AETHER EM · DESKTOP 2026 V2.3 PRACTICAL DESIGN GUIDE

그림으로 배우는
3D 전자기 · 위저드 · 열 설계

Aether EM Desktop 2026 V2.3 실전 설계 가이드 — 3D Full-Wave FEM부터
안테나·PA·WPT 자동 합성 위저드, 회로도 Co-sim, 전기-열 통합 방열, 전수 따라하기까지



Full-Wave FEM | Antenna · PA Wizards | Live PA Tuner | Circuit + EM Co-sim | WPT Beam & Cavity | Thermal Workbench | Step-by-Step Labs

AETHER EM DESKTOP 2026 V2.3
2026년 11월 전문가 마스터 개정판 · 만든 사람 이경학

WARPSOLUTION Inc.
www.warpsolution.com

Aether EM 실전 설계 가이드 — Desktop 2026 V2.3 (전문가 마스터 개정판)

그림과 여섯 캐릭터로 배우는 3D 전자기 해석 · 독보적 RF 자동 합성 위저드 · 전기-열 통합 방열 · 실전 따라하기 & 샘플 대백과

대상 소프트웨어 · Aether EM Desktop 2026 V2.3 (Warps 3D Full-Wave FEM & Electro-Thermal Suite)
기준 빌드 · 2026년 11월 에디션 (개정 전 판: v1.96 전문가편집판 · 총 9부 42장 구성)
등장인물 · 에테르(Aether), 포티(Porty), 웨이비(Wavy), 메시(Mesh), 위즈(Wiz), 써미(Thermy)
만든 사람 · 이경학
펴낸 곳 · WARPSOLUTION Inc. (www.warpsolution.com)

이 책의 모든 UI 화면, 6종 렌더링 뷰포트, 위저드 대화상자, 열해석 온도 분포, 실측 성능 차트는 실제 **Aether EM Desktop 2026 V2.3** 실행 환경에서 직접 캡처·검증했습니다. 본문에 수록된 안테나 자동 튜닝, CGH40010 / CG2H40010 GaN 전력증폭기(PA) 튜너 어드벤처 및 흑색 아노다이징 히트싱크 비교(TH1~TH4), 공동 WPT 공진기, 열해석 검증 벤치마크(Th1~Th8), 그리고 35종 이상의 배포 예제(`.warp`) 수치는 실제 솔버 검증 데이터를 그대로 재현한 값입니다. 모든 폐형식(closed-form) 초기 합성치는 반드시 3D FEM 검증과 실측 교정을 거쳐 최종 양산 설계에 적용하시기 바랍니다.

MEET THE 6 CREW MEMBERS

여섯 친구가 설계 실험실을 안내합니다

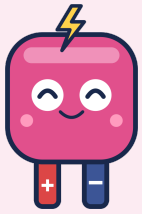
Desktop 2026 V2.3 개정판에는 위저드 마법사 **위즈**와 방열 코치 **써미**가 새롭게 합류했습니다! 말풍선 색깔과 배지만 봐도 실무 요령인지, 함정 경고인지, 타 툴에는 없는 독보적 무기인지 단번에 알아볼 수 있습니다.



GUIDE · 청록

에테르 Aether

실험실 총괄 안내 로봇입니다. 가장 빠른 실무 순서와 단축 요령을 콕 집어 알려 줍니다.



CAUTION · 분홍

포티 Porty

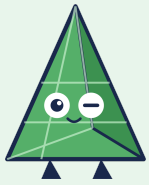
+와 – 두 다리를 가진 포트 요정입니다. 극성·단위·기준면처럼 실수하기 쉬운 함정을 막아 줍니다.



THEORY · 파랑

웨이비 Wavy

전자기파 친구입니다. 복잡한 맥스웰 방정식과 임피던스 물리를 직관적인 그림 언어로 풀어 줍니다.



CHECK · 초록

메시 Mesh

사면체 격자 수호자입니다. 수렴 판정(|ΔS|), 에너지 보존, 거친 격자 착시 수사를 책임집니다.



WIZARD · 보라 · NEW

위즈 Wiz

스미스 차트 메달과 마법봉을 든 자동합성 마법사! 1초 공식 합성(≈)과 3D FEM 보정의 비결을 전수합니다.



THERMAL · 다홍 · NEW

써미 Thermy

구리 방열판 왕관을 쓴 열해석 코치! 열병목 추적, TIM·비아·아노다이징 냉각과 열폭주 방지를 맡습니다.

CREW COMIC **실험실 미니 만담 — 왜 4개의 고가 상용 툴을 오가던 일을 한 파일에서 끝낼까?**



위즈 사양 숫자 몇 개만 주면 내가 0.2초 만에 패치 배열이랑 진성 드레인 Class-F 전력증폭기 기판을 뚝딱 그려 줄게!

메시 잠깐! 공식(≈)으로 그린 첫 도면은 접합부 프린징 때문에 주파수가 1~3 % 비껴가. 내 적응형 FEM 메시와 공간 사상으로 검증해야 진짜 설계야.





써미 그리고 S11이 아무리 예뻐도 GaN 칩이 160 °C로 달궈지면 효율이 뚝 떨어지며 열폭주가 온다고! CAD 변환 없이 바로 열해석까지 한 번에 끝내자!

마스터 따라하기

7부 미션 & 8부 샘플 백과

`Ctrl` + `N` 백지 좌표 입력부터 GaN PA 8단계 탐정 미션, 35+ 샘플 전수 해설까지 수록했습니다.

메뉴와 리본

Results ▸ PA Results

상단 메뉴바 영문 경로와 한국어 리본 버튼을 함께 표기해 어디서든 길을 잃지 않습니다.

3종 핵심 배지

NEW V2.3 UPGRADE ONLY IN AETHER

NEW V2.3 신규 기능, UPGRADE 고도화 기능, ONLY IN AETHER 타 상용 EM 툴에 없는 독보적 무기입니다!

ONLY IN AETHER EM · KILLER DIFFERENTIATORS

다른 상용 EM 툴에는 없다! 오직 Aether EM만의 12대 독보적 무기

기존 RF 설계에서는 **3D EM 솔버 ↔ 회로 시뮬레이터 ↔ PCB CAD ↔ 열해석(CFD) 툴** 네 가지를 번갈아 띄우고 파일을 내보내며 며칠을 허비했습니다. Aether EM Desktop 2026 V2.3이 단일 `.warp` 안에서 이 장벽을 어떻게 허물었는지 확인하세요.

---

01 · 회로도 Co-sim → 3D EM 역반영 `25·35장`

자유 배선 SVG 회로도에서 Murata 실제 칩·다이오드를 실시간 슬라이더로 튜닝한 뒤, 클릭 한 번에 3D 모델의 포트를 실제 **Lumped RLC 경계로 역치환**합니다.

02 · 무재해석 0.1초 실시간 PA Tuner `24·36장`

4포트 보드 EM을 단 1번만 풀어 두면, 재메시 없이 E24 실물 칩 자동 튜닝·400장 공장 수율 주사위·방열판별 접합온도(T_j)와 열폭주를 0.1초 만에 조율합니다.

03 · 진성 드레인(Intrinsic) Class-F 합성 `24·37장`

패키지 본드와이어(L_{pkg})·용량(C_{ds}) 뒤에 숨은 진짜 **다이 전류원 평면**을 역산해 $2f_0$ 단락·$3f_0$ 개방 스텁을 꽂고 출력부 면적을 55 % 줄여 줍니다.

04 · 외부 KiCad · ADS 회로도 경쟁 심사 `23장`

내가 KiCad(`.kicad_sch`)나 ADS/AWR/SPICE로 짜 둔 정합 회로도를 그대로 읽어 들여, 위저드가 합성한 후보들과 동일 조건에서 맞대결 점수를 매깁니다.

05 · |ΔS|=0 보장 독립 열 워크벤치 `27–31장`

EM 격자와 S-파라미터를 단 1비트도 건드리지 않고 같은 3D 모델에서 즉시 열해석! 반사·안테나 방사 전력을 자동 차감한 순수 **RF Loss → Heat**를 직결합니다.

06 · 메쉬 폭발 0개! 절점 분리 TIM & 박막 동박 `28·39장`

50 µm 솔더(절점 분리)와 35 µm 구리층(접선 열전도, $595 \rightarrow 123.5^{\circ}\text{C}$!)을 얇은 3D 격자 단 한 개도 추가하지 않고 수학적으로 완벽히 풀어냅니다.

07 · 외부 구리 솔리드 → Step to RF Line `12·36장`

STEP·KiCad·Gerber로 가져온 멍텅구리 구리 덩어리를 우클릭 한 번에 아래 기판을 아는 **스마트 파라메트릭 RF 선로**로 승격해 미앤더·스텁을 바로 답니다.

08 · 벤치 구리 테이프 실측 역산기 `19장`

실험실에서 VNA를 보며 스텁 끝에 칼로 잘라 붙인 **동박 테이프 (mm×mm)** 크기를 입력하면, 다음 PCB 거버에 반영할 정확한 패턴 연장량을 역산합니다.

09 · 비파괴 GND 자동 비움 & Via Fill pH 직독 `9–10장`

스텁을 옮기거나 지우면 파냈던 CPWG 접지면과 기판 비아 구멍이 감쪽같이 복원되며, $\lambda_g/10$ 비아 펜스의 병렬 합성 인덕턴스(pH)를 즉시 계산합니다.

10 · Chu 물리 한계 역산 & 1패스 공간 사상 `20·34장`

무리한 초소형 안테나 요구에 이론 최소 구 지름($2a_{\min}$)을 제시하고, `Solved at (retune)` 공간 사상으로 30번 옵티마이저 돌릴 일을 단 1회 재해석으로 끝냅니다.

11 · 근거리 초점 WPT · 인체 안전선 · 공동 충전 `26장`

프레넬 수(N_F) 초점 이동, 역지향 파일럿 추적, $10\ \text{W/m}^2$ 법적 노출 상한과 91.9 % 효율 433 MHz 금속 챔버 공진 충전을 전용 리본에서 설계합니다.

12 · 표준기 없는 3-Line 디임베딩 & 6종 세이더 `3·18장`

고가 TRL 교정 키트 없이 선로 3개만으로 SMA 런치 기생을 벗겨 내고, **웹툰·청사진·연필 스케치·X-Ray** 셰이더로 특허·논문 삽화를 즉시 뽑아냅니다.

이 책의 독서 전략: 본문 곳곳의 **ONLY IN AETHER** 배지를 눈여겨보세요! 다른 툴에서 수작업 스크립트와 파일 변환으로 고생하던 병목을 단 몇 초 만에 뚫어 주는 Aether EM만의 치트키입니다.

WHAT'S NEW IN DESKTOP 2026 V2.3

Desktop 2026 V2.3 핵심 업그레이드 & 9부 마스터 로드맵

단순 3D EM 솔버를 넘어 **설계 자동화(Wizards) · 회로/비선형 통합(Co-sim) · 무선전력(WPT) · 전기-열 통합 방열 · 전수 실습 대백과**로 완성된 V2.3의 전체 지도입니다.

분야 · 핵심 기능	무엇이 새로워졌고 왜 강력한가	장
6종 3D Look & 오픈 프리뷰 NEW V2.3	**Realistic · 2D 웹툰 · 청사진 · 연필 스케치 · X-Ray · 높이 컬러** 실시간 셰이더와 열기 대화상자 **.warp 3D 미리보기**·한글 초성 검색·18종 템플릿	3–4
본드와이어 · 비아 · 무라타 칩 NEW V2.3	JEDEC 4점 **Bondwire**, $\lambda_g/10$ 자동 **Via Fill**(병렬 pH 계산), 54종 **Murata .s2p** 실제 기생 공진(SRF) 반영, 양방향 버터플라이 스텁	9–10
고속 STEP 반입 & RF 승격 ONLY IN AETHER	바이너리 블롭 캐시 고속 STEP/NURBS DXF 반입, **Faces** 직접 편집(Push-Pull/Heal), 외부 구리 솔리드를 파라메트릭 선로로 바꾸는 **Step to RF Line**	7, 12
고속 ROM 스윕 & 베이지안 최적화 UPGRADE	투영 차수축소(**_ProjectedROM**) 고속 스윕, 병렬 워커, 최소 횟수 FEM으로 답을 찾는 **Optuna Bayesian(TPE)** 서로게이트 최적화	14–15
출판급 AePlot · 3-Line 디임베딩 NEW V2.3	더블클릭 비모달 ✎ **Edit** 차트 편집기(2× PNG/SVG), 표준기 없는 **3-Line De-embedding**, 수동성 보정 **Vector Fit SPICE**, 60 fps 3D HTML 뷰어	16–18
전송선 · 정합 · 필터 · 결합기 ONLY IN AETHER	고조파 분산·**동박 테이프 벤치 역산(TL Wizard)**, 듀얼 스미스·정류 다이오드·TLT(**Matching**), 기생 선보상(**Filter**), 단선 고장 진단(**RF Circuit**)	19, 22
안테나 2원화 & 메타표면 NEW V2.3	22종 배열·파레토·프로브 급전망 **Antenna Wizard**(+메타표면·FPRA)와 Chu 물리 한계·소형화·FEM 자동 튜닝 **Antenna Designer** 완비	20–21
PA 4단계 통합 생태계 ONLY IN AETHER	17종 소자+KiCad/ADS 경쟁 **PA Wizard** → **Bias Designer**(PDN 댐핑) → **Class-F Auto-Stub**(진성 드레인·55 % 축소) → 0.1초 실시간 **PA Tuner**	23–24
자유 배선 회로도 Co-sim ONLY IN AETHER	SVG 캔버스에 EM N-포트·Murata 칩·쇼트키 다이오드(배압기 200× 가속 HB)를 배선해 튜닝 후 **3D EM Lumped RLC로 원클릭 역반영**	25
무선전력 · 공동 WPT ONLY IN AETHER	전용 **무선전력 · 빔** 리본과 **WPT Beam** 메뉴. Goubau BCE·프레넬 초점 진실·인체 노출(10 W/m²) 안전선·433 MHz **Cavity WPT** 공진 충전	26
전기-열 통합 방열 · 지그 ONLY IN AETHER	독립 **Thermal** 워크벤치(|ΔS|=0) + **RF Loss→Heat** + 절점 분리 TIM + 비아/코인/PCM + **흑색 아노다이징(−26 K) · 열폭주 · 메탈 지그**	27–31
실전 마스터 따라하기 & 샘플 백과 NEW V2.3	**7부(32–37장)** 백지 좌표 입력·배열·스텁·렉테나·GaN PA 8단계 탐정 미션·지그 설계 + **8부(38–39장)** 35+ `.warp` & 18종 `.py` 전수 해설 도감	32–39

차례

01 시작하기 화면·3D 뷰·다중 디자인 프로젝트 9

01 Aether EM Desktop 2026 V2.3 한눈에 보기 10
02 화면 구성과 8개 리본 · 11개 메뉴 익히기 15
03 3D 뷰 다루기와 6종 렌더링 스타일 (Look) 19
04 다중 디자인 프로젝트, 3D 열기 미리보기, 템플릿과 예제 22

02 3D 모델링과 실전 RF 가공 도형·본드와이어·실제 칩·외부 CAD 28

05 기본 도형 · 마우스 드로잉 · 수식 입력 29
06 정밀 선택 · 측정 · 파라메트릭 설계 변수 32
07 변환 · 배열 · 불리언 · 외부 솔리드 면 편집 (Faces) 35
08 스윕과 수식 곡선: 나선 · 헬릭스 · 재편집 38
09 실전 RF PCB · 본드와이어 · 스마트 비아 · 무라타 실제 칩 41
10 동박 겹침 자동 정리 (Clear · Push)와 DRC 검수 47
11 재료 라이브러리와 도체 · 분산 매질 모델링 49
12 고속 외부 CAD (STEP·DXF·KiCad·Gerber) 반입과 Step to RF Line 50

03 경계 · 포트 · 고속 솔버 · 최적화 정확하고 빠르게 답을 얻는 법 54

13 경계 조건 · 개방 영역 (Radiation/PML) · 포트 완전 정복 55
14 Solution Setup · 적응형 메시 · 고속 주파수 스윕 60
15 검사 · 실행 · Eigenmode · Optuna 베이지안 최적화 64

04 시뮬레이션 결과 쉽게 읽는 법 · 출판급 리포트 그래프 한 줄에서 물리 원인과 해결책까지 67

16 S-파라미터 · 스미스 차트 · 수렴표 쉽게 읽는 법과 AePlot 68
17 3D 전기장·자기장·표면전류와 원거리 방사 패턴 쉽게 읽는 법 73
18 3-Line 디임베딩 · Vector Fit SPICE · 60 fps 3D 뷰어 공유 78

05 위저드 & 자동 설계 대백과 사양 입력에서 안테나·PA·회로·WPT 완성까지 81

19 위저드 생태계 지도 · 공통 UX · 전송선로 위저드 82
20 안테나 2단계 정복: Antenna Wizard · 메타표면 · Antenna Designer 86
21 무직각 자동 배선 (Smart Connect)과 배열 급전망 (Auto Feed) 90
22 수동 회로 합성 3총사: 임피던스 정합 · 필터 · 분배/결합기 93
23 전력증폭기(PA) 4단계 완전 정복 ①: PA Wizard & Bias Designer 96
24 전력증폭기(PA) 4단계 완전 정복 ②: Class-F Auto-Stub & 실시간 PA Tuner 99
25 비선형 & 자유 배선 회로도 Co-sim (SPICE + EM + 역반영) 103
26 무선전력전송 · 빔포밍 · 공동 공진 워크벤치 (WPT Beam) 106

06 열해석 워크벤치 & 방열 설계 접합온도 Tj부터 흑색 아노다이징·열폭주 방지까지 110

27 열해석 워크벤치 입문: EM 무결성(|ΔS|=0)과 열전달 물리 첫걸음 111
28 3대 발열원과 절점 분리 TIM · 박막 동박(Thin Copper)의 마법 116
29 5대 방열 도우미 실전 가이드: 열비아 · 구리 코인 · 스프레더 · PCM · 펄스 119
30 열병목 추적(Heat Path) · 자동 최적화 · 온도→RF 양방향 결합 122
31 [심화 특집] GaN PA 전기-열 통합 냉각 설계와 메탈 지그(Jig) 126

07 실전 설계 따라하기 마스터클래스 Ctrl+N 백지 좌표부터 GaN PA 8대 미션까지 131

32 따라하기 1 (입문) · 백지(Ctrl+N)에서 좌표로 그리는 다이폴 & 패치 안테나 132
33 따라하기 2 (초중급) · 1×4 배열 자동 급전 · 실시간 빔 조향 · 80 GHz 위상 사건 135
34 따라하기 3 (중급) · 도형 놀이터 (rf_shapes_playground) & 1패스 공간 사상 정복 139
35 따라하기 4 (중고급) · 5.8 GHz WPT 렉테나 + 7포트 정류기 HB & 회로도 역반영 142
36 따라하기 5 (전문가 미션편) · CGH40010 5.8 GHz GaN PA 튜너 어드벤처 145
37 따라하기 6 (플래그십 R&D) · CG2H40010 −33 % 소형화 · 기생 감사 · 메탈 지그 설계 151

08 **배포 샘플 파일 & 스크립트 대백과 35+ 실전 .warp 프로젝트와 Python 자동화 도감** 154

38 전자기 검증 · 안테나 · 메타표면 · 수동 회로 · WPT 샘플 29종 도감 155

39 열해석 벤치마크(Th1~Th8) · 고출력 PA 샘플 계보 · Python 스크립트 18종 백과 158

09 **전문가 부록 응급 트러블슈팅 · 메뉴 지도 · 용어 사전** 161

40 증상별 문제 해결 가이드 (Troubleshooting) 162

41 단축키 총정리와 Desktop 2026 V2.3 전체 메뉴 지도 167

42 지원 범위 매트릭스 · 물리 한계 요약 · 핵심 용어 사전 172

10 **개정 보강편 설정 · 내보내기 · 결과 해석 · 무선전력 · AI** 175

43 Setup Advisor와 새 속도 기본값 177

44 결과를 파일로: Export 총정리 180

45 다이폴 하나로 읽는 전류 · E · H · 방사 183

46 무선전력 2차 기능: 추적 · 노출 · 자세 · 정류기 · 공진기 186

47 AI 에이전트와 Physical AI 연계 189

+ 현장 치트시트: 새 기능 한 장 요약 191

PART

01

시작하기
화면·3D 뷰·다중 디자인 프로젝트

Aether EM Desktop 2026 V2.3은 맥스웰 방정식을 3차원 그대로 푸는 Full-Wave FEM 전자기 솔버를 중심에 두고, 자동 합성 위저드·회로 Co-sim·무선전력·열해석 워크벤치를 한 창에 통합한 실전 RF 설계 환경입니다. 1부에서는 전체 설계 루프의 큰 그림, 8개 리본과 11개 메뉴 구성, 6종 실시간 렌더링 뷰포트 조작, 다중 디자인 프로젝트와 3D 파일 미리보기를 익힙니다.



01 Aether EM Desktop 2026 V2.3 한눈에 보기

02 화면 구성과 8개 리본 · 11개 메뉴 익히기

03 3D 뷰 다루기와 6종 렌더링 스타일 (Look)

04 다중 디자인 프로젝트, 3D 열기 미리보기, 템플릿과 예제

01 CHAPTER

Aether EM Desktop 2026 V2.3 한눈에 보기



단순히 그린 형상을 해석만 하던 시대는 지났습니다. 사양 입력에서 자동 합성, 3D FEM 검증, 비선형 회로 결합, 발열·방열 역결합까지 이어지는 Aether EM의 전체 지도를 먼저 펼쳐 봅니다.

배울 것
Full-Wave FEM과 통합 설계 범위

해 볼 것
페루프 5단계 작업 흐름

핵심 개념
파장·S-파라미터·dB·Q와 검증 정확도

1.1 무엇을 풀고 어디까지 설계하는 툴인가

Aether EM의 심장은 **주파수 영역 3D Full-Wave 유한요소법(FEM) 솔버**입니다. 해석 공간 전체를 사면체(tetrahedron) 격자로 쪼개고, 사면체 모서리를 따라 정의되는 Nédélec 접선 벡터 기저함수로 전기장 $\mathbf{E}$를 직접 근사합니다. 전송선을 단순 등가회로로 치환하지 않기 때문에 비아 기생 인덕턴스, 인접 선로 간 전자기 결합, 패키지 본드와이어 방사, 하우징 공동 공진처럼 회로 시뮬레이터가 놓치는 3차원 물리 현상이 결과에 고스란히 담깁니다.

전자기 해석 모드는 크게 두 가지입니다. **Driven Modal**은 Wave Port나 Lumped Port로 고주파 전력을 인가해 다포트 S-파라미터, 전자기장 분포, 원거리장 방사 패턴을 구합니다. **Eigenmode**는 외부 포트 없이 닫힌 구조 자체의 고유 공진 주파수 f_r, 무부하 품질계수 Q_0, 모드 필드 분포를 계산합니다. 여기에 Desktop 2026 V2.3부터는 **자동 합성 위저드군**, **하모닉 밸런스·회로도 Co-sim**, **WPT 빔·공동 공진 워크벤치**, **고체 열전달 FEM 워크벤치**가 유기적으로 맞물립니다.

ANTENNA · META
안테나 · 배열 · 메타표면
22종 배열 위저드, 단일 소자 Chu 한계·소형화 설계기, 반사배열·FPRA, 3D 패턴과 빔 조향.

PASSIVE RF
전송선 · 필터 · 분배기
마이크로스트립·CPWG·스트립라인, 13종 필터 기생 선보상, 10종 분배·결합기, 무라타 실제 칩(.s2p).

PA · CLASS-F
전력증폭기 통합 설계
17종 GaN/LDMOS 라이브러리, PDN 바이어스 티, 진성 드레인 Class-F 스텁, 0.1초 실시간 PA 튜너.

CIRCUIT CO-SIM
비선형 · 회로도 결합
쇼트키 정류기 하모닉 밸런스 및 자유 배선 SVG 회로도 편집기, 몬테카를로 수율, 3D EM 역반영.

WPT BEAM
무선전력 · 공동 충전
근거리 초점 빔포밍, Goubau 수렴 효율, 인체 노출(10 W/m²) 안전 구역, 433 MHz 공동 공진 충전.

THERMAL FEM
전기-열 통합 방열
트랜지스터·RF 표피/유전체 손실 열원, TIM·열비아·구리 코인·PCM, 온도→RF 역결합과 방열판 최적화.

1.2 페루프 다섯 단계 작업 흐름

처음부터 도형을 그리든 위저드로 출발하든, Aether EM의 모든 설계는 아래 다섯 단계를 돌며 완성됩니다. **Home** 리본 탭의 아이콘도 정확히 왼쪽에서 오른쪽으로 이 순서를 따릅니다.



그림 1-1 Aether EM Desktop 2026 V2.3의 페루프 설계 흐름. 위저드 초안 합성에서 3D FEM·회로 Co-sim·열해석 역결합까지 한 프로젝트 안에서 순환합니다.

1 모델링 · 위저드 — 기본 도형·수식 변수로 직접 그리거나, 안테나·필터·PA 위저드로 검증된 파라메트릭 초기 도면을 1초 만에 생성합니다.

2 경계 · 포트 — 열린 공간(Radiation·PML), 도체 손실 경계, 신호를 넣고 빼는 포트(Wave / Lumped / 실제 칩 RLC)를 지정합니다.

3 해석 설정 — Solution Setup에서 적응형 메시 기준 주파수와 수렴 기준(|ΔS|)을 정하고, 고속 스윕 대역을 추가합니다.

4 검사 · 실행 — F5 Validation Check로 누락·충돌을 사전 점검한 뒤 F9 Analyze All로 Full-Wave FEM을 실행합니다.

5 결과 · 튜닝 · 열 — 출판급 차트(AePlot), 3D 필드, 실시간 PA 튜너, 회로도 Co-sim, 열해석(Tj)을 확인하고 변수나 스텁을 자동 보정합니다.

FIRST 3 MINUTES **처음 켜자마자 3분 만에 성공하는 첫 시뮬레이션 따라하기!**

1. **프로그램 실행 (`START_WINDOWS.cmd`)**
   설치 폴더의 `START_WINDOWS.cmd`를 더블클릭하면 로컬 FEM 솔버 엔진이 기동되면서 Aether EM Desktop 2026 V2.3 작업 창이 자동으로 열립니다.

2. **3D 미리보기로 예제 열기 (`Ctrl` + `O`)**
   상단 메뉴 **File ▸ Open Project...**를 누르고 `examples/dipole_antenna.warp`를 한 번 클릭해 보세요. 창 오른쪽에 나타나는 **실시간 3D 미리보기**를 마우스로 돌려 형상을 확인한 뒤 **Open**을 누릅니다(원본 보존을 위해 `Ctrl` + `Shift` + `S`로 내 작업 폴더에 다른 이름으로 저장해 두면 더욱 안전합니다!).

3. **사전 건강검진 (`F5`) → 전자기 해석 실행 (`F9`)**
   키보드 `F5`(리본 **Validate**)를 눌러 6개 항목에 모두 초록 체크가 뜨는지 확인한 뒤, `F9`(리본 **Analyze**)를 누릅니다. 화면 아래 `Progress` 창에서 사면체 격자가 쪼개지며 약 30초 안에 해석이 완료됩니다.

4. **첫 공진 그래프와 살아 움직이는 전류 파동 감상!**
   리본 **Results ▸ S-Parameters**를 누르면 **2.95 GHz에서 −16.9 dB로 쑥 내려간 공진 곡선**이 나타납니다! 이어서 **Results ▸ Surface Current**를 누르고 오른쪽 패널에서 **Instantaneous 체크 + ▶ Animate**를 클릭해 보세요 — 안테나 도체 팔 위를 흐르는 고주파 전류 정재파가 눈앞에서 생생하게 물결칩니다!



웨이비의 전자기 원리 노트
3D 뷰포트의 전기장·표면전류 애니메이션은 특정 주파수 f_0의 정현파 정상 상태 페이저 $\mathrm{Re}\{\mathbf{E}(\mathbf{r})e^{j\phi}\}$에서 위상 ϕ를 $0^\circ \rightarrow 360^\circ$로 회전시키는 것입니다. 시간 영역 펄스 전파(FDTD)가 아니므로 정상파 마디(null)와 진행파 위상 흐름을 읽는 용도로 보세요!

1.3 RF 설계자가 매일 쓰는 네 가지 물리 자(尺)

1. 파장(Wavelength) — 모든 치수 규칙의 기준

고주파에서 10 mm가 "긴지 짧은지"는 오직 **파장** λ만이 결정합니다. 자유공간 파장 $\lambda_0 = c/f$도 유전체 기판 위에 올라가면 유효 유전율 ε_{eff}만큼 느려져 관내 파장 $\lambda_g = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}$로 짧아집니다. 반파장 패치, $\lambda_g/4$ 임피던스 변환기, $\lambda_g/10$ 비아 펜스 간격, $\lambda_0/4$ 공기 상자 이격이 모두 파장 단위입니다.

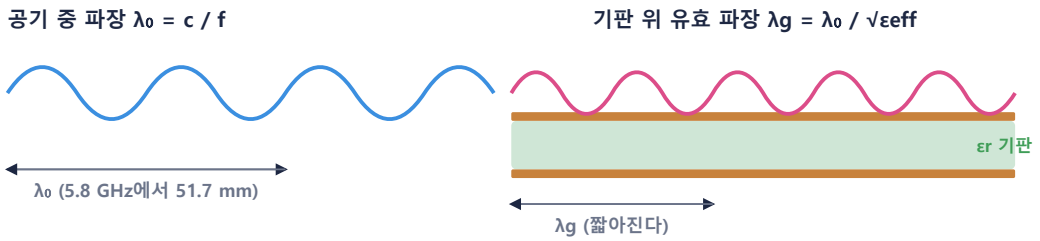


그림 1-2 자유공간 파장 λ_0와 유전체 기판 위 유효 파장 λg. 같은 5.8 GHz라도 RO4003C 기판 위에서는 파장이 약 60 %로 줄어듭니다.

대표 대역	자유공간 λ_0	공기 이격 $\lambda_0/4$	RO4003C $\lambda_g/4$ (약)	이 책의 대표 예제 · 응용
433 MHz	692.4 mm	173.1 mm	106 mm	로봇 충전용 공동 공진기 WPT (26장)
2.45 GHz	122.4 mm	30.6 mm	18.8 mm	BLE/Wi-Fi 소형 미앤더·나선 안테나, PA 로드풀
5.8 GHz	51.7 mm	12.9 mm	7.9 mm	패치 배열, WPT 빔포밍·렉테나, CGH40010 GaN PA (36장)
10 GHz	30.0 mm	7.5 mm	4.6 mm	WR-90 도파관, X-밴드 혼, 새 Setup 기본 주파수
77–80 GHz	3.75 mm	0.94 mm	0.58 mm	차량 레이더 패치 배열, 밀리미터파 본드와이어 전이

2. S-파라미터 · dB · Q — 반사, 전달, 그리고 공진의 날카로움



그림 1-3 2포트 네트워크의 입사파(a)와 반사·투과파(b). 모든 미사용 포트가 기준 임피던스 Z_0로 무반사 종단된 조건에서 정의됩니다.

S-파라미터는 전압 대신 전력파의 비를 잽니다. $|S_{11}|_{\text{dB}} = 20\log_{10}|S_{11}|$이 -10 dB 이하라면 입사 전력의 90 % 이상이 구조 안으로 받아들여진 것입니다.

품질계수 Q는 한 주기 동안 저장된 에너지와 손실 전력의 비($Q = \omega W / P_{\text{loss}} \approx f_0/\Delta f_{3\text{dB}}$)입니다. 필터·공동 공진기는 높은 Q가 생명이고, 광대역 안테나는 반대로 낮은 방사 Q(Chu 한계, 20장)를 확보해야 대역폭이 넓어집니다.

$\lvert S_{11}\rvert$ (dB)	VSWR	반사 전력	수용 전력
−3 dB	5.85 : 1	50.0 %	50.0 %
−6 dB	3.01 : 1	25.1 %	74.9 %
−10 dB	1.92 : 1	10.0 %	90.0 %
−15 dB	1.43 : 1	3.2 %	96.8 %
−20 dB	1.22 : 1	1.0 %	99.0 %
−30 dB	1.07 : 1	0.1 %	99.9 %



포티의 포트·경계 주의

$|S_{11}| = -25$ dB가 나왔다고 무조건 만세를 부르면 안 됩니다! 손실 큰 FR-4 기판이나 댐핑 저항이 전력을 열로 다 삼켜 버려도 반사는 작게 나옵니다. 안테나는 **Radiation Efficiency**, 수동 회로는 $|S_{21}|$ 삽입손실까지 반드시 함께 확인하세요.

1.4 솔버 검증 정확도와 정직한 지원 경계

엄밀 해석해(analytical solution)가 존재하는 표준 전자기·열 벤치마크에 대한 Aether EM의 검증 오차입니다.

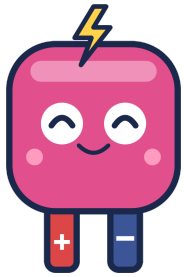
검증 벤치마크	이론 해석해	Aether EM V2.3	상대 오차
WR-90 도파관 TE_{10} 차단 주파수	6.5571 GHz	6.5600 GHz	0.04 %
직육면체 공동 TE_{101} 고유주파수 (고차 요소)	9.0076 GHz	9.0078 GHz	0.002 %
손실 유전체 공동 $Q_d = 1/\tan\delta$	1000.0000	1000.0003	3×10^{-7}
구리 벽면 공동 Q_c (Pozar 식 6.46)	9182	9178	0.04 %
반파장 다이폴 입력 임피던스 / 최대 지향성	73 Ω / 2.15 dBi	69 Ω / 2.18 dBi	4 Ω / 0.03 dB
열해석 에너지 보존 오차 $\lvert\sum Q_{\text{in}} - \sum Q_{\text{out}}\rvert$ (Th1~Th8)	0 W	$< 10^{-12}$ W	기계 정밀도 수준

시작 전에 알아 둘 솔버 경계

Full-Wave FEM에서 무한 주기 Floquet 단위셀 경계, 차동 Driven Terminal 다중 도체 모드 분리, 열린 방사 경계가 포함된 복소 Eigenmode는 지원하지 않습니다(단, 메타표면 위저드는 등가 시트/가이드 파장 모델로 합성 지원). 또한 열해석 워크벤치는 **고체 열전도 + 표면 대류 계수 h + 스테판-볼츠만 복사**를 풀며, 공기의 유동장 자체를 계산하는 CFD는 포함하지 않습니다. 지원 범위 밖 설정은 F5 Validation이 실행 전에 명확한 한국어·영어 안내로 알려 줍니다.

02 CHAPTER

화면 구성과 8개 리본 · 11개 메뉴 익히기



Desktop 2026 V2.3은 방대한 위저드와 열·무선전력 워크벤치가 추가되었지만, 작업 문맥에 따라 트리와 리본이 깔끔하게 전환되도록 설계되었습니다. 원하는 명령을 2초 안에 찾는 세 가지 길을 익힙니다.

배울 것
작업 창의 11개 핵심 영역

해 볼 것
8개 리본 탭(Thermal · 무선전력 포함)

핵심 개념
11개 풀다운 메뉴와 자동 계층 서브메뉴

2.1 한눈에 보는 Aether Desktop 2026 V2.3 작업 창

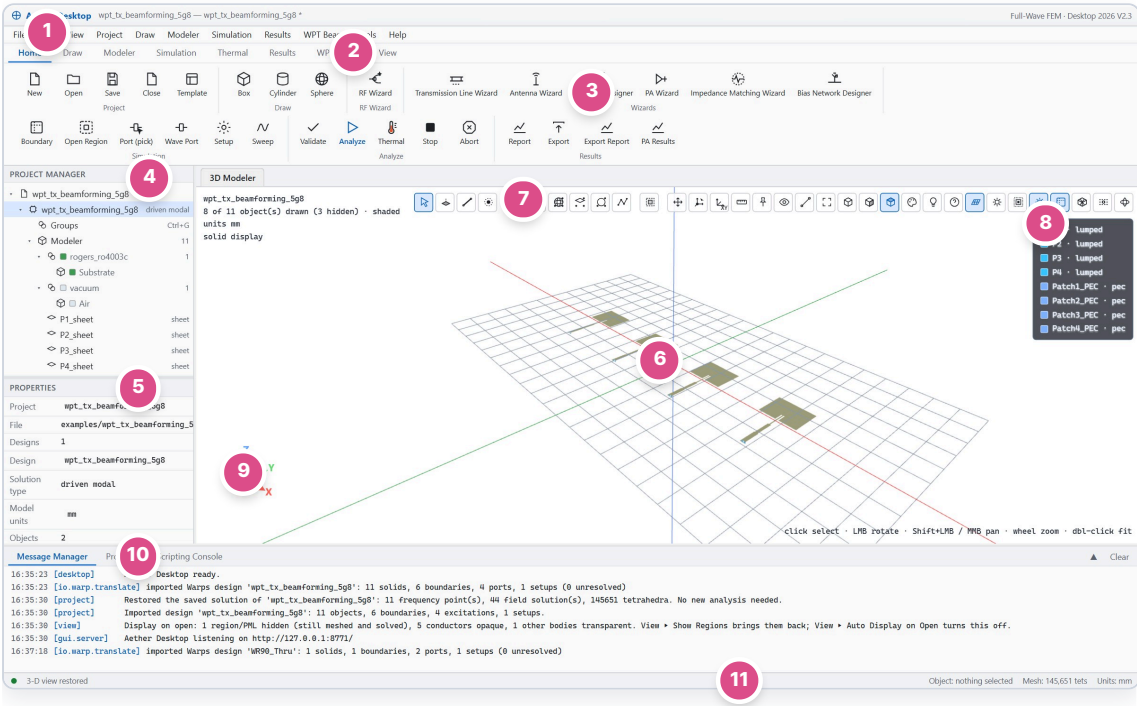


그림 2-1 5.8 GHz 4소자 빔포밍 배열(wpt_tx_beamforming_5g8.warp)을 연 Desktop 2026 V2.3 전체 화면. 우측 상단 타이틀바에 Full-Wave FEM · Desktop 2026 V2.3 배지가 표시됩니다.

1. **메뉴 막대 (11개)** — File부터 WPT Beam, Tools, Help까지 전체 명령 수록
2. **리본 탭 (8개)** — Home, Draw, Modeler, Simulation, Thermal, Results, 무선전력 · 빔, View
3. **리본 아이콘 바** — 현재 탭의 핵심 도구와 6종 설계 위저드를 그룹별로 배치
4. **프로젝트 관리자** — 다중 디자인, 재료별 솔리드·시트, 좌표계, 경계·포트·셋업·결과 트리
5. **Properties 창** — 선택한 객체·포트·셋업의 수치·수식·색상·투명도를 즉시 편집
6. **3D 모델러 뷰포트** — 형상 모델링, 포트 피킹, 3D 전자기장·온도장·방사 패턴 렌더링
7. **뷰포트 상단 도구 막대 (27개)** — 객체/면/모서리/정점 선택, 점 드로잉, 측정, **Look 스타일**, 오버레이 토글
8. **경계 · 포트 범례** — 할당된 포트(lumped/wave)와 도체 경계(pec)를 색상별로 표시
9. **시점 축 트라이어드** — 원판 클릭으로 정투영 전환, 우측 하단에는 현재 도구 마우스 힌트 표시
10. **하단 도크** — Message Manager(이력·경고), Progress(수렴·남은 시간), Scripting Console
11. **상태 표시줄** — 해석 상태, 활성 좌표계(CS), 선택 객체, 사면체 메시 수, 모델 단위 표시

2.2 8개 리본 탭: 설계 흐름을 따라가는 작업대 UPGRADE

V2.3의 리본은 8개 탭으로 확장되었습니다. 특히 **Home** 탭 윗줄 오른쪽에 **6대 핵심 설계 위저드**가 상시 배치되어 빈 프로젝트에서도 버튼 하나로 안테나·전송선·PA·정합·바이어스 합성을 즉시 시작할 수 있습니다.

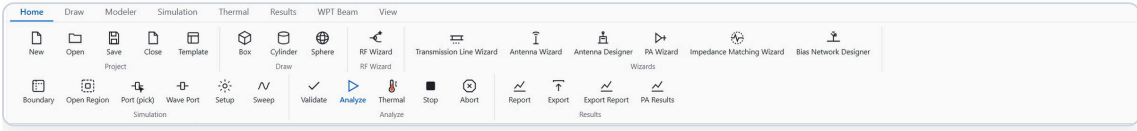


그림 2-2 새로워진 Home 리본 탭. 윗줄에 Project · Draw · RF Wizard · 6대 Wizards가, 아랫줄에 경계/포트 · 해석/열해석 · 리포트/PA Results가 정돈되어 있습니다.

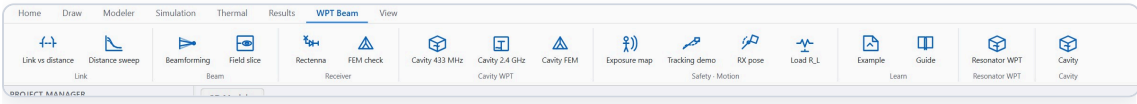


그림 2-3 Desktop 2026 V2.3에 신설된 무선전력 · 빔 리본 탭. 링크 버짓, 빔포밍, 렉테나 검증, 433/2.4 GHz 공동 공진기, 인체 노출·이동 추적까지 전 과정을 안내합니다.

리본 탭	수록된 주요 도구 그룹
Home	파일/템플릿, 기본 도형, **RF Wizard**, **6대 Wizards**(TL·Antenna·Designer·PA·Matching·Bias), 경계·포트·셋업, Validate·Analyze·**Thermal**, Report·**PA Results**
Draw	3D 솔리드 6종, 시트 도형, **Bondwire**, 선/수식 곡선, CAD 가져오기/수선/S-Param PCB, RF Wizard, Smart Connect, Filter Designer, Auto Feed Network·Feed Tune, 6대 Wizards
Modeler	Undo/Redo, Boolean·Split·Slice, 점 기준 이동/회전/배열, Smart Connect, Sweep, 수식 곡선·코일, **RF 가공**(Meander·Stub·Z0·C/L·Class F·SMD·**SMD @ Point**·**Via Fill**), **Faces 면 편집**
Simulation	Diagnostics·Controls·Air Region, **Optimize(Bayesian TPE)**·Parameter Study, 경계·Lumped RLC, Wave/Lumped Port, Setup·Sweep·Mesh, Validate F5 · Analyze All F9

리본 탭	수록된 주요 도구 그룹
Thermal UPGRADE	클릭 시 좌측 트리가 **열 워크벤치 트리**로 자동 전환! 열 설정·재료, Transistor·Heat Source·**RF Loss→Heat**, Face BC·**Contact/TIM**·Thin Copper, 비아·코인·스프레더·PCM·펄스, **Optimize Tj · Temp→RF**
Results	S-Parameters·스미스·안정도, Port Modes, Eigenmodes, Far Field·안테나 요약, 3D E/H/J 필드·Cut Plane, **Vector Fit / SPICE**, Export
무선전력 · 빔 NEW V2.3	링크 버짓·거리 스윕, 빔포밍/3D 필드 슬라이스, 렉테나·FEM 검증, **공동 공진기(433 MHz / 2.4 GHz / FEM)**, 인체 노출 지도·이동 추적·RX 자세·정류 부하
View	Fit All·표준 시점, Shaded/Edges/Wireframe/Solid, **Look(6종 셰이더)**, 격자·Radiation·PML 토글, **Why blank?** 진단

2.3 11개 풀다운 메뉴와 알아 두면 편리한 두 가지 규칙 NEW V2.3

리본에 다 담지 못한 고급 도구(`Results ▸ 3-Line De-embedding...`, `Results ▸ Co-sim (Circuit + EM)...` 등)까지 빠짐없이 들어 있는 곳이 상단 **11개 풀다운 메뉴**입니다. V2.3의 메뉴를 볼 때 두 가지 규칙을 알면 훨씬 빠릅니다.

- **상단 메뉴바는 깔끔한 영문 라벨로 표시됩니다** — 내부 명령 이름에 한글 부연 설명이 붙어 있어도 상단 풀다운 메뉴는 영문 핵심어만 남겨 간결하게 렌더링합니다. 예를 들어 회로도 통합 해석기는 우클릭·창 제목에서는 *회로도 Co-sim (Circuit + EM)*이지만, 상단 메뉴바에서는 `Results ▸ Co-sim (Circuit + EM)...` 또는 `Tools ▸ Co-sim (Circuit + EM)...`으로 표시됩니다.
- **연관 항목이 3개 이상이면 자동으로 ▸ 계층 서브메뉴로 묶입니다** — `File ▸ Import ▸`, `File ▸ Export ▸`, `Modeler ▸ Faces ▸`, `Modeler ▸ RF ▸`, `Simulation ▸ Assign ▸`, `Results ▸ PA Results ▸` 처럼 마우스를 올리면 옆으로 하위 메뉴가 깔끔하게 펼쳐집니다. (전체 지도는 41장 부록 수록).

2.4 모달리스(Modeless) 대화상자와 우클릭 지름길

Desktop 2026 V2.3의 위저드 창과 차트 편집기(`✎ Edit`)는 **창 제목줄 우측 ⠿ 손잡이를 끌어 옮길 수 있는 비모달/반투명 프리뷰 구조**를 지원합니다. 대화상자를 열어 둔 채로 뒤쪽 3D 모델러에서 스텁이나 비아가 어디에 생기는지 실시간 미리보기로 확인하며 수치를 바꿀 수 있습니다.



에테르의 한마디
외부 STEP 기판을 가져왔을 때는 **3D 뷰포트 우클릭 메뉴**가 보물창고입니다! 구리 트레이스를 우클릭해 `RF ▸ Step to RF Line...`을 고르면 일반 솔리드가 즉시 임피던스 Z_0를 아는 스마트 RF 선로로 변신합니다(12장).

하단 도크 3종과 단축키 사용자화

Message Manager에는 파일 지문 확인, 열 때 숨긴 영역 안내, 수렴 경고가 시간순으로 기록됩니다. 노란색·빨간색 줄은 반드시 읽는 습관을 들이세요. **Progress**는 사면체 수·미지수(DOF)·패스별 수렴 오차와 남은 시간을 실시간 표시하며, **Scripting Console**은 모든 GUI 동작을 Python JSON-RPC 명령으로 자동화합니다.

Help ▸ Keyboard Shortcuts(또는 **Tools**)에서는 모든 메뉴 명령에 원하는 단축키를 직접 바인딩하고 JSON으로 내보내 연구실 동료 PC에 그대로 이식할 수 있습니다.

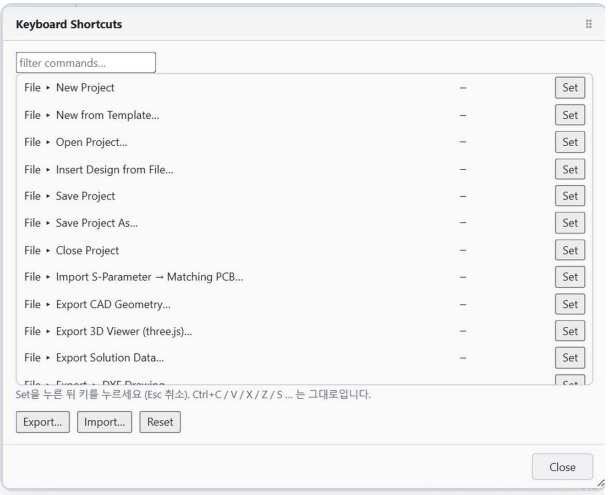


그림 2-4 Keyboard Shortcuts 설정 창. 원하는 기능에 나만의 단축키를 부여하고 파일로 백업·공유합니다.

03 CHAPTER

3D 뷰 다루기와 6종 렌더링 스타일 (Look)

다층 기판 속 묻힌 비아를 엑스레이로 투시하고, 특허 도면이나 발표 자료용 웹툰·청사진 일러스트를 클릭 한 번에 뽑아냅니다. 하루 수백 번 쓰는 카메라 조작법과 6종 셰이더를 마스터합니다.



배울 것
1:1 Pan · 회전 · Alt+클릭 8구역 뷰 스냅

해 볼 것
View ▸ Look 6종 실시간 렌더링 갤러리

핵심 개념
열 때 자동 표시(Display on Open)와 빈 화면 진단

3.1 손끝에 착 붙는 마우스 조작과 1:1 이동(Pan)

V2.3의 카메라 이동(Pan)은 초점 평면 깊이를 실시간 역산해 **마우스 커서가 움직인 거리와 도면 위 지점이 1:1 픽셀 단위로 정확히 일치**하도록 보정되어 있습니다. 미끄러지거나 헛도는 느낌 없이 현미경 스테이지를 밀듯 정밀하게 움직입니다.

조작	마우스 · 키보드 동작	실무 활용 포인트
자유 3D 회전	마우스 왼쪽 버튼 드래그	천장·바닥 극점을 넘어 기판 뒷면 접지 슬롯까지 끊김 없이 회전합니다.
1:1 평행 이동 (Pan)	`Shift` +왼쪽 드래그 / 휠 버튼 드래그	잡은 꼭짓점이 커서를 정확히 따라오며, 창 바깥으로 커서가 나가도 드래그가 유지됩니다.
커서 기준 줌	마우스 휠 회전	현재 커서가 가리키는 급전 핀이나 에어갭을 중심으로 부드럽게 확대합니다.
전체 맞춤 / 선택 맞춤	빈 공간 더블클릭(`Ctrl` + `D`) / `F`	거대한 공기 박스 속 0402 칩 하나만 꽉 차게 보려면 칩을 고르고 Fit Selection을 누릅니다.
선택 모드 즉시 전환	`O` 객체 · `F` 면 · `E` 모서리 · `V` 정점	뷰포트 상단 도구 막대 왼쪽 4개 아이콘과 동일합니다. 포트 지정과 면 편집의 출발점입니다.

3.2 0.2초 만에 원하는 정투영으로: Alt+클릭 8구역 스냅

메뉴를 열지 않고 시점을 정렬하는 두 가지 비결이 있습니다. 첫째, 뷰포트 좌측 하단 **X-Y-Z 축 트라이어드 원판**을 클릭하면 해당 축 정면으로 회전합니다. 둘째, 뷰포트의 **빈 배경(또는 투명한 공기 영역 위)을** `Alt` **+클릭**해 보세요! 화면 가장자리 상·하·좌·우를 누르면 Top·Bottom·Left·Right 정투영으로, 네 모서리를 누르면 각 방향 등각투영(Isometric)으로 0.2초 만에 부드럽게 스냅됩니다.

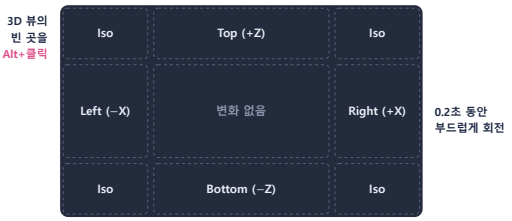
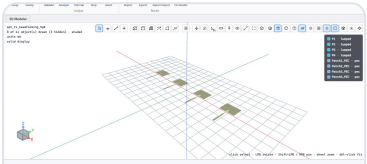


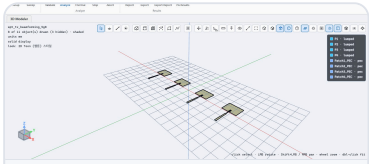
그림 3-1 뷰포트 8구역 Alt+클릭 스냅 지도. 레이아웃 정렬 확인 시 Top 뷰 전환이 0.2초면 끝납니다.

3.3 발표 자료와 다층 검사를 혁신하는 6종 Look 셰이더 NEW V2.3

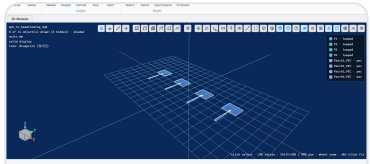
View ▸ Look ▸ 메뉴, View 리본의 **Look** 버튼, 또는 뷰포트 상단 도구 막대의 팔레트 아이콘을 누르면 GLSL 후처리 셰이더가 즉시 바뀝니다. 단순 스크린샷 필터가 아니라 **6종 모든 모드에서 60 fps 회전·정점 스냅·도형 그리기가 100 % 동일하게 작동**합니다!



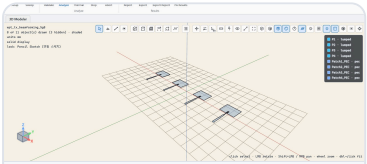
① Realistic (실물 렌더링) — 금속 반사광과 음영을 살린 기본 모드(라이트/다크 테마 자동 연동).



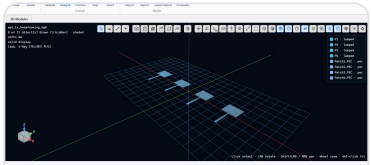
② 2D Toon (웹툰 스타일) — 선명한 셀 셰이딩과 검은 잉크 윤곽선. 교재·발표 슬라이드 삽화에 최적!



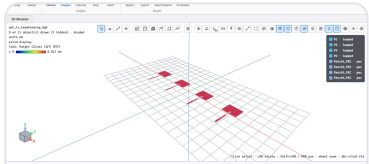
③ Blueprint (청사진) — 클래식 엔지니어링 청색 도면 위에 백색 모서리선을 정밀하게 강조합니다.



④ Pencil Sketch (연필 스케치) — 종이 질감 위 명암 해칭(hatching)과 흑연 선화로 특허·논문 개념도에 안성맞춤.



⑤ X-Ray (엑스레이 투시) — 외함·기판을 반투명 유리로 투시해 내층 스트립라인·열비아·구리 코인 간섭을 단번에 검수!



⑥ Height Colors (높이 컬러) — z축 높이를 Turbo 컬러맵과 좌측 상단 컬러바로 매핑해 적층 단차·본드와이어 루프 높이를 직관 확인.



에테르의 한마디

다층 기판을 설계할 때 평소에는 **Realistic**이나 **2D Toon**으로 패턴을 그리다가, 내층 접지 슬롯과 비아 배럴이 제대로 닿았는지 확인할 때만 **X-Ray**로 톡 바꿔 보세요. 객체를 일일이 숨겼다 켰다 할 필요가 없어 작업 속도가 두 배 빨라집니다!

STEP-BY-STEP **다층 기판 속 숨은 실수를 10초 만에 잡아내는 뷰포트 검수 루틴**

1. **정면·등각 시점 스냅**
   뷰포트 빈 배경의 **위쪽 가장자리**를 `Alt`+클릭해 평면 배치를 검수한 뒤, **오른쪽 위 모서리**를 `Alt`+클릭해 등각투영(Isometric) 입체 시점으로 돌립니다.
2. **X-Ray 투시로 내층 관통 확인**
   리본 **View ▸ Look ▸ X-Ray** 를 선택합니다. 기판과 패드가 유리처럼 투명해지면서 내부 비아 기둥과 구리 코인이 접지면에 빈틈없이 닿았는지 단번에 보입니다.
3. **Height Colors로 높이 단차 점검**
   View ▸ Look ▸ Height Colors 로 바꾸고 좌측 상단 컬러바(mm)를 읽으면 본드와이어 정점 높이나 적층 두께 입력 실수(예: `35um` 대신 `35mm` 입력!)가 색깔로 즉시 드러납니다.

3.4 열 때 자동 표시 정책(`Display on Open`)과 빈 화면 진단

3D EM 모델은 안테나나 PCB 바깥을 커다란 공기 상자(Air Region)와 흡수층(PML)이 감싸고 있어서, 모든 물체를 그대로 그리면 정작 중요한 회로가 하얀 상자 속에 가려 보이지 않습니다. Aether EM은 파일을 열 때 물체의 재질·경계·포함 관계를 분석해 **공기 영역과 PML은 자동으로 숨기고, 도체는 선명한 불투명으로, 하우징과 기판은 적당한 반투명으로** 똑똑하게 정리해 보여 줍니다.

가장 중요한 원칙은 **"표시만 숨길 뿐 해석에는 100 % 그대로 들어간다"**는 점입니다. 공기 상자를 숨기든 켜든 메시와 S-파라미터는 마지막 비트까지 완전히 동일합니다. 프로젝트별 열기 표시 규칙은 **View ▸ Display on Open...** 에서 세밀하게 조정할 수 있고, 숨겨진 공기/PML 상자를 잠깐 눈으로 확인하려면 뷰포트 상단 도구 막대의 점선 상자 아이콘을 누르면 됩니다.

