

전자기학 마스터 레퍼런스

Maxwell 이론에서 연구 수준 전기역학까지
수식 중심 한국어 PDF

OpenAI ChatGPT, 공개 강의자료 기반 원본 정리

2026 년 7 월 7 일

이 문서의 범위와 사용법

이 PDF 는 전자공학/물리학 전공자가 전자기학을 한 번에 조망할 수 있도록 만든 **수식 중심 연구 레퍼런스**이다. 목표는 “모든 것을 완벽히 대체하는 교재” 가 아니라, 학부 전자기학에서 대학원 고전전기역학, 안테나, 도파관, 계산전자기학, 플라즈마, 상대론적 전기역학, 광자/양자 접점까지 이어지는 큰 구조를 한 문서 안에 압축하는 것이다.

원문을 장황하게 베끼지 않고, 공개 강의자료와 표준 교재에서 공통적으로 쓰이는 핵심 이론을 한국어로 재구성했다. 주요 공개 참고자료는 MIT OCW 8.07 *Electromagnetism II*, MIT OCW 6.013 *Electromagnetics and Applications*, David Tong 의 Cambridge 전자기학 강의노트, Caltech 의 Feynman Lectures Vol. II 온라인판, OpenStax University Physics Vol. 2, CODATA/NIST 상수값이다. 상세 URL 은 부록의 참고자료에 모았다.

핵심. 읽는 순서: (1) Maxwell 방정식 네 줄을 암기하지 말고 각 항의 차원을 먼저 확인한다. (2) 정전기와 정자기는 Green 함수와 경계조건 문제로 이해한다. (3) 시간 변화가 들어오면 에너지-운동량 보존과 파동/지연 퍼텐셜을 중심축으로 삼는다. (4) 연구 수준에서는 대칭성, 게이지, 분산, 수치 안정성, 역문제 관점으로 다시 읽는다.

자가 점검. 각 장 마지막의 질문은 답을 바로 보려고 넣은 것이 아니다. 자신이 한 줄로 설명할 수 있는지 확인하는 체크포인트다. 특히 전자공학 전공자는 회로, 전송선, 안테나, 광파동, 반도체/플라즈마 응용과 연결해서 읽으면 좋다.

Contents

I 기초 구조: 장, 소스, 대칭성	1
1 전자기학의 기본 언어	2
1.1 장 (field) 의 관점	2
1.2 국소성과 인과성	2
1.3 스케일과 근사	2
2 벡터해석과 분포	3
2.1 연산자와 정리	3
2.2 자주 쓰는 항등식	3
2.3 Dirac 델타와 Green 함수	3
3 단위계, 차원, 상수	5
3.1 SI 단위계의 핵심	5
3.2 주요 상수와 유도량	5
3.3 Gaussian 단위와 Heaviside–Lorentz 단위	5
II Maxwell 방정식의 여러 얼굴	6
4 Maxwell 방정식	7
4.1 미분형과 적분형	7
4.2 구성방정식	7
4.3 경계조건	7
4.4 전하보존의 유도	8
5 퍼텐셜, 게이지, 파동방정식	9
5.1 스칼라/벡터 퍼텐셜	9
5.2 Coulomb 게이지와 Lorenz 게이지	9
5.3 자유공간 파동방정식	9
6 보존법칙: 에너지, 운동량, 각운동량	11
6.1 Poynting 정리	11
6.2 응력 텐서와 운동량	11
6.3 각운동량과 숨은 운동량	12

III 정전기와 경계값 문제	13
7 정전기	14
7.1 Coulomb 법칙과 중첩	14
7.2 전기쌍극자와 다중극 전개	14
7.3 정전기 에너지	15
7.4 도체의 성질	15
8 경계값 문제와 Green 함수	16
8.1 유일성 정리	16
8.2 Green 의 항등식	16
8.3 영상법	16
8.4 분리해와 직교함수	17
8.5 conformal mapping 의 2 차원 정전기	17
9 유전체와 분극	18
9.1 결합전하	18
9.2 경계와 에너지	18
9.3 국소장과 Clausius–Mossotti	18
9.4 분산과 Kramers–Kronig	18
IV 정자기와 준정적 전자기학	20
10 정자기	21
10.1 Biot–Savart 와 Ampere 법칙	21
10.2 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지	21
10.3 자기쌍극자	21
10.4 자기 에너지와 인덕턴스	22
11 자성체와 자화	23
11.1 결합전류	23
11.2 반자성, 상자성, 강자성	23
11.3 자기 회로의 한계	23
12 준정적 근사, 유도, 회로 연결	24
12.1 Faraday 유도	24
12.2 저항과 전하완화	24
12.3 피부효과	24
12.4 준정적 영역의 구분	25
V 파동, 매질, 경계	26
13 평면파와 편파	27
13.1 phasor 표기	27
13.2 균일 평면파	27
13.3 편파	27

13.4	군속도와 에너지 속도	28
14	경계면, Fresnel 계수, 광학	29
14.1	입사, 반사, 굴절	29
14.2	s 편파와 p 편파 Fresnel 계수	29
14.3	전반사와 evanescent wave	29
14.4	다층막 전송행렬	29
15	분산, 손실, 비등방 매질	31
15.1	Drude 모델	31
15.2	Lorentz oscillator	31
15.3	비등방 결정	31
15.4	Tellegen 와 bianisotropic 매질	32
VI	전송선, 도파관, 공진기	33
16	전송선 이론	34
16.1	telegrapher 방정식	34
16.2	반사와 정재파	34
16.3	Smith chart 의 수식적 핵심	35
17	도파관과 공동공진기	36
17.1	모드 분해	36
17.2	직사각형 도파관	36
17.3	원형 도파관	36
17.4	공동공진기와 Q	36
17.5	S-파라미터	37
18	안테나와 개구	38
18.1	짧은 전기쌍극자	38
18.2	반파장 다이폴	38
18.3	Friis 전송식	38
18.4	개구 안테나와 Fourier optics	39
VII	소스, 복사, 산란	40
19	지연 퍼텐셜과 Lienard–Wiechert 장	41
19.1	retarded Green 함수	41
19.2	점전하의 Lienard–Wiechert 퍼텐셜	41
19.3	속도장과 가속도장	41
19.4	Larmor 와 Lienard 공식	42
20	다중극 복사와 산란	43
20.1	전기쌍극자 복사	43
20.2	자기쌍극자와 전기 사중극자	43
20.3	Rayleigh 산란	43

20.4 optical theorem	44
20.5 Mie 산란의 구조	44
21 복사 반작용과 자기력 문제	45
21.1 Abraham–Lorentz 힘	45
21.2 Landau–Lifshitz 근사	45
21.3 자기 에너지의 발산	45
VIII 상대론적 전자기학과 작용원리	46
22 특수상대론과 전자기장	47
22.1 4-벡터 표기	47
22.2 전자기장 텐서	47
22.3 공변 Maxwell 방정식	47
22.4 Lorentz 변환에서 장의 변화	47
22.5 불변량	48
23 작용, 게이지 대칭, Noether 정리	49
23.1 장과 입자의 작용	49
23.2 게이지 대칭	49
23.3 에너지-운동량 텐서	49
23.4 미분형식 표기	49
IX 고급 수학 도구와 계산전자기학	51
24 고급 해석기법	52
24.1 Fourier 해석	52
24.2 Helmholtz 분해	52
24.3 dyadic Green 함수	52
24.4 reciprocity	52
24.5 변분원리	53
25 계산전자기학	54
25.1 FDTD: Yee 격자	54
25.2 수치분산	54
25.3 FEM	54
25.4 MoM 과 적분방정식	54
25.5 PML	55
25.6 검증과 수렴	55
X 플라즈마, 포토닉스, 양자 접점	56
26 플라즈마 전자기학	57
26.1 기본 파라미터	57
26.2 cold plasma dielectric	57

26.3 Vlasov–Maxwell	57
26.4 MHD	58
27 메타물질, 포토닉 결정, 위상 전자기파	59
27.1 유효매질과 음의 굴절률	59
27.2 metasurface 경계조건	59
27.3 포토닉 결정	59
27.4 Berry curvature 와 위상 광자	59
28 양자역학과 전자기장의 접점	60
28.1 minimal coupling	60
28.2 Aharonov–Bohm 위상	60
28.3 전자기장 양자화의 핵심	60
28.4 spontaneous emission 과 Purcell 효과	60
XI 연구 문제를 푸는 방법	62
29 전자기 문제 해결 알고리즘	63
29.1 문제 유형 판별	63
29.2 차원분석	63
29.3 대칭성 사용	63
29.4 경계조건 우선 원칙	63
29.5 오답을 잡는 10 가지 테스트	64
XII 부록: 수식 아틀라스와 학습 체크리스트	65
30 핵심 수식 아틀라스	66
F001. Maxwell-SI	66
F002. Lorentz 힘	66
F003. 연속방정식	66
F004. Coulomb 법칙	66
F005. Gauss 법칙 응용	66
F006. Poisson/Laplace	67
F007. 정전기 에너지	67
F008. 축전기	67
F009. 쌍극자	67
F010. 경계조건	67
F011. 분극 전하	67
F012. 자화 전류	68
F013. Biot-Savart	68
F014. Ampere	68
F015. 자기쌍극자	68
F016. 인덕턴스	68
F017. Faraday	68
F018. 변위전류	69

F019. Poynting	69
F020. 응력텐서	69
F021. 퍼텐셜	69
F022. Lorenz 게이지	69
F023. 지연 퍼텐셜	69
F024. 파동방정식	69
F025. 평면파	70
F026. phasor Maxwell	70
F027. 복소 유전율	70
F028. 파동 임피던스	70
F029. Fresnel-s	70
F030. Fresnel-p	70
F031. Snell	70
F032. 전반사	71
F033. Drude	71
F034. Lorentz oscillator	71
F035. Kramers-Kronig	71
F036. skin depth	71
F037. 전송선	71
F038. 전송선 상수	72
F039. 반사계수	72
F040. 입력 임피던스	72
F041. 도파관 분산	72
F042. 직사각형 도파관	72
F043. 공진기 Q	72
F044. S 파라미터	73
F045. Hertzian dipole	73
F046. Friis	73
F047. 개구 이득	73
F048. Larmor	73
F049. 전기쌍극자 복사	73
F050. Rayleigh	73
F051. optical theorem	74
F052. Lienard-Wiechert	74
F053. 상대론 불변량	74
F054. 공변 Maxwell	74
F055. 게이지 작용	74
F056. Helmholtz 분해	74
F057. dyadic Green	75
F058. reciprocity	75
F059. FDTD	75
F060. Courant	75
F061. FEM weak form	75
F062. PML	75

F063. 플라즈마 주파수	76
F064. cold plasma	76
F065. Vlasov	76
F066. MHD induction	76
F067. Bloch EM	76
F068. Berry curvature	76
F069. minimal coupling	77
F070. Aharonov-Bohm	77
F071. Purcell	77
F072. LDOS	77
31 좌표계별 유용한 공식	78
31.1 직교 곡선좌표	78
31.2 원통좌표	78
31.3 구면좌표	78
32 특수함수와 모드 전개	79
32.1 Legendre 다항식	79
32.2 구면조화함수	79
32.3 Bessel 함수	79
32.4 벡터 구면조화함수	79
33 난이도별 연습문제: 답 대신 힌트	80
33.1 기초	80
33.2 중급	80
33.3 고급	80
33.4 연구형	80
34 대표 유도 25 선	81
34.1 1. Gauss 법칙에서 Coulomb 장	81
34.2 2. Coulomb 퍼텐셜에서 Poisson 방정식	81
34.3 3. 유일성 정리	81
34.4 4. 영상법의 논리	81
34.5 5. 다중극 전개	82
34.6 6. 경계조건 유도	82
34.7 7. Biot-Savart 식	82
34.8 8. 자기 에너지	82
34.9 9. Poynting 정리	83
34.1010. 진공 파동방정식	83
34.1111. 평면파의 횡파성	83
34.1212. Fresnel 계수	83
34.1313. Brewster 각	83
34.1414. 피부깊이	84
34.1515. 전송선 방정식	84
34.1616. 도파관 차단	84
34.1717. 짧은 쌍극자 복사	84

34.1818. Larmor 공식의 스케일	84
34.1919. Lorentz 변환으로 자기장 보기	85
34.2020. 공변 Maxwell 방정식	85
34.2121. Lorentz reciprocity	85
34.2222. FDTD Courant 조건의 의미	85
34.2323. 플라즈마 진동	85
34.2424. Bloch 정리	86
34.2525. Purcell 효과의 고전적 해석	86
35 연구 주제 지도	87
35.1 전통적 연구축	87
35.2 논문을 읽을 때 표시할 것	87
35.3 대학원 수준으로 올라가는 추천 순서	87
36 참고자료와 더 깊은 공부	89
36.1 공개 자료	89
36.2 표준 고급 교재	89
36.3 학습 루틴	89

Part I

기초 구조: 장, 소스, 대칭성

1. 전자기학의 기본 언어

1.1 장 (field) 의 관점

전자기학은 입자 사이의 힘을 원거리 작용으로만 보지 않고, 공간과 시간에 정의된 장 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 가 에너지와 운동량을 운반한다고 본다. 전하와 전류는 장의 소스이며, 장은 다시 전하에 힘을 준다. 가장 압축된 출발점은 Lorentz 힘과 Maxwell 방정식이다.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (1.3)$$

여기서 ρ 는 전하밀도, $\mathbf{J}$ 는 전류밀도, ϵ_0 와 μ_0 는 진공 유전율과 투자율이다. 이 네 식은 전하보존을 자동으로 요구한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (1.4)$$

1.2 국소성과 인과성

Maxwell 방정식은 미분방정식이므로 국소적 (local) 이다. 그러나 해는 Green 함수로 적분형태로 쓸 수 있고, 시간 의존 문제에서는 지연시간 $t_R = t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c$ 가 등장한다. 따라서 전자기 상호작용은 광속 c 보다 빠르게 전달되지 않는다.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \mu_0 c. \quad (1.5)$$

1.3 스케일과 근사

전자기 문제는 길이 L , 파장 λ , 시간척도 T , 물질 응답시간 τ 의 비교로 분류된다.

$$kL \ll 1 : \text{정전기/정자기/준정적 근사}, \quad (1.6)$$

$$kL \sim 1 : \text{파동, 공진, 복사}, \quad (1.7)$$

$$\omega\tau \ll 1 : \text{순간적 물질 응답 근사}, \quad (1.8)$$

$$\omega\tau \gtrsim 1 : \text{분산과 손실이 본질적}. \quad (1.9)$$

자가 점검. 회로 이론이 잘 맞는 조건을 한 문장으로 말해보라. 힌트: 부품 크기와 신호 파장의 비율을 생각하면 된다.

2. 벡터해석과 분포

2.1 연산자와 정리

전자기학의 대부분은 세 연산자 ∇ , $\nabla \cdot$, $\nabla \times$ 와 두 적분정리로 쓰인다.

$$\nabla f = \hat{\mathbf{e}}_i \partial_i f, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i, \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \epsilon_{ijk} \hat{\mathbf{e}}_i \partial_j A_k. \quad (2.3)$$

Gauss 정리와 Stokes 정리는 미분형과 적분형 Maxwell 방정식 사이의 다리다.

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} \, dV = \oint_{\partial V} \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, da, \quad (2.4)$$

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \hat{\mathbf{n}} \, da = \oint_{\partial S} \mathbf{A} \cdot d\boldsymbol{\ell}. \quad (2.5)$$

2.2 자주 쓰는 항등식

$$\nabla \times (\nabla f) = 0, \quad \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0, \quad (2.6)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}, \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot (f\mathbf{A}) = (\nabla f) \cdot \mathbf{A} + f \nabla \cdot \mathbf{A}, \quad (2.8)$$

$$\nabla \times (f\mathbf{A}) = (\nabla f) \times \mathbf{A} + f \nabla \times \mathbf{A}, \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}), \quad (2.10)$$

$$\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{A} - (\mathbf{A} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \mathbf{A}(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{A}). \quad (2.11)$$

2.3 Dirac 델타와 Green 함수

점전하와 점전류를 다루려면 분포가 필요하다.

$$\int f(\mathbf{r}') \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \, d^3 r' = f(\mathbf{r}), \quad (2.12)$$

$$\delta(g(x)) = \sum_i \frac{\delta(x - x_i)}{|g'(x_i)|}. \quad (2.13)$$

3 차원 Poisson Green 함수는

$$\nabla^2 \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = -4\pi \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \quad (2.14)$$

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (2.15)$$

Helmholtz Green 함수는 방사조건에 따라

$$(\nabla^2 + k^2)G_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \quad (2.16)$$

$$G_k^{(+)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (2.17)$$

연구자 관점. Green 함수는 단순 계산 도구가 아니라 경계조건과 인과성을 한 번에 포장하는 객체다. 수치전자기학의 MoM, 경계요소법, 산란이론, dyadic Green 함수가 모두 이 관점에서 출발한다.

3. 단위계, 차원, 상수

3.1 SI 단위계의 핵심

현대 SI 에서 c, e, h 등은 정의값이고, ε_0, μ_0 는 미세구조상수 α 와 연결되어 실험값의 불확도를 갖는다. 전자기학 계산에서는 차원을 항상 같이 추적해야 한다.

양	SI 단위	대표 관계
전하 q	C	$\rho [\text{C/m}^3], \mathbf{J} [\text{A/m}^2]$
전기장 $\mathbf{E}$	V/m 또는 N/C	$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$
자기장 $\mathbf{B}$	T	$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
전속밀도 $\mathbf{D}$	C/m ²	$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}$
자계 $\mathbf{H}$	A/m	$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$
전위 ϕ	V	$\mathbf{E} = -\nabla\phi$
벡터퍼텐셜 $\mathbf{A}$	Wb/m	$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

3.2 주요 상수와 유도량

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (\text{정의값}), \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_0 \approx 8.8541878188 \times 10^{-12} \text{ F/m}, \quad (3.2)$$

$$\mu_0 \approx 1.25663706127 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2, \quad (3.3)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 376.730313 \, \Omega, \quad (3.4)$$

$$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{정의값}), \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137.036}. \quad (3.6)$$

3.3 Gaussian 단위와 Heaviside–Lorentz 단위

문헌을 읽을 때 단위계 변환은 매우 중요하다. Gaussian cgs 에서는 4π 와 c 가 다른 위치에 나타난다.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (3.8)$$

Heaviside–Lorentz 단위에서는 4π 가 흡수되어 상대론적 표기가 간단해진다.

자가 점검. 어떤 논문에서 Coulomb 법칙이 $F = q_1q_2/r^2$ 로 쓰였으면 SI 가 아니다. 이때 Maxwell 방정식에서 4π 와 c 가 어디로 갔는지 확인하라.

Part II

Maxwell 방정식의 여러 얼굴

4. Maxwell 방정식

4.1 미분형과 적분형

진공에서 Maxwell 방정식은 다음 네 줄이다.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \oint_{\partial V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\varepsilon_0}, \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \oint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0, \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}, \quad (4.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad \oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 I_{\text{enc}} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a}. \quad (4.4)$$

물질 속에서는 자유 전하와 자유 전류를 분리하여

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (4.6)$$

4.2 구성방정식

Maxwell 방정식만으로는 물질 내 문제가 닫히지 않는다. 구성방정식이 필요하다.

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{P}(\mathbf{r}, t), \quad (4.7)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0 [\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{M}(\mathbf{r}, t)]. \quad (4.8)$$

선형, 등방, 시간불변 매질의 주파수 영역에서는

$$\mathbf{D}(\omega) = \varepsilon(\omega) \mathbf{E}(\omega), \quad \mathbf{B}(\omega) = \mu(\omega) \mathbf{H}(\omega), \quad \mathbf{J}(\omega) = \sigma(\omega) \mathbf{E}(\omega). \quad (4.9)$$

비등방 매질에서는 스칼라가 텐서가 된다.

$$D_i = \varepsilon_{ij} E_j, \quad B_i = \mu_{ij} H_j, \quad J_i = \sigma_{ij} E_j. \quad (4.10)$$

4.3 경계조건

표면 법선 $\hat{\mathbf{n}}$ 이 1 번 매질에서 2 번 매질로 향한다고 하자. 표면 자유전하 σ_f , 표면 자유전류 $\mathbf{K}_f$ 가 있으면

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma_f, \quad (4.11)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \quad (4.12)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = \mathbf{0}, \quad (4.13)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}_f. \quad (4.14)$$

완전도체 표면에서는 내부 $\mathbf{E} = 0$, $\mathbf{B} = 0$ 인 정전/정상상태 근사하에

$$\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{\text{out}} = 0, \quad \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{B}_{\text{out}} = 0, \quad \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{D}_{\text{out}} = \sigma_f, \quad \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{\text{out}} = \mathbf{K}_f. \quad (4.15)$$

4.4 전하보존의 유도

Ampere–Maxwell 법칙에 발산을 취하면

$$0 = \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \mu_0 \nabla \cdot \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{E}) = \mu_0 \left(\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right). \quad (4.16)$$

즉, 변위전류항은 단순한 보정이 아니라 국소적 전하보존과 이론의 자기일관성을 위해 필요하다.

자가 점검. 축전기 충전 문제에서 도선 사이의 빈 공간을 관통하는 폐곡선에 Ampere 법칙을 적용하면 왜 모순이 생기는지 설명해보라.

5. 퍼텐셜, 게이지, 파동방정식

5.1 스칼라/벡터 퍼텐셜

$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 이므로 항상 국소적으로 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 라 쓸 수 있다. Faraday 법칙은

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5.1)$$

이므로

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (5.2)$$

퍼텐셜은 유일하지 않다. 임의의 스칼라 함수 χ 에 대해

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla\chi, \quad (5.3)$$

$$\phi' = \phi - \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (5.4)$$

이면 $\mathbf{E}, \mathbf{B}$ 는 변하지 않는다.

5.2 Coulomb 게이지와 Lorenz 게이지

Coulomb 게이지는 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ 이다.

$$\nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon_0, \quad (5.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{J}_T. \quad (5.6)$$

여기서 $\mathbf{J}_T$ 는 횡 (transverse) 전류다. Lorenz 게이지는

$$\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (5.7)$$

이며, 퍼텐셜들이 같은 형태의 파동방정식을 만족한다.

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (5.8)$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}. \quad (5.9)$$

5.3 자유공간 파동방정식

진공과 소스 없는 영역에서

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (5.10)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (5.11)$$

평면파 해 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ 를 넣으면

$$\omega = ck, \quad \mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_0 = 0, \quad \mathbf{B}_0 = \frac{1}{\omega} \mathbf{k} \times \mathbf{E}_0. \quad (5.12)$$

연구자 관점. 게이지는 물리량이 아니라 기술 방식의 자유도다. 그러나 양자론, 위상효과, 경계가 있는 공간, 수치해석에서는 게이지 선택이 계산 안정성 및 물리 해석에 큰 영향을 준다.

6. 보존법칙: 에너지, 운동량, 각운동량

6.1 Poynting 정리

Maxwell 방정식에서 에너지 보존을 얻는다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad (6.1)$$

진공에서

$$u = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right), \quad (6.2)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}. \quad (6.3)$$

선형 비분산 매질에서는 보통

$$u = \frac{1}{2} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}), \quad \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (6.4)$$

분산 매질의 시간평균 에너지밀도는 손실이 작을 때

$$\langle u \rangle = \frac{1}{4} \left[\frac{\partial(\omega\epsilon)}{\partial\omega} |\mathbf{E}_0|^2 + \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} |\mathbf{H}_0|^2 \right]. \quad (6.5)$$

6.2 응력 텐서와 운동량

진공 Maxwell 응력 텐서는

$$T_{ij} = \epsilon_0 \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right). \quad (6.6)$$

운동량 밀도는

$$\mathbf{g} = \epsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{S}}{c^2}. \quad (6.7)$$

국소 운동량 보존식은

$$\frac{\partial g_i}{\partial t} + \partial_j T_{ij} = -f_i, \quad (6.8)$$

여기서 $\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 는 물질이 받는 Lorentz 힘밀도다.

6.3 각운동량과 숨은 운동량

전자기 각운동량 밀도는

$$\ell = \mathbf{r} \times \mathbf{g} = \varepsilon_0 \mathbf{r} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{B}). \quad (6.9)$$

정전하와 자기쌍극자가 같이 있을 때 장 운동량과 기계적 숨은 운동량 (hidden momentum) 이 서로 보상하는 예가 있다.

$$\mathbf{p}_{\text{hidden}} = \frac{1}{c^2} \mathbf{m} \times \mathbf{E}. \quad (6.10)$$

자가 점검. 전송선에서 에너지는 도선 내부가 아니라 주로 도선 사이의 전자기장으로 흐른다는 말을 Poynting 벡터로 설명해보라.

Part III

정전기와 경계값 문제

7. 정전기

7.1 Coulomb 법칙과 중첩

점전하 q 의 전기장과 전위는

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q(\mathbf{r} - \mathbf{r}_q)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_q|^3}, \quad (7.1)$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_q|}. \quad (7.2)$$

연속 전하분포에 대해

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r', \quad (7.3)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3r'. \quad (7.4)$$

정전기에서는 $\nabla \times \mathbf{E} = 0$, $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ 이고

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Poisson}), \quad \nabla^2\phi = 0 \quad (\text{Laplace}). \quad (7.5)$$

7.2 전기쌍극자와 다중극 전개

총 전하가 국소화되어 있고 관측점이 충분히 멀면

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \frac{1}{r} + \frac{\mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2} + \frac{1}{2} \frac{3(\mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}})^2 - r'^2}{r^3} + \cdots. \quad (7.6)$$

따라서

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{Q}{r} + \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2} + \frac{1}{2r^3} \sum_{ij} Q_{ij} \hat{r}_i \hat{r}_j + \cdots \right], \quad (7.7)$$

$$Q = \int \rho d^3r, \quad \mathbf{p} = \int \rho \mathbf{r}' d^3r', \quad (7.8)$$

$$Q_{ij} = \int \rho(\mathbf{r}') (3x'_i x'_j - r'^2 \delta_{ij}) d^3r'. \quad (7.9)$$

점쌍극자 $\mathbf{p}$ 의 장은

$$\phi_{\text{dip}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2}, \quad (7.10)$$

$$\mathbf{E}_{\text{dip}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3\hat{\mathbf{r}}(\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{p}}{r^3}. \quad (7.11)$$

7.3 정전기 에너지

전하분포의 에너지는

$$U = \frac{1}{2} \int \rho \phi \, d^3r = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 \, d^3r. \quad (7.12)$$

도체 전극에서 Q_i , V_i 가 주어지면

$$U = \frac{1}{2} \sum_i Q_i V_i = \frac{1}{2} \sum_{ij} C_{ij} V_i V_j. \quad (7.13)$$

7.4 도체의 성질

정전평형 도체 내부는 $\mathbf{E} = 0$, 도체 전체는 등전위다. 표면 바로 밖에서

$$E_{\perp} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad E_{\parallel} = 0. \quad (7.14)$$

표면 전하가 받는 압력은

$$P = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}. \quad (7.15)$$

자가 점검. 속이 빈 도체 껍질 내부 공동에 전하가 없을 때 왜 내부 전기장이 0 인지 유일성 정리 관점에서 말해보라.