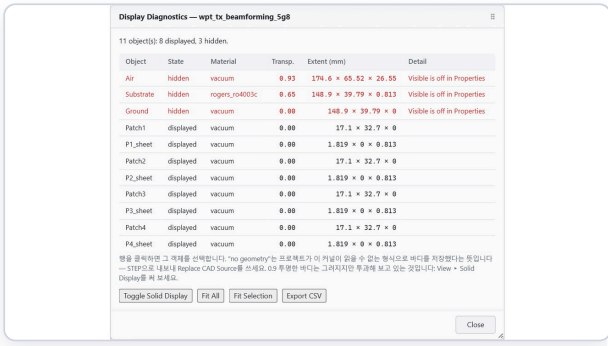
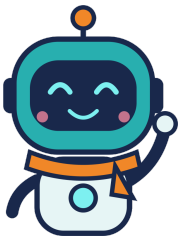


그림 3-2 Display Diagnostics 진단 창. 공기 상자 대비 부품이 너무 작거나 투명해 안 보이는 이유를 객체별로 명확히 알려 줍니다.

만약 외부 CAD를 가져왔는데 화면이 텅 비어 보인다면 당황하지 말고 **View ▸ Why is the Viewport Blank?...** (리본 **Blank View?**)를 누르세요. 모든 객체의 형상 유무·크기 비율·투명도를 진단해 원인을 바로 짚어 줍니다.

04 CHAPTER

다중 디자인 프로젝트, 3D 열기 미리보기, 템플릿과 예제



하나의 .warp 파일 안에 초기안·최적화안·히트싱크 냉각 변형 5종을 나란히 담아 비교하고, 파일을 열기 전에 3D 미리보기로 도면을 돌려 확인하는 스마트한 파일 관리법을 다룹니다.

배울 것
단일 .warp 속 다중 디자인 관리와 병합

해 볼 것
열기 대화상자 실시간 3D 프리뷰와 .wres 지문

핵심 개념
18종 내장 템플릿과 V2.3 전체 예제 지도

4.1 한 파일 안에 여러 설계를 담는 Multi-Design Project Manager UPGRADE

실전 설계에서는 원본 패치 옆에 소형화 패치를 만들어 비교하거나, 같은 PA 보드에 방열 구조만 다른 4가지 냉각안(무방열판·자연대류·강제풍·흑색 아노다이징)을 함께 관리해야 합니다. Aether EM의 `.warp` **프로젝트 파일 하나에는 개수 제한 없이 여러 개의 디자인(Driven Modal / Eigenmode)**을 담을 수 있습니다.

- **Project ▸ Insert Driven Modal / Eigenmode Design** — 새 빈 디자인 추가
- **Project ▸ Duplicate Active Design** — 현재 디자인을 통째로 복제해 안전하게 실험 버전 생성
- **Project ▸ Insert Design from File (.warp)...** — 다른 `.warp` 파일 속 디자인들을 현재 프로젝트로 깔끔하게 병합 NEW V2.3

해석과 리포트는 언제나 트리에서 굵게 표시된 **활성 디자인(Active Design)**에 대해 수행되며, 다른 디자인을 더블클릭하거나 우클릭해 **Set as Active Design**을 고르면 즉시 전환됩니다.

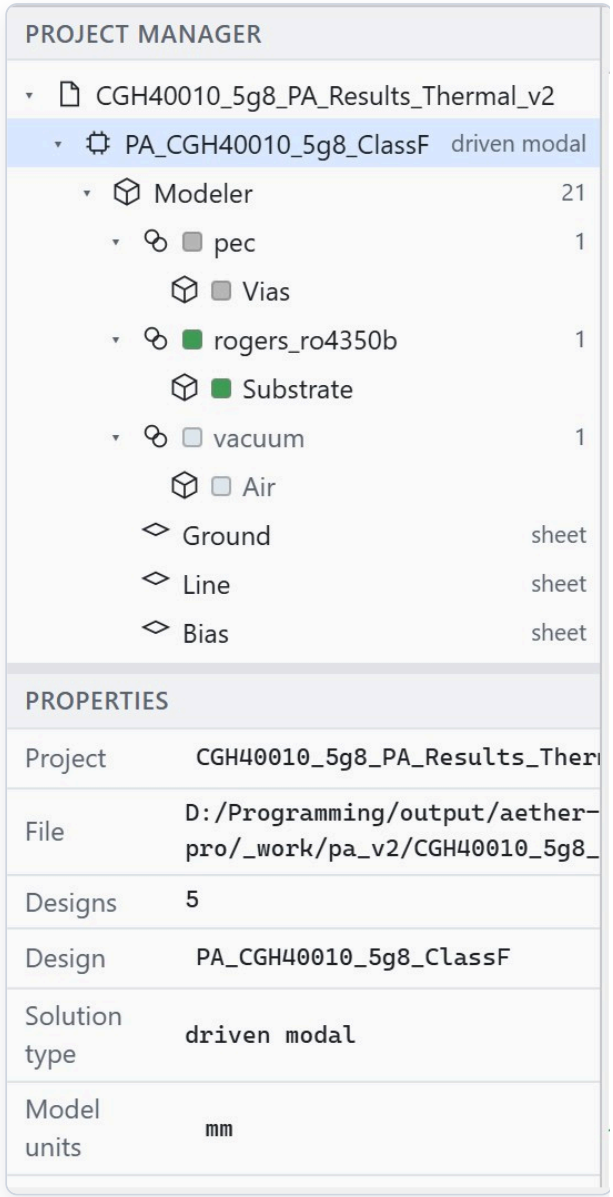


그림 4-1 다중 디자인 프로젝트 트리 예시 (CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal_v2.warp). PA EM 본체 디자인과 TH1~TH4 4종의 방열 설계가 한 파일에 공존하며 PA 튜너와 연동됩니다.

STEP-BY-STEP **원본을 건드리지 않고 한 파일 안에서 A안 vs B안 안전하게 실험하기**

1. **현재 디자인 통째로 복제**
   상단 메뉴 **Project ▸ Duplicate Active Design** 을 클릭하면 형상·재료·포트·Setup이 똑같은 쌍둥이 디자인이 왼쪽 트리에 즉시 추가됩니다.
2. **알기 쉬운 이름 부여 후 수정**
   새 디자인을 우클릭해 `Rename Design…` 으로 이름(예: `Ant_Mini_Tuned`)을 붙이고 더블클릭해 활성화(굵은 글씨)한 뒤 안심하고 치수를 고쳐 `F9` 를 돌립니다.
3. **더블클릭 한 번으로 결과 왕복 비교**
   트리의 원본 디자인과 수정 디자인을 번갈아 더블클릭하면 파일을 새로 열 필요 없이 0.1초 만에 두 설계의 도면과 그래프를 비교할 수 있습니다.

4.2 열기 전에 돌려 보는 `.warp` 실시간 3D 프리뷰 NEW V2.3

수십 개의 버전 파일(`v1`, `v2_stub`, `v3_jig`…) 가운데 내가 찾는 도면이 어느 파일인지 일일이 열어 볼 필요가 없습니다! `Ctrl` + `O` 로 **Open Project** 창을 열고 파일 목록에서 `.warp` 파일을 클릭하면, **오른쪽 미리보기 칸에 즉시 마우스로 회전·확대 가능한 경량 3D 도면**과 함께 솔리드/시트 개수, 파일 용량, 포함된 디자인 수·단위가 나타납니다.

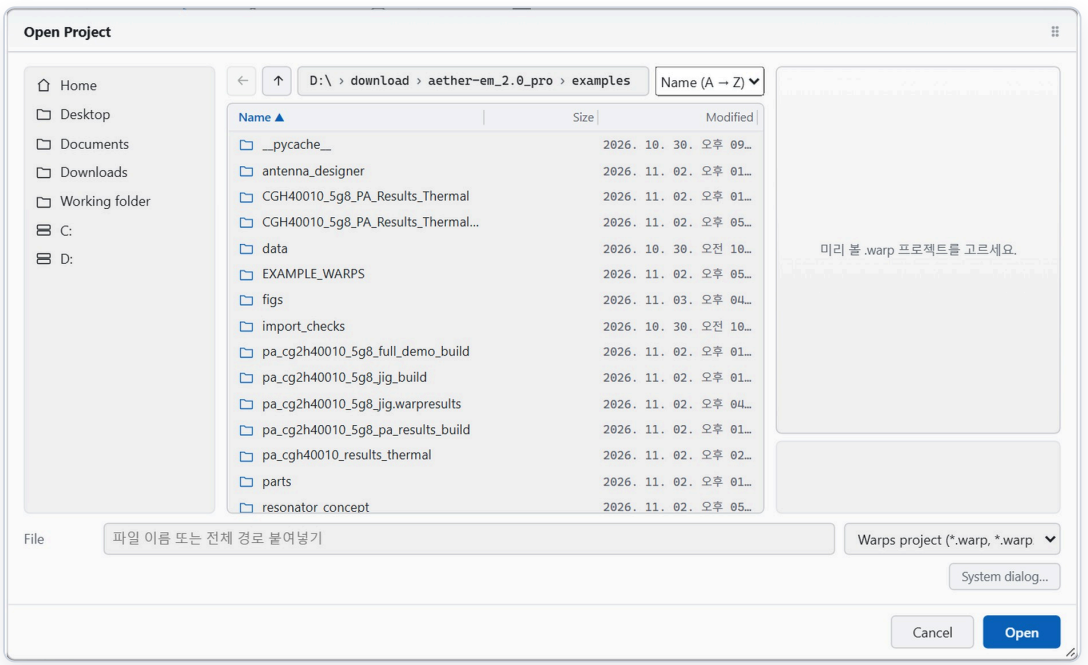


그림 4-2 새로워진 Open Project 대화상자. 현재 작업 중인 세션을 전혀 건드리지 않고 최대 1.5초 안에 안전한 3D 형상 프리뷰와 메타데이터를 보여 주며, 파일 검색창은 한글 초성 검색도 지원합니다.

4.3 `.warp`와 `.warp.wres` — SHA-256 지문으로 지키는 결과 무결성

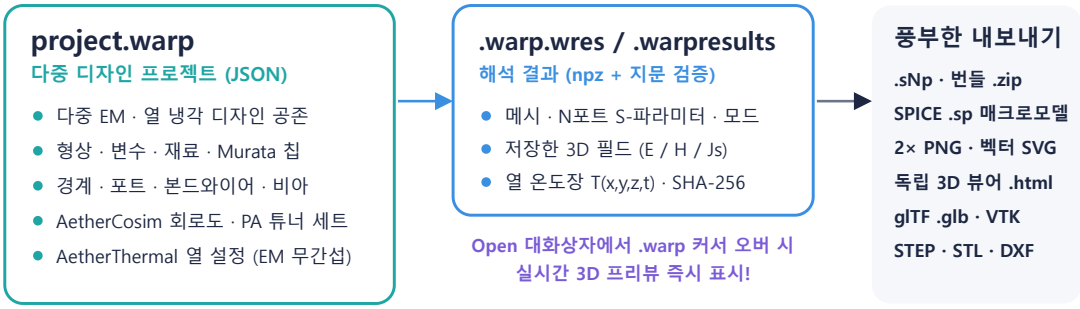


그림 4-3 경량 JSON 설계 원본(.warp)과 대용량 수치 결과 사이드카(.warp.wres)의 이원 구조.

`.warp`는 형상, 파라메트릭 변수, 재료, 포트, 열 설정, 회로도 Co-sim 배선, PA 튜너 상태까지 담는 읽기 쉬운 JSON 프로젝트 파일입니다(외부 STEP 형상도 내부 압축 포함). 반면 수십만 사면체 메시와 주파수별 3D 전기장 벡터를 담는 `.warp.wres`는 저장 시 옆에 생성되는 바이너리 결과 파일입니다.

Aether EM은 결과를 저장할 때 `.warp` 설계 상태의 **SHA-256 암호화 해시 지문**을 `.wres`에 각인합니다. 만약 도면 치수를 0.1 mm라도 고쳐 저장했다면, 옛날 결과와 새 도면이 뒤섞이는 대형 사고를 막기 위해 이전 `.wres` 로드를 자동 차단하고 Message Manager에 정직하게 알려 줍니다.

4.4 1초 만에 바로 F9 해석하는 18종 스타터 템플릿 UPGRADE

빈 화면에서 막막할 때는 **File ▸ New from Template...**을 여세요. V2.3에서는 기판·도체·경계·포트·Setup·Sweep이 100 % 완비된 **18종의 정밀 스타터 템플릿**을 카테고리별로 제공합니다.

- **전송선 · 수동소자 (6종)** — 50 Ω 마이크로스트립, CPWG, 비아 전이, 계단 임피던스 LPF, 2-Way 윌킨슨 분배기, 90° 브랜치라인 커플러
- **도파관 · 공진기 (3종)** — WR-90 도파관, 유도성 아이리스 대역통과 필터, 원통형 공동 공진기(Eigenmode)
- **안테나 · 레이더 (6종)** — 2.45 GHz 패치, 동축 급전 패치, 77 GHz 차량 레이더 패치, $\lambda/4$ 모노폴, X-밴드 피라미드 혼, 2소자 급전 배열
- **WPT · 차폐 · 차동선 (3종)** — 자기공진 코일 쌍, 슬롯 금속 차폐 함체, 100 Ω 차동 마이크로스트립 쌍

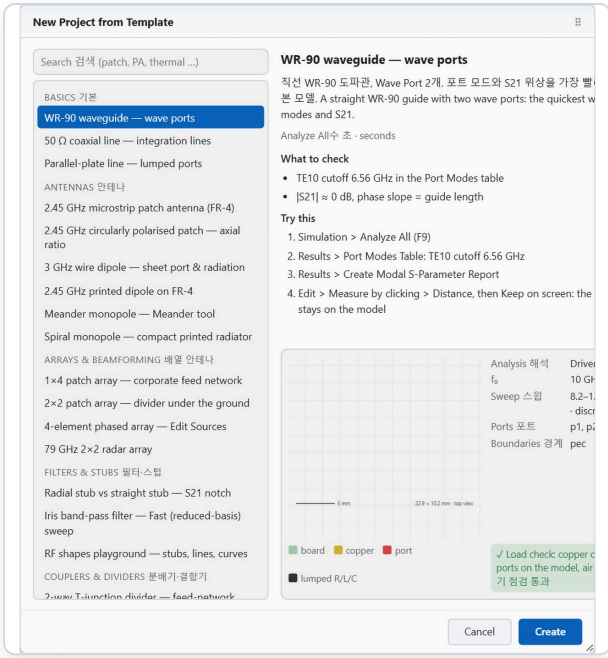


그림 4-4 New Project from Template 대화상자. 원하는 구조를 고르면 즉시 해석 가능한 완성 모델이 열립니다.

4.5 실습으로 바로 쓰는 배포 예제 프로젝트 지도

설치 폴더 안 `examples/` 디렉터리에는 이 책의 각 장과 직결되는 실전 검증 프로젝트가 수록되어 있습니다. 원본 보호를 위해 항상 작업 폴더로 복사한 뒤 열어 실습하세요.

예제 파일 (`examples/`)	핵심 학습 주제 · 관련 장
wr90_waveguide · coax_line · parallel_plate_lumped	Wave Port 모드 임피던스, 차단 주파수, Lumped Port & RLC 기초 (13장)
dipole_antenna · patch_antenna · patch_array_1x4_5g8	다이폴·패치 원거리장 효율, 1×4 배열 위상 급전과 빔 조향 (32–33장)
patch_array_2x2_80g · metasurface_amc_dipole_5g8	80 GHz 레이더 배열 위상 보정, 초박형(λ/17) AMC 메타표면 다이폴 (20, 33, 38장)
tee / gysel_divider · radial_stub_notch_5g8	고출력 Gysel/T 전력 분배기, 광대역 래디얼 스텁 대역저지 비교 (34, 38장)
slab_matching_parametric · rf_shapes_playground	베이지안 최적화, 실시간 R·L·C 및 Solved at 1패스 공간 사상 (15, 34장)

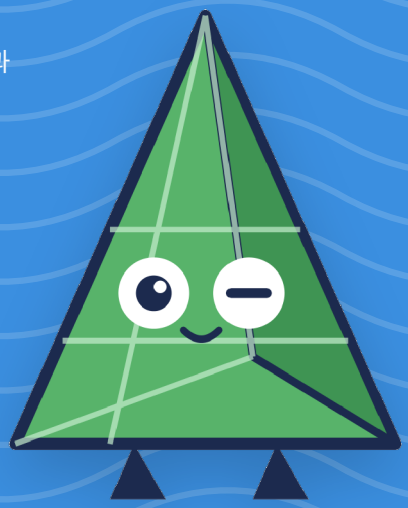
예제 파일 (`examples/`)	핵심 학습 주제 · 관련 장
wpt_tx_beamforming_5g8 · wpt_wifi_coupling_5g8	5.8 GHz 근거리 초점 빔포밍 및 Wi-Fi 165번 채널 공존 시나리오 (26, 38장)
wpt_rx_rectenna_5g8 · NT9001 정류 회로도	렉테나 EM 해석 + 쇼트키 다이오드 HB 및 회로도 3D 역반영 (25, 35장)
CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal_v2 NEW V2.3	GaN PA 8단계 탐정 미션, 실시간 PA 튜너, TH1~TH4 아노다이징 방열 (24, 31, 36장)
pa_cg2h40010_5g8_full_demo · pa_cg2h40010_5g8_jig NEW V2.3	−33 % 소형화·패키지 기생 감사 풀 데모 및 컷아웃 메탈 방열 지그 (31, 37, 39장)
thermal/Th1_EM_loss_coupling ~ Th8_auto_optimize UPGRADE	RF 손실 열원·220 W 코인·박막 동박·열비아·기판 스윕 ·PCM·Temp→RF·자동 최적화 8종 (27–30, 39장)

PART

02

3D 모델링과 실전 RF 가공 도형·본드와이어·실제 칩·외부 CAD

해석 결과는 모델링이 담아낸 물리만큼만 정확합니다. 2부에서는 기본 도형과 수식 변수, 불리언·스윕·면 직접 편집부터 Desktop 2026 V2.3에 대폭 보강된 JEDEC 본드와이어, λg/10 자동 비아 채움, 무라타 실제 칩(.s2p) 기생 공진 반영, 버터플라이 스텁, 그리고 외부 STEP 기판을 스마트 RF 선로로 승격하는 실무 기법까지 모두 익힙니다.



05 기본 도형 · 마우스 드로잉 · 수식 입력

06 정밀 선택 · 측정 · 파라메트릭 설계 변수

07 변환 · 배열 · 불리언 · 외부 솔리드 면 편집 (Faces)

08 스윕과 수식 곡선: 나선 · 헬릭스 · 재편집

09 실전 RF PCB · 본드와이어 · 스마트 비아 · 무라타 실제 칩

10 동박 겹침 자동 정리 (Clear · Push)와 DRC 검수

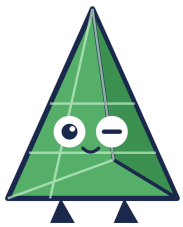
11 재료 라이브러리와 도체 · 분산 매질 모델링

12 고속 외부 CAD (STEP·DXF·KiCad·Gerber) 반입과 Step to RF Line

05 CHAPTER

기본 도형 · 마우스 드로잉 · 수식 입력

모든 3D 모델은 직육면체, 원기둥, 직사각형 시트 같은 기본 도형에서 출발합니다. 숫자로 칼같이 입력하는 법, 마우스 클릭만으로 스케치하는 법, 그리고 모든 입력 칸에서 통하는 변수 수식을 다룹니다.



배울 것
입체·시트 기본 도형 8종

해 볼 것
점 클릭 드로잉과 자동 스냅

핵심 개념
단위·수식 일관성 규칙

5.1 입체(Solid)와 시트(Sheet) 기본 도형

Draw 메뉴와 리본에는 부피를 가진 **입체 도형**(기판, 금속 함체, 비아 배럴, 동축 유전체용)과 두께 없는 2차원 **시트 도형**(마이크로스트립 동박, 패치, 포트 면용)이 준비되어 있습니다.

도형	구분	핵심 파라미터	실전 활용처
Box	입체	Position, X / Y / Z size	유전체 기판, 공기 상자, 알루미늄 지그·방열판
Cylinder	입체	Center, Radius, Height, Axis	단일 비아, 동축선 내·외도체, 동축 프로브 급전 핀
Cone · Sphere · Torus	입체	반지름(r1, r2), 높이, 축	원추 혼 안테나, 유전체 렌즈, 자기결합 루프 코일
Rectangle	시트	Position, 폭·길이, 평면 (XY/YZ/ZX)	패치 안테나, 마이크로스트립 선로, Lumped/Wave 포트 시트
Circle · Polygon · Ring	시트	중심, 반지름(내·외경), 변 수	원형 편파 패치, 링 하이브리드 결합기, 원형 패드

5.2 대화상자 수치 입력과 자동 재질 규칙

Draw ▸ Box... 를 열면 기준점과 크기를 단위와 함께 입력합니다. 숫자 뒤에 `25mil` 이나 `35um` 를 붙여 적으면 우측 단위 선택기가 자동으로 해당 단위로 바뀝니다.

이름을 `air`, `vacuum`, `region`, `pml` 로 시작해 상자를 만들면 재질이 자동으로 `vacuum` 으로 지정되고, 구리 시트를 그리면 즉시 도체 경계가 부여되어 별도 작업 없이 바로 도체로 동작합니다.

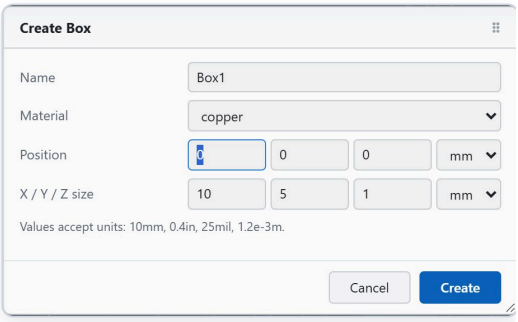


그림 5-1 Create Box 대화상자. 모든 치수 칸은 숫자와 수식, 단위 접미사를 동시에 인식합니다.

5.3 마우스 클릭으로 바로 그리기 (Draw by Points)

뷰포트 상단 도구 막대의 도형 아이콘을 누르면 모달 창이 도면을 가리지 않은 채 3D 뷰 위에서 마우스 클릭만으로 상자·원기둥·사각형을 스케치합니다. 커서를 움직이면 12 픽셀 이내의 **꼭짓점 · 모서리 중점 · 면 중심**에 자석처럼 달라붙습니다(공간 해시 기반 60 fps 스냅).

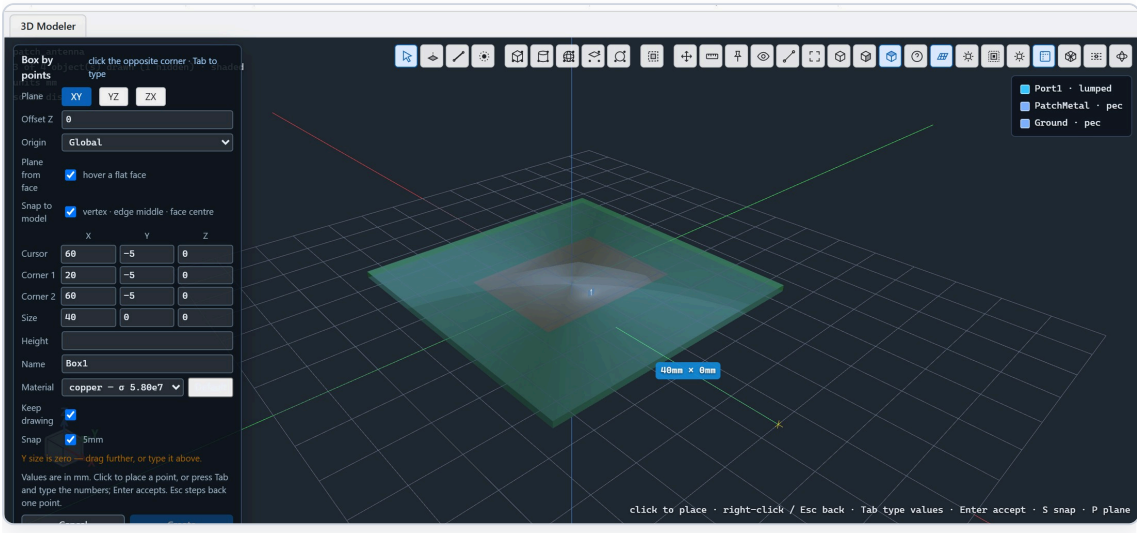


그림 5-2 점 클릭 상자 그리기. 첫 모서리를 찍고 대각선으로 끌면 실시간 치수 라벨과 와이어프레임이 따라옵니다.

HOW TO 점 세 번 찍어 정밀 상자 만들기

1. **작업 평면 확인**
   `P` 키로 XY·YZ·ZX 평면을 바꾸거나, 기존 기판 윗면에 마우스를 올려 그 면을 기준 평면으로 삼습니다.
2. **시작점 → 대각점 클릭**
   정확한 수치를 넣고 싶다면 드래그 도중 `Tab` 키를 눌러 좌측 입력 칸에 숫자를 치고 `Enter`를 누릅니다.
3. **높이 지정**
   마우스를 수직으로 끌어 높이를 정하면 입체가 완성됩니다. `Esc`는 한 단계씩 취소합니다.

5.4 모든 입력 칸에서 동작하는 수식 계산기

Aether EM의 치수·주파수·각도 입력 칸에는 `PatchL/2 + 0.5mm`, `sqrt(W^2 + H^2)`, `360/8` 같은 수학식을 그대로 적을 수 있습니다. 브라우저 미리보기와 백엔드 CAD 커널이 동일한 파서를 공유하므로 눈으로 본 크기와 실제 생성 크기가 어긋나지 않습니다.

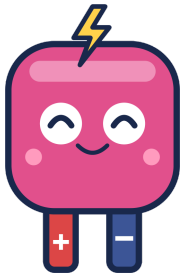


포티의 포트·경계 주의

가장 흔한 실수는 **마이크로미터 단위 누락**입니다! 모델 기본 단위가 `mm`일 때 동박 두께 칸에 그냥 `35`를 치면 **3.5 cm 두께의 구리 벽돌**이 생깁니다. 얇은 두께는 반드시 `35um` 또는 `0.035mm`로 적으세요.

06 CHAPTER

정밀 선택 · 측정 · 파라메트릭 설계 변수



경계를 입히고 포트를 달고 간격을 재는 모든 작업은 정확한 선택에서 출발합니다. 겹친 물체 뒤쪽을 고르는 요령, 드래그 방향에 따른 선택 규칙, 그리고 최적화의 씨앗이 되는 설계 변수를 정리합니다.

배울 것
O·F·E·V 4대 선택 모드와 B 키 투과 선택

해 볼 것
좌→우 vs 우→좌 드래그 선택과 이름 필터

핵심 개념
최소 간격 측정과 Design Variables

6.1 네 가지 선택 모드와 위상 불변 면 기억

O · OBJECT
객체 선택
재질 변경, 이동·복제, 불리언 연산 등 덩어리 단위 편집.

F · FACE
면 선택
포트·경계 지정, 면 Push-Pull 편집, 국부 메시 지정.

E · EDGE
모서리 선택
필렛·챔퍼, 모서리 이동, Smart Connect 배선 끝단 지정.

V · VERTEX
꼭짓점 선택
두 점 간 거리 측정, 본드와이어 패드 피킹, 상대 좌표계 원점.

앞쪽 공기 상자나 기판에 가려 뒤쪽 패치 면이 안 잡힐 때는 커서를 그대로 둔 채 B **키**를 누르세요. 광선(ray)이 통과하는 뒤쪽 객체·면으로 선택이 차례로 넘어갑니다. 또한 Aether EM은 선택한 면을 단순 번호(ID)가 아니라 **기하 중심·법선 벡터·면적 서명**으로 기억하므로, 나중에 메시를 다시 쪼개거나 변수를 바꿔 리빌드해도 포트와 경계가 엉뚱한 면으로 튀지 않습니다.

6.2 영역 드래그 선택과 이름 필터

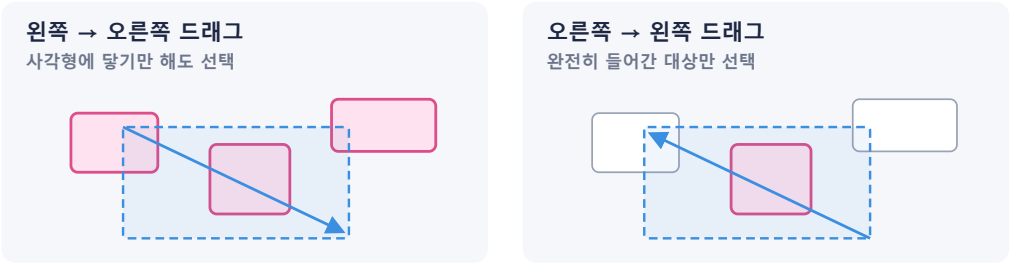


그림 6-1 Ctrl+드래그 사각형 선택 규칙. 왼쪽→오른쪽은 스치기만 해도 선택(교차), 오른쪽→왼쪽은 사각형 안에 완전히 들어온 대상만 선택합니다.

수백 개의 비아 배럴이나 배열 패치 가운데 특정 이름만 골라야 할 때는 **Edit ▸ Select by Area Filter...** 를 엽니다. 와일드카드 패턴(예: `*via*`, `Patch_*`), 재질, 솔리드/시트 구분으로 원하는 대상만 일괄 선택해 색상을 바꾸거나 숨길 수 있습니다.

선택 즉시 뷰포트 좌측 하단에는 외곽 크기와 **두 대상 사이의 최소 표면 간격(gap)**이 실시간 측정되어 표시됩니다. `M` 키(**Measure**)를 누르면 정밀 측정표를 CSV로 저장하거나 **Keep Current Measurement**로 치수선을 화면에 영구 고정할 수 있습니다.

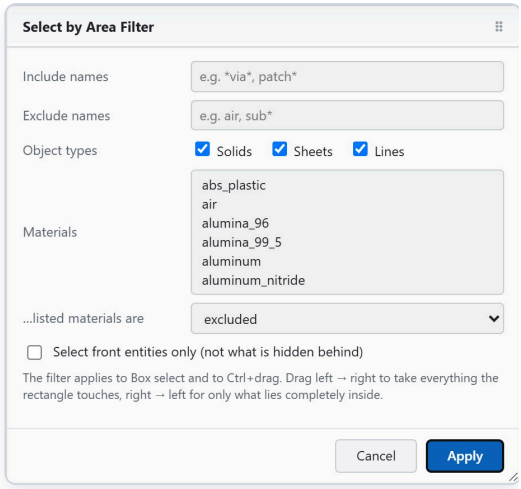


그림 6-2 Select by Area Filter. 수백 개 부품 어셈블리에서 원하는 그룹만 족집게처럼 골라냅니다.

6.3 설계 변수(`Design Variables`): 스터디와 베이지안 최적화의 열쇠

Project ▸ Design Variables... (또는 **Tools**)에 `PatchL = 16.2mm`, `Inset = PatchL * 0.28`처럼 변수와 종속 수식을 등록해 두면, 변수 값 하나만 고치고 **Apply and rebuild**를 눌렀을 때 연관된 모든 도형·불리언·포트 위치가 한꺼번에 재생성됩니다.

단위 차원 검사기가 내장되어 있어 길이 칸에 주파수 변수를 넣는 실수를 원천 차단하며, 여기서 등록한 변수가 그대로 15장 **Parameter Study**와 **Optuna 베이지안 최적화**, 30장 **열해석 Tj 자동 최적화**의 튜닝 손잡이가 됩니다.

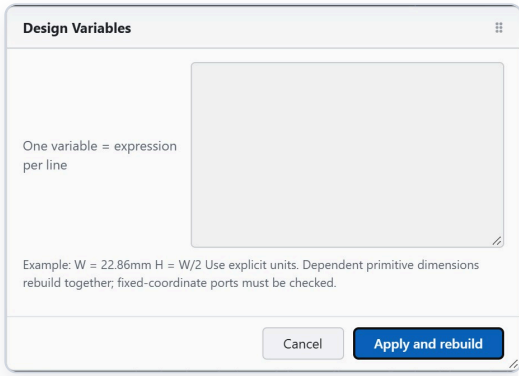


그림 6-3 Design Variables 편집 창. 수식 참조와 단위 검사를 지원합니다.

구분	지원 구문 · 예시	실무 활용 팁
길이 · 각도 단위	`mm, cm, m, um, mil, in, deg, rad`	`20mil`(=0.508 mm), `35um`(=1 oz 동박) 혼용 입력 시 자동 환산
주파수 · 전기 단위	`Hz, kHz, MHz, GHz, THz, ohm, pF, nH`	스윕·포트·RLC 모든 입력 칸에서 단위 접미사 즉시 인식
내장 수학 함수	`sin, cos, tan, sqrt, log10, exp, pi`	`c0/(4*5.8e9*sqrt(2.75))`처럼 파장 초기치를 수식으로 바로 기입!

HOW TO 첫 설계 변수(PatchL) 등록하고 종속 치수까지 한 번에 리빌드하기

1. **변수 창 열기**
   상단 메뉴 **Project ▸ Design Variables...** 를 열고 **+ Add** 버튼을 누릅니다.
2. **독립·종속 변수 등록**
   이름에 `PatchL`, 값에 `16.2mm`를 입력합니다. 한 줄 더 추가해 이름 `Inset`, 값에 수식 `PatchL * 0.28`을 넣으면 우측에 자동 계산된 `4.536 mm`와 길이 차원 통과 표시가 뜹니다.
3. **도형 치수에 연결**
   트리에서 패치 시트를 클릭하고 좌측 하단 **Properties**의 길이 칸에 숫자 대신 `PatchL`을 입력합니다.
4. **원클릭 리빌드**
   이후 언제든 변수 창에서 `PatchL`만 `15.8mm`로 바꾸고 **Apply and rebuild**를 누르면 패치·인셋 홈·포트 시트가 한꺼번에 새 치수로 재생성됩니다!

07 CHAPTER

변환 · 배열 · 불리언 · 외부 솔리드 면 편집 (Faces)



도형을 옮기면 그 면에 붙은 포트와 경계도 함께 따라갑니다. 합집합·차집합 불리언 연산과 함께, 파라메트릭 이력이 없는 외부 STEP 기구물의 트레이스 폭과 구멍을 직접 고치는 Faces 면 편집 도구를 익힙니다.

배울 것
포트·경계가 따라오는 이동·회전·배열

해 볼 것
Unite · Subtract · Split 불리언

핵심 개념
Faces 직접 편집(Offset · Delete & Heal · Replace w/ Box)

7.1 포트까지 함께 이사 가는 스마트 변환과 배열 복제

40단계 스냅샷 Undo(`Ctrl` + `Z`)를 지원하므로 언제든 안심하고 실험할 수 있습니다. **Edit ▸ Arrange ▸** 의 이동·회전·미러·스케일이나 두 점 클릭 이동(뷰포트 툴바 십자 화살표)으로 도형을 옮기면, **그 도체 면에 할당된 Lumped/Wave 포트(적분선 극성 포함)와 경계 조건, 국부 메시 연산까지 자동으로 함께 변환**됩니다.

선형·원형 배열 복제(**Edit ▸ Duplicate ▸**)에서 **Total number는 원본을 포함한 총 개수**입니다. 1×4 배열 패치를 만들려면 원본 1개를 그리고 Total number에 `4`를 입력합니다.

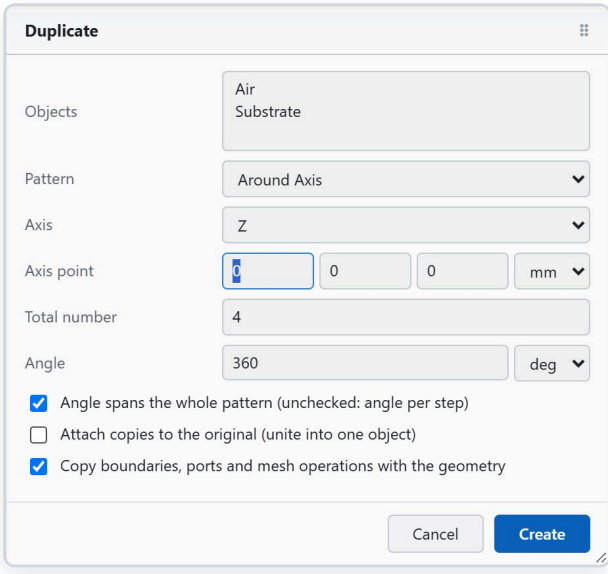


그림 7-1 원형 배열 복제(Around Axis). 원형 편파 시퀀셜 회전 배열이나 원통형 비아 링 생성에 유용합니다.

7.2 불리언 연산(Boolean)과 평면 분할(Split)

명령 (Modeler ▸ Boolean ▸)	동작과 실무 팁
Unite	선택한 여러 도체 시트나 솔리드를 하나의 연속된 객체로 합칩니다(접합부 내부 경계면 제거).

명령 (Modeler ▸ Boolean ▸)	동작과 실무 팁
Subtract...	대상 객체(Blank)에서 도구 객체(Tool)를 파냅니다. 비아 홀을 여러 층에서 뚫을 때는 **Keep originals(도구 유지)**를 켭니다.
Split by Plane... / Imprint	XY·YZ·ZX 평면으로 대칭 모델을 절반으로 자르거나(대칭 경계 활용), 접촉면을 각인해 메시 절점을 일치시킵니다.

7.3 히스토리 없는 외부 CAD도 자유자재로: `Faces` 직접 편집 UPGRADE

기구팀에서 받은 STEP 하우징이나 안테나 브래킷에는 설계 변수가 없습니다. Desktop 2026 V2.3의 **Modeler ▸ Faces ▸** (또는 F 면 선택 후 우클릭 **Faces ▸**)를 쓰면 원본 CAD 프로그램으로 되돌아갈 필요 없이 즉석에서 형상을 수정하고 디피처링(defeaturing)할 수 있습니다.

면·모서리 명령	무엇을 해결해 주나
Offset / Push-Pull... NEW V2.3	선택한 평면이나 원통면을 법선 방향으로 밀거나 당깁니다. 패치 길이 튜닝, 캐비티 벽 이동, 비아 반경 변경이 1초면 끝납니다.
Delete & Heal NEW V2.3	메시 수만 개를 잡아먹는 미세 필렛·모따기·나사 구멍 면을 지우고 인접 면을 연장해 깨끗한 솔리드로 자동 봉합(healing)합니다.
Replace with Box NEW V2.3	전자기 성능과 무관한 복잡한 커넥터 외피나 방열 핀 뭉치를 동일한 외곽 바운딩 직육면체로 단순화해 해석 속도를 극대화합니다.
Sweep Face · Detach	선택한 2D 단면을 법선 방향으로 돌출해 새 3D 입체를 만들거나, 솔리드 표면 하나를 독립 시트로 떼어 냅니다.



메시의 수렴·정확도 점검

외부 기구물 STEP에 있는 0.2 mm짜리 로고 각인과 나사산 하나가 전체 사면체 메시의 70 %를 삼켜 버리곤 합니다! 해석 전에 **Delete & Heal**과 **Replace with Box**로 불필요한 잔주름만 정리해도 해석 시간이 5분에서 20초로 줄어듭니다.

HOW TO 실수 제로! 불리언 차집합(Subtract) 순서와 외부 STEP 구멍 1초 봉합하기

1. **차집합 선택 순서 (남길 판 → 파낼 공구)**
   트리나 뷰포트(`O` 모드)에서 구멍이 뚫릴 대상(**Blank**, 예: 기판 또는 접지판)을 **먼저 클릭**한 뒤, `Ctrl` +클릭으로 파낼 기둥(**Tool**, 예: 비아 또는 동축 외경)을 두 번째로 고릅니다.

2. **Keep originals 체크 확인!**
   `Modeler ▸ Boolean ▸ Subtract...` 에서 비아 도체 기둥 자체가 함께 사라지지 않게 하려면 반드시 **Keep originals (도구 유지)**에 체크하고 **Apply**를 누릅니다.

3. **외부 STEP 불필요 홀 지우기**
   가져온 기구물에서 나사 구멍을 메우려면 `F` 키(면 선택)를 누르고 구멍 안쪽 원통 내벽 면을 클릭합니다.

4. **Delete & Heal 실행**
   우클릭 `Faces ▸ Delete & Heal` 을 누르면 구멍이 감쪽같이 메워지며 매끈한 평면 솔리드로 자동 복원됩니다!

08 CHAPTER

스윕과 수식 곡선: 나선 · 헬릭스 · 재편집

회전 대칭 혼 안테나부터 매개변수 수식으로 그리는 아르키메데스 스파이럴, 3차원 헬리컬 코일까지 곡선 모델링 기법과 생성 후 수식을 다시 고치는 Edit curve 기능을 다룹니다.



배울 것
축·벡터·경로 3종 Sweep

해 볼 것
Equation Curve · Helix · Spiral

핵심 개념
Properties ▸ Edit curve 비파괴 재편집

8.1 단면을 입체로 바꾸는 세 가지 Sweep

Modeler ▸ Sweep ▸ 은 평면 프로파일 시트를 움직여 3D 입체를 만듭니다. **Around Axis**는 단면을 지정 축 둘레로 회전시켜 동축 테이퍼·원뿔 혼·유전체 링을 만들고, **Along Vector**는 비스듬한 벡터 방향으로 돌출하며, **Along Path**는 폴리라인이나 수식 곡선을 따라 단면을 수직 정렬해 쓸어 나갑니다.



그림 8-1 Sweep Around Axis 대화상자. 회전축과 각도(360°면 닫힌 회전체)를 지정합니다.

8.2 수식 곡선(`Equation Curve`)과 Helix · Spiral 프리셋

Draw ▸ Equation-Based Curve...와 **Draw ▸ Helix... / Spiral...**은 매개변수 `_t`에 대한 $x(_t), y(_t), z(_t)$ 수식으로 정밀 곡선을 생성합니다. 이때 **Make(단면 형태)** 선택이 결정적으로 중요합니다.

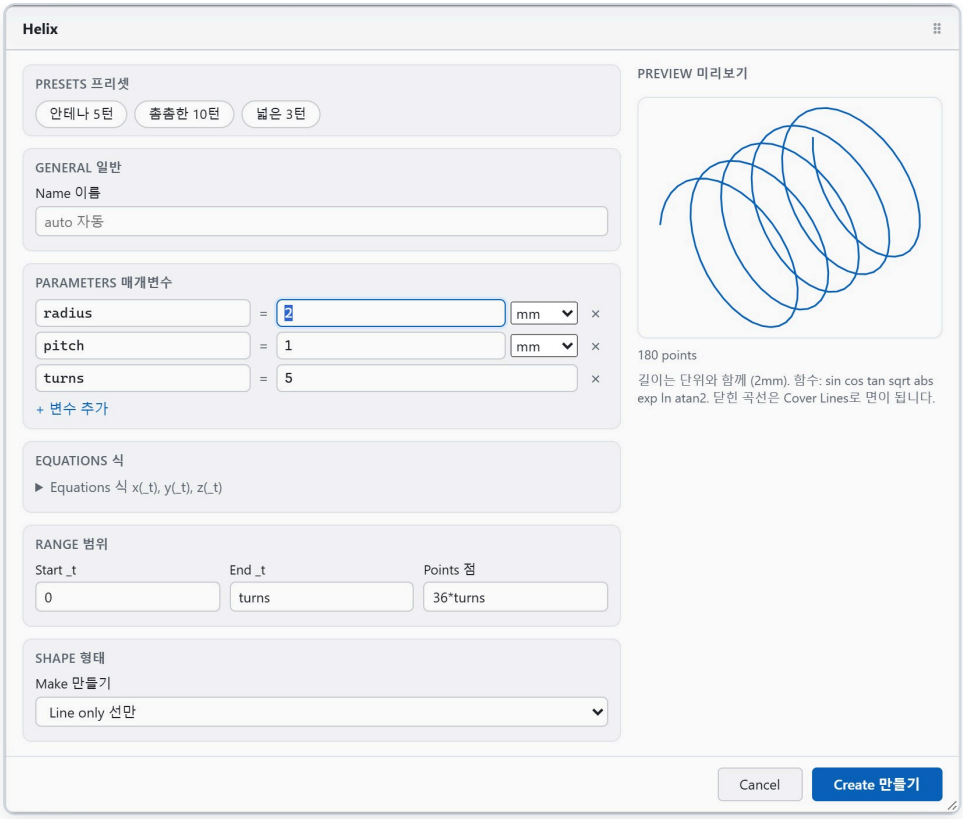


그림 8-2 Helix 생성 및 미리보기 창. 턴 수·반경·피치를 바꾸면 우측 투영도와 3D 뷰포트에 즉시 반영됩니다.

PATH ONLY
Line only
두께·폭이 없는 순수 기하 경로(스윕 경로용, 단독 전류 불가).

2D TRACE
Flat trace
지정 선폭을 가진 평면 동박 시트(평면 스파이럴 안테나·인덕터).

3D BAR
Bar
폭 × 두께(예: 35 µm) 직사각 단면 솔리드 도체.

WIRE
Round wire
원형 단면 솔리드 도선(권선형 헬리컬 안테나·공심 초크).

8.3 만든 뒤에도 수식 그대로 고치는 `Edit curve` UPGRADE

수식 곡선이나 나선 코일을 만든 뒤 턴 수나 반지름을 바꾸고 싶을 때 지우고 다시 그릴 필요가 없습니다. 트리와 뷰포트에서 해당 객체를 클릭한 뒤 좌측 하단 Properties 창의 **Edit curve** 버튼을 누르면 처음 입력했던 매개변수와 수식이 그대로 복원되어 제자리에서 형상이 갱신됩니다.

DXF 등으로 가져온 닫힌 선분은 **Cover Closed Line**으로 패치 시트로 메우고, 열린 중심선은 **Line Pattern**으로 선폭을 입혀 도체 패턴으로 변환합니다.

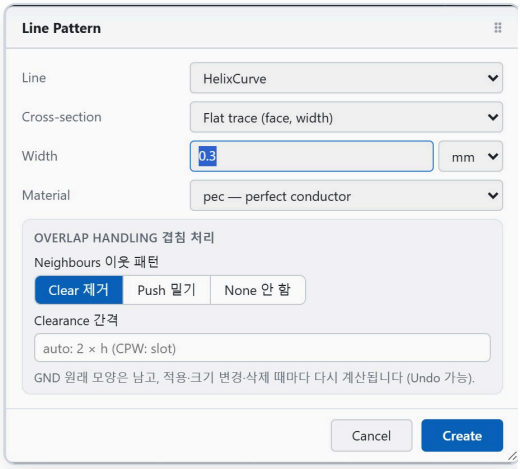


그림 8-3 Line Pattern. 중심선에 동박 폭이나 원형 도선 단면을 부여합니다.

09 CHAPTER

실전 RF PCB · 본드와이어 · 스마트 비아 · 무라타 실제 칩



Desktop 2026 V2.3에서 가장 화려하게 진화한 실전 레이아웃 무기들입니다! 다이와 보드를 잇는 JEDEC 본드와이어, λg/10 자동 비아 펜스, 자기공진(SRF)까지 살아 있는 54종 무라타 칩(.s2p), 양방향 버터플라이 스텁을 완벽히 마스터합니다.

배울 것
JEDEC 4점 Bondwire와 병렬 와이어

해 볼 것
자동 λg/10 Via Fill과 기생 L 계산

핵심 개념
Murata .s2p 실제 칩 부품과 버터플라이 스텁·미앤더

9.1 다이 패드에서 기판까지: 3D `Bondwire` NEW V2.3

베어 다이(bare die) MMIC나 GaN 트랜지스터 패키지 내부에서 가장 큰 직렬 인덕턴스($0.7 \sim 1\ \mathrm{nH/mm}$)를 만드는 주범이 본드와이어입니다. 리본 **Draw ▸ Bondwire**를 누르면 3D 뷰포트에서 **본드 패드 점 → 리드(기판) 점**을 마우스로 콕콕 찍어 실제 3차원 루프 와이어를 즉시 생성합니다.

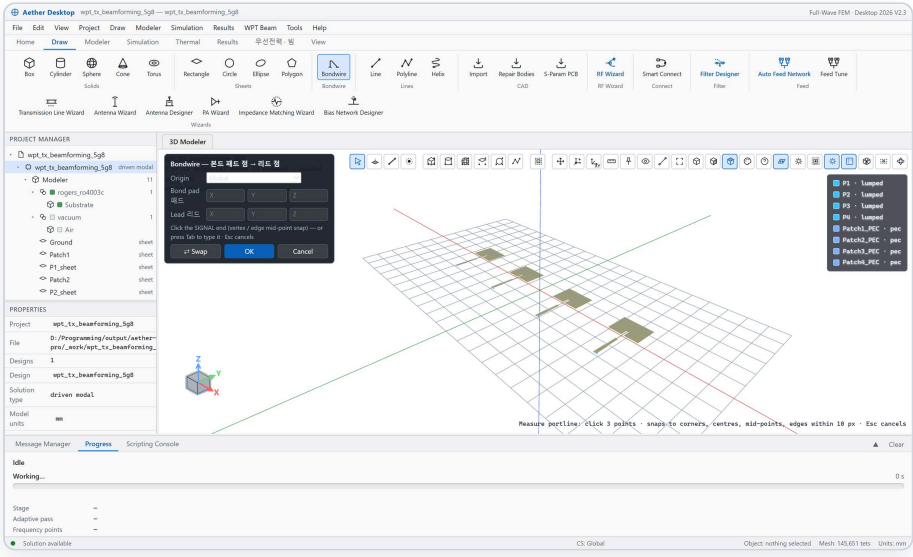


그림 9-1 Draw 리본의 Bondwire 피킹 모드. 정점·모서리 중점에 자동 스냅되며 Swap 버튼으로 시작·끝 방향을 뒤집을 수 있습니다.

- **3종 루프 프로파일** — 수직 상승 후 경사지게 내려오는 실전 표준 **JEDEC 4-point**, 부드러운 포물선(**Parabolic**), 평탄 상단 사다리꼴(**Trapezoid**)을 지원하며 생성 후에도 Properties 창에서 루프 높이·지름을 언제든 재편집합니다.

- **원형 와이어 vs 리본 & 다중 병렬 본딩** — 지름 $18 \sim 50\ \mu\text{m}$ 골드/알루미늄 와이어뿐 아니라 고주파 저인덕턴스 **리본(Ribbon, 폭×두께)**과 2~8가닥 병렬 배치(`count`, `pitch`)를 한 번에 생성하며, 표피효과 교류 저항 R_{ac}와 등가 인덕턴스 L을 추산해 보여 줍니다.



메시의 수렴·정확도 점검
지름 $25\ \mu\text{m}$ 원기둥을 32각으로 매끄럽게 그리면 와이어 하나에 사면체 수만 개가 몰립니다! Bondwire 도구는 해석 정확도는 똑같이 유지하면서 메시 수를 획기적으로 줄이는 **6~8각 프리즘 단면**을 기본 권장합니다.

9.2 클릭 한 번에 48개 비아 펜스 완성: `Via Fill / Smart Via` NEW V2.3

ONLY IN AETHER

접지 패드나 CPWG 구리 판에 비아를 하나씩 원기둥으로 심고 기판에서 차집합으로 구멍을 뚫던 노가다는 이제 끝났습니다! 동박 시트를 선택하고 리본 **Modeler ▸ Via Fill** (**Modeler ▸ RF ▸ Via Fill / Smart Via...**)을 실행해 보세요.

- **자동 주파수 간격 규칙** — 아래 기판(ε_r, h)과 해석 주파수를 자동 인식해 누설 파동을 막는 $\lambda_g/10$(엄격 체크 시 $\lambda_g/20$) 간격으로 둘레 펜스 + 내부 격자 비아를 자동 배치합니다.
- **기생 인덕턴스 즉시 계산** — 오른쪽 그림처럼 비아 1개당 인덕턴스(550 pH)와 48개 병렬 합성 인덕턴스(**11.5 pH**!)를 실시간 계산해 보여 줍니다.
- **비파괴 그룹 & 기판 홀 자동 복원** — `하나의 물체로 묶기`로 메시 효율을 높이고, 나중에 비아 그룹을 수정하거나 지우면 기판에 뚫렸던 구멍도 감쪽같이 원래대로 메워집니다!



그림 9-2 Via Fill 대화상자. RO4003C 0.813 mm 기판 위 패치에 48개 비아(펜스 34 + 내부 14)와 병렬 인덕턴스 11.5 pH를 자동 산출한 모습입니다.

HOW TO **바닥 GND가 아닌 윗면 패드를 고르세요! Via Fill 4단계 따라하기**

1. **윗면 구리 시트 선택**
   뷰포트(`0` 모드)나 트리에서 비아를 심을 **윗면 접지 아일랜드 또는 패치 시트**를 클릭합니다(바닥 전체 Ground 시트가 아님에 주의!).
2. **Via Fill 창 열기**
   리본 **Modeler ▸ Via Fill** 을 누르면 바로 아래 유전체 기판 두께(h)와 유전율(ε_r), 바닥 접지면 높이를 툴이 자동으로 읽어 들입니다.
3. **드릴 규격 · 기생 L 확인**
   `Drill diameter`(예: `0.3mm`)와 간격 규칙(기본 $\lambda_g/10$)을 확인하고, 하단에 실시간 계산된 총 비아 수와 **병렬 합성 인덕턴스(예: 11.5 pH)**를 점검한 뒤 **Apply**를 누릅니다.
4. **비파괴 수정 · 복구**
   간격을 바꾸고 싶다면 트리의 `ViaFill_*` 그룹만 지우세요. 기판에 뚫렸던 수십 개의 구멍까지 흔적 없이 원래대로 메워집니다!

9.3 이상적 C의 배신을 막아라: `Murata .s2p` 실제 칩 부품 라이브러리 NEW V2.3

5.8 GHz 회로에 "이상적인 2.2 pF 커패시터"를 넣으면 완벽하게 동작하던 정합 회로가, 실제 기판을 찍어 오면 완전히 틀어지는 이유가 무엇일까요? 실제 적층 세라믹 커패시터(MLCC) 내부의 기생 직렬 인덕턴스(ESL) 때문에 특정 주파수에서 **자기공진(SRF, Self-Resonant Frequency)**이 일어나고, 그 위에서는 커패시터가 아니라 **인덕터**로 둔갑하기 때문입니다!

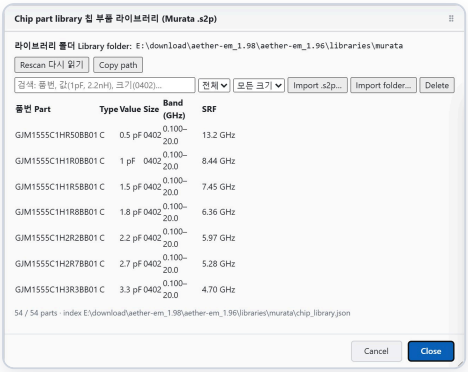


그림 9-3 내장 Murata 0402(.s2p) 칩 부품 라이브러리(54종). 2.2 pF(GJM1555C1H2R2BB01)의 SRF가 5.97 GHz로 5.8 GHz 동작점 코앞임을 한눈에 경고합니다!

SMD Part, Place SMD at Point, Lumped RLC 대화상자 안에는 이제 `Model 소자 모델` 3단 선택기가 들어 있습니다.

1. **Ideal R / L / C**
   기생 성분 없는 교과서 이상 소자 (초기 개념 확인용).
2. **Real part (.s2p)**
   내장 54종 Murata GJM/LQP 측정 `.s2p` 데이터(또는 사용자가 추가한 벤더 `.s2p`)의 주파수별 복소 임피던스를 3D EM 경계와 Co-sim에 직접 주입!
3. **Fitted circuit**
   `.s2p`로부터 추출한 유효 직렬 R-L-C 등가회로 적용.

또한 리본 **SMD @ Point**를 누르면 미앤더나 기울어진 선로 위 어디든 클릭해 부품을 올리며, 배치 중 `R` / `Shift`+`R` 키로 90°씩 방향을 돌리고 병렬(shunt) 선택 시 접지 패드와 비아 2개까지 자동 생성합니다.

HOW TO **미앤더 위 어디든 콕! 무라타 .s2p 실제 칩 올리고 자기공진(SRF) 점검하기**

1. **위치 클릭 & 방향 회전**
   리본 `Modeler ▸ SMD @ Point` 를 누르고 선로 위 원하는 지점을 클릭합니다. `R` 키로 90°씩 방향을 맞추고 직렬(`Series`, 선로 자동 절단) 또는 병렬(`Shunt`, 접지 패드+비아 2개 자동 생성)을 고릅니다.
2. **Real part (.s2p) 전환**
   `Model 소자 모델`을 **Real part (.s2p)**로 바꾸면 내장 54종 Murata 0402/0603 GJM(커패시터)·LQP(인덕터) 카탈로그가 열립니다.
3. **SRF 안전 여유 확인**
   목록에서 원하는 용량/인덕턴스를 고른 뒤 표시되는 **SRF 주파수가 내 회로 중심 주파수보다 충분히 높은지(권장 1.3배 이상)** 확인합니다. SRF가 너무 가까우면 더 작은 용량을 병렬로 쓰거나 0201/0402 저ESL 시리즈로 바꿉니다.
4. **3D + EM 경계 동시 생성**
   Apply를 누르면 솔더 패드·칩 바디·접지 비아와 함께 전 대역 측정 `.s2p` 임피던스 경계가 단 한 번에 조립됩니다!

9.4 자유 길이 미앤더 · 버터플라이 C/L 스텁 · 단락 부채꼴 스텁 · PCB 코일 UPGRADE

Meander — `Fix length` 토글의 마법 UPGRADE

`Modeler ▸ Meander...` 는 기본값(`Fix length 길이 고정` 켜짐)에서 원래 선로의 총 길이를 칼같이 보존하며 지그재그로 접습니다. V2.3에서는 `Fix length` **체크를 끄면** 스팬 폭은 그대로 둔 채 원하는 목표 전기적 길이를 숫자로 직접 입력하거나 끝점 흰 핸들을 최대 3배까지 드래그해 위상 지연선을 자유자재로 늘일 수 있습니다.

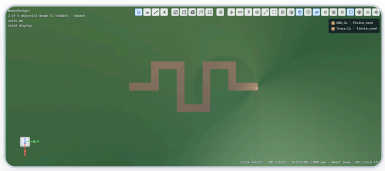


그림 9-4 20 mm 직선 선로를 3턴 미앤더로 접은 결과(폭 10.01 mm). 이제 길이 고정 해제 시 원하는 위상 길이로 자유 신축됩니다.

BUTTERFLY C / L

양방향 대칭·비대칭 스텁 NEW V2.3

`RF ▸ C / L from a Line...` 에서 사각형 외에 **원형·부채꼴·다각형 패드**와 선로 양쪽 **Both sides(버터플라이 대칭 C/2 또는 비대칭 비율)** 배치를 지원해 불연속 기생 성분을 절반으로 줄입니다.

RADIAL SHORT

단락 부채꼴 스텁 NEW V2.3

`Modeler ▸ Stub...` 의 **Radial, shorted by vias**는 부채꼴 호를 따라 비아 배열을 자동 배치해 RF 대역에서는 개방(무부하)이면서 강력한 **DC 귀로 및 ESD 방전 보호선**이 됩니다.

PCB HELIX

기판 관통 헬리컬 코일

유전체 보드를 고르고 **PCB Helical Coil**을 실행하면 상·하층 트레이스와 관통 비아로 감기는 3D 솔레노이드 인덕터(추정 L·SRF 표시)를 생성합니다.

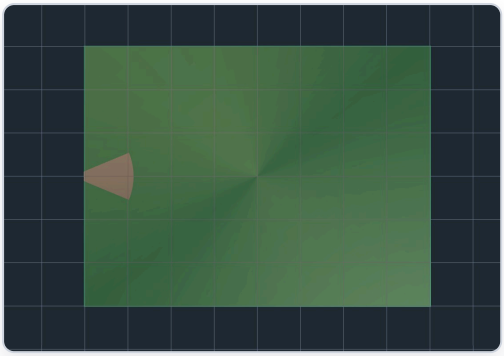


그림 9-5 50 Ω 주 선로 옆에 합성한 45° 개방 래디얼 스텁과 FEM 주파수 재조정(Solved at retune) 기능.

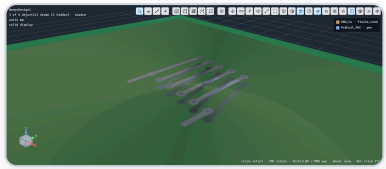
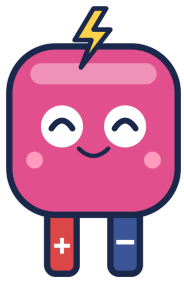


그림 9-6 0.508 mm 기판에 자동 생성한 5턴 PCB 헬리컬 코일(약 11.2 nH, SRF 3.26 GHz).

10 CHAPTER

동박 겹침 자동 정리 (Clear · Push)와 DRC 검수



코플래너 접지판(CPWG) 위에 스텁을 얹거나 빽빽한 보드에서 미앤더를 늘릴 때, 일일이 불리언 차집합을 하거나 옆 선로를 손으로 옮기지 마세요. 툴이 알아서 비우고 밀어 줍니다.

배울 것
Clear · Push · None 3대 겹침 정책

해 볼 것
원본 보존 GND 자동 클리어런스

핵심 개념
이웃 배선 자동 밀어내기와 DRC

10.1 패턴이 부딪힐 때 작동하는 세 가지 지능형 규칙

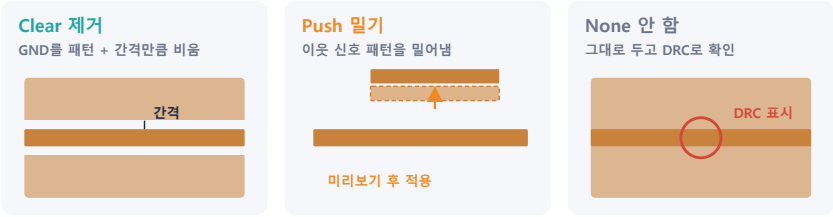


그림 10-1 동박 겹침 처리 3모드. Clear는 원본 GND를 기억한 채 이격 간격만큼 파내고, Push는 인접 신호선까지 안전 거리 밖으로 밀어냅니다.

모든 RF 패턴 도구의 하단과 우클릭 메뉴에는 **Overlap & Clearance** 엔진이 연결되어 있습니다.

- **Clear (GND 자동 비우기)** ONLY IN AETHER — 신호 패턴 외곽선에서 지정 간격(기본 기판 두께의 $2 \times h$)만큼 같은 층의 접지 동박을 자동으로 파냅니다. 일반 EM 툴의 파괴적 불리언(Subtract)과 달리 **원본 접지 형상을 비파괴로 기억**하므로 나중에 스텁을 지우거나 줄이면 파냈던 접지도 자동으로 다시 메워집니다!
- **Push (이웃 트레이스 자동 밀어내기, `Push Neighbours…`)** UPGRADE — 새로 넓어진 미앤더나 패드가 옆 신호선과 너무 가까워지면 침범 거리만큼 이웃 트레이스를 평행 이동할 미리보기를 보여 주고 안전하게 밀어 줍니다.
- **Design Rule Check (DRC)** — **Modeler ▸ Design Rule Check (DRC)** 를 누르면 동일 층 도체 간 단락(겹침)과 최소 공정 간격(기본 0.1 mm) 위반 지점을 3D 뷰에 붉은 하이라이트로 찍어 줍니다.

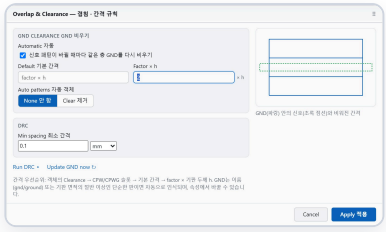


그림 10-2 Overlap & Clearance 규칙 설정 창. 자동 클리어런스 갱신과 최소 공정 간격을 관리합니다.

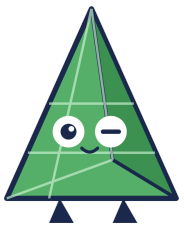
HOW TO 내장 샘플(Overlap_Clear_Start_5G8.warp)로 비파괴 GND 자동 비우기 체험하기

1. **샘플 열기 & DRC 단락 검출**
   File ▸ Open Examples… 에서 `Overlap_Clear_Start_5G8.warp` 를 연 뒤 **Modeler ▸ Design Rule Check (DRC)** 를 실행합니다. 상부 CPWG 접지 동박과 신호 스텁이 겹친 단락 부위가 빨갛게 하이라이트됩니다.
2. **자동 클리어런스(Clear) 적용**
   Modeler ▸ Overlap & Clearance… 를 열고 정책을 **Clear**, 이격 간격을 `0.4mm` (또는 `2*h`)로 둔 채 **Apply**를 누르면 스텁 외곽을 따라 접지 동박이 칼같이 파입니다.
3. **비파괴 자동 복원 확인!**
   이제 스텁을 선택해 옆으로 1 mm 옮기거나 크기를 줄여 보세요. 새 위치의 접지가 자동으로 파이는 동시에 **아까 파였던 옛날 자리가 감쪽같이 다시 메워집니다!**
4. **DRC 재검수 통과**
   다시 **DRC**를 돌려 위반 건수 `0건(PASS)` 이 뜨는지 확인합니다.

11 CHAPTER

재료 라이브러리와 도체 · 분산 매질 모델링

똑같은 14 mm 패치라도 RO4003C 위인지 FR-4 위인지에 따라 공진 주파수와 이득이 완전히 달라집니다. 내장 RF 기판·세라믹·금속 재질과 고주파 분산·거칠기 모델링 원칙을 정리합니다.



배울 것
40여 종 표준 RF·세라믹·금속 라이브러리

해 볼 것
주파수 분산 유전체 (Debye·Djordjevic-Sarkar)

핵심 개념
시트 도체 vs 3D 솔리드 도체 선택 기준

11.1 재료 관리자(`Material Manager`)

Project ▸ Material Manager...에는 Rogers(`RO4003C`, `RO4350B`, `RO3003/3010`), Taconic/RT(`RT/duroid 5880`), `FR-4`, 고열전도 세라믹(`AlN`, `Alumina`, `BeO`), 반도체(`Si`, `GaN`, `SiC`), 도체(`copper`, `gold`, `aluminum`, `silver`, `pec`)가 기본 내장되어 있습니다.

광대역 해석을 위해 상수 $\tan\delta$ 외에도 인과율(causality)을 만족하는 **Djordjevic-Sarkar · Debye · Lorentz 주파수 분산 모델**을 지원하며, 유한 도전율 경계에는 동박 표면 거칠기(RMS roughness, Hammerstad/Groisse 보정)를 반영해 밀리미터파 도체 손실 과소평가를 막습니다.

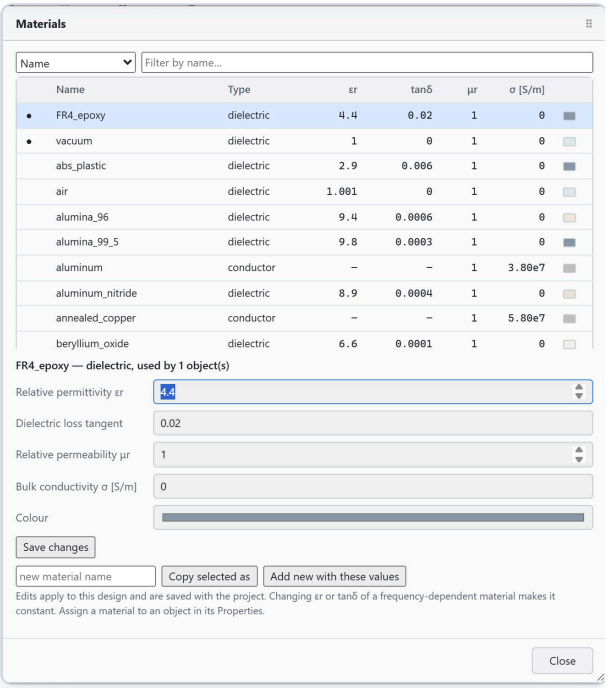


그림 11-1 Material Manager. 현재 디자인에서 사용 중인 재질에 점(•) 표시가 붙으며 프로젝트별로 안전하게 커스터마이징됩니다.

2D SHEET
유한 도전율 구리 시트
표피 임피던스 경계로 옴 손실을 정확히 반영하면서 두께 방향 미세 메시가 필요 없어 일반 PCB 해석의 표준입니다.

3D SOLID
실제 두께(35 µm) 솔리드
간격 0.1 mm 이하의 강결합 커플러처럼 동박 **측면(sidewall) 전계 결합**이 결정적일 때 사용합니다 (내부 메시는 자동 생략).

PEC
완전 전기 도체
저항 손실 0. 순수 방사 Q나 무손실 이론 검증, 대칭벽에 사용합니다.

12 CHAPTER

고속 외부 CAD (STEP·DXF·KiCad·Gerber) 반입과 Step to RF Line



수백 개 비아가 뚫린 다층 STEP 보드와 NURBS 곡선이 섞인 DXF를 순식간에 읽어 들이고, 외부에서 가져온 멍텅구리 구리 덩어리를 클릭 한 번에 스마트 RF 전송선으로 승격시킵니다!

배울 것
바이너리 블롭 고속 STEP · 정밀 DXF · KiCad/Gerber 반입

해 볼 것
단위 검증과 레이어 이름 기반 재료 자동 매핑

핵심 개념
우클릭 RF ▸ Step to RF Line 승격 마법

12.1 초고속 외부 CAD · PCB 반입 엔진 UPGRADE

File ▸ Import ▸ 는 기계·회로·아트웍 팀의 주요 표준 포맷을 모두 직접 읽습니다. 특히 Desktop 2026 V2.3에서는 대용량 어셈블리 반입 성능과 정밀도가 대폭 도약했습니다.

- **STEP / IGES / BREP 고속화** — OpenCASCADE 병렬 표면 삼각분할(`Fast` / `Balanced` / `Fine` 프리셋)과 원시 바이너리 `/api/blob` 해시 캐시로 수백 개 비아가 든 80 GHz 다층 보드도 끊김 없이 읽고 `.warp` 파일 하나에 압축 내장합니다.
- **DXF / GDSII 정밀화** UPGRADE — 중첩 블록(`INSERT` 회전·비균일 스케일·배열), 폴리라인 원호(`Bulge`), `SPLINE`(NURBS), 내부 홀 차집합과 `$INSUNITS` 단위를 정밀 복원하며 **2D 시트 / 두께 돌출 3D 솔리드 / 폴리라인** 중 선택해 가져옵니다.
- **KiCad(`.kicad_pcb`) · Gerber(`.zip`/드릴)** — 다층 적층 두께, 구리 레이어(`F.Cu`, `B.Cu`), 드릴 비아 배럴을 3D로 자동 조립하고 부품·레이어 이름(`RO4003C`, `patch`, `gnd`)에서 재질을 자동 매핑합니다.

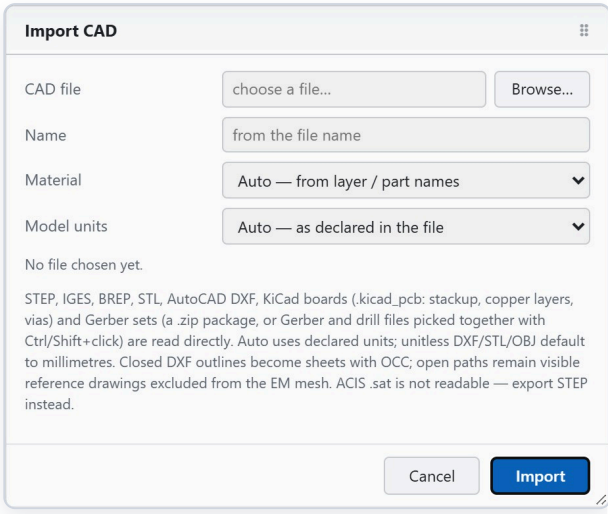


그림 12-1 Import CAD 대화상자. 반입 전 실제 mm 외곽 치수와 바디 수를 미리 검증해 단위 사고(mm vs inch/m)를 원천 차단합니다.

12.2 외부 구리 솔리드를 파라메트릭 선로로! Step to RF Line… NEW V2.3 ONLY IN AETHER

다른 상용 EM 툴에 외부 STEP이나 KiCad/Gerber 보드를 불러오면 모든 구리 트레이스가 "이력 없는 멍텅구리 3D 다각형 덩어리"가 되어 선폭 하나, 위상 10°를 바꾸려고 해도 다시 아트웍 툴로 돌아가야 했습니다. Aether EM에서는 가져온 구리 트레이스(또는 직선 구간 면)를 우클릭하고 RF ▸ Step to RF Line… (Properties 창의 **Edit as RF Line…**)을 누르는 순간 끝납니다!

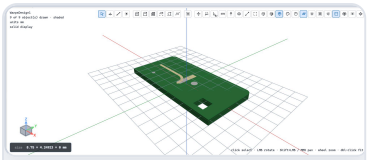


그림 12-2 ① 반입 직후: KiCad/STEP에서 들어온 평범한 구리 다각형(파라메트릭 속성 없음).

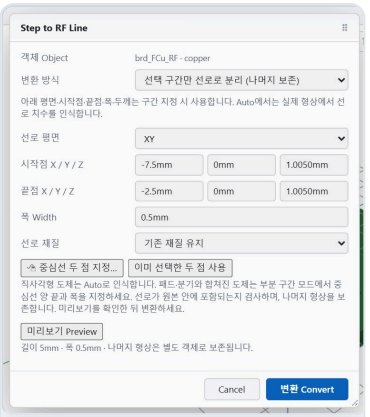


그림 12-3 ② Step to RF Line 승격: 아래 기판을 자동 인식해 Z0·전기적 길이를 읽고 면적 오차 2.5×10^{-16} mm²로 변환!

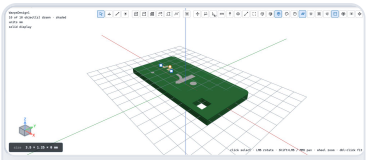


그림 12-4 ③ Meander 즉시 적용: 승격된 선로를 그 자리에서 지그재그로 접어 위상 지연선 완성!

HOW TO 외부 STEP·KiCad 트레이스에 스텁과 미앤더 바로 달기

1. **트레이스 우클릭 ▸ RF ▸ Step to RF Line...**
   툴이 트레이스 중심선과 선폭을 기하학적으로 역추적하고(면적 보존 정밀도 $2.5 \times 10^{-16}\ \mathrm{mm}^2$!), 바로 아래의 유전체 기판($\varepsilon_r$, 두께 h)과 접지면 위치를 자동 탐지합니다.

2. **파라메트릭 RF 선로로 승격**
   현재 선폭의 특성 임피던스 Z_0를 즉시 계산해 주며, 목표 Z_0(예: 50 Ω)를 입력하면 선폭이 그 자리에서 정밀 보정됩니다.

3. **모든 RF 도구 해금!**
   승격된 선로에는 처음부터 Aether EM에서 그린 선로와 100 % 똑같이 **Meander(길이 고정/자유 신축), Radial/Class-F Stub, C/L from Line, SMD Part, Auto Port**가 작동합니다!

12.3 제작 도면 내보내기 (STEP · STL · 다층 DXF · glTF)

설계와 튜닝이 끝난 3D 형상은 **File ▸ Export ▸** 를 통해 기구 검수용 **STEP / STL / 3D glTF(`.glb`)** 또는 PCB 아트웍 교환용 **2D/3D 레이어별 DXF 도면**(공기·PML 자동 제외 옵션 지원)으로 깨끗하게 내보냅니다.

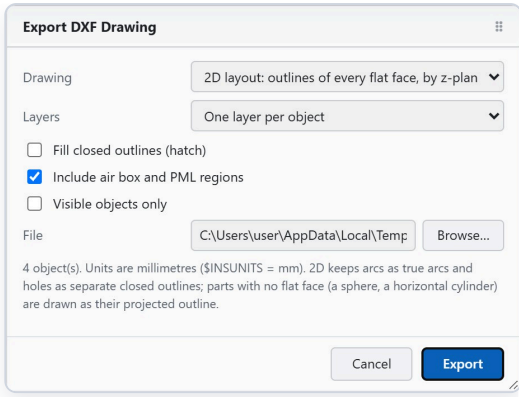


그림 12-5 Export DXF Drawing. z축 층별·재질별 레이어 분리와 닫힌 폴리곤 해칭 옵션을 제공합니다.

PART

03

경계 · 포트 · 고속 솔버 · 최적화 정확하고 빠르게 답을 얻는 법

똑같은 3D 도면이라도 경계 조건과 포트 기준면, 메시 수렴 규칙을 어떻게 잡느냐에 따라 명품 설계와 가짜 공진이 갈립니다. 3부에서는 8종 경계와 PML 개방 영역, 3초 자동 포트 지정법, 차수축소(_ProjectedROM) 고속 스윕과 고정 거친 메시의 치명적 함정, 그리고 최소 횟수의 FEM 해석으로 최적 치수를 찾아내는 Optuna 베이지안(TPE) 최적화를 다룹니다.



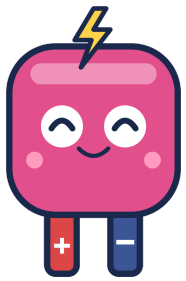
13 경계 조건 · 개방 영역 (Radiation/PML) · 포트 완전 정복

14 Solution Setup · 적응형 메시 · 고속 주파수 스윕

15 검사 · 실행 · Eigenmode · Optuna 베이지안 최적화

13 CHAPTER

경계 조건 · 개방 영역 (Radiation/PML) · 포트 완전 정복



경계 조건은 해석 공간의 바깥 끝과 도체 표면에 물리 법칙을 부여하고, 포트는 고주파 에너지를 넣고 빼는 관문입니다. 극성 실수 없이 3초 만에 정확한 포트를 세우는 세 가지 지름길을 익힙니다.

배울 것
8종 핵심 경계 조건과 Lumped RLC

해 볼 것
Radiation vs PML 개방 영역 선택 기준

핵심 개념
Wave Port · Lumped Port · Auto Port와 극성

13.1 해석 공간의 규칙을 정하는 8종 경계 조건

Simulation ▸ Assign ▸ ▸ Boundary... 또는 면 선택(F) 후 우클릭으로 지정합니다.

경계 종류	물리적 의미	대표 용도 · 기본값
Perfect E (PEC)	접선 전기장 $\mathbf{E}_t = 0$ (무손실 완전 전기벽)	이상 접지면, 도파관 외벽
Perfect H (PMC)	접선 자기장 $\mathbf{H}_t = 0$ (이상 자기벽)	짝수 대칭면, 개방 단면 근사
Finite Conductivity	표피효과 + 동박 두께 + 표면 거칠기 옴 손실 반영	실제 구리·금·알루미늄 도체 시트
Radiation	1차 구면파 흡수 경계(열린 자유공간 근사)	일반 안테나 공기 상자 외곽면
Impedance	균일 표면 시트 저항·리액턴스 $Z_s = R + jX$ $[\Omega/\mathrm{sq}]$	박막 저항기, 전자파 흡수 시트(377 Ω/sq)
Lumped RLC UPGRADE	시트 양단에 집중 $R \cdot L \cdot C$ 또는 **Murata 실제 칩(.s2p)**	SMD 매칭 소자, 50 Ω 종단 저항, 바이어스 디커플링
Symmetry E / H	전자기 대칭면 선언으로 해석 체적 1/2 또는 1/4 감축	대칭 혼 안테나, 공동 공진기, 차동 쌍

경계가 허공에 떠 있지 않은지 꼭 확인하세요

우측 상단 범례에 이름은 있는데 덮는 삼각형 수가 0개라면 Message Manager에 경고가 뜹니다. 불리언 편집 직후에는 범례 항목을 클릭해 원하는 면이 하이라이트되는지 확인하는 습관이 수시간의 재해석을 아껴 줍니다.

Q&A **Lumped RLC 대화상자의 `Parallel` 체크박스, 켜야 할까요 꺼야 할까요?**

실제 칩 커패시터(MLCC)의 기생 성분을 넣을 때는 반드시 체크를 꺼야(직렬 연결) 합니다! 실제 바이패스 칩(예: $R = 0.1\ \Omega, L = 0.4\ \text{nH}, C = 100\ \text{pF}$)은 전류가 `ESR → ESL → C` 를 차례로 지나는 **직렬 공진 회로**($Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$, 0.8 GHz 부근 단락 통과!)입니다. 만약 무심코 `Parallel` 을 체크하면 세 소자가 나란히 병렬 연결되어 $0.1\ \Omega$ 저항 하나로 둔갑하거나 정반대의 병렬 반공진 트랩이 되어 버립니다. `Parallel` 은 병렬 공진 LC 탱크 회로를 모사할 때만 켜세요.

13.2 열린 자유공간 만들기: Radiation vs PML

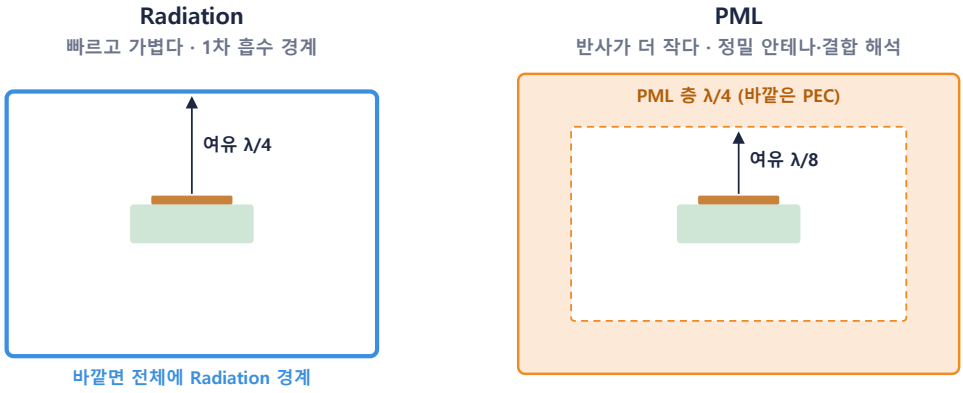


그림 13-1 Radiation 경계(λ/4 공기 여유 + 1차 흡수면)와 PML 완전정합층(λ/8 여유 + λ/4 이방성 흡수층 + 외벽 PEC) 구조 비교.

안테나처럼 공간으로 전파를 쏘는 구조는 **Simulation ▸ Open Region (Radiation / PML)...** 으로 감싸야 합니다. 대역 최저 주파수만 입력하면 파장 λ_0를 계산해 공기 상자를 자동 생성합니다.

- **Radiation** — 구조물에서 $\lambda_0/4$ 이격. 가볍고 빠르며 일반 패치·다이폴 설계에 충분합니다.
- **PML (권장 고정밀)** — 구조물에서 $\lambda_0/8$ 이격 후 $\lambda_0/4$ 두께의 완전 정합 흡수층을 둡니다. 입사각이 비스듬한 빔 조향 배열이나 고이득 안테나에서도 반사가 $-50\ \text{dB}$ 이하로 억제됩니다.

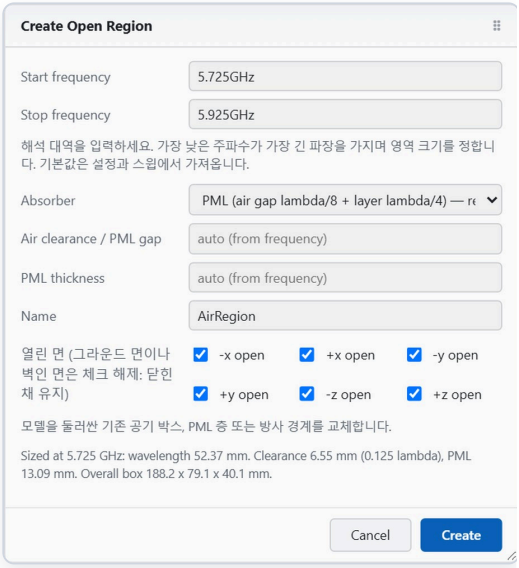


그림 13-2 Create Open Region 대화상자. 접지면이 바닥을 막고 있는 패치 안테나에서는 −Z 방향 체크를 끄면 불필요한 하부 공기 메시가 절약됩니다.

13.3 Wave Port vs Lumped Port — 언제 무엇을 쓸까?

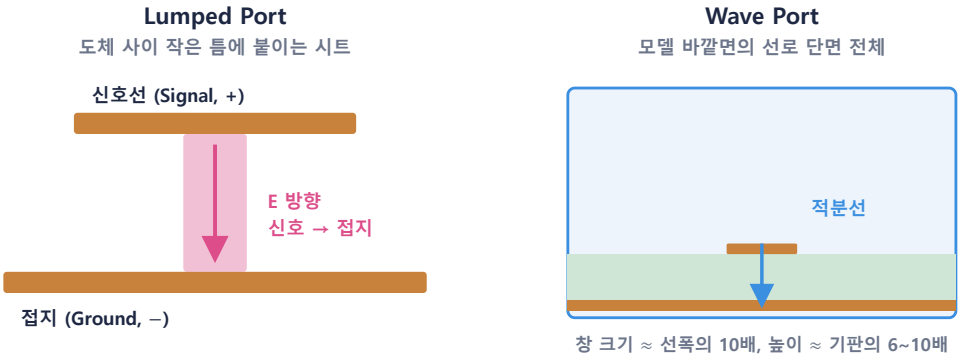


그림 13-3 모델 내부 좁은 급전 틈에 놓는 Lumped Port와 해석 영역 외벽 단면 전체를 덮는 Wave Port.

구분	Lumped Port (집중 포트)	Wave Port (도파 모드 포트)
설치 위치	모델 **내부** 신호 도체와 접지 사이의 작은 틈 ($< \lambda/10$)	해석 공기 상자 **바깥 경계면**과 맞닿은 선로 단면 창
동작 원리	포트 시트에 균일 전기장 인가, 사용자 지정 Z_0 (보통 50 Ω) 정규화	2D 단면 고유값 문제를 먼저 풀어 실제 TEM/TE/TM 모드 장 분포로 여기
강점 · 용도	인셋 패치, 다이폴 중앙, 트랜지스터 게이트/드레인 내부 단자	도파관, 동축 커넥터, 정밀 마이크로스트립·CPWG 입출력, 기준면 디임베딩

13.4 실수 없이 3초 만에 포트 다는 3가지 방법

1. **Port (pick) 원클릭 시트 생성**
   리본 `Home ▸ Port (pick)`을 누르고 **신호 끝면 클릭 → 접지 면 클릭 → Apply**를 누르면 틈새 크기에 딱 맞는 시트 생성과 포트 할당이 한 번에 끝납니다.

2. **Port Marks ▸ Auto Port**
   도체나 면을 우클릭해 **Mark as Signal (+)**과 **Mark as Ground (−)**로 표시한 뒤 `Auto Port ▸ Assign Port (auto type)`을 고르면 외곽 경계 접촉 여부에 따라 Wave/Lumped까지 알아서 판단해 생성합니다.

3. **극성(Polarity) 검증**
   적분선 화살표는 언제나 **Signal(+)에서 Ground(−)**를 향합니다. 차동 배열이나 분배기에서 위상이 180° 뒤집혔다면 포트 우클릭 **Reverse Polarity**로 즉시 바로잡습니다.

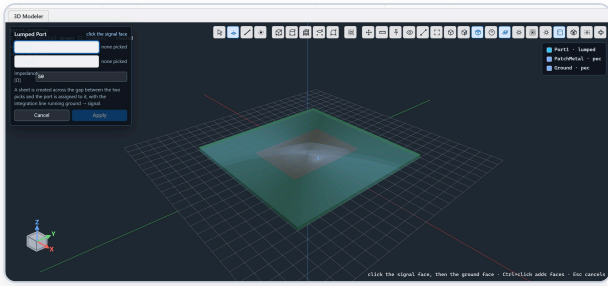


그림 13-4 뷰포트 좌측 상단 Port (pick) 도우미와 Assign Lumped Port 설정.

HOW TO 마이크로스트립 정밀 Wave Port 창 크기 공식($8\ W\ \times\ 6\ h$)과 4단계 세팅법

1. **외벽 접촉 확인**
   마이크로스트립 선로 끝단과 바닥 접지면이 해석 공기 상자(`AirBox`)의 바깥 경계면과 빈틈없이 맞닿아 있는지 확인합니다(모델 안쪽이라면 `Lumped Port` 사용).

2. **포트 창 시트 그리기 ($8W \times 6h$ 황금 비율)**
   공기 상자 외벽 평면에 직사각형 시트를 그립니다. 가로 폭은 신호 선폭의 $6 \sim 10$**배**, 세로 높이는 바닥 접지면부터 위로 기판 두께의 $5 \sim 6$**배**가 정석입니다(창이 너무 좁으면 프린징 전기장이 잘려 Z_0가 틀어지고, 공기 상자 전체를 덮을 만큼 너무 크면 도파관 고차모드가 섞입니다!).

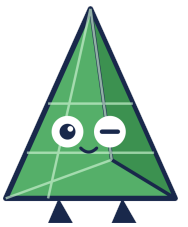
3. **적분선(Integration Line) 지정**
   포트 시트를 선택하고 **Simulation ▸ Assign ▸ Wave Port...**를 연 뒤 적분선 시작점을 **바닥 접지면 중앙**, 끝점을 **신호선 중앙**으로 찍어 수직 화살표를 세웁니다.

4. **모드 임피던스 검산**
   해석 후 **Results ▸ Port Modes**를 열어 추출된 기본 준-TEM 모드의 특성 임피던스 Z_0가 의도한 $50 \pm 1\ \Omega$ 근처인지 확인합니다.

14 CHAPTER

Solution Setup · 적응형 메시 · 고속 주파수 스윕

FEM 솔버가 스스로 오차가 큰 곳의 격자를 쪼개며 정답에 다가가는 적응형 메시(Adaptive Mesh) 원리와, 정확도 손실 제로(|ΔS| = 0)로 스윕 속도를 수 배 끌어올린 차수축소(_ProjectedROM) 엔진을 해부합니다.

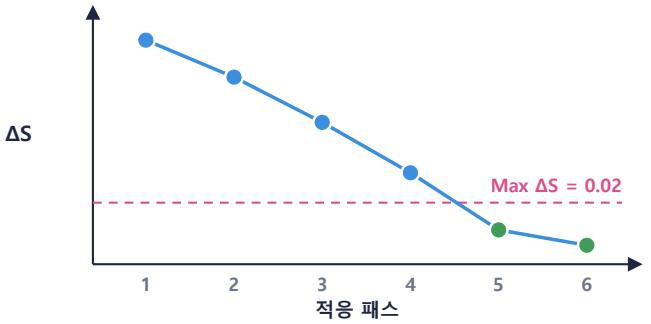


배울 것
적응형 패스와 기저 차수 (Zero·First·Mixed)

해 볼 것
고정 거친 메시의 치명적 함정(−33.7 dB 착시!)

핵심 개념
Discrete · Interpolating · Fast(_ProjectedROM) 스윕과 병렬 워커

14.1 적응형 메시(Adaptive Mesh)와 기저함수 차수



수렴 판정

ΔS가 기준 아래인 패스가
연속 2번(기본) 이어지면 종료
Zero order는 최소 3패스
고정 거친 메시는 가짜 공진 위험!

그림 14-1 적응형 메시 정밀화 루프. 전기장 에너지 오차가 집중된 모서리 사면체만 선별 분할하며 연속 2패스 동안 |ΔS| < 기준치를 만족할 때 수렴 판정합니다.

Simulation ▸ Add Solution Setup...에서 가장 먼저 챙길 값은 **Solution frequency**입니다. 기본값 10 GHz를 그대로 두고 2.45 GHz 안테나를 돌리면 격자가 필요 이상으로 촘촘해지거나 반대로 28 GHz 회로에서 너무 거칠어집니다. 반드시 **설계 중심 주파수(또는 최고 동작 주파수)**로 맞추세요.

기저 차수는 **First order**(사면체당 20 자유도, 기본 권장)와 장 에너지가 강한 도체·유전체 주변에만 고차 요소를 자동 배치하는 **Mixed** 모드를 지원합니다. 수렴 판정은 우연한 조기 종료를 막기 위해 **연속 2패스 이상** $|\Delta S|$ 허용오차(기본 0.02) 이하 진입을 요구합니다.

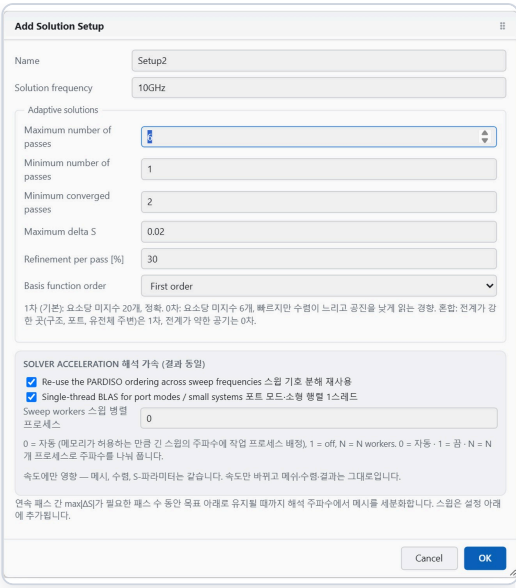


그림 14-2 Add Solution Setup 대화상자. 하단 가속 옵션(PARDISO 기호 분해 재사용 등)은 결과를 단 1비트도 바꾸지 않고 속도만 높입니다.

CREW COMIC **실화 경고 — 적응형 패스를 끄고 거친 메시 1패스만 돌렸다가 벌어진 참사!**

포티 메시야! 내가 빨리 보려고 적응 패스를 1번만 돌렸더니 5.8 GHz GaN PA 입력 정합이 무려 **S11 = −33.68 dB**나 나왔어! 대박이지?!

메시 스톱!! 그거 완전한 **거친 격자 수치 착시(coarse-mesh artifact)**야! 스텁 모서리 프린징 전기장이 뭉개져서 우연히 반사가 0처럼 보인 거라고!

위즈 맞아. 실제로 그 보드(CGH40010 v1)를 10패스 수렴 메시(26,563 사면체)로 제대로 다시 풀었더니 진짜 S11은 **−3.35 dB**(절반 이상 반사!)였어. 아래 실측 그래프를 두 눈으로 꼭 확인해 봐!

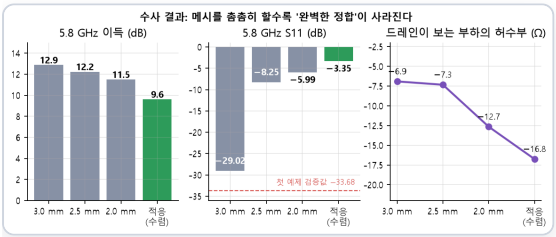


그림 14-3 거친 1패스(점선, −33.68 dB 가짜 대박!) vs 10패스 수렴 FEM(실선, −3.35 dB 진짜 현실) 비교.

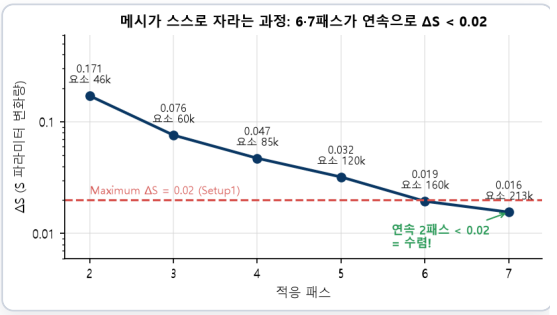


그림 14-4 패스별 사면체 수와 |ΔS| 수렴 궤적. 연속 2패스 이상 허용오차 아래로 들어와야 믿을 수 있습니다.

14.2 주파수 스윕 3총사와 `_ProjectedROM` 고속 엔진 UPGRADE

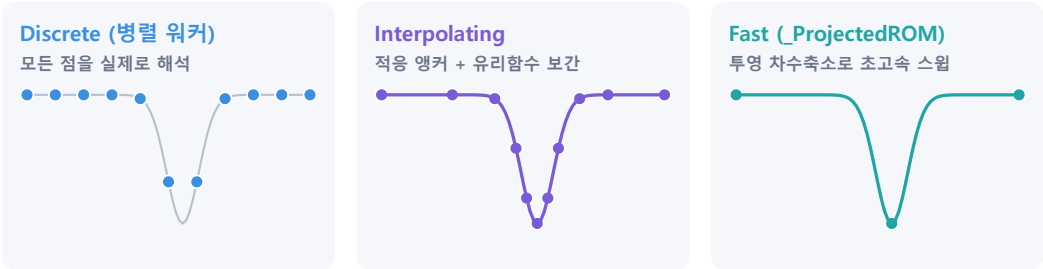


그림 14-5 주파수 스윕 3방식 비교. Fast(_ProjectedROM)와 Interpolating(AAA)은 소수의 앵커 주파수 해석만으로 수백 점의 연속 응답을 복원합니다.

- **Fast (`_ProjectedROM` 투영 차수축소)** UPGRADE — 몇 개의 앵커 주파수에서 구한 해 벡터들을 직교 기저(orthogonal subspace)로 삼아 거대 FEM 강성·질량 행렬을 수십 차원 축소 행렬로 투영합니다. 잔차가 가장 큰 주파수에 적응적으로 기저를 추가하므로 날카로운 다중 공진 필터나 광대역 스윕을 수 배 빠르게 그려 냅니다.
- **Interpolating (적응형 AAA 유리함수 보간)** — 대역 양 끝과 중점을 찔러 보며 변화가 급격한 구간에 샘플을 집중 배치해 $|\Delta S| < 10^{-3}$ 이내로 수렴시킵니다.
- **Discrete + 병렬 스윕 워커(`Sweep workers`)** — 지정한 모든 주파수 점을 독립적으로 풉니다. **Save fields**를 켜 주파수별 원거리장·열손실 분포를 저장할 때 필수이며, 멀티코어 병렬 워커로 여러 주파수 점을 동시에 계산합니다.

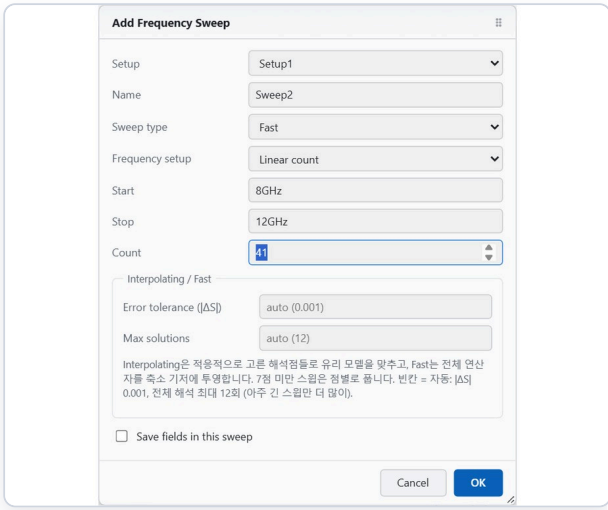


그림 14-6 Add Frequency Sweep 대화상자. 대역 대비 간격이 5 %를 넘는 거친 Discrete 스윕은 노치 누락 경고를 자동으로 띄웁니다.

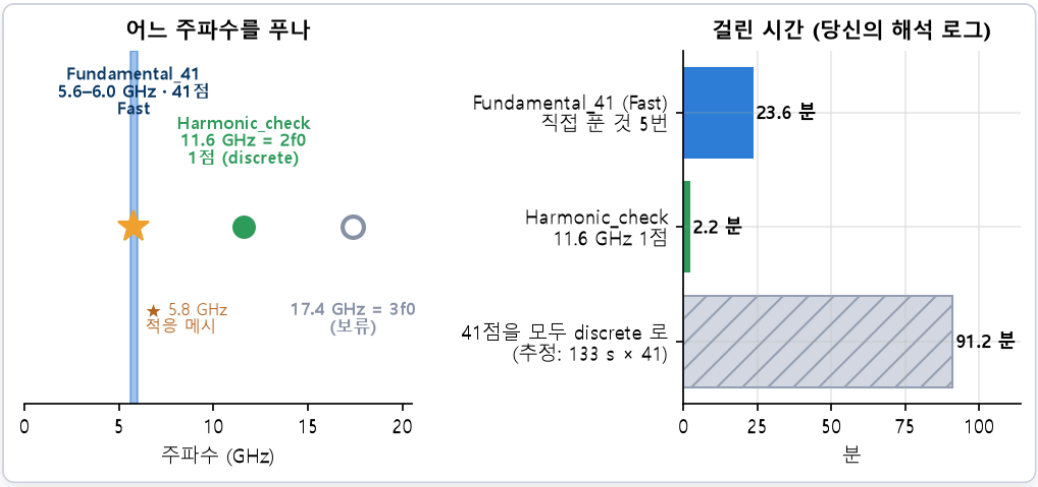


그림 14-7 실전 멀티 스윕 전략(CGH40010 보드): 기본파 대역 41점은 Fast(_ProjectedROM)로 단 5번 행렬 분해 만에 끝내고(좌), 2차 고조파(11.6 GHz)는 1점짜리 Discrete 스윕으로 정확히 콕 집어 확인합니다(우)!

고수의 시간 절약 비법: `Fast` 대역 스윕 + `1점 Discrete` 고조파 스윕 조합!

5.8 GHz PA에서 기본파 대역(5.6~6.0 GHz, 41점)과 $2f_0$(11.6 GHz) 임피던스를 모두 보려고 5.6~12 GHz 전체를 통째로 스윕하지 마세요! 하나의 `Setup1` 아래에 ① `Fundamental_41` **(Fast 스윕 — 41점 중 단 5개 앵커만 실제 풀이!)**과 ② `Harmonic_check` **(Discrete 스윕 —** `11.6 GHz` **단일 점)** 두 개를 등록하면 단 **6번의 FEM 행렬 풀이**만으로 대역 곡선과 고조파 위상을 모두 얻습니다.

14.3 빈칸 고민 끝! 설계 목적별 `Solution Setup & Sweep` 표준 레시피

처음 셋업 창을 열었을 때 숫자를 얼마로 넣어야 할지 막막하다면 아래 검증된 실무 표준표를 그대로 따라 입력해 보세요.

설계 대상	Solution Freq	Max Passes / $\lvert\Delta S\rvert$	권장 Frequency Sweep 조합 (핵심 체크 포인트)
단일 · 배열 안테나	중심 주파수 f_0	`12` 패스 / `0.02`	대역 **Fast**(101점) + 중심점 f_0 1점 **Discrete(** `Save fields` **켬 — 3D 방사 패턴용!)**
필터 · 스텁 · 분배기	통과대역 상단 f_{high}	`14` 패스 / `0.01`	대역 **Fast (** `_ProjectedROM` **)** 201~401점 (날카로운 감쇠 극점·노치 무손실 복원)
정류기 · 고조파 Co-sim	$2f_0$ (고조파 격자 확보)	`12` 패스 / `0.015`	$0.5f_0 \sim 3.5f_0$ 광대역 **Fast** 또는 $f_0, 2f_0, 3f_0$ 3점 **Discrete** (HB 하모닉 밸런스 직결)
고출력 PA + 열해석 연동	중심 주파수 f_0	`12` 패스 / `0.015`	대역 **Fast** + 동작점 f_0 1점 **Discrete(** `Save fields` **필수 —** `RF Loss → Heat` **발열원 추출!)**

15 CHAPTER

검사 · 실행 · Eigenmode · Optuna 베이지안 최적화

F5 검사에서 F9 실행, 공동 공진기 고유모드 해석까지 마쳤다면 이제 컴퓨터에게 치수 튜닝을 맡길 차례입니다. 단 15~25번의 FEM 해석만으로 다변수 최적점을 찾아내는 Optuna 베이지안(TPE) 서로게이트 최적화를 다룹니다.



배울 것
F5 Validation · F9 백그라운드 실행 · 부분 결과 보존

해 볼 것
무가짜모드 Eigenmode 공진·Q 해석

핵심 개념
Parameter Study와 Optuna Bayesian(TPE) 목표 최적화

15.1 국부 메시 보강 · F5 검사 · F9 논블로킹 실행

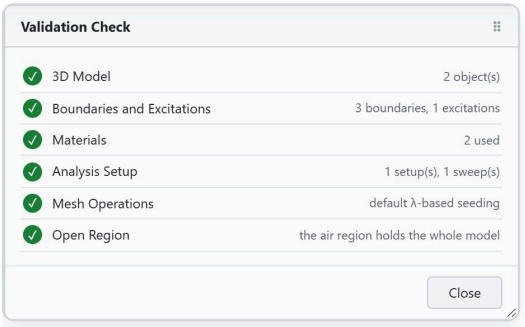


그림 15-1 Validation Check(F5). 모델·경계·재질·셋업·메시·개방영역 6개 관문이 모두 초록불이면 준비 완료!

포트 급전 틈이나 0.15 mm 결합 선로 간격처럼 장이 급변하는 곳에는 **Simulation ▸ Assign ▸ ▸ Mesh Operation...** 으로 최대 모서리 길이를 미리 지정해 초기 패스부터 정확한 장을 포착하게 돕습니다.

F9 **Analyze All**을 누르면 솔버는 UI와 분리된 **독립 저우선순위 프로세스**에서 돌며 MKL PARDISO 가속기를 구동합니다. 해석 도중 **Stop**(Shift + Esc)을 누르면 지금까지 완료된 패스와 주파수 점들이 날아가지 않고 **부분 결과(Partial Results)**로 고스란히 남아 즉시 그래프를 그려 볼 수 있습니다!

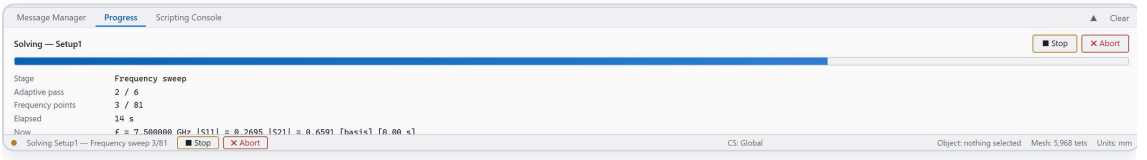


그림 15-2 실시간 Progress 도크. 단계별 경과 시간과 사면체·미지수 규모가 표시되며 열린 리포트 그래프는 점이 풀릴 때마다 살아 움직이듯 갱신됩니다.

15.2 포트 없이 공진 주파수와 Q_0를 뽑는 `Eigenmode`

유전체 공진기(DRA), 도파관 캐비티 필터, 무선전력 공동 공진기(26장)는 **Project ▸ Insert Eigenmode Design**으로 해석합니다. 회전 없는 정전 영공간(curl-free nullspace)을 수학적으로 투영 제거하여 0 Hz 부근의 가짜 수치 모드(spurious modes) 없이 순수 전자기 고유모드 $f_1, f_2, \ldots$와 벽면·유전체 손실을 반영한 무부하 Q_0를 한 번에 산출합니다.

15.3 최소 횟수 FEM으로 정답을 찍는 `Bayesian (Optuna TPE)` 최적화 NEW V2.3

변수가 3~5개인 안테나나 매칭 회로를 격자 탐색(Grid search)으로 풀려면 수백 번의 무거운 3D FEM 해석이 필요합니다. Desktop 2026 V2.3의 **Simulation ▸ Optimization...**에는 국소 탐색(Nelder-Mead, Pattern, L-BFGS-B)과 전역 진화(Differential Evolution) 외에 **Optuna 기반 베이지안 서로게이트 최적화(`Bayesian / TPE`)**가 탑재되었습니다!

- **Tree-structured Parzen Estimator (TPE) 원리** — 지금까지 수행한 소수의 FEM 결과로부터 "목표를 달성할 확률이 높은 유망 영역"의 확률 밀도 모델을 매회 갱신해 다음 시험 치수를 고릅니다. 보통 **15~30회 이내의 FEM 해석**만으로 훌륭한 최적점에 도달합니다.
- **6종 단방향 Hinge 목표 비용** — 대역 내 최대 $|S_{11}| \le -15$ dB, 최소 $|S_{21}| \ge -0.5$ dB, 공진 노치 주파수 일치, 고유모드 주파수 일치, 원거리장 피크 이득 달성 등을 조합합니다. **목표를 이미 넘긴 항목은 비용이 즉시 0이 되어** 모든 목표 달성 순간 남은 횟수를 쓰지 않고 똑똑하게 즉시 종료합니다!
- **원본 보호 & 원클릭 반영** — 모든 시도는 임시 복제본에서 돌며, 완료 후 **Apply best**를 누를 때만 내 디자인 변수에 반영됩니다(Undo 1회 복원).

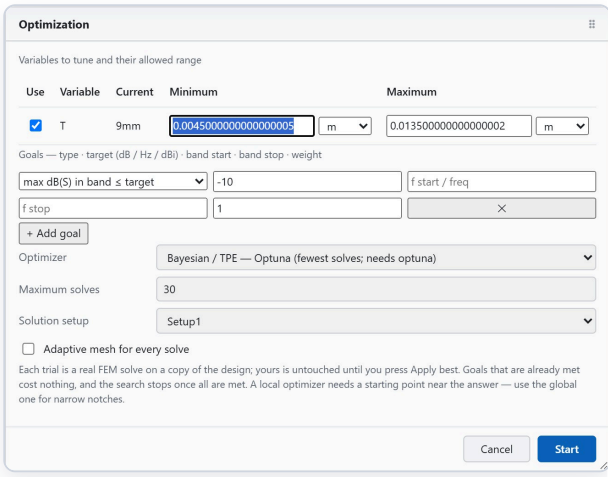


그림 15-3 Optimization 대화상자. 변수 범위와 단방향 Hinge 목표를 설정하고 Bayesian(Optuna TPE) 또는 Nelder-Mead 알고리즘으로 자동 튜닝합니다.

탐색 도구 · 알고리즘	권장 변수 수	언제 선택하면 가장 빠른가?
Solved at / Auto-tune ONLY IN AETHER	1~2개	스텁 노치나 패치 공진이 1~4 % 어긋났을 때 — **단 1~2회 FEM으로 즉시 명중!** (20·34장)
Parameter Study	1~2개 격자	변수 민감도 경향($\partial f_0/\partial L$)을 등간격 곡선 묶음으로 한눈에 파악하고 싶을 때

탐색 도구 · 알고리즘	권장 변수 수	언제 선택하면 가장 빠른가?
Nelder-Mead / Pattern	2~3개	위저드 초기치가 이미 정답 근처에 있어 매끄러운 국소 골짜기로 빠르게 내려갈 때
Bayesian (Optuna TPE) NEW V2.3	**3~6개 다변수**	비싼 3D FEM 횟수를 **15~30회 이내**로 아끼면서 다중 공진·광대역 전역 최적점을 찾을 때

HOW TO 내장 샘플(slab_matching_parametric.warp)로 Optuna 자동 최적화 5단계 완주하기

1. **파라메트릭 샘플 열기**
   File ▸ Open Examples... 에서 `slab_matching_parametric.warp` 를 엽니다 (Project ▸ Design Variables 를 열어 보면 도파관 정합 슬랩 두께 변수 `T` 가 등록되어 있습니다).
2. **최적화 창 실행**
   상단 메뉴 Simulation ▸ Optimization... 을 클릭합니다.
3. **튜닝 변수 범위 지정**
   Variables 목록에서 변수 `T` 를 체크하고 탐색 하한(`Min`)과 상한(`Max`) 범위를 지정합니다(기본값 대비 $\pm 40\,\%$ 권장).
4. **목표(Goal) & 알고리즘 설정**
   Goals에서 **+ Add Goal**을 눌러 `S(1,1) dB ≤ -25 dB` (목표 대역/주파수)를 넣고, 알고리즘을 **Bayesian (Optuna TPE)**, 최대 평가 횟수를 `20` 으로 맞춘 뒤 **Start**를 누릅니다.
5. **조기 종료 & 최적치 반영**
   실시간 비용 그래프가 `0` 에 닿으며 목표를 달성해 자동 종료되면, 우측 최적 치수를 확인하고 **Apply best**를 눌러 내 3D 모델에 확정합니다!

PART

04

시뮬레이션 결과 쉽게 읽는 법 · 출판급 리포트
그래프 한 줄에서 물리 원인과 해결책까지

시뮬레이션 버튼을 눌러 얻은 알록달록한 곡선과 무지개색 3D 그림은 "어디가 왜 고장 났고 무엇을 고쳐야 하는지" 알려 주는 정밀 진단서입니다. 4부에서는 초보자도 30초 만에 S-파라미터·스미스 차트·수렴표·3D 전자기장·방사 패턴의 의미를 꿰뚫어 보는 해석 공식부터, 더블클릭 비모달 ✎ Edit 출판급 차트 편집기, 표준기 없는 3-Line 디임베딩과 SPICE 매크로모델 추출까지 차근차근 안내합니다.