8. 경계값 문제와 Green 함수

8.1 유일성 정리

영역 V 에서 $\nabla^2 \phi = -\rho/\varepsilon_0$ 이고 경계 ∂V 에서 Dirichlet 조건 ϕ 또는 Neumann 조건 $\partial_n \phi$ 가 주어지면 해는 적절한 상수 자유도를 제외하고 유일하다. 증명은 두 해의 차 ψ 에 대해

$$\int_V |\nabla \psi|^2 dV = \oint_{\partial V} \psi \partial_n \psi da - \int_V \psi \nabla^2 \psi dV \quad (8.1)$$

를 쓰면 된다.

8.2 Green 의 항등식

$$\int_V (\phi \nabla^2 \psi - \psi \nabla^2 \phi) dV = \oint_{\partial V} (\phi \partial_n \psi - \psi \partial_n \phi) da. \quad (8.2)$$

Dirichlet Green 함수 G_D 가

$$\nabla^2 G_D(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \quad G_D|_{\partial V} = 0 \quad (8.3)$$

을 만족하면

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V G_D(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \rho(\mathbf{r}') d^3 r' - \oint_{\partial V} \phi(\mathbf{r}') \partial_{n'} G_D(\mathbf{r}, \mathbf{r}') da'. \quad (8.4)$$

8.3 영상법

접지된 무한 도체평면 $z = 0$ 위 $z = a$ 에 점전하 q 가 있으면 영상전하 $-q$ 를 $z = -a$ 에 둔다.

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left[\frac{q}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - a)^2}} - \frac{q}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z + a)^2}} \right]. \quad (8.5)$$

유도 표면전하밀도는

$$\sigma(x, y) = -\varepsilon_0 \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0^+} = -\frac{qa}{2\pi(x^2 + y^2 + a^2)^{3/2}}. \quad (8.6)$$

힘은 실제 전하와 영상전하 사이의 Coulomb 힘의 절반이 아니라, 실제 전하가 영상전하가 만든 장에서 받는 힘이다.

$$F_z = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{(2a)^2} = -\frac{q^2}{16\pi\varepsilon_0 a^2}. \quad (8.7)$$

8.4 분리해와 직교함수

구면 좌표에서 축대칭 Laplace 방정식의 일반해는

$$\phi(r, \theta) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \left(A_{\ell} r^{\ell} + \frac{B_{\ell}}{r^{\ell+1}} \right) P_{\ell}(\cos \theta). \quad (8.8)$$

원통 좌표에서는

$$\phi(\rho, \varphi, z) = R(\rho)\Phi(\varphi)Z(z), \quad (8.9)$$

이며 R 은 Bessel 함수로 표현되는 경우가 많다.

$$\rho^2 R'' + \rho R' + (k^2 \rho^2 - m^2)R = 0. \quad (8.10)$$

8.5 conformal mapping 의 2 차원 정전기

2 차원에서 $w = \phi + i\psi$ 가 해석함수이면 ϕ 와 ψ 는 각각 조화함수다.

$$E_x - iE_y = -\frac{dw}{dz}. \quad (8.11)$$

복소해석은 썬기, 평판, 원통 근처 정전기 문제를 간결하게 푼다.

자가 점검. 영상법이 작동하려면 무엇이 같아야 하는가? 힌트: 실제 영역 안의 소스와 경계조건을 비교하라.

9. 유전체와 분극

9.1 결합전하

분극 $\mathbf{P}$ 는 미시적 전기쌍극자 모멘트 밀도다.

$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P}, \quad \sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}. \quad (9.1)$$

총 전하밀도는 $\rho = \rho_f + \rho_b$ 이고

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f. \quad (9.2)$$

선형 유전체에서는

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E}. \quad (9.3)$$

9.2 경계와 에너지

자유 표면전하가 없으면

$$D_{2\perp} = D_{1\perp}, \quad E_{2\parallel} = E_{1\parallel}. \quad (9.4)$$

유전체에 저장된 에너지는 선형 비분산 매질에서

$$U = \frac{1}{2} \int \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} \, d^3r. \quad (9.5)$$

전압원을 붙인 채 유전체를 끌어들이는 문제에서는 전기장 에너지뿐 아니라 전원 공급 에너지를 함께 따져야 한다.

9.3 국소장과 Clausius–Mossotti

희박한 매질에서 분자 분극률 α_m 와 유전율은

$$\mathbf{p} = \alpha_m \mathbf{E}_{\text{loc}}, \quad \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N \alpha_m}{3 \varepsilon_0}. \quad (9.6)$$

여기서 N 은 분자 수밀도다. 이 식은 구멍장/Lorentz local field 근사에 기초한다.

9.4 분산과 Kramers–Kronig

인과적인 선형 응답은 convolution 으로 쓰인다.

$$D_i(t) = \varepsilon_0 E_i(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \chi_{ij}(t - t') E_j(t') \, dt'. \quad (9.7)$$

주파수 영역의 susceptibility 는 해석성을 가지므로 실수부와 허수부가 Hilbert 변환으로 연결된다.

$$\Re\chi(\omega) = \frac{2}{\pi} \mathcal{P} \int_0^\infty \frac{\omega' \Im\chi(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad (9.8)$$

$$\Im\chi(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \mathcal{P} \int_0^\infty \frac{\Re\chi(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'. \quad (9.9)$$

연구자 관점. 물질상수는 단순 숫자가 아니다. 실제 연구에서는 $\varepsilon(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{E}, T)$, 비국소성, 비선형성, 시간변조, 손실과 잡음까지 고려해야 한다.

Part IV

정자기와 준정적 전자기학

10. 정자기

10.1 Biot-Savart 와 Ampere 법칙

정상전류 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ 가 만드는 자기장은

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3r'. \quad (10.1)$$

선전류 I 에 대해서는

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\ell' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}. \quad (10.2)$$

Ampere 법칙은

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}, \quad \oint \mathbf{B} \cdot d\ell = \mu_0 I_{\text{enc}}. \quad (10.3)$$

무한 직선전류는

$$B_\varphi(\rho) = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho}. \quad (10.4)$$

10.2 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (\nabla \cdot \mathbf{A} = 0). \quad (10.5)$$

따라서

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r'. \quad (10.6)$$

10.3 자기쌍극자

작은 전류루프의 자기쌍극자 모멘트는

$$\mathbf{m} = I\mathbf{a}, \quad (10.7)$$

여기서 $\mathbf{a}$ 는 면적벡터다. 먼 거리에서

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}, \quad (10.8)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3\hat{\mathbf{r}}(\mathbf{m} \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{m}] + \frac{2\mu_0}{3} \mathbf{m} \delta^{(3)}(\mathbf{r}). \quad (10.9)$$

토크와 에너지는

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}, \quad U = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}. \quad (10.10)$$

10.4 자기 에너지와 인덕턴스

정상전류의 자기 에너지는

$$U = \frac{1}{2} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} \, d^3r = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 \, d^3r. \quad (10.11)$$

회로 표현에서는

$$\Phi_i = \sum_j L_{ij} I_j, \quad U = \frac{1}{2} \sum_{ij} L_{ij} I_i I_j. \quad (10.12)$$

자가 점검. 전기쌍극자와 자기쌍극자의 먼장 공식이 닮았지만, 자기쌍극자에는 왜 델타 함수 항을 조심해야 하는지 생각해보라.

11. 자성체와 자화

11.1 결합전류

자화 $\mathbf{M}$ 은 미시적 전류루프 모멘트 밀도다. 결합전류는

$$\mathbf{J}_b = \nabla \times \mathbf{M}, \quad \mathbf{K}_b = \mathbf{M} \times \hat{\mathbf{n}}. \quad (11.1)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f. \quad (11.2)$$

선형 자성체에서

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0(1 + \chi_m) \mathbf{H}. \quad (11.3)$$

11.2 반자성, 상자성, 강자성

물질 자성은 양자역학에 뿌리를 둔다. 고전 전자기학에서는 현상론적으로 μ , hysteresis, 손실을 쓴다.

$$\mu = \mu' - i\mu'', \quad P_{\text{loss}} = \frac{\omega}{2} \mu'' |\mathbf{H}_0|^2. \quad (11.4)$$

강자성체에서는 비선형 관계 $\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{H})$ 가 나타나며, 작은 신호에서는 미분투자율

$$\mu_{\text{diff}} = \frac{dB}{dH} \quad (11.5)$$

을 쓴다.

11.3 자기 회로의 한계

자기회로 근사에서는

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \quad \mathcal{F} = NI, \quad \mathcal{R} = \int \frac{d\ell}{\mu A}. \quad (11.6)$$

그러나 누설자속, 포화, fringing, 비선형 히스테리시스가 크면 full-field 해석이 필요하다.

자가 점검. 전기 회로의 저항 R 와 자기 회로의 reluctance $\mathcal{R}$ 의 유사점과 결정적 차이를 하나씩 말해보라.

12. 준정적 근사, 유도, 회로 연결

12.1 Faraday 유도

회로 $C(t)$ 가 움직일 수 있을 때 일반화된 기전력은

$$\mathcal{E} = \oint_{C(t)} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\boldsymbol{\ell}. \quad (12.1)$$

자속 $\Phi_B = \int_{S(t)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}$ 에 대해

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (12.2)$$

이 식은 transformer emf 와 motional emf 를 모두 포함한다.

12.2 저항과 전하완화

Ohm 법칙은 국소적으로

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (12.3)$$

균일 도체 내부의 자유전하 완화는

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\sigma}{\epsilon} \rho = 0, \quad \tau_c = \frac{\epsilon}{\sigma}. \quad (12.4)$$

좋은 도체에서는 τ_c 가 매우 작아 내부 전하밀도는 빠르게 사라지고 표면전하가 전류분포를 조정한다.

12.3 피부효과

도체에서 조화시간 $e^{-i\omega t}$ 을 쓰면

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma \mathbf{E} \quad (12.5)$$

(좋은 도체, 변위전류 무시). 피부깊이는

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}. \quad (12.6)$$

표면임피던스는

$$Z_s = (1 + i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}. \quad (12.7)$$

12.4 준정적 영역의 구분

전기준정적 (EQS) 근사는 $\nabla \times \mathbf{E} \approx 0$ 이고 전하/전위가 중심이다. 자기준정적 (MQS) 근사는 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, 변위전류가 전도전류보다 작다는 조건에서 유효하다.

$$\frac{|\varepsilon \partial_t \mathbf{E}|}{|\sigma \mathbf{E}|} \sim \frac{\omega \varepsilon}{\sigma}. \quad (12.8)$$

자가 점검. 저주파 회로라도 긴 전선에서는 왜 파동효과가 생길 수 있는가? 힌트: 주파수 하나만 보지 말고 길이와 파장을 비교하라.

Part V

파동, 매질, 경계

13. 평면파와 편파

13.1 phasor 표기

시간 의존성을 $e^{-i\omega t}$ 로 두면

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \Re\{\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}\}. \quad (13.1)$$

Maxwell 방정식은

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{D}} = \tilde{\rho}_f, \quad \nabla \cdot \tilde{\mathbf{B}} = 0, \quad (13.2)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = i\omega \tilde{\mathbf{B}}, \quad \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{J}}_f - i\omega \tilde{\mathbf{D}}. \quad (13.3)$$

손실 도체를 유전율에 흡수하면

$$\varepsilon_c = \varepsilon + \frac{i\sigma}{\omega} \quad (13.4)$$

이다. 표기 $e^{+i\omega t}$ 를 쓰는 문헌에서는 부호가 반대가 된다.

13.2 균일 평면파

등방 균질 매질에서

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mu \mathbf{H}_0, \quad (13.5)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = -\omega \varepsilon \mathbf{E}_0, \quad (13.6)$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon, \quad \eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}. \quad (13.7)$$

$$\mathbf{H}_0 = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{E}_0, \quad \langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} \Re(\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0^*). \quad (13.8)$$

13.3 편파

전파방향을 z 로 두고

$$\mathbf{E}(z, t) = \Re\{(\hat{\mathbf{x}}E_x + \hat{\mathbf{y}}E_y)e^{ikz-i\omega t}\}. \quad (13.9)$$

Jones 벡터는

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \quad (13.10)$$

Stokes 파라미터는

$$S_0 = |E_x|^2 + |E_y|^2, \quad (13.11)$$

$$S_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2, \quad (13.12)$$

$$S_2 = 2\Re(E_x E_y^*), \quad (13.13)$$

$$S_3 = 2\Im(E_x E_y^*). \quad (13.14)$$

13.4 군속도와 에너지 속도

분산 관계 $\omega(k)$ 에서

$$v_p = \frac{\omega}{k}, \quad v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}. \quad (13.15)$$

손실이 작고 잘 정의된 모드에서는 에너지 속도

$$v_E = \frac{\int \langle S_z \rangle dA}{\int \langle u \rangle dA} \quad (13.16)$$

가 군속도와 일치하는 경우가 많다.

자가 점검. 진공 평면파에서 $E/B = c$ 와 $E/H = \eta_0$ 의 차이를 설명해보라.

14. 경계면, Fresnel 계수, 광학

14.1 입사, 반사, 굴절

평면 경계에서 접선 방향 위상일치가 필요하므로

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t, \quad \mathbf{k}_{i\parallel} = \mathbf{k}_{r\parallel} = \mathbf{k}_{t\parallel}. \quad (14.1)$$

따라서 Snell 법칙

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (14.2)$$

가 나온다.

14.2 s 편파와 p 편파 Fresnel 계수

비자성 매질 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ 에서 진폭 반사계수는

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (14.3)$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (14.4)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad (14.5)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}. \quad (14.6)$$

Brewster 각은 $r_p = 0$ 에서

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (14.7)$$

14.3 전반사와 evanescent wave

$n_1 > n_2$ 이고 $\sin \theta_i > n_2/n_1$ 이면 투과파의 법선 파수는 허수가 된다.

$$k_{tz} = i\kappa, \quad \kappa = k_0 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}. \quad (14.8)$$

장 크기는 경계에서 멀어지며 $e^{-\kappa z}$ 로 감쇠하지만, 경계 방향으로 위상이 진행된다.

14.4 다층막 전송행렬

각 층에서 전방/후방 파의 계수를 $(a_j, b_j)^T$ 로 두면

$$\begin{pmatrix} a_j \\ b_j \end{pmatrix} = \mathbf{M}_j \begin{pmatrix} a_{j+1} \\ b_{j+1} \end{pmatrix}. \quad (14.9)$$

단층 위상행렬은

$$\mathbf{P}_j = \begin{pmatrix} e^{ik_{zj}d_j} & 0 \\ 0 & e^{-ik_{zj}d_j} \end{pmatrix}. \quad (14.10)$$

연구자 관점. Fresnel 공식은 박막, 광섬유, 포토닉 결정, metasurface 의 가장 작은 블록이다. 실제 연구에서는 복소 굴절률, 표면전도도, 비국소 경계조건, roughness 평균까지 확장된다.

15. 분산, 손실, 비등방 매질

15.1 Drude 모델

자유전자 플라즈마의 운동방정식은

$$m \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \gamma \mathbf{v} \right) = -e\mathbf{E}. \quad (15.1)$$

조화장에 대해 전도도와 유전함수는

$$\sigma(\omega) = \frac{ne^2}{m(\gamma - i\omega)}, \quad (15.2)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (15.3)$$

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}. \quad (15.4)$$

15.2 Lorentz oscillator

결합전자의 공명은

$$m (\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x) = -eE \quad (15.5)$$

로 모델링된다.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_j \frac{f_j \omega_{pj}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}. \quad (15.6)$$

15.3 비등방 결정

유전율 텐서가 대각형

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \text{diag}(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) \quad (15.7)$$

이면 파동방정식은

$$\mathbf{k} \times \mu^{-1}(\mathbf{k} \times \mathbf{E}) + \omega^2 \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} = 0. \quad (15.8)$$

비자명한 해를 위해

$$\det [k^2 \mathbf{I} - \mathbf{k}\mathbf{k} - \omega^2 \mu \boldsymbol{\varepsilon}] = 0 \quad (15.9)$$

이어야 한다.

15.4 Tellegen 와 bianisotropic 매질

가장 일반적인 선형 국소 매질은

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon & \xi \\ \zeta & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix}. \quad (15.10)$$

상호성, 시간반전, 공간반전 대칭이 tensor 항을 제한한다.

자가 점검. 손실 매질에서 굴절률 $n = n' + in''$ 의 허수부가 왜 공간 감쇠와 연결되는지 phasor 로 보여보라.

Part VI

전송선, 도파관, 공진기

16. 전송선 이론

16.1 telegrapher 방정식

단위길이당 R, L, G, C 를 갖는 전송선에서

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -L \frac{\partial I}{\partial t} - RI, \quad (16.1)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -C \frac{\partial V}{\partial t} - GV. \quad (16.2)$$

phasor 영역에서는

$$\frac{dV}{dz} = -(R - i\omega L)I, \quad (16.3)$$

$$\frac{dI}{dz} = -(G - i\omega C)V. \quad (16.4)$$

전파상수와 특성임피던스는

$$\gamma = \sqrt{(R - i\omega L)(G - i\omega C)}, \quad (16.5)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R - i\omega L}{G - i\omega C}}. \quad (16.6)$$

손실 없는 선로에서는

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \beta = \omega\sqrt{LC}. \quad (16.7)$$

16.2 반사와 정재파

부하 Z_L 에서 반사계수는

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (16.8)$$

입력 임피던스는

$$Z_{in}(\ell) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma\ell)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma\ell)}. \quad (16.9)$$

손실 없는 경우

$$Z_{in}(\ell) = Z_0 \frac{Z_L + iZ_0 \tan \beta\ell}{Z_0 + iZ_L \tan \beta\ell}. \quad (16.10)$$

정재파비는

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (16.11)$$

16.3 Smith chart 의 수식적 핵심

정규화 임피던스 $z = Z/Z_0$ 에 대해

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1}, \quad z = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (16.12)$$

무손실 선로를 길이 ℓ 만큼 이동하면

$$\Gamma(z) = \Gamma_L e^{-2i\beta\ell}. \quad (16.13)$$

자가 점검. $\lambda/4$ 변압기가 왜 $Z_{\text{in}} = Z_0^2/Z_L$ 를 만드는지 입력임피던스 식에서 직접 확인하라.

17. 도파관과 공동공진기

17.1 모드 분해

도파관 축을 z 로 두고 장이 $e^{i\beta z - i\omega t}$ 에 비례한다고 하자. 종방향 성분 E_z, H_z 가 횡방향 장을 결정한다.

$$(\nabla_t^2 + k_c^2)E_z = 0, \quad (17.1)$$

$$(\nabla_t^2 + k_c^2)H_z = 0, \quad (17.2)$$

$$\beta^2 = k^2 - k_c^2. \quad (17.3)$$

TEM 모드는 $E_z = H_z = 0$ 이고, 단일 도체 hollow waveguide 에는 TEM 모드가 없다.

17.2 직사각형 도파관

PEC 벽 $0 < x < a, 0 < y < b$ 에서 TE_{mn} 모드는

$$H_z = H_0 \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{i\beta z}, \quad (17.4)$$

$$k_c^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2. \quad (17.5)$$

차단 주파수는

$$\omega_c = \frac{k_c}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (17.6)$$

17.3 원형 도파관

원형 도파관에서는 Bessel 함수와 그 도함수의 영점이 등장한다.

$$k_c^{\text{TM}} = \frac{x_{mn}}{a}, \quad J_m(x_{mn}) = 0, \quad (17.7)$$

$$k_c^{\text{TE}} = \frac{x'_{mn}}{a}, \quad J'_m(x'_{mn}) = 0. \quad (17.8)$$

17.4 공동공진기와 Q

공진기의 품질계수는

$$Q = \omega \frac{\text{저장 에너지}}{\text{평균 손실 전력}}. \quad (17.9)$$

선폭과 수명은

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}, \quad \tau = \frac{Q}{\omega_0}. \quad (17.10)$$

17.5 S-파라미터

마이크로파 네트워크에서 포트의 입사/반사파 a_i, b_i 는

$$\mathbf{b} = \mathbf{S}\mathbf{a}. \quad (17.11)$$

수동 무손실 네트워크는 unitary 조건

$$\mathbf{S}^\dagger \mathbf{S} = \mathbf{I} \quad (17.12)$$

을 만족하고, 상호 네트워크는 $\mathbf{S} = \mathbf{S}^T$ 이다.

자가 점검. 도파관에서 위상속도가 c 보다 커질 수 있는데 왜 정보가 초광속으로 전달되지 않는지 군속도와 비교해보라.

18. 안테나와 개구

18.1 짧은 전기쌍극자

길이 $\ell \ll \lambda$, 전류 I_0 인 Hertzian dipole 의 원거리장은

$$E_\theta = i\eta \frac{kI_0\ell}{4\pi r} \sin\theta e^{ikr}, \quad (18.1)$$

$$H_\varphi = \frac{E_\theta}{\eta}. \quad (18.2)$$

시간평균 복사전력은

$$P = \frac{\eta k^2 I_0^2 \ell^2}{12\pi}. \quad (18.3)$$

복사저항은 RMS 전류 기준으로

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2. \quad (18.4)$$

18.2 반파장 다이폴

이상적인 짧은 반파장 다이폴의 전류분포는 근사적으로

$$I(z) = I_0 \sin \left[k \left(\frac{\ell}{2} - |z| \right) \right], \quad \ell \approx \frac{\lambda}{2}. \quad (18.5)$$

방사패턴은

$$E_\theta \propto \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta}. \quad (18.6)$$

18.3 Friis 전송식

자유공간 원거리에서 송수신 안테나 이득 G_t, G_r 이면

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2. \quad (18.7)$$

편파 불일치와 임피던스 부정합은 추가 계수로 곱해진다.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 |\hat{e}_t \cdot \hat{e}_r^*|^2 (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2). \quad (18.8)$$

18.4 개구 안테나와 Fourier optics

원거리 복사패턴은 개구장의 Fourier 변환으로 볼 수 있다.

$$\mathbf{E}_{\text{far}}(\theta, \phi) \propto \iint_A \mathbf{E}_{\text{ap}}(x, y) e^{ik(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dx dy. \quad (18.9)$$

개구 효율 η_{ap} 를 쓰면

$$G \approx \eta_{\text{ap}} \frac{4\pi A}{\lambda^2}. \quad (18.10)$$

자가 점검. 안테나가 회로 부품처럼 보이지만 실제로는 장의 경계조건 문제라는 점을, 입력 임피던스와 방사패턴 두 관점에서 설명해보라.

Part VII

소스, 복사, 산란

19. 지연 퍼텐셜과 Lienard–Wiechert 장

19.1 retarded Green 함수

Lorenz 게이지에서 파동연산자

$$\square = \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (19.1)$$

의 retarded Green 함수는

$$G_{\text{ret}}(\mathbf{r}, t; \mathbf{r}', t') = \frac{\delta\left(t' - t + \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}\right)}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (19.2)$$

따라서

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}', t_R)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r', \quad (19.3)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t_R)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r', \quad (19.4)$$

$$t_R = t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}. \quad (19.5)$$

19.2 점전하의 Lienard–Wiechert 퍼텐셜

전하 q 가 $\mathbf{r}_q(t)$ 를 따라 움직일 때 retarded time t_R 는

$$t_R = t - \frac{R(t_R)}{c}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_q(t_R). \quad (19.6)$$

퍼텐셜은

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(1 - \hat{\mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\beta})R} \right]_{\text{ret}}, \quad (19.7)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \left[\frac{\mathbf{v}}{(1 - \hat{\mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\beta})R} \right]_{\text{ret}}. \quad (19.8)$$

여기서 $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c$ 이다.

19.3 속도장과 가속도장

전기장은

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{(1 - \beta^2)(\hat{\mathbf{R}} - \boldsymbol{\beta})}{\kappa^3 R^2} + \frac{\hat{\mathbf{R}} \times \{(\hat{\mathbf{R}} - \boldsymbol{\beta}) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}\}}{c\kappa^3 R} \right]_{\text{ret}}, \quad (19.9)$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{1}{c} \hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{E} \right]_{\text{ret}}, \quad \kappa = 1 - \hat{\mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\beta}. \quad (19.10)$$

첫 항은 $1/R^2$ 근접/속도장, 둘째 항은 $1/R$ 복사장이다.

19.4 Larmor 와 Lienard 공식

비상대론적 가속 전하의 복사전력은

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}. \quad (19.11)$$

상대론적 일반화는

$$P = \frac{q^2 \gamma^6}{6\pi\epsilon_0 c^3} \left[a^2 - \frac{(\mathbf{v} \times \mathbf{a})^2}{c^2} \right]. \quad (19.12)$$

자가 점검. 왜 균일속도 전하는 원거리 복사를 하지 않고, 가속 전하만 복사하는지 장의 거리 의존성으로 설명해보라.

20. 다중극 복사와 산란

20.1 전기쌍극자 복사

시간 의존 전기쌍극자 $\mathbf{p}(t)$ 의 원거리장은

$$\mathbf{E}_{\text{rad}}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} [\hat{\mathbf{r}} \times (\hat{\mathbf{r}} \times \ddot{\mathbf{p}}(t - r/c))], \quad (20.1)$$

$$\mathbf{B}_{\text{rad}} = \frac{1}{c} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E}_{\text{rad}}. \quad (20.2)$$

조화 쌍극자 $\mathbf{p}_0 e^{-i\omega t}$ 의 평균 복사전력은

$$\langle P \rangle = \frac{\omega^4 |\mathbf{p}_0|^2}{12\pi\epsilon_0 c^3}. \quad (20.3)$$

20.2 자기쌍극자와 전기 사중극자

소스 크기 $a \ll \lambda$ 에서는

$$P_{E1} \sim \frac{\omega^4 p^2}{\epsilon_0 c^3}, \quad (20.4)$$

$$P_{M1} \sim \frac{\mu_0 \omega^4 m^2}{c^3}, \quad (20.5)$$

$$P_{E2} \sim \frac{\omega^6 Q^2}{\epsilon_0 c^5}. \quad (20.6)$$

일반적으로 높은 다중극은 $(ka)^2$ 만큼 억제된다.

20.3 Rayleigh 산란

작은 유전체 구의 유도 쌍극자 분극률은

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}. \quad (20.7)$$

산란 단면적은

$$\sigma_{\text{sca}} = \frac{k^4}{6\pi\epsilon_0^2} |\alpha|^2. \quad (20.8)$$

따라서 $\sigma \propto \lambda^{-4}$ 이다.