16 S-파라미터 · 스미스 차트 · 수렴표 쉽게 읽는 법과 AePlot

17 3D 전기장·자기장·표면전류와 원거리 방사 패턴 쉽게 읽는 법

18 3-Line 디임베딩 · Vector Fit SPICE · 60 fps 3D 뷰어 공유

16 CHAPTER

S-파라미터 · 스미스 차트 · 수렴표 쉽게 읽는 법과 AePlot

S11이 −10 dB라는 말은 전력이 몇 % 통과했다는 뜻일까요? 스미스 차트 위쪽과 아래쪽은 각각 어떤 부품을 달아 달라는 신호일까요? 결과를 100 % 읽어 내는 물리 암산법과 출판급 AePlot 리포트 편집법을 함께 익힙니다.



배울 것
S11·S21 dB 성적표와 3초 에너지 보존 암산법

해 볼 것
스미스 차트 4방향 나침반과 위상·군지연 해석

핵심 개념
수렴표·포트 모드 건강검진과 ✎ Edit 논문 차트 제작

16.1 S-파라미터(S_{11}, S_{21}) 30초 감각 & 데시벨(dB) 합격 성적표

고주파에서는 전압·전류 대신 **"파동이 얼마나 튕겨 나오고(S_{11}), 얼마나 건너갔는가(S_{21})"**로 성적을 매깁니다. 포트 1로 쏜 파동(a_1) 중 되돌아온 반사파 비율이 S_{11}**(반사계수)**, 포트 2로 빠져나간 전달파 비율이 S_{21}**(전달계수/삽입손실·이득)** 입니다.



포트 2를 정합 부하로 끝내고 포트 1만 여기한 상태

그림 16-1 2포트 S-파라미터의 물리적 정의. S11은 낮을수록(음수로 클수록) 반사가 적어 좋고, 수동 회로의 S21은 0 dB에 가까울수록 손실이 적어 좋습니다.

S_{11} 값 [dB]	튕겨 나온 전력 ($\lvert S_{11}\rvert^2$)	들어간 전력 ($1-\lvert S_{11}\rvert^2$)	실무 판정 기준 · 체감 의미
`-3 dB`	50.1 % 반사	49.9 % 진입	**불합격** — 쏜 전력의 절반이 도로 튕겨 나감 (VSWR 5.85)
`-6 dB`	25.1 % 반사	74.9 % 진입	초소형 웨어러블·휴대폰 내장 안테나의 타협 하한선 (VSWR 3.0)
`-10 dB` ★	**10.0 % 반사**	**90.0 % 진입**	**일반 안테나·RF 모듈 표준 합격선!** (VSWR 1.92 ≈ 2:1) — 대역폭의 기준선

S_{11} 값 [dB]	튕겨 나온 전력 ($\lvert S_{11}\rvert^2$)	들어간 전력 ($1-\lvert S_{11}\rvert^2$)	실무 판정 기준 · 체감 의미
`-15 dB`	3.2 % 반사	96.8 % 진입	**우수 정합** — 기지국 배열 안테나·LNA/PA 입출력 권장선 (VSWR 1.43)
`-20 dB`	1.0 % 반사	99.0 % 진입	**명품 정합** — 계측기·정밀 필터·교정 보드 수준 (VSWR 1.22)
`-30 dB`	0.1 % 반사	99.9 % 진입	초정밀 도파관·커플러 격리도(Isolation) 수준 (VSWR 1.07)

고수의 3초 에너지 보존 암산법: 사라진 전력은 어디로 갔을까?

수동 2포트 회로에서는 언제나 $\lvert S_{11}\rvert^2 + \lvert S_{21}\rvert^2 + P_{\text{손실+방사}} = 1\ (100\,\%)$입니다. 예를 들어 1:2 윌킨슨 전력분배기에서 $S_{11} = -25\ \text{dB}(0.3\,\%\ \text{반사})$, $S_{21} = S_{31} = -3.30\ \text{dB}$가 나왔다면 불량일까요? 아닙니다! 전력이 둘로 반반 나뉘면 무손실 이론값이 원래 $-3.01\ \text{dB}(50\,\%)$이므로 실제 기판·동박 열손실은 단 $0.29\ \text{dB}$ 뿐인 훌륭한 설계입니다. 반대로 1포트 안테나에서 $S_{11} = -25\ \text{dB}$가 나왔더라도 "전력이 99.7 % 안테나 속으로 들어갔다"는 뜻일 뿐, 그 전력이 전파로 뻗어 나갔는지 저항으로 타 버렸는지는 반드시 17장 **Realized Gain**으로 확인해야 합니다!

16.2 스미스 차트(Smith Chart) 초보 탈출 30초 나침반

직교 그래프($\lvert S_{11}\rvert$ dB)가 "정합이 안 됐다"는 결과만 알려 준다면, `Results ▸ Create Smith Chart Report`는 **"인덕터(L)를 달아야 할지 커패시터(C)를 달아야 할지"** 처방전까지 즉시 알려 주는 마법의 지도입니다!

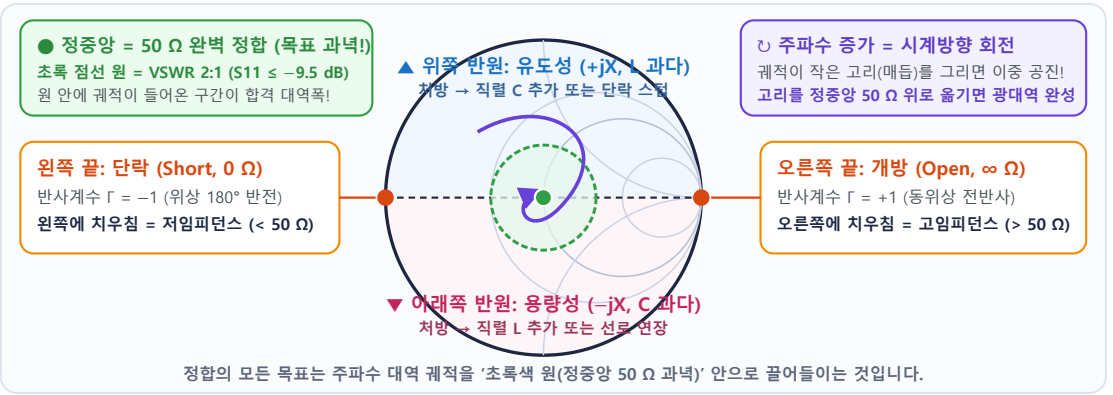


그림 16-2 스미스 차트 4방향 나침반. 정중앙 50 Ω을 과녁으로 삼고 위쪽은 유도성(+jX), 아래쪽은 용량성(−jX), 왼쪽은 단락(0 Ω), 오른쪽은 개방(∞ Ω)입니다.

PHASE ∠S21

위상(Phase) 직선성 읽는 법

신호가 선로를 통과할 때 주파수에 비례해 위상이 일정한 기울기로 내려가야 파형이 깨지지 않습니다. 두 분배 포트 간 `∠S21 - ∠S31` 차이가 $0°$(동위상) 또는 $90°/180°$(하이브리드/발룬)로 평탄한지 확인하세요.

GROUP DELAY

군지연($\tau_g = -d\phi/d\omega$) 왜곡 읽는 법

위상 기울기를 미분한 **실제 전파 도달 시간(ns)**입니다. 대역 안에서 평평할수록 광대역 변조(Wi-Fi/5G/레이더 처프) 파형이 깨끗하며, 필터 경계에서 뾰족한 뿔이 솟으면 신호 링잉(EVM 악화)이 발생합니다.

16.3 결과를 믿기 전 10초 건강검진: `Convergence` 와 `Port Modes`

예쁜 그래프가 떴다고 바로 믿으면 큰일 납니다(14장 -33.7 dB 거친 메시 착시 기억하시죠!). 단 10초면 끝나는 아래 두 가지 건강검진을 먼저 통과시키세요.

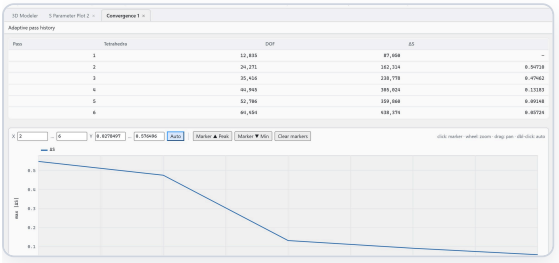


그림 16-3 건강검진 ① Convergence: 사면체 수가 늘며 max|ΔS| 곡선(파랑)이 붉은 기준선(0.02) 아래로 안정적으로 내려앉았는지 확인합니다.



그림 16-4 건강검진 ② Port Modes: 포트 특성 임피던스(Z_wave / Z_port)가 의도한 50 Ω 부근이고 원치 않는 고차모드가 없는지 확인합니다.

- **Convergence 판독 요령** — `max|ΔS|`가 마지막 2패스 연속 기준치 이하로 내려오며 평탄해지면 **수렴 합격**입니다. 만약 최대 패스(예: Pass 10)까지 갔는데도 `max|ΔS| = 0.08`처럼 높게 끝났다면 아직 격자가 부족한 상태이므로 셋업에서 `Max passes`를 `15`로 늘려 이어 풀어야 합니다.
- **Port Modes 판독 요령** — 50 Ω 마이크로스트립 Wave Port를 그렸는데 `Z_port`가 `18 Ω`이나 `110 Ω`으로 찍혔다면 선폭 계산 실수이거나 포트 창 크기가 잘못된 것입니다. 또한 `f_c [GHz]`가 동작 대역 안에 들어온 2번째 도파 모드가 보이면 공기 상자 폭을 줄이거나 비아 펜스를 촘촘히 박아 기생 박스 모드를 차단하세요.

16.4 출판급 `AePlot` 리포트 · 비모달 `✎ Edit` 편집기 · `Accumulate` 이력 비교

NEW V2.3

Desktop 2026 V2.3의 모든 2D 차트는 matplotlib 출판 스타일의 **통합 AePlot 엔진**으로 동작하며 우측 상단에 수동성(`passive`)·가역성(`reciprocal`) 자동 검증 배지를 띄웁니다. 차트를 **더블클릭**하거나 **✎ Edit plot**을 누르면 창을 닫지 않고 실시간으로 꾸미는 비모달 편집기가 열립니다.

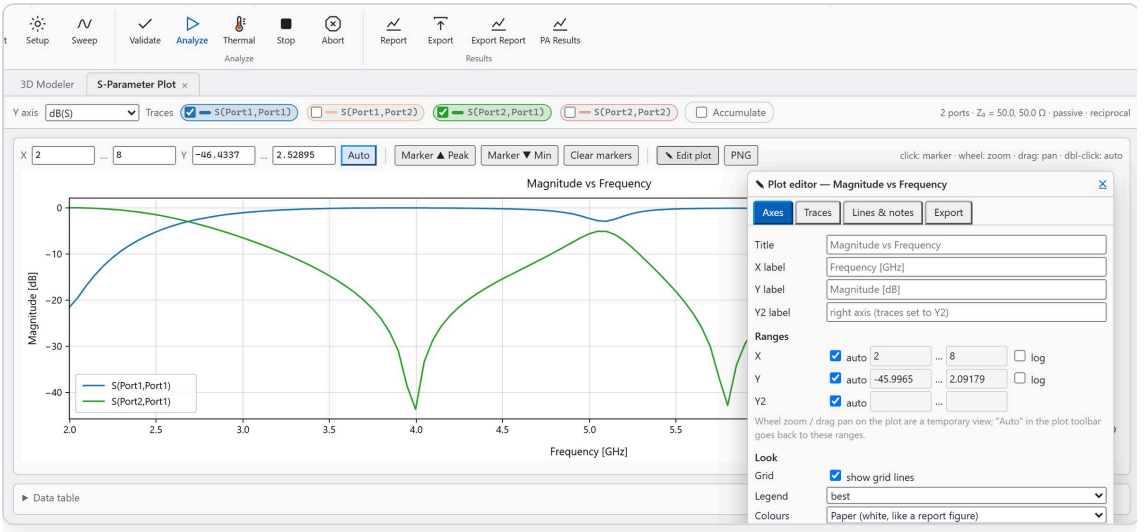


그림 16-5 래디얼 스텁 노치 필터의 S-파라미터 리포트와 비모달 Plot Editor(✎ Edit). 축 범위·우측 Y2 보조축·화살표 주석을 고치는 즉시 차트에 반영됩니다.

Results ▸ S-Parameter Metrics... 는 기준선(예: $-10\ \mathrm{dB}$) 하한·상한 주파수와 정합 대역폭(MHz, %)을 정밀 보간해 뽑아 주며, 차트 상단 **Accumulate**를 켜 두면 치수를 고쳐 재해석할 때마다 이전 곡선들이 반투명 오버레이로 차곡차곡 쌓여 튜닝 방향이 맞았는지 한눈에 비교됩니다.

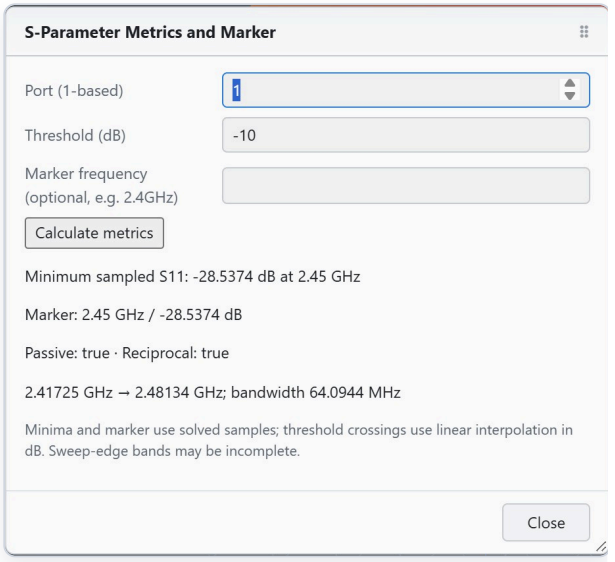


그림 16-6 S-Parameter Metrics 창. −10 dB 대역폭(64.1 MHz)과 수동성 통과 여부를 자동 계측합니다.

HOW TO 논문·보고서용 S-파라미터 차트 1분 완성 & 튜닝 전후 겹쳐 보기

1. **리포트 생성 & 이력 고정**
   리본 `Results ▸ S-Parameters` 를 눌러 그래프를 띄우고 상단 **Accumulate**에 체크합니다(이제 다음 해석부터 이전 곡선이 자동으로 남습니다!).

2. **마커 찍고 화살표 주석 승격**
   곡선 위 공진 최저점을 클릭해 마커 `m1`을 찍은 뒤, 그래프를 더블클릭(`✎ Edit`) → **Lines & Notes** 탭에서 `-10 dB` 수평 합격선을 추가하고 `m1 → note`를 눌러 화살표 주석으로 고정합니다.

3. **보조축(Y2) 동시 표시**
   이득(`S21` , 좌측 축)과 반사손실(`S11`) 또는 위상(`∠S21`)을 한 그림에 겹칠 때는 **Traces** 탭에서 해당 곡선을 `Y2 (right axis)` 로 배정합니다.

4. **고해상도 내보내기**
   Export 탭에서 학술 논문용 무손실 벡터 **SVG** 또는 발표 슬라이드용 **2× PNG**, 수치 데이터용 **CSV**로 저장합니다.

17 CHAPTER

3D 전기장·자기장·표면전류와 원거리 방사 패턴 쉽게 읽는 법



S-파라미터가 '몇 점짜리인가'를 알려 주는 성적표라면, 3D 필드와 방사 패턴은 '어느 모서리에서 왜 열이 나고 전파가 어디로 새는가'를 찍은 X-레이 사진입니다. 무지개색 물리 해독법과 3초 안테나 고장 진단법을 마스터합니다.

배울 것
전기장(E)·자기장(H)·표면전류(Js) 물리 해독과 Dead Copper 소형화

해 볼 것
Directivity → Gain → Realized Gain 3초 고장 진단 퍼널

핵심 개념
2D/3D 방사 패턴 5대 지표와 Edit Sources 무재해석 빔 조향

17.1 3D 무지개 컬러맵 물리 해독표: 어디가 빨개야 정상일까?

리본 **Results ▸ Field Overlay / Field Slice**를 켰을 때 붉은색(최대)과 파란색(최소)이 뜻하는 물리적 의미는 **어떤 물리량을 골랐느냐**에 따라 정반대입니다! 아래 표 하나면 모든 고주파 현상이 눈앞에 읽힙니다.

필드 종류	빨간색(피크)이 뜨는 위치	엔지니어가 즉시 내려야 할 실전 판단 · 처방
전기장 $\lvert\mathbf{E}\rvert$ **[V/m]**	전압이 최대인 **개방 끝단 · 패치 양 끝 · 좁은 커플링 틈새**	① **유전체 발열 주범**($p_d \propto \omega\varepsilon''\lvert\mathbf{E}\rvert^2$) ② 손가락·플라스틱 케이스가 닿으면 공진이 확 틀어지는 **디튜닝 민감 구역** ③ 고전력 코로나/아크 방전 위험점 (모서리 필렛 처방!).
자기장 $\lvert\mathbf{H}\rvert$ **· 표면전류** $\lvert\mathbf{J}_s\rvert$	전류가 몰리는 **단락 비아 · 패치 중앙 · 인셋 목 · 선로 가장자리**	① **구리 저항 발열 주범**($p_c \propto R_s\lvert\mathbf{J}_s\rvert^2$, 선폭 확대·병렬 비아 처방!) ② 붉은 전류 길을 가로질러 슬롯을 파면 경로가 우회해 **유효 길이가 길어짐 (소형화 원리!)**.
파란색 구역 (Dead Copper)	$\lvert\mathbf{E}\rvert$도 파랗고 $\lvert\mathbf{J}_s\rvert$도 파란 접지/패드 외곽 구석	전파 방사와 정합에 거의 기여하지 않는 **무풍지대!** 보드 크기를 줄여야 할 때 **가장 먼저 잘라 내거나 기구 고정용 나사 홀을 뚫어도 안전한 위치**입니다.

- `Chosen metals` **(선택 금속 전용 스케일)** — 포트 급전부의 강렬한 피크 하나 때문에 정작 보고 싶은 커플러나 스텁 전체가 시퍼렇게만 보일 때는, 보고 싶은 트레이스만 체크해 컬러맵 최대·최소 범위를 그 도체에 집중시킵니다.
- `Ex / Ey / Ez` **부호 성분 & 위상 애니메이션** — 크기($|\mathbf{E}|$)는 항상 양수라 정재파 마디만 보이지만, 성분을 `Ez`로 바꾸고 위상($0^\circ \rightarrow 360^\circ$)을 재생하면 파동이 선로를 타고 흘러가는 **진행파 여부와 반사 정재파 위치**가 영화처럼 드러납니다!

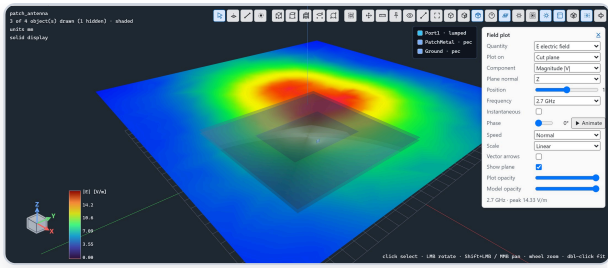


그림 17-1 패치 안테나 단면 |E| 분포. 방사 모서리 양 끝에 강한 프린징 전기장이 걸리고 패치 정중앙은 전압 마디(파란색, 단락 핀을 박아도 되는 위치!)임이 한눈에 보입니다.

HOW TO 원하는 도체 전류만 족집게 확대! 3D 필드 슬라이스 & 위상 애니메이션 4단계

1. **Save fields 확인**
   주파수 스윕 중 보고 싶은 주파수(예: 5.8 GHz)에 `Save fields`가 켜진 상태로 해석이 완료되었는지 확인합니다.
2. **표면전류 · 단면 켜기**
   리본 **Results ▸ Field Overlay**에서 물리량을 `|Js| (Surface Current)`로 고르거나, **Field Slice**로 기판 내부 `XY / XZ` 절단면의 `|E|`를 켭니다.
3. **스케일 최적화**
   미세 패턴이 잘 안 보이면 컬러바 설정을 **Log scale(dB)**로 바꾸고 `Chosen metals`에서 관심 트레이스만 선택합니다.
4. **위상 재생으로 누설 추적**
   애니메이션 **▶ Play**를 눌러 전류가 의도한 출력 포트로 흐르는지, 아니면 바이어스 선로나 접지 틈으로 새고 있는지 눈으로 확인합니다!

17.2 원거리장(Far Field) 3초 고장 진단 퍼널: 왜 안테나 이득이 낮을까?

초보자가 안테나 시뮬레이션에서 가장 많이 속는 함정이 **Directivity, Gain, Realized Gain 세 숫자를 헷갈리는 것**입니다! 안테나 이득이 기대보다 낮게 나왔을 때 아래 **3초 진단 퍼널**에 세 숫자를 대입해 보면 원인이 기판 재질 때문인지 매칭 때문인지 그 자리에서 판명됩니다.



그림 17-2 원거리장 3대 이득 지표의 물리적 관계와 3초 고장 진단법. 최종 통신 거리 계산에는 언제나 맨 오른쪽 Realized Gain을 사용해야 합니다!

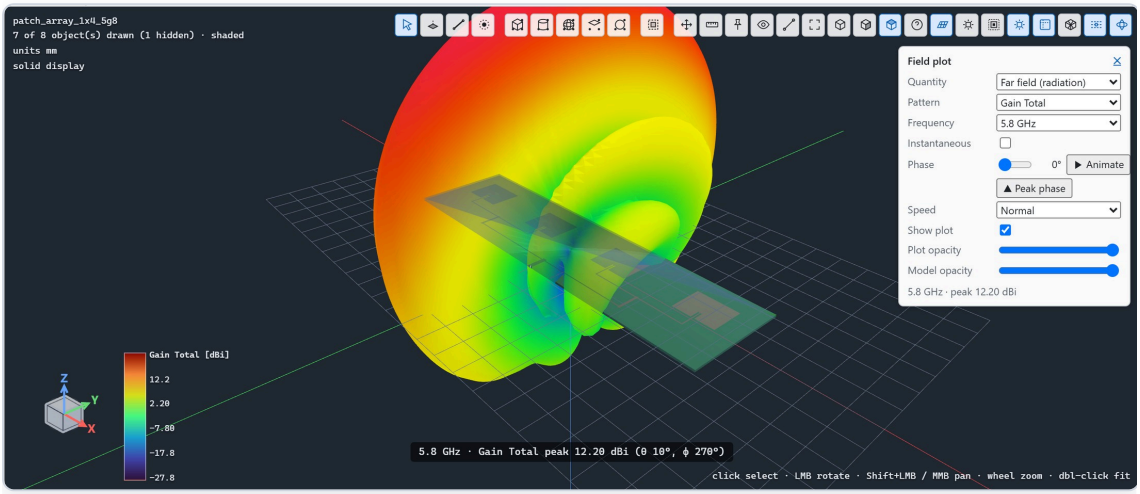


그림 17-3 5.8 GHz 1×4 배열 안테나의 3D Realized Gain 오버레이(피크 12.20 dBi). Model opacity 슬라이더로 기판을 반투명하게 비춰 빔이 어느 쪽으로 뻗는지 직관적으로 확인합니다.

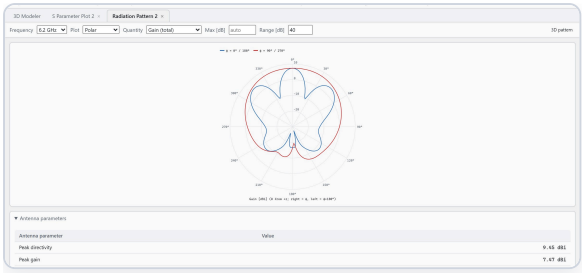


그림 17-4 2D 극좌표 E-면/H-면 단면 패턴과 하단 효율·빔폭 요약표.

2D 극좌표/직교 방사 패턴(**Results ▸ Create Far-Field Report**)과 **Antenna Summary**에서 읽어야 할 **5대 핵심 성적표**입니다.

- **Realized Gain [dBi]** — 등방성 점원(0 dBi) 대비 주빔 방향 실효 증폭 배율(다이폴 약 2.15 dBi, 단일 패치 5~7 dBi, 1×4 배열 11~13 dBi).
- **방사 효율 η_{rad} [%]** — 수용 전력 중 열로 안 타고 우주로 날아간 비율(RO4003C 패치 80~92 %, 두꺼운 FR-4 패치 40~60 %).
- **반전력 빔폭 HPBW [°]** — 피크에서 $-3\ \mathrm{dB}$ 떨어지는 양쪽 각도 폭(배열 소자를 늘릴수록 좁고 날카로워짐).
- **부엽 레벨 SLL & 전후방비 F/B** — 주빔 외에 옆으로 삐져나온 가장 큰 부엽 억제비(보통 $\leq -13\ \mathrm{dB}$ 권장)와 뒷면 누설비($\geq 15\ \mathrm{dB}$ 권장).
- **축비 Axial Ratio [dB]** — GPS·위성 원형 편파 안테나의 원형도 성적표. 주빔 방향에서 $\mathrm{AR} \leq 3\ \mathrm{dB}$이면 원형 편파 합격입니다!

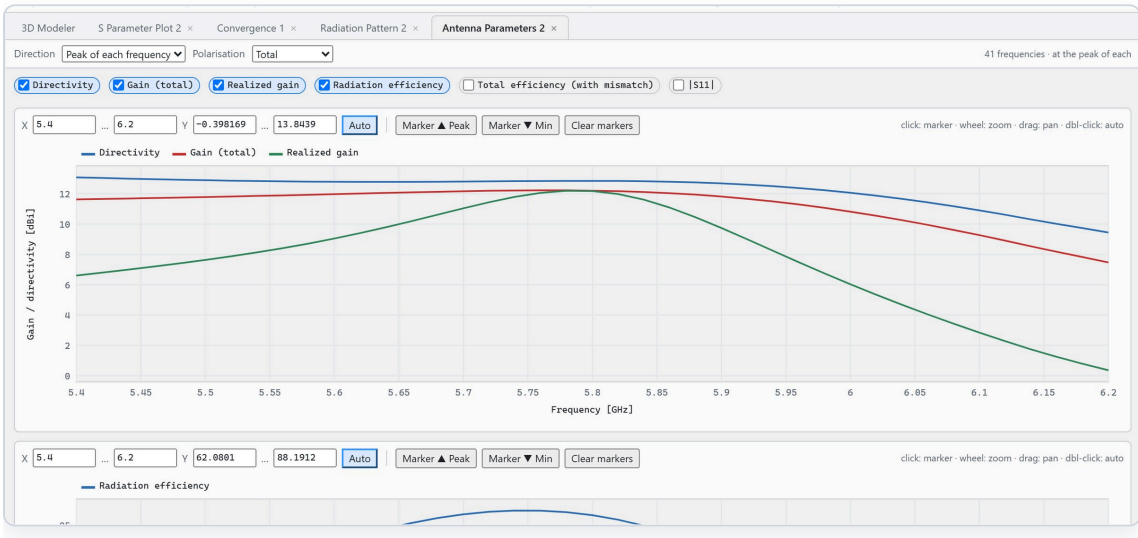


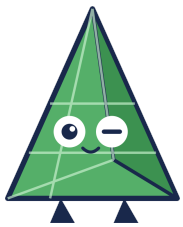
그림 17-5 주파수에 따른 Directivity(파랑), Gain(주황), Realized Gain(초록) 동시 비교. 5.78 GHz 정합점에서는 주황과 초록이 딱 붙지만, 대역 양 끝에서는 반사 손실 때문에 Realized Gain만 급락하는 원리가 선명히 보입니다!

17.3 재해석 0초! `Edit Sources` 실시간 위상 배열 빔 조향

다포트 배열 안테나는 3D FEM을 단 한 번만 풀어 두면 끝입니다. **Simulation ▸ Edit Sources…**를 열어 포트 1~4에 등간격 위상차(예: $0^\circ, -45^\circ, -90^\circ, -135^\circ$)나 테일러(Taylor) 진폭 가중치를 입력하고 **Apply**를 누르는 즉시, 전자기장 선형 중첩으로 **재해석 시간 0초 만에 3D 주빔 조향각과 부엽 억제, 능동 반사계수(Active S_{nn})**가 실시간 갱신됩니다.

18 CHAPTER

3-Line 디임베딩 · Vector Fit SPICE · 60 fps 3D 뷰어 공유



별도의 TRL 교정 키트 없이 길이만 다른 선로 세 개로 포트 런치 기생을 깔끔히 벗겨 내는 3-Line De-embedding과, 수동성(Passivity) 보정 SPICE 서브서킷 추출, 무설치 60 fps 웹 3D 필드 뷰어 공유법을 다룹니다.

배울 것
표준기 없는 3-Line 포트 디임베딩과 Consistency 판독법

해 볼 것
수동성 강제 Vector Fit / SPICE(.sp) 오차 검증

핵심 개념
독립 .html 3D 뷰어와 한/영 자동 PDF 리포트

18.1 포트 런치 기생을 도려내는 `3-Line De-embedding` NEW V2.3 ONLY IN AETHER

커넥터나 Lumped Port 급전부에는 불연속 기생 인덕턴스·커패시턴스("포트 에지 오차 박스")가 섞여 있어 순수 소자(DUT)만의 S-파라미터를 흐립니다. **Results ▸ 3-Line De-embedding...** 은 Open/Short 표준기 없이도 **동일한 포트 런치를 갖고 길이만 다른 직선 전송선 3개(L_1, L_2, L_3)**만으로 오차 박스를 수학적으로 역산해 제거합니다!

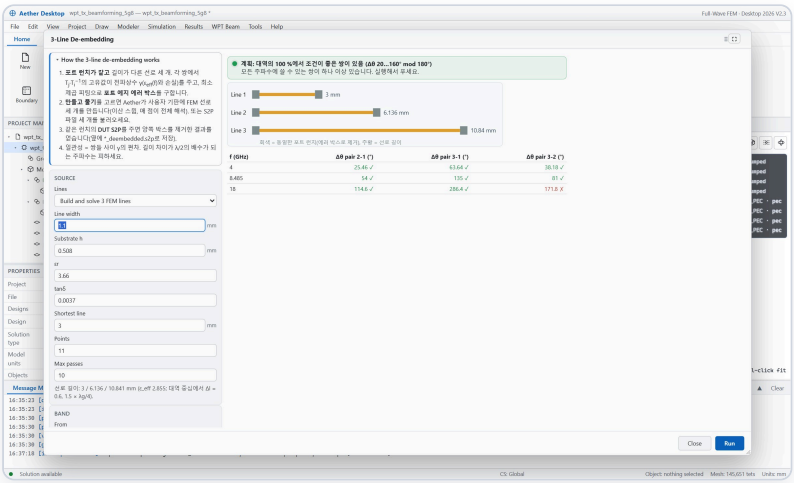


그림 18-1 3-Line De-embedding 대화상자. 기판 제원만 넣으면 반파장(λg/2) 특이점을 피하는 최적 3개 선로 길이(예: 3 / 6.167 / 10.918 mm)를 자동 산정해 백그라운드 FEM으로 오차 박스를 추출합니다.

- **핵심 수식 원리** — 캐스케이드 전달행렬 쌍 $T_j T_i^{-1}$의 고유값(eigenvalues)으로부터 포트 기생과 무관한 순수 선로 복소 전파상수 $\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$(주파수별 $\varepsilon_{\text{eff}}(f)$와 dB/mm 손실)를 뽑아내고, 최소자승법으로 좌·우 포트 에지 오차 박스(`*_errorbox.s2p`)를 구해 DUT 양단에서 벗겨 냅니다(`*_deembedded.s2p`).
- **파일 모드 & 자동 FEM 모드** — 이미 측정한 실물 보드 `.s2p` 3개를 불러와 VNA 측정 디임베딩에 쓸 수도 있고, `Build and solve 3 FEM lines`로 Aether가 3개 선로를 자동 생성·해석하게 맡길 수도 있습니다.

HOW TO **포트 기생 깨끗이 벗기기! 3-Line De-embedding 실행 & Consistency 결과 읽는 법**

1. **대역 · 기판 입력**
   Results ▸ 3-Line De-embedding... 을 열고 관심 대역(예: `1~20 GHz`)과 기판 두께·유전율·선폭을 확인하면 반파장($n\lambda_g/2$) 특이점을 피하는 황금 비율 3개 선로 길이가 자동 추천됩니다.
2. **기준선 3개 풀이**
   Build and solve 3 FEM lines(실측 파일이 있다면 `Load .s2p files`)를 실행해 전파상수 $\gamma(f)$와 포트 오차 박스를 추출합니다.
3. **Consistency 곡선 검수**
   결과 창의 `Consistency` **오차 곡선**이 대역 전체에서 낮고 매끈한지 확인합니다(만약 특정 주파수에 날카로운 스파이크가 솟았다면 길이 차 ΔL이 반파장 배수에 걸린 것이므로 추천 길이로 재산출하세요).
4. **DUT 디임베딩 저장**
   내 소자(DUT) S-파라미터를 지정하고 **De-embed DUT**를 누르면 포트 런치 기생이 완벽히 제거된 순수 `*_deembedded.s2p`를 얻습니다!

18.2 시간 영역 회로 시뮬레이터로 직행: `Vector Fit / SPICE Macromodel`

NEW V2.3

3D EM으로 구한 주파수 영역 S-파라미터를 LTspice, Spectre, ADS 과도(Transient) 해석에 넣으려면 유리함수 극점-유수(pole-residue) 등가회로로 변환해야 합니다. **Results ▸ Vector Fit / SPICE Macromodel...** 이 이 과정을 원클릭으로 처리합니다.

과도 해석 발산(에너지가 무한 증폭되는 수치 폭발)을 막기 위해 `Enforce passivity` **(수동성 강제 보정)** 옵션을 반드시 켜두세요. 피팅 완료 후 표시되는 **RMS 오차가** `1e-3` **(**-60 dB**) 이하**이고 `Passive: YES` 배지가 떴다면 원본 EM 곡선과 겹쳐 보아도 구분할 수 없는 완벽한 SPICE `.subckt` 넷리스트(`.sp`)입니다.

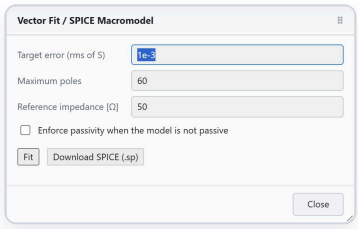


그림 18-2 Vector Fit / SPICE Macromodel 대화상자. 목표 RMS 오차(1e-3), 최대 극점 수, 수동성 강제 보정을 지원합니다.

18.3 수식 추출(`Output Variables`) · 자동 PDF 보고서 · 60 fps 독립 `.html` 뷰어

UPGRADE

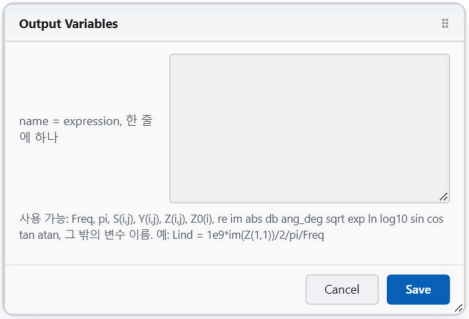


그림 18-3 Output Variables. im(Z(1,1))/(2*pi*Freq) 같은 수식으로 나선 인덕터의 유효 L과 Q 곡선을 즉시 합성합니다.

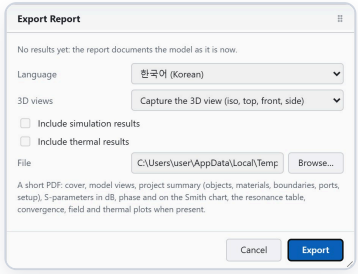


그림 18-4 한/영 자동 PDF 보고서 생성기. 4방향 3D 뷰·셋업 요약·S-파라미터·필드·열해석 결과까지 한 권으로 묶습니다.

툴이 없는 고객·동료에게 3D 필드를 보내는 최고의 방법: 독립 `.html` 3D 뷰어

File ▸ Export ▸ ▸ Report (.html) / 3D Viewer 로 내보낸 단일 HTML 파일에는 LP 양자화 압축된 복소 전기장·자기장·표면전류·3D 방사 패턴과 Three.js WebGL 엔진이 통째로 들어 있습니다. 받는 사람은 Aether EM이나 인터넷 연결 없이 크롬·엣지 브라우저로 파일을 더블클릭하기만 하면 **60 fps로 도면을 돌리고 임의 절단면(Cut Plane)을 슬라이스하며 RF 위상 애니메이션과 포트 빔 조향**까지 직접 조작해 볼 수 있습니다!

PART

05

위저드 & 자동 설계 대백과 사양 입력에서 안테나·PA·회로·WPT 완성까지

손계산과 시행착오로 일주일씩 걸리던 마이크로스트립 정합, 22종 배열 안테나와 메타표면, 4단계 GaN 전력증폭기(PA) 체인, 자유 배선 회로도 Co-sim, 근거리 초점 무선전력(WPT)과 공동 공진기까지 — 위저드 마법사 위즈(Wiz)와 함께 공식 합성(≈)으로 1초 만에 출발해 3D Full-Wave FEM으로 완벽히 마감하는 실전 자동 설계의 정수를 파헤칩니다.



19 위저드 생태계 지도 · 공통 UX · 전송선로 위저드

20 안테나 2단계 정복: Antenna Wizard · 메타표면 · Antenna Designer

21 무직각 자동 배선 (Smart Connect)과 배열 급전망 (Auto Feed)

22 수동 회로 합성 3총사: 임피던스 정합 · 필터 · 분배/결합기

23 전력증폭기(PA) 4단계 완전 정복 ①: PA Wizard & Bias Designer

24 전력증폭기(PA) 4단계 완전 정복 ②: Class-F Auto-Stub & 실시간 PA Tuner

25 비선형 & 자유 배선 회로도 Co-sim (SPICE + EM + 역반영)

26 무선전력전송 · 빔포밍 · 공동 공진 워크벤치 (WPT Beam)

19 CHAPTER

위저드 생태계 지도 · 공통 UX · 전송선로 위저드



Aether EM의 위저드는 단순한 '계산기'가 아닙니다. 프로젝트 기판을 스스로 읽고, 3색 신호등으로 물리적 한계와 공정 공차를 진단하며, 3D 도면 생성과 백그라운드 FEM 튜닝까지 한 호흡으로 이어 주는 지능형 설계 파트너입니다.

배울 것
전체 위저드 생태계 지도와 4단계 페루프 철학

해 볼 것
기판 자동 인식 · 3색 신호등 · 정직한 ≈ 추정 표기

핵심 개념
Transmission Line Wizard와 벤치 동박 테이프 역산 레시피



그림 19-1 위저드 실험실 디오라마. 사양 몇 줄에서 전송선·패치 배열·필터·전력증폭기·무선전력 빔이 3D 기판 위로 솟아오르고, 마지막은 항상 수렴 3D FEM이 검증합니다.

19.1 한눈에 보는 Desktop 2026 V2.3 위저드 생태계 지도

수동 소자 하나부터 다단 전력증폭기와 무선전력 시스템까지, 내 설계 과제에 딱 맞는 도구를 아래 지도에서 골라 바로 진입하세요. 모든 위저드는 서로 데이터를 주고받도록 연결되어 있습니다.

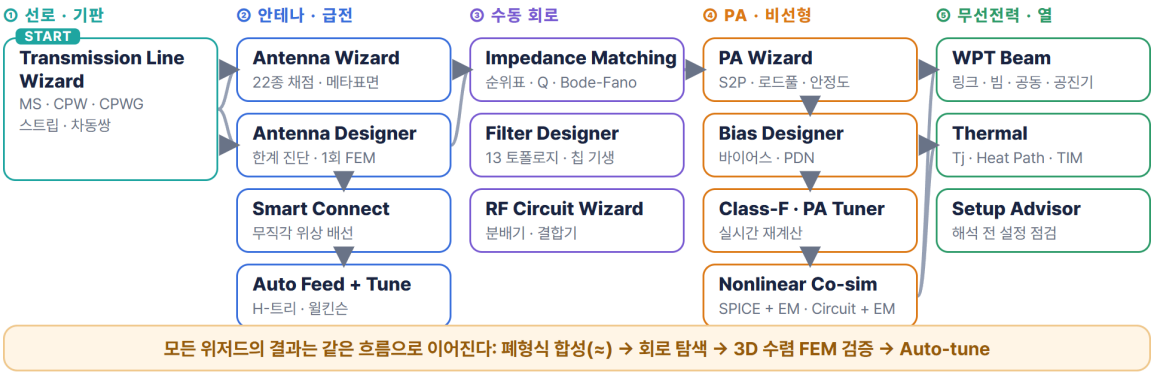


그림 19-2 Aether EM 자동 설계 위저드 전체 지도. 단일 소자 합성에서 배열 급전, 4단계 PA 파이프라인, 회로도 Co-sim, WPT 워크벤치까지 유기적으로 이어집니다.

19.2 모든 위저드가 공유하는 5대 황금 UX와 엔지니어링 정직성



그림 19-3 위저드 공통 4단계 페루프: ① 폐형식 초고속 합성(≈) → ② 회로·공차 탐색 → ③ 3D 수렴 FEM 검증 → ④ 공간매핑/되먹임 자동 치수 보정.

1 · AUTO BOARD

프로젝트 기판 자동 인식

창을 여는 순간 현재 디자인의 `Substrate` 유전체를 찾아 재질·두께 $h{\cdot}\varepsilon_r{\cdot}\tan\delta$를 자동으로 채우고 `✓ Board from the project` 배지를 띄웁니다.

2 · MODELESS & FORMULA

모달리스 3D 뷰 & 수식 입력

위저드 창을 띄운 채 뒤쪽 3D 뷰포트를 자유롭게 돌려 보며, 모든 칸에 `2*Wf`, `0.5mm+h` 같은 수식·단위를 입력합니다(`Enter` 재계산, `Esc` 닫기).

3 · TRAFFIC LIGHT

3색 신호등과 한 줄 처방전

초록은 공차 여유까지 통과, **주황**은 공칭만 통과(저-Q 다단 전환 등 처방 제시), **빨강**은 Chu/Bode-Fano 물리 한계 위반이나 에칭 불가(<0.1 mm) 경고입니다.

4 · HONEST ≈ BADGE

추정(≈)과 FEM 실해석의 엄격 구분

3D FEM을 돌리기 전 모든 숫자는 준정적 공식 추정치임을 ≈ **기호**로 정직하게 밝히며, 백그라운드 해석 중에는 하단에 ΔS **수렴 미니 스파크라인**을 실시간 표시합니다.

19.3 모든 RF 설계의 주춧돌: `Transmission Line Wizard` NEW V2.3

Draw ▸ Transmission Line Wizard... (리본 **Home / Draw**)는 마이크로스트립, CPW, 접지 코플래너(CPWG), 스트립라인, 차동 결합 마이크로스트립(Differential pair) **5종 전송선**의 주파수 분산과 손실, 고차 모드 한계를 정밀 합성합니다.

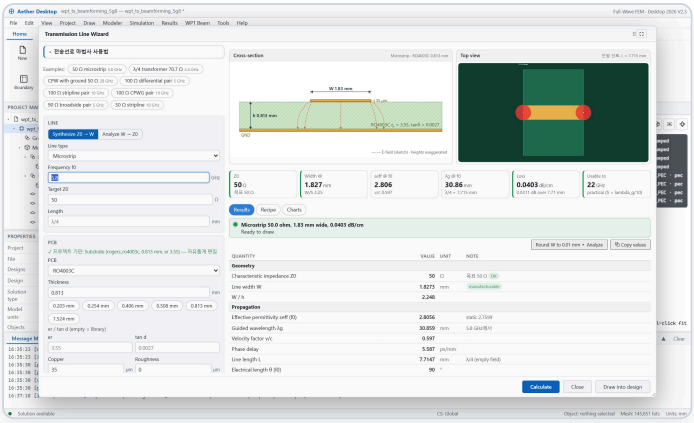


그림 19-4 Transmission Line Wizard. 프로젝트의 RO4003C 0.813 mm 기판을 자동 인식해 5.8 GHz 50 Ω 선폭(1.83 mm)과 포트·셋업 포함 3D 생성을 즉시 준비합니다.

왜 고조파 길이를 그냥 나누기 2, 나누기 3 하면 틀릴까?

마이크로스트립은 주파수가 올라갈수록 전자기장이 기판 속으로 더 빨려 들어가 유효 유전율 $\varepsilon_{\mathrm{eff}}(f)$가 커지는 **주파수 분산 (Kirschning–Jansen / Frankel 모델)**을 겪습니다. 따라서 $3f_0$ (17.4 GHz)에서의 $\lambda_g/4$ 길이는 f_0 파장의 단순 $1/12$보다 유의미하게 짧습니다!

위저드의 `Result` **탭**은 각 고조파($f_0, 2f_0, 3f_0$)마다 해당 주파수의 분산 $\varepsilon_{\mathrm{eff}}(nf_0)$로 계산한 정확한 물리 길이표와 함께, $\mathrm{TE}_1/\mathrm{TM}_1$ 표면파와 횡공진이 시작되는 **안전 상한 주파수** $f_{\max}$를 짚어 줍니다.

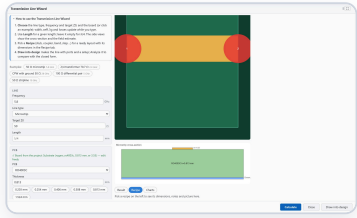


그림 19-5 실무자에게 가장 사랑받는 Recipe 탭. 스텁·테이퍼·비아 펜스 치수는 물론, 벤치 테스트에서 붙인 동박 테이프 역산까지 지원합니다!



위즈의 자동설계 레시피

ONLY IN AETHER 실험실에서 VNA를 보며 칼로 깎은 **구리 테이프(Copper tape)** 조각을 스텁 끝에 붙여 공진을 맞춘 경험 있으시죠? 다른 어떤 상용 EM 툴에도 없는 `Recipe` 탭의 **Back-annotate measured tape**에 붙인 테이프 가로×세로 mm를 입력해 보세요! 공진 이동률(%)과 다음 거버 리비전에 반영할 동박 연장 치수를 즉시 역산해 줍니다.

HOW TO 30초 만에 포트·셋업 완비 50 Ω 표준 선로 3D 생성 & 분산 결과 읽기

1. **위저드 실행 & 기판 확인**

   Draw ▸ Transmission Line Wizard... 를 열고 상단에 `✓ Board from the project` 배지(또는 원하는 기판 프리셋)가 선택되었는지 확인합니다.

2. **선로 종류 · 목표치 입력**

   `Microstrip` 또는 `CPWG` 를 고르고 `Frequency = 5.8 GHz`, `Target Z0 = 50 ohm`, `Electrical length = 90 deg` 를 입력합니다.

3. **분산 · 모드 천장($f_{\max}$) 판독**

   Result 탭에서 산출된 물리 선폭 W, 단위 길이당 손실(dB/mm), 그리고 고차 표면파가 켜지는 **안전 상한** $f_{\max}$가 내 최고 동작 주파수보다 넉넉히 높은지 확인합니다(낮다면 더 얇은 기판으로 교체!).

4. **원클릭 3D 조립**

   하단 **Build in 3D**를 누르면 기판·접지·동박·입출력 포트·해석 셋업이 한 번에 생성되어 바로 `F9` 검증으로 넘어갑니다.

20 CHAPTER

안테나 2단계 정복: Antenna Wizard · 메타표면 · Antenna Designer



시스템 관점에서 22개 안테나 패밀리의 파레토 전선과 메타표면·FPRA를 탐색하는 Antenna Wizard, 그리고 단일 안테나의 Chu 물리 한계부터 30 % 면적 소형화·자동 FEM 튜닝까지 끝내는 Antenna Designer의 환상 호흡을 배웁니다.

배울 것
아키텍처 선정(Antenna Wizard) vs 정밀 합성(Antenna Designer)

해 볼 것
메타표면(Reflectarray) 위상 빌더와 FPRA 공진기

핵심 개념
Chu–McLean 물리 한계 · 소형화 트레이드오프 · 1회 FEM 자동 튜닝

20.1 두 개의 안테나 마법사, 언제 무엇을 열까?



그림 20-1 Aether EM의 안테나 설계 이원화 전략. 시스템 탐색·배열·메타표면은 Antenna Wizard에서, 단일 방사체 한계 검증·소형화·FEM 자동 보정은 Antenna Designer에서 수행합니다.

20.2 22종 후보 채점과 파레토 전선: `Antenna Wizard` + 메타표면/FPRA NEW V2.3

ONLY IN AETHER

Draw ▸ Antenna Wizard...에 목표 주파수, 대역폭(%), 필요 이득(dBi), 허용 크기와 주변 환경(자유공간, 레이돔 두께·ε_r, 금속판 이격, 인체 근접 디튜닝)을 넣으면 **22개 전 패밀리(22/22 3D 생성 완비!)**의 단일·배열 구성을 전수 평가해 파레토 순위를 매깁니다. 특히 배열 후보를 고르면 위상 불평형 $< 0.5^\circ$ 이내의 **동축 프로브 기업형 급전망 (Corporate Probe-Fed Array)**까지 후면 기판에 자동 배선하며, 생성 직후 백그라운드 FEM이 공진 스케일 인자(`k_len`)와 급전 위치 인자(`k_feed`)를 스스로 보정합니다!

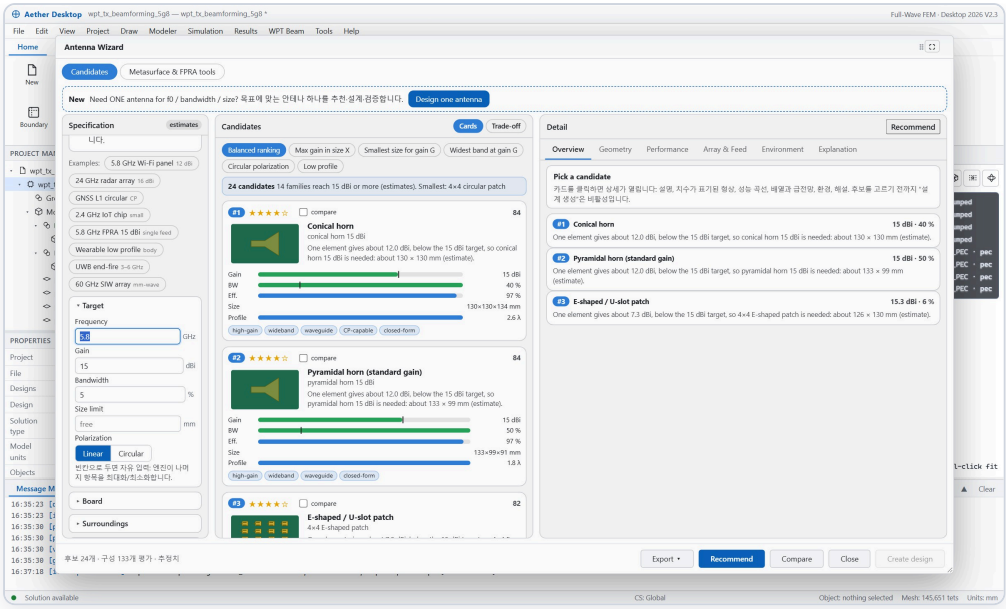


그림 20-2 Antenna Wizard 3단 화면. 5.8 GHz 15 dBi 목표에 대해 단일 패치로는 불가능함을 밝히고 4×4 E-슬롯 패치·유전체 공진기(DRA)·적층 패치 배열을 자동 구성해 비교합니다.

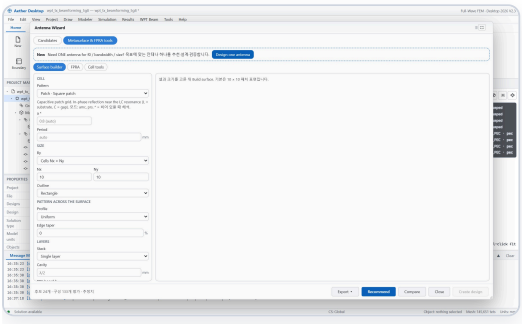


그림 20-3 Antenna Wizard 상단의 Metasurface & FPRA tools 모드. 반사배열/투과배열 위상 배치표와 Fabry-Perot 공진기(PRS) 높이를 자동 합성합니다.

반사배열 · 메타렌즈 & FPRA 설계기(`Metasurface & FPRA tools`)

단일 급전 혼이나 패치 하나로 15~25 dBi 고이득을 내고 싶다면 상단 토글에서 **Metasurface & FPRA tools**를 누르세요(일반 CAD 면 편집 `Faces`와 다른 전자기 개구면 합성기입니다!).

- **Surface builder** — 급전 위치 (x_f, y_f, z_f)와 조향각 (θ_0, ϕ_0)에 맞춰 각 격자 셀이 만들어야 할 보정 위상 $\phi_{\text{req}}(x_i, y_j)$를 계산하고, 단위셀 룩업 테이블로 전체 3D 반사배열/메타표면을 자동 배치하며 양자화 손실(dB)을 사전 리포트합니다.
- **FPRA (Fabry–Perot 공진기 안테나)** — 부분반사표면(PRS) 반사계수 $|R|, \angle R$로부터 공진 캐비티 높이 $h \approx \frac{\lambda_0}{4\pi}(\angle R + \angle R_{\text{GND}} + 2\pi N)$와 지향성 이득 향상 $\Delta D \approx \frac{1+|R|}{1-|R|}$를 구하고 3D 구조를 즉시 생성합니다.

20.3 단일 안테나 정밀 합성과 물리 한계 진단: `Antenna Designer` NEW V2.3

목표에 맞는 단일 안테나 하나를 끝까지 완성할 때는 **Draw ▸ Antenna Designer...** (또는 Antenna Wizard 상단 파란 배너 버튼)를 엽니다. 16개 안테나 형식에 대해 **추천 → 설계 → Chu 물리 한계 → 소형화 → 정합 → FEM 검증·**

자동 튜닝의 6단계 탭을 순서대로 밟아 나갑니다.

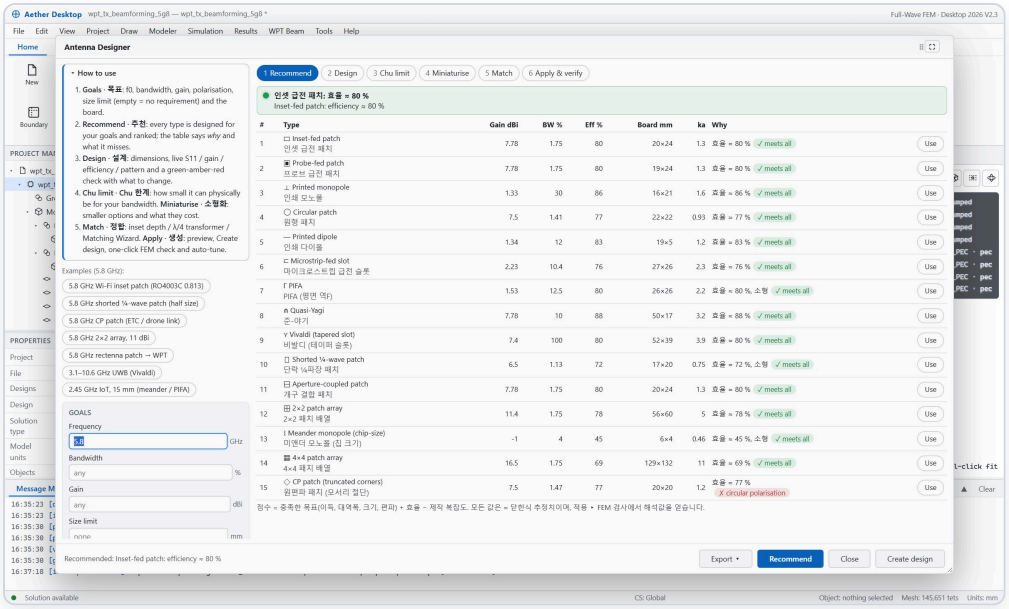


그림 20-4 Antenna Designer 1단계 추천 탭. 16개 안테나 형식을 모두 실제 치수로 합성해 이득·대역폭·효율·외접구 크기(ka)와 충족 사유를 한눈에 비교합니다.

핵심 물리 ① — 왜 작은 안테나는 광대역과 고효율을 동시에 못 가질까? (`3 Chu limit`)

크기 10 mm 안에 광대역 고이득 안테나를 넣어 달라는 무리한 기구 요구를 받았을 때, 말 대신 물리 법칙으로 설득해 주는 탭입니다! 반지름 a인 구 안에 들어가는 모든 선편파 안테나의 최소 방사 품질계수 Q_{Chu}와 최대 2:1 VSWR 대역폭은 Chu(1948)–McLean(1996) 정리로 결정됩니다.

$$Q_{\text{Chu}} = \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka}, \qquad \text{BW}_{\text{max,2:1}} = \frac{1}{\sqrt{2}\,\eta_{\text{rad}}\,Q_{\text{Chu}}} \qquad \left(k = \frac{2\pi}{\lambda_0}\right)$$



웨이비의 전자기 원리 노트

여기서 `Antenna Designer` 만의 결정적 디테일! 패치 안테나는 접지면이 거울 영상(image) 역할을 하므로 외접구 반지름 a를 **방사 패치 크기**로 잡지만, **모노폴 · PIFA · 미앤더 안테나는 접지면에 흐르는 전류 자체가 주 방사원**이므로 반드시 **보드 전체 대각선**을 $2a$로 잡아야 맞습니다! 불가능한 사양을 넣으면 필요한 최소 외접구 지름 $2a_{\min}$을 이분법으로 정확히 역산해 줍니다.

핵심 물리 ② — 면적을 30 %로 줄이면 무엇을 잃을까? (`4 Miniaturise` & `6 Auto-tune`)

5.8 GHz RO4003C($h = 0.813$ mm) 인셋 패치를 기준으로 `4 Miniaturise` 탭이 비교해 주는 소형화 기법별 실전 성적표와 `6 Apply & verify` 탭의 **3D FEM 자동 튜닝** 검증 결과입니다.

5.8 GHz 안테나 변형	상대 면적	2:1 대역폭	예측 이득 / 효율	초기 FEM 공진 → Auto-tune 후 결과
기본 반파장 인셋 패치 ($\varepsilon_r = 3.55$)	100 % (13.5×17.1 mm)	1.75 %	7.8 dBi / 80 %	5.905 GHz (+1.8 %) → **1회 튜닝 후 5.804 GHz,** $S_{11} = -23.8$ dB
고유전율 기판 교체 ($\varepsilon_r = 6.15$ / 10.2)	69 % / 51 %	1.25 % / 0.89 %	6.8 / 5.3 dBi	유전율 증가로 표면파 손실 증가·대역폭 축소 트레이드오프
단락 $\lambda/4$ 패치 (비아 벽 단락)	보드 70 % (**패치 30 %**)	1.13 % (FEM 0.53 %)	6.5 dBi / 72 %	5.367 GHz (비아 L 하향) → **2회 튜닝 후 5.799 GHz,** $S_{11} = -27.3$ dB
칩 크기 미앤더 모노폴	**5 %** (6×4 mm)	4.0 %	−1.0 dBi / 45 %	초소형 IoT용, 옴 손실 증가 및 접지면 크기에 패턴 의존

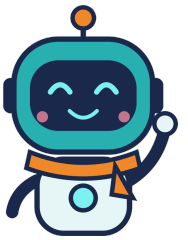
또한 `5 Match` 탭에서는 교과서 인셋 깊이 공식($\cos^2$) 옆에 노치 교란을 보정한 실전 EM 경험식($\cos^4$)을 나란히 보여주며, 완성된 안테나 제원을 **Send to WPT RX** 버튼 하나로 26장 무선전력 수신기에 즉시 넘길 수 있습니다.

HOW TO 초보자도 실패 없는 안테나 완성 공식: Antenna Designer 1→6탭 따라하기

1. **1 Recommend · 후보 선정**
   목표 주파수·대역폭·이득·최대 허용 크기를 입력하고 16종 후보 표에서 **초록 신호등**이 켜진 최상위 안테나를 클릭합니다.
2. **2 Design · 3 Chu limit 검증**
   자동 계산된 초기 치수를 확인하고, **3 Chu limit** 탭에서 내 안테나 점이 물리 한계 곡선 아래(실현 가능 구역)에 있는지 체크합니다.
3. **4 Miniaturise · 5 Match 설정**
   보드 면적이 부족하면 **4 Miniaturise**에서 $\lambda/4$ 단락 비아 벽이나 고유전율 대안을 고르고, **5 Match**에서 실전 $\cos^4$ 인셋 급전(또는 $\lambda/4$ 변환선)을 선택합니다.
4. **6 Apply & verify · 자동 FEM 명중!**
   Build 3D + Auto-tune (FEM) 버튼을 누르고 잠시 기다리면 백그라운드 3D FEM이 프린징 오차까지 스스로 보정해 목표 주파수 정중앙에 $S_{11} \leq -20$ dB로 꽂아 놓습니다!

21 CHAPTER

무직각 자동 배선 (Smart Connect)과 배열 급전망 (Auto Feed)



직각 꺾임 반사 없이 원하는 전기적 위상 길이로 두 선로를 이어 주는 Smart Connect, 그리고 입력 1개와 출력 N개만 찍으면 위상·진폭이 칼같이 맞는 윌킨슨 급전 트리를 자동 합성·FEM 보정하는 Auto Feed Network를 다룹니다.

배울 것
Dubins 최단·위상 매칭 Smart Connect와 Klopfenstein 테이퍼

해 볼 것
공통 1 + 출력 N 선택으로 끝나는 Auto Feed Network

핵심 개념
FEM 위상 오차 11.7° → 1.45°로 줄이는 Feed Tune

21.1 직각 없는 매끄러운 위상 배선: `Smart Connect`

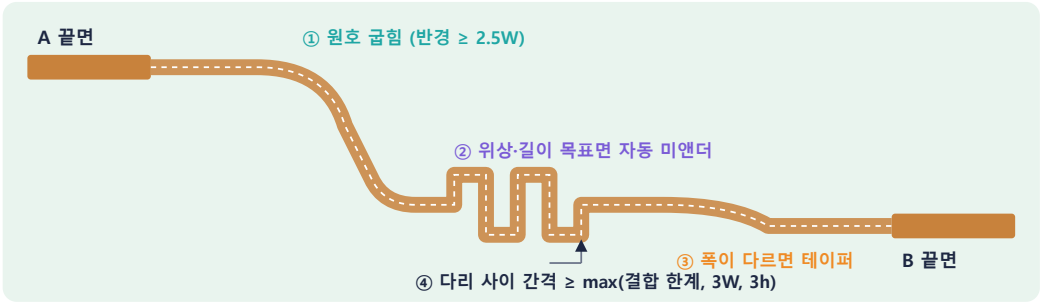


그림 21-1 Smart Connect의 4대 자동 합성 요소: 원호/마이터 굽힘, 목표 위상 미앤더, 결합 억제 간격, 임피던스 테이퍼.

면 선택(`F`) 또는 모서리 선택(`E`) 모드에서 연결할 두 선로 끝을 `Ctrl`+클릭하고 **Modeler ▸ Smart Connect ▸ ▸ Smart Connect…** 를 누릅니다.

- **Auto(최단 Dubins 경로) · Phase(목표 위상 θ) · Length(물리 길이)** — 목표 위상보다 직선 거리가 짧으면 결합 한계(기본 -25 dB, Garg–Bahl 결합선 모델)를 지키는 안전 간격으로 자동 미앤더를 접어 넣습니다.
- **서로 다른 선폭 자동 변환** — 양 끝 임피던스가 다르면 등리플 최단 길이 **Klopfenstein 테이퍼**나 다단 이항 변환기를 자동 삽입합니다.
- `Smart Connect Tune…` — 굽힘과 인접 다리 결합으로 인한 미세 위상 오차를 실제 FEM S_{21} 위상으로 측정해 1~3회 안에 정확히 보정합니다.

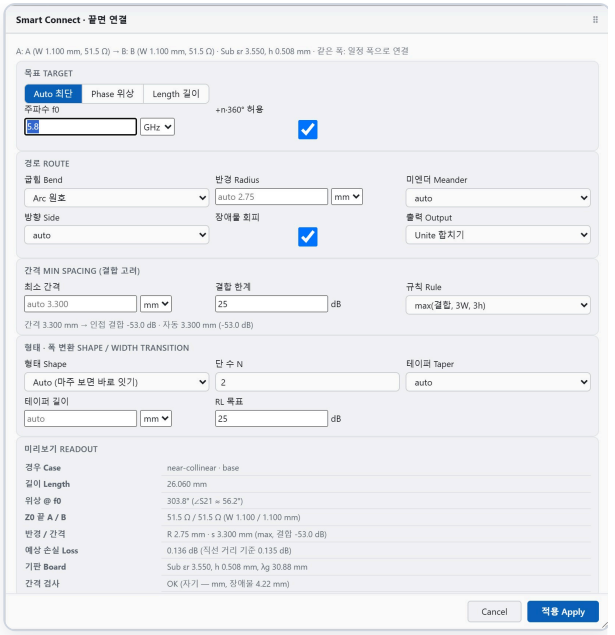


그림 21-2 Smart Connect 실시간 미리보기. 총 길이 26.06 mm, 위상 303.8°, 최소 결합 간격 3.3 mm(−53 dB)를 그리기 전에 계산합니다.

21.2 배열 급전 트리의 완전 자동화: `Auto Feed Network` & `Feed Tune`

4소자, 8소자 배열 패치에 균등 급전이나 저부엽 Taylor / Chebyshev 테이퍼, 빔 조향 진행 위상($0°, 90°, 180°, 270°$)을 먹이는 기업형(corporate) 분배망을 손으로 그리려면 이틀이 걸립니다. 이제 **첫 번째로 공통 입력 끝면을 클릭하고, 이어서 출력 끝면들을 순서대로** `Ctrl`**+클릭**한 뒤 리본 **Draw ▸ Auto Feed Network** 를 누르세요!

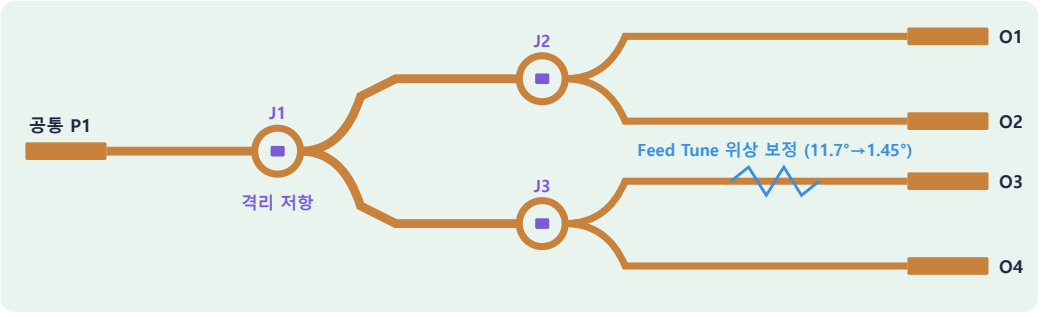


그림 21-3 1→4 급전 트리 자동 합성 구조. 공간 여유에 따라 Wilkinson(격리 저항 RLC 포함) 또는 λ/4 T-분기를 배치하고 위상 보정 미앤더를 삽입합니다.

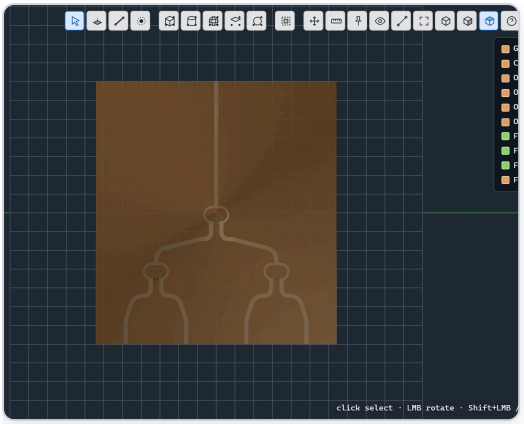


그림 21-4 5.8 GHz 1→4 Wilkinson 급전 트리 합성 결과와 미세 슬리버 자동 치유(heal_rings) 형상.

T-접합 위상 틀어짐을 단 1회에 잡는 `Feed Tune`

회로 공식으로 그린 5.8 GHz $0/90/180/270^\circ$ 진행위상 1:4 Wilkinson 트리를 처음 3D FEM으로 검증(`Verify`)하면, 분기 비대칭과 미앤더 결합 때문에 출력 간 최대 위상 오차가 11.7°까지 벌어집니다.

이때 리본 **Feed Tune**(**Auto Feed Network ▸ Verify / Tune...**)을 눌러 보정 루프를 단 **1회** 돌리면, FEM에서 측정한 위상·진폭 잔차를 각 출력 보정선 길이와 분배비로 역주입해 재합성함으로써 **최대 위상 오차** 1.45°**, 진폭 오차** 0.05 dB**, 포트 격리** 19.1 dB라는 양산급 성능으로 단숨에 수렴합니다!

22 CHAPTER

수동 회로 합성 3총사: 임피던스 정합 · 필터 · 분배/결합기



부품 ±5 % 공차까지 버티는 정합망을 듀얼 스미스 차트에서 고르고, 칩 기생 성분을 미리 역보상한 필터를 그리며, 500 W 대전력 결합기의 온도 상승과 고장 시 격리 저항 소손까지 진단합니다.

배울 것
듀얼 스미스·정류 다이오드·페라이트 TLT 정합 위저드

해 볼 것
칩 기생 선보상(Compensate) Filter Designer

핵심 개념
대전력 스트레스 진단 RF Circuit Wizard

22.1 공차와 기생까지 책임지는 `Impedance Matching Wizard` NEW V2.3

Draw ▸ Impedance Matching Wizard... 를 열면 빈 칸 대신 **50 Ω** → $10 + j20\ \Omega$ **@ 5.8 GHz** 실전 예제가 즉시 합성되어 좌·우 듀얼 스미스 차트와 후보 순위표가 나타납니다.

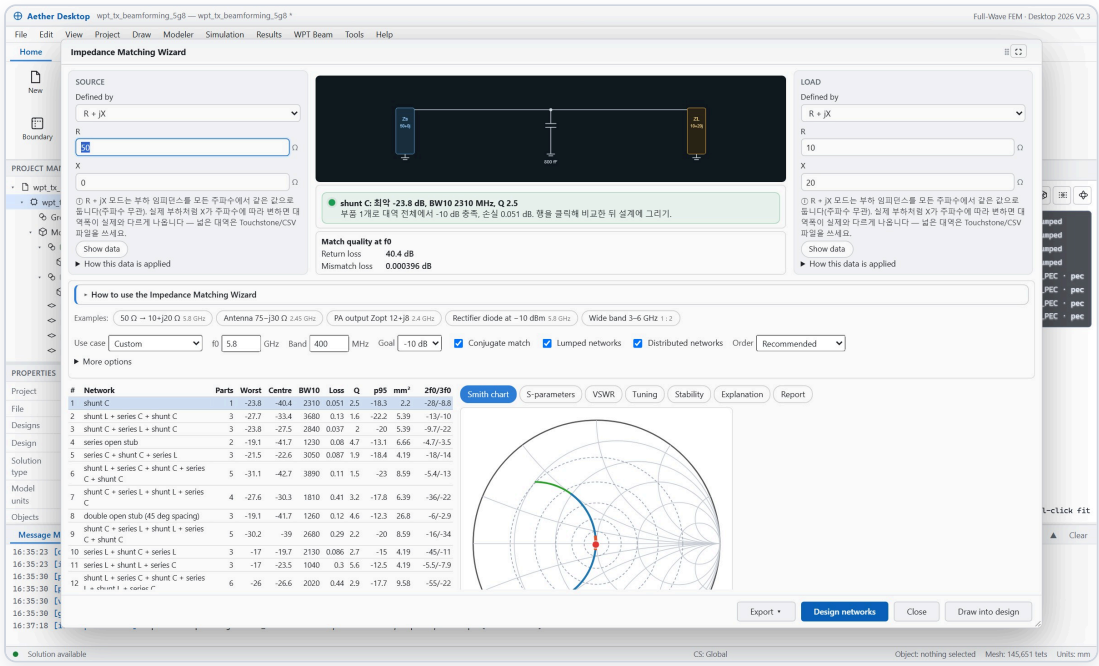


그림 22-1 Impedance Matching Wizard. 소스(좌)와 부하(우) 각각에 R+jX, Touchstone, 현재 EM 결과, PA Zopt, 쇼트키 정류 다이오드를 지정하고 최적 정합망을 비교합니다.

- **기본 부품 모델이 이상 소자가 아닌 `Chip with parasitics`!** — 0402/0603 실제 기생 ESR·SRF(또는 `Murata library`)를 기본 반영하며, 순위표의 `p95` **열**은 부품값 $\pm 5\%$ 몬테카를로 95백분위 최악 $|S_{11}|$을 보여줍니다. 공칭만 좋고 `p95`에서 깨지는 고-Q 회로는 즉시 **주황 신호등**이 켜지며 저-Q 다단 L/Pi 회로를 권합니다.
- **정류 다이오드 대신호 임피던스(`Diode at Pin`) & 백오프 검사** — WPT 렉테나용 쇼트키 다이오드 파라미터와 입력 전력 P_{in}을 넣으면 대신호 입력 임피던스를 자동 추출하고, 10 dB 낮은 전력에서도 정합이 무너지지 않는지 동시 검증한 뒤 **Send to Co-sim**으로 바로 넘깁니다.
- **VHF/UHF 광대역 `TLT / ferrite`** — 수백 MHz 이하에서 $\lambda/4$ 선로가 보드 크기를 넘으면 동축 Guanella / Ruthroff 전송선 변압기(TLT)를 제안하고 페라이트 코어 자속 포화($B_{\max}$) 여부까지 체크합니다.

22.2 칩 기생으로 밀릴 컷오프를 미리 당겨 놓는 `Filter Designer` UPGRADE

Draw ▸ Filter Designer... 는 LPF·HPF·BPF·BSF 13종 토폴로지를 마이크로스트립 패턴, 칩 RLC 사다리, 또는 하이브리드(인쇄 L + 칩 C)로 합성합니다.

백미는 **기생 보상 (Compensate)** 옵션입니다! SMD 패드 기생 용량, 비아 인덕턴스, 칩 자체 ESL 때문에 컷오프 주파수가 아래로 처지는 양을 미리 역산해 **기생 성분이 합쳐졌을 때 정확히 목표 응답에 들어맞도록** 원형 소자 값을 사전 왜곡(pre-distort)한 뒤 E24 표준값으로 스냅합니다. 그린 뒤에는 **Results ▸ Compare with Circuit Model...** 로 이상 회로·기생 회로·실제 3D FEM 세 곡선을 한 차트에서 대조합니다.



그림 22-2 Filter Designer 대화상자. 체비쇼프 필터의 fc는 −3 dB가 아닌 리플 경계 주파수임을 기억하세요!

22.3 고출력 발열·절연파괴까지 점검하는 `RF Circuit Wizard` UPGRADE

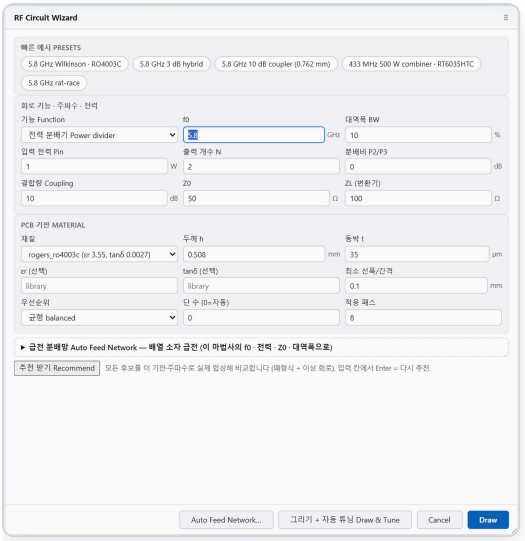


그림 22-3 RF Circuit Wizard. 10종 분배·결합·하이브리드 토폴로지 추천과 Draw & Tune 자동 보정을 지원합니다.

Wilkinson, 고출력 접지 저항형 **Gysel**, Branch-line, 광대역 인터디지털 **Lange**, Rat-race 180° 하이브리드, 다단 이항 변환기 10종을 기판 위에 합성합니다. 특히 입력 전력 `Pin [W]`(예: 433 MHz 500 W 결합기)을 넣으면 **트레이스 온도 상승 ΔT, 피크 RF 전압 절연 여유, 안테나 단선 고장 시 격리 저항에 쏠리는 소모 전력 P_{fault}**를 사전 진단해 저항 소손 사고를 막아 줍니다.

HOW TO 정합·필터 위저드 결과표 제대로 읽고 3곡선 대조 검증하기

1. **공칭 대신 p95 공차 열 읽기**
   `Impedance Matching Wizard` 순위표에서는 공칭 $|S_{11}|$ 숫자에 현혹되지 말고, 부품 $\pm 5\%$ 오차 최악치인 `p95` **열이 -10 dB 이하(초록 신호등)**인 저-Q 회로를 고릅니다.

2. **기생 선보상(Compensate) 켜기**
   `Filter Designer`에서 **Compensate** 체크를 켜 패드·비아 기생으로 컷오프가 밀릴 양을 미리 역보상한 뒤 **Build in 3D**와 `F9` 해석을 실행합니다.

3. **회로 vs 3D EM 3곡선 대조**
   상단 메뉴 **Results ▸ Compare with Circuit Model...** 을 열어 **이상 회로(점선) · 기생 반영 회로 · 실제 3D FEM(실선)** 세 곡선이 통과대역과 차단 경사에서 포개지는지 확인합니다!

23 CHAPTER

전력증폭기(PA) 4단계 완전 정복 ①: PA Wizard & Bias Designer

고출력 GaN 전력증폭기 설계가 자주 실패하는 두 가지 진짜 이유 — '350 MHz 대역 외 게이트 저주파 발진'과 '비아 인덕턴스가 망쳐 놓은 바이어스 격리'를 Aether의 PA 파이프라인 전반부 두 마법사로 완벽히 제압합니다!



배울 것
Aether 4단계 PA 통합 파이프라인

해 볼 것
17종 PA 칩 라이브러리 · 로드풀 · 외부 회로도 경쟁

핵심 개념
PDN 반공진 댐핑 · 비아 기생 교훈 (55→18.2 dB) · 350 MHz 발진 제거

23.1 Aether EM의 4단계 PA 설계 파이프라인

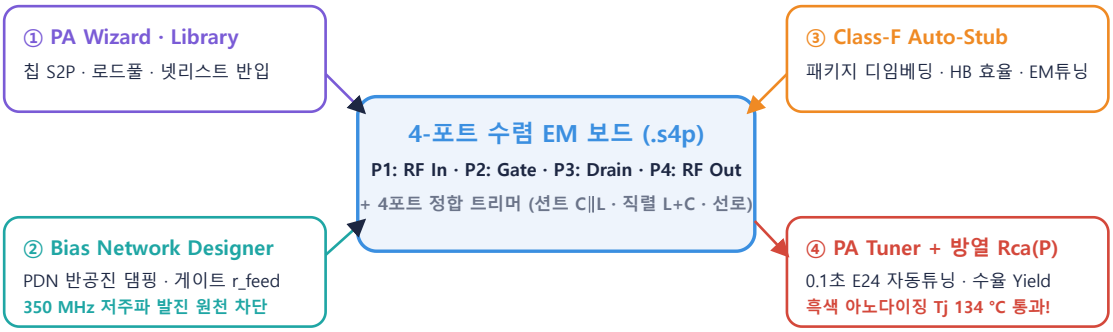


그림 23-1 전력증폭기 4단계 통합 설계 체인: ① PA Wizard 기본 정합·안정화 → ② Bias Designer PDN·바이어스 티 → ③ Class-F 진성 드레인 고조파 성형 → ④ PA Tuner 0.1초 실시간 트리머·방열 통합 검증.

23.2 1단계 — `PA Wizard`와 17종 검증 `PA Library` NEW V2.3

Draw ▸ PA Wizard...와 **Tools ▸ PA Library...**에는 MACOM/Wolfspeed(`CGH40010`, `CG2H40010`, `CG2H40120`), Ampleon(`BLF188XR` 1.4 kW LDMOS), Analog Devices, Mini-Circuits 등 데이터시트 출처가 명시된 17종의 대표 RF 전력 소자가 내장되어 있으며 사용자 `.s2p`와 로드풀(`.lp` / `.csv`), 데이터시트 임피던스 표를 직접 불러올 수 있습니다.

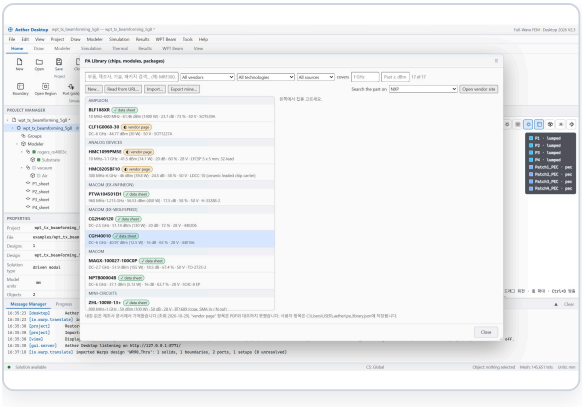


그림 23-2 PA Wizard. 소자 S2P와 로드풀 데이터로부터 안정화 회로·입출력 정합 쌍 순위·예측 대전력 곡선을 한 번에 도출합니다.

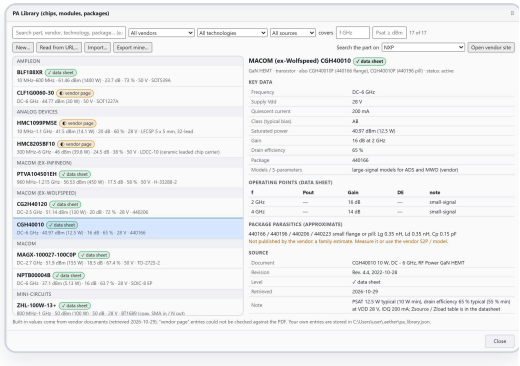


그림 23-3 PA Library(17종 내장 + 사용자 확장). 동작 대역, 포화 출력, 효율, 패키지 열저항 Rjc를 한눈에 검색합니다.

- **외부 KiCad / ADS / AWR / Qucs / SPICE 회로도 가져오기 경쟁** ONLY IN AETHER — 기존에 KiCad(`.kicad_sch`), ADS, AWR, Qucs, SPICE 넷리스트(`.net`)로 짜 둔 정합 회로가 있다면 그대로 불러와 위저드가 자동 합성한 후보들과 똑같은 링 위에서 이득·리플·안정도를 맞대결시킬 수 있습니다!
- **전 대역 안정도($K, \mu > 1$) 및 안정화 저항 자동 삽입** — 동작 주파수뿐 아니라 저주파 대역 전체에서 기하 안정도 인자 $\mu < 1$인 잠재 발진 구간을 탐지해 게이트 직렬/병렬 RC 안정화 네트워크를 원클릭으로 추가합니다. (참고: PA Wizard 내부 대전력 곡선은 소신호 S2P + 로드풀 Z_{opt} + Rapp 포화 거동 모델 기반 추정치입니다).

23.3 2단계 — `Bias Network Designer` : 숨은 발진과 메모리 효과를 잡다 NEW V2.3

바이어스 회로를 "그냥 $\lambda/4$ 얇은 선에 커패시터 하나 달면 끝"이라고 생각하면 큰코다칩니다! **Draw ▸ Bias Network Designer...**는 RF 격리뿐 아니라 **1 kHz ~ 20 GHz 전원분배망(PDN) 임피던스**와 저주파 루프 안정도를 동시에 설계합니다.

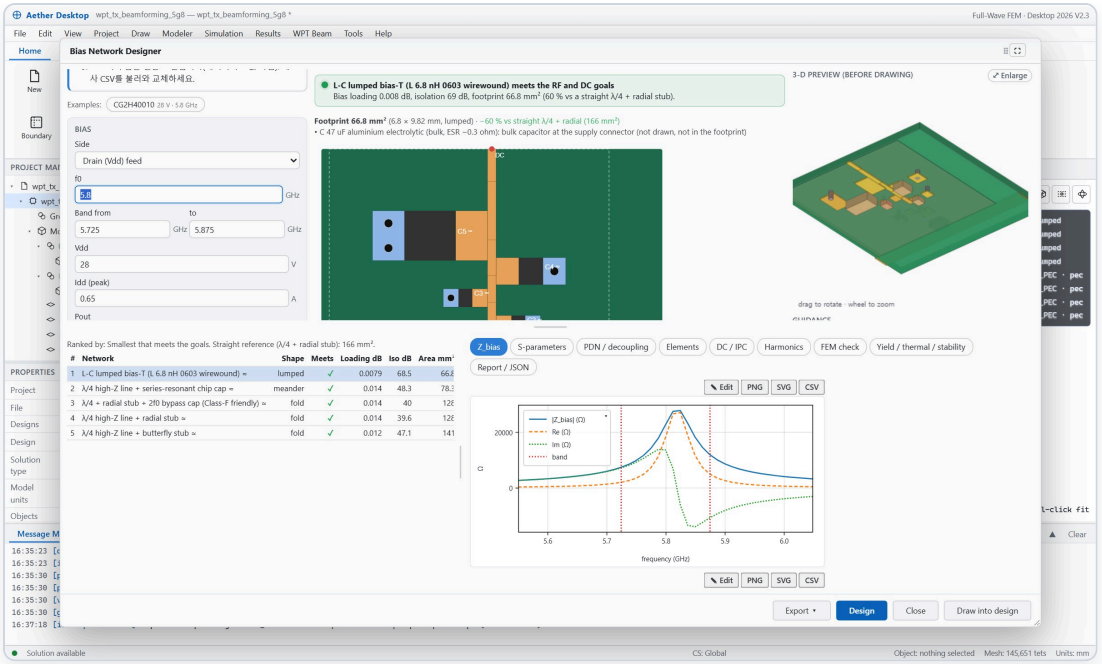


그림 23-4 Bias Network Designer. CG2H40010 5.8 GHz 드레인 바이어스에 대해 직선 λ/4+래디얼(166 mm²) 대비 면적을 60 % 줄인 66.8 mm² 집중형 L-C 바이어스-T와 접힌 미앤더 후보들을 자동 비교·3D 프리뷰합니다.

CREW COMIC **바이어스 설계 3대 실전 교훈 — 회로 시뮬레이터만 믿으면 당하는 함정!**

포티 어라?! 이상 회로에서는 0402 바이패스 캡 하나로 5.8 GHz 격리도가 **55 dB**나 나왔는데, 왜 3D FEM을 돌리니까 **18.2 dB**로 폭락해서 RF 전력이 전원으로 줄줄 새는 거지?

웨이비 패드와 접지 비아 2개의 기생 인덕턴스(수백 pH)가 5.8 GHz에서 직렬 리액턴스로 버티고 있기 때문이야! 반대로 래디얼 스텁 + `FEM stub trim`(1.03배 보정)을 쓰면 실제 3D FEM에서도 **45.2 dB 격리**가 거뜬히 나와!

위즈 게다가 게이트 쪽에 무손실 L-C 초크를 달면 **350 MHz 부근에서** $|\Gamma_S\Gamma_{\text{in}}| > 1$ **저주파 발진**이 터지기 쉬워. 게이트 전류는 거의 0이니까 **게이트 저항 급전(**`r_feed`**, 220 Ω)** 토폴로지를 고르면 전 대역 발진이 마법처럼 사라진단다!

- **PDN 병렬 반공진 링잉 탐지 & 댐핑 저항** R_{damp} — 100 pF RF 캡의 ESL과 10 nF/1 µF 벌크 캡 용량이 수십 MHz에서 병렬 반공진 피크를 일으키면 변조 신호 엔벨로프가 일그러집니다(메모리 효과). `PDN / decoupling` 탭은 $|Z_{\text{PDN}}| < 0.1R_{\text{opt}}$를 유지하는 **비디오 대역폭**을 계산하고, RF 손실을 건드리지 않는 저주파 단에만 정확한 $R_{\text{damp}} \approx \sqrt{L/C}$를 제안합니다.
- `Send to Class-F (2f0 short)` — $\lambda/4$ 바이어스 선로가 동시에 $2f_0$ 짝수 고조파 단락 스텁 역할을 겸하도록 다음 단계 Class-F 도구로 즉시 바통을 넘깁니다!

24 CHAPTER

전력증폭기(PA) 4단계 완전 정복 ②: Class-F Auto-Stub & 실시간 PA Tuner



패키지 기생 성분 뒤에 숨은 진짜 '다이 내부 전류원 평면'에서 2f0 단락·3f0 개방을 맞추고 면적을 55 % 줄인 뒤, 4포트 EM 결과 위에서 0.1초 만에 입출력 트리머와 방열판까지 튜닝하는 PA 설계의 하이라이트입니다!

배울 것
진성 드레인 전류원 역디임베딩과 55 % 소형화

해 볼 것
Broyden 공간매핑(EM tune) 자동 수렴

핵심 개념
0.1초 실시간 PA Tuner와 기본파·고조파 상호작용 교훈

24.1 3단계 — 왜 교과서 $\lambda/4$ 스텁이 실제 GaN 패키지에서 실패할까? (`Class-F Auto-Stub`) NEW V2.3 ONLY IN AETHER

Class-F 고효율 증폭기의 핵심은 드레인 전압 파형을 구형파로 성형해 전류와 겹치는 손실 면적을 없애는 것, 즉 $2f_0$ **짝수 고조파는 단락($\Gamma = -1, 180°$),** $3f_0$ **홀수 고조파는 개방($\Gamma = +1, 0°$)**으로 만드는 것입니다. 그런데 패키지 리드 바로 바깥 마이크로스트립에 교과서대로 $\lambda_g/4$ 스텁을 달면 효율이 오히려 폭락합니다! 왜일까요?

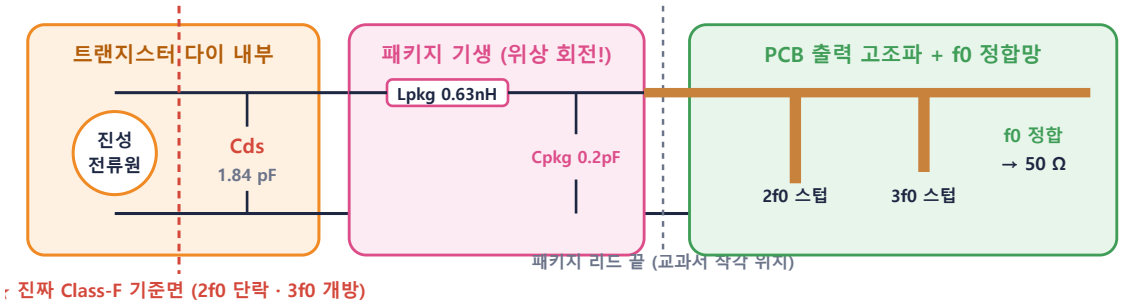


그림 24-1 진성 드레인 전류원 평면(Intrinsic Plane) vs 패키지 리드 평면. 본드와이어 Lpkg(0.629 nH)와 드레인-소스 용량 Cds(1.84 pF)를 거치면서 패키지 밖에서 만들어야 할 2f0·3f0 목표 위상이 완전히 다른 각도로 회전합니다!

예를 들어 5.8 GHz에서 CG2H40010의 $C_{ds} = 1.84\,\text{pF}$는 $3f_0$(17.4 GHz)에서 이미 $-j5\,\Omega$에 불과하고, L_{pkg}–C_{ds} 직렬공진이 4.68 GHz에 버티고 있습니다. 따라서 출력 선로를 선택하고 **Modeler ▸ RF ▸ Class F on Output Line...**을 실행하면, 툴은 패키지 기생을 역산(de-embedding)해 **다이 내부 전류원이 진짜로 원하는 고조파 반사 위상**을 스미스 차트에 찍어 주고, $f_0 \sim 7f_0$ 전체 네트워크로 푼 **드레인 하모닉 밸런스 효율(DE %)**을 최상단 지표로 보여 줍니다(스텁 위치가 1.5 mm만 어긋나도 고조파 점수가 $0.78 \rightarrow 0.17$로 붕괴합니다!).

MINIATURISE −55%

동일 효율 55 % 면적 축소

효율 손실 0.2 %p 이내에서 $\lambda_g/2$ 주기 해를 탐색하고 스텁을 선로 한쪽 면으로 모아 출력부 면적을 최대 **55 % 축소**합니다(CG2H40010 보드 $980 \rightarrow 659\ \mathrm{mm}^2$ 달성).

SMITH DRAG & MC

스미스 드래그 & 400보드 공차

스미스 차트 위 $2f_0/3f_0$ 마커를 마우스로 끌면 스텁 길이·위치가 실시간 역산되며, 에칭 오차 $\pm 0.05\ \mathrm{mm}$에 따른 효율 분포를 400회 몬테카를로로 검증합니다.

BROYDEN EM TUNE

출력 공간매핑 자동 튜닝

`Extract EM stub model`로 T-접합 프린징 연장량(+0.48 mm)을 뽑고, **Broyden 야코비안 공간매핑** (`EM tune`)으로 2~3회 FEM 만에 수렴 보정합니다.

24.2 4단계 — 재해석 0초, 슬라이더로 끝내는 실시간 `PA Tuner` NEW V2.3

ONLY IN AETHER

수동 보드를 4포트(`RF_In`, `Gate`, `Drain`, `RF_Out`)로 단 **1회** 정밀 EM 해석해 두면, **Results ▸ PA Results**(리본 **Home ▸ PA Results**)에서 좌측 `Result set`을 `PA Tuner (live, editable) 튜너`로 고르는 순간 마법이 펼쳐집니다! 각 포트에 부착되는 직렬·션트 트리머 2포트 사다리($\mathbf{T}_{\mathrm{trim}}$)는 근사식이 아니라 정확한 폐형식 포트 확장 공식(`extend_port`: $S_{\mathrm{ext}} = S_{aa} + S_{ap}\Gamma_{\mathrm{net}}(I - S_{pp}\Gamma_{\mathrm{net}})^{-1}S_{pa}$)으로 4×4 보드 행렬에 0.01초 만에 결합됩니다.

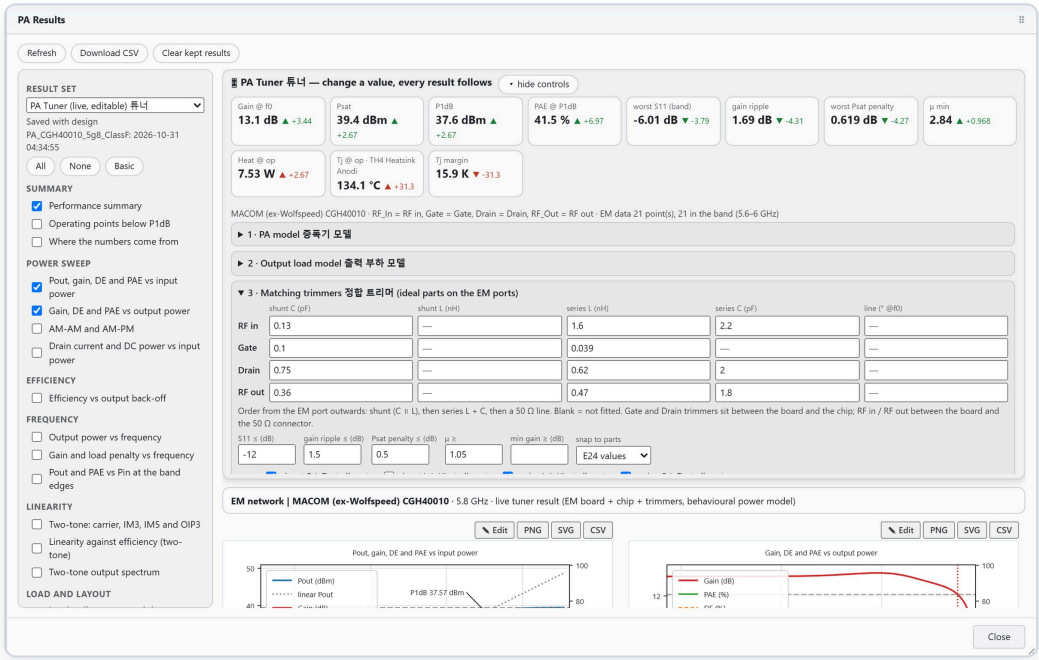


그림 24-2 실시간 PA Tuner 대시보드(CGH40010 5.8 GHz). 입·출력 4포트 트리머 L/C 값을 바꾸거나 Auto-tune(E24 스냅)을 누르면 0.1초 안에 이득(13.1 dB), Psat(39.4 dBm), PAE(41.5 %), 안정도(μ=2.84), 아노다이징 방열판 접합온도(Tj=134.1 °C)와 30종 차트가 일제히 갱신됩니다!

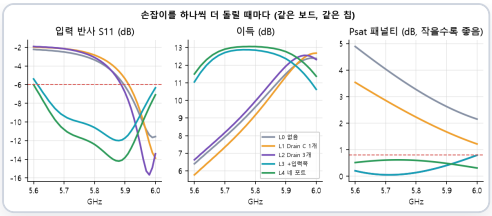


그림 24-3 트리머를 L0(맨 보드)에서 L4(4포트 전체 E24 스냅)까지 켤 때 S11(−2.2 → −6.0 dB)과 대역 이득(리플 6.0 → 1.69 dB)이 살아나는 과정.

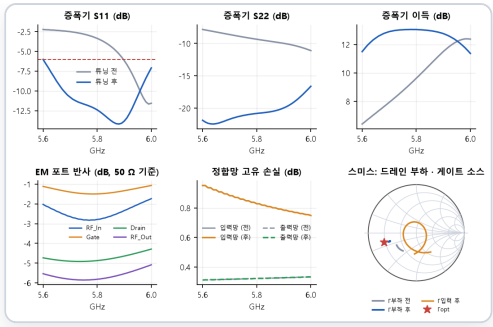


그림 24-4 단순 |S21|에 섞인 부정합 반사를 걷어내고 −10 $\log_{10}$(MAG)로 발라낸 순수 기판 동박·유전체 소산 손실(0.2~0.4 dB).

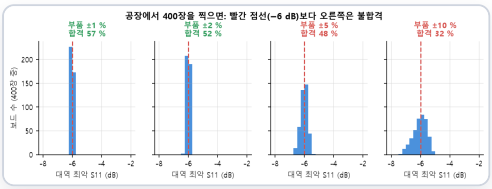


그림 24-5 ±5 % 부품 공차 400장 주사위 실험: 목표(−6.0 dB)에 딱 붙여(−6.01 dB) 튜닝하면 공장 수율이 48.5 % 반타작이 납니다!

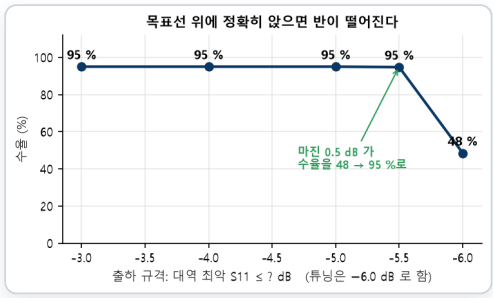


그림 24-6 양산 고수의 +0.5 dB 마진 법칙: Auto-tune 목표를 −6.5 dB로 0.5 dB만 죄어 다시 돌리면 ±5 % 수율이 즉시 95 %로 급등합니다!

- **실전 복구 사례 (CGH40010 v2)** — 수렴 FEM에서 드러난 맨 보드의 부정합($S_{11} = -2.22$ dB, 대역 리플 6.00 dB)에 대해 PA Tuner의 `Auto-tune`(전역 차분진화 → Nelder-Mead → E24 표준 부품값 전수 스냅)을 실행하자, 재메시 없이 단 몇 초 만에 대역 최악 S_{11} −6.01 dB(5.8 GHz 중심 −12.40 dB), 이득 리플 1.69 dB, P_{sat} 부하 페널티 0.62 dB로 부활했습니다(36장 미션에서 직접 실습합니다!).
- **순수 소산 손실만 발라내는 MAG 지표** ONLY IN AETHER — 임피던스 변환망(50 Ω → Z_{opt})에서는 50 Ω 기준 $|S_{21}|$에 부정합 반사가 잔뜩 섞여 보드가 열손실이 큰 것처럼 오해하기 쉽습니다. PA Tuner는 종단 무관 최대 가용 이득 기반 $-10\log_{10}(\text{MAG})$로 순수 동박·유전체 열손실만 칼같이 분리해 보여 줍니다.

고급 설계자의 필독 교훈 (CGH40010 v3): 기본파 션트 C와 고조파 스텁의 충돌!

드레인 바로 앞에 기본파 정합용 큰 션트 커패시터(예: 2.04 pF, 17.4 GHz에서 $-j4.5\ \Omega$)를 먼저 달아 버리면 그 자체가 $3f_0$를 단락시켜 뒤쪽 $3f_0$ 개방 스텁을 무력화합니다. 또한 **고조파 제약 없이 PA Tuner에서 드레인 트리머를 크게 돌리면 애써 맞춰 둔 보드의 $2f_0$ 단락 위상($-172^\circ \rightarrow +109^\circ$)이 틀어질 수 있습니다**. 따라서 고효율 Class-F 설계 시에는 반드시 `Class-F Auto-Stub`의 통합 기본파 재정합 루프로 보드 위에서 고조파와 기본파를 함께 맞춘 뒤, PA Tuner에서는 미세 커넥터 트리밍과 수율·열 검증을 수행하세요!

24.3 한눈에 판독하는 `PA Results` 상단 KPI 성적표 & 양산 합격 기준

처음 `PA Results` 창을 열었을 때 수많은 숫자와 차트 중 무엇부터 봐야 할까요? 상단 요약 카드 7개만 아래 기준표대로 점검하면 증폭기의 건강 상태가 10초 만에 판명됩니다!

핵심 결과 지표 (KPI)	실무 양산 합격선	불합격일 때 원인 해석 & 즉각 처방전
`μ min` **(최소 안정도)**	**전 대역** ≥ 1.05 **필수!**	1.0 미만이면 발진 위험 1순위! 게이트 직렬 R-C 또는 저항 바이어스 급전(220 Ω) 추가.
`worst S11 (band)`	단독 ≤ -10 dB (아이솔레이터 앞 ≤ -6.5 dB)	입력 스미스 차트(파란 궤적)가 중앙에서 벗어남 → 입력 2포트 트리머 `Auto-tune` (+0.5 dB 마진).
`Gain @ f0` **&** `Gain ripple`	대역 리플 $\leq 1.5 \sim 2.0$ dB	리플이 크면 대역 한쪽 끝 정합이 무너진 것 → 입출력 공진점을 대역 상·하단으로 살짝 엇갈려 배분.
`worst Psat penalty`	$\leq 0.6 \sim 0.8$ dB	출력 스미스 차트의 주황색 부하 궤적이 빨간 Z_{opt} 등고선 밖으로 밀려남 → 드레인 정합 선폭·길이 보정.
`PAE @ P1dB / Psat`	AB급 40~55 % / F급 55~70 %+	`DE` 는 높은데 `PAE` 만 낮다면 **이득(Gain) 부족** 또는 출력 보드 동박 손실(`-10 log MAG` 확인!) 탓.
`Tj @ op` **&** `Tj margin`	**여유** $\geq +15$ K (폭주 없음)	붉은 경고가 뜨면 방열판 흑색 아노다이징($\varepsilon = 0.85$), 구리 코인/컷아웃 지그로 R_{ca} 절감(31장).

25 CHAPTER

비선형 & 자유 배선 회로도 Co-sim (SPICE + EM + 역반영)

쇼트키 정류 다이오드의 전력 수지와 역전압 항복(-BV)을 하모닉 밸런스로 정밀 해부하는 Nonlinear Co-sim, 그리고 자유 배선 SVG 캔버스에서 튜닝한 칩 부품을 3D EM 모델로 다시 꽂아 넣는 회로도 Co-sim을 익힙니다.



배울 것
쇼트키 정류기 하모닉 밸런스(K≥8)와 Rectifier Report

해 볼 것
자유 배선 SVG 회로도 Co-sim과 베이지안 PCE 최적화

핵심 개념
반영 ▾ → EM 포트 → Lumped RLC 확정 역주입 루프

25.1 쇼트키 정류기와 전력 수지 해부: `Nonlinear Co-sim` & `Rectifier Report`

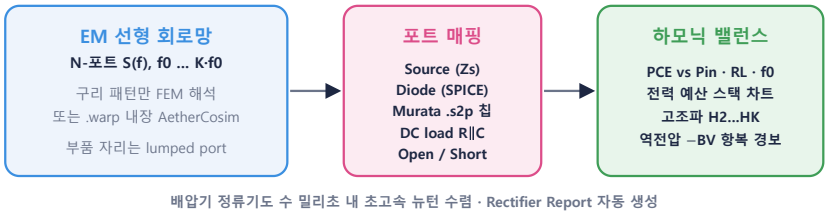


그림 25-1 수동 패턴은 포트만 열어 1회 EM 해석하고, 비선형 쇼트키 다이오드와 부하는 주파수 영역 하모닉 밸런스(HB)로 결합합니다.

5.8 GHz 렉테나처럼 다이오드가 들어가는 회로는 EM 스윕 범위를 **최저 0.5 GHz 이하(DC 외삽용)부터 최고 고조파 Kf_0까지**(예: $K = 4$면 24 GHz, 고정밀 $K = 8$ 권장 — K가 작으면 효율을 3~4 %p 과대평가합니다!) 넓게 잡아 1회 해석한 뒤 **Results ▸ Nonlinear Co-sim (SPICE + EM)…** 및 **Results ▸ Rectifier Report…**를 실행합니다.

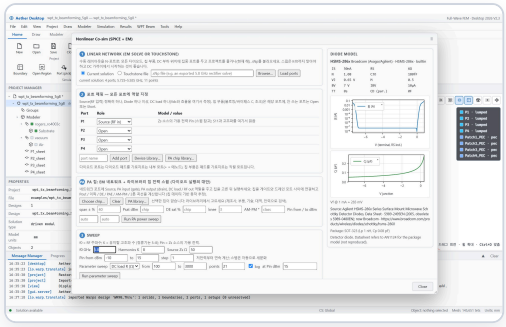


그림 25-2 Nonlinear Co-sim 창. 내장 데이터시트 검증 다이오드(HSMS-282x/285x/286x, SMS7630, NT9000~9003)의 I-V/C-V 곡선과 패키지 기생(Lp, Cp)을 반영합니다.

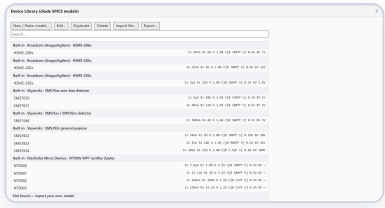


그림 25-3 Device Library. 공식 데이터시트 SPICE 파라미터만 수록하며 사용자 .model/.lib 파일을 자유롭게 추가합니다.

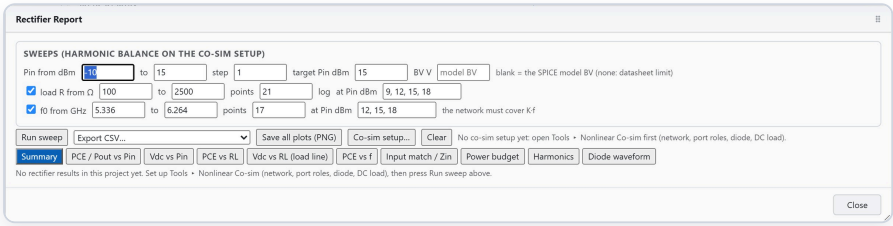


그림 25-4 Rectifier Report 통합 스윕 창. 입력 전력(Pin)·부하 저항(RL)·주파수(f0) 3중 스윕을 자동 수행해 전력 손실 분해(반사 vs 기판 손실 vs 다이오드 Rs 손실)와 역전압 항복(-BV 근접) 경고를 한 번에 뽑아냅니다.

CHART 1 · POWER BUDGET

누적 전력 손실 막대 읽는 법

입력 100 %가 **반사 손실 · EM 기판 손실 · 다이오드 R_s 손실 · DC 수확 전력(PCE)**으로 색깔별로 나뉩니다. 반사 막대가 크면 정합망을, 다이오드 막대가 크면 저-R_s 소자 교체를 처방합니다!

CHART 2 · PCE vs Pin & −BV

입력 전력 곡선 절벽 & 항복 읽기

저전력 오르막은 문턱전압(V_{bi}) 구간, 꼭대기가 최적점이며, 고전력에서 효율이 뚝 꺾이면 시간 파형 $v_j(t)$가 붉은 **역전압 항복선(`-BV`)**을 친 것입니다(고내압 소자나 배압기 전환!).

25.2 자유 배선 SVG 캔버스와 3D 역반영의 마법: `Co-sim (Circuit + EM)`

NEW V2.3 ONLY IN AETHER

고정된 폼을 넘어 내 마음대로 회로를 그리고 싶을 때는 상단 메뉴 **Results ▸ Co-sim (Circuit + EM)...** (창 제목: **회로도 Co-sim**)을 여세요! 현재 디자인의 다포트 EM 블록(재해석 시 지문 비교로 자동 갱신!) 옆에 이상 소자, 기생 포함 소자(`CREAL/LREAL`), **54종 Murata `.s2p` 칩(`CHIP`)**, 마이크로스트립(`MLIN`), 쇼트키 다이오드(배전압 정류기 전류 잔차 뉴턴 해법으로 **기존 대비 200배 가속!**), PA 칩을 마우스로 배선합니다.

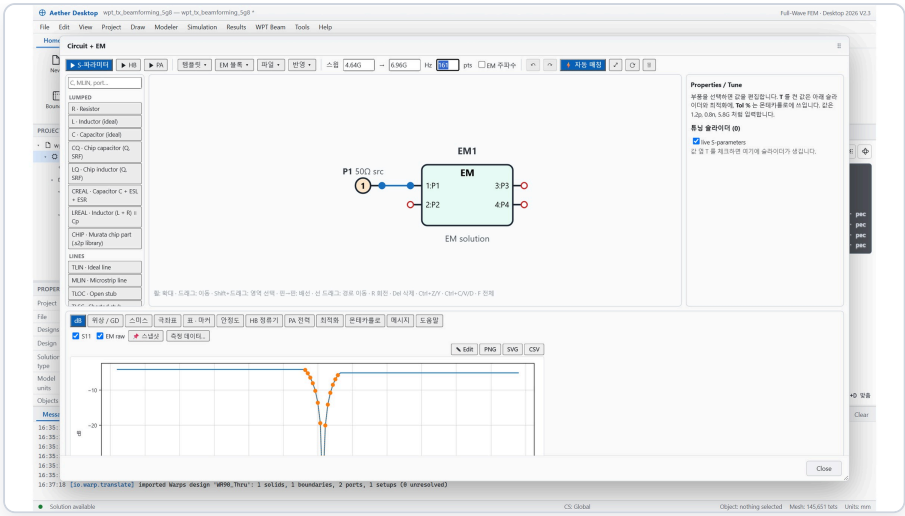


그림 25-5 회로도 Co-sim(Circuit + EM) 편집기. 7포트 정류기 EM 블록(S7P)에 NT9001 다이오드 쌍과 기생 포함 L/C를 배선하고 우측 실시간 슬라이더로 S11과 HB 정류 효율을 동시에 튜닝하는 화면입니다.

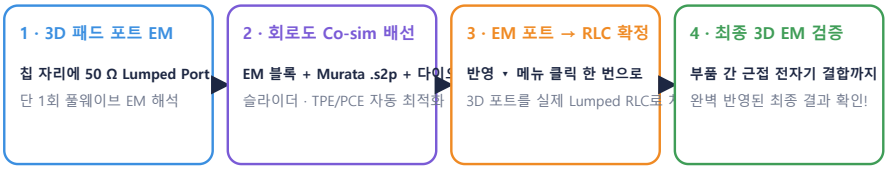


그림 25-6 실전 설계 시간을 10분의 1로 줄이는 회로도 Co-sim → 3D EM Lumped RLC 역반영(Back-Annotation) 마감 플로우.

BEST PRACTICE **패드 간극 포트 → 회로도 1초 튜닝 → 3D EM Lumped RLC 확정!**

1. **패드 간극에 Lumped Port 뚫기**
   3D 보드의 SMD 부품 패드 자리마다 50 Ω Lumped Port를 달아 딱 **1번** FEM 해석합니다.