20.4 optical theorem

입사 평면파의 산란진폭 $f(\theta, \phi)$ 에 대해

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{4\pi}{k} \Im f(0). \quad (20.9)$$

이는 전방 산란 위상과 전체 소멸 단면적의 관계다.

20.5 Mie 산란의 구조

구형 입자의 산란은 vector spherical harmonics 로 전개된다.

$$\mathbf{E}_{\text{sca}} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \left[a_{\ell m} \mathbf{N}_{\ell m}^{(3)}(kr) + b_{\ell m} \mathbf{M}_{\ell m}^{(3)}(kr) \right]. \quad (20.10)$$

구 대칭이면 m 의존이 단순화되고 Mie 계수 a_{ℓ}, b_{ℓ} 만 남는다.

연구자 관점. 나노포토닉스에서는 “전기쌍극자 하나” 가 끝이 아니다. 고굴절률 입자에서는 자기 쌍극자, toroidal moment, Fano 간섭, bound states in the continuum 이 함께 나타난다.

21. 복사 반작용과 자기력 문제

21.1 Abraham–Lorentz 힘

비상대론적 점전하 모델에서는 자기장이 자기 자신에게 주는 반작용을 형식적으로

$$\mathbf{F}_{\text{rad}} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \dot{\mathbf{a}} \quad (21.1)$$

로 쓴다. 운동방정식

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}_{\text{ext}} + \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \dot{\mathbf{a}} \quad (21.2)$$

는 runaway solution 과 preacceleration 문제를 낳는다.

21.2 Landau–Lifshitz 근사

작은 복사반작용에서는 외력에 의한 가속도를 대입하여 차수를 줄인다.

$$\mathbf{F}_{\text{LL}} \approx \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{F}_{\text{ext}}}{m} \right). \quad (21.3)$$

상대론적 고강도 레이저-입자 상호작용에서는 더 정교한 식이 필요하다.

21.3 자기 에너지의 발산

점전하의 Coulomb 장 에너지는

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 d^3r \sim \int_0 \frac{dr}{r^2} \quad (21.4)$$

로 발산한다. 이는 고전 점입자의 한계를 보여주며 질량 재규격화와 양자장론 문제로 이어진다.

자가 점검. 복사반작용 문제가 왜 “Maxwell 방정식이 틀렸다” 는 의미가 아니라 점입자 이상화의 문제인지 설명해보라.

Part VIII

상대론적 전자기학과 작용원리

22. 특수상대론과 전자기장

22.1 4-벡터 표기

시공간 좌표를 $x^\mu = (ct, \mathbf{x})$, metric 을 $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ 로 둔다.

$$\partial_\mu = \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right), \quad J^\mu = (c\rho, \mathbf{J}). \quad (22.1)$$

전하보존은

$$\partial_\mu J^\mu = 0. \quad (22.2)$$

22.2 전자기장 텐서

4-퍼텐셜은

$$A^\mu = \left(\frac{\phi}{c}, \mathbf{A} \right). \quad (22.3)$$

장 텐서는

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu. \quad (22.4)$$

행렬 형태는 관례에 따라 부호가 달라질 수 있으나 한 표기에서는

$$F^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (22.5)$$

22.3 공변 Maxwell 방정식

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu, \quad (22.6)$$

$$\partial_\lambda F_{\mu\nu} + \partial_\mu F_{\nu\lambda} + \partial_\nu F_{\lambda\mu} = 0. \quad (22.7)$$

쌍대 텐서 $\tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} F_{\alpha\beta}$ 를 쓰면 동차식은

$$\partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0. \quad (22.8)$$

22.4 Lorentz 변환에서 장의 변화

속도 $\mathbf{v}$ 로 움직이는 계로 변환할 때 평행/수직 성분은

$$\mathbf{E}'_{\parallel} = \mathbf{E}_{\parallel}, \quad (22.9)$$

$$\mathbf{B}'_{\parallel} = \mathbf{B}_{\parallel}, \quad (22.10)$$

$$\mathbf{E}'_{\perp} = \gamma(\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (22.11)$$

$$\mathbf{B}'_{\perp} = \gamma\left(\mathbf{B}_{\perp} - \frac{1}{c^2}\mathbf{v} \times \mathbf{E}\right). \quad (22.12)$$

더 정확한 일반형은

$$\mathbf{E}' = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} \frac{\mathbf{v}}{c^2} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}), \quad (22.13)$$

$$\mathbf{B}' = \gamma\left(\mathbf{B} - \frac{1}{c^2}\mathbf{v} \times \mathbf{E}\right) - \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} \frac{\mathbf{v}}{c^2} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}). \quad (22.14)$$

22.5 불변량

두 Lorentz 불변량은

$$I_1 = E^2 - c^2 B^2, \quad (22.15)$$

$$I_2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}. \quad (22.16)$$

어떤 관성계에서 순수 전기장 또는 순수 자기장으로 만들 수 있는지 판정할 때 유용하다.

자가 점검. 한 계에서 자기력만 받는 입자가 다른 계에서는 전기력도 받는다. 이것이 “전기와 자기는 한 힘의 다른 모습”이라는 말을 어떻게 뒷받침하는지 설명해보라.

23. 작용, 게이지 대칭, Noether 정리

23.1 장과 입자의 작용

전자기장의 작용은

$$S_{\text{field}} = -\frac{1}{4\mu_0} \int F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} d^4x. \quad (23.1)$$

전류와의 결합은

$$S_{\text{int}} = - \int J_\mu A^\mu d^4x. \quad (23.2)$$

전체 작용을 A_μ 에 대해 변분하면 비동차 Maxwell 방정식이 나온다.

23.2 게이지 대칭

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \chi. \quad (23.3)$$

상호작용 작용의 변화는

$$\Delta S_{\text{int}} = - \int J_\mu \partial^\mu \chi d^4x = \int \chi \partial_\mu J^\mu d^4x \quad (23.4)$$

이므로 전하보존이 게이지 불변성과 연결된다.

23.3 에너지-운동량 텐서

대칭 에너지-운동량 텐서는

$$T^{\mu\nu} = \frac{1}{\mu_0} \left(F^{\mu\alpha} F^\nu{}_\alpha + \frac{1}{4} \eta^{\mu\nu} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \right) \quad (23.5)$$

이다. 성분은 에너지밀도, Poynting 벡터, Maxwell stress tensor 를 포함한다.

$$T^{00} = u, \quad T^{0i} = \frac{S_i}{c}, \quad T^{ij} = -T_{ij}^{\text{Maxwell}} \quad (\text{부호 관례 주의}). \quad (23.6)$$

23.4 미분형식 표기

전자기장을 2-form

$$F = dA \quad (23.7)$$

로 쓰면 동차 Maxwell 방정식은

$$dF = 0, \quad (23.8)$$

비동차식은 Hodge star $\star$ 를 써서

$$d\star F = \mu_0 \star J. \quad (23.9)$$

자기 단극자가 없다는 조건은 F 가 전역적으로 exact 일 수 있는지와 연결되며, 위상적인 공간에서는 Aharonov–Bohm 효과와 Dirac 양자화 조건으로 이어진다.

연구자 관점. 고전 전자기학의 깊이는 “Maxwell 방정식 네 줄” 보다 게이지 대칭, 위상, 보존법칙, 경계조건의 결합에 있다. 현대 장론과 위상물질은 이 구조를 계속 재사용한다.

Part IX

고급 수학 도구와 계산전자기학

24. 고급 해석기법

24.1 Fourier 해석

무한 공간에서 Fourier 변환을

$$f(\mathbf{r}) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \tilde{f}(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (24.1)$$

로 정의하면 Poisson 방정식은 대수방정식이 된다.

$$-k^2 \tilde{\phi}(\mathbf{k}) = -\frac{\tilde{\rho}(\mathbf{k})}{\varepsilon_0}, \quad \tilde{\phi}(\mathbf{k}) = \frac{\tilde{\rho}(\mathbf{k})}{\varepsilon_0 k^2}. \quad (24.2)$$

24.2 Helmholtz 분해

충분히 잘 감소하는 벡터장 $\mathbf{V}$ 는 종/횡 성분으로 나뉜다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_T, \quad \nabla \times \mathbf{V}_L = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{V}_T = 0. \quad (24.3)$$

Fourier 공간에서 projection operator 는

$$(P_L)_{ij} = \frac{k_i k_j}{k^2}, \quad (P_T)_{ij} = \delta_{ij} - \frac{k_i k_j}{k^2}. \quad (24.4)$$

24.3 dyadic Green 함수

주파수 영역에서 전기장은

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - k_0^2 \varepsilon_r(\mathbf{r}) \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \mathbf{J}. \quad (24.5)$$

균일 매질 dyadic Green 함수 $\mathbf{G}$ 는

$$(\nabla \times \nabla \times - k^2 \mathbf{I}) \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \mathbf{I} \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}'). \quad (24.6)$$

자유공간에서는

$$\mathbf{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \left(\mathbf{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{ikR}}{4\pi R}, \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|. \quad (24.7)$$

24.4 reciprocity

선형 상호 매질에서 Lorentz reciprocity 정리는

$$\int_V (\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 - \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1) dV = \oint_{\partial V} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \hat{\mathbf{n}} da. \quad (24.8)$$

경계면에서 방사가 없으면 좌변이 0 이 되어 송수신 대칭성이 나온다.

24.5 변분원리

소스 없는 공진 모드는 generalized eigenvalue 문제로 쓸 수 있다.

$$\nabla \times \mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E} = \omega^2 \varepsilon \mathbf{E}. \quad (24.9)$$

손실 없는 양의 매질에서는 Rayleigh quotient

$$\omega^2 = \frac{\int (\nabla \times \mathbf{E})^* \cdot \mu^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) dV}{\int \mathbf{E}^* \cdot \varepsilon \mathbf{E} dV} \quad (24.10)$$

가 성립한다.

자가 점검. Fourier 공간에서 $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$ 가 왜 $\mathbf{k} \cdot \tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\rho}/(i\varepsilon_0)$ 가 되는지, 그리고 이것이 종방향 성분만 고정한다는 뜻을 설명해보라.

25. 계산전자기학

25.1 FDTD: Yee 격자

시간영역 Maxwell 방정식을 staggered grid 에 두면 전기장과 자기장을 반 시간스텝씩 번갈아 업데이트한다.

$$\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - \Delta t \mu^{-1} \nabla \times_h \mathbf{E}^n, \quad (25.1)$$

$$\mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + \Delta t \varepsilon^{-1} (\nabla \times_h \mathbf{H}^{n+1/2} - \mathbf{J}^{n+1/2}). \quad (25.2)$$

3 차원 균일 격자의 Courant 안정조건은

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2}}}. \quad (25.3)$$

25.2 수치분산

1 차원 Yee scheme 의 분산관계는

$$\left[\frac{\sin(\omega \Delta t / 2)}{c \Delta t / 2} \right]^2 = \left[\frac{\sin(k \Delta x / 2)}{\Delta x / 2} \right]^2. \quad (25.4)$$

격자가 파장에 비해 충분히 작지 않으면 위상속도 오차가 누적된다.

25.3 FEM

주파수 영역 FEM 은 약형을 사용한다.

$$\int_V (\nabla \times \mathbf{w})^* \cdot \mu^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int_V \mathbf{w}^* \cdot \varepsilon \mathbf{E} dV = i\omega \int_V \mathbf{w}^* \cdot \mathbf{J} dV. \quad (25.5)$$

벡터 basis 로 edge element 를 쓰면 spurious mode 를 줄인다.

25.4 MoM 과 적분방정식

PEC 산란체 표면에서 전류 $\mathbf{J}_s$ 를 미지수로 두고 EFIE 를 쓴다.

$$\hat{\mathbf{n}} \times \left(\mathbf{E}^{\text{inc}} + i\omega\mu_0 \int_S \mathbf{G}_0 \cdot \mathbf{J}_s dS' \right) = 0. \quad (25.6)$$

basis f_n 으로 전개하면 선형시스템

$$\sum_n Z_{mn} I_n = V_m \quad (25.7)$$

을 푼다.

25.5 PML

perfectly matched layer 는 좌표 stretching 으로 해석할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x}, \quad s_x = 1 + \frac{\sigma_x}{i\omega\epsilon_0}. \quad (25.8)$$

연속 이론에서는 반사가 없지만, 이산화와 매개변수 선택이 수치반사를 만든다.

25.6 검증과 수렴

수치해석 결과는 다음을 검사해야 한다.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} - \rho \rightarrow 0, \quad (25.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} \rightarrow 0, \quad (25.10)$$

$$\oint \mathbf{S} \cdot d\mathbf{a} + P_{\text{abs}} + P_{\text{rad}} - P_{\text{src}} \rightarrow 0. \quad (25.11)$$

연구자 관점. 계산전자기학에서 가장 흔한 실수는 “컬러 플롯이 예쁘면 맞다” 고 믿는 것이다. mesh convergence, 에너지 보존, reciprocity, benchmark 해석해와 비교가 반드시 필요하다.

Part X

플라즈마, 포토닉스, 양자 접점

26. 플라즈마 전자기학

26.1 기본 파라미터

전자 플라즈마 주파수와 Debye 길이는

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}, \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}. \quad (26.1)$$

cyclotron 주파수는

$$\Omega_s = \frac{q_s B_0}{m_s}. \quad (26.2)$$

26.2 cold plasma dielectric

자기장 $\mathbf{B}_0 = B_0 \hat{\mathbf{z}}$ 에서 cold plasma 의 유전텐서는

$$\boldsymbol{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}, \quad (26.3)$$

$$S = 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2 - \Omega_s^2}, \quad (26.4)$$

$$D = \sum_s \frac{\Omega_s}{\omega} \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2 - \Omega_s^2}, \quad (26.5)$$

$$P = 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2}. \quad (26.6)$$

26.3 Vlasov–Maxwell

분포함수 $f_s(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ 는

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f_s + \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_v f_s = 0. \quad (26.7)$$

소스는

$$\rho = \sum_s q_s \int f_s d^3v, \quad \mathbf{J} = \sum_s q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v. \quad (26.8)$$

26.4 MHD

단일유체 MHD 의 대표 방정식은

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = 0, \quad (26.9)$$

$$\rho_m \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (26.10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (26.11)$$

자기 Reynolds 수는

$$R_m = \mu\sigma UL. \quad (26.12)$$

$R_m \gg 1$ 이면 magnetic flux freezing 근사가 가능하다.

자가 점검. 금속의 Drude 모델과 플라스마 모델이 수식적으로 왜 비슷한지, 충돌률 γ 의 역할을 중심으로 설명해보라.

27. 메타물질, 포토닉 결정, 위상 전자기파

27.1 유효매질과 음의 굴절률

동시에 $\epsilon' < 0$, $\mu' < 0$ 인 손실 작은 주파수 대역에서는 굴절률의 부호를 음으로 택할 수 있다.

$$n = -\sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad \mathbf{S} \cdot \mathbf{k} < 0. \quad (27.1)$$

그러나 인과성과 수동성 때문에 강한 분산과 손실이 동반된다.

27.2 metasurface 경계조건

표면 전기/자기 분극을 갖는 얇은 층은 generalized sheet transition conditions 로 모델링한다.

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{J}_s + \frac{\partial \mathbf{P}_{s\parallel}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \hat{\mathbf{n}} \times \nabla_{\parallel} M_{s\perp}, \quad (27.2)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = -\mathbf{K}_s - \mu_0 \frac{\partial \mathbf{M}_{s\parallel}}{\partial t} - \frac{1}{\epsilon_0} \hat{\mathbf{n}} \times \nabla_{\parallel} P_{s\perp}. \quad (27.3)$$

27.3 포토닉 결정

주기적 유전율 $\epsilon(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \epsilon(\mathbf{r})$ 에서는 Bloch 모드

$$\mathbf{E}_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \mathbf{u}_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \quad (27.4)$$

가 존재한다. 고유값 문제는

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H} \quad (27.5)$$

형태로 쓸 수 있다.

27.4 Berry curvature 와 위상 광자

정규화된 Bloch 모드 $u_{n\mathbf{k}}$ 에 대해 Berry connection 과 curvature 는

$$\mathbf{A}_n(\mathbf{k}) = i \langle u_{n\mathbf{k}} | \nabla_{\mathbf{k}} u_{n\mathbf{k}} \rangle, \quad (27.6)$$

$$\Omega_n(\mathbf{k}) = \nabla_{\mathbf{k}} \times \mathbf{A}_n(\mathbf{k}). \quad (27.7)$$

2 차원 밴드의 Chern number 는

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{\text{BZ}} \Omega_{n,z}(\mathbf{k}) d^2k. \quad (27.8)$$

연구자 관점. 위상 포토닉스는 Maxwell 고유값 문제가 양자역학적 밴드 이론과 같은 수학기조를 공유한다는 사실에서 출발한다. 차이는 광자는 보존입자 수, 게이지 제약, 물질 분산을 함께 고려해야 한다는 점이다.

28. 양자역학과 전자기장의 접점

28.1 minimal coupling

양자역학에서 전자기장은 운동량을

$$\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p} - q\mathbf{A} \quad (28.1)$$

로 바꾼다. Hamiltonian 은

$$H = \frac{1}{2m} (-i\hbar\nabla - q\mathbf{A})^2 + q\phi. \quad (28.2)$$

게이지 변환은 파동함수 위상 변환과 함께 가야 한다.

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla\chi, \quad \phi' = \phi - \frac{\partial\chi}{\partial t}, \quad (28.3)$$

$$\psi' = \exp\left(\frac{iq\chi}{\hbar}\right)\psi. \quad (28.4)$$

28.2 Aharonov–Bohm 위상

자기장이 0 인 영역에서도 벡터퍼텐셜의 선적분이 양자위상을 만든다.

$$\Delta\varphi = \frac{q}{\hbar} \oint \mathbf{A} \cdot d\ell = \frac{q\Phi_B}{\hbar}. \quad (28.5)$$

28.3 전자기장 양자화의 핵심

Coulomb 게이지에서 횡파 모드는 조화진동자들의 모임이다.

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{k}, \lambda} \sqrt{\frac{\hbar}{2\varepsilon_0\omega_k V}} \left(\hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} \boldsymbol{\epsilon}_{\mathbf{k}\lambda} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t} + \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger \boldsymbol{\epsilon}_{\mathbf{k}\lambda}^* e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + i\omega t} \right). \quad (28.6)$$

Hamiltonian 은

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}, \lambda} \hbar\omega_k \left(\hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} + \frac{1}{2} \right). \quad (28.7)$$

28.4 spontaneous emission 과 Purcell 효과

모드 밀도가 방출률을 바꾼다. 공동 안의 Purcell factor 는 이상화하여

$$F_P = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n} \right)^3 \frac{Q}{V_{\text{mode}}}. \quad (28.8)$$

고전적으로는 dyadic Green 함수의 허수부와 국소 상태밀도 (LDOS) 가 핵심이다.

$$\rho(\mathbf{r}, \omega) \propto \Im \text{Tr } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \omega). \quad (28.9)$$

자가 점검. Aharonov-Bohm 효과는 “ $\mathbf{E}, \mathbf{B}$ 만 물리량이다” 라는 고전적 직관을 어떻게 수정하게 만드는가?

Part XI

연구 문제를 푸는 방법

29. 전자기 문제 해결 알고리즘

29.1 문제 유형 판별

전자기 문제를 만나면 다음 순서로 판별한다.

1. 소스가 주어졌는가, 경계가 주어졌는가, 모드/고유값이 필요한가?
2. $kL \ll 1$ 인가, 아니면 파동 문제인가?
3. 매질은 선형, 등방, 균질, 시간불변인가?
4. 손실과 분산이 중요한가?
5. 해석해가 가능한 대칭이 있는가?
6. 수치해석이면 보존법칙과 benchmark 는 무엇인가?

29.2 차원분석

모든 식은 단위로 검사한다. 예를 들어 Coulomb 에너지는

$$U \sim \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a} \quad (29.1)$$

이고, 쌍극자 복사는

$$P \sim \frac{\omega^4 p^2}{\epsilon_0 c^3} \quad (29.2)$$

이어야 한다. 상수 4π 는 틀릴 수 있어도 차원이 틀리면 식은 반드시 틀렸다.

29.3 대칭성 사용

대칭은 미분방정식을 줄인다.

$$\text{평행이동 대칭} \Rightarrow \text{Fourier mode}, \quad (29.3)$$

$$\text{회전 대칭} \Rightarrow \text{spherical/cylindrical harmonics}, \quad (29.4)$$

$$\text{시간 불변성} \Rightarrow \text{phasor 와 에너지 보존}, \quad (29.5)$$

$$\text{상호성} \Rightarrow S_{ij} = S_{ji}. \quad (29.6)$$

29.4 경계조건 우선 원칙

Maxwell 방정식의 일반해보다 경계조건이 더 어렵다. 도체, 유전체, 자성체, radiation condition, periodic condition, PML condition 을 먼저 쓰고 미지수를 정해야 한다.

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0, \quad \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}_s, \quad \hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma_s. \quad (29.7)$$

29.5 오답을 잡는 10 가지 테스트

1. 단위가 맞는가?
2. 극한 $\omega \rightarrow 0$, $r \rightarrow \infty$, $\sigma \rightarrow \infty$ 에서 말이 되는가?
3. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 를 만족하는가?
4. 전하보존을 깨지 않는가?
5. 경계조건 네 개를 모두 확인했는가?
6. 에너지 보존 또는 Poynting flux 가 맞는가?
7. reciprocity 가 필요한 문제에서 $S_{ij} = S_{ji}$ 인가?
8. 손실 매질에서 평균 흡수전력이 양수인가?
9. 수치격자 수렴을 확인했는가?
10. 단위계 (SI/cgs/자연단위) 를 섞지 않았는가?

자가 점검. 지금까지 배운 내용을 한 줄로 요약해보라: “전자기학은 _ 와 _ 를 만족하는 장 이론이다.” 빈칸에는 보존법칙과 경계조건을 넣어보면 좋다.

Part XII

부록: 수식 아틀라스와 학습 체크리스트

30. 핵심 수식 아틀라스

이 장은 빠른 복습용이다. 각 카드는 조건을 함께 기억해야 한다. 동일한 형태의 식도 단위계, 시간 convention, 매질 가정에 따라 부호와 계수가 달라질 수 있다.

F001. Maxwell-SI

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \partial_t \mathbf{E}. \quad (30.1)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F002. Lorentz 힘

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (30.2)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F003. 연속방정식

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad \partial_\mu J^\mu = 0. \quad (30.3)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F004. Coulomb 법칙

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q\hat{\mathbf{r}}}{r^2}, \quad \phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (30.4)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F005. Gauss 법칙 응용

$$E_{\text{sphere}}(r > R) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad E_{\text{line}} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad E_{\text{sheet}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (30.5)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F006. Poisson/Laplace

$$\nabla^2 \phi = -\rho/\varepsilon_0, \quad \nabla^2 \phi = 0 \quad (\rho = 0). \quad (30.6)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F007. 정전기 에너지

$$U = \frac{1}{2} \int \rho \phi \, d^3r = \frac{\varepsilon_0}{2} \int E^2 \, d^3r. \quad (30.7)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F008. 축전기

$$C = Q/V, \quad U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C}, \quad C_{pp} = \varepsilon A/d. \quad (30.8)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F009. 쌍극자

$$\phi = \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \quad \mathbf{E} = \frac{3\hat{\mathbf{r}}(\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}. \quad (30.9)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F010. 경계조건

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma_f, \quad \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0, \quad \hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \quad \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}_f. \quad (30.10)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F011. 분극 전하

$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P}, \quad \sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}. \quad (30.11)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F012. 자화 전류

$$\mathbf{J}_b = \nabla \times \mathbf{M}, \quad \mathbf{K}_b = \mathbf{M} \times \hat{n}, \quad \mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{M}. \quad (30.12)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F013. Biot-Savart

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3r'. \quad (30.13)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F014. Ampere

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}, \quad \oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 I. \quad (30.14)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F015. 자기쌍극자

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \hat{r}}{r^2}, \quad \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \{3\hat{r}(\mathbf{m} \cdot \hat{r}) - \mathbf{m}\}. \quad (30.15)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F016. 인덕턴스

$$\Phi_i = \sum_j L_{ij} I_j, \quad U = \frac{1}{2} \sum_{ij} L_{ij} I_i I_j = \frac{1}{2\mu} \int B^2 d^3r. \quad (30.16)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F017. Faraday

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}, \quad \mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (30.17)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F018. 변위전류

$$\mathbf{J}_D = \partial_t \mathbf{D}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \partial_t \mathbf{D}. \quad (30.18)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F019. Poynting

$$\partial_t u + \nabla \cdot \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad u = \frac{1}{2}(\varepsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0), \quad \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (30.19)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F020. 응력텐서

$$T_{ij} = \varepsilon_0(E_i E_j - \delta_{ij} E^2/2) + \mu_0^{-1}(B_i B_j - \delta_{ij} B^2/2). \quad (30.20)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F021. 퍼텐셜

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi - \partial_t \mathbf{A}, \quad \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla \chi, \quad \phi \rightarrow \phi - \partial_t \chi. \quad (30.21)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F022. Lorenz 게이지

$$\nabla \cdot \mathbf{A} + c^{-2} \partial_t \phi = 0, \quad \square \phi = -\rho/\varepsilon_0, \quad \square \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}. \quad (30.22)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F023. 지연 퍼텐셜

$$\phi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}', t - R/c)}{R} d^3 r', \quad \mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t - R/c)}{R} d^3 r'. \quad (30.23)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F024. 파동방정식

$$\nabla^2 \mathbf{E} - c^{-2} \partial_t^2 \mathbf{E} = 0, \quad \nabla^2 \mathbf{B} - c^{-2} \partial_t^2 \mathbf{B} = 0. \quad (30.24)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F025. 평면파

$$\omega = ck, \quad \mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0, \quad \mathbf{B} = \omega^{-1} \mathbf{k} \times \mathbf{E}, \quad E/B = c. \quad (30.25)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F026. phasor Maxwell

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = i\omega \tilde{\mathbf{B}}, \quad \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{J}} - i\omega \tilde{\mathbf{D}}. \quad (30.26)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F027. 복소 유전율

$$\varepsilon_c = \varepsilon + i\sigma/\omega \quad (e^{-i\omega t} \text{ 관례}). \quad (30.27)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F028. 파동 임피던스

$$\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}, \quad \mathbf{H} = \eta^{-1} \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{E}, \quad \langle S \rangle = |E_0|^2/(2\eta) \quad (\eta \in \mathbb{R}). \quad (30.28)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F029. Fresnel-s

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}. \quad (30.29)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F030. Fresnel-p

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad \tan \theta_B = n_2/n_1. \quad (30.30)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F031. Snell

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t. \quad (30.31)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F032. 전반사

$$\sin \theta_c = n_2/n_1, \quad \kappa = k_0 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}. \quad (30.32)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F033. Drude

$$\sigma(\omega) = \frac{ne^2}{m(\gamma - i\omega)}, \quad \varepsilon = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \quad (30.33)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F034. Lorentz oscillator

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_j \frac{f_j \omega_{pj}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}. \quad (30.34)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F035. Kramers-Kronig

$$\Re \chi(\omega) = \frac{2}{\pi} \mathcal{P} \int_0^\infty \frac{\omega' \Im \chi(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'. \quad (30.35)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F036. skin depth

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}, \quad Z_s = (1 + i)\sqrt{\omega\mu/(2\sigma)}. \quad (30.36)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F037. 전송선

$$\partial_z V = -L\partial_t I - RI, \quad \partial_z I = -C\partial_t V - GV. \quad (30.37)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F038. 전송선 상수

$$\gamma = \sqrt{(R - i\omega L)(G - i\omega C)}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{R - i\omega L}{G - i\omega C}}. \quad (30.38)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F039. 반사계수

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad \text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (30.39)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F040. 입력 임피던스

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + iZ_0 \tan \beta \ell}{Z_0 + iZ_L \tan \beta \ell}. \quad (30.40)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F041. 도파관 분산

$$\beta^2 = k^2 - k_c^2, \quad \omega_c = k_c / \sqrt{\mu\epsilon}. \quad (30.41)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F042. 직사각형 도파관

$$k_c^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2. \quad (30.42)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F043. 공진기 Q

$$Q = \omega_0 \frac{U}{P_{loss}} = \omega_0 / \Delta\omega. \quad (30.43)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F044. S 파라미터

$$\mathbf{b} = \mathbf{S}\mathbf{a}, \quad \mathbf{S}^\dagger \mathbf{S} = \mathbf{I} \text{ (무손실)}, \quad \mathbf{S} = \mathbf{S}^T \text{ (상호)}. \quad (30.44)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F045. Hertzian dipole

$$E_\theta = i\eta k I_0 \ell \sin \theta e^{ikr} / (4\pi r), \quad R_r = 80\pi^2 (\ell/\lambda)^2. \quad (30.45)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F046. Friis

$$P_r = P_t G_t G_r (\lambda/4\pi R)^2. \quad (30.46)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F047. 개구 이득

$$G \approx \eta_{ap} 4\pi A / \lambda^2. \quad (30.47)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F048. Larmor

$$P = q^2 a^2 / (6\pi\epsilon_0 c^3). \quad (30.48)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F049. 전기쌍극자 복사

$$\langle P \rangle = \omega^4 |p_0|^2 / (12\pi\epsilon_0 c^3). \quad (30.49)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F050. Rayleigh

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}, \quad \sigma_{sca} = k^4 |\alpha|^2 / (6\pi\epsilon_0^2). \quad (30.50)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F051. optical theorem

$$\sigma_{ext} = \frac{4\pi}{k} \Im f(0). \quad (30.51)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F052. Lienard-Wiechert

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(1 - \hat{R} \cdot \beta)R} \right]_{ret}, \quad \mathbf{A} = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \left[\frac{\mathbf{v}}{(1 - \hat{R} \cdot \beta)R} \right]_{ret}. \quad (30.52)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F053. 상대론 불변량

$$I_1 = E^2 - c^2 B^2, \quad I_2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}. \quad (30.53)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F054. 공변 Maxwell

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu, \quad \partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0. \quad (30.54)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F055. 게이지 작용

$$S = -\frac{1}{4\mu_0} \int F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} d^4x - \int J_\mu A^\mu d^4x. \quad (30.55)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F056. Helmholtz 분해

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_T, \quad P_{ij}^L = k_i k_j / k^2, \quad P_{ij}^T = \delta_{ij} - k_i k_j / k^2. \quad (30.56)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F057. dyadic Green

$$\mathbf{G}_0 = (\mathbf{I} + k^{-2} \nabla \nabla) \frac{e^{ikR}}{4\pi R}. \quad (30.57)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F058. reciprocity

$$\int (\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 - \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1) dV = \oint (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \hat{n} da. \quad (30.58)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F059. FDTD

$$\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - \Delta t \mu^{-1} \nabla \times_h \mathbf{E}^n, \quad \mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + \Delta t \varepsilon^{-1} (\nabla \times_h \mathbf{H}^{n+1/2} - \mathbf{J}^{n+1/2}). \quad (30.59)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F060. Courant

$$\Delta t \leq [c \sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2}}]^{-1}. \quad (30.60)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F061. FEM weak form

$$\int (\nabla \times w)^* \mu^{-1} (\nabla \times E) dV - \omega^2 \int w^* \varepsilon E dV = i\omega \int w^* J dV. \quad (30.61)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F062. PML

$$\partial_x \rightarrow s_x^{-1} \partial_x, \quad s_x = 1 + \sigma_x / (i\omega \varepsilon_0). \quad (30.62)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F063. 플라스마 주파수

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / (\epsilon_0 m_e)}, \quad \lambda_D = \sqrt{\epsilon_0 k_B T_e / (n_e e^2)}. \quad (30.63)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F064. cold plasma

$$\epsilon/\epsilon_0 = \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}. \quad (30.64)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F065. Vlasov

$$\partial_t f_s + \mathbf{v} \cdot \nabla f_s + \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_v f_s = 0. \quad (30.65)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F066. MHD induction

$$\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + (\mu\sigma)^{-1} \nabla^2 \mathbf{B}, \quad R_m = \mu\sigma UL. \quad (30.66)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F067. Bloch EM

$$\mathbf{E}_{n\mathbf{k}} = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}), \quad u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r} + R) = u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}). \quad (30.67)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F068. Berry curvature

$$\mathbf{A}_n = i \langle u_n | \nabla_k u_n \rangle, \quad \Omega_n = \nabla_k \times \mathbf{A}_n, \quad C_n = (2\pi)^{-1} \int_{BZ} \Omega_z d^2 k. \quad (30.68)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F069. minimal coupling

$$H = \frac{1}{2m}(-i\hbar\nabla - q\mathbf{A})^2 + q\phi. \quad (30.69)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F070. Aharonov-Bohm

$$\Delta\varphi = q \oint \mathbf{A} \cdot d\ell / \hbar = q\Phi_B / \hbar. \quad (30.70)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F071. Purcell

$$F_P = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n} \right)^3 \frac{Q}{V_{mode}}. \quad (30.71)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

F072. LDOS

$$\rho(\mathbf{r}, \omega) \propto \Im \text{Tr } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \omega). \quad (30.72)$$

조건 확인: 단위계, 경계조건, 선형성, 손실/분산, 시간 convention 을 먼저 확인한다.

31. 좌표계별 유용한 공식

31.1 직교 곡선좌표

scale factor h_1, h_2, h_3 를 갖는 좌표 (u_1, u_2, u_3) 에서

$$\nabla f = \sum_i \hat{e}_i \frac{1}{h_i} \frac{\partial f}{\partial u_i}, \quad (31.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial u_1} (h_2 h_3 A_1) + \frac{\partial}{\partial u_2} (h_3 h_1 A_2) + \frac{\partial}{\partial u_3} (h_1 h_2 A_3) \right]. \quad (31.2)$$

31.2 원통좌표

$$\nabla f = \hat{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + \hat{\varphi} \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \varphi} + \hat{z} \frac{\partial f}{\partial z}, \quad (31.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}, \quad (31.4)$$

$$(\nabla \times \mathbf{A})_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad (31.5)$$

$$(\nabla \times \mathbf{A})_\varphi = \frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho}, \quad (31.6)$$

$$(\nabla \times \mathbf{A})_z = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\varphi) - \frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi} \right]. \quad (31.7)$$

31.3 구면좌표

$$\nabla f = \hat{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} + \hat{\varphi} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi}, \quad (31.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_\theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi}, \quad (31.9)$$

$$(\nabla \times \mathbf{A})_r = \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_\varphi) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \varphi} \right], \quad (31.10)$$

$$(\nabla \times \mathbf{A})_\theta = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi) \right], \quad (31.11)$$

$$(\nabla \times \mathbf{A})_\varphi = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right]. \quad (31.12)$$

32. 특수함수와 모드 전개

32.1 Legendre 다항식

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dP_\ell}{dx} \right] + \ell(\ell+1)P_\ell = 0. \quad (32.1)$$

직교성은

$$\int_{-1}^1 P_\ell(x) P_m(x) dx = \frac{2}{2\ell+1} \delta_{\ell m}. \quad (32.2)$$

생성함수는

$$\frac{1}{\sqrt{1-2xt+t^2}} = \sum_{\ell=0}^{\infty} P_\ell(x) t^\ell. \quad (32.3)$$

32.2 구면조화함수

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = (-1)^m \sqrt{\frac{2\ell+1}{4\pi} \frac{(\ell-m)!}{(\ell+m)!}} P_\ell^m(\cos \theta) e^{im\phi}. \quad (32.4)$$

$$\int Y_{\ell m}^*(\Omega) Y_{\ell' m'}(\Omega) d\Omega = \delta_{\ell \ell'} \delta_{m m'}. \quad (32.5)$$

32.3 Bessel 함수

$$x^2 y'' + xy' + (x^2 - m^2)y = 0. \quad (32.6)$$

해는 $J_m(x)$, $Y_m(x)$. 원통 도파관과 산란 문제에서 자주 등장한다.

$$J'_m(x) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(x) - J_{m+1}(x)]. \quad (32.7)$$

32.4 벡터 구면조화함수

$$\mathbf{X}_{\ell m} = \frac{1}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} \mathbf{L} Y_{\ell m}, \quad \mathbf{L} = -i\mathbf{r} \times \nabla. \quad (32.8)$$

전자기 다중극 모드는 대략

$$\mathbf{M}_{\ell m} = j_\ell(kr) \mathbf{X}_{\ell m}, \quad \mathbf{N}_{\ell m} = \frac{1}{k} \nabla \times \mathbf{M}_{\ell m} \quad (32.9)$$

로 구성된다.

33. 난이도별 연습문제: 답 대신 힌트

33.1 기초

- B1. 무한 선전하의 전기장을 Gauss 법칙으로 유도하라. 힌트: 원통 Gaussian surface 를 잡고 대칭성으로 E 를 상수로 둔다.
- B2. 평행판 축전기의 에너지밀도와 총 에너지를 비교하라. 힌트: $E = V/d$, $C = \epsilon A/d$.
- B3. 무한 직선전류의 자기장을 Ampere 법칙으로 구하라. 힌트: 원형 경로에서 B_ϕ 만 남는다.

33.2 중급

- I1. 접지 도체평면 앞의 점전하 문제에서 표면전하밀도를 적분하여 총 유도전하를 구하라. 힌트: 극좌표 적분으로 바꾼다.
- I2. 유전체 경계에서 $\mathbf{E}$ 의 방향이 어떻게 꺾이는지 $D_\perp$, $E_\parallel$ 연속성을 이용해 유도하라.
- I3. 손실 없는 전송선의 $\lambda/4$ 변압기 식을 유도하라. 힌트: $\tan(\pi/2)$ 극한을 직접 취한다.

33.3 고급

- A1. Lorenz 게이지에서 지연 퍼텐셜이 Maxwell 방정식을 만족함을 Green 함수로 보이라.
- A2. 균일하게 움직이는 점전하의 장을 Lorentz 변환으로 얻고, Lienard-Wiechert 식과 비교하라.
- A3. 직사각형 도파관 TE_{10} 모드의 장 성분, 위상속도, 군속도를 모두 구하라.
- A4. dyadic Green 함수의 $\nabla\nabla/k^2$ 항이 왜 횡방향 조건과 근접장 singularity 에 필요하지 설명하라.

33.4 연구형

- R1. 복소 유전율 데이터를 가지고 Kramers-Kronig 일관성을 점검하는 절차를 설계하라.
- R2. FDTD 로 금속 나노입자 산란을 계산할 때 Drude 분산을 ADE 방법으로 넣고 에너지 보존을 확인하라.
- R3. 포토닉 결정 밴드구조에서 Berry curvature 를 수치적으로 계산하는 gauge-invariant 알고리즘을 조사하라.
- R4. metasurface 의 표면 susceptibility 를 목표 반사/투과 계수에서 역설계하는 식을 세워라.

34. 대표 유도 25 선

이 장은 공식을 단순 암기가 아니라 연결망으로 기억하기 위한 짧은 유도 모음이다. 각 유도는 완전한 엄밀 증명보다 연구/시험에서 재구성할 수 있는 뼈대를 강조한다.

34.1 1. Gauss 법칙에서 Coulomb 장

구대칭 점전하에서는 $\mathbf{E} = E(r)\hat{r}$. 반지름 r 의 구면에 Gauss 법칙을 적용하면

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = E(r)4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (34.1)$$

따라서

$$\mathbf{E}(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}. \quad (34.2)$$

핵심은 대칭성으로 미지수를 하나의 함수로 줄인 다음 적분형 법칙을 쓰는 것이다.

34.2 2. Coulomb 퍼텐셜에서 Poisson 방정식

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r' \quad (34.3)$$

에 Laplacian 을 취하면

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\mathbf{r}') \nabla^2 \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r' = -\frac{\rho(\mathbf{r})}{\epsilon_0}. \quad (34.4)$$

여기서 $\nabla^2(1/R) = -4\pi\delta^{(3)}(R)$ 를 썼다.

34.3 3. 유일성 정리

두 해 ϕ_1, ϕ_2 가 같은 ρ 와 같은 Dirichlet 경계값을 만족한다고 하자. 차 $\psi = \phi_1 - \phi_2$ 는 $\nabla^2 \psi = 0$, $\psi|_{\partial V} = 0$. Green 첫 항등식은

$$\int_V |\nabla \psi|^2 dV = \oint_{\partial V} \psi \partial_n \psi da - \int_V \psi \nabla^2 \psi dV = 0. \quad (34.5)$$

따라서 $\nabla \psi = 0$, 경계값 때문에 $\psi = 0$. 해는 유일하다.

34.4 4. 영상법의 논리

영상법은 실제 영역 안에서 같은 소스와 같은 경계조건을 갖는 더 쉬운 문제를 만든다. 접지 평면의 경우 실제 영역 $z > 0$ 에서 소스는 q 하나뿐이고, 경계 $z = 0$ 에서 $\phi = 0$ 이다. 영상 $-q$ 는 실제 영역 밖에 있으므로 실제 영역의 Poisson 방정식을 바꾸지 않으며, 경계값만 맞춘다. 유일성 정리에 의해 이것이 실제 해다.

34.5 5. 다중극 전개

$r \gg r'$ 에서

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \frac{1}{r} \left(1 - 2 \frac{\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'}{r} + \frac{r'^2}{r^2} \right)^{-1/2}. \quad (34.6)$$

이항 전개를 하면

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \frac{1}{r} + \frac{\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'}{r^2} + \frac{3(\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}')^2 - r'^2}{2r^3} + \dots. \quad (34.7)$$

전위 적분에 넣으면 총전하, 쌍극자, 사중극자 순서로 나타난다.

34.6 6. 경계조건 유도

Gauss pillbox 를 경계면에 걸치면 높이를 0 으로 보낼 때 옆면 flux 가 사라져

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma_f. \quad (34.8)$$

작은 직사각형 loop 를 경계면에 걸치고 Stokes 정리를 쓰면 면적항이 0 으로 가서

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0. \quad (34.9)$$

같은 방식으로 $\mathbf{B}$ 법선 연속, $\mathbf{H}$ 접선 점프 조건을 얻는다.

34.7 7. Biot–Savart 식

정자기에서 Coulomb 게이지 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ 를 택하면

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}. \quad (34.10)$$

Poisson 해로

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{R} d^3r'. \quad (34.11)$$

$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 와 $\nabla(1/R) = -(\mathbf{r} - \mathbf{r}')/R^3$ 를 쓰면 Biot–Savart 법칙이 나온다.

34.8 8. 자기 에너지

$$U = \frac{1}{2} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} d^3r. \quad (34.12)$$

정자기에서 $\mathbf{J} = \mu^{-1} \nabla \times \mathbf{B}$ 이고 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$. 항등식

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{A} \cdot \nabla \times \mathbf{B} \quad (34.13)$$

를 적분하고 표면항을 버리면

$$U = \frac{1}{2\mu} \int B^2 d^3r. \quad (34.14)$$

34.9 9. Poynting 정리

Ampere–Maxwell 식에 $\mathbf{E}$ 를 내적하고 Faraday 식에 $\mathbf{H}$ 를 내적한다.

$$\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} + \mathbf{E} \cdot \partial_t \mathbf{D}, \quad (34.15)$$

$$\mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mathbf{H} \cdot \partial_t \mathbf{B}. \quad (34.16)$$

두 식과 $\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = \mathbf{H} \cdot \nabla \times \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{H}$ 를 합치면

$$\partial_t u + \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}. \quad (34.17)$$

34.10 10. 진공 파동방정식

Faraday 법칙에 curl 을 취한다.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t (\nabla \times \mathbf{B}). \quad (34.18)$$

소스 없는 진공에서 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \partial_t \mathbf{E}$, $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ 이므로

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \partial_t^2 \mathbf{E}. \quad (34.19)$$

따라서 $\nabla^2 \mathbf{E} - c^{-2} \partial_t^2 \mathbf{E} = 0$.

34.11 11. 평면파의 횡파성

$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ 를 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ 에 넣으면

$$i\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_0 = 0. \quad (34.20)$$

즉 $\mathbf{E} \perp \mathbf{k}$. Faraday 법칙은

$$i\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = i\omega \mathbf{B}_0 \quad (34.21)$$

이므로 $\mathbf{B}$ 도 $\mathbf{k}$, $\mathbf{E}$ 에 수직이다.

34.12 12. Fresnel 계수

경계면에서 접선 $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$ 연속을 쓴다. s-편파의 경우

$$E_i + E_r = E_t, \quad (34.22)$$

$$\frac{n_1}{\eta_0} (E_i - E_r) \cos \theta_i = \frac{n_2}{\eta_0} E_t \cos \theta_t. \quad (34.23)$$

두 방정식을 풀면 r_s, t_s 가 나온다. p-편파는 자기장 방향이 경계에 평행하므로 계수 위치가 바뀐다.

34.13 13. Brewster 각

p-편파 반사계수 분자가 0 이면

$$n_2 \cos \theta_i = n_1 \cos \theta_t. \quad (34.24)$$

Snell 법칙과 결합하면 $\theta_i + \theta_t = \pi/2$, 따라서

$$\tan \theta_B = n_2/n_1. \quad (34.25)$$

34.14 14. 피부깊이

좋은 도체에서 $\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}$, $\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}$. curl 을 한 번 더 취하면

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma \mathbf{E}. \quad (34.26)$$

반공간 도체에서 $E \propto e^{-\gamma z}$ 라 두면

$$\gamma = (1+i)/\delta, \quad \delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}. \quad (34.27)$$

34.15 15. 전송선 방정식

길이 Δz 의 작은 구간에 KVL 과 KCL 을 적용한다.

$$V(z) - V(z + \Delta z) = R\Delta z I + L\Delta z \partial_t I, \quad (34.28)$$

$$I(z) - I(z + \Delta z) = G\Delta z V + C\Delta z \partial_t V. \quad (34.29)$$

$\Delta z \rightarrow 0$ 극한을 취하면 telegrapher 방정식이 된다.

34.16 16. 도파관 차단

장 성분이 $e^{i\beta z}$ 에 비례할 때 횡방향 고유값이 k_c^2 이면

$$\beta^2 = k^2 - k_c^2. \quad (34.30)$$

$\omega < \omega_c$ 이면 β 가 허수가 되어 진행파가 아니라 감쇠파가 된다. 이것이 차단이다.

34.17 17. 짧은 쌍극자 복사

전류요소는 원거리에서 벡터퍼텐셜

$$A_z \simeq \frac{\mu I_0 \ell}{4\pi r} e^{ikr} \quad (34.31)$$

를 만든다. 방사장에서는 $1/r$ 항만 남기고 횡성분을 취한다.

$$E_\theta \simeq i\eta \frac{k I_0 \ell}{4\pi r} \sin \theta e^{ikr}. \quad (34.32)$$

$\langle S \rangle r^2$ 를 적분하면 복사전력이 나온다.

34.18 18. Larmor 공식의 스케일

비상대론적 가속 전하의 원거리장은

$$E_{rad} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \hat{r} \times (\hat{r} \times \mathbf{a}). \quad (34.33)$$

Poynting flux 를 구면에 대해 적분하면

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}. \quad (34.34)$$

34.19 19. Lorentz 변환으로 자기장 보기

한 계에서 순수 전기장 $\mathbf{E}$ 만 있어도 다른 계에서는

$$\mathbf{B}'_{\perp} = -\gamma \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{E}}{c^2} \quad (34.35)$$

가 생긴다. 따라서 자기력은 상대론적으로 변환된 전기력의 일부로 해석할 수 있다. 이 관점은 전류가 흐르는 도선과 움직이는 시험전하 문제에서 특히 유용하다.

34.20 20. 공변 Maxwell 방정식

$F^{\mu\nu} = \partial^{\mu} A^{\nu} - \partial^{\nu} A^{\mu}$ 로 정의하면 반대칭성 때문에

$$\partial_{\lambda} F_{\mu\nu} + \partial_{\mu} F_{\nu\lambda} + \partial_{\nu} F_{\lambda\mu} = 0 \quad (34.36)$$

이 자동으로 성립한다. 작용을 A_{μ} 에 대해 변분하면

$$\partial_{\mu} F^{\mu\nu} = \mu_0 J^{\nu} \quad (34.37)$$

가 나온다.

34.21 21. Lorentz reciprocity

두 해 $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1, \mathbf{J}_1)$, $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2, \mathbf{J}_2)$ 에 대해 Maxwell curl 식을 교차 내적하고 빼면

$$\nabla \cdot (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2. \quad (34.38)$$

부피 적분을 하면 reciprocity 정리가 된다.

34.22 22. FDTD Courant 조건의 의미

격자에서 정보가 한 시간스텝에 이동할 수 있는 수치거리보다 물리적 파동이 더 멀리 가면 불안정해진다. 3 차원 Yee 격자의 조건은

$$c\Delta t \sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2}} \leq 1. \quad (34.39)$$

이는 단순한 경험식이 아니라 이산 Fourier 모드의 증폭계수 크기가 1 이하라는 조건이다.

34.23 23. 플라즈마 진동

전자 유체를 배경 이온 위에서 조금 변위 x 시킨다. 전하분리가 전기장 $E \sim -n_e x e / \epsilon_0$ 를 만들고 전자 운동방정식은

$$m_e \ddot{x} = -eE = -\frac{n_e e^2}{\epsilon_0} x. \quad (34.40)$$

따라서

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}. \quad (34.41)$$

34.24 24. Bloch 정리

주기 매질의 Maxwell 고유연산자 $\mathcal{L}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \mathcal{L}(\mathbf{r})$ 는 병진연산자와 교환한다. 따라서 고유모드는 병진연산자의 고유함수로 잡을 수 있고

$$\mathbf{E}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (34.42)$$

이다. 이로부터 $\mathbf{E} = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 가 나온다.

34.25 25. Purcell 효과의 고전적 해석

쌍극자 소스가 방출하는 전력은 자기장이 아니라 자기 자신이 만든 산란장을 포함한 국소 전기장과 관련된다.

$$P = \frac{\omega}{2} \Im \{ \mathbf{p}^* \cdot \mathbf{E}_{\text{total}}(\mathbf{r}_0) \}. \quad (34.43)$$

Green 함수로 $\mathbf{E} \sim \omega^2 \mu_0 \mathbf{G} \cdot \mathbf{p}$ 이므로 방출률 변화는 $\Im \mathbf{G}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_0)$ 에 비례한다.

35. 연구 주제 지도

35.1 전통적 연구축

분야	핵심 방정식/도구	대표 질문
안테나/전파	Maxwell, 등 가 원 리, MoM, S-parameter	작고 넓은 대역의 고효율 안테나는 가능한가?
마이크로파/밀리미터 파	도파관, 공진기, 산란행렬	손실과 제조오차를 줄이는 구조는 무엇인가?
광자/나노포토닉스	dyadic Green, LDOS, Bloch mode	빛-물질 상호작용을 얼마나 증강할 수 있는가?
계산전자기학	FDTD/FEM/MoM/PML	수치 안정성과 물리 보존을 어떻게 보장하는가?
플라즈마	Vlasov–Maxwell, MHD	집단모드, 불안정성, 난류를 어떻게 예측하는가?
메타물질	유효 매 질, bianisotropy, homogenization	자연에 없는 파동 임피던스와 위상을 만들 수 있는가?
위상 포토닉스	Berry curvature, Chern number	결함에 강한 광전달을 만들 수 있는가?
역설계	adjoint method, topology optimization	목표 산란/모드/힘을 만족하는 구조를 자동 설계할 수 있는가?

35.2 논문을 읽을 때 표시할 것

1. 시간 convention: $e^{-i\omega t}$ 인가 $e^{+i\omega t}$ 인가?
2. 단위계: SI 인가 cgs 인가?
3. 매질: ϵ, μ, σ 가 스칼라인가 텐서인가, 분산/손실이 있는가?
4. 경계: PEC, PMC, impedance boundary, periodic, radiation condition 중 무엇인가?
5. 보존: 에너지, 전하, reciprocity, passivity 가 검증되었는가?
6. 수치: mesh, time step, PML, convergence, benchmark 가 제시되었는가?

35.3 대학원 수준으로 올라가는 추천 순서

1. 정전기 경계값 문제와 Green 함수.
2. 정자기와 자기 에너지, vector potential.
3. 시간 의존 Maxwell 방정식과 Poynting 정리.
4. 평면파, Fresnel, 도파관, 전송선.

5. 지연 퍼텐셜, 복사, 산란.
6. 상대론적 표기와 작용원리.
7. dyadic Green 함수와 수치전자기학.
8. 관심 응용: 안테나, 포토닉스, 플라즈마, 메타물질 중 하나를 깊게.

36. 참고자료와 더 깊은 공부

36.1 공개 자료

- MIT OpenCourseWare, 8.07 *Electromagnetism II*: <https://ocw.mit.edu/courses/8-07-electromagnetism-ii-fall-2012/>
- MIT OpenCourseWare, 6.013 *Electromagnetics and Applications*: <https://ocw.mit.edu/courses/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/>
- David Tong, *Lectures on Electromagnetism*: <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/justem.html>
- Feynman, Leighton, Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. II*: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html
- OpenStax, *University Physics Volume 2*: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/>
- CODATA/NIST Fundamental Physical Constants: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>

36.2 표준 고급 교재

- J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*. 대학원 고전전기역학의 표준적인 난이도.
- L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields* 및 *Electrodynamics of Continuous Media*. 이론물리적 압축도가 높다.
- J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*. 경계값 문제와 파동 이론의 고전.
- R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*. 안테나/산란/적분방정식에 강하다.
- C. A. Balanis, *Antenna Theory*. 공학적 안테나 설계 표준.
- A. Taflov and S. Hagness, *Computational Electrodynamics*. FDTD 중심.
- J. D. Joannopoulos et al., *Photonic Crystals*. 주기 매질과 밴드구조.
- L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*. 근접장, LDOS, 나노광학.