2. **회로도 Co-sim 슬라이더 & 베이지안 최적화**
   회로도 편집기에서 슬라이더를 밀거나 `최적화` 탭(Bayesian TPE 지원 — 심지어 **정류기 HB 변환효율 PCE % 직접 최대화**도 가능!)과 E24 스냅, `몬테카를로` 수율 곡선으로 최적 부품값을 몇 초 만에 확정합니다.

3. **3D 모델로 원클릭 역반영!**
   상단 툴바의 **반영** ▾ ▸ **EM 포트 → Lumped RLC 확정**을 누르면, 방금 찾은 R/L/C·칩 값들이 3D 모델의 해당 Lumped Port 위치에 실제 **Lumped RLC 경계**로 일괄 치환됩니다(Undo 완벽 지원). 마지막으로 `F9`를 한 번만 더 돌려 부품 간 3D 결합까지 최종 사인오프하세요!

26 CHAPTER

무선전력전송 · 빔포밍 · 공동 공진 워크벤치 (WPT Beam)



근거리 구면파 초점 빔포밍이 언제 +17 dB의 기적을 만들고 언제 +0.3 dB에 그치는지, 왜 인체 안전 기준(10 W/m²)이 송신 출력과 무관하게 수신 전력 상한을 못 박는지, 그리고 91.9 % 효율의 433 MHz 금속 챔버 공진 충전까지 WPT의 모든 물리를 정복합니다.

배울 것
구면파 적분 · Goubau 효율 · 프레넬 수(NF≥1) 초점 진실

해 볼 것
역지향 파일럿 추적(+6 dB)과 10 W/m² 안전 상한 법칙

핵심 개념
433 MHz Cavity WPT 자동 설계와 34.2 kV/m 인터록 필수 안전

26.1 무선전력의 세 가지 물리 영역과 전용 무선전력 · 빔 워크벤치 NEW V2.3

리본 **무선전력 · 빔** 탭과 상단 **WPT Beam** 메뉴는 원거리 근사(Friis 공식)가 깨지는 가까운 거리에서도 모든 송·수신 소자 쌍의 **정확한 3D 구면파 거리** R_{mn} **적분**과 Goubau 파동 파라미터 $\tau = \frac{\sqrt{A_t A_r}}{\lambda d}$($\mathrm{BCE}_{\max} = 1 - e^{-\tau^2}$)로 링크 예산을 정밀 계산합니다.



그림 26-1 방사형 근거리 집속(NF ≥ 1) vs 원거리 조향 vs 폐공간 공동 공진(Cavity WPT) 물리 비교와 인체 노출 안전 한계.

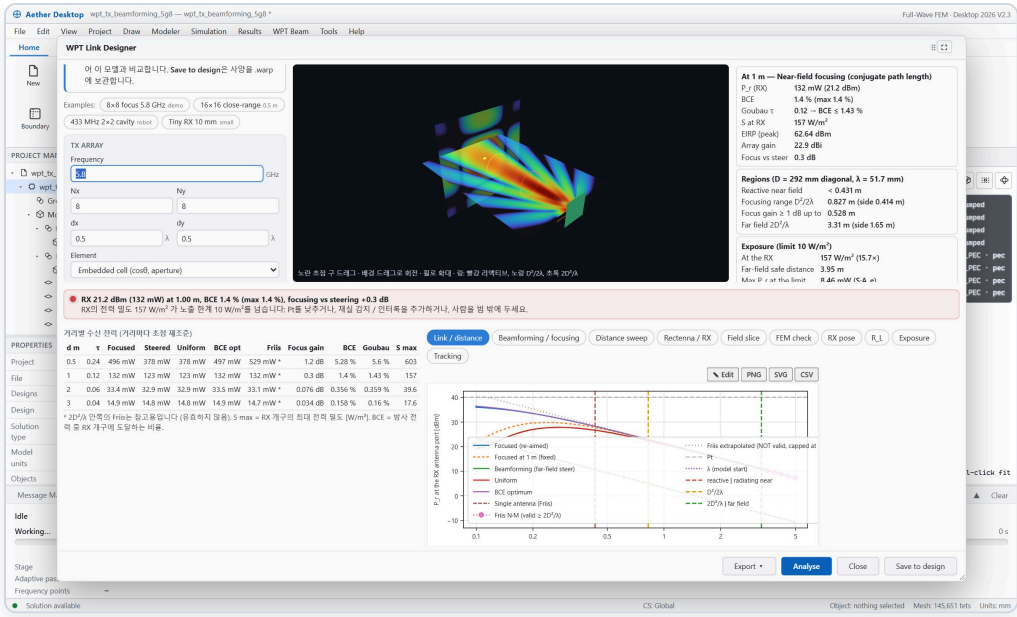


그림 26-2 WPT Link Designer(5.8 GHz 8×8 데모). 3D 빔 단면 슬라이스, 거리별 Focused/Steered/Goubau/Friis 비교 곡선, 그리고 10 W/m² 인체 노출 한도 초과 경고를 한 화면에서 진단합니다.

26.2 실무자가 반드시 알아야 할 빔 WPT의 세 가지 결정적 진실

TRUTH 1 · FRESNEL

근거리 집속은 $N_F \geq 1$에서만 통한다!

프레넬 수 $N_F = \frac{(D/2)^2}{\lambda d} < 1$이면 $1/R$ 감쇠가 위상 보강을 이겨 피크가 앞쪽으로 끌려옵니다(**초점 이동**). 5.8 GHz에서 8×8($D = 292$ mm)로 1 m를 쏘면 $N_F = 0.21$이라 집속 이득이 **+0.3 dB**뿐이지만, **16×16($D = 585$ mm)으로 0.5 m를 쏘면 무려 +17 dB(410 mW vs 7.8 mW)**가 폭발합니다!

TRUTH 2 · SAFETY CAP

인체 안전선($10\ \mathrm{W/m^2}$)이 최대 전력을 못 박는다

과기정통부·FCC·ICNIRP 일반인 노출 한도는 $S_{\lim} = 10\ \mathrm{W/m^2}$($1\ \mathrm{mW/cm^2}$)입니다. 사람이 들어올 수 있는 공간에서는 송신 출력을 아무리 높여도 최대 수신 전력은 **$P_{r,\max} \approx S_{\lim} A_{e,\mathrm{RX}} \cdot \mathrm{PCE}$**로 고정됩니다! 더 보내려면 수신 개구 A_e를 넓히거나 무인 인터록이 필수입니다.

TRUTH 3 · RETRODIRECTIVE

이동체에는 역지향 파일럿 추적이 정답

수신기가 쏜 파일럿 위상을 공액($-\angle V_{\mathrm{pilot}}$)으로 뒤집어 쏘는 **역지향 (Retrodirective)** 방식은 6비트 위상기 양자화 손실이 0.015 dB에 불과하며, `Tracking · 추적` 8자 이동 시뮬레이션에서 고정 빔(5.16 mW) 대비 **21.4 mW(+5.99 dB)**를 기록합니다!

또한 리본 `Safety · Motion` 그룹의 **RX 위치·자세**는 오프셋·기울기·편파 회전 손실($\cos^2\psi$)을 정량 분해하고, **인체 노출 지도**는 출입금지 구역(Keep-out zone) 반경과 Gabriel 피부 모델 국소 SAR, 법적 한도 준수 최대 송신 전력 백오프를 원클릭으로 산출합니다.

26.3 차폐 박스·로봇 충전의 끝판왕: Cavity WPT Designer NEW V2.3 ONLY IN AETHER

금속 보관함이나 산업용 차폐 챔버 내부에서 움직이는 로봇·센서를 충전할 때는 자유공간 빔 대신 챔버 전체를 고-Q 공진기로 쓰는 **WPT Beam ▸ Cavity / Box WPT...**(리본 **공동 공진기 433 MHz / 2.4 GHz**)가 압도적인 효율을 냅니다.

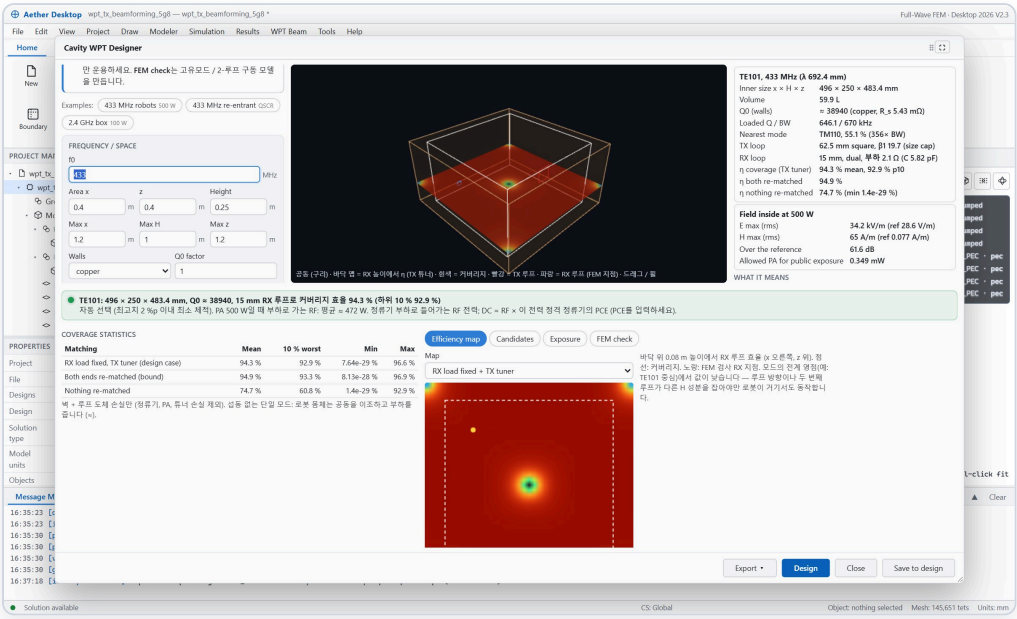


그림 26-3 Cavity WPT Designer(433 MHz 로봇 500 W 예제). 인접 기생 모드를 3·BW 밖으로 밀어낸 최소 부피 TE101 구리 챔버(496×250×483.4 mm, Q0 ≈ 38,940)와 15 mm 초소형 수신 루프를 자동 합성해 바닥 90 % 영역에서 평균 94.3 %(3D FEM 검증 91.9 %) 효율을 달성합니다!

Cavity WPT의 두 가지 물리·안전 철칙: 자기장 Null과 34.2 kV/m 고전압 인터록!

- **모드 정재파 마디(Magnetic Null) 주의** — 위 그림 하단 효율 지도의 초록색 점처럼 TE_{101} 중심부 등 자속 마디에 단일 루프가 놓이거나 루프 면이 자속과 평행해지면 결합이 0이 됩니다. 이동 로봇에는 반드시 **직교 2루프(dual orthogonal loops)** 또는 이중 모드 여기를 적용하세요.
- **절대 밀폐 차폐 & 도어 인터록 필수!** — 무부하 $Q_0 \approx 38,940$인 챔버에 500 W를 넣으면 내부 피크 전기장이 무려 $34.2\ \mathrm{kV/m}$**(일반인 노출 기준 +61.6 dB 초과!)**에 달합니다. 사람이 안에 있거나 문이 열린 상태에서는 절대 동작하면 안 되며, 완전 밀폐 금속 벽과 **도어 개방 즉시 RF 전원을 끄는 이중 하드웨어 인터록**이 필수입니다.

HOW TO **3분 만에 무선전력 수신 mW와 법적 인체 안전거리 판정하기**

1. **링크 디자이너 열기**
   리본 **무선전력 · 빔 ▸ WPT Link Designer** 를 열고 동작 주파수(예: `5.8 GHz`), 송·수신 개구 크기, 전송 거리 d, 송신 전력을 입력합니다.

2. **프레넬 수(N_F) & 4곡선 판독**
   상단 프레넬 수 $N_F \geq 1$인지 확인하고(1 미만이면 초점 집속 이득 미미!), 거리별 그래프에서 **Focused(근거리 집속) · Steered(평면파) · Goubau(물리 상한) · Friis** 수신 전력을 비교합니다.

3. **인체 노출 안전선 검증**
   리본 **인체 노출 지도**를 클릭해 $10\ \mathrm{W/m^2}$ 법적 한도를 넘는 **붉은 출입금지 반경(Keep-out zone)**을 확인하고, 유인 공간이라면 안내된 안전 송신 전력 이하로 백오프합니다!

PART

06

열해석 워크벤치 & 방열 설계 접합온도 Tj부터 흑색 아노다이징·열폭주 방지까지

아무리 S-파라미터가 완벽해도 GaN 트랜지스터 접합온도 Tj가 150 °C를 넘기면 효율이 꺾이고 열폭주로 소자가 타 버립니다! 6부에서는 방열 코치 써미(Thermy)와 함께 전자기 모델을 단 1비트도 어지럽히지 않는(|ΔS| = 0.0) 독립 열해석 워크벤치의 물리 원리부터, 절점 분리 TIM, 열비아·구리 코인·PCM 도우미, 온도→RF 양방향 역결합, 그리고 팬 없이도 온도를 26 K 낮추는 흑색 아노다이징 히트싱크와 메탈 지그 설계까지 알기 쉽게 완전 정복합니다.



27 열해석 워크벤치 입문: EM 무결성(|ΔS|=0)과 열전달 물리 첫걸음

28 3대 발열원과 절점 분리 TIM · 박막 동박(Thin Copper)의 마법

29 5대 방열 도우미 실전 가이드: 열비아 · 구리 코인 · 스프레더 · PCM · 펄스

30 열병목 추적(Heat Path) · 자동 최적화 · 온도→RF 양방향 결합

31 [심화 특집] GaN PA 전기-열 통합 냉각 설계와 메탈 지그(Jig)

27 CHAPTER

열해석 워크벤치 입문: EM 무결성(|ΔS|=0)과 열전달 물리 첫걸음



전자기(EM) 엔지니어에게 가장 친숙한 '전압·전류·저항·커패시터' 비유로 전도·대류·복사 열전달을 명쾌하게 이해하고, 기존 EM 결과를 전혀 건드리지 않고 5단계로 끝내는 열 워크벤치 구조를 익힙니다.

배울 것
EM 무결성(ΔS=0)을 보장하는 독립 AetherThermal 구조

해 볼 것
전기 회로 비유로 깨우치는 열저항 Rth와 열시정수 τ

핵심 개념
대류 계수 h 칩과 비선형 스테판-볼츠만 복사 물리

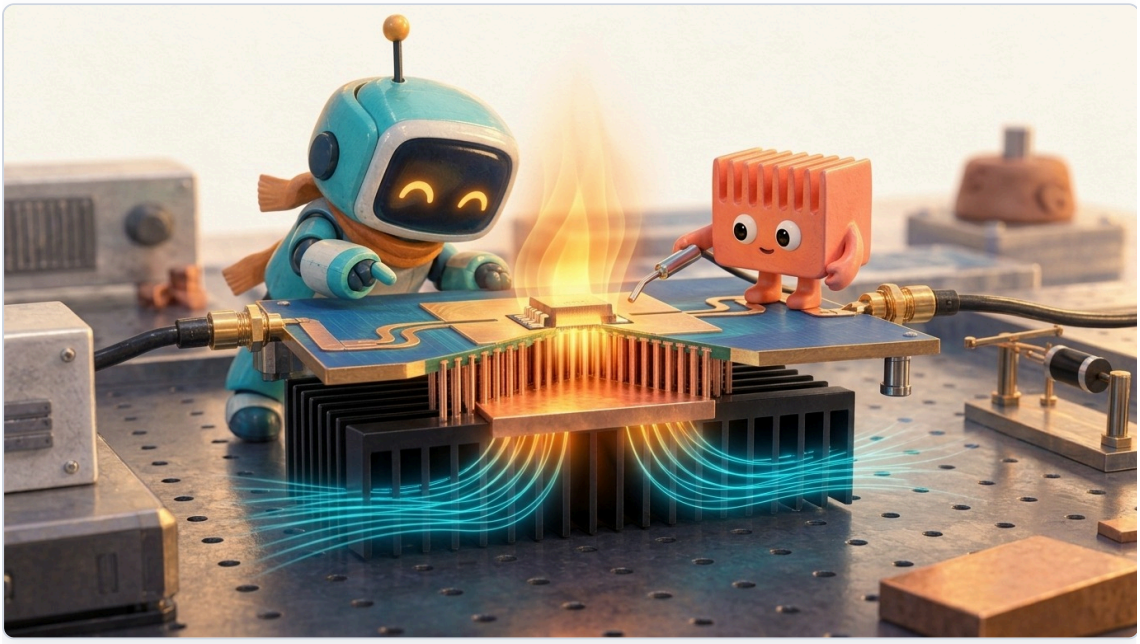


그림 27-1 열해석 실험실 디오라마. 트랜지스터 다이에서 발생한 열이 솔더(TIM), 구리 코인과 열비아를 타고 흑색 아노다이징 방열 핀으로 퍼져 대류와 적외선 복사로 빠져나가는 전 과정을 3D FEM으로 추적합니다.

27.1 왜 EM 엔지니어가 별도 CFD 툴 없이 바로 쓸 수 있는가?

전통적으로 RF 보드의 온도를 보려면 CAD를 내보내 별도의 기계용 열해석 프로그램에서 경계와 격자를 처음부터 다시 짜야 했습니다. 반대로 한 파일에서 열 설정을 만졌다가 애써 수렴시켜 둔 S-파라미터가 깨질까 봐 겁나기도 했죠. Aether EM의 **Thermal Workbench**는 이 두 가지 고민을 동시에 해결했습니다.



그림 27-2 동일 3D 도면 위에서 EM 영역과 완벽히 격리되어 동작하는 Thermal Workbench 아키텍처와 양방향 결합 루프.

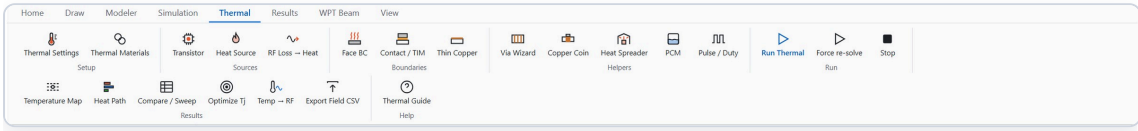


그림 27-3 전용 Thermal 리본 탭. 왼쪽부터 Setup → Sources(열원) → Boundaries(경계·TIM·박막동박) → Helpers(5대 방열 도우미) → Run → Results(병목·최적화·온도→RF) 순서로 흐릅니다.



그림 27-4 Thermal 탭을 누르면 좌측 트리가 전용 열 워크벤치 트리로 즉시 전환됩니다(모델 트리 링크로 언제든 EM 트리와 왕복).

철저한 EM 무결성 보장: `|ΔS| = 0.0`
ONLY IN AETHER

모든 열 물성·발열원·대류·TIM 설정은 `.warp` 파일 안의 독립된 `AetherThermal` 블록에만 기록되며, 최외곽 공기 상자(`Air`)는 열 모델에서 자동 제외됩니다. 배포된 8개 검증 예제(Th1~Th8) 전체에서 열 설정 전후 EM S-파라미터 차이가 **정확히** $|\Delta S| = 0.0$임이 검증되었습니다! (단, 구리 코인처럼 실제 3D 금속 형상을 새로 삽입하거나 `Temp → RF` 로 고온 재질을 적용한 경우에만 의도적으로 EM에 반영됩니다).

27.2 RF 엔지니어를 위한 3분 열전달 물리: 옴의 법칙과 똑같다!

열해석이 낯설다면 아래 표 딱 하나만 기억하세요. **열전달 방정식은 DC 전기 회로와 수학적으로 1:1 쌍둥이**입니다!

전기 회로 개념	열전달 대응 개념	핵심 수식 · 물리적 직관
전류 I [A]	열유량 Q [W]	트랜지스터나 선로 손실이 뿜어내는 초당 열에너지 흐름입니다.
전압 강하 ΔV [V]	온도 상승 ΔT [K 또는 °C]	열이 저항을 지날 때마다 생기는 온도 단차입니다($1\ \mathrm{K}$ 차이 $=$ $1^{\circ}\mathrm{C}$ 차이).
저항 $R = \frac{L}{\sigma A}$ [Ω]	**전도 열저항 $R_{\mathrm{cond}} = \frac{L}{kA}$ [K/W]**	두께 L이 얇을수록, 열전도율 k(구리 401 vs FR-4 0.3!)와 단면적 A가 클수록 잘 빠집니다.
종단 저항	**대류·복사 저항 $R_{\mathrm{conv}} = \frac{1}{hA}$**	표면적 A를 넓히고(히트싱크 핀!), 바람(h)과 표면 방사율(ε)을 키워야 공기로 잘 나갑니다.
커패시터 C [F]	**열용량 $C_{\mathrm{th}} = \rho c_p V$ [J/K]**	정상상태 온도는 못 바꾸지만, 펄스 버스트 동안 온도 급등을 늦춥니다(시정수 $\tau = R_{\mathrm{th}} C_{\mathrm{th}}$).

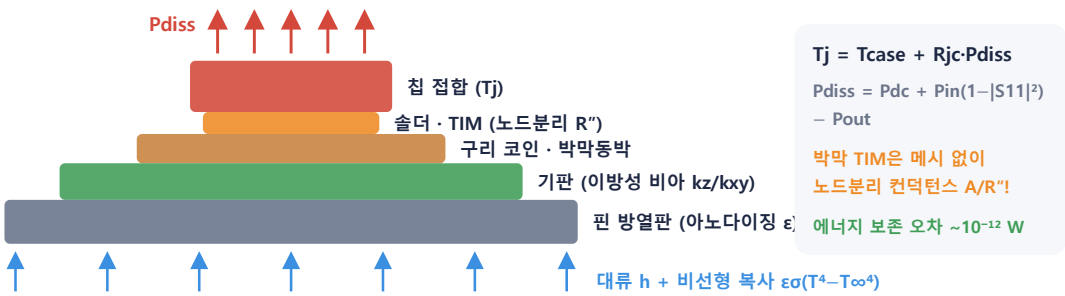


그림 27-5 칩 접합부(Tj)에서 주변 공기(T∞)까지 이어지는 직·병렬 열저항 사다리. 가장 저항이 큰 한 구간(병목)을 뚫어야 온도가 내려갑니다.

27.3 `Thermal Settings`와 `Thermal Materials` 핵심 설정

Thermal Settings에서는 미지정 외부면에 기본 적용할 주변 온도 T_∞, 대류 열전달 계수 h, 기본 방사율 ε, 정상상태·과도 해석 여부를 정합니다.

- **원클릭 대류 h 칩 [$\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$] —** 밀폐 자연대류 `5` · 개방 정지공기 `10` · 소형 팬 `30` · 강제 공랭 `100` · 수냉 콜드플레이트 `1000`.
- **자동 5τ 과도 적분 —** 과도 종료 시간을 `0`으로 두면 솔버가 모델의 열 시정수 τ를 스스로 추정해 정상상태의 99 % 이상에 도달하는 **약 5τ 시간까지 자동 계산**합니다!
- **이방성 재질 & 온도계수 — Thermal Materials**에서 다층 기판용 이방성 열전도율 (k_{xy}, k_z)과 역결합용 온도계수($\mathrm{TC}_{\varepsilon_r}$, 구리 $\mathrm{TC}_\sigma \approx -0.39\%/\mathrm{K}$)를 관리합니다.

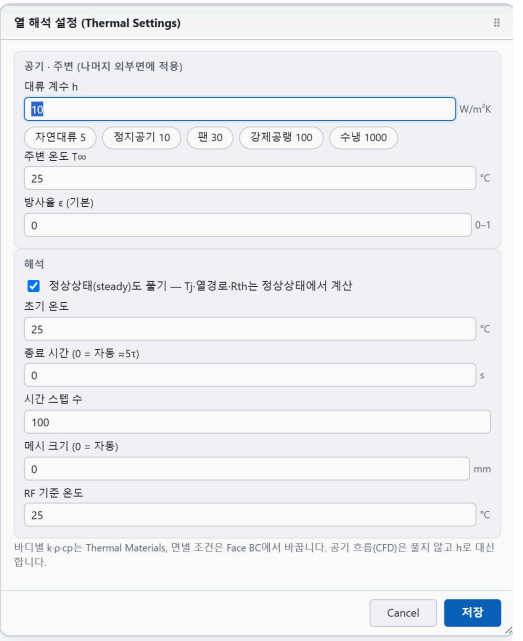


그림 27-6 Thermal Settings 대화상자. 환경별 대류 계수 h 원클릭 버튼과 자동 시정수 과도 해석을 지원합니다.

FIRST 3 MINUTES 생초보 3분 완주! 첫 3D 열해석 5단계 따라하기 (thermal_chip_on_board.warp)

1. **열해석 입문 샘플 열기**
   File ▸ Open Examples... 에서 `thermal_chip_on_board.warp` 를 더블클릭해 엽니다.
2. **Thermal 리본 진입**
   상단 리본 탭에서 **Thermal**을 클릭하면 좌측 트리가 열 전용 워크벤치 트리로 바뀌고 발열 칩·기판·방열 경계가 표시됩니다.
3. **원클릭 열해석 실행**
   리본 Thermal ▸ Run 을 누르면 수 초 안에 정상상태와 과도 온도장이 계산되어 3D 뷰포트에 무지개 온도 분포가 펼쳐집니다.
4. **시간 재생 & 단면 슬라이스**
   우측 열 결과 패널에서 **Time ▶ Play**를 눌러 칩에서 보드로 열이 퍼져 나가는 과정을 감상하고, **Cut plane**을 켜 기판 두께 방향 온도 구배를 확인합니다.
5. **마우스 클릭 온도 프로브**
   Pick probe point를 누르고 칩 윗면과 보드 모서리를 차례로 찍어 시간에 따른 가열 곡선($T(t)$)을 비교해 보세요!

28 CHAPTER

3대 발열원과 절점 분리 TIM · 박막 동박(Thin Copper)의 마법



트랜지스터 데이터시트 동작점에서 발열량을 자동 계산하고, 3D EM의 유전체·표피 손실을 열원으로 직결하며, 50 μm 솔더와 35 μm 동박을 메시 폭발 없이 정확하게 풀어내는 핵심 기법들을 다룹니다.

배울 것
Transistor 발열·접합온도 Tj 자동 산출

해 볼 것
반사·방사를 빼고 순수 열만 매핑하는 RF Loss → Heat

핵심 개념
메시 0개 절점 분리
Contact/TIM과 470 °C 차이를 가르는 Thin Copper

28.1 어디서 얼마나 뜨거워지는가? — 3대 열원(Sources)

① Transistor : RF 동작점에서 P_{diss}와 T_j 직결!

전력증폭기 소자 바디를 고르고 출력 P_{out} [W], 드레인 효율 η [%], 이득 G [dB]를 넣으면 열 손실 $P_{\text{diss}} = P_{\text{out}}/\eta + P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$와 접합온도 $T_j = T_{\text{case,max}} + R_{\text{th,jc}} \cdot P_{\text{diss}}$를 실시간 산출합니다.

예를 들어 $P_{\text{out}} = 10\ \text{W}, \eta = 60\%, G = 15\ \text{dB}, R_{\text{th,jc}} = 1\ \text{K/W}$를 넣으면 $P_{\text{diss}} = 6.983\ \text{W} (+6.983\ \text{K})$가 계산되며 한계 $T_{j,\max}$ 초과 시 경보를 울립니다. 일반 저항·히터는 ② Heat Source 로 체적 발열(W)이나 면 열유속(W/m^2)을 부여합니다.



그림 28-1 트랜지스터 열원(Tj) 대화상자. 4종 대표 GaN/LDMOS 프리셋과 실시간 Pdiss·여유 온도 계산기를 내장했습니다.

③ RF Loss → Heat : 3D 전자기 손실 분포를 그대로 열원으로! ONLY IN AETHER

고전력 필터, 도파관 아이리스, 유전가열 챔버처럼 **"어느 스텁 모서리가 가장 뜨거워지는지"** 알아야 할 때는 EM Setup에서 Save fields 를 켜 해석한 뒤 리본 **RF Loss → Heat**를 누릅니다!

- **유전체 체적 손실 + 도체 표피 손실 자동 적분** — 사면체 내부의 유전 손실 밀도 $\frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon''|\mathbf{E}|^2$와 도체 시트 양면/벽면의 표피 저항 손실 밀도 $\frac{1}{2}R_s|\mathbf{H}_t|^2$를 각 열 바디 위로 정밀 매핑합니다.
- **반사 전력 & 안테나 방사 전력 자동 제외!** — 입사 전력 P_{in} 가운데 포트로 되돌아간 반사 전력($|S_{11}|^2$)과 공중으로 날아간 안테나 방사 전력(P_{rad})은 기판을 데우지 않으므로 자동 차감하고 순수 소산 열만 정확히 스케일링합니다

(Th1 2.45 GHz 10 W 유전가열 예제: 흡수율 60.7 % = 6.07 W 열원 → 3초 후 액체 최고 온도 $42.2^{\circ}\mathrm{C}$ 정밀 재현).

28.2 면별 대류·비선형 복사(`Face BC`)와 방사율 ε의 위력

면 선택(`F`) 후 **Face BC**를 열면 특정 면에만 수냉 바닥 고정 온도, 단열 대칭면, 또는 대류+복사를 개별 지정합니다(법선·중심 좌표로 기억되어 치수 변경 후에도 유지!).

특히 스테판-볼츠만 복사 열전달 $q_{\mathrm{rad}} = \varepsilon\sigma_{\mathrm{SB}}(T^4 - T_{\infty}^4)$는 온도의 네제곱에 비례하는 강한 비선형 식이므로, 정상상태 솔버가 선형 근사 대신 **정확한 Newton-Raphson 반복법**으로 풉니다. 원클릭 방사율 칩을 눈여겨보세요: 반짝이는 연마 구리(`0.03`)나 생 알루미늄(`0.10`)은 적외선 복사를 거의 못 하지만, **흑색 아노다이징 알루미늄(`0.85`)**이나 **솔더마스크(`0.90`)**는 강력한 복사 방열기가 됩니다(31장에서 기적을 보여 줍니다!).



그림 28-2 면 경계 조건(Face BC). 표면 처리별 방사율 ε 원클릭 칩을 제공합니다.

28.3 미세 박막 메시 지옥을 끝내는 두 가지 비기: `Contact / TIM` & `Thin Copper`

ONLY IN AETHER

비기 ① — 절점 분리(Node-Splitting) `Contact / TIM`

$50\ \mu\mathrm{m}$ 두께의 서멀 그리스나 SAC305 솔더 층을 실제 3D 얇은 상자로 그리면 사면체 수백만 개가 깨지며 메시가 멈춥니다. **Contact / TIM**은 맞닿은 두 물체 경계면의 **FEM 절점을 수학적으로 둘로 쪼개고(node splitting) 면적당 열컨덕턴스 A/R''($R'' = t/k$)로 직결**합니다! 추가 부피 메시 **0개**로 소결 은($30\ \mu\mathrm{m}$), 솔더, 서멀 그리스, 갭패드의 온도 단차를 100 % 정확하게 계산합니다.

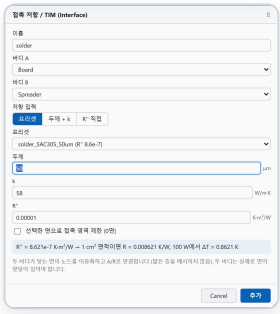


그림 28-3 접촉 열저항 / TIM 설정 창. 1 cm²당 100 W 통과 시 발생하는 온도 단차 ΔT를 즉석에서 환산해 보여 줍니다.

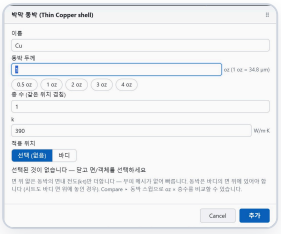


그림 28-4 박막 동박(Thin Copper) 설정 창. 0.5 ~ 4 oz 동박 두께와 내층 개수를 부피 메시 없이 반영합니다.

비기 ② — 595°C를 123.5°C로 낮추는 `Thin Copper`!

FR-4 유전체 자체는 열전도율이 $0.3\ \mathrm{W/(m{\cdot}K)}$인 단열재에 가깝고, 실제 PCB에서 열을 옆으로 넓게 펼쳐 주는 일등 공신은 $k = 401\ \mathrm{W/(m{\cdot}K)}$인 $35\ \mu\mathrm{m}$**(1 oz) 구리 동박 층**입니다!

EM에서 두께 0 시트로 그린 패치·접지면에 **Thin Copper**로 `1 oz × 층수`를 부여하면 접선 열전도 강성($k_{\mathrm{Cu}}tN$)이 즉시 살아납니다. 검증 예제 **Th3**에서 1 oz 박막 동박을 빼먹으면 최고 온도가 595°C로 치솟지만, 켜는 순간 실제 보드 온도인 123.5°C로 정확히 수렴합니다!

HOW TO **EM 손실을 열원으로 직결! RF Loss → Heat & 박막 동박 필수 세팅 4단계**

1. **Save fields EM 해석 완료**
   EM `Frequency Sweep`에서 발열을 볼 동작 주파수에 `Save fields`가 체크된 상태로 `F9` 해석을 마칩니다.
2. **Thin Copper 먼저 지정!**
   Thermal 리본으로 이동해 **Thin Copper**를 열고 시트 도체(신호선·접지면)에 실제 동박 두께(예: `1 oz = 35 μm`)를 부여합니다(빠뜨리면 수평 방열이 누락되어 온도가 비정상 급등!).
3. **TIM 접촉 저항 연결**
   맞닿은 칩-패드 또는 보드-방열판 사이에 **Contact / TIM**으로 솔더(`SAC305`)나 서멀 그리스를 지정합니다.
4. **RF Loss → Heat 매핑 & Run**
   리본 **RF Loss → Heat**를 열어 실제 인가 RF 전력(예: `Pin = 10 W`)을 입력해 열원으로 등록한 뒤 **Run**을 누릅니다!

29 CHAPTER

5대 방열 도우미 실전 가이드: 열비아 · 구리 코인 · 스프레더 · PCM · 펄스

소자가 뜨거울 때 무조건 팬부터 달지 마세요! 4 W급 QFN에 딱 맞는 이방성 열비아부터 220 W급 LDMOS를 살려 내는 구리 코인, 레이더 버스트 피크를 깎아 내는 상변화 물질(PCM)까지 상황별 최적 처방전을 비교합니다.



배울 것
발열 규모별 방열 도우미 선택 매트릭스

해 볼 것
이방성 균질화 Via Wizard(Th4: 272.7→75.9 °C)

핵심 개념
구리 코인(Th2) · 스프레더(Th5) · PCM 잠열 & 펄스 적분(Th6)

29.1 내 회로에는 어떤 방열 도우미가 정답일까?

방열 도우미	권장 발열 규모	핵심 작동 원리 · 실전 적용처
Thermal Via Wizard	소~중전력 ($1 \sim 15$ W)	FR-4/RO4350B 기판 아래 QFN/SOIC 패드에 도금·구리충전 비아 격자를 박아 바닥 방열판으로 열을 빼냅니다.
Copper Coin / 컷아웃	고전력 ($15 \sim 300$ W+)	비아로도 감당 안 되는 고출력 GaN/LDMOS 아래 기판을 관통해 순수 구리 덩어리(코인)나 페데스탈을 직결합니다.
Heat Spreader	밀폐 모듈 · 쉴드캔	놀고 있는 금속 쉴드캔이나 알루미늄 외함 천장을 서멀 패드(TIM)로 연결해 방열 면적을 수 배로 넓힙니다.
PCM + Pulse / Duty	간헐 버스트 · 레이더	평균 전력은 낮지만 수 초간 고출력이 터질 때 파라핀·갈륨의 **융해 잠열(Latent Heat)**로 피크 온도를 묶어 둡니다!

29.2 수백 개 비아를 1초 만에 비교·등가화: `Thermal Via Wizard` (Th4 검증)

비아 100개를 원기둥 솔리드로 일일이 뚫으면 메시만 수십만 개가 늘어납니다. **Via Wizard**는 최대 4가지 비아 공정(드릴 지름 d, 피치 p, 도금 두께, 레진 vs 구리 충전)을 나란히 놓고 **두께 방향 k_z는 정확한 면적 병렬 법칙**으로, **수평 방향 k_{xy}는 Maxwell–Rayleigh 유효매질 공식**으로 계산해 단일 이방성 블록으로 초고속 치환합니다!

Th4 검증 (FR-4 위 4 W QFN)	접합 온도 T_j	개선 효과
열비아 없음 (생 FR-4)	**272.7 °C**	소자 즉시 소손
$d = 0.3$ mm, $p = 1.0$ mm 레진 충전	100.7 °C	−172.0 K 급감!
$d = 0.3$ mm, $p = 0.6$ mm 구리 충전	77.4 °C	조밀 피치 + Cu 필
$d = 0.5$ mm, $p = 0.8$ mm 구리 충전	**75.9 °C**	쾌적한 양산 여유

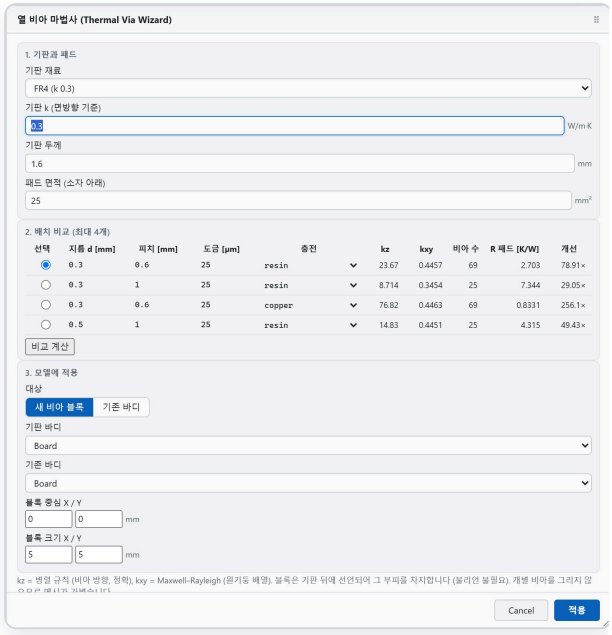


그림 29-1 Thermal Via Wizard. 공정별 등가 kz·kxy와 패드 열저항 개선 배수를 표로 한눈에 비교합니다.

29.3 대전력 직통 고속도로: `Copper Coin` (Th2) & `Heat Spreader` (Th5)

`Copper Coin`은 기판을 관통하는 구리 블록과 설계 변수(`Coin_w`, `Coin_l`), 그리고 소자 바닥 `SAC305 50 µm` 솔더 TIM까지 원클릭으로 생성합니다. 500 W급 LDMOS에서 열 손실 **220.6 W**가 쏟아지는 **Th2** 예제에서 기판만 두면 이론상 $2404^\circ\mathrm{C}$로 불타지만, 구리 코인을 박아 콜드플레이트에 직결하자 $T_j = 104.5^\circ\mathrm{C}$로 완벽히 제어됩니다!

`Heat Spreader`는 쉴드캔이나 금속 함체 바디를 고르면 맞닿는 모든 내부 부품에 와일드카드 TIM(`a = *`)을 일괄 체결합니다. **Th5** 예제에서 쉴드캔을 연결하자 $315.5^\circ\mathrm{C} \rightarrow \mathbf{150.6}^\circ\mathrm{C}$로 반토막 났고, 기판을 질화알루미늄(AlN)으로 바꾸자 $63.6^\circ\mathrm{C}$까지 내려갔습니다.

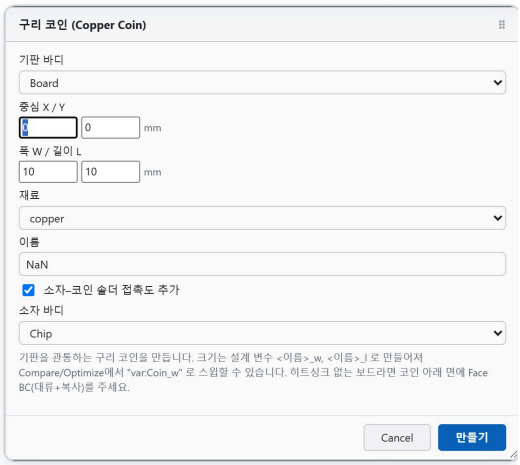


그림 29-2 구리 코인(Copper Coin) 생성 창. 향후 Optimize Tj 자동 치수 최적화와 바로 연동됩니다.

29.4 버스트 피크를 잠열로 삼키다: `PCM` & `Pulse / Duty` (Th6 검증)



그림 29-3 상변화 잠열 재료(PCM) 설정. 파라핀 RT55/RT70, 에리스리톨(118 °C), 갈륨(29.8 °C) 프리셋을 내장했습니다.

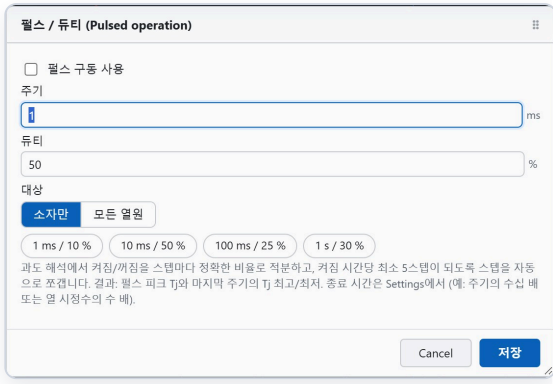


그림 29-4 펄스 / 듀티 설정. ON 구간마다 최소 5개 이상의 시간 스텝을 자동 배치해 펄스 피크 누락을 원천 방지합니다.



써미의 방열·열해석 코칭

얼음이 다 녹을 때까지 $0^\circ\mathrm{C}$를 유지하듯, **상변화 물질(PCM)**은 녹는점 T_m 부근에서 거대한 융해 잠열 L(엔탈피법)로 열을 흡수합니다! 6초 주기 50 % 듀티 버스트 예제(**Th6**)에서 파라핀 블록 하나가 피크 T_j를 $114.9^\circ\mathrm{C} \rightarrow \mathbf{103.3^\circ C}$(**–11.6 K 피크 컷!**)로 눌러 줍니다. 단, 연속 동작 정상상태에서는 잠열이 다 소모되므로 간헐 버스트 시스템에 쓰세요!

30 CHAPTER

열병목 추적(Heat Path) · 자동 최적화 · 온도→RF 양방향 결합



어디를 고쳐야 온도가 가장 많이 떨어질지 막대 하나로 짚어 주는 Heat Path, 목표 Tj 이하가 되는 최소 구리 코인 폭을 이분법으로 찾아내는 Optimize Tj, 그리고 뜨거워진 유전체가 공진 주파수를 얼마나 밀어내는지 되먹이는 Temp → RF까지 마스터합니다.

배울 것
3D 온도 단면·프로브·에너지 보존 ($<10^{-12}$ W) 검증

해 볼 것
Heat Path 구간별 병목 진단과 Compare 스윕

핵심 개념
이분법 Optimize Tj(Th8)와 Temperature → RF 수렴(Th7)

30.1 3D 온도장 · 시간 슬라이더 · `Heat Path` 병목 족집게 진단

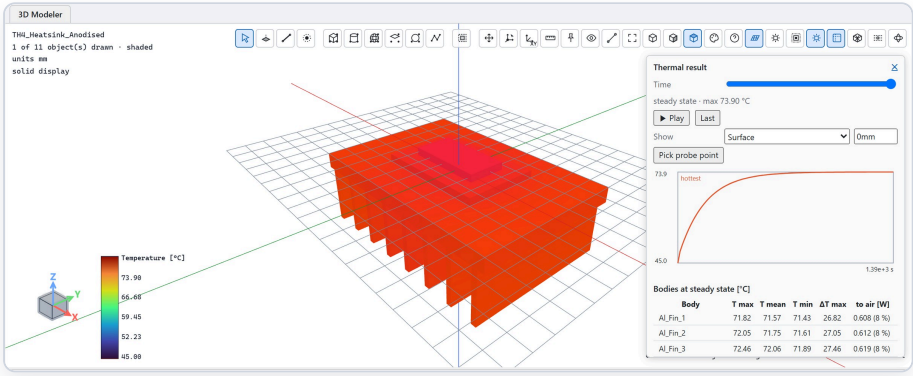


그림 30-1 Th2(220.6 W LDMOS + 구리 코인) 열해석 완료 화면. 우측 패널에서 과도 시간 재생, 단면 슬라이스, 클릭 프로브 온도 곡선, 바디별 공기 방열 분담률을 확인합니다.

해석 직후 Message Manager에는 **에너지 보존 수지 오차**($|\text{입력 W} - (\text{대류} + \text{복사} + \text{열저장} + \text{고정면 유출})| < 10^{-12}$ W)와 열 시정수 τ_{63}, t_{90}이 기록됩니다. 그다음 반드시 열어 볼 창이 리본 **Heat Path**입니다!

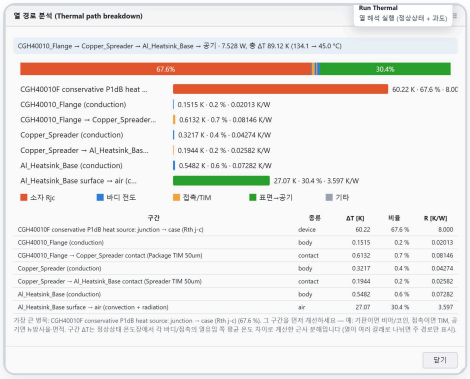


그림 30-2 Heat Path 열 경로 병목 분해 차트. 소자 내부 Rjc부터 솔더, 코인, 섀시까지 각 구간이 잡아먹는 ΔT(K)와 비율(%)을 직관적으로 분해합니다.

엉뚱한 곳을 고치는 헛수고를 막아 주는 `Heat Path`

왼쪽 Th2 열 경로 막대를 보세요! 전체 온도 상승 $\Delta T = 64.23\ \mathrm{K}$ 가운데 무려 **61.8 %가 트랜지스터 패키지 내부 열저항** $R_{\mathrm{th,jc}}$에서 발생하고, 구리 코인과 섀시 구간의 단차는 아주 작습니다.

즉, 이 상태에서 보드 구리 코인을 두 배로 키우거나 수냉 유량을 늘려 봤자 T_j는 몇 도 내려가지 않습니다! 더 낮은 T_j가 필요하다면 패키지 R_{jc}가 더 작은 상위 소자를 고르거나 2개 소자로 전력을 병렬 분배해야 한다는 결론이 3초 만에 나옵니다.

30.2 열해석 결과 쉽게 읽는 법: 안전 온도 기준 & 병목별 1초 처방표

열해석이 끝난 뒤 숫자가 안전한지 위험한지, 또 어느 부품을 고쳐야 할지 아래 실무 판정표 하나로 즉시 결정하세요.

확인 항목 · 병목 구간	실무 안전 기준 · 신호	원인 진단 & 가장 효과적인 즉각 처방전
GaN / Si 소자 접합 T_j	GaN $\leq 150 \sim 175^{\circ}\mathrm{C}$ Si / LDMOS $\leq 125 \sim 150^{\circ}\mathrm{C}$	절대 정격(200~225 °C) 대비 최소 $25 \sim 50\ \mathrm{K}$ 여유 확보 필수 (MTTF 수명 지수 비례!).
PCB 기판 최고 온도	일반 FR-4 $\leq 105 \sim 115^{\circ}\mathrm{C}$ (유리전이 $T_g \approx 135^{\circ}\mathrm{C}$)	T_g 근처에서 기판 박리·$\tan\delta$ 폭증! 고온부는 RO4350B / 세라믹(AlN) 교체 또는 `Thin Copper` 2 oz 증설.
`Heat Path` **1위: 기판(PCB)**	기판 구간 ΔT 비중 최대	수직 열 통로 부재 → 15 W 이하는 **구리 충전 열비아**, 15 W 이상은 **구리 코인 / 컷아웃 지그** 직결!
`Heat Path` **1위: 대기(Air)**	방열판 표면 $\rightarrow T_{\infty}$ 단차 최대	무풍 은색 금속 복사 불량 → **흑색 아노다이징($\varepsilon = 0.85$)** + 핀 면적 확대 또는 소형 팬($h \uparrow$).
`Heat Path` **1위: 소자** R_{jc}	패키지 내부 $\Delta T > 50\%$	외부 방열은 이미 한계치 도달! R_{jc}가 낮은 상위 패키지 교체 또는 2소자 밸런스드/도허티 분배.
과도 τ_{63} **& 에너지 오차**	수지 오차 $< 10^{-12}\ \mathrm{W}$	버스트 폭 $< \tau_{63}$이면 **PCM 잠열재**로 피크 억제 유효, 연속 동작이면 정상상태 열저항(R_{th}) 절감 필수.

30.3 What-If 일괄 비교(`Compare / Sweep`)와 목표 `Optimize Tj` (Th8 검증)



그림 30-3 Compare / Sweep. FR-4 · RO4350B · Al_2O_3 · AlN · IMS 기판 교체나 동박 oz×층수 매트릭스를 수 초 만에 비교합니다.



그림 30-4 목표 Tj 자동 최적화(Optimize Tj). 단조 이분법으로 최대 14회 열해석 안에 최적 설계 변수를 정확히 찾아냅니다.

Optimize Tj는 "접합온도 $T_j \le 130°C$를 만족하는 **가장 작은 구리 코인 폭(`Coin_w`)**이나 **가장 넓은 허용 비아 피치**가 얼마인가?"를 단조 이분법(monotonic bisection)으로 자동 탐색합니다. 검증 예제 **Th8**(300 W급 소자)에서는 단 10회 열해석 만에 목표 $130°C$를 턱걸이로 지키는 최소 코인 폭 `Coin_w = 5.83 mm` **($T_j = 129.6°C$)**를 자동으로 찾아냈습니다!

30.4 뜨거워진 공진기가 주파수를 밀어낸다: `Temp → RF` 양방향 결합 (Th7)

ONLY IN AETHER

고출력 필터나 세라믹 공진기가 열을 받으면 기판 유전율 $\varepsilon_r(T)$가 변해 공진 주파수 자체가 옆으로 흘러가고($\Delta f/f \approx -\frac{1}{2}\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_r$), 구리 도전율 $\sigma(T)$가 떨어져 삽입손실이 더 커집니다.

CLOSED LOOP **Temperature → RF 양방향 수렴 3단계**

1. **EM(Save fields) → RF Loss → Heat → Run Thermal**
   상온($25°C$) 물성으로 첫 EM 손실과 3D 온도장을 구합니다.
2. **Thermal ▸ Temp → RF ▸ 재료에 적용**
   각 바디 평균 온도로 보정된 파생 재질(`<이름>_T31C` 등, 중복 누적 방지 처리 내장!)과 예상 주파수 이동량(ppm)을 확인하고 적용합니다.
3. **재해석 수렴 확인**
   `F9` EM 재해석 → `RF Loss → Heat` 갱신 → `Run Thermal`을 돌립니다. 고전력 유전가열 공진기 예제(**Th7**, ε_r : $24.0 \to 23.43$ 열 드리프트)는 **단 2회 반복 만에 온도 변화 < 0.5 K로 완전 수렴**합니다!

정직하게 알아 둘 열 워크벤치의 물리 경계 (Solid FEM vs CFD)

Aether의 열해석기는 **고체 열전도 FEM + 표면 대류 계수 h + Newton 비선형 복사** 솔버이며, 공기 자체의 나비에-스토크스 유동장을 푸는 CFD(전산유체역학)는 아닙니다. 예를 들어 자연대류 히트싱크 핀 간격을 1 mm로 빽빽하게 좁히면 실제로는 공기가 막혀(boundary-layer choking) 냉각이 나빠지지만, 고정 h를 주면 면적이 늘었다고 온도가 낮게 계산될 수 있습니다. 자연대류 핀 간격은 최소 5~6 mm 이상 확보하고 상관식에 맞는 현실적인 h를 입력하시기 바랍니다.

31 CHAPTER

[심화 특집] GaN PA 전기-열 통합 냉각 설계와 메탈 지그(Jig)



소음과 고장 원인이 되는 냉각 팬을 달지 않고도 표면 흑색 아노다이징 처리(ε = 0.85) 하나로 GaN PA 온도를 26.1 K 낮춰 양산 규격을 통과한 실전 비결과, 열폭주(DE tempco) 진단법, 기판 컷아웃 알루미늄 지그 설계법을 공개합니다!

배울 것
3점 비선형 열 FEM Rca(P) 특성화

해 볼 것
이득 tempco의 착시와 진짜 열폭주를 잡는 DE tempco

핵심 개념
흑색 아노다이징 −26.1 K 기적 (TH1~TH4)과 컷아웃 방열 지그 + 공동 공진 회피

31.1 왜 똑같은 알루미늄 히트싱크인데 색깔만 까맣게 바꿨더니 26.1 °C가 떨어졌을까?

배포 예제 `pa_v2/CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal_v2.warp`에는 5.8 GHz 10 W급 GaN HEMT(`CGH40010`, 동작점 발열 $P_{\mathrm{diss}} = 7.53\ \mathrm{W}$, 혹서기 주변 온도 $T_{\infty} = 45^{\circ}\mathrm{C}$, 안전 한계 $T_{j,\max} = 150^{\circ}\mathrm{C}$)에 대한 **4가지 냉각 설계(`TH1`~`TH4`)**가 한 프로젝트 안에 들어 있습니다.

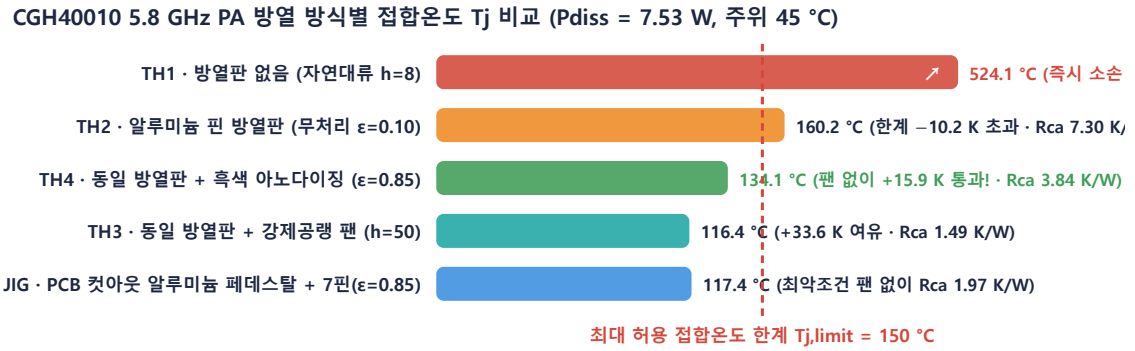


그림 31-1 CGH40010 GaN PA(발열 7.53 W, 주변 45 °C)에 대한 TH1~TH4 냉각 방식별 케이스-대기 열저항 Rca와 최종 접합온도 Tj 실측 FEM 비교.

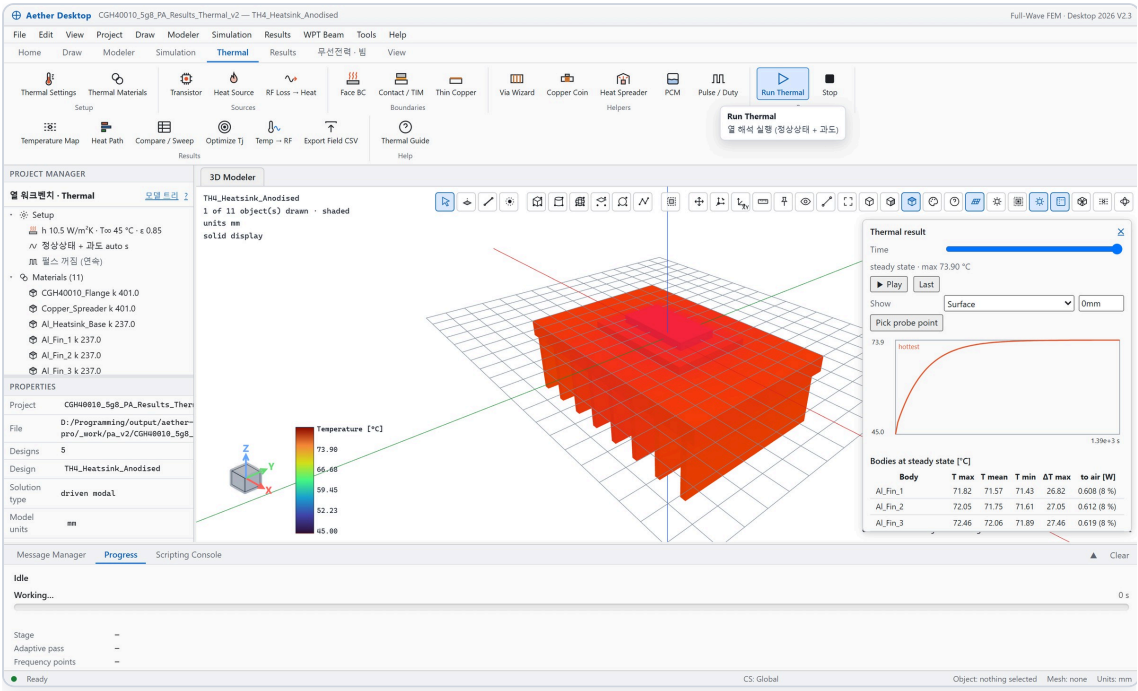


그림 31-2 TH4_Heatsink_Anodised 디자인의 3D 열해석 결과. 팬 없는 자연대류(h=10.5 W/m²K)에서도 흑색 아노다이징 복사(ε=0.85) 덕분에 히트싱크 최고 온도가 73.9 °C, 칩 내부 접합온도 Tj가 134.1 °C(한계 대비 +15.9 K 여유!)로 안착합니다.