36.3 학습 루틴

1. 매일 Maxwell 방정식의 네 식을 단위와 함께 다시 쓴다.
2. 한 문제를 풀 때 “미분형, 적분형, 에너지형, 퍼텐셜형” 중 어떤 표현이 가장 짧은지 판단한다.
3. 공식을 외운 뒤에는 반드시 극한값을 확인한다: $r \rightarrow \infty$, $\omega \rightarrow 0$, $\sigma \rightarrow \infty$, $kL \ll 1$.

4. 전자공학 응용에서는 회로와 장의 경계가 어디서 무너지는지 항상 체크한다.
5. 연구 논문을 읽을 때는 새 현상보다 먼저 가정: 선형성, 상호성, 국소성, 수동성, 손실을 표시한다.

전자기학 마스터 레퍼런스

증보 부록

Maxwell 이론에서 연구 수준 전기역학까지
수식 중심 한국어 확장판

원본 100쪽 뒤에 추가되는 연구자용 확장 노트

OpenAI ChatGPT, 공개 강의자료와 표준 이론 기반 재구성

2026년 7월 7일

증보 부록의 범위와 읽는 법

이 부록은 원본 전자기학 마스터 레퍼런스의 흐름을 유지하면서, 원본에 짧게만 들어간 주제를 연구 수준으로 다시 압축한 수식 카드 모음이다. 원본이 전체 지도를 제공한다면, 이 부록은 지도 위에 더 촘촘한 좌표, 경계조건, 변분식, 수치검증식, 현대 포토닉스/플라즈마/양자 점점의 핵심 공식을 추가한다.

읽는 순서. 먼저 자신이 푸는 문제가 정전기, 정자기, 파동, 모드, 복사, 산란, 수치해석, 물질응답 중 어디에 속하는지 정한다. 그 다음 해당 장의 공식 카드를 보고, 각 카드의 조건과 검산 항목을 먼저 확인한다. 공식은 외우는 대상이 아니라, 어떤 가정이 들어가면 어떤 항이 사라지는지 추적하는 도구다.

전자공학 연결. 회로, 전송선, 안테나, 반도체 광소자, 마이크로파 네트워크, 포토닉스 설계에서 Maxwell 방정식은 항상 뒤에 있다. 회로식이 맞는 이유와 무너지는 조건을 전자기장 관점에서 동시에 보는 연습을 목표로 한다.

주의. 모든 식은 SI와 $e^{-i\omega t}$ convention을 기본으로 하되, 카드마다 예외를 적었다. 논문이나 교재를 읽을 때는 단위계, 시간 convention, 매질 가정, 경계조건, 손실/분산 여부를 반드시 먼저 표시하라.

Contents

증보 부록의 범위와 읽는 법	i
I 증보 공식 아틀라스	1
1 고급 벡터해석, 분포, Green 함수	5
F073. Levi-Civita 축약 항등식	6
F074. dyadic 곱과 trace	7
F075. 벡터 Laplacian	8
F076. 분포 미분의 정의	9
F077. surface delta	10
F078. Hadamard finite part의 스케일	11
F079. Poisson Green 함수의 정규화	12
F080. Helmholtz outgoing Green 함수	13
F081. Sommerfeld 방사조건	14
F082. Fourier 표현의 Green 함수	15
F083. Helmholtz 분해의 투영자	16
F084. Hodge-Helmholtz 경계 의존성	17
F085. Green 두 번째 항등식	18
F086. Fredholm 적분방정식 표기	19
F087. stationary phase 근사	20
F088. steepest descent와 복소 파수	21
F089. 벡터 구면조화함수의 직교성	22
F090. Bessel Wronskian	23
F091. Legendre 덧셈정리	24
2 Maxwell 구조, 보존법칙, 게이지	25
F092. 미분형과 적분형의 동치	26
F093. 전하 보존의 국소성	27
F094. 퍼텐셜과 gauge orbit	28

F095. Lorenz 게이지 파동방정식	29
F096. Coulomb 게이지의 중첩 분리	30
F097. Poynting 정리 일반형	31
F098. 복소 phasor 평균전력	32
F099. 분산 매질의 Brillouin 에너지	33
F100. Maxwell stress tensor	34
F101. 운동량 보존	35
F102. 각운동량 밀도	36
F103. Abraham-Minkowski 운동량 표기	37
F104. Noether 전류의 구조	38
F105. 전하 보존과 gauge 불변성	39
F106. duality rotation	40
F107. magnetic monopole가 있을 때	41
F108. Dirac 양자화 조건	42
F109. 에너지 속도	43
F110. passivity의 주파수 영역 조건	44
F111. reciprocity의 미분형 출발점	45
3 정전기 경계값 문제와 다중극	47
F112. Poisson 방정식과 Green 표현	48
F113. Dirichlet 유일성 정리	49
F114. Neumann 조건의 compatibility	50
F115. 영상법: 접지 평면	51
F116. 영상법: 접지 구	52
F117. 구면 다중극 전개	53
F118. 축대칭 Laplace 해	54
F119. 전기쌍극자의 분포 표현	55
F120. 사중극자 텐서	56
F121. 축전기 행렬	57
F122. 전기장 에너지와 힘	58
F123. 도체 표면 압력	59
F124. Kelvin inversion	60
F125. conformal mapping 장 변환	61
F126. Schwarz-Christoffel 변환	62
F127. 원통 좌표 Green 전개	63
F128. 전기장 경계조건 각도 법칙	64
F129. Maxwell capacitance reciprocity	65

F130. Green 함수의 고유함수 전개	66
F131. 평행판 fringing의 스케일	67
F132. Robin 경계조건	68
F133. 정전기 Maxwell stress 힘	69
F134. 분극체의 등가 전하	70
F135. 국소장 Lorentz cavity	71
F136. 정전기 virial 형태	72
4 정자기, 자성체, 준정적 근사	73
F137. 정자기 Coulomb gauge	74
F138. Biot-Savart 선전류	75
F139. 벡터퍼텐셜의 다중극	76
F140. 자기쌍극자의 델타 항	77
F141. 자화 전류	78
F142. 자기 scalar potential	79
F143. demagnetizing field	80
F144. 인덕턴스 행렬	81
F145. Neumann 공식	82
F146. 자기 에너지	83
F147. Faraday 일반 emf	84
F148. 전하 완화 시간	85
F149. 피부효과 복소 파수	86
F150. 표면 임피던스	87
F151. EQS 조건	88
F152. MQS 조건	89
F153. 자기회로 근사	90
F154. 히스테리시스 손실	91
F155. 복소 투자율 손실	92
F156. 자기력의 에너지법	93
5 파동, 경계, 분산 광학	95
F157. phasor Maxwell convention	96
F158. 균일 매질 평면파	97
F159. 복소 굴절률과 감쇠	98
F160. 도체의 복소 유전율	99
F161. 편파 타원	100
F162. Jones matrix	101

F163. Mueller-Stokes 변환	102
F164. Fresnel s 계수	103
F165. Fresnel p 계수	104
F166. Brewster 조건 일반형	105
F167. 전반사 evanescent decay	106
F168. Goos-Hanchen shift	107
F169. 다층막 transfer matrix	108
F170. quarter-wave stack	109
F171. Drude 전도도	110
F172. Lorentz oscillator	111
F173. Kramers-Kronig	112
F174. 비등방 Fresnel 방정식	113
F175. ordinary-extraordinary wave	114
F176. Faraday rotation	115
F177. group velocity	116
F178. causality와 analytic upper half-plane	117
F179. negative index sign choice	118
F180. 표면 플라즈몬 polariton	119
6 전송선, 도파관, 공진기, 마이크로파 네트워크	121
F181. telegrapher 방정식 phasor	122
F182. 특성 임피던스	123
F183. 입력 임피던스	124
F184. 반사계수와 Smith map	125
F185. quarter-wave transformer	126
F186. ABCD 행렬	127
F187. S-parameter power normalization	128
F188. rectangular waveguide cutoff	129
F189. TE 모드 횡장	130
F190. TM 모드 횡장	131
F191. TE ₁₀ mode	132
F192. 원형 도파관	133
F193. 위상속도와 군속도	134
F194. wave impedance	135
F195. 공진기 고유값	136
F196. Q factor	137
F197. cavity perturbation	138

F198. coupled-mode single resonance	139
F199. critical coupling	140
F200. Bloch impedance in periodic line	141
F201. microstrip quasi-TEM	142
F202. loss tangent	143
F203. conductor attenuation	144
F204. network reciprocity	145
F205. Bode-Fano 한계의 형태	146
7 복사, 안테나, 산란, 원거리장	147
F206. retarded potentials	148
F207. Lienard-Wiechert potentials	149
F208. 가속 전하 복사장	150
F209. Larmor-Lienard power	151
F210. 전기쌍극자 복사	152
F211. Hertzian dipole	153
F212. half-wave dipole pattern	154
F213. Friis transmission	155
F214. array factor	156
F215. uniform linear array	157
F216. aperture Fourier relation	158
F217. radar equation	159
F218. scattering amplitude	160
F219. optical theorem	161
F220. Rayleigh scattering	162
F221. Mie coefficients	163
F222. partial-wave cross section	164
F223. radiation reaction scale	165
F224. Landau-Lifshitz reduction	166
F225. equivalence principle radiation	167
F226. physical optics approximation	168
F227. RCS of large sphere scale	169
F228. bound states in continuum	170
F229. Fano line shape	171
8 상대론적 전자기학과 작용원리	173
F230. 4-potential과 field tensor	174

F231. covariant Maxwell	175
F232. dual tensor	176
F233. 전자기 불변량	177
F234. 장 변환 일반형	178
F235. 4-current continuity	179
F236. particle action	180
F237. field action	181
F238. Lorenz gauge covariant form	182
F239. retarded solution covariant	183
F240. energy-momentum tensor	184
F241. proper fields classification	185
F242. constant crossed field invariants	186
F243. Lienard-Wiechert retarded time	187
F244. radiation formation length scale	188
F245. synchrotron critical frequency	189
F246. covariant Lorentz force density	190
F247. differential forms	191
F248. topological theta term	192
F249. stress tensor trace	193
9 계산전자기학, 역설계, 수치 검증	195
F250. Yee update	196
F251. Courant stability	197
F252. Yee numerical dispersion 1D	198
F253. ADE Drude update	199
F254. PML coordinate stretch	200
F255. FEM weak form	201
F256. edge element tangential continuity	202
F257. spurious mode 제거 조건	203
F258. MoM EFIE	204
F259. MFIE principal value	205
F260. CFIE	206
F261. BEM single/double layer	207
F262. near-to-far transform	208
F263. discrete divergence check	209
F264. energy balance check	210
F265. mesh convergence	211

F266. adjoint gradient	212
F267. frequency-domain Maxwell matrix	213
F268. topology optimization filter	214
F269. model order reduction	215
F270. domain decomposition	216
F271. periodic/Bloch boundary	217
F272. Poynting flux monitor	218
F273. uncertainty propagation	219
10 플라즈마와 빔 전자기학	221
F274. plasma frequency and Debye length	222
F275. cyclotron and gyro radius	223
F276. Vlasov equation	224
F277. moments of distribution	225
F278. two-fluid momentum	226
F279. cold plasma tensor	227
F280. Appleton-Hartree 구조	228
F281. Langmuir wave	229
F282. ion acoustic wave	230
F283. Alfvén wave	231
F284. MHD induction	232
F285. frozen-in condition	233
F286. Grad-Shafranov equation	234
F287. Landau damping integral	235
F288. ponderomotive force	236
F289. beam perveance scaling	237
F290. Child-Langmuir law	238
F291. wakefield impedance	239
F292. magnetic reconnection Lundquist number	240
F293. plasma beta	241
11 포토닉스, 메타물질, 위상 전자기학	243
F294. photonic crystal eigenproblem	244
F295. band gap condition	245
F296. effective medium scale	246
F297. Maxwell-Garnett	247
F298. Bruggeman formula	248

F299. bianisotropic constitutive law	249
F300. GSTC metasurface	250
F301. Huygens metasurface condition	251
F302. phase gradient refraction	252
F303. surface impedance sheet	253
F304. plasmonic resonance of small sphere	254
F305. LDOS Green tensor	255
F306. Purcell factor Green form	256
F307. coupled resonator waveguide	257
F308. temporal coupled mode reciprocity	258
F309. Berry connection	259
F310. Chern number	260
F311. discrete Berry curvature	261
F312. bulk-edge correspondence	262
F313. non-Hermitian exceptional point	263
F314. parity-time condition	264
F315. BIC topological charge	265
F316. epsilon-near-zero scaling	266
F317. hyperbolic dispersion	267
F318. transformation optics	268
12 양자, 잡음, Casimir, 고전-양자 접점	269
F319. minimal coupling	270
F320. Aharonov-Bohm phase	271
F321. Landau levels	272
F322. Zeeman coupling	273
F323. quantized vector potential	274
F324. photon Hamiltonian	275
F325. spontaneous emission rate	276
F326. Fermi golden rule	277
F327. Jaynes-Cummings coupling	278
F328. strong coupling criterion	279
F329. blackbody density of states	280
F330. Stefan-Boltzmann law	281
F331. fluctuation-dissipation theorem	282
F332. Johnson-Nyquist noise	283
F333. Casimir pressure ideal plates	284

F334. Lifshitz free energy structure	285
F335. local density of states and $\text{Im } G$	286
F336. optical theorem quantum Green	287
F337. Pauli Hamiltonian	288
F338. Schwinger critical field	289
 II 대표 유도 증보편	 291
 13 대표 유도 D026–D085	 295
D026. Green 첫 항등식에서 유일성 정리	296
D027. 접지 구 영상전하의 위치	297
D028. 다중극 전개와 traceless 사중극자	298
D029. Clausius-Mossotti 식	299
D030. 자기쌍극자의 δ 항	300
D031. Poynting 정리	301
D032. Maxwell stress tensor로 힘 구하기	302
D033. Lorenz gauge에서 지연퍼텐셜	303
D034. 평면파 횡파성	304
D035. Fresnel 계수	305
D036. Brewster 각	306
D037. 피부깊이	307
D038. telegrapher 방정식	308
D039. $\lambda/4$ 변압기	309
D040. 도파관 차단	310
D041. 공진기 perturbation	311
D042. 짧은 쌍극자 복사저항	312
D043. Larmor 공식	313
D044. optical theorem	314
D045. Mie Rayleigh 극한	315
D046. Lorentz 변환으로 자기장 얻기	316
D047. 작용 변분으로 Maxwell 방정식	317
D048. Noether와 전하보존	318
D049. FDTD Courant 조건	319
D050. Yee 수치분산	320
D051. PML 좌표 stretching	321
D052. FEM 약형	322
D053. MoM 행렬화	323

D054. adjoint gradient	324
D055. Vlasov moment 방정식	325
D056. 플라즈마 진동	326
D057. Alfvén 속도	327
D058. MHD frozen-in flux	328
D059. Landau damping contour	329
D060. Bloch 정리	330
D061. Chern 수의 정수성	331
D062. GSTC 유도	332
D063. Purcell factor	333
D064. Aharonov-Bohm 위상	334
D065. Landau level	335
D066. Casimir 압력	336
D067. fluctuation-dissipation	337
D068. Johnson noise	338
D069. surface plasmon 조건	339
D070. Bode-Fano 한계	340
D071. reciprocity 정리	341
D072. Huygens 원리	342
D073. Green tensor LDOS	343
D074. passivity와 Kramers-Kronig	344
D075. 비등방 고유값 문제	345
D076. Hamiltonian optics eikonal	346
D077. geometric phase of polarization	347
D078. optical force dipole	348
D079. Maxwell-Garnett dilute limit	349
D080. ray impedance matching	350
D081. Gaussian beam waist	351
D082. Fraunhofer 조건	352
D083. Fraunhofer diffraction integral	353
 III 연구 문제와 논문 읽기 체크카드	 355
 14 연구 체크카드 R005–R034	 359
R005. 논문 읽기 1: 시간 convention	360
R006. 논문 읽기 2: 단위계	361
R007. 논문 읽기 3: reciprocity 판정	362

R008. 논문 읽기 4: passivity 판정	363
R009. 수치 검증 1: 수렴률	364
R010. 수치 검증 2: 에너지 보존	365
R011. 수치 검증 3: reciprocity benchmark	366
R012. 실험 연결 1: VNA calibration	367
R013. 실험 연결 2: material retrieval	368
R014. 실험 연결 3: Q extraction	369
R015. 안테나 연구: Chu bound scale	370
R016. 메타표면 연구: 목표 위상	371
R017. 포토닉 결정 연구: gap-midgap ratio	372
R018. 나노포토닉스 연구: mode volume	373
R019. 플라즈마 연구: instability growth	374
R020. 역설계 연구: objective	375
R021. 열복사 연구: view factor	376
R022. Casimir 연구: imaginary frequency	377
R023. 양자광학 연구: cooperativity	378
R024. 위상광학 연구: gap Chern sum	379
R025. 비선형광학 연구: phase matching	380
R026. THG/FWM 연구	381
R027. 광힘 연구: stress tensor integration	382
R028. 도파관 연구: group index	383
R029. 통신 연결: link budget	384
R030. EMC 연결: shielding effectiveness	385
R031. 반도체 연결: plasma dispersion	386
R032. 그래핀 광학	387
R033. 2D materials boundary	388
R034. 최종 검산 루프	389
증보판 참고자료	391
마지막 10분 복습 루틴	395

Part I

증보 공식 아틀라스

이 Part는 원본의 F001–F072 뒤에 이어지는 F073 이후의 공식 카드다. 각 카드는 한 페이지 안에서 핵심식, 적용 조건, 유도 뼈대, 검산법을 함께 보도록 설계했다.

Chapter 1

고급 벡터해석, 분포, Green 함수

분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다.

F073. Levi-Civita 축약 항등식

핵심식.

$$\begin{aligned}\epsilon_{ijk}\epsilon_{ilm} &= \delta_{jl}\delta_{km} - \delta_{jm}\delta_{kl}, \\ (\mathbf{a} \times \mathbf{b})_i &= \epsilon_{ijk}a_jb_k\end{aligned}\tag{F073}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지만 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F074. dyadic 곱과 trace

핵심식.

$$\begin{aligned}(\mathbf{ab})_{ij} &= a_i b_j, \\ (\mathbf{ab}) \cdot \mathbf{c} &= \mathbf{a}(\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}), \\ \text{Tr}(\mathbf{ab}) &= \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}\end{aligned}\tag{F074}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F075. 벡터 Laplacian

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla^2 \mathbf{A} &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}), \\ (\nabla^2 \mathbf{A})_i &= \partial_j \partial_j A_i\end{aligned}\tag{F075}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F076. 분포 미분의 정의

핵심식.

$$\int f(\mathbf{r}) \partial_i \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) d^3r = -\partial_i f(\mathbf{r}_0), \quad (\text{F076})$$

$$\nabla \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = -\nabla_0 \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F077. surface delta**핵심식.**

$$\int_V f(\mathbf{r}) \delta_S(\mathbf{r}) dV = \int_S f(\mathbf{r}) da, \quad (F077)$$

$$\delta_S(\mathbf{r}) = \delta(g(\mathbf{r})) |\nabla g| \quad (S : g = 0)$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F078. Hadamard finite part의 스케일

핵심식.

$$\text{FP} \int_{r>a} \frac{d^3r}{r^4} = 4\pi \text{FP} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2}, \quad (\text{F078})$$

singularity $\sim a^{-1}$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F079. Poisson Green 함수의 정규화

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla^2 \frac{1}{4\pi R} &= -\delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \\ G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \frac{1}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\end{aligned}\tag{F079}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F080. Helmholtz outgoing Green 함수

핵심식.

$$\begin{aligned} (\nabla^2 + k^2)G^{(+)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= -\delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \\ G^{(+)} &= \frac{e^{ikR}}{4\pi R}, \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \end{aligned} \quad (\text{F080})$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F081. Sommerfeld 방사조건

핵심식.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left(\frac{\partial G}{\partial R} - ikG \right) = 0, \quad (F081)$$

$$G \sim \frac{e^{ikR}}{4\pi R}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F082. Fourier 표현의 Green 함수

핵심식.

$$G^{(+)}(\mathbf{R}) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}}}{k^2 - k_0^2 - i0^+}, \quad (\text{F082})$$

$$\frac{1}{x \mp i0^+} = \mathcal{P} \frac{1}{x} \pm i\pi\delta(x)$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F083. Helmholtz 분해의 투영자

핵심식.

$$\begin{aligned} P_{ij}^L(\mathbf{k}) &= \frac{k_i k_j}{k^2}, \\ P_{ij}^T(\mathbf{k}) &= \delta_{ij} - \frac{k_i k_j}{k^2}, \\ \tilde{\mathbf{V}} &= \tilde{\mathbf{V}}_L + \tilde{\mathbf{V}}_T \end{aligned} \tag{F083}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F084. Hodge-Helmholtz 경계 의존성

핵심식.

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= -\nabla\Phi + \nabla \times \mathbf{A} + \mathbf{H}_0, \\ \nabla^2\Phi &= -\nabla \cdot \mathbf{V}, \quad \nabla^2\mathbf{A} = -\nabla \times \mathbf{V} \end{aligned} \tag{F084}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F085. Green 두 번째 항등식

핵심식.

$$\int_V (\phi \nabla^2 \psi - \psi \nabla^2 \phi) dV = \oint_{\partial V} (\phi \partial_n \psi - \psi \partial_n \phi) da \quad (\text{F085})$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F086. Fredholm 적분방정식 표기

핵심식.

$$\phi(\mathbf{r}) - \lambda \int K(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \phi(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' = f(\mathbf{r}), \quad (\text{F086})$$

$$\det(I - \lambda K) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{mode/resonance}$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F087. stationary phase 근사

핵심식.

$$I(k) = \int a(x) e^{ikS(x)} dx,$$

$$I(k) \sim \sum_{S'(x_s)=0} a(x_s) e^{ikS(x_s) + i\pi \operatorname{sgn} S''/4} \sqrt{\frac{2\pi}{k|S''(x_s)|}} \quad (\text{F087})$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F088. steepest descent와 복소 파수

핵심식.

$$\int_{\Gamma} e^{ikS(z)} a(z) dz \sim \sum_s e^{ikS(z_s)} a(z_s) \sqrt{\frac{2\pi}{kS''(z_s)}}, \quad (F088)$$

$$S'(z_s) = 0$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F089. 벡터 구면조화함수의 직교성

핵심식.

$$\mathbf{X}_{\ell m} = \frac{1}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} \mathbf{L} Y_{\ell m},$$

$$\int \mathbf{X}_{\ell m}^* \cdot \mathbf{X}_{\ell' m'} d\Omega = \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'} \quad (\text{F089})$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F090. Bessel Wronskian

핵심식.

$$\begin{aligned} J_m(x)Y'_m(x) - J'_m(x)Y_m(x) &= \frac{2}{\pi x}, \\ J_{m-1}(x) - J_{m+1}(x) &= 2J'_m(x) \end{aligned} \quad (\text{F090})$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F091. Legendre 덧셈정리

핵심식.

$$P_\ell(\cos \gamma) = \frac{4\pi}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} Y_{\ell m}(\Omega) Y_{\ell m}^*(\Omega'), \quad (\text{F091})$$

$$\cos \gamma = \hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{r}}'$$

조건. 분포론과 연산자 항등식은 특이 소스, 경계 적분, 산란 이론의 공통 언어다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 2

Maxwell 구조, 보존법칙, 게이지

Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다.

F092. 미분형과 적분형의 동치

핵심식.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_f, & \oint_{\partial V} \mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, da &= Q_f, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\partial_t \mathbf{B}, & \oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} &= -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \end{aligned} \quad (\text{F092})$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F093. 전하 보존의 국소성

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) &= 0, \\ \partial_t \rho_f + \nabla \cdot \mathbf{J}_f &= 0\end{aligned}\tag{F093}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F094. 퍼텐셜과 gauge orbit

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{E} &= -\nabla\phi - \partial_t \mathbf{A}, \\ \mathbf{A}' &= \mathbf{A} + \nabla\chi, \quad \phi' = \phi - \partial_t \chi\end{aligned}\tag{F094}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F095. Lorenz 게이지 파동방정식

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \partial_t \phi &= 0, \\ \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \right) \phi &= -\rho / \epsilon_0, \\ \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \right) \mathbf{A} &= -\mu_0 \mathbf{J}\end{aligned}\tag{F095}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F096. Coulomb 게이지의 종횡 분리

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{A} &= 0, \\ \nabla^2 \phi &= -\rho/\epsilon_0, \\ (\nabla^2 - c^{-2}\partial_t^2) \mathbf{A} &= -\mu_0 \mathbf{J}_T\end{aligned}\tag{F096}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F097. Poynting 정리 일반형

핵심식.

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} &= -\mathbf{J}_f \cdot \mathbf{E}, \\ u &= \frac{1}{2}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}), \\ \mathbf{S} &= \mathbf{E} \times \mathbf{H}\end{aligned}\tag{F097}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F098. 복소 phasor 평균전력

핵심식.

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{S} \rangle &= \frac{1}{2} \text{Re}(\tilde{\mathbf{E}} \times \tilde{\mathbf{H}}^*), \\ \langle p_{\text{loss}} \rangle &= \frac{1}{2} \text{Re}(\tilde{\mathbf{J}} \cdot \tilde{\mathbf{E}}^*)\end{aligned}\tag{F098}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F099. 분산 매질의 Brillouin 에너지

핵심식.

$$\langle u \rangle = \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{E}}^* \cdot \frac{\partial(\omega\epsilon)}{\partial\omega} \tilde{\mathbf{E}} + \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{H}}^* \cdot \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} \tilde{\mathbf{H}} \quad (\text{F099})$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F100. Maxwell stress tensor

핵심식.

$$T_{ij} = \epsilon_0 \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right), \quad (\text{F100})$$

$$f_i = \rho E_i + (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_i$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F101. 운동량 보존

핵심식.

$$\mathbf{g} = \epsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{S}}{c^2}, \quad (\text{F101})$$

$$\partial_t g_i + \partial_j T_{ij} = -f_i$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F102. 각운동량 밀도

핵심식.

$$\begin{aligned} \ell_{\text{EM}} &= \mathbf{r} \times \mathbf{g}, \\ \frac{d}{dt} \int_V \ell_{\text{EM}} dV &= - \int_V \mathbf{r} \times \mathbf{f} dV - \oint \mathbf{r} \times (T \cdot \hat{\mathbf{n}}) da \end{aligned} \quad (\text{F102})$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F103. Abraham-Minkowski 운동량 표기

핵심식.

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_A &= \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}}{c^2}, \\ \mathbf{g}_M &= \mathbf{D} \times \mathbf{B}, \\ \mathbf{f}_{\text{material}} &= \partial_t(\mathbf{g}_M - \mathbf{g}_A) + \cdots \end{aligned} \tag{F103}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F104. Noether 전류의 구조

핵심식.

$$\begin{aligned}\delta\mathcal{L} &= \partial_\mu K^\mu, \\ J_{\text{Noether}}^\mu &= \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu q_a)} \delta q_a - K^\mu, \\ \partial_\mu J_{\text{Noether}}^\mu &= 0\end{aligned}\tag{F104}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F105. 전하 보존과 gauge 불변성

핵심식.

$$\begin{aligned} S_{\text{int}} &= - \int J^\mu A_\mu d^4x, \\ A_\mu &\rightarrow A_\mu + \partial_\mu \chi, \\ \Delta S_{\text{int}} &= \int \chi \partial_\mu J^\mu d^4x \end{aligned} \tag{F105}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F106. duality rotation

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}' &= \mathbf{E} \cos \theta + c\mathbf{B} \sin \theta, \\ c\mathbf{B}' &= c\mathbf{B} \cos \theta - \mathbf{E} \sin \theta\end{aligned}\tag{F106}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F107. magnetic monopole가 있을 때

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{B} &= \mu_0 \rho_m, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\partial_t \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{J}_m, \\ \partial_t \rho_m + \nabla \cdot \mathbf{J}_m &= 0\end{aligned}\tag{F107}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F108. Dirac 양자화 조건

핵심식.

$$\begin{aligned} qg &= 2\pi n\hbar, \\ \frac{q\Phi_B}{\hbar} &= 2\pi n \end{aligned} \tag{F108}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F109. 에너지 속도

핵심식.

$$v_E = \frac{\int_A \langle S_z \rangle dA}{\int_A \langle u \rangle dA}, \quad (\text{F109})$$

$$v_E = v_g \quad (\text{손실이 작고 단일 모드일 때})$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F110. passivity의 주파수 영역 조건

핵심식.

$$\begin{aligned}\omega \operatorname{Im} \epsilon(\omega) &\geq 0, \\ \omega \operatorname{Im} \mu(\omega) &\geq 0, \\ \langle p_{\text{abs}} \rangle &\geq 0\end{aligned}\tag{F110}$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F111. reciprocity의 미분형 출발점

핵심식.

$$\nabla \cdot (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 \quad (\text{F111})$$

조건. Maxwell 방정식은 국소 보존법칙, 에너지-운동량, 게이지 자유도를 동시에 묶는다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 3

정전기 경계값 문제와 다중극

정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다.

F112. Poisson 방정식과 Green 표현

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla^2 \phi &= -\rho/\epsilon_0, \\ \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V G_D(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \rho(\mathbf{r}') d^3 r' - \oint_{\partial V} \phi(\mathbf{r}') \partial_{n'} G_D da'\end{aligned}\tag{F112}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F113. Dirichlet 유일성 정리

핵심식.

$$\begin{aligned} \psi &= \phi_1 - \phi_2, & \nabla^2 \psi &= 0, \\ \int_V |\nabla \psi|^2 dV &= \oint_{\partial V} \psi \partial_n \psi da = 0 \end{aligned} \quad (\text{F113})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F114. Neumann 조건의 compatibility

핵심식.

$$\begin{aligned} \partial_n \phi|_{\partial V} &= g, \\ \int_V \rho \, dV &= -\epsilon_0 \oint_{\partial V} g \, da, \\ \phi &\rightarrow \phi + \text{constant} \end{aligned} \tag{F114}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F115. 영상법: 접지 평면

핵심식.

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z + a)^2}} \right), \quad (\text{F115})$$

$$\sigma(\rho) = -\frac{qa}{2\pi(\rho^2 + a^2)^{3/2}}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F116. 영상법: 접지 구

핵심식.

$$\begin{aligned} q' &= -\frac{R}{a}q, & b &= \frac{R^2}{a}, \\ \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{|\mathbf{r} - a\hat{\mathbf{z}}|} + \frac{q'}{|\mathbf{r} - b\hat{\mathbf{z}}|} \right) \end{aligned} \quad (\text{F116})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F117. 구면 다중극 전개

핵심식.

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \frac{4\pi}{2\ell+1} \frac{r_{<}^{\ell}}{r_{>}^{\ell+1}} Y_{\ell m}(\Omega) Y_{\ell m}^*(\Omega') \quad (\text{F117})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F118. 축대칭 Laplace 해

핵심식.

$$\phi(r, \theta) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \left(A_{\ell} r^{\ell} + B_{\ell} r^{-\ell-1} \right) P_{\ell}(\cos \theta) \quad (\text{F118})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F119. 전기쌍극자의 분포 표현

핵심식.

$$\begin{aligned}\rho(\mathbf{r}) &= -\mathbf{p} \cdot \nabla \delta^{(3)}(\mathbf{r}), \\ \phi(\mathbf{r}) &= \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{4\pi\epsilon_0 r^2}\end{aligned}\tag{F119}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F120. 사중극자 텐서

핵심식.

$$Q_{ij} = \int \rho(\mathbf{r})(3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d^3r, \quad (F120)$$

$$\phi_Q = \frac{1}{8\pi\epsilon_0 r^3} Q_{ij} \hat{r}_i \hat{r}_j$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F121. 축전기 행렬

핵심식.

$$\begin{aligned} Q_i &= \sum_j C_{ij} V_j, \\ U &= \frac{1}{2} \sum_{ij} C_{ij} V_i V_j, \\ C_{ij} &= C_{ji} \end{aligned} \tag{F121}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F122. 전기장 에너지와 힘

핵심식.

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 d^3r, \quad (F122)$$

$$F_x = - \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_Q, \quad F_x = + \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_V$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F123. 도체 표면 압력

핵심식.

$$p_{\text{el}} = \frac{1}{2}\epsilon_0 E_{\perp}^2 = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}, \quad (\text{F123})$$

$$\mathbf{f}_s = p_{\text{el}}\hat{\mathbf{n}}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F124. Kelvin inversion

핵심식.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}' &= \frac{a^2}{r^2} \mathbf{r}, \\ \phi'(\mathbf{r}') &= \frac{a}{r'} \phi(\mathbf{r}), \\ \nabla'^2 \phi' &= 0 \quad (\nabla^2 \phi = 0) \end{aligned} \tag{F124}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F125. conformal mapping 장 변환

핵심식.

$$\begin{aligned} w &= \phi + i\psi, & E_x - iE_y &= -\frac{dw}{dz}, \\ \phi(z) &= \operatorname{Re} W(z) \end{aligned} \quad (\text{F125})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F126. Schwarz-Christoffel 변환

핵심식.

$$\frac{dz}{d\zeta} = C \prod_j (\zeta - \zeta_j)^{\alpha_j/\pi - 1},$$

$$\sum_j \alpha_j = (N - 2)\pi$$
(F126)

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F127. 원통 좌표 Green 전개

핵심식.

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\phi-\phi')} \int_0^{\infty} I_m(k\rho_{<}) K_m(k\rho_{>}) \cos k(z-z') dk \quad (\text{F127})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F128. 전기장 경계조건 각도 법칙

핵심식.

$$\begin{aligned} E_{1\parallel} &= E_{2\parallel}, & \epsilon_1 E_{1\perp} &= \epsilon_2 E_{2\perp}, \\ \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} &= \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \end{aligned} \quad (\text{F128})$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F129. Maxwell capacitance reciprocity

핵심식.

$$\begin{aligned} C_{ij} &= -\epsilon \oint_{S_i} \partial_n \phi_j \, da, \\ C_{ij} &= C_{ji} \end{aligned} \tag{F129}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F130. Green 함수의 고유함수 전개

핵심식.

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \sum_n \frac{u_n(\mathbf{r})u_n^*(\mathbf{r}')}{\lambda_n}, \quad (\text{F130})$$

$$-\nabla^2 u_n = \lambda_n u_n$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F131. 평행판 fringing의 스케일

핵심식.

$$C \simeq \epsilon \frac{A}{d} \left[1 + O\left(\frac{d}{\sqrt{A}}\right) \right], \quad (F131)$$

$$E_{\text{edge}} \sim E_0 O(1)$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F132. Robin 경계조건

핵심식.

$$\begin{aligned} a\phi + b\partial_n\phi &= f \quad \text{on } \partial V, \\ G_R : \quad aG_R + b\partial_n G_R &= 0 \end{aligned} \tag{F132}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F133. 정전기 Maxwell stress 힘

핵심식.

$$\mathbf{F} = \oint_S \mathbf{T} \cdot \hat{\mathbf{n}} da, \quad (F133)$$

$$T_{ij} = \epsilon_0(E_i E_j - \delta_{ij} E^2/2)$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F134. 분극체의 등가 전하

핵심식.

$$\begin{aligned}\rho_b &= -\nabla \cdot \mathbf{P}, \\ \sigma_b &= \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}, \\ \mathbf{p} &= \int \mathbf{P} d^3r\end{aligned}\tag{F134}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F135. 국소장 Lorentz cavity

핵심식.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{loc}} &= \mathbf{E} + \frac{\mathbf{P}}{3\epsilon_0}, \\ \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} &= \frac{N\alpha_m}{3\epsilon_0} \end{aligned} \tag{F135}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F136. 정전기 virial 형태

핵심식.

$$\begin{aligned}\int \rho \mathbf{r} \cdot \nabla \phi \, d^3r &= - \int \rho \phi \, d^3r, \\ U &= \frac{1}{2} \int \rho \phi \, d^3r\end{aligned}\tag{F136}$$

조건. 정전기 문제는 Poisson/Laplace 방정식과 경계조건의 결합으로 환원된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 4

정자기, 자성체, 준정적 근사

정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다.

F137. 정자기 Coulomb gauge

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{A} &= 0, \\ \nabla^2 \mathbf{A} &= -\mu_0 \mathbf{J}, \\ \mathbf{A}(\mathbf{r}) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{R} d^3r'\end{aligned}\tag{F137}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F138. Biot-Savart 선전류

핵심식.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\boldsymbol{\ell}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (\text{F138})$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F139. 벡터퍼텐셜의 다중극

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{A}(\mathbf{r}) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} + O(r^{-3}), \\ \mathbf{m} &= \frac{1}{2} \int \mathbf{r}' \times \mathbf{J}(\mathbf{r}') d^3r'\end{aligned}\tag{F139}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F140. 자기쌍극자의 델타 항

핵심식.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \{3\hat{\mathbf{r}}(\mathbf{m} \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{m}\} + \frac{2\mu_0}{3} \mathbf{m} \delta^{(3)}(\mathbf{r}) \quad (\text{F140})$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F141. 자화 전류

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{J}_b &= \nabla \times \mathbf{M}, \\ \mathbf{K}_b &= \mathbf{M} \times \hat{\mathbf{n}}, \\ \mathbf{H} &= \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}\end{aligned}\tag{F141}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F142. 자기 scalar potential

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H} = -\nabla \Phi_m, \\ \nabla \cdot (\mu \nabla \Phi_m) &= 0\end{aligned}\tag{F142}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F143. demagnetizing field

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{H}_{\text{in}} &= \mathbf{H}_0 - N\mathbf{M}, \\ \mathbf{M} &= \chi_m \mathbf{H}_{\text{in}}, \\ \chi_{\text{eff}} &= \frac{\chi_m}{1 + N\chi_m}\end{aligned}\tag{F143}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F144. 인덕턴스 행렬

핵심식.

$$\begin{aligned}\Phi_i &= \sum_j L_{ij} I_j, \\ U &= \frac{1}{2} \sum_{ij} L_{ij} I_i I_j, \\ L_{ij} &= L_{ji}\end{aligned}\tag{F144}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F145. Neumann 공식

핵심식.

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\boldsymbol{\ell}_1 \cdot d\boldsymbol{\ell}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \quad (\text{F145})$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F146. 자기 에너지

핵심식.

$$U = \frac{1}{2} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} d^3r = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} d^3r \quad (\text{F146})$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F147. Faraday 일반 emf

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= \oint_{C(t)} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\boldsymbol{\ell}, \\ \mathcal{E} &= -\frac{d}{dt} \int_{S(t)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}\end{aligned}\tag{F147}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F148. 전하 완화 시간

핵심식.

$$\begin{aligned}\partial_t \rho + \frac{\sigma}{\epsilon} \rho &= 0, \\ \tau_c &= \frac{\epsilon}{\sigma}\end{aligned}\tag{F148}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F149. 피부효과 복소 파수

핵심식.

$$\begin{aligned}\gamma^2 &= i\omega\mu(\sigma - i\omega\epsilon), \\ \delta &= \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (\sigma \gg \omega\epsilon)\end{aligned}\tag{F149}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F150. 표면 임피던스

핵심식.

$$Z_s = \frac{E_t}{H_t} = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}}, \quad (F150)$$

$$R_s = \text{Re } Z_s$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F151. EQS 조건

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &\approx 0, \\ \frac{|\partial_t \mathbf{B}|L}{|\mathbf{E}|} &\sim (kL)^2 \ll 1\end{aligned}\tag{F151}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F152. MQS 조건

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{J} &\approx 0, \\ \frac{|\partial_t \mathbf{D}|}{|\mathbf{J}|} &\sim \frac{\omega \epsilon}{\sigma} \ll 1\end{aligned}\tag{F152}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F153. 자기회로 근사

핵심식.

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \\ \mathcal{F} &= NI, \\ \mathcal{R} &= \int \frac{d\ell}{\mu A}\end{aligned}\tag{F153}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F154. 히스테리시스 손실

핵심식.

$$\begin{aligned} W_{\text{loss/vol}} &= \oint H \, dB, \\ P_{\text{loss}} &= f \oint H \, dB \end{aligned} \tag{F154}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F155. 복소 투자율 손실

핵심식.

$$\begin{aligned}\mu &= \mu' - i\mu'' \quad (e^{-i\omega t}), \\ \langle p_m \rangle &= \frac{\omega}{2} \mu'' |\tilde{\mathbf{H}}|^2\end{aligned}\tag{F155}$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F156. 자기력의 에너지법

핵심식.

$$\begin{aligned} F_x &= - \left(\frac{\partial U_m}{\partial x} \right)_{\Phi}, \\ F_x &= + \left(\frac{\partial U_m}{\partial x} \right)_I \end{aligned} \quad (\text{F156})$$

조건. 정상 전류 문제는 벡터퍼텐셜, 전류 연속성, 인덕턴스 행렬로 정리된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 5

파동, 경계, 분산 광학

파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다.

F157. phasor Maxwell convention

핵심식.

$$\begin{aligned} e^{-i\omega t} : \quad \nabla \times \tilde{\mathbf{E}} &= i\omega \tilde{\mathbf{B}}, \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} &= \tilde{\mathbf{J}} - i\omega \tilde{\mathbf{D}} \end{aligned} \quad (\text{F157})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F158. 균일 매질 평면파

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 &= \omega \mu \mathbf{H}_0, \\ \mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 &= -\omega \epsilon \mathbf{E}_0, \\ k^2 &= \omega^2 \mu \epsilon\end{aligned}\tag{F158}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F159. 복소 굴절률과 감쇠

핵심식.

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{E}} &= \mathbf{E}_0 e^{i\beta z - \alpha z}, \\ \tilde{n} &= n + i\kappa, \\ \alpha &= k_0 \kappa\end{aligned}\tag{F159}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F160. 도체의 복소 유전율

핵심식.

$$\begin{aligned}\epsilon_c(\omega) &= \epsilon + \frac{i\sigma}{\omega} \quad (e^{-i\omega t}), \\ k^2 &= \omega^2 \mu \epsilon_c\end{aligned}\tag{F160}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F161. 편파 타원

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \text{Re}\{(\hat{\mathbf{x}}E_x + \hat{\mathbf{y}}E_y)e^{ikz-i\omega t}\}, \\ S_3 &= 2 \text{Im}(E_x E_y^*)\end{aligned}\tag{F161}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F162. Jones matrix

핵심식.

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix},$$

$$J_{\text{ret}}(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (\text{F162})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F163. Mueller-Stokes 변환

핵심식.

$$\begin{aligned} S'_i &= M_{ij} S_j, \\ S_0^2 &\geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \end{aligned} \tag{F163}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F164. Fresnel s 계수

핵심식.

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, \\ t_s &= \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \end{aligned} \quad (\text{F164})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F165. Fresnel p 계수

핵심식.

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}, \\ t_p &= \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \end{aligned} \quad (\text{F165})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F166. Brewster 조건 일반형

핵심식.

$$\begin{aligned} r_p = 0 &\Rightarrow \eta_2 \cos \theta_t = \eta_1 \cos \theta_i, \\ \tan \theta_B &= \frac{n_2}{n_1} \quad (\mu_1 = \mu_2) \end{aligned} \quad (\text{F166})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F167. 전반사 evanescent decay

핵심식.

$$\begin{aligned} k_{tz} &= i\kappa, \\ \kappa &= k_0 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}, \\ \delta_{\text{pen}} &= \kappa^{-1} \end{aligned} \tag{F167}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F168. Goos-Hanchen shift

핵심식.

$$\Delta_{\text{GH}} = -\frac{\partial \phi_r}{\partial k_{\parallel}}, \quad (F168)$$

$$r = |r|e^{i\phi_r}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F169. 다층막 transfer matrix

핵심식.

$$\begin{pmatrix} a_j \\ b_j \end{pmatrix} = I_{j,j+1} P_{j+1} \begin{pmatrix} a_{j+1} \\ b_{j+1} \end{pmatrix}, \quad (F169)$$

$$P_j = \begin{pmatrix} e^{ik_{zj}d_j} & 0 \\ 0 & e^{-ik_{zj}d_j} \end{pmatrix}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F170. quarter-wave stack**핵심식.**

$$d_j = \frac{\lambda_0}{4n_j}, \quad (F170)$$

$$R \rightarrow 1 \quad \text{as} \quad N \rightarrow \infty \quad (n_H/n_L > 1)$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F171. Drude 전도도

핵심식.

$$\begin{aligned}\sigma(\omega) &= \frac{ne^2}{m(\gamma - i\omega)}, \\ \epsilon(\omega) &= \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}\end{aligned}\tag{F171}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F172. Lorentz oscillator

핵심식.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_j \frac{f_j \omega_{pj}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega} \quad (\text{F172})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F173. Kramers-Kronig

핵심식.

$$\begin{aligned}\operatorname{Re} \chi(\omega) &= \frac{2}{\pi} \mathcal{P} \int_0^\infty \frac{\Omega \operatorname{Im} \chi(\Omega)}{\Omega^2 - \omega^2} d\Omega, \\ \operatorname{Im} \chi(\omega) &= -\frac{2\omega}{\pi} \mathcal{P} \int_0^\infty \frac{\operatorname{Re} \chi(\Omega)}{\Omega^2 - \omega^2} d\Omega\end{aligned}\tag{F173}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F174. 비등방 Fresnel 방정식

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{k} \times \mu^{-1}(\mathbf{k} \times \mathbf{E}) + \omega^2 \epsilon \cdot \mathbf{E} &= 0, \\ \det\{k^2 I - \mathbf{k}\mathbf{k} - \omega^2 \mu \epsilon\} &= 0\end{aligned}\tag{F174}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F175. ordinary-extraordinary wave

핵심식.

$$\begin{aligned} n_o^2 &= \epsilon_{\perp} / \epsilon_0, \\ \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} &= \frac{1}{n_{\text{eff}}^2} \end{aligned} \quad (\text{F175})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F176. Faraday rotation

핵심식.

$$\theta_F = \frac{1}{2}(k_+ - k_-)L,$$

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon & ig & 0 \\ -ig & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix} \quad (\text{F176})$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F177. group velocity

핵심식.

$$\begin{aligned} v_g &= \frac{\partial \omega}{\partial k}, \\ \mathbf{v}_g &= \nabla_{\mathbf{k}} \omega(\mathbf{k}) \end{aligned} \tag{F177}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F178. causality와 analytic upper half-plane**핵심식.**

$$\begin{aligned}\chi(t < 0) &= 0, \\ \chi(\omega) &\text{ analytic for } \text{Im } \omega > 0\end{aligned}\tag{F178}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F179. negative index sign choice

핵심식.

$$\begin{aligned} n &= -\sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \\ \mathbf{S} \cdot \mathbf{k} &< 0, \\ \frac{d(\omega\epsilon)}{d\omega} &> 0 \quad (\text{lossless passive band}) \end{aligned} \tag{F179}$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F180. 표면 플라즈몬 polariton

핵심식.

$$k_{\parallel} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (\text{F180})$$

$$\text{Re } \epsilon_2 < -\epsilon_1$$

조건. 파동 문제에서는 phasor convention, 복소 파수, 에너지 흐름, 경계조건을 동시에 추적한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 6

전송선, 도파관, 공진기, 마이크로파 네트워크

장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다.

F181. telegrapher 방정식 phasor

핵심식.

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dz} &= -(R - i\omega L)I, \\ \frac{dI}{dz} &= -(G - i\omega C)V, \\ \gamma &= \sqrt{(R - i\omega L)(G - i\omega C)}\end{aligned}\tag{F181}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F182. 특성 임피던스

핵심식.

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{R - i\omega L}{G - i\omega C}}, \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (R = G = 0) \end{aligned} \quad (\text{F182})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F183. 입력 임피던스

핵심식.

$$Z_{\text{in}}(\ell) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma \ell}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma \ell},$$

$$Z_{\text{in}} = Z_0 \frac{Z_L + i Z_0 \tan \beta \ell}{Z_0 + i Z_L \tan \beta \ell} \quad (\alpha = 0) \quad (\text{F183})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F184. 반사계수와 Smith map

핵심식.

$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \\ z &= \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \\ \Gamma(z) &= \Gamma_L e^{-2i\beta z}\end{aligned}\tag{F184}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F185. quarter-wave transformer**핵심식.**

$$\begin{aligned}
 \ell &= \frac{\lambda}{4}, \\
 Z_{\text{in}} &= \frac{Z_0^2}{Z_L}, \\
 Z_0 &= \sqrt{Z_S Z_L}
 \end{aligned}
 \tag{F185}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F186. ABCD 행렬

핵심식.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}, \quad (\text{F186})$$

$$AD - BC = 1 \quad (\text{reciprocal})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F187. S-parameter power normalization

핵심식.

$$\begin{aligned} b_i &= \sum_j S_{ij} a_j, \\ P_i &= |a_i|^2 - |b_i|^2, \\ S^\dagger S &= I \quad (\text{lossless}) \end{aligned} \tag{F187}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F188. rectangular waveguide cutoff**핵심식.**

$$\begin{aligned} k_c^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2, \\ \beta^2 &= \omega^2 \mu \epsilon - k_c^2 \end{aligned} \quad (\text{F188})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F189. TE 모드 횡장

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_t &= \frac{i\omega\mu}{k_c^2} \hat{\mathbf{z}} \times \nabla_t H_z, \\ \mathbf{H}_t &= \frac{i\beta}{k_c^2} \nabla_t H_z\end{aligned}\tag{F189}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F190. TM 모드 횡장

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_t &= -\frac{i\beta}{k_c^2} \nabla_t E_z, \\ \mathbf{H}_t &= \frac{i\omega\epsilon}{k_c^2} \hat{\mathbf{z}} \times \nabla_t E_z\end{aligned}\tag{F190}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F191. TE₁₀ mode

핵심식.

$$H_z = H_0 \cos \frac{\pi x}{a} e^{i\beta z},$$

$$f_c = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (\text{F191})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F192. 원형 도파관

핵심식.

$$\begin{aligned} k_c^{\text{TM}} &= \frac{x_{mn}}{a}, & J_m(x_{mn}) &= 0, \\ k_c^{\text{TE}} &= \frac{x'_{mn}}{a}, & J'_m(x'_{mn}) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{F192})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F193. 위상속도와 군속도

핵심식.

$$\begin{aligned} v_p &= \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\omega_c/\omega)^2}}, \\ v_g &= c\sqrt{1 - (\omega_c/\omega)^2}, \\ v_p v_g &= c^2 \end{aligned} \tag{F193}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F194. wave impedance**핵심식.**

$$\begin{aligned} Z_{\text{TE}} &= \frac{\omega\mu}{\beta}, \\ Z_{\text{TM}} &= \frac{\beta}{\omega\epsilon} \end{aligned} \tag{F194}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F195. 공진기 고유값

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \times \mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E}_n &= \omega_n^2 \epsilon \mathbf{E}_n, \\ \int \mathbf{E}_m^* \cdot \epsilon \mathbf{E}_n \, dV &= \delta_{mn}\end{aligned}\tag{F195}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F196. Q factor

핵심식.

$$\begin{aligned} Q &= \omega_0 \frac{U}{P_{\text{loss}}}, \\ Q &= \frac{\omega_0}{\Delta\omega}, \\ \tau &= \frac{Q}{\omega_0} \end{aligned} \tag{F196}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F197. cavity perturbation

핵심식.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{1}{2} \frac{\int (\Delta\epsilon |\mathbf{E}|^2 + \Delta\mu |\mathbf{H}|^2) dV}{\int (\epsilon |\mathbf{E}|^2 + \mu |\mathbf{H}|^2) dV} \quad (\text{F197})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F198. coupled-mode single resonance

핵심식.

$$\begin{aligned}\frac{da}{dt} &= (i\omega_0 - \gamma)a + \mathbf{k}^T \mathbf{s}_+, \\ \mathbf{s}_- &= C\mathbf{s}_+ + \mathbf{d}a\end{aligned}\tag{F198}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F199. critical coupling

핵심식.

$$\begin{aligned}\gamma_e &= \gamma_i, \\ T(\omega_0) &= 0 \quad (\text{one-port absorber})\end{aligned}\tag{F199}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F200. Bloch impedance in periodic line

핵심식.

$$\begin{aligned}\cos(k_B a) &= \frac{A + D}{2}, \\ Z_B &= \frac{B}{e^{ik_B a} - A}\end{aligned}\tag{F200}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F201. microstrip quasi-TEM

핵심식.

$$\begin{aligned} v_p &\simeq \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \\ Z_0 &\simeq Z_0(w/h, \epsilon_r) \end{aligned} \quad (\text{F201})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F202. loss tangent**핵심식.**

$$\begin{aligned}\tan \delta &= \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \\ \alpha_d &\approx \frac{k_0 \sqrt{\epsilon_r}}{2} \tan \delta\end{aligned}\tag{F202}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F203. conductor attenuation

핵심식.

$$\alpha_c \propto \frac{R_s}{Z_0} (\text{geometry factor}),$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (\text{F203})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F204. network reciprocity**핵심식.**

$$\begin{aligned} S &= S^T \quad \text{if linear reciprocal ports,} \\ Z &= Z^T \end{aligned} \tag{F204}$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F205. Bode-Fano 한계의 형태

핵심식.

$$\int_0^\infty \ln \frac{1}{|\Gamma(\omega)|} d\omega \leq \frac{\pi}{RC} \quad (\text{RC load example}) \quad (\text{F205})$$

조건. 장 문제는 모드 직교성으로 회로 변수와 산란행렬에 연결된다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 7

복사, 안테나, 산란, 원거리장

복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다.