냉각 디자인	조건 요약	R_{ca} (K/W)	최종 T_j ($T_{\text{amb}} = 45^{\circ}\text{C}$)	판정 (150°C 한계)
TH1 No Heatsink	방열판 없는 단품 보드 노출	55.65	**524.1 °C**	즉시 소손 (−374 K)
TH2 Heatsink Natural	무처리 은색 가공 알루미늄 핀 ($\varepsilon = 0.10$, 무풍)	7.30	**160.2 °C**	**규격 탈락 (−10.2 K 초과!)**
TH4 Heatsink Anodised	**TH2와 형상 100 % 동일 + 흑색 아노다이징 ($\varepsilon = 0.85$)**	**3.84**	**134.1 °C**	**무팬 통과! (+15.9 K 여유, −26.1 K 절감!)**
TH3 Heatsink Forced	강제 공랭 팬 부착 (h 증가)	1.49	**116.4 °C**	통과 (+33.6 K 여유, 이후는 $R_{jc} = 8$이 병목)



써미의 방열·열해석 코칭

강제 공랭 팬이 없는 옥외 기지국이나 무소음 장비에서는 자연대류만으로는 열의 절반밖에 못 뺍니다! 은색 가공 알루미늄($\varepsilon = 0.10$)은 적외선을 거울처럼 가두지만, 저렴한 **흑색 아노다이징 표면 처리($\varepsilon = 0.85$)**만 입히면 적외선 복사 방열이 $0.56\ \text{W} \rightarrow 2.77\ \text{W}$**(약 5배!)**로 폭발해 열저항 R_{ca}가 $7.30 \rightarrow 3.84\ \text{K/W}$로 반토막 나며 팬 하나 없이 $26.1\ \text{K}$를 깎아 냅니다!

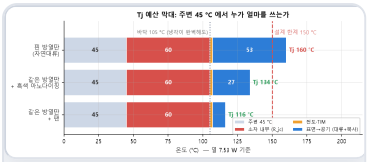


그림 31-3 ① 열 예산의 바닥(105 °C): 45 °C 대기에 패키지 Rjc(8 K/W × 7.53 W = 60.2 K)만 더해도 이미 105.2 °C! 방열판 Rca는 5.95 K/W 이하여야 생존합니다.

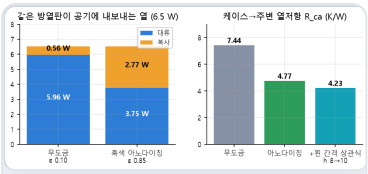


그림 31-4 ② 흑색 아노다이징의 물리: 형상은 그대로인데 적외선 복사 방출량이 0.56 W → 2.77 W로 5배 뛰어오르며 26.1 K를 깎아 냅니다!

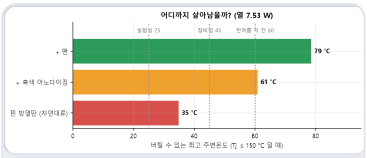


그림 31-5 ③ 냉각안별 생존 가능 최고 대기 온도: TH2(무처리)는 34.8 °C에서 탈락하지만 TH4(아노다이징)는 60.9 °C 폭염까지 버틴니다!

31.2 PA Tuner 속 `Heat and cooling` 과 `DE tempco` 열폭주의 비밀! NEW V2.3

ONLY IN AETHER

`PA Results` 창에서 섹션 `4 · Heat and cooling`을 펼치고 **Characterise cooling designs** 버튼을 누르면, 프로젝트 안의 `TH1`~`TH4` 디자인들을 각각 $0.5\times, 1\times, 1.5\times$ 발열량에서 3점 열 FEM으로 풀어 복사·자연대류 비선형성이 살아 있는 $R_{ca}(P)$ **보간 곡선**으로 등록합니다(입력 전력을 바꿀 때마다 0.1초 만에 모든 방열판의 T_j 곡선이 동시에 그려집니다!).

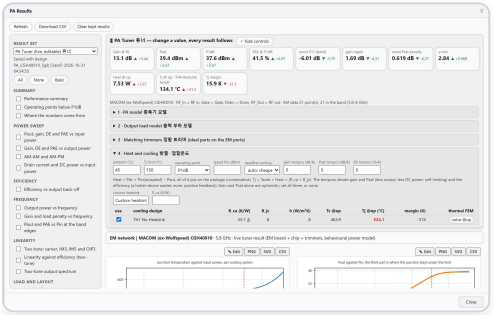


그림 31-6 PA Results의 Heat and cooling 섹션. 입력 전력별 접합온도 곡선과 안전 출력 구간을 실시간 진단합니다.

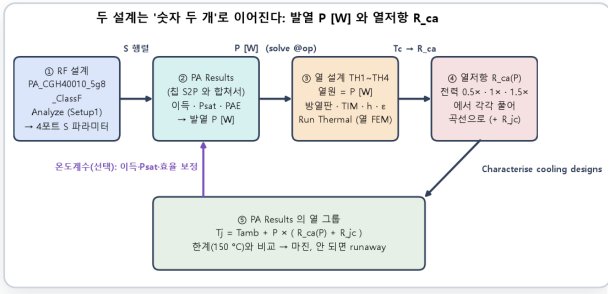


그림 31-7 3점(0.5×, 1×, 1.5× 발열량) 열 FEM으로 추출한 비선형 Rca(P) 보간 곡선. 온도가 오를수록 복사(T^4) 비중이 커져 열저항이 완만히 낮아지는 현상까지 반영합니다.

CREW COMIC **전문가 필독 — 왜 이득(Gain) 온도계수만 넣으면 열폭주를 절대 못 잡을까?**



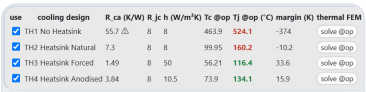
포티 써미야! 온도가 오르면 GaN 이득이랑 포화출력이 떨어지니까 `gain tempco = -0.015 dB/K`, `Psat tempco = -0.01 dB/K`만 넣었더니 온도가 적당히 오르다 알아서 멈추던데? 안전하네!

써미 큰일 날 소리!! 이득과 P_{sat} 음수 계수만 켜면 온도가 오를 때 출력과 DC 전류가 같이 줄어들어 발열이 줄어드는 **가짜 자기제한(낙관적 착시)**이 생겨!



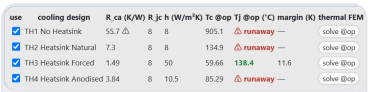


위즈 맞아! 현실에서는 소자가 뜨거워질수록 **드레인 효율(DE) 자체가 깎여서** 같은 출력을 내느라 열을 더 뿜는 **양의 되먹임(Positive feedback = 열폭주!)**이 일어난단다. 아래 3단계 실측 비교처럼 반드시 `DE tempco` **(예: `-0.15 %/K`)까지 세 개를 모두 함께** 넣어야 진짜 `⚠ thermal runaway` 임계점을 잡아낼 수 있어!



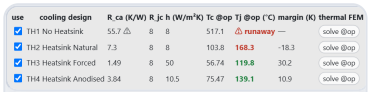
use	cooling design	R_ca (K/W)	R_jc	h (W/m²K)	Tc @op	Tj @op (°C)	margin (K)	thermal FEM
☑	TH1 No Heatsink	55.7 ⚠	8	8	463.9	524.1	-374	solve @op
☑	TH2 Heatsink Natural	7.3	8	8	99.95	160.2	-10.2	solve @op
☑	TH3 Heatsink Forced	1.49	8	50	56.21	116.4	33.6	solve @op
☑	TH4 Heatsink Anodised	3.84	8	10.5	73.9	134.1	15.9	solve @op

그림 31-8 ① 온도계수 OFF(Cold): 고정 발열량으로만 계산해 열폭주 징후가 전혀 보이지 않습니다.



use	cooling design	R_ca (K/W)	R_jc	h (W/m²K)	Tc @op	Tj @op (°C)	margin (K)	thermal FEM
☑	TH1 No Heatsink	55.7 ⚠	8	8	905.1	⚠ runaway	—	solve @op
☑	TH2 Heatsink Natural	7.3	8	8	134.9	⚠ runaway	—	solve @op
☑	TH3 Heatsink Forced	1.49	8	50	59.66	138.4	11.6	solve @op
☑	TH4 Heatsink Anodised	3.84	8	10.5	85.29	⚠ runaway	—	solve @op

그림 31-9 ② DE tempco(−0.15 %/K) 단독 ON: 효율 저하→발열 증가 루프로 TH1·TH2·TH4가 연쇄 열폭주!



use	cooling design	R_ca (K/W)	R_jc	h (W/m²K)	Tc @op	Tj @op (°C)	margin (K)	thermal FEM
☑	TH1 No Heatsink	55.7 ⚠	8	8	517.1	⚠ runaway	—	solve @op
☑	TH2 Heatsink Natural	7.3	8	8	103.8	168.3	-18.3	solve @op
☑	TH3 Heatsink Forced	1.49	8	50	56.74	119.8	30.2	solve @op
☑	TH4 Heatsink Anodised	3.84	8	10.5	75.47	139.1	10.9	solve @op

그림 31-10 ③ 3종 tempco(Gain·Psat·DE) 동시 ON: 현실 물리 수렴! TH1만 폭주하고 TH4는 139.1 °C로 생존!

31.3 실전 하드웨어 정석: 기판 컷아웃(Cut-out) 알루미늄 메탈 지그 설계

25 W급 패키지 트랜지스터 (`pa_cg2h40010_5g8_jig.warp`)를 테스트하거나 양산할 때 가장 확실한 방열 구조는 열전도가 나쁜 PCB 기판을 아예 거치지 않는 것입니다!

- **PCB 중앙 컷아웃 + 페데스탈 직결** — 기판 중앙을 사각형으로 따내고, 알루미늄 지그 바닥에서 솟아오른 페데스탈(pedestal) 윗면에 트랜지스터 구리 플랜지를 서멀 그리스($50\ \mu\mathrm{m}$)와 함께 직접 볼트 체결합니다. 입·출력 리드만 양옆 RO4350B 기판 위 마이크로스트립에 솔더링됩니다.
- **7핀 흑색 아노다이징 자연대류 지그 성능** — 핀 간격 6 mm($h \approx 10.1\ \mathrm{W/m^2K}$ 상관식), $\varepsilon = 0.85$ 적용 결과 무팬 상태에서 무려 $R_{ca} = 1.97\ \mathrm{K/W}$ 달성! 표준 발열 4.71 W 시 $T_j = 92.0^{\circ}\mathrm{C}$, 최악 7.26 W·주위 $45^{\circ}\mathrm{C}$에서도 $T_j = 117.4^{\circ}\mathrm{C}$로 거뜬히 버팁니다.
- **전자기 함정 경고 — 금속 뚜껑 캐비티 공진!** — $28 \times 35\ \mathrm{mm}$ 크기의 이 메탈 지그 위에 금속 차폐 뚜껑을 덮어 버리면 내부 공기 공간이 **6.0~6.9 GHz** TE_{101} **공동 공진기**가 되어 5.8 GHz PA 이득을 교란하고 발진을 부릅니다! 지그는 상부 개방형으로 두거나, 차폐가 필수라면 뚜껑 안쪽에 전자파 흡수 시트(13장 Impedance 경계)를 부착하고 반드시 3D FEM으로 함께 검증하세요.

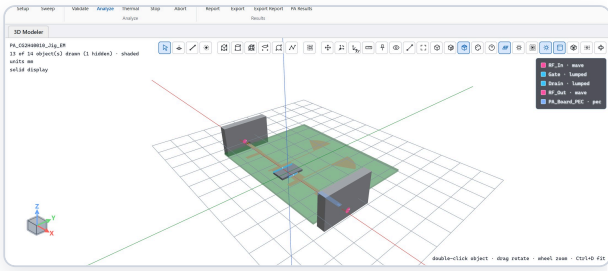


그림 31-11 기판 컷아웃 알루미늄 방열 지그 위에 실장된 5.8 GHz CG2H40010 Class-F PA 3D 모델(pa_cg2h40010_5g8_jig.warp).

PART

07

실전 설계 따라하기 마스터클래스 Ctrl+N 백지 좌표부터 GaN PA 8대 미션까지

눈으로만 읽는 설명서는 덮는 순간 잊히지만, 손끝으로 직접 치수를 치고 슬라이더를 밀어 본 경험은 평생 엔지니어의 무기가 됩니다. 7부에서는 **백지 상태(Ctrl+N)에서 Tab 좌표 입력만으로 안테나를 처음부터 완성하는 입문 실습**부터, 1×4 배열 자동 급전과 80 GHz 레이더 위상 반전 사건, 도형 놀이터 1패스 공간 사상(Solved at), WPT 렉테나 회로도 역반영, 그리고 **CGH40010 · CG2H40010 GaN 전력증폭기 8단계 탐정 미션과 메탈 방열 지그 설계**까지 클릭 순서 그대로 따라 하며 전문가의 실전 감각을 완벽히 체득합니다.



32 따라하기 1 (입문) · 백지(Ctrl+N)에서 좌표로 그리는 다이폴 & 패치 안테나

33 따라하기 2 (초중급) · 1×4 배열 자동 급전 · 실시간 빔 조향 · 80 GHz 위상 사건

34 따라하기 3 (중급) · 도형 놀이터 (rf_shapes_playground) & 1패스 공간 사상 정복

35 따라하기 4 (중고급) · 5.8 GHz WPT 렉테나 + 7포트 정류기 HB & 회로도 역반영

36 따라하기 5 (전문가 미션편) · CGH40010 5.8 GHz GaN PA 튜너 어드벤처

37 따라하기 6 (플래그십 R&D) · CG2H40010 −33 % 소형화 · 기생 감사 · 메탈 지그 설계

32 CHAPTER

따라하기 1 (입문) · 백지(Ctrl+N)에서 좌표로 그리는 다이폴 & 패치 안테나

배포 파일을 열어 보는 것을 넘어, 아무것도 없는 빈 화면에서 키보드 좌표 입력만으로 두 개의 기준 안테나를 처음부터 끝까지 직접 완성합니다. 솔버의 정확도를 검증하는 3 GHz 반파장 다이폴과, 정합 착시를 일깨워 주는 5.8 GHz FR-4 패치 안테나입니다.



배울 것
Ctrl+N 백지 출발 · 정확한 mm 좌표 입력 실습

해 볼 것
Port (pick) 원클릭 급전과 이론 지향성(2.15 dBi) 대조

핵심 개념
FR-4 유전 손실(η=46 %) 확인과 Antenna Designer 30초 검증

LAB 32-A · ZERO TO FIRST ANTENNA

난이도 ★☆☆ · 소요 12분

실습 A: 빈 프로젝트에서 3 GHz 반파장 다이폴 안테나 직접 완성하기

목표: 두 도체 팔과 2 mm 급전 시트를 정확한 수치로 세우고, 이론 지향성(2.15 dBi)과 0.04 dB 이내 일치를 내 손으로 확인합니다.

32.1 Step 1 · 새 프로젝트 생성과 4개 도형 좌표 입력

`Ctrl`+`N`(**File** ▸ **New Project**)을 눌러 빈 디자인을 엽니다. 상태줄 우측 단위가 `mm`인지 확인한 뒤, 상단 메뉴 **Draw** ▸ **Box...** 와 **Draw** ▸ **Rectangle...** 을 열어 아래 표의 숫자를 순서대로 입력하세요. 3 GHz 자유공간 파장은 $\lambda_0 = 99.93\ \mathrm{mm}$이며, 두께 2 mm 도체 팔의 끝단 프린징 용량을 고려해 전체 길이를 $0.417\,\lambda_0 \approx 41.66\ \mathrm{mm}$로 잡습니다.

객체 이름	명령 (평면)	시작 위치 `(X, Y, Z)` [mm]	크기 `(dX, dY, dZ)` [mm]	재질 / 역할
Arm_Top	Box	`(-1, -1, 1)`	`(2, 2, 19.83)`	`pec` (위쪽 도체 팔)
Arm_Bottom	Box	`(-1, -1, -20.83)`	`(2, 2, 19.83)`	`pec` (아래쪽 도체 팔)
Feed	Rectangle (XZ)	`(-1, 0, -1)`	`dX = 2, dZ = 2`	시트 (급전 간극 브리지)
Air	Box	`(-50, -50, -70)`	`(100, 100, 140)`	`vacuum` ($\geq \lambda_0/2$ 여유)

마우스 + `Tab` 키로 빠르게 그리는 요령: 리본에서 **Box** 아이콘을 누른 뒤 뷰포트를 클릭하기 전에 바로 `Tab` 키를 누르면 좌측 수치 입력 칸에 커서가 들어갑니다. `-1, -1, 1` → `Enter` → 크기 `2, 2, 19.83` → `Enter`를 치면 마우스 흔들림 없이 0.01 mm 단위로 정확히 생성됩니다!

이름을 `Air`로 지으면 재질이 자동으로 `vacuum`이 되고 반투명 처리되어 내부 다이폴이 선명하게 들여다보입니다.

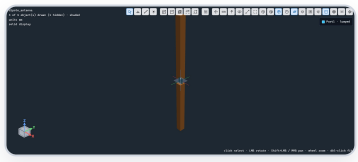


그림 32-1 완성된 3 GHz 다이폴 형상(배포본 dipole_antenna.warp와 동일). 중앙 빨간 시트(Feed)가 50 Ω Lumped Port입니다.

32.2 Step 2 · 포트 · 흡수 경계 · 국부 메시 · Setup 설정 (클릭 그대로!)

1. **50 Ω Lumped Port 지정**

   트리에서 `Feed` 시트를 우클릭 → **Assign Excitation ▸ Lumped Port...**를 엽니다. 저항 `50` Ω, 적분 방향(Direction)을 `+Z`(아래 팔 $z=-1 \rightarrow$ 위 팔 $z=+1$)로 두고 **OK**를 누릅니다. (또는 리본 **Port (pick)**을 눌러 `Arm_Top` 밑면 클릭 → `Arm_Bottom` 윗면 클릭 → **Apply**를 누르면 `Feed` 시트 생성과 포트 할당이 3초 만에 한 번에 끝납니다!)

2. **Radiation 개방 경계**

   트리에서 `Air` 우클릭 → **Assign Boundary ▸ Radiation**을 선택해 바깥 6개 면 전체를 자유공간 흡수 경계로 감쌉니다.

3. **급전 틈 국부 메시 보강**

   `Feed` 우클릭 → **Assign Mesh Operation ▸ On Selection...**에서 최대 모서리 길이 `1.0mm`를 지정합니다(도체 팔에는 `2.5mm` 권장).

4. **Setup & Sweep 추가 후 `F9` 실행!**

   Simulation ▸ Add Solution Setup...에서 주파수 `3GHz`, Max passes `3`, $\Delta S = 0.02$, Basis order `Second order (2차 요소)`를 고르고, 이어서 `2.6GHz` ~ `3.4GHz`(`Interpolating` 또는 `Fast`, `Save fields` 체크!) 스윕을 추가합니다. `F5` 검사 통과 확인 후 `F9`를 누릅니다!

32.3 Step 3 · 결과 판독과 물리 이론 대조

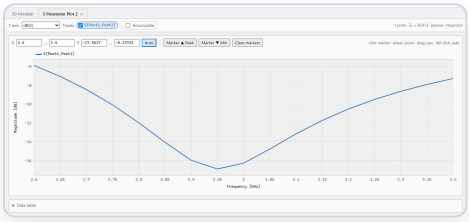


그림 32-2 직접 만든 다이폴의 S11 곡선. 2.95 GHz에서 −16.89 dB로 공진하며 16.2 %의 넉넉한 대역폭을 보입니다.

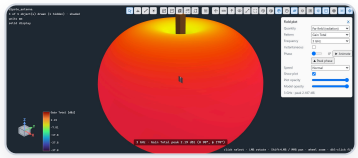


그림 32-3 3D 방사 패턴(Results ▸ Far Field ▸ 3D pattern). ±z축 영점과 적도면 2.19 dBi 피크가 선명합니다.

- **이론해와 0.04 dB 일치 검증** — **Results ▸ Far Field Radiation Pattern...**을 열면 최대 지향성 **2.19 dBi**($\theta = 90°$), 방사 효율 **100 %**가 찍힙니다. 전자기학 교과서의 반파장 다이폴 엄밀해(**2.15 dBi**)와 불과 0.04 dB 차이입니다!
- **살아 움직이는 정재파 전류 관찰** — **Results ▸ Surface Current |Js|**를 켜고 우측 패널에서 **Instantaneous + ▶ Animate**를 눌러 보세요. 중앙 급전부에서 전류가 최대이고 양 끝단 개방점($z = \pm 20.83$ mm)에서 정확히 0으로 묶이는 반파장 정재파가 눈앞에서 맥동합니다.

LAB 32-B · PATCH FROM SCRATCH & WIZARD RACE

난이도 ★☆☆ · 소요 15분

실습 B: 5.8 GHz FR-4 패치 안테나 수동 제작 vs Antenna Designer 30초 대결!

목표: 저가 FR-4 기판 위 패치를 좌표로 직접 그려 'S11 = −20 dB인데 절반이 열로 사라지는 정합 착시'를 확인하고, 위저드 자동 튜닝과 비교합니다.

32.4 Step 1 · 5.8 GHz 프로브 급전 패치 좌표표 (`patch_antenna.warp` 동일 제원)

새 디자인을 열고 아래 4개 객체를 입력합니다(기판: `FR4_epoxy`, $\varepsilon_r = 4.4, \tan\delta = 0.02, h = 1.6$ mm). 급전점을 방사 모서리($x = +5.47$ mm)에서 안쪽으로 2.7 mm 들여보낸 $x = 2.77$ mm 위치에 세로 급전 리본 시트를 세웁니다.

객체 이름	명령 (평면)	시작 위치 `(X, Y, Z)` [mm]	크기 [mm]	경계 / 포트 지정
Substrate	Box	`(-16, -16, 0)`	`(32, 32, 1.6)`	재질 `FR4_epoxy` · 바닥면($z = 0$)에 **Perfect E (Ground)**
Patch	Rectangle (XY)	`(-5.47, -7.85, 1.6)`	`10.94 × 15.7`	시트 우클릭 → **Perfect E** ($L_p = 10.94, W = 15.7$ mm)
Feed	Rectangle (YZ)	`(2.77, -0.5, 0)`	`dY=1.0, dZ=1.6`	**Lumped Port** (50 Ω, `+Z` 방향)
Air	Box	`(-29, -29, 0)`	`(58, 58, 17.1)`	**바닥($z = 0$) 제외한 5개 외벽만** `Radiation` 할당!

`Setup1`(`5.8GHz`, 5패스, 2차 요소)과 `5.3~6.3GHz` 스윕을 돌려 보면 S_{11}은 -20.3 dB **@ 5.75 GHz**(5.8 GHz에서 -19.9 dB, 2.45 GHz 판에서는 -28.5 dB)로 완벽하게 정합됩니다. 하지만 원거리장 표를 여는 순간 깜짝 놀라게 됩니다!

FR-4의 큰 유전 손실($\tan\delta = 0.02$) 때문에 공진 패치 아래 갇힌 전기장 에너지의 절반 이상이 열로 소모되어 **방사 효율** $\eta_{\text{rad}} \approx 46\%$ (지향성 대비 이득이 **3.38 dB 증발!**)에 그칩니다.

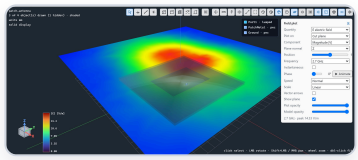


그림 32-4 패치 단면 |E| 분포. 양쪽 방사 슬롯 아래 FR-4 내부에 강한 전기장이 갇혀 유전열 손실을 일으킵니다.

입문자의 평생 철칙: 50 Ω 더미 저항도 VNA에서 찍으면 $S_{11} = -\infty$ dB가 나옵니다! 안테나는 반드시 **실현 이득(Realized Gain)과 방사 효율(η_{rad})**까지 확인해야 진짜 합격입니다. 이제 **Draw ▸ Antenna Designer...** ONLY IN AETHER를 열어 기판만 `RO4003C`로 바꾸고 `Auto-tune (FEM)`을 눌러 보세요 — 내가 15분 걸려 맞춘 패치가 단 1회 자동 보정 만에 **5.804 GHz, $S_{11} = -23.8$ dB, 효율 80 %+**로 완성됩니다!

33 CHAPTER

따라하기 2 (초중급) · 1×4 배열 자동 급전 · 실시간 빔 조향 · 80 GHz 위상 사건



단일 패치를 4개 묶어 이득을 12.2 dBi로 끌어올리고, 이틀 걸리던 분배망 배선을 Auto Feed + Feed Tune으로 1분 만에 끝냅니다. 이어서 재해석 없이 빔을 꺾는 Edit Sources와 80 GHz 차량용 레이더 배열의 아찔한 위상 반전 사건까지 해결합니다!

배울 것
RO4003C 1×4 기업형 급전과 Feed Tune(11.7°→1.45°)

해 볼 것
Edit Sources 무재해석 실시간 빔 조향과 유한 접지 측면파

핵심 개념
80 GHz 2×2 배열의 정면 빔 분열(−4.8 dBi) 원인과 U자 지연선 해법

LAB 33-A · CORPORATE FEED & FEED TUNE

난이도 ★★☆ · 소요 15분

실습 A: 5.8 GHz 1×4 배열 해석과 원클릭 Auto Feed Network 합성

대상 샘플: `examples/patch_array_1x4_5g8.warp` + `Auto Feed Network` ONLY IN AETHER

먼저 배포 예제 `patch_array_1x4_5g8.warp`를 열어 `F9`를 실행해 봅니다. 저손실 `RO4003C` ($h = 0.813$ mm, $\tan\delta = 0.0027$) 위에서 100 Ω 인셋 급전선이 T-접합(50 Ω)과 $\lambda_g/4$ 변환기(70.7 Ω)를 거쳐 중앙 포트로 모입니다.

- **고속 ROM 스윕 위력 확인** — 하단 로그를 보면 41개 주파수 점 가운데 솔버가 실제로 행렬 분해를 수행한 앵커는 단 **9점**뿐인데도 전 대역 곡선이 매끄럽게 복원됩니다!
- **성능 검증** — $S_{11} = -23.24$ dB **@ 5.78 GHz**, 정면 실현 이득 **12.20 dBi**(단일 소자 대비 +6 dB 이론치 일치), 방사 효율 **86 %**를 달성합니다.

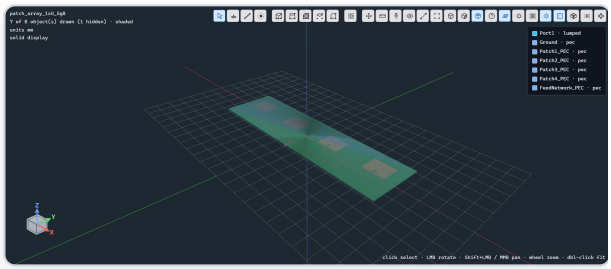


그림 33-1 RO4003C 기판 위의 5.8 GHz 1×4 기업형 급전 패치 배열 (patch_array_1x4_5g8.warp).

HANDS-ON **손으로 T-접합 그리지 마세요! Auto Feed + Feed Tune 4단계**

ONLY IN AETHER

1. **포트 끝면 순서대로 선택**

   `F` 면 선택 모드에서 **첫 번째로 공통 입력 선로 끝면**을 클릭하고, `Ctrl`을 누른 채 **패치 4개의 급전 끝면**을 왼쪽부터 차례로 클릭합니다(총 5개 선택).

2. **Auto Feed Network 실행**

   리본 **Draw ▸ Auto Feed Network**를 열고 진폭 분포(`Uniform` 또는 저부엽 `Taylor -20 dB`)와 위상 진행각(예: `0, 90, 180, 270°`)을 고른 뒤 **Build**를 누르면 윌킨슨 격리 저항(100 Ω RLC)까지 포함된 분배 트리가 즉시 깔립니다!

3. **Feed Tune 1회로 위상 오차 제압**

   초기 공식 합성본은 T-접합 기생과 미앤더 결합 때문에 3D FEM에서 최대 11.7° 위상 오차가 납니다. 리본 **Feed Tune**을 눌러 보정 루프를 단 **1회** 돌리면 보정선 길이가 자동 역산되어 **최대 위상 오차** 1.45°**, 진폭 편차** 0.05 dB**, 격리도** 19.1 dB로 칼같이 정렬됩니다!

LAB 33-B · ZERO-RESOLVE BEAM STEERING

난이도 ★★☆ · 소요 8분

실습 B: FEM 재해석 0초! `Edit Sources`로 실시간 위상 빔 조향하기

대상 샘플: `examples/wpt_tx_beamforming_5g8.warp`

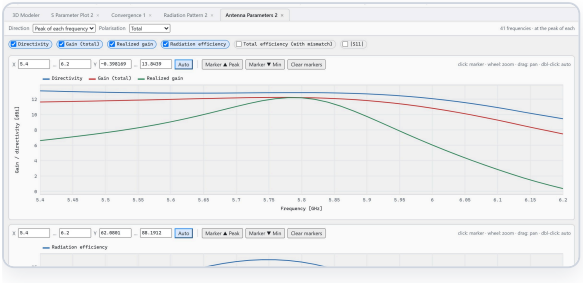


그림 33-2 배열 안테나 주파수별 이득·효율 지표. Edit Sources와 결합하면 위상기 시나리오를 즉시 비교합니다.

`wpt_tx_beamforming_5g8.warp`에는 분배망 대신 패치 4개 각각에 독립 50 Ω 포트(`P1~P4`)가 달려 있습니다. 1회 해석이 끝난 상태에서 상단 메뉴 **Results ▸ Edit Sources...**를 여세요!

1. **진폭·위상 가중치 입력**
   `P1~P4`에 각각 `1 W`, 위상 `0°, 66°, 132°, 198°`를 입력하고 **Apply**를 누릅니다.

2. **재해석 없이 주빔 이동 확인!**
   원거리장 창 상단 여기 목록을 `Sources (Edit Sources)`로 바꾸고 주파수를 `5.825 GHz`로 고르는 즉시, 행렬 재풀이 없이 주빔이 $\theta = 21^\circ$ **방향(13.1 dBi)**으로 휙 꺾입니다!

숨은 실전 포인트: 유한 접지면 위 패치 배열은 수평면($\theta = 90^\circ$) 측면 방사가 E면(**+2.8 dBi**)과 H면(**−11.8 dBi**)에서 무려 **15 dB**나 차이 납니다! 테이퍼 급전을 걸어도 E면 회절파는 줄지 않으므로 주변 Wi-Fi 기기는 반드시 배열의 H면 축 쪽에 배치해야 간섭을 피합니다.

LAB 33-C · 80 GHZ RADAR DETECTIVE CASE

난이도 ★★★ · 소요 10분

실습 C [탐정 사건]: 왜 80 GHz 2×2 레이더 배열의 정면 이득이 −4.8 dBi 구멍이 났을까?

대상 샘플: `examples/patch_array_2x2_80g.warp` (RO3003 0.25 mm 밀리미터파 보드)

사건 개요 **위아래 대칭으로 예쁘게 그린 2×2 패치 배열인데, 정면($\theta = 0^\circ$)으로 전파가 안 나가고 양옆 $\pm 28^\circ$로 두 갈래 쪼개집니다!**

범인은 중앙 T-접합의 기하학적 방향 반전입니다! 중앙 수평 급전선에서 위쪽 행 패치로는 $+y$ 방향으로, 아래쪽 행 패치로는 $-y$ 방향으로 급전선이 뻗어 나가면, T-접합 전압은 동위상이라도 공간상의 패치 급전 방향이 마주 보게 되어 **위 행과 아래 행의 표면 전류 벡터가 정반대(180° 역위상!)**가 됩니다. 그 결과 정면($\theta = 0^\circ$)에서는 완벽한 상쇄 간섭(**−4.8 dBi 널 구멍!**)이 파인 것입니다.

해결책 확인: `patch_array_2x2_80g.warp`를 열어 위쪽 행 급전선을 확대해 보세요! 길이 $1.21\ \mathrm{mm}$**짜리 U자 $\lambda_g/2$ 위상 지연선**을 끼워 넣어 180°를 한 번 더 뒤집어 주자, 두 행의 전류가 한 방향으로 정렬되며 77.4~83.8 GHz 광대역 정합(79 GHz $S_{11} = -18.1\ \mathrm{dB}$)과 함께 **정면 이득 +11.7 dBi**가 깨끗하게 복원되었습니다!

34 CHAPTER

따라하기 3 (중급) · 도형 놀이터 (rf_shapes_playground) & 1패스 공간 사상 정복

실시간 R·L·C 등가회로 판독기, 흰 손잡이 미앤더, 래디얼 스텁과 비아 자동 단락 Class-F 스텁을 한 기판 위에서 모조리 손으로 만져 보고, 30번 최적화 대신 'Solved at' 숫자 하나로 노치를 정중앙에 꽂아 넣는 공간 사상(Space Mapping) 마법을 실습합니다!



배울 것
RF equivalent 실시간 R·L·C와 formal 경고 해독

해 볼 것
Meander 흰 손잡이 드래그와 Fix length 토글

핵심 개념
3종 스텁 변환 후 Solved at 1회 보정으로 오차 0.00 GHz 명중

LAB 34 · RF SHAPES PLAYGROUND MASTER 난이도 ★★☆ · 소요 20분

실습 준비: `examples/rf_shapes_playground.warp` 사본 열기

0.813 mm RO4003C 기판 위에 50 Ω 주선로(`Line50`), 시드 패드 3개(`StubRadial, StubShort, StubOpen`), 독립 선로(`Trace`), 나선 곡선 2개가 준비된 종합 실습판입니다.

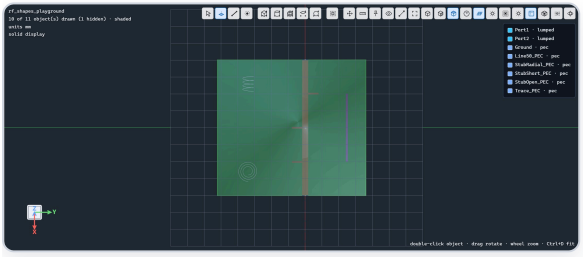


그림 34-1 rf_shapes_playground 초기 화면. 아래 5단계를 순서대로 따라 하면 단순 통과 선로가 3중 고조파 트랩으로 변신합니다!

34.1 1단계 · 클릭만 하면 아래 기판을 읽는 `RF equivalent` ONLY IN AETHER

트리나 뷰포트에서 중앙 선로 `Line50`을 클릭하고 좌측 하단 Properties 창 맨 아래 `RF equivalent` 섹션을 펼쳐 보세요.

- 내가 기판 정보를 알려 준 적이 없는데도 바로 아래 `Substrate` ($\varepsilon_r = 3.55, h = 0.813$ mm)를 스스로 찾아내 $Z_0 \approx 50\ \Omega$, ε_{eff}, 전기적 길이(°), 직렬 $R \cdot L$, 양단 C를 즉시 계산해 보여 줍니다!
- `Frequency` 칸의 숫자를 높여 전기적 길이가 $90°$**를 넘어가면** 집중소자 π-모델 옆에 `(formal)` 표시가 붙습니다 — 반파장에 가까운 분포정수 선로는 더 이상 단일 L·C 부품값으로 치환하면 안 된다는 친절한 물리 경고입니다!

34.2 2단계 · 흰 손잡이 드래그로 접고 늘리는 `Meander` 실습

위쪽에 따로 놓인 직선 트레이스 `Trace`를 클릭하면 양 끝에 **하얀 원형 손잡이**가 나타납니다.

1. **길이 보존 접기 (`Fix length` ON 기본값)**
   오른쪽 흰 손잡이를 마우스로 잡고 안쪽으로 쓱 끌어 보세요! 원래 선로 총 길이는 1 μm도 바뀌지 않은 채 공간에 맞춰 지그재그 턴 수가 실시간으로 늘어납니다(기존 임피던스 정합선을 보드 모서리 안으로 구겨 넣을 때 사용).

2. **위상 지연기 신축 (`Fix length` OFF)** UPGRADE
   Properties에서 `Fix length` 체크를 끄고 `Line length`에 원하는 mm를 입력하거나 손잡이를 끌어 보세요. 이제 발자국 폭은 고정된 채 위상 지연량이 자유자재로 늘어납니다!

34.3 3단계 · 시드 사각형 3개를 고조파 스텁으로 원클릭 변신시키기

이제 `Line50` 옆에 붙어 있는 작은 $0.5 \times 3\ \text{mm}$ 사각형 패드 세 개를 차례로 골라 우클릭 **Stub...**(또는 리본 **Modeler ▸ Stub**)을 실행합니다.

- ① `StubRadial` → `Radial` **(대역** `5.5GHz` **–** `6.1GHz` **)** — **Preview** 후 **Make Stub**을 누르면 부채꼴 꼭짓점이 `Line50` 중심선에 자동 정렬되며 대역을 덮는 최소 부채꼴 각도(**45~60°**)가 선택됩니다.
- ② `StubShort` → `Class F short stub` **(**$f_0 =$ `2.45GHz` **)** — $2f_0 = 4.90\ \text{GHz}$ 짝수 고조파 포획용 $\lambda_g/4$ 단락 스텁으로 변환되며, 스텁 끝단에 기판을 관통해 바닥 접지로 꽂히는 **단락 비아(** `StubShort_Via` **)까지 자동 생성**됩니다!
- ③ `StubOpen` → `Class F open stub` **(**$f_0 =$ `2.45GHz`, `3rd` **)** — 개방단 프린징 연장 보정이 반영된 $3f_0 = 7.35\ \text{GHz}$ 홀수 고조파 개방 스텁으로 변환됩니다.

> **설계자 비화** **왜 Aether EM의 자동 래디얼 스텁은 90°나 145° 대신 45~60° 각도만 골라 줄까요?**
> 실제 7종의 3D FEM 벤치마크 대조 결과, 테이퍼 전송선 연쇄 모델로 보정한 **45~60° 부채꼴**은 초기 FEM 오차가 ±3% **이내(이 예제 45° 스텁은 단 –0.9 %!)**로 매우 정확한 반면, **90°**는 주선로 측면 결합으로 **+15 %**나 주파수가 튀고, **145°**는 주선로와 넓게 합쳐져 아예 저지 노치 자체가 사라졌기 때문입니다! 검증된 물리 영역만 자동 추천하는 엔지니어링 디테일입니다.

34.4 4단계 · 1차 FEM 실행 → `Solved at (retune)` 공간 사상으로 2차 FEM 정타!

ONLY IN AETHER

`F9`를 눌러 1차 FEM을 돌립니다. 기본파 $2.45\ \text{GHz}$는 $S_{21} = -0.7\ \text{dB}$로 잘 통과하지만, T-접합 기생 커패시턴스 때문에 세 노치가 각각 **4.75 GHz, 5.75 GHz, 7.05 GHz**로 1~4 % 낮게 찍힙니다. 이때 무작정 최적화기를 돌리지 마세요!

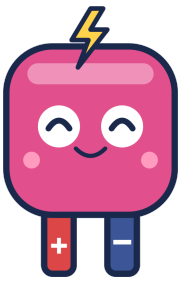
각 스텁을 클릭하고 Properties 창의 `Solved at (retune)` 입력 칸에 방금 그래프에서 읽은 실제 노치 주파수(`4.75GHz`, `5.75GHz`, `7.05GHz`)를 그대로 치고 `Enter`를 누른 뒤, 딱 한 번만 더 `F9`를 돌려 보세요!

스텁 이름 · 목표 역할	설계 목표	1차 FEM 실측 노치	`Solved at` 입력 후 자동 축소율	2차 FEM 결과 (단 1회 재해석!)
StubShort ($2f_0$ 단락)	**4.90 GHz**	4.75 GHz (−40 dB)	$\times 0.969$ 자동 스케일	**4.90 GHz 정중앙 명중! (−48.6 dB)**
StubRadial (ISM 저지)	**5.80 GHz**	5.75 GHz (−47 dB)	$\times 0.991$ 자동 스케일	**5.80 GHz 정중앙 명중! (−37.7 dB)**
StubOpen ($3f_0$ 개방)	**7.35 GHz**	7.05 GHz (−39 dB)	$\times 0.959$ 자동 스케일	**7.35 GHz 억제 완성 (−27.4 dB)**

보너스 실험(5단계): 구석의 `HelixCurve`와 `SpiralCurve`를 선택해 **Line Pattern**(폭 `0.3mm`)을 입혀 보세요. 만약 선폭을 감김 피치보다 과도하게 크게 입력하면 자가 교차(self-intersection) 불량 솔리드가 생기는 것을 막기 위해 친절한 안내와 함께 사전 차단합니다(모든 작업은 `Ctrl` + `Z`로 즉시 복원!).

35 CHAPTER

따라하기 4 (중고급) · 5.8 GHz WPT 렉테나 + 7포트 정류기 HB & 회로도 역반영



전파를 받아 직류 전기로 바꾸는 무선전력 수신기(Rectenna) 전체 체인을 실습합니다! 인셋 급전선의 숨은 λg/4 임피던스 반전을 풀고, 7포트 보드 EM 위에 쇼트키 다이오드 하모닉 밸런스(HB)와 자유 배선 회로도 역반영까지 완주합니다.

배울 것
wpt_rx_rectenna_5g8의 59 Ω 변환기 정합 비밀

해 볼 것
7포트 EM(K=8) + Rectifier Report 3중 스윕과 BV 항복 진단

핵심 개념
SVG 회로도 Co-sim 튜닝 → 3D EM Lumped RLC 원클릭 확정

LAB 35-A · RECTENNA IMPEDANCE INVERSION

난이도 ★★☆ · 소요 10분

실습 A: 왜 배열에서 떼어 온 패치에 70.7 Ω 변환기를 달면 S11이 −14.6 dB에 그칠까?

대상 샘플: `examples/wpt_rx_rectenna_5g8.warp`

`wpt_rx_rectenna_5g8.warp`를 열어 급전부를 살펴보세요. 33장 송신 배열과 똑같은 패치에 100 Ω 인셋 급전선이 들어가는데, 그 뒤에 흔히 쓰는 70.7 Ω 변환기 대신 **59 Ω $\lambda_g/4$ 변환기**가 붙어 있고, 해석해 보면 **5.825 GHz에서 $S_{11} = -29.6\ \mathrm{dB}$ ($Z_{\mathrm{in}} = 46.8 - j0.4\ \Omega$, 이득 7.2 dBi, 방사 효율 88 %)**라는 기막힌 정합이 나옵니다!

비결: 패치 안쪽으로 파고든 **8.8 mm 길이의 100 Ω 인셋 급전선 자체가 5.825 GHz에서 거의 $\lambda_g/4$**이기 때문입니다! 패치 가장자리 임피던스 R_{edge}가 100 Ω에서 조금만 벗어나도 인셋선이 $Z_1 = 100^2/R_{\mathrm{edge}}$로 이미 한 번 임피던스를 뒤집어 놓으므로, 두 번째 $\lambda_g/4$ 단은 $\sqrt{50 \cdot Z_1} \approx 59\ \Omega$이어야 정확히 50 Ω에 안착합니다.

LAB 35-B · 7-PORT HARMONIC BALANCE & RECTIFIER REPORT

난이도 ★★★ · 소요 15분

실습 B: 7포트 정류기 EM + 쇼트키 하모닉 밸런스 3중 스윕 따라하기

메뉴 경로: **Results ▸ Rectifier Report...** & `examples/16_rectifier_hb_5g8.py`

1 **0.25 ~ 24 GHz 광대역 7포트 EM 준비**

정류기 보드의 RF 입력(`IN`), 정합 소자 패드(`CM, LM`), DC 초크(`LDC`), 다이오드 자리(`D1`), 평활 캡(`CO`), 부하 저항(`RL`) 7곳에 Lumped Port를 뚫고 $K = 8$**차 고조파(**8×3 GHz **또는** 4×5.8 GHz**)까지 덮는 광대역 스윕**을 1회 실행합니다. (주의: $K = 3$으로 줄이면 고조파 손실이 누락되어 효율을 3~4 %p 부풀려 착각하게 됩니다!)

2 **다이오드 & 실제 칩 배정 후 3중 스윕**

Results ▸ Rectifier Report...를 열어 `D1`에 내장 `HSMS-286x`(SOT-323 기생 $L_p = 2.0$ nH, $C_p = 0.08$ pF 포함!), 부하 `RL = 800 Ω`을 지정하고 **입력 전력(**$-10 \sim +15$ dBm**) · 부하 저항(**$100 \sim 5000\ \Omega$**) · 주파수 스윕**을 실행합니다.

3 **전력 수지 막대와 `-BV` 항복 절벽 판독!**

오른쪽 리포트의 누적 손실 막대(반사 vs 기판 열손실 vs 다이오드 R_s 손실 vs 순수 DC 출력)와 시간 파형 $v_j(t)$를 확인합니다.

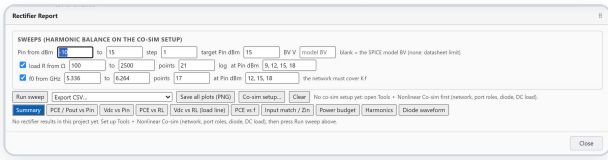


그림 35-1 Rectifier Report 결과 창. Pin=12 dBm에서 효율 60.5 % 정점을 찍은 직후, 접합 역전압이 HSMS-286x의 항복 한계(−BV = −7 V 점선)를 뚫고 내려가며 15 dBm에서 효율이 30 %로 급락하는 현상을 정확히 잡아냅니다!

LAB 35-C · SVG CO-SIM TO 3D BACK-ANNOTATION

난이도 ★★★ · 소요 10분

실습 C ONLY IN AETHER : 자유 배선 회로도에서 1초 만에 튜닝하고 3D 모델로 원클릭 역반영!

다른 툴처럼 값을 메모지에 적어 3D 창으로 돌아가 포트 하나씩 지우고 다시 그릴 필요가 없습니다!

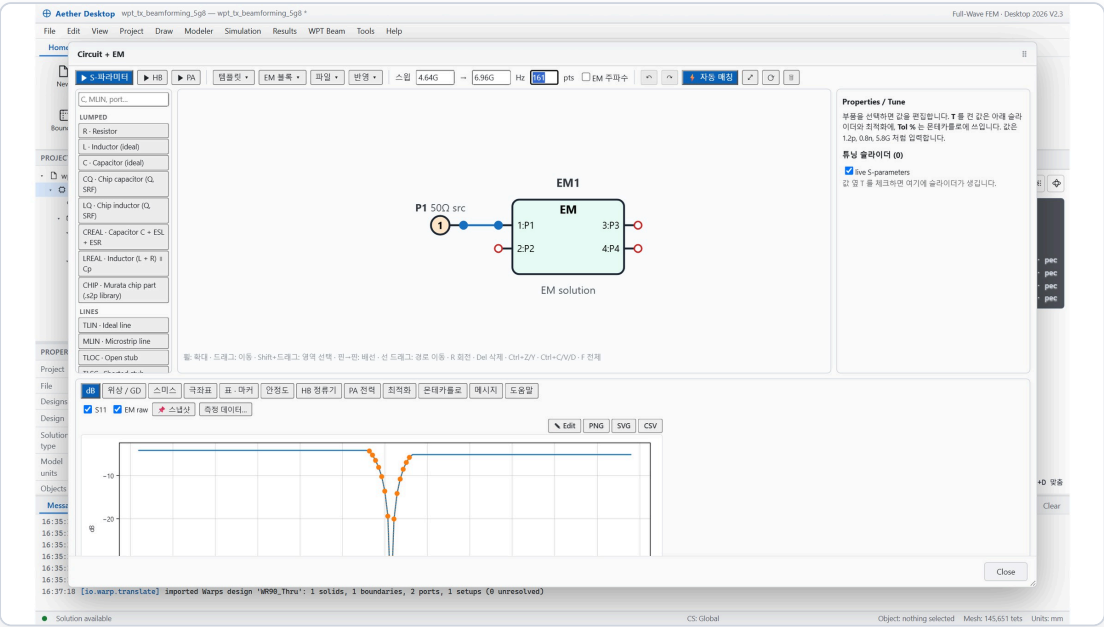


그림 35-2 Results ▸ Co-sim (Circuit + EM) 자유 배선 캔버스. 7포트 EM 블록에 Murata 실제 칩(.s2p)과 NT9001 배전압 쇼트키 쌍을 배선해 실시간 슬라이더와 베이지안 최적화로 정류 효율(PCE %)을 극대화합니다.

1 회로도 캔버스 열기 및 부품 배선

Results ▸ Co-sim (Circuit + EM)... 을 열면 현재 디자인의 다포트 EM 블록이 자동 배치됩니다. 좌측 팔레트에서 `CHIP` **(54종 Murata** `.s2p` **)**과 고내압 쇼트키(`SMS3923` , $\mathrm{BV} = 46\ \mathrm{V}$ 또는 `NT9001` 배전압 쌍 — 전류 잔차 뉴턴 엔진으로 200배 고속 수렴!)를 끌어다 연결합니다.

2 베이지안 PCE 직접 최적화 & E24 스냅

우측 `최적화` 탭에서 목표를 `정류 효율 PCE 최대화`로 두고 실행한 뒤, `E24 스냅`을 눌러 실제 구매 가능한 표준 부품값으로 고정합니다.

3 대망의 원클릭 3D 역반영!

상단 툴바의 **반영** ▾ ▸ **EM 포트 → Lumped RLC 확정**을 클릭하세요! 회로도에서 튜닝한 모든 L·C·R 값이 3D 보드의 해당 Lumped Port 위치에 실제 `Lumped RLC` **경계**로 일괄 치환됩니다(`Ctrl` + `Z` 1회 복원 지원). 이제 `F9` 한 번이면 최종 3D 사인오프 끝!

36 CHAPTER

따라하기 5 (전문가 미션편) · CGH40010 5.8 GHz GaN PA 튜너 어드벤처



단 하나의 프로젝트 파일을 열고 여덟 개의 흥미진진한 탐정 미션을 클리어하다 보면, 어느새 거친 메시 착시 수사부터 4포트 실시간 트리머 레벨업, 400장 공장 수율 주사위, 흑색 아노다이징 방열과 열폭주 제어까지 마스터하게 되는 V2.3 최고의 간판 실습입니다!

배울 것
Project Manager 4대 보물상자와 2f0/3f0 고조파 Q&A

해 볼 것
L0→L4 트리머 레벨업과 400장 공장 공차(+0.5 dB 마진 법칙)

핵심 개념
방열판 Rca ≤ 5.95 K/W 퀴즈 · 아노다이징 · DE tempco 열폭주 스위치

MISSION 01 · OPEN THE CASE FILE & TREASURE MAP

미션 1/6 · 10분

사건 파일 열기와 Project Manager 4대 보물상자 정밀 수색!

대상 파일:

`examples/CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal/pa_cgh40010_results_thermal_v2/CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal_v2.warp`

File ▸ Open Project...로 위 파일을 엽니다(열기 창 우측의 3D 미리보기로 보드 형상을 먼저 감상해 보세요!). 하나의 `.warp` 파일 안에 **1개의 RF 전자기 디자인(**`PA_CGH40010_5g8_ClassF`**)**과 **4개의 방열 디자인(**`TH1`**~**`TH4`**)**이 함께 들어 있습니다.

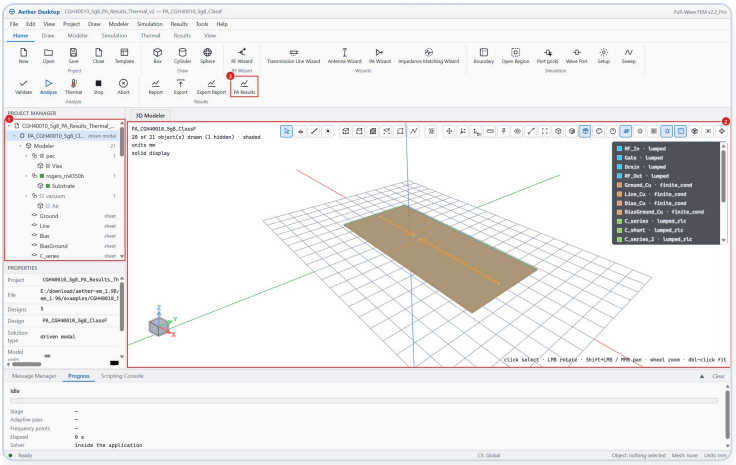


그림 36-1 사건 현장 전경: RO4350B 0.508 mm 기판 위의 5.8 GHz CGH40010 Class-F 보드. RF_In, Gate, Drain, RF_Out 4개의 50 Ω Lumped Port가 열려 있습니다.

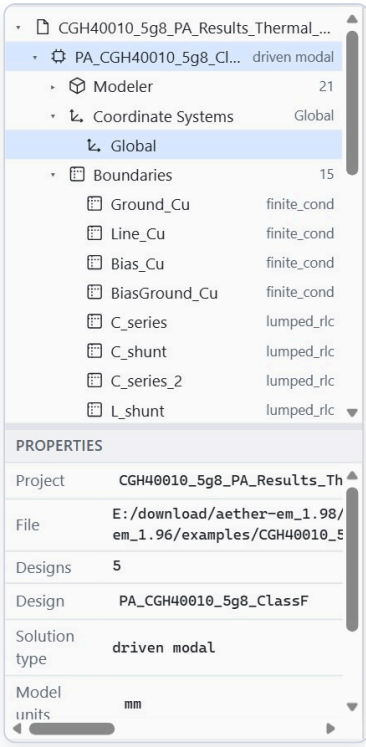


그림 36-2 좌측 Project Manager 트리: 5개 멀티 디자인과 경계, 4개 포트, 2개 스윕 구성.

해석 결과를 열기 전에, 먼저 좌측 트리의 설정 창 세 곳을 더블클릭해 고수가 숨겨 둔 3가지 설계 장치를 확인해 봅시다!

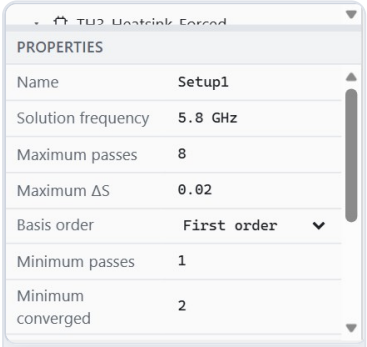


그림 36-3 ① Setup1: 5.8 GHz, 최대 8패스, 연속 2패스 |ΔS|<0.02 수렴 조건, 2차 기저함수(거친 1패스 −33.7 dB 착시 원천 봉쇄!).

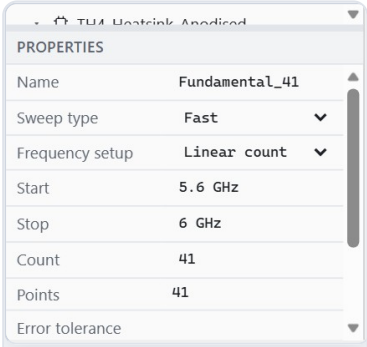


그림 36-4 ② 2중 스윕: 대역 41점은 Fast(5번 풀이)로 빠르게, 11.6 GHz(2f0)는 1점 Discrete로 정확히 콕 집어 추출!