F206. retarded potentials

핵심식.

$$\begin{aligned}\phi(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}', t - R/c)}{R} d^3r', \\ \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t - R/c)}{R} d^3r'\end{aligned}\tag{F206}$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F207. Lienard-Wiechert potentials

핵심식.

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(1 - \hat{\mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\beta})R} \right]_{\text{ret}}, \\ \mathbf{A} &= \frac{\mu_0 q}{4\pi} \left[\frac{\mathbf{v}}{(1 - \hat{\mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\beta})R} \right]_{\text{ret}}\end{aligned}\tag{F207}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F208. 가속 전하 복사장

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{\text{rad}} &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c} \left[\frac{\hat{\mathbf{R}} \times \{(\hat{\mathbf{R}} - \boldsymbol{\beta}) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}\}}{\kappa^3 R} \right]_{\text{ret}}, \\ \mathbf{B}_{\text{rad}} &= \frac{1}{c} \hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{E}_{\text{rad}}\end{aligned}\tag{F208}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F209. Larmor-Lienard power

핵심식.

$$\begin{aligned} P_{\text{Larmor}} &= \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}, \\ P_{\text{Lienard}} &= \frac{q^2 \gamma^6}{6\pi\epsilon_0 c^3} \left(a^2 - \frac{|\mathbf{v} \times \mathbf{a}|^2}{c^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{F209})$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F210. 전기쌍극자 복사

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{\text{rad}} &= \frac{\mu_0}{4\pi r} \hat{\mathbf{r}} \times (\hat{\mathbf{r}} \times \ddot{\mathbf{p}}), \\ \langle P \rangle &= \frac{\omega^4 |\mathbf{p}_0|^2}{12\pi\epsilon_0 c^3}\end{aligned}\tag{F210}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F211. Hertzian dipole

핵심식.

$$\begin{aligned} E_\theta &= i\eta \frac{kI_0\ell}{4\pi r} e^{ikr} \sin\theta, \\ R_r &= 80\pi^2 \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2 \end{aligned} \tag{F211}$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F212. half-wave dipole pattern**핵심식.**

$$I(z) \approx I_0 \sin \left[k \left(\frac{\ell}{2} - |z| \right) \right],$$

$$F(\theta) = \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta \right)}{\sin \theta} \quad (\text{F212})$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F213. Friis transmission

핵심식.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (F213)$$

$$A_e = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F214. array factor

핵심식.

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N w_n e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n}, \quad (\text{F214})$$

$$F_{\text{total}} = F_{\text{element}} AF$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F215. uniform linear array**핵심식.**

$$AF(\theta) = \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)}, \quad (F215)$$

$$\psi = kd \cos \theta + \alpha$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F216. aperture Fourier relation

핵심식.

$$\mathbf{E}_{\text{far}}(k_x, k_y) \propto \iint_A \mathbf{E}_{\text{ap}}(x, y) e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (\text{F216})$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F217. radar equation**핵심식.**

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{S_{\text{sca}}}{S_{\text{inc}}} \quad (\text{F217})$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F218. scattering amplitude

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{\text{sca}} &\sim E_0 \frac{e^{ikr}}{r} f(\theta, \phi), \\ \frac{d\sigma}{d\Omega} &= |f(\theta, \phi)|^2\end{aligned}\tag{F218}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F219. optical theorem

핵심식.

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{4\pi}{k} \text{Im} f(0), \quad (\text{F219})$$

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{sca}} + \sigma_{\text{abs}}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F220. Rayleigh scattering

핵심식.

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2},$$

$$\sigma_{\text{sca}} = \frac{k^4}{6\pi\epsilon_0^2} |\alpha|^2 \quad (\text{F220})$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F221. Mie coefficients**핵심식.**

$$\begin{aligned}
 a_\ell &= \frac{m\psi_\ell(mx)\psi'_\ell(x) - \psi_\ell(x)\psi'_\ell(mx)}{m\psi_\ell(mx)\xi'_\ell(x) - \xi_\ell(x)\psi'_\ell(mx)}, \\
 b_\ell &= \frac{\psi_\ell(mx)\psi'_\ell(x) - m\psi_\ell(x)\psi'_\ell(mx)}{\psi_\ell(mx)\xi'_\ell(x) - m\xi_\ell(x)\psi'_\ell(mx)}
 \end{aligned}
 \tag{F221}$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F222. partial-wave cross section

핵심식.

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{sca}} &= \frac{2\pi}{k^2} \sum_{\ell=1}^{\infty} (2\ell + 1) (|a_{\ell}|^2 + |b_{\ell}|^2), \\ \sigma_{\text{ext}} &= \frac{2\pi}{k^2} \sum_{\ell=1}^{\infty} (2\ell + 1) \text{Re}(a_{\ell} + b_{\ell})\end{aligned}\tag{F222}$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F223. radiation reaction scale**핵심식.**

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{\text{AL}} &= \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \dot{\mathbf{a}}, \\ \tau_0 &= \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 m c^3}\end{aligned}\tag{F223}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F224. Landau-Lifshitz reduction

핵심식.

$$\mathbf{F}_{\text{LL}} \approx \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{F}_{\text{ext}}}{m} \right) \quad (\text{F224})$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F225. equivalence principle radiation

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{J}_s &= \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}, \\ \mathbf{M}_s &= -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}\end{aligned}\tag{F225}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F226. physical optics approximation

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{J}_s &\approx 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{\text{inc}} \quad \text{on illuminated PEC,} \\ \mathbf{J}_s &\approx 0 \quad \text{in shadow}\end{aligned}\tag{F226}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F227. RCS of large sphere scale

핵심식.

$$\begin{aligned}\sigma &\rightarrow \pi a^2 \quad (ka \gg 1), \\ \sigma_{\text{Rayleigh}} &\propto a^6/\lambda^4 \quad (ka \ll 1)\end{aligned}\tag{F227}$$

조건. 복사는 지연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F228. bound states in continuum

핵심식.

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{rad}}(\mathbf{k}_0) &= 0, \\ Q_{\text{rad}} &= \frac{\omega}{2\gamma_{\text{rad}}} \rightarrow \infty\end{aligned}\tag{F228}$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F229. Fano line shape

핵심식.

$$F(\epsilon) = \frac{(q + \epsilon)^2}{1 + \epsilon^2}, \quad (F229)$$

$$\epsilon = \frac{2(\omega - \omega_0)}{\Gamma}$$

조건. 복사는 자연 퍼텐셜의 원거리항이며 산란은 Green 함수와 에너지 보존의 결과다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 8

상대론적 전자기학과 작용원리

전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다.

F230. 4-potential과 field tensor

핵심식.

$$\begin{aligned} A^\mu &= (\phi/c, \mathbf{A}), \\ F^{\mu\nu} &= \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \end{aligned} \tag{F230}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F231. covariant Maxwell**핵심식.**

$$\begin{aligned}\partial_\mu F^{\mu\nu} &= \mu_0 J^\nu, \\ \partial_\lambda F_{\mu\nu} + \partial_\mu F_{\nu\lambda} + \partial_\nu F_{\lambda\mu} &= 0\end{aligned}\tag{F231}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F232. dual tensor

핵심식.

$$\begin{aligned}\tilde{F}^{\mu\nu} &= \frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}F_{\alpha\beta}, \\ \partial_\mu\tilde{F}^{\mu\nu} &= 0\end{aligned}\tag{F232}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F233. 전자기 불변량

핵심식.

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} &= 2(B^2 - E^2/c^2), \\ F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} &= -\frac{4}{c}\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \end{aligned} \quad (\text{F233})$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F234. 장 변환 일반형

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}' &= \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} \frac{\mathbf{v}}{c^2} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}), \\ \mathbf{B}' &= \gamma \left(\mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \mathbf{v} \times \mathbf{E} \right) - \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} \frac{\mathbf{v}}{c^2} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})\end{aligned}\tag{F234}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F235. 4-current continuity**핵심식.**

$$\begin{aligned} J^\mu &= (c\rho, \mathbf{J}), \\ \partial_\mu J^\mu &= 0 \end{aligned} \tag{F235}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F236. particle action

핵심식.

$$S_p = -mc^2 \int d\tau + q \int A_\mu dx^\mu, \quad (F236)$$

$$\frac{dp^\mu}{d\tau} = qF^{\mu\nu}u_\nu$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F237. field action

핵심식.

$$S_{\text{EM}} = -\frac{1}{4\mu_0} \int F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} d^4x - \int J^\mu A_\mu d^4x \quad (\text{F237})$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F238. Lorenz gauge covariant form

핵심식.

$$\begin{aligned}\partial_\mu A^\mu &= 0, \\ \square A^\mu &= -\mu_0 J^\mu, \\ \square &= c^{-2} \partial_t^2 - \nabla^2\end{aligned}\tag{F238}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F239. retarded solution covariant**핵심식.**

$$A^\mu(x) = \mu_0 \int G_{\text{ret}}(x - x') J^\mu(x') d^4x',$$

$$G_{\text{ret}} = \frac{\delta(t - t' - R/c)}{4\pi R} \Theta(t - t') \quad (\text{F239})$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F240. energy-momentum tensor

핵심식.

$$T^{\mu\nu} = \frac{1}{\mu_0} \left(F^{\mu\alpha} F^\nu{}_\alpha + \frac{1}{4} \eta^{\mu\nu} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \right), \quad (\text{F240})$$

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = -F^{\nu\lambda} J_\lambda$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F241. proper fields classification

핵심식.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= E^2 - c^2 B^2, & I_2 &= \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}, \\
 I_2 = 0, I_1 > 0 &\Rightarrow \text{pure electric frame}, \\
 I_2 = 0, I_1 < 0 &\Rightarrow \text{pure magnetic frame}
 \end{aligned}
 \tag{F241}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F242. constant crossed field invariants**핵심식.**

$$\mathbf{E} \perp \mathbf{B}, \quad E = cB \Rightarrow I_1 = 0, \quad I_2 = 0 \quad (\text{F242})$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F243. Lienard-Wiechert retarded time

핵심식.

$$\begin{aligned} t_r &= t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_q(t_r)|}{c}, \\ \frac{\partial t_r}{\partial t} &= \frac{1}{1 - \hat{\mathbf{R}} \cdot \boldsymbol{\beta}} \end{aligned} \quad (\text{F243})$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F244. radiation formation length scale

핵심식.

$$\begin{aligned} \ell_f &\sim \frac{\gamma^2 c}{\omega} \quad (\text{relativistic beaming}), \\ \theta_{\text{beam}} &\sim \gamma^{-1} \end{aligned} \tag{F244}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F245. synchrotron critical frequency**핵심식.**

$$\begin{aligned}\omega_c &= \frac{3}{2} \gamma^3 \frac{c}{\rho}, \\ P &= \frac{q^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{\gamma^4}{\rho^2}\end{aligned}\tag{F245}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F246. covariant Lorentz force density

핵심식.

$$\begin{aligned} f^\mu &= F^{\mu\nu} J_\nu, \\ f^0 &= \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}/c \end{aligned} \tag{F246}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F247. differential forms

핵심식.

$$\begin{aligned} F &= dA, \\ dF &= 0, \\ d \star F &= \mu_0 \star J \end{aligned} \tag{F247}$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F248. topological theta term

핵심식.

$$S_\theta = \frac{\alpha}{4\pi^2} \int \theta \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} d^3x dt, \quad (\text{F248})$$

$\Delta\theta \neq 0 \Rightarrow$ surface Hall response

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F249. stress tensor trace**핵심식.**

$$T^\mu{}_\mu = 0 \quad (\text{vacuum Maxwell in } 3+1\text{D}),$$

$$\text{scale invariance} \Rightarrow \omega \propto 1/L \quad (\text{F249})$$

조건. 전기장과 자기장은 하나의 antisymmetric tensor이며 gauge symmetry가 전하 보존을 제어한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 9

계산전자기학, 역설계, 수치 검증

수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다.

F250. Yee update

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{H}^{n+1/2} &= \mathbf{H}^{n-1/2} - \Delta t \mu^{-1} \nabla_h \times \mathbf{E}^n, \\ \mathbf{E}^{n+1} &= \mathbf{E}^n + \Delta t \epsilon^{-1} (\nabla_h \times \mathbf{H}^{n+1/2} - \mathbf{J}^{n+1/2})\end{aligned}\tag{F250}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F251. Courant stability

핵심식.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c\sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2}}},$$

$$S = \frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (\Delta x_i = \Delta x)$$
(F251)

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F252. Yee numerical dispersion 1D

핵심식.

$$\left[\frac{\sin(\omega \Delta t/2)}{c \Delta t/2} \right]^2 = \left[\frac{\sin(k \Delta x/2)}{\Delta x/2} \right]^2 \quad (\text{F252})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F253. ADE Drude update

핵심식.

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{J}}{dt} + \gamma\mathbf{J} &= \epsilon_0\omega_p^2\mathbf{E}, \\ \mathbf{D} &= \epsilon_0\epsilon_\infty\mathbf{E} + \mathbf{P}\end{aligned}\tag{F253}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F254. PML coordinate stretch

핵심식.

$$\begin{aligned}\partial_x &\rightarrow \frac{1}{s_x} \partial_x, \\ s_x(\omega) &= \kappa_x + \frac{\sigma_x}{\alpha_x - i\omega\epsilon_0}\end{aligned}\tag{F254}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F255. FEM weak form

핵심식.

$$\int_V (\nabla \times \mathbf{w})^* \cdot \mu^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int_V \mathbf{w}^* \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = i\omega \int_V \mathbf{w}^* \cdot \mathbf{J} dV \quad (\text{F255})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F256. edge element tangential continuity

핵심식.

$$\mathbf{N}_e = \lambda_i \nabla \lambda_j - \lambda_j \nabla \lambda_i, \quad (F256)$$

$$\int_e \mathbf{N}_e \cdot d\boldsymbol{\ell} = 1$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F257. spurious mode 제거 조건

핵심식.

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = 0, \quad \text{use } H(\text{curl}) \text{ edge elements, not nodal vector elements} \quad (\text{F257})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F258. MoM EFIE

핵심식.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{n}} \times \left(\mathbf{E}^{\text{inc}} + i\omega\mu \int_S \mathbf{G} \cdot \mathbf{J}_s dS' \right) &= 0, \\ \sum_n Z_{mn} I_n &= V_m \end{aligned} \quad (\text{F258})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F259. MFIE principal value**핵심식.**

$$\frac{1}{2}\mathbf{J}_s - \hat{\mathbf{n}} \times \mathcal{K}\mathbf{J}_s = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^{\text{inc}} \quad (\text{F259})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F260. CFIE**핵심식.**

$$\alpha \text{EFIE} + (1 - \alpha)\eta \text{MFIE} = 0, \quad (F260)$$

$$0 < \alpha < 1$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F261. BEM single/double layer

핵심식.

$$\phi(\mathbf{r}) = \int_S [G\sigma - \partial_{n'} G\mu] dS', \quad (\text{F261})$$

$$\text{jump} : \quad \lim_{\pm} \mathcal{D}\mu = \mp \frac{1}{2}\mu + K\mu$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F262. near-to-far transform

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{\text{far}} &= \mathcal{F}\{\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}, -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}\}_S, \\ \mathbf{J}_s &= \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}, \quad \mathbf{M}_s = -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}\end{aligned}\tag{F262}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F263. discrete divergence check**핵심식.**

$$\begin{aligned}\|\nabla_h \cdot \mathbf{B}_h\| &\rightarrow 0, \\ \|\nabla_h \cdot \mathbf{D}_h - \rho_h\| &\rightarrow 0\end{aligned}\tag{F263}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F264. energy balance check

핵심식.

$$P_{\text{src}} - P_{\text{abs}} - P_{\text{rad}} - \frac{dU}{dt} \rightarrow 0 \quad (\text{F264})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F265. mesh convergence**핵심식.**

$$Q(h) = Q_0 + Ch^p + O(h^{p+1}),$$

$$Q_0 \approx \frac{2^p Q(h/2) - Q(h)}{2^p - 1} \quad (\text{F265})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F266. adjoint gradient

핵심식.

$$\begin{aligned}\frac{dF}{dp} &= \frac{\partial F}{\partial p} - \lambda^T \frac{\partial A}{\partial p} x, \\ A^T \lambda &= \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^T\end{aligned}\tag{F266}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F267. frequency-domain Maxwell matrix**핵심식.**

$$\begin{aligned}
 A(\omega, p)\mathbf{e} &= \mathbf{b}, \\
 A &= \nabla \times \mu^{-1} \nabla \times -\omega^2 \epsilon(p)
 \end{aligned}
 \tag{F267}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F268. topology optimization filter

핵심식.

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}(\mathbf{r}) &= \frac{\int w(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \rho(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'}{\int w(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) d\mathbf{r}'}, \\ \epsilon(\rho) &= \epsilon_{\min} + \rho^q (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min})\end{aligned}\tag{F268}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F269. model order reduction**핵심식.**

$$\begin{aligned}
 A(s)x(s) &= b, \\
 x(s) &\approx Vy(s), \\
 V^T A(s)Vy &= V^T b
 \end{aligned}
 \tag{F269}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F270. domain decomposition

핵심식.

$$\Omega = \bigcup_i \Omega_i, \quad (F270)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_i - \mathbf{E}_j) = 0, \quad \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_j) = 0$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F271. periodic/Bloch boundary**핵심식.**

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) &= e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}} \mathbf{E}(\mathbf{r}), \\ \mathbf{H}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) &= e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}} \mathbf{H}(\mathbf{r})\end{aligned}\tag{F271}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F272. Poynting flux monitor

핵심식.

$$P(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_A \tilde{\mathbf{E}} \times \tilde{\mathbf{H}}^* \cdot \hat{\mathbf{n}} dA \quad (\text{F272})$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F273. uncertainty propagation

핵심식.

$$\begin{aligned}\text{Var } F &\approx \nabla_p F^T \Sigma_p \nabla_p F, \\ S_i &= \frac{\partial \ln F}{\partial \ln p_i}\end{aligned}\tag{F273}$$

조건. 수치 전자기학은 Maxwell 방정식을 이산화한 뒤 보존법칙과 수렴으로 검증한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 10

플라즈마와 빔 전자기학

플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다.

F274. plasma frequency and Debye length

핵심식.

$$\begin{aligned}\omega_{ps}^2 &= \frac{n_s q_s^2}{\epsilon_0 m_s}, \\ \lambda_D^2 &= \frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}\end{aligned}\tag{F274}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F275. cyclotron and gyro radius

핵심식.

$$\begin{aligned}\Omega_s &= \frac{q_s B_0}{m_s}, \\ \rho_s &= \frac{v_\perp}{|\Omega_s|}\end{aligned}\tag{F275}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F276. Vlasov equation

핵심식.

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f_s + \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_v f_s = 0 \quad (\text{F276})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F277. moments of distribution

핵심식.

$$\begin{aligned} n_s &= \int f_s d^3v, \\ \mathbf{u}_s &= \frac{1}{n_s} \int \mathbf{v} f_s d^3v, \\ P_s &= m_s \int (\mathbf{v} - \mathbf{u}_s)(\mathbf{v} - \mathbf{u}_s) f_s d^3v \end{aligned} \tag{F277}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F278. two-fluid momentum

핵심식.

$$m_s n_s (\partial_t + \mathbf{u}_s \cdot \nabla) \mathbf{u}_s = q_s n_s (\mathbf{E} + \mathbf{u}_s \times \mathbf{B}) - \nabla \cdot \mathbf{P}_s + \mathbf{R}_s \quad (\text{F278})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F279. cold plasma tensor**핵심식.**

$$\epsilon/\epsilon_0 = \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}, \quad (F279)$$

$$S = 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2 - \Omega_s^2}, \quad D = \sum_s \frac{\Omega_s}{\omega} \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2 - \Omega_s^2}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지를 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F280. Appleton-Hartree 구조

핵심식.

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - \frac{Y_T^2}{2(1-X)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1-X)^2} + Y_L^2}}, \quad (\text{F280})$$

$$X = \omega_p^2/\omega^2, \quad Y = \Omega_e/\omega$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F281. Langmuir wave**핵심식.**

$$\begin{aligned}\omega^2 &\approx \omega_{pe}^2 + 3k^2 v_{Te}^2, \\ v_{Te}^2 &= k_B T_e / m_e\end{aligned}\tag{F281}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F282. ion acoustic wave**핵심식.**

$$\omega \approx \frac{kc_s}{\sqrt{1 + k^2\lambda_D^2}},$$

$$c_s^2 = \frac{\gamma_e k_B T_e + \gamma_i k_B T_i}{m_i} \quad (\text{F282})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F283. Alfven wave**핵심식.**

$$\begin{aligned}\omega &= k_{\parallel} v_A, \\ v_A &= \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 \rho_m}}\end{aligned}\tag{F283}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F284. MHD induction

핵심식.

$$\begin{aligned}\partial_t \mathbf{B} &= \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 \mathbf{B}, \\ R_m &= \mu_0 \sigma U L\end{aligned}\tag{F284}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F285. frozen-in condition**핵심식.**

$$R_m \gg 1 \Rightarrow \partial_t \mathbf{B} \approx \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}),$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \approx 0 \quad (\text{F285})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F286. Grad-Shafranov equation

핵심식.

$$\begin{aligned}\Delta^* \psi &= -\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi} - F \frac{dF}{d\psi}, \\ \Delta^* &= R \partial_R (R^{-1} \partial_R) + \partial_Z^2\end{aligned}\tag{F286}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F287. Landau damping integral

핵심식.

$$\epsilon(k, \omega) = 1 + \frac{q^2}{\epsilon_0 m k} \int \frac{\partial f_0 / \partial v}{\omega - kv} dv, \quad (F287)$$

$$\omega \rightarrow \omega + i0^+$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F288. ponderomotive force

핵심식.

$$\mathbf{F}_p = -\frac{q^2}{4m\omega^2} \nabla |\mathbf{E}_0|^2 \quad (\text{F288})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F289. beam perveance scaling**핵심식.**

$$K = \frac{2I}{I_A \beta^3 \gamma^3},$$

$$I_A = \frac{4\pi\epsilon_0 mc^3}{q} \quad (\text{F289})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F290. Child-Langmuir law

핵심식.

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (\text{F290})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F291. wakefield impedance

핵심식.

$$Z_{\parallel}(\omega) = \frac{1}{q} \int_{-\infty}^{\infty} E_z(z, t = z/c) e^{i\omega z/c} dz \quad (\text{F291})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F292. magnetic reconnection Lundquist number

핵심식.

$$S_L = \frac{\mu_0 L v_A}{\eta}, \quad (F292)$$

$$\delta_{SP} \sim L S_L^{-1/2}$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F293. plasma beta**핵심식.**

$$\beta_p = \frac{2\mu_0 p}{B^2} \quad (\text{F293})$$

조건. 플라즈마는 Maxwell 방정식과 입자/유체 분포의 self-consistent coupling이다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 11

포토닉스, 메타물질, 위상 전자기파

주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다.

F294. photonic crystal eigenproblem

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \times \frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}_{n\mathbf{k}} &= \left(\frac{\omega_{n\mathbf{k}}}{c} \right)^2 \mathbf{H}_{n\mathbf{k}}, \\ \mathbf{H}_{n\mathbf{k}} &= e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \mathbf{u}_{n\mathbf{k}}\end{aligned}\tag{F294}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F295. band gap condition

핵심식.

$$\omega \notin \{\omega_{nk} : \mathbf{k} \in \text{BZ}\} \Rightarrow \text{photonic band gap} \quad (\text{F295})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F296. effective medium scale

핵심식.

$$\begin{aligned} a/\lambda &\ll 1, \\ \epsilon_{\text{eff}} &= \epsilon_{\text{host}} + O(f) \quad (\text{dilute inclusion}) \end{aligned} \tag{F296}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F297. Maxwell-Garnett

핵심식.

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_h}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_h} = f \frac{\epsilon_i - \epsilon_h}{\epsilon_i + 2\epsilon_h} \quad (\text{F297})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F298. Bruggeman formula

핵심식.

$$f \frac{\epsilon_i - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_i + 2\epsilon_{\text{eff}}} + (1 - f) \frac{\epsilon_h - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_h + 2\epsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (\text{F298})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F299. bianisotropic constitutive law**핵심식.**

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon & \xi \\ \zeta & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} \quad (\text{F299})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F300. GSTC metasurface

핵심식.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{n}} \times \Delta \mathbf{H} &= \mathbf{J}_s + i\omega \mathbf{P}_{s\parallel} - \hat{\mathbf{n}} \times \nabla_{\parallel} M_{s\perp}, \\ \hat{\mathbf{n}} \times \Delta \mathbf{E} &= -\mathbf{K}_s - i\omega \mu_0 \mathbf{M}_{s\parallel} - \frac{1}{\epsilon_0} \hat{\mathbf{n}} \times \nabla_{\parallel} P_{s\perp}\end{aligned}\tag{F300}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F301. Huygens metasurface condition

핵심식.

$$\begin{aligned} r &\approx 0, \\ \eta_0 \alpha_m &\approx \alpha_e / \eta_0, \\ t &= e^{i\phi} \end{aligned} \tag{F301}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F302. phase gradient refraction

핵심식.

$$\begin{aligned} k_{t\parallel} - k_{i\parallel} &= \nabla_{\parallel} \Phi_s, \\ n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i &= \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi_s}{dx} \end{aligned} \quad (\text{F302})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F303. surface impedance sheet

핵심식.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E} &= Z_s \mathbf{J}_s, \\ r &= -\frac{Z_0}{2Z_s + Z_0} \quad (\text{symmetric free-space sheet})\end{aligned}\tag{F303}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F304. plasmonic resonance of small sphere

핵심식.

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d}, \quad (\text{F304})$$

$$\text{Re } \epsilon_m = -2\epsilon_d$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F305. LDOS Green tensor

핵심식.

$$\rho(\mathbf{r}, \omega) = \frac{2\omega}{\pi c^2} \text{Im Tr } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \omega) \quad (\text{F305})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F306. Purcell factor Green form

핵심식.

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{6\pi c}{\omega} \hat{\mathbf{p}} \cdot \text{Im } \mathbf{G}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_0; \omega) \cdot \hat{\mathbf{p}} \quad (\text{F306})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F307. coupled resonator waveguide

핵심식.

$$\begin{aligned}\omega(k) &= \omega_0 + 2\kappa \cos(ka), \\ v_g &= -2\kappa a \sin(ka)\end{aligned}\tag{F307}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F308. temporal coupled mode reciprocity

핵심식.

$$\begin{aligned} D &= K^T, \\ CD^* &= -D \quad (\text{lossless time-reversal constraint}) \end{aligned} \tag{F308}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F309. Berry connection

핵심식.

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_n(\mathbf{k}) &= i\langle u_{n\mathbf{k}} | \nabla_{\mathbf{k}} u_{n\mathbf{k}} \rangle, \\ \boldsymbol{\Omega}_n &= \nabla_{\mathbf{k}} \times \mathbf{A}_n\end{aligned}\tag{F309}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F310. Chern number

핵심식.

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{\text{BZ}} \Omega_{n,z}(\mathbf{k}) d^2k \in \mathbb{Z} \quad (\text{F310})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F311. discrete Berry curvature

핵심식.

$$F_{12}(\mathbf{k}) = \text{Im} \log U_1(\mathbf{k}) U_2(\mathbf{k} + \Delta_1) U_1^{-1}(\mathbf{k} + \Delta_2) U_2^{-1}(\mathbf{k}),$$

$$U_\mu = \frac{\langle u(\mathbf{k}) | u(\mathbf{k} + \Delta_\mu) \rangle}{|\langle u(\mathbf{k}) | u(\mathbf{k} + \Delta_\mu) \rangle|} \quad (\text{F311})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F312. bulk-edge correspondence

핵심식.

$$N_{\text{edge}} = \Delta C, \quad (F312)$$

$\omega_{\text{edge}}(k)$ crosses gap when $\Delta C \neq 0$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F313. non-Hermitian exceptional point**핵심식.**

$$\begin{aligned}
 H(\lambda)\mathbf{v} &= \omega\mathbf{v}, \\
 \omega_1 &= \omega_2, \quad \mathbf{v}_1 \parallel \mathbf{v}_2
 \end{aligned}
 \tag{F313}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F314. parity-time condition

핵심식.

$$\begin{aligned}\epsilon(\mathbf{r}) &= \epsilon^*(-\mathbf{r}), \\ [PT, H] &= 0\end{aligned}\tag{F314}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F315. BIC topological charge

핵심식.

$$q = \frac{1}{2\pi} \oint \nabla_{\mathbf{k}} \arg(p_x + ip_y) \cdot d\mathbf{k} \quad (\text{F315})$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F316. epsilon-near-zero scaling

핵심식.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= 0, \\ \epsilon \rightarrow 0 &\Rightarrow D_n \text{ finite, } E_n \text{ large}\end{aligned}\tag{F316}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F317. hyperbolic dispersion

핵심식.

$$\frac{k_x^2 + k_y^2}{\epsilon_z} + \frac{k_z^2}{\epsilon_t} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2, \quad (F317)$$

$$\epsilon_t \epsilon_z < 0$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F318. transformation optics

핵심식.

$$\begin{aligned}\epsilon' &= \frac{J\epsilon J^T}{\det J}, \\ \mu' &= \frac{J\mu J^T}{\det J}\end{aligned}\tag{F318}$$

조건. 주기 구조와 유효매질은 Maxwell 고유값 문제를 밴드 이론, 산란행렬, 역설계와 연결한다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Chapter 12

양자, 잡음, Casimir, 고전-양자 접점

고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다.

F319. minimal coupling

핵심식.

$$\begin{aligned}\hat{H} &= \frac{1}{2m}(-i\hbar\nabla - q\mathbf{A})^2 + q\phi, \\ \psi' &= e^{iq\chi/\hbar}\psi\end{aligned}\tag{F319}$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F320. Aharonov-Bohm phase

핵심식.

$$\Delta\varphi = \frac{q}{\hbar} \oint \mathbf{A} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \frac{q\Phi_B}{\hbar} \quad (\text{F320})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F321. Landau levels

핵심식.

$$E_n = \hbar \omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right),$$

$$\omega_c = \frac{|q|B}{m}$$
(F321)

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F322. Zeeman coupling

핵심식.

$$\begin{aligned} H_Z &= -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}, \\ \boldsymbol{\mu} &= g \frac{q}{2m} \mathbf{S} \end{aligned} \tag{F322}$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F323. quantized vector potential

핵심식.

$$\hat{\mathbf{A}}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \sqrt{\frac{\hbar}{2\epsilon_0\omega_k V}} \left(\hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} \boldsymbol{\epsilon}_{\mathbf{k}\lambda} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega_k t} + \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger \boldsymbol{\epsilon}_{\mathbf{k}\lambda}^* e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + i\omega_k t} \right) \quad (\text{F323})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F324. photon Hamiltonian

핵심식.

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \hbar\omega_k \left(\hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} + \frac{1}{2} \right) \quad (\text{F324})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F325. spontaneous emission rate**핵심식.**

$$\Gamma_0 = \frac{\omega_0^3 |\mathbf{d}|^2}{3\pi\epsilon_0 \hbar c^3} \quad (\text{F325})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F326. Fermi golden rule

핵심식.

$$\Gamma_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | \hat{V} | i \rangle|^2 \rho(E_f) \quad (\text{F326})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F327. Jaynes-Cummings coupling

핵심식.

$$\begin{aligned}\hat{H}/\hbar &= \omega_c \hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{\omega_0}{2} \hat{\sigma}_z + g(\hat{a}^\dagger \hat{\sigma}_- + \hat{a} \hat{\sigma}_+), \\ g &= \frac{\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}_{\text{vac}}}{\hbar}\end{aligned}\tag{F327}$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F328. strong coupling criterion**핵심식.**

$$g > \frac{\kappa + \gamma}{4}, \quad (F328)$$

$$\Omega_R \approx 2g$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F329. blackbody density of states

핵심식.

$$u(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1} \quad (\text{F329})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F330. Stefan-Boltzmann law

핵심식.

$$\begin{aligned} j^* &= \sigma_{\text{SB}} T^4, \\ \sigma_{\text{SB}} &= \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} \end{aligned} \quad (\text{F330})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F331. fluctuation-dissipation theorem**핵심식.**

$$S_{JJ}(\omega) = 2\hbar\omega \coth\left(\frac{\hbar\omega}{2k_B T}\right) \text{Im} \chi_{JJ}(\omega) \quad (\text{F331})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F332. Johnson-Nyquist noise

핵심식.

$$S_V(f) = 4k_B T R \quad (\hbar\omega \ll k_B T) \quad (\text{F332})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F333. Casimir pressure ideal plates

핵심식.

$$\begin{aligned}\frac{F}{A} &= -\frac{\pi^2 \hbar c}{240a^4}, \\ \frac{U}{A} &= -\frac{\pi^2 \hbar c}{720a^3}\end{aligned}\tag{F333}$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F334. Lifshitz free energy structure

핵심식.

$$\mathcal{F} = k_B T \sum_{n=0}^{\infty} \int \frac{d^2 \mathbf{k}_{\parallel}}{(2\pi)^2} \sum_{p=s,p} \ln(1 - r_{1p} r_{2p} e^{-2\kappa_n a}) \quad (\text{F334})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F335. local density of states and Im G

핵심식.

$$\rho_p(\mathbf{r}, \omega) = \frac{6\omega}{\pi c^2} \hat{\mathbf{p}} \cdot \text{Im } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \omega) \cdot \hat{\mathbf{p}} \quad (\text{F335})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F336. optical theorem quantum Green

핵심식.

$$\text{Im } \mathbf{G} = \mathbf{G} \text{Im}(\omega^2 \epsilon / c^2) \mathbf{G}^\dagger + \text{radiation channels} \quad (\text{F336})$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F337. Pauli Hamiltonian

핵심식.

$$\begin{aligned}\hat{H} &= \frac{1}{2m}(\boldsymbol{\sigma} \cdot (-i\hbar\nabla - q\mathbf{A}))^2 + q\phi, \\ &= \frac{\boldsymbol{\Pi}^2}{2m} - \frac{q\hbar}{2m}\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} + q\phi\end{aligned}\tag{F337}$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

F338. Schwinger critical field

핵심식.

$$\begin{aligned} E_S &= \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar}, \\ B_S &= \frac{E_S}{c} \end{aligned} \tag{F338}$$

조건. 고전 전자기학의 Green 함수는 양자 방출, 열복사, 잡음, Casimir 힘에서도 핵심 객체다. 특히 이 식의 단위계, 시간 convention, 경계조건을 먼저 고정해야 한다.

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Green 함수, 모드 직교성, 또는 변분원리 중 어떤 구조가 쓰였는지 한 줄로 표시한 뒤 전개한다.

검산. 양변의 차원, 손실이 0인 극한, 주파수 0 또는 무한대 극한, 경계면의 접선/법선 조건을 순서대로 확인한다.

자가 점검. 이 카드의 식에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항 또는 텐서가 새로 생기는지 말해보라.

Part II

대표 유도 증보편

원본의 대표 유도 25선 뒤에 이어지는 압축 유도 카드다. 완전한 엄밀 증명보다, 시험과 연구 노트에서 빠르게 재구성할 수 있는 핵심 줄기를 남겼다.

Chapter 13

대표 유도 D026–D085

D026. Green 첫 항등식에서 유일성 정리

목표식.

$$\int_V |\nabla \psi|^2 dV = \oint \psi \partial_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi dV \quad (\text{D026})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D027. 접지 구 영상전하의 위치

목표식.

$$b = R^2/a, \quad q' = -(R/a)q \quad (\text{D027})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D028. 다중극 전개와 traceless 사중극자

목표식.

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{r} + \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2} + \frac{Q_{ij}\hat{r}_i\hat{r}_j}{2r^3} + \dots \right) \quad (\text{D028})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D029. Clausius-Mossotti 식

목표식.

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha_m}{3\epsilon_0} \quad (\text{D029})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D030. 자기쌍극자의 delta 항

목표식.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3\hat{r}(\mathbf{m} \cdot \hat{r}) - \mathbf{m}] + \frac{2\mu_0}{3} \mathbf{m} \delta^{(3)}(\mathbf{r}) \quad (\text{D030})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D031. Poynting 정리

목표식.

$$\partial_t u + \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (\text{D031})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D032. Maxwell stress tensor로 힘 구하기

목표식.

$$\mathbf{F} = \oint_S T \cdot \hat{n} da \quad (\text{D032})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D033. Lorenz gauge에서 지연퍼텐셜

목표식.

$$\square A^\mu = -\mu_0 J^\mu \Rightarrow A^\mu = \mu_0 G_{\text{ret}} * J^\mu \quad (\text{D033})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D034. 평면파 횡파성

목표식.

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_0 = 0, \quad \mathbf{B}_0 = \omega^{-1} \mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 \quad (\text{D034})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D035. Fresnel 계수

목표식.

$$E_i + E_r = E_t, \quad H_i - H_r = H_t \quad (\text{D035})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D036. Brewster 각

목표식.

$$r_p = 0 \Rightarrow \theta_i + \theta_t = \pi/2 \quad (\text{D036})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D037. 피부깊이

목표식.

$$\nabla^2 E = i\omega\mu\sigma E \Rightarrow \delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)} \quad (\text{D037})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D038. telegrapher 방정식

목표식.

$$\partial_z V = -L\partial_t I - RI, \quad \partial_z I = -C\partial_t V - GV \quad (\text{D038})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D039. $\lambda/4$ 변압기

목표식.

$$Z_{\text{in}}(\lambda/4) = Z_0^2/Z_L \quad (\text{D039})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D040. 도파관 차단

목표식.

$$\beta^2 = k^2 - k_c^2 \quad (\text{D040})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D041. 공진기 perturbation

목표식.

$$\Delta\omega/\omega = -\frac{1}{2} \frac{\int (\Delta\epsilon |E|^2 + \Delta\mu |H|^2)}{\int (\epsilon |E|^2 + \mu |H|^2)} \quad (\text{D041})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D042. 짧은 쌍극자 복사저항

목표식.

$$R_r = 80\pi^2(\ell/\lambda)^2 \quad (\text{D042})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D043. Larmor 공식

목표식.

$$P = q^2 a^2 / (6\pi\epsilon_0 c^3) \quad (\text{D043})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D044. optical theorem

목표식.

$$\sigma_{\text{ext}} = 4\pi k^{-1} \text{Im } f(0) \quad (\text{D044})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D045. Mie Rayleigh 극한

목표식.

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3 (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 2) \quad (\text{D045})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D046. Lorentz 변환으로 자기장 얻기

목표식.

$$\mathbf{B}' = -\gamma \mathbf{v} \times \mathbf{E}/c^2 \quad (\mathbf{B} = 0) \quad (\text{D046})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D047. 작용 변분으로 Maxwell 방정식

목표식.

$$\delta S / \delta A_\mu = 0 \Rightarrow \partial_\nu F^{\nu\mu} = \mu_0 J^\mu \quad (\text{D047})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D048. Noether와 전하보존

목표식.

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \chi \Rightarrow \partial_\mu J^\mu = 0 \quad (\text{D048})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D049. FDTD Courant 조건

목표식.

$$c\Delta t\sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2}} \leq 1 \quad (\text{D049})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D050. Yee 수치분산

목표식.

$$\sin^2(\omega\Delta t/2)/(c\Delta t/2)^2 = \sin^2(k\Delta x/2)/(\Delta x/2)^2 \quad (\text{D050})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D051. PML 좌표 stretching

목표식.

$$\partial_x \rightarrow s_x^{-1} \partial_x \quad (\text{D051})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D052. FEM 약형

목표식.

$$\int (\nabla \times w)^* \mu^{-1} (\nabla \times E) - \omega^2 w^* \epsilon E = i\omega \int w^* J \quad (\text{D052})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D053. MoM 행렬화

목표식.

$$J = \sum_n I_n f_n \Rightarrow \sum_n Z_{mn} I_n = V_m \quad (\text{D053})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D054. adjoint gradient

목표식.

$$A^T \lambda = (\partial F / \partial x)^T \quad (\text{D054})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D055. Vlasov moment 방정식

목표식.

$$\int v^n [\partial_t f + v \cdot \nabla f + (q/m)(E + v \times B) \cdot \nabla_v f] dv = 0 \quad (\text{D055})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D056. 플라즈마 진동

목표식.

$$\omega_{pe}^2 = n_e e^2 / (\epsilon_0 m_e) \quad (\text{D056})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D057. Alfven 속도

목표식.

$$v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho_m} \quad (\text{D057})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D058. MHD frozen-in flux

목표식.

$$R_m \gg 1 \Rightarrow d\Phi_B/dt = 0 \quad (\text{D058})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D059. Landau damping contour

목표식.

$$\omega \rightarrow \omega + i0^+ \quad (\text{D059})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D060. Bloch 정리

목표식.

$$E(r + R) = e^{ik \cdot R} E(r) \quad (\text{D060})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D061. Chern 수의 정수성

목표식.

$$C = (2\pi)^{-1} \int_{\text{BZ}} \Omega_z d^2k \in \mathbb{Z} \quad (\text{D061})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D062. GSTC 유도

목표식.

$$\int_{-0}^{+0} \nabla \times H \, dn = \hat{n} \times (H_2 - H_1) \quad (\text{D062})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D063. Purcell factor**목표식.**

$$F_P = \frac{3}{4\pi^2} (\lambda/n)^3 Q/V \quad (\text{D063})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.**2단계.** 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.**3단계.** 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.**자가 점검.** 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D064. Aharonov-Bohm 위상

목표식.

$$\Delta\varphi = q\Phi_B/\hbar \quad (\text{D064})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D065. Landau level

목표식.

$$E_n = \hbar\omega_c(n + 1/2) \quad (\text{D065})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D066. Casimir 압력

목표식.

$$F/A = -\pi^2 \hbar c / (240a^4) \quad (\text{D066})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D067. fluctuation-dissipation

목표식.

$$S(\omega) \propto \coth(\hbar\omega/2k_B T) \operatorname{Im} \chi \quad (\text{D067})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D068. Johnson noise

목표식.

$$S_V = 4k_B T R \quad (\text{D068})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D069. surface plasmon 조건

목표식.

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 = 0 \quad (\text{nonretarded resonance}) \quad (\text{D069})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D070. Bode-Fano 한계

목표식.

$$\int_0^\infty \ln(1/|\Gamma|)d\omega \leq \pi/(RC) \quad (\text{D070})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D071. reciprocity 정리

목표식.

$$\int (E_1 \cdot J_2 - E_2 \cdot J_1) = \oint (E_1 \times H_2 - E_2 \times H_1) \cdot n \quad (\text{D071})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D072. Huygens 원리

목표식.

$$J_s = n \times H, \quad M_s = -n \times E \quad (\text{D072})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D073. Green tensor LDOS

목표식.

$$\rho \propto \text{Im Tr } G(r, r; \omega) \quad (\text{D073})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D074. passivity와 Kramers-Kronig

목표식.

$$\chi(t < 0) = 0 \Rightarrow \chi(\omega) \text{ analytic in UHP} \quad (\text{D074})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D075. 비등방 고유값 문제

목표식.

$$k \times \mu^{-1}(k \times E) + \omega^2 \epsilon E = 0 \quad (\text{D075})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D076. Hamiltonian optics eikonal

목표식.

$$|\nabla S|^2 = n^2, \quad k = \nabla S \quad (\text{D076})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D077. geometric phase of polarization**목표식.**

$$\gamma = i \oint \langle u | \nabla u \rangle \cdot dk \quad (\text{D077})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.**2단계.** 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.**3단계.** 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.**자가 점검.** 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D078. optical force dipole

목표식.

$$\langle F_i \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ p_j^* \partial_i E_j \} \quad (\text{D078})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D079. Maxwell-Garnett dilute limit

목표식.

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx \epsilon_h + 3f\epsilon_h(\epsilon_i - \epsilon_h)/(\epsilon_i + 2\epsilon_h) \quad (\text{D079})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D080. ray impedance matching

목표식.

$$r = 0 \Rightarrow Z_1 = Z_2 \quad (\text{D080})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D081. Gaussian beam waist

목표식.

$$z_R = \pi w_0^2 / \lambda \quad (\text{D081})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D082. Fraunhofer 조건

목표식.

$$R \gg 2D^2/\lambda \quad (\text{D082})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

D083. Fraunhofer diffraction integral

목표식.

$$U(x, y) \propto \mathcal{F}\{U_0(\xi, \eta)\} \quad (\text{D083})$$

1단계. 먼저 대칭성, 경계조건, 또는 gauge 조건을 적어 미지수를 줄인다.

2단계. 적분형 Maxwell 방정식, Green 항등식, Fourier 변환, 또는 변분식을 적용한다.

3단계. 표면항, 방사조건, 정규화 조건을 확인하고 물리량의 부호를 정한다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 달라지는지 표시해보라.

Part III

연구 문제와 논문 읽기 체크카드

이 Part는 공식을 실제 연구 문제로 연결하기 위한 카드다. 논문을 읽거나 설계를 시작하기 전에 가정과 검산식을 먼저 표시하는 습관을 만든다.

Chapter 14

연구 체크카드 R005–R034

R005. 논문 읽기 1: 시간 convention

핵심 판단식.

$$e^{-i\omega t} \Rightarrow \epsilon_c = \epsilon + i\sigma/\omega, \quad e^{+i\omega t} \Rightarrow \epsilon_c = \epsilon - i\sigma/\omega \quad (\text{R005})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R006. 논문 읽기 2: 단위계

핵심 판단식.

$$\nabla \cdot E = \rho/\epsilon_0 \text{ (SI)}, \quad \nabla \cdot E = 4\pi\rho \text{ (Gaussian)} \quad (\text{R006})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R007. 논문 읽기 3: reciprocity 판정

핵심 판단식.

$$\epsilon^T = \epsilon, \quad \mu^T = \mu, \quad \xi^T = -\zeta \Rightarrow \text{reciprocal} \quad (\text{R007})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R008. 논문 읽기 4: passivity 판정

핵심 판단식.

$$\langle P_{\text{abs}} \rangle \geq 0 \quad (\text{R008})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R009. 수치 검증 1: 수렴률

핵심 판단식.

$$Q(h) = Q_0 + Ch^p \quad (\text{R009})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R010. 수치 검증 2: 에너지 보존

핵심 판단식.

$$P_{src} = P_{abs} + P_{rad} + dU/dt \quad (\text{R010})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R011. 수치 검증 3: reciprocity benchmark

핵심 판단식.

$$S_{21} = S_{12} \quad (\text{R011})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R012. 실험 연결 1: VNA calibration

핵심 판단식.

$$S_{\text{measured}} \rightarrow S_{\text{DUT}} \quad \text{by SOLT/TRL} \quad (\text{R012})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R013. 실험 연결 2: material retrieval

핵심 판단식.

$$n = \frac{1}{k_0 d} \cos^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) \quad (\text{R013})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R014. 실험 연결 3: Q extraction

핵심 판단식.

$$Q_L = \omega_0 / \Delta\omega, \quad Q_i^{-1} = Q_L^{-1} - Q_e^{-1} \quad (\text{R014})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R015. 안테나 연구: Chu bound scale

핵심 판단식.

$$Q \gtrsim (ka)^{-3} + (ka)^{-1} \quad (\text{R015})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R016. 메타표면 연구: 목표 위상

핵심 판단식.

$$\Phi(x, y) = -k_0(\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) \quad (\text{R016})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R017. 포토닉 결정 연구: gap-midgap ratio

핵심 판단식.

$$\Delta\omega/\omega_m = 2(\omega_2 - \omega_1)/(\omega_2 + \omega_1) \quad (\text{R017})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R018. 나노포토닉스 연구: mode volume

핵심 판단식.

$$V_{\text{mode}} = \frac{\int \epsilon |E|^2 dV}{\max \epsilon |E|^2} \quad (\text{R018})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R019. 플라스마 연구: instability growth

핵심 판단식.

$$\omega = \omega_r + i\gamma, \quad \gamma > 0 \Rightarrow \text{unstable} \quad (\text{R019})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R020. 역설계 연구: objective

핵심 판단식.

$$F = |c^\dagger E|^2 \quad \text{or} \quad F = P_{\text{target}}/P_{\text{input}} \quad (\text{R020})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R021. 열복사 연구: view factor

핵심 판단식.

$$P = \int d\omega [\Theta(\omega, T_1) - \Theta(\omega, T_2)] \mathcal{T}(\omega) \quad (\text{R021})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R022. Casimir 연구: imaginary frequency

핵심 판단식.

$$\omega = i\xi, \quad \epsilon(i\xi) \in \mathbb{R}^+ \quad (\text{R022})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R023. 양자광학 연구: cooperativity

핵심 판단식.

$$C = \frac{4g^2}{\kappa\gamma} \quad (\text{R023})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R024. 위상광학 연구: gap Chern sum

핵심 판단식.

$$C_{\text{gap}} = \sum_{n \in \text{bands below gap}} C_n \quad (\text{R024})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R025. 비선형광학 연구: phase matching

핵심 판단식.

$$\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 \quad (\text{R025})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R026. THG/FWM 연구

핵심 판단식.

$$P^{(3)}(\omega_4) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E_1 E_2 E_3^* \quad (\text{R026})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R027. 광힘 연구: stress tensor integration

핵심 판단식.

$$\langle F \rangle = \oint \langle T \rangle \cdot n \, da \quad (\text{R027})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R028. 도파관 연구: group index

핵심 판단식.

$$n_g = c/v_g = c \partial\beta/\partial\omega \quad (\text{R028})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R029. 통신 연결: link budget

핵심 판단식.

$$P_r [\text{dBm}] = P_t + G_t + G_r - L_{fs} - L_{misc} \quad (\text{R029})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R030. EMC 연결: shielding effectiveness

핵심 판단식.

$$SE = 20 \log_{10} |E_i/E_t| \quad (\text{R030})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R031. 반도체 연결: plasma dispersion

핵심 판단식.

$$\Delta n \propto -\Delta N_e/m_e^* - \Delta N_h/m_h^* \quad (\text{R031})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R032. 그래핀 광학

핵심 판단식.

$$\sigma_g(\omega) \approx \frac{e^2 E_F}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i/\tau} \quad (\text{R032})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R033. 2D materials boundary

핵심 판단식.

$$n \times (H_2 - H_1) = \sigma_s E_t \quad (\text{R033})$$

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

R034. 최종 검산 루프

핵심 판단식.

units $\rightarrow$ limits $\rightarrow$ boundary $\rightarrow$ conservation $\rightarrow$ benchmark (R034)

사용법. 논문 초록보다 먼저 식의 가정, 실험/수치 조건, 보존법칙 검증 여부를 표시한다.

전자공학 연결. 회로 변수로 줄일 수 있는 영역과 full-wave field 해석이 필요한 영역을 구분한다.

자가 점검. 이 카드를 실제 과제나 프로젝트 하나에 적용해, 필요한 물리량 세 개를 적어보라.

증보판 참고자료

이 PDF는 원문을 장황하게 복제하지 않고 공개 강의자료와 표준 전자기학 지식을 바탕으로 핵심 구조와 공식을 한국어로 재구성했다. 깊게 공부할 때는 반드시 원전을 함께 확인하라.

Bibliography

- [1] MIT OpenCourseWare, *8.07 Electromagnetism II*, Fall 2012. <https://ocw.mit.edu/courses/8-07-electromagnetism-ii-fall-2012/>
- [2] MIT OpenCourseWare, *6.013 Electromagnetics and Applications*, Spring 2009. <https://ocw.mit.edu/courses/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/>
- [3] David Tong, *Lectures on Electromagnetism*, University of Cambridge. <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/justem.html>
- [4] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. II*. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html
- [5] OpenStax, *University Physics Volume 2*. <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/>
- [6] NIST, *CODATA Fundamental Physical Constants*. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
- [7] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., Wiley.
- [8] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields; Electrodynamics of Continuous Media*.
- [9] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*.
- [10] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*.
- [11] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*.
- [12] A. Taflov and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*.
- [13] J. D. Joannopoulos et al., *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*.
- [14] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*.
- [15] Meep Documentation, *Introduction to FDTD and Maxwell Equations*. <https://meep.readthedocs.io/en/latest/Introduction/>

마지막 10분 복습 루틴

1. Maxwell 방정식 네 줄을 SI와 phasor convention으로 다시 쓴다.
2. 문제의 소스, 경계, 매질, 주파수 영역을 표시한다.
3. $kL \ll 1$ 인지, full-wave 문제인지 판단한다.
4. 에너지 보존식 또는 Poynting flux를 하나 적는다.
5. reciprocity, passivity, causality 중 해당되는 검산식을 표시한다.
6. 수치 결과라면 mesh convergence와 benchmark를 찾는다.
7. 논문이라면 단위계, 시간 convention, 손실 부호, 경계조건을 먼저 체크한다.
8. 자신이 모르는 항은 “가정이 완화되어 생긴 항” 인지 “새로운 물리” 인지 구분한다.
9. 마지막으로 결과의 극한값 $\omega \rightarrow 0$, $r \rightarrow \infty$, $\sigma \rightarrow \infty$ 를 확인한다.
10. 한 줄 요약: 전자기학은 소스, 경계조건, 보존법칙, 인과성이 결합된 장 이론이다.