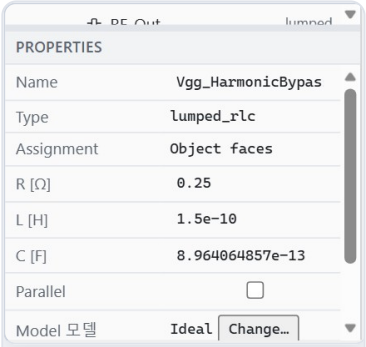


그림 36-5 ③ C_bypass_drain: R=0.1 Ω, L=0.4 nH, C=100 pF에서 Parallel 체크 해제! 실제 칩의 직렬 ESR+ESL+C 공진을 모사합니다.

탐정 Q&A **Class-F 보드라면서 왜 고조파 스윕(`Harmonic_check`)에 $2f_0$(11.6 GHz)만 넣고 $3f_0$(17.4 GHz)는 안 넣었나요?**

패키지 내부 커패시턴스가 17.4 GHz를 이미 저절로 단락시키고 있기 때문입니다! `CGH40010` 패키지 안에는 약 $C_{ds} \approx 1.3\ \mathrm{pF}$의 드레인-소스 기생 용량이 들어 있어 17.4 GHz에서 리액턴스가 이미 $-j7\ \Omega$에 불과합니다. 즉 패키지 바깥 PCB에서 아무리 개방 스텁을 달아도 다이 내부에서는 $3f_0$ 개방을 만들기 어렵고(무리하게 션트 C를 달면 24장 경고처럼 오히려 $2f_0$까지 망가짐!), 이 주파수 대역 패키지 GaN의 실질 효율 향상 열쇠는 $2f_0$**(11.6 GHz) 단락 위상을 지키는 것**에 달려 있기 때문입니다.

MISSION 02 · KNOB LEVEL-UP L0 → L4 미션 2/6 · 12분

실시간 `PA Tuner` 오픈 & 손잡이 하나씩 켜며 `L0 → L4` 레벨업 체험하기!

리본 **Home ▸ PA Results** 클릭 → 좌측 상단 `Result set`에서 `PA Tuner (live, editable)` 선택!

ONLY IN AETHER

창이 열리면 먼저 좌측 체크박스 19개 항목이 각각 무엇을 뜻하는지 아래 요약표로 1분 만에 스캔하세요. 체크박스를 켜고 끌 때마다 우측 대시보드 카드와 그래프가 즉시 재구성됩니다.

그룹	핵심 체크박스 항목과 현장에서 읽는 법
1 · Small-signal & Match	**Gain / S21**(소신호 이득·대역 리플), **Input S11 / Output S22**(입출력 반사), **Stability K & μ**(전 대역 $\mu > 1$이면 무조건 안정!), **Smith Z_in / Z_load**(드레인 부하 궤적이 Z_{opt} 별표에 얼마나 가까운가)
2 · Large-signal Power	**Pout, Gain, PAE, DE vs Pin**(입력 전력 스윕 압축 곡선과 $P_{1\mathrm{dB}}, P_{\mathrm{sat}}$ 마커), **Load-pull Penalty [dB]**(현재 보드 부하가 최적 Z_{opt}에서 벗어나 잃어버린 포화 출력 페널티!), **Two-tone IMD3 / ACPR**(선형성 지표)
3 · Passive PCB Audit	**PCB Insertion Loss (−10 log MAG)**(부정합 반사를 뺀 순수 동박·유전체 열손실), **Gate–Drain Isolation**(역방향 발진 결합도), **2f0 / 3f0 Harmonic Z**(고조파 반사 위상 점검)
4 · Tolerance & Thermal	**Monte-Carlo Yield**(부품 $\pm 1 \sim 10\%$ 공차 400회 수율 히스토그램), **Cooling Tj vs Pin & Safe Envelope**(냉각안 `TH1~TH4`별 접합온도 곡선, 생존 최대 출력, `DE tempco` 열폭주 경보)

이제 4개 포트(`RF in`, `Gate`, `Drain`, `RF out`)에 달린 트리머 L/C 값을 0(맨 보드 `L0`)에서 시작해 한 단계씩 켜면서 이 증폭기가 어떻게 깨어나는지 직접 확인해 보세요!



그림 36-6 레벨 L0 (트리머 전부 OFF, 맨 보드 EM 그대로): 최악 S11 = −2.22 dB, 이득 리플 6.00 dB, 부하 페널티 4.89 dB로 절반 이상이 반사됩니다!

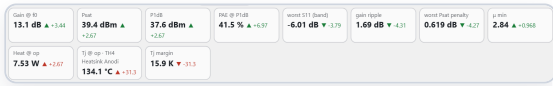


그림 36-7 레벨 L4 (4포트 E24 트리머 ON): 최악 S11 = −6.01 dB(중심 −12.4 dB), 이득 13.06 dB(리플 1.69 dB), 부하 페널티 0.62 dB, PAE 41.5 % 달성!

레벨업 단계	켠 트리머 손잡이	대역 최악 S_{11}	5.8 GHz 이득 (리플)	부하 페널티	$\mathrm{PAE}_{1\mathrm{dB}}$	발열 P_{diss} ($T_{j,\mathrm{TH4}}$)
L0 · 맨 보드	없음 (수렴 EM 원본)	−2.22 dB	9.62 dB (6.00 dB)	4.89 dB	34.5 %	4.85 W (102.8 °C)

레벨업 단계	켠 트리머 손잡이	대역 최악 S_{11}	5.8 GHz 이득 (리플)	부하 페널티	$\mathrm{PAE}_{1\mathrm{dB}}$	발열 P_{diss} ($T_{j,\mathrm{TH4}}$)
L1 · 첫 손잡이	`Drain` 션트 C `0.75 pF` 1개	−1.97 dB	9.17 dB (6.91 dB)	3.54 dB	35.5 %	5.73 W (113.1 °C)
L2 · 출력 정복	`Drain` 3소자 전부 ON	−1.91 dB	9.96 dB (5.93 dB)	**0.80 dB!**	39.1 %	8.23 W (142.3 °C)
L3 · 입력 개통	+ `RF in` 3개 + `Gate` 2개	−5.39 dB	12.85 dB (2.25 dB)	0.80 dB	41.9 %	8.19 W (141.9 °C)
L4 · 완전체	**4포트 전체 (E24 스냅 완료)**	**−6.01 dB**	**13.06 dB (1.69 dB)**	**0.62 dB**	**41.5 %**	**7.53 W (134.1 °C)**

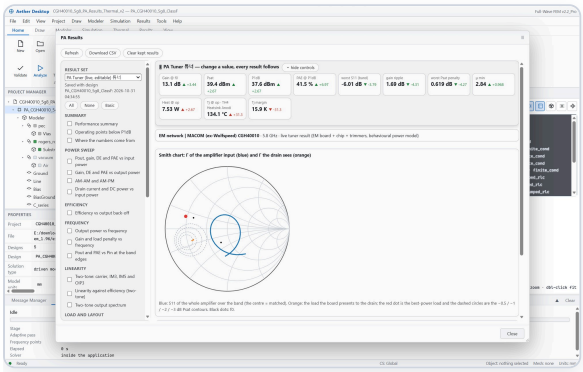


그림 36-8 스미스 차트에서 본 L4 마법: 엉뚱한 곳에 흩어져 있던 드레인 부하 궤적이 Zopt 과녁 정중앙으로 모이고 입력 궤적이 50 Ω 원 안으로 쏙 들어옵니다!

표에서 꼭 짚고 넘어갈 두 가지 소름 돋는 물리 디테일!

- **역할 분담의 정석 —** `L2`(드레인 쪽만 튜닝)를 보세요! S_{11}은 여전히 -1.91 dB로 엉망이지만, 드레인이 Z_{opt}를 찾은 덕분에 **부하 페널티가** $4.89 \rightarrow 0.80$ dB**로 단숨에 해결**됩니다. 그다음 `L3`에서 입력·게이트를 맞추자 비로소 이득이 $+3$ dB 점프합니다!
- **왜 튜닝을 잘했더니 칩이 더 뜨거워졌을까? (** $102.8 \rightarrow 134.1^{\circ}\mathrm{C}$**) —** `L0`에서는 입력 RF 전력의 절반이 보드 입구에서 튕겨 나가 트랜지스터가 사실상 놀고 있었기 때문입니다($P_{\mathrm{diss}} = 4.85$ W)! `L4`로 정합이 뚫려 진짜 8.7 W 대전력을 뿜어내기 시작하자 정상 동작 발열량인 **7.53 W**가 비로소 드러난 것입니다!

MISSION 03 · AUTO-TUNE & LARGE-SIGNAL CHECK

미션 3/6 · 8분

인간 대 로봇! `Reset` 후 `Auto-tune` 버튼 눌러 대신호·선형성 검수하기

직접 손으로 슬라이더를 밀어 `L4` 점수를 이겨 본 뒤, `Auto-tune`(E24 체크)과 대결해 보세요!

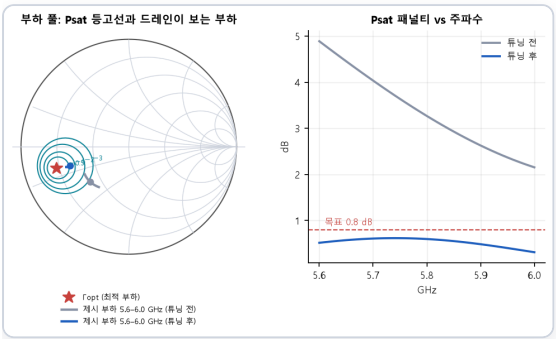


그림 36-9 대신호 전력 스윕(Pout · Gain · PAE vs Pin): Psat = 39.4 dBm(8.7 W), P1dB = 37.6 dBm에서 PAE 41.5 %가 매끄럽게 펼쳐집니다.

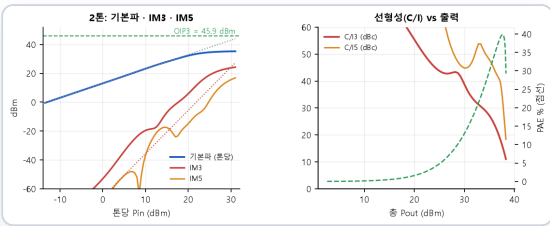


그림 36-10 2톤 선형성(IMD3 · ACPR) 곡선: 백오프 구간과 P1dB 근처 상호변조 왜곡 한계를 동시에 체크합니다.

MISSION 04 · THE 400-BOARD FACTORY DICE

미션 4/6 · 8분

400장 공장 주사위의 배신(수율 48.5 %)과 양산 고수의 `+0.5 dB` 마진 법칙!

공칭값에서 모든 목표가 초록불(100 % 통과)인데, 왜 공장에 넘기면 절반이 불량 판정을 받을까요?

튜너의 `Tolerance / Yield` 섹션에서 부품 공차를 일반 구매 등급인 `±5 %`, 시행 횟수를 `400`으로 두고 굴려 보세요! 방금 전까지 100 % 통과하던 보드의 수율이 갑자기 **48.5 %**로 반토막 납니다(24장 그림 참조)!

- **원인 수사 —** `Auto-tune` 로봇은 시킨 대로 너무 정직하게 일해서, 목표가 `S11 ≤ -6.0 dB`이면 딱 `-6.01 dB` 절벽 끝에 바퀴를 걸쳐 놓고 멈췄기 때문입니다! 여기서 칩 값이 $+2\%$만 흔들려도 절반은 -5.9 dB로 밀려 탈락합니다.
- **10초 해결 실습 —** 목표 칸의 숫자를 내가 진짜 원하는 규격보다 `0.5 dB`**만 더 엄격하게**(예: `S11 ≤ -6.5 dB`) 고치고 다시 **Auto-tune**을 누른 뒤 주사위를 굴려 보세요. $\pm5\%$ 공차 수율이 **48.5 %** $\rightarrow$ **95 % 이상**으로 단숨에 뛰어오릅니다!

MISSION 05 · THERMAL QUIZ & RUNAWAY SWITCH

미션 5/6 · 12분

방열판 암산 퀴즈 · `TH4` 열병목 촬영 · 열폭주 스위치 발동 실험!

흑서기 대기 $T_{amb} = 45°C$, 발열 $P_{diss} = 7.53$ W, 패키지 $R_{jc} = 8.0$ K/W일 때 $T_j \le 150°C$를 지키려면?

계산기를 꺼낼 필요도 없습니다! 허용 가능한 총 온도 상승은 $150 - 45 = 105$ K이고, 그중 소자 패키지 내부($R_{jc} = 8$ K/W)가 이미 $8 \times 7.53 = \mathbf{60.2}$ K를 먹어 치워 케이스 바닥 온도는 무조건 $105.2°C$ 이하로 묶여야 합니다. 즉 방열판에 허락된 열저항은 $R_{ca} \le \frac{105}{7.53} - 8.0 = \mathbf{5.95}$ K/W입니다!

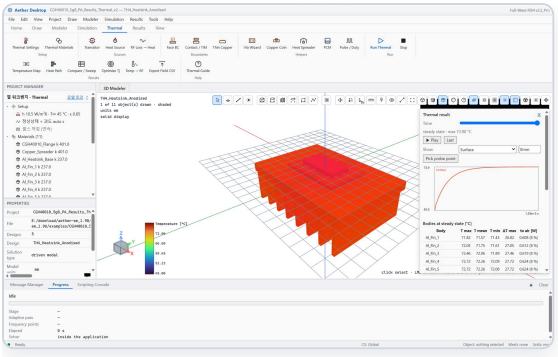


그림 36-11 좌측 트리에서 TH4_Heatsink_Anodised를 더블클릭하고 Thermal 탭에서 확인한 3D 온도장: 흑색 아노다이징(ε=0.85, Rca=3.84 K/W) 덕분에 핀 최고 73.9 °C, 칩 접합 Tj = 134.1 °C로 합격!

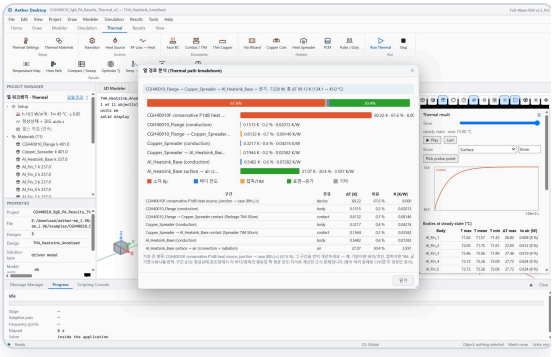


그림 36-12 Thermal ▸ Heat Path 병목 분해 막대: 전체 ΔT(89.1 K) 중 60.2 K가 패키지 Rjc이고 히트싱크 공기 저항이 28.9 K임을 한눈에 증명합니다.

스릴 만점 열폭주 실험: 다시 `PA Results`의 `4 · Heat and cooling`으로 돌아와 `DE tempco`에 `-0.15` **[%/K]**, `gain tempco`에 `-0.015`, `Psat tempco`에 `-0.01`을 입력해 보세요(31장 비교 차트). 방열판 없는 `TH1` 행에 빨간 `⚠ thermal runaway` 경보가 켜지는 반면, 흑색 아노다이징 `TH4`는 효율 저하 되먹임을 이겨내고 139.1°C에서 굳건히 수렴합니다!

MISSION 06 · BUILD YOUR OWN FROM PA LIBRARY

미션 6/6 · 10분

졸업 미션: `PA Library`에서 소자를 골라 내 새 보드로 처음부터 합성하기!

남이 만든 예제를 분석했으니, 이제 백지에서 나만의 GaN PA 프로젝트를 직접 생성해 봅시다.

1 **PA Library → PA Wizard 직행**

`Ctrl`+`N` 새 프로젝트 생성 후 **Tools ▸ PA Library...**에서 `CGH40010`(또는 25 W급 `CG2H40010`)을 고르고 **Open in PA Wizard**를 누릅니다.

2 **정합 후보 선택 & 3D 기판 생성**

목표 대역(예: `5.6-6.0 GHz`)과 기판(`RO4350B 0.508 mm`)을 고르고 1위 정합 쌍의 **Build 3D Board**를 누르면 포트·바이어스·셋업이 완비된 3D 보드가 즉시 생성됩니다.

3 **방열 쌍둥이 복제**

Project 트리에서 완성된 디자인을 우클릭 **Duplicate Design**으로 복제한 뒤 이름을 `TH_MySink`로 바꾸고 **Thermal** 리본에서 히트싱크와 `Transistor` 열원을 얹으면 방금 실습한 5-디자인 통합 패키지가 내 손으로 재탄생합니다!

37 CHAPTER

따라하기 6 (플래그십 R&D) · CG2H40010 −33 % 소형화 · 기생 감사 · 메탈 지그 설계

실제 연구소 양산 개발 노트 그대로! 보드 면적을 33 % 줄이면서 게이트 발진과 바이어스 누설을 동시에 잡고, 패키지 내부 Cds·Lpkg 기생 성분이 갉아먹던 포화 출력 2.7 dB를 되찾아 드레인 효율 70.5 %를 달성한 뒤, 컷아웃 알루미늄 지그에 체결하는 완결편입니다.



배울 것
980→659 mm²(−33 %) 소형화와 게이트 r_feed 안정화

해 볼 것
패키지 Cds·Lpkg 기생 감사로 Psat 36.8→39.5 dBm 복구

핵심 개념
단일 입력 스텁 1회 리튠(−18.9 dB)과 컷아웃 메탈 지그(Tj=117.4 °C)

LAB 37-A · FULL-BOARD MINIATURISATION & PARASITIC AUDIT

난이도 ★★★ · R&D 실전

실습 A: `pa_cg2h40010_5g8_full_demo.warp` 의 3대 R&D 설계 비법 해부

대상 샘플: `examples/pa_cg2h40010_5g8_full_demo.warp` (RO4350B 0.508 mm, 6포트 풀보드)

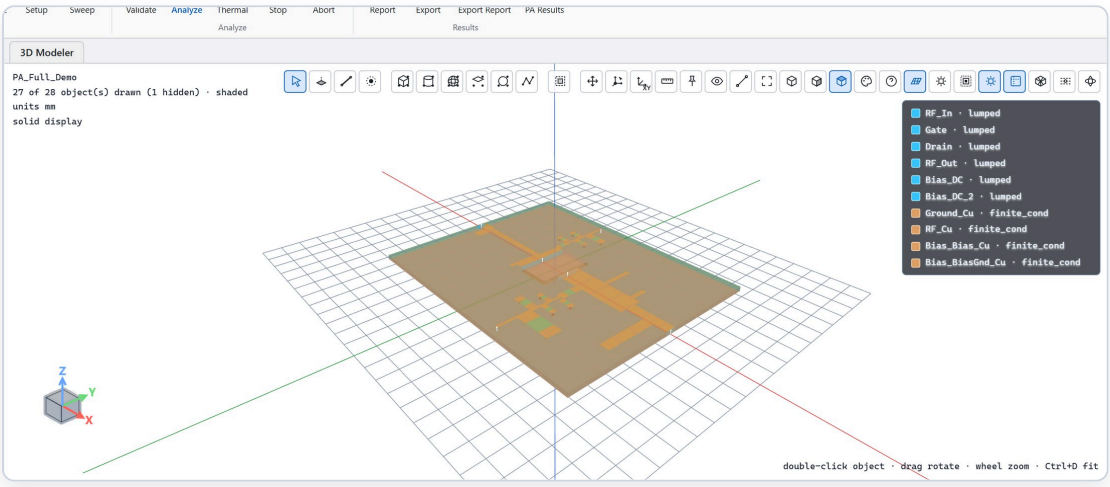


그림 37-1 33.1 % 면적 소형화에 성공한 5.8 GHz CG2H40010 Class-F 풀보드(659 mm²). 게이트 저항 급전(좌상), 반대편(−Y)으로 분리한 6.8 nH 집중형 드레인 바이어스-T, 한쪽(+Y)으로 모은 진성 Class-F 고조파 스텁이 조화를 이룹니다.

37.1 비법 1 · 왜 보드 크기가 980 mm²에서 659 mm²(−33.1 %)로 줄었는데 격리도는 더 좋아졌을까?

- **게이트 `r_feed` (220 Ω) 채택** — 게이트 DC 전류는 0에 가까우므로 거대한 $\lambda_g/4$ 선로 대신 작은 220 Ω 직렬 저항으로 급전해 면적을 줄이면서 **350 MHz 대역 외 저주파 발진($\mu_{\min} = 1.18 > 1$)까지 일거양득으로 박멸**했습니다!
- **드레인 바이어스-T 반대편($-Y$) 격리 배치** — 직선 $\lambda_g/4$ 바이어스(166 mm²) 대신 `Bias Designer`의 6.8 nH 집중형 L-C 바이어스-T(66.8 mm²)를 쓰되, $+Y$ 방향에 모인 Class-F 고조파 스텁들과 자기장 결합이 일어나지 않도록 **반대쪽($-Y$)으로 뽑아 기생 결합을 $k = -40.9$ dB로 차단**했습니다.

37.2 비법 2 ONLY IN AETHER · 잃어버린 포화 출력 2.7 dB를 되찾은 패키지 기생 감사 (Parasitic Audit)!

실전 디버깅 **초기 설계에서 소신호 이득은 괜찮았는데 왜 포화 출력이 데이터시트(40 dBm)보다 한참 낮은 36.8 dBm 에 머물렀을까요?**

`PA Results`의 `Load-pull Penalty` 지표를 열어 보니 무려 **3.24 dB**의 부하 부정합 페널티가 찍혀 있었습니다! 원인을 추적하자 초기 합성 시 **다이 전류원 최적 임피던스($Z_{\text{opt,int}} \approx 15.2 + j6.8\ \Omega$)를 패키지 리드 바깥 목표값으로 그대로 착각해 입력**했던 것이 드러났습니다.

실제 `CG2H40010` 패키지 내부의 $C_{ds} = 1.84$ pF, 본드와이어·리드 인덕턴스 $L_{\text{pkg}} = 0.629$ nH를 통과시켜 패키지 단자 기준 목표 임피던스($Z_{\text{opt,pkg}} \approx 8.5 + j4.2\ \Omega$)로 교정해 재합성하자, 포화 출력이 $36.8 \rightarrow$ **39.5** dBm **(8.9 W)**으로 껑충 뛰고 하모닉 밸런스 드레인 효율 **DE = 70.5 % (PAE = 65.2 %)**라는 발군의 성능이 터져 나왔습니다!

37.3 비법 3 · 소자를 달았더니 틀어진 입력 S_{11}, 스텁 딱 하나로 1회 FEM에 끝내기!

단독 수동 정합망에서는 완벽하던 입력 S_{11}이 실제 GaN 트랜지스터를 얹자 5.8 GHz에서 비껴갔습니다 — 비단방향 소자의 역방향 투과(S_{12}) 때문에 드레인 부하가 게이트 입력 임피던스($\Gamma_{\text{in}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1-S_{22}\Gamma_L}$)를 끌어당겼기 때문입니다. 전체 보드를 다시 건드릴 필요 없이 **입력 개방 스텁 B의 길이 딱 하나만 `3.77 mm → 1.47 mm`로 줄이자 단 1회 FEM 만에 풀보드 입력 반사가 $S_{11} = -18.9$ dB @ 5.80 GHz로 명중**했습니다!

LAB 37-B · CUT-OUT ANODISED METAL TEST JIG

난이도 ★★★ · 하드웨어 체결

실습 B: SMA 엔드런치 + 7핀 흑색 아노다이징 컷아웃 메탈 지그 완결 검증

대상 샘플: `examples/pa_cg2h40010_5g8_jig.warp` (EM + Thermal 멀티 디자인)

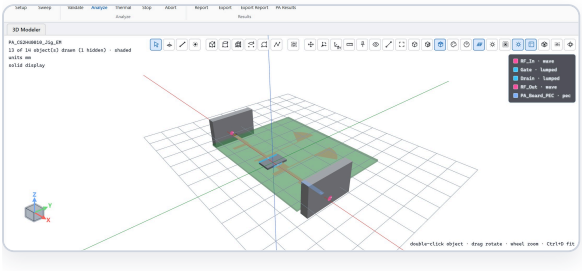


그림 37-2 pa_cg2h40010_5g8_jig.warp: 70×50×6 mm 알루미늄 베이스 중앙 페데스탈에 GaN 플랜지를 직결하고 양단에 PTFE 동축 SMA 엔드런치 Wave Port를 체결한 실물 테스트 지그.

마지막으로 이 보드를 실험실 계측기(VNA/전력계)에 물리기 위한 실제 금속 지그 파일 `pa_cg2h40010_5g8_jig.warp`를 열어 세 가지 하드웨어 마감 디테일을 점검하세요!

- **SMA 엔드런치 트랜지션** — 단순 내부 Lumped Port가 아니라 실제 PTFE 유전체 동축 중심핀이 마이크로스트립 패드 위에 올라타는 3D SMA 커넥터에 `Wave Port`를 걸어 전 대역 반사 $-24.1\ \mathrm{dB}$ **이하**를 검증했습니다.
- **핀 간격 6 mm 자연대류 최적 설계** — 하부 7개 흑색 아노다이징($\varepsilon = 0.85$) 방열 핀 간격을 공기 경계층이 막히지 않는 **6 mm**(Bar-Cohen 상관식 $h = 10.1\ \mathrm{W/m^2K}$)로 설계해 무팬 $R_{ca} = 1.97\ \mathrm{K/W}$ 달성! 흑서기 45 °C·최악 발열 7.26 W에서도 $T_j = 117.4°\mathrm{C}$로 여유롭게 통과합니다.
- **무뚜껑(Open-top) 원칙 재확인** — $28 \times 35\ \mathrm{mm}$ 포켓 위에 금속 뚜껑을 씌우면 6.0~6.9 GHz TE_{101} 공동 공진이 일어나므로 상부는 열린 Radiation 경계로 유지합니다.

7부 마스터클래스 완주 요약: 이제 여러분은 ① 백지 좌표 모델링(32장) → ② 배열 자동 급전·빔 조향(33장) → ③ 1패스 공간 사상 보정(34장) → ④ 하모닉 밸런스 & 회로도 3D 역반영(35장) → ⑤ 실시간 PA 튜닝·공차·열폭주 제어(36장) → ⑥ 패키지 기생 감사와 실물 측정 지그 설계(37장)까지 현업 수석 엔지니어의 전 과정을 손끝으로 경험했습니다!

PART

08

배포 샘플 파일 & 스크립트 대백과 35+ 실전 .warp 프로젝트와 Python 자동화 도감

설치 폴더 `examples/` 안에는 교과서 엄밀해 검증부터 초박형 AMC 메타표면, 80 GHz 밀리미터파 레이더, 고출력 Gysel 결합기, Wi-Fi 공존 무선전력, 8대 열해석 표준 벤치마크(Th1~Th8), 그리고 플래그십 GaN 전력증폭기까지 즉시 실행 가능한 보물 같은 예제들이 가득 담겨 있습니다. 8부에서는 모든 샘플 파일의 설계 의도, 검증된 해석 수치, 소요 시간, 그리고 열어서 바로 바꿔 볼 재미있는 응용 포인트를 전수 해설합니다.



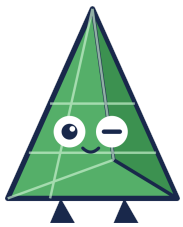
38 전자기 검증 · 안테나 · 메타표면 · 수동 회로 · WPT 샘플 29종 도감

39 열해석 벤치마크(Th1~Th8) · 고출력 PA 샘플 계보 · Python 스크립트 18종 백과

38 CHAPTER

전자기 검증 · 안테나 · 메타표면 · 수동 회로 · WPT 샘플 29종 도감

모든 .warp 파일은 형상·재질·경계·포트·Setup·Sweep이 100 % 완비된 완성본이라 열어서 F9만 누르면 바로 결과가 나옵니다(열기 창의 3D 미리보기로 모양을 먼저 확인하세요!). 목적에 맞는 샘플을 골라 내 설계의 출발 템플릿으로 삼으세요.



배울 것
교과서 이론해 검증 9종(도파관·동축·공동·슬랩)

해 볼 것
실전 안테나·AMC 메타표면·Gysel 분배기 14종

핵심 개념
5.8 GHz WPT 빔포밍 및 Wi-Fi 165번 채널 공존 6종

38.1 솔버 정확도를 눈으로 확인하는 기초 · 교과서 이론 검증 샘플 9종

새 PC에 Aether EM을 설치했거나 포트·고유모드·최적화 기본기를 빠르게 익히고 싶을 때 가장 먼저 열어 볼 기준 예제들입니다(모두 `examples/` 루트에 위치).

파일명 (`.warp`)	핵심 기능 · 물리 포인트	검증된 FEM 수치 & 열어서 해 볼 실험	시간
wr90_waveguide	표준 WR-90 도파관(22.86×10.16 mm), `Wave Port` 2개, Interpolating 스윕	TE_{10} 차단 주파수 **6.56 GHz** 정확 재현, X-대역(8.2–12.4 GHz) 무반사 통과 및 $\angle S_{21}$ 군지연 확인	30초
coax_line	50 Ω 공기 동축선, `Wave Port` + **적분선**($a \to b$)	TEM 모드 장 분포 및 전압-전력 적분 특성 임피던스 $Z_0 = V^2/(2P) = 50.0\ \Omega$ 정밀 일치 확인	20초
parallel_plate_lumped	평행판 도파로(PMC 측벽), 내부 `Lumped Port`, $2Z_0$ 부정합 종단	이론 반사계수 $\lvert\Gamma\rvert = \frac{2Z_0 - Z_0}{2Z_0 + Z_0} = \mathbf{1/3}$ (-9.54 dB)와 전 주파수 소수점 일치 검증	5초
iris_filter	유도성 금속 아이리스 시트 2개로 만든 1극 도파관 대역통과 필터	내부 2D PEC 시트 경계와 `Fast(_ProjectedROM)` 스윕이 날카로운 공진 통과대역을 수 초 만에 복원하는 과정 관찰	1분
cavity_eigenmode	$30 \times 15 \times 20$ mm 무손실 PEC 직육면체 공동, **Eigenmode** 5모드	0 Hz 가짜 모드 없이 해석해 $f_{mnp} = \frac{c}{2}\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/d)^2}$와 5개 고유주파수 정밀 대조	10초
copper_cavity_eigenmode	동일 크기 구리 벽면 공동 (`Finite Conductivity`)	표피 저항 손실로부터 무부하 품질계수 Q_0 산출(Pozar 식 6.46 이론치와 직접 대조!)	10초
slab_matching_parametric	WR-90 내부 유전체 슬랩, 두께가 설계 변수 `T` 로 바인딩됨	**Simulation ▸ Optimization...** 또는 `Parameter Study` 로 10 GHz 무반사 두께(이론 11.96 mm) 자동 탐색	수 초/회

파일명 (`.warp`)	핵심 기능 · 물리 포인트	검증된 FEM 수치 & 열어서 해 볼 실험	시간
dipole_antenna	3 GHz 반파장 다이폴($0.417\lambda_0$), 급전 시트 `Lumped Port`, 2차 요소	$S_{11} = -16.9$ dB @ 2.95 GHz, 지향성 **2.19 dBi**(이론 2.15 dBi). 표면 전류 애니메이션 필독(32장)	1분
patch_antenna	5.8 GHz FR-4(1.6 mm) 프로브 급전 패치(15.7×10.94 mm, 인셋 2.7 mm)	$S_{11} = -20.3$ dB @ 5.75 GHz, FR-4 유전 손실로 인한 효율 저하 체험 후 재질을 RO4003C로 바꿔 비교(32장)	2분

38.2 인쇄 안테나 · 초박형 AMC 메타표면 · 80 GHz 레이더 · 수동 RF 회로 14종

실제 PCB 기판과 동박 시트, 비아, 방사 경계가 모두 포함된 실무용 3D Full-Wave 예제들입니다. 특히 설계자들이 자주 부딪히는 **"왜 급전 간격 1 mm 차이로 정합이 깨질까?"**에 대한 명쾌한 해답이 담겨 있습니다.

파일명 (`.warp`)	구조 특징 · 검증 수치 · 설계자 인사이트	시간
metasurface_amc_dipole_5g8	**초박형 인공자기도체(AMC) 메타표면!** 접지 RO4003C(1.524 mm) 위 5×5 주기 패치(주기 8.95 mm, 패치 8.34 mm — 초기 셀 대비 0.927배 스케일 튜닝) 위 불과 **1.5 mm($\lambda_0/34$, 총 두께 $\lambda_0/17$!)** 높이에 18.55 mm 다이폴 배치. 일반 금속판 위라면 영상 전류가 상쇄되어 불통이지만, AMC 동위상 반사 덕분에 $S_{11} = -21.4$ dB**(5.56–6.05 GHz), 정면 이득 8.9 dBi** 달성!	6분
meander_monopole_5g8 **(+ meander_monopole_2g45)**	FR-4 1.6 mm 부분 접지(17 mm) 위 4턴 미앤더 모노폴(6.48 mm 폭). **핵심 비결:** 접지 끝단에서 첫 굽이까지 급전 간격을 `0.9 mm`로 좁히면 영상 결합 때문에 입력 저항이 8 Ω에 갇히지만, `2.5 mm`로 띄우자 $Z_{in} = 47 + j5\ \Omega$, $S_{11} = -24.4$ dB **@ 5.80 GHz** 명중! (2.45 GHz 판: −13.8 dB)	1분
spiral_monopole_5g8 **(+ spiral_monopole_2g45)**	1.5턴 사각 스파이럴 모노폴(간격 2.4 mm 급전). 부분 접지면이 함께 방사하는 **저-Q 광대역 구조**라 날카로운 딥 대신 **4.75~6.45 GHz(1.7 GHz 폭!) 전 구간 평탄한** $-10 \sim -11.6$ dB **정합** 실현(2.45 GHz 판: 2.03–2.87 GHz 광대역)	1분
patch_array_1x4_5g8	RO4003C 0.813 mm 1×4 기업형 급전 배열. $S_{11} = -23.2$ dB, 정면 이득 **12.2 dBi**, 효율 86 %(33장 실습본)	5분
patch_array_2x2_80g	**80 GHz 차량용 밀리미터파 레이더 2×2 배열**(RO3003 0.25 mm). 위 행 급전선에 1.21 mm **U자 $\lambda_g/2$ 위상 보정선**을 넣어 대향 급전 빔 분열(−4.8 dBi)을 막고 **77.4–83.8 GHz 정합, 정면 +11.7 dBi** 달성(33장 탐정 사건!)	5분
radial_stub_notch_5g8	50 Ω 선로 위 직선 $\lambda_g/4$ 개방 스텁(4.05 GHz, −44 dB)과 60° 래디얼 스텁(5.75 GHz, −40 dB) 맞대결! 단독 비교 시 −10 dB 저지 대역폭이 직선은 **0.65 GHz**인 반면 래디얼은 **1.60 GHz(2.5배 광대역!)**임을 입증	3분
rf_shapes_playground	`RF equivalent` 실시간 R·L·C, 흰 손잡이 미앤더, 3종 고조파 스텁 & `Solved at` 1패스 명중 종합 실습판(34장)	4분
pa_output_match_5g8 **(+ pa_output_match_2g45)**	드레인 최적 부하 12.5 Ω(포트 1) → 25 Ω $\lambda_g/4$ 변환기(×1.07) → 50 Ω + $\lambda_g/4$ 100 Ω 바이어스·래디얼 스텁($r = 6.3$ mm). $S_{11} = -25.6$ dB, $S_{21} = -0.21$ dB, 3–9 GHz 내 기생 공진 제로 검증!	2분
tee_divider_2way_5g8 **tee_divider_4way_5g8**	RT/duroid 5880($\varepsilon_r = 2.2$) 저손실 1:2 및 1:4 T-접합 전력 분배기. 2분배기 기준 $S_{11} = -17.5$ dB, $S_{21} = S_{31} = -3.30$ dB(순수 손실 0.29 dB, 34장)	2~4분
gysel_divider_2way_5g8 **gysel_divider_4way_5g8**	**고출력 PA 결합용 Gysel 분배기!** 윌킨슨의 부유 저항 대신 격리 저항 한쪽을 **접지 비아로 빼내 방열판으로 열을 식힐 수 있는** 고전력 필수 토폴로지(22장 `RF Circuit Wizard` 연동)	3~6분

파일명 (`.warp`)	구조 특징 · 검증 수치 · 설계자 인사이트	시간
Overlap_Clear_Start_5G8 **Overlap_Clear_Result_5G8**	10장 **비파괴 동박 클리어런스(`Clear`)** **ONLY IN AETHER** 전·후 비교 쌍. CPWG 상부 접지판을 가로지르는 신호선 주변이 $2h$ 간격으로 자동 파여 단락이 해소되는 과정을 즉시 대조합니다.	2분

38.3 5.8 GHz 무선전력(WPT) 빔 집속 & Wi-Fi 165번 채널 공존 시나리오 6종

5.825 GHz(Wi-Fi 165번 채널)에서 32 W CW 무선전력 송신기를 쏠 때 옆줄에 놓인 일반 Wi-Fi 공유기·노트북과 어떻게 공존할 수 있는지를 정면으로 파헤친 독창적인 전자기 시나리오 시리즈입니다!

파일명 (`.warp`)	핵심 시나리오와 FEM이 밝혀낸 의외의 물리 진실!	시간
wpt_5g8_focus_demo	26장 근거리 구면파 집속 데모. 프레넬 수 N_F에 따른 초점 이동과 빔 단면 전계 집속도를 시각적으로 확인	3분
wpt_tx_array_5g8	유한 접지면 위의 5.825 GHz 송신 부배열($S_{11} = -36.3$ dB, 정면 12.9 dBi, 효율 87 %). **결정적 발견:** 무한 접지 가정을 버리고 실제 유한 기판을 풀어야 수평($\theta = 90°$) 측면 방사의 E면(**+2.8 dBi**) vs H면(**−11.8 dBi**) 15 dB 비대칭이 보입니다!	8분
wpt_tx_beamforming_5g8	4포트 독립 급전 위상 배열. `Edit Sources`로 균일(13.4 dBi)·테이퍼·조향($\theta = 21°, 13.1$ dBi)을 무재해석 비교. 테이퍼를 걸어도 E면 모서리 회절파(+1.9~3.0 dBi)는 줄지 않음을 증명!	10분
wpt_rx_rectenna_5g8	수신 렉테나 단일 패치(59 Ω 변환기, $S_{11} = -29.6$ dB @ 5.825 GHz, 이득 7.2 dBi, 효율 88 %, 35장)	3분
wpt_wifi_coupling_5g8	송신 부배열(Port 1)과 E면 12 cm 옆 Wi-Fi 반파장 다이폴(Port 2) 근접장 직접 결합 해석. 165번 채널(-30.1 dB)이나 149번 채널(-31.5 dB)이나 **안테나 간 공간 격리도는 거의 같으며**, 채널 분리 이득은 오직 수신기 필터 선택도에서 나옴을 입증!	12분
wpt_wifi_coupling_absorber_5g8	기판 끝과 Wi-Fi 안테나 사이에 20 mm 손실 유전체 블록($\varepsilon_r = 2, \tan\delta = 0.6$) 삽입 실험. 단순 평면 블록은 **3.2 dB(**$-30.1 \rightarrow -33.3$ dB**) 개선**에 그치며, 실질적 차단을 위해선 피라미드 흡수체나 $\lambda/4$ 초크 홈이 필수임을 정량 검증!	12분



에테르의 한마디

위 WPT–Wi-Fi 5종 모델의 결과는 `examples/wpt_wifi/index.html`을 웹 브라우저로 더블클릭해 열면 **오프라인 Three.js 대화형 3D 링크 버짓 시뮬레이터**로도 즐길 수 있습니다! 거리(1~15 m)와 Wi-Fi 채널을 바꿔 가며 간섭 여유를 확인해 보세요.

39 CHAPTER

열해석 벤치마크(Th1~Th8) · 고출력 PA 샘플 계보 · Python 스크립트 18종 백과



전자기 모델을 단 1비트도 건드리지 않는(|ΔS| = 0.0) 9개의 열해석 검증 프로젝트, 목적별로 골라 여는 6종의 고출력 GaN PA 플래그십 샘플 계보, 그리고 야간 무인 자동화를 책임지는 18종의 Python 스크립트 사용법을 총정리합니다.

배울 것
thermal_chip_on_board 입문 + Th1~Th8 전수 검증 수치표

해 볼 것
CG2H40010 vs CGH40010 PA 샘플 6종 완벽 구분 가이드

핵심 개념
Python 헤드리스 API 스크립트 18종과 5줄 자동화 코드

39.1 열해석 표준 벤치마크 9종 전수 도감 (`thermal_chip_on_board` + `Th1`~`Th8`) ONLY IN AETHER

입문용 `examples/thermal_chip_on_board.warp`(FR-4 위 0.5 W 실리콘 칩 + 하부 구리 방열판, 종료 시간 `0` 입력 시 약 $5\tau \approx 1100\,\mathrm{s}$까지 자동 과도 적분하여 정상상태 약 $80^{\circ}\mathrm{C}$ 도달, 풀이 시간 **1초!**)로 몸을 푼 뒤, `examples/thermal/` 폴더의 8대 공식 검증 벤치마크(`Th1`~`Th8`)를 순서대로 열어 보세요. 8개 전 모델에서 열 설정 전후 EM S-파라미터 변화가 **정확히** $\max|\Delta S| = 0.0$임이 수학적으로 보증되어 있습니다!

파일명 (`examples/thermal/`)	검증 물리 · 핵심 기능	실제 열 FEM 검증 수치 & 클릭해서 확인해 볼 포인트
Th1_EM_loss_coupling	**RF Loss → Heat** 유전·도체 손실 자동 매핑 + 과도 해석	2.45 GHz 10 W 도파관 유전가열. 반사·방사를 뺀 순수 흡수 전력 **6.07 W(60.7 %)** 자동 적분 → 3초 가열 후 시료 최고 온도 **42.2 °C** 정밀 도달!
Th2_transistor_Rth_TIM	**500 W LDMOS**($P_{\mathrm{diss}} = 220.6\,\mathrm{W}$) + **구리 코인** + 절점 분리 솔더 TIM	생 기판 방치 시 이론 $2404^{\circ}\mathrm{C}$ 소손 → 구리 코인 + 50 µm SAC305 TIM + 40 °C 콜드플레이트 체결 시 보드 54.7 °C, $T_j = 104.5^{\circ}\mathrm{C}$ 제압! `Heat Path`에서 R_{jc} 비중(61.8 %) 필독.
Th3_per_face_BC_radiation_thinCu	면별 개별 대류·복사(`Face BC`) + **박막 동박(`Thin Copper`)**	FR-4 위 발열체에서 35 µm(1 oz) 구리층 수평 열확산을 빼먹으면 $595^{\circ}\mathrm{C}$로 치솟던 온도가, `Thin Copper` 체크 하나로 실제 보드 온도인 $123.5^{\circ}\mathrm{C}$로 수렴하는 극적 대조!
Th4_thermal_via_wizard_compare	**Thermal Via Wizard** 이방성 균질화(k_z, k_{xy}) 4공정 비교	4 W QFN 패키지: 무비아 **272.7 °C** → $d = 0.3/p = 1.0$ 레진 **100.7 °C** → $p = 0.6$ 구리충전 **77.4 °C** → $d = 0.5/p = 0.8$ 구리충전 **75.9 °C**를 수백 개 비아 메시 없이 1초 만에 비교!

파일명 (`examples/thermal/`)	검증 물리 · 핵심 기능	실제 열 FEM 검증 수치 & 클릭해서 확인해 볼 포인트
Th5_enclosure_spreader_substrate_compare	**쉴드캔 Heat Spreader + 5종 기판 재질 일괄 스윕** (`Compare`)	밀폐 모듈 315.5 °C → 쉴드캔 TIM 연결만으로 **FR-4 150.6 °C**! 이어서 기판 교체 스윕: **RO4350B 141.0 °C → 알루미나(Al_2O_3) 77.9 °C → 질화알루미늄(AlN) 63.6 °C → 금속기판(IMS) 63.5 °C**!
Th6_PCM_pulsed_duty	**상변화 물질(PCM)** 엔탈피 잠열 + **펄스/듀티** 자동 시간 스텝	6초 주기 50 % 듀티 버스트 발열. 파라핀 잠열 블록이 융해 구간에서 열을 흡수해 피크 접합온도를 $114.9°C \rightarrow \mathbf{103.3}°C$(**–11.6 K 피크 컷!**)로 억제!
Th7_temp_RF_backcoupling	**Temp → RF** 양방향 고온 물성 역결합 폐루프	고전력 공진기가 달궈지며 ε_r : $24.0 \rightarrow 23.43$으로 이동해 공진 주파수가 밀리는 현상 재현. EM ↔ Thermal **단 2회 왕복 만에 $\Delta T < 0.5$ K 완전 수렴!**
Th8_auto_optimize	**Optimize Tj** 단조 이분법 자동 방열 치수 설계	300 W급 패키지에서 "$T_j \le 130°C$를 만족하는 최소 구리 코인 폭 `Coin_w` "를 단 10회 열해석 만에 자동 탐색 → `Coin_w = 5.83 mm` (**$T_j = 129.6°C$**) 도출!

39.2 한눈에 구분하는 고출력 GaN PA 플래그십 샘플 6종 계보도

배포 폴더에는 5.8 GHz GaN 전력증폭기 관련 `.warp` 파일이 여러 개 들어 있어 처음 보면 어느 파일을 열어야 할지 헷갈리기 쉽습니다. 아래 표로 각 파일의 역할과 계보를 명쾌하게 정리해 두세요!

파일 경로 · 이름	소자 · 포트	언제 이 파일을 열어야 하는가? (핵심 목적)
examples/pa_cg2h40010_5g8.warp	CG2H40010 · 4포트	가장 깔끔한 기본 입출력 정합망 원형. 게이트 $7.29 - j38.5\ \Omega$, 드레인 $10.52 - j12.3\ \Omega$, 격리 -50 dB. Python `14_pa_cosim_5g8.py` 와 연결해 소신호 이득 13.9 dB 확인용.
examples/pa_cg2h40010_5g8_pa_results.warp	CG2H40010 · 4포트	위 기본 보드에 대신호 압축·로드풀 `PA Results` 메타데이터를 입힌 버전.
examples/pa_cg2h40010_5g8_full_demo.warp	CG2H40010 · 6포트	**[37장 실습 A]** –33 % 면적 소형화(659 mm²), 게이트 220 Ω 안정화, 패키지 기생 감사($P_{sat} = 39.5$ dBm, HB 효율 70.5 %), 입력 스텁 1회 리튠(-18.9 dB) 완결판!
examples/pa_cg2h40010_5g8_jig.warp	CG2H40010 · 지그+열	**[37장 실습 B]** 70×50×6 mm 7핀 흑색 아노다이징 알루미늄 컷아웃 지그 + PTFE SMA 엔드런치 Wave Port(-24.1 dB) + 방열($T_j = 117.4°C$) 하드웨어 체결본!
.../pa_cgh40010_results_thermal/ CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal.warp	CGH40010 · v1 보존판	**[14장 거친 메시 반면교사!]** 고정 3 mm 거친 격자 3점 풀이로 인해 5.8 GHz에서 가짜 $S_{11} = -33.7$ dB 착시가 나타나는 교육용 보존본.
.../pa_cgh40010_results_thermal_v2/ CGH40010_5g8_PA_Results_Thermal_v2.warp	**CGH40010 · 1 RF + 4 열**	**[36장 어드벤처 마스터판 ★강력 추천!]** 수렴 EM + 실시간 E24 `PA Tuner` + 400회 공차 수율 + `TH1~TH4` 흑색 아노다이징·열폭주까지 한 파일에 담긴 종합 교보재!

39.3 GUI 없이 수십 개 모델을 돌리는 Python 스크립트 18종 백과

Aether EM의 모든 지오메트리·솔버·위저드·열해석 엔진은 순수 Python 패키지(`import aether as ae`)로 열려 있습니다! 터미널에서 `py -3.12 examples/스크립트명.py`로 즉시 실행할 수 있는 핵심 스크립트 목록입니다.

스크립트 파일명	수행 작업 및 실무 활용 포인트
01_rectangular_waveguide.py ~ 04_iris_coupled_cavity.py	코드 20줄로 도파관·동축선·평행판·아이리스 필터를 생성하고 해석해와 자동 비교하는 입문 API 정석 예제 4종
05_warps_roundtrip.py · 06_cad_import.py	`.warp` 프로젝트 파일 저장·재로드 무결성 검증 및 외부 STEP/DXF 배치 반입 자동화 예제
10_dipole_antenna.py · 11_optimize_slab.py	다이폴 원거리장 지표 추출 및 유전체 슬랩 두께 자동 최적화 루프
12_sweep_strategies.py · 13_eigenmode_cavity.py	`Discrete` vs `Interpolating` vs `Fast(_ProjectedROM)` 풀이 횟수·속도·정확도 벤치마크 및 공동 고유모드·Q_0 계산
14_pa_cosim_5g8.py · 16_rectifier_hb_5g8.py	4포트 EM 행렬에 CG2H40010 S2P를 결합하는 소신호 증폭기 Co-sim 및 7포트 쇼트키 정류기 하모닉 밸런스 배치 실행
15_wpt_wifi_fem.py	WPT–Wi-Fi 5대 모델을 순차 해석해 `.warp.wres`와 웹 뷰어용 `fem_data.js`를 자동 생성하는 대규모 파이프라인
16_smart_connect_verify.py · 17_auto_feed_verify.py	`Smart Connect` 위상 배선과 `Auto Feed Network` + `Feed Tune` ($11.7° \rightarrow 1.45°$) 자동 보정 검증 스크립트
build_examples.py · thermal/run_thermal_examples.py	`--verify` 옵션으로 전체 전자기 예제 및 `Th1~Th8` 열해석 벤치마크를 일괄 생성·풀이·회귀 검증하는 마스터 빌더

5줄로 끝나는 헤드리스(Headless) 야간 배치 실행 스니펫

낮에는 GUI에서 편안하게 모델을 다듬고, 퇴근 전 수십 가지 치수 조합을 돌릴 때는 아래처럼 5줄 스크립트로 실행하세요. 저장된 `.warp.wres` 결과 파일은 다음 날 아침 GUI에서 열면 3D 필드와 `AePlot` 차트로 즉시 이어서 볼 수 있습니다!

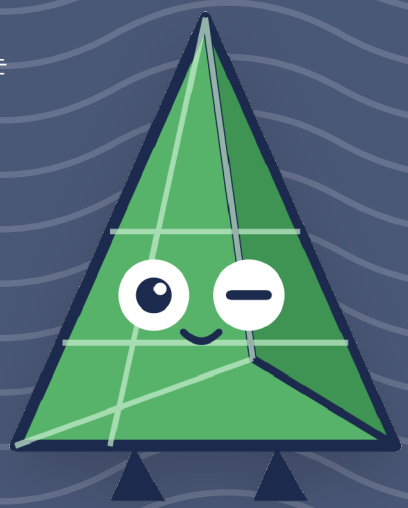
```
import aether as ae
proj = ae.Project.open("examples/patch_array_1x4_5g8.warp")
res = proj.active_design.solve_all() # MKL PARDISO + _ProjectedROM 자동 가동!
print("Min S11 [dB]:", res.min_s11_db())
proj.save()
```

PART

09

전문가 부록
응급 트러블슈팅 · 메뉴 지도 · 용어 사전

설계 도중 예기치 않은 경고창이나 이상한 그래프를 만났을 때 바로 펼쳐 보는 현장 응급처치 매뉴얼입니다. 증상별 원인·해결 진단표(모델링·메시·위저드·Co-sim·열해석 총망라), 작업 속도를 두 배로 높이는 단축키와 11개 전체 메뉴 포스터, 솔버의 정직한 물리적 경계(지원·미지원 매트릭스), 그리고 전자기·RF·WPT·열전달 핵심 용어 사전을 한자리에 모았습니다.



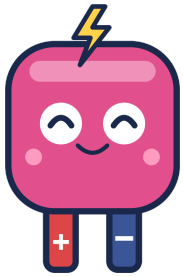
40 증상별 문제 해결 가이드 (Troubleshooting)

41 단축키 총정리와 Desktop 2026 V2.3 전체 메뉴 지도

42 지원 범위 매트릭스 · 물리 한계 요약 · 핵심 용어 사전

40 CHAPTER

증상별 문제 해결 가이드 (Troubleshooting)



현장에서 가장 자주 마주치는 당황스러운 증상들을 원인부터 즉각적인 해결책까지 일대일로 짝지었습니다. 당황하기 전에 하단 Message Manager의 노란 줄과 F5 Validation Check를 먼저 보면 이미 절반은 풀려 있습니다.

배울 것
뷰포트·고속 CAD 반입·멀티 디자인 문제

해 볼 것
포트·적렬/병렬 RLC·적응형 메시 허상 해결

핵심 개념
위저드(≈)·비선형 Co-sim·열폭주 응급처치

40.1 화면 표시 · CAD 반입 · 프로젝트 관리

증상	흔한 원인	즉각 해결책
파일을 열었는데 화면이 텅 비어 있다	투명 공기 상자만 잡혔거나 미세 부품이 시야 밖에 있음	**View ▸ Display Diagnostics** (Why blank?) 실행, `Ctrl` + `D` (Fit All) 또는 트리에서 객체 선택 후 `Ctrl` + `Shift` + `D`
반입한 STEP이 산만 하거나 점처럼 작다	원본 CAD 단위(inch/m)와 선언 단위 불일치	Import 미리보기 치수 확인 후 `Model units` 지정. 이미 들어왔다면 **Modeler ▸ Replace CAD Source** 로 단위 재지정
공기 상자(`Air`)가 안 보인다	열기 시 시야 확보를 위한 자동 은폐 (정상 동작)	**View ▸ Show Regions / PML** 토글. 화면에만 숨겨질 뿐 3D FEM 해석에는 정상 반영됨(3장)
어셈블리가 통짜 1개 바디로 들어왔다	`Import as single body` 체크 상태로 반입	바디별 반입(기본값) 사용, 또는 반입 후 **Modeler ▸ Separate Bodies** 실행

증상	흔한 원인	즉각 해결책
외부 STEP 구리 패턴의 선폭·미앤더 편집 ONLY IN AETHER	단순 솔리드로 들어와 파라메트릭 속성이 없음	트레이스 우클릭 `RF ▸ Step to RF Line...` (12·36장)으로 중심선·선폭을 역산해 스마트 RF 선로로 승격, 또는 `Faces` 탭 Offset 사용
저장된 결과가 안 열리고 지문 경고가 뜬다	해석 저장 뒤 형상·재질이 수정됨 (Fingerprint 불일치)	`F9`로 재해석하거나, 멀티 디자인 트리에서 원본 디자인 사본으로 복원

40.2 포트 · 경계 · 직렬/병렬 RLC · 메탈 지그 공진

증상	흔한 원인	즉각 해결책
"할당이 덮는 삼각형 0개" 경고	경계·포트 시트가 도체/기판 면과 미세하게 떨어짐	`F` 면 선택 모드로 실제 접촉면을 다시 집어 재할당하고 포트 범례 위치 확인
투과 위상($\angle S_{21}$)이 180° 뒤집힌다	입출력 포트 적분선 화살표 극성이 서로 반대	포트 우클릭 → `Reverse Polarity` 또는 `New Line`으로 신호→접지 방향 통일(80 GHz 대향 급전 배열은 $\lambda_g/2$ U자 지연선 삽입, 33장)
바이패스 캡(`Lumped RLC`)이 RF를 못 막는다 NEW V2.3	**`Parallel` 체크박스를 켜서 R·L·C가 병렬로 연결됨!**	실제 적층 세라믹 커패시터(ESR+ESL+C)는 **직렬 공진 소자**입니다! 반드시 `Parallel` 체크를 해제하세요 (13·36장)
"under $\lambda/8$ ... recreate open region"	해석 최저 주파수 대비 공기 상자 여유가 좁음	스윕 최저 주파수 기준으로 `Create Open Region` 재생성(또는 근접 흡수용 `PML` 채택)
Wave Port Z_0가 비정상적으로 튄다	다도체(MS/CPW)에 적분선 누락, 포트 창 폭 협소	신호→접지 적분선 지정, 포트 창 폭을 선폭의 8 ~ 10배로 확장, `Port Modes` 표 점검

증상	흔한 원인	즉각 해결책
메탈 하우징/지그에 넣자 PA가 발진한다 NEW V2.3	닫힌 금속 뚜껑 내부에서 TE_{101} 공동 공진 발생	공동 폭 $a < c/(2f_{\max})$로 줄이거나, 지그 해석 시 뚜껑을 제거한 **상부 개방 공기 경계** 사용(31·37장)

40.3 적응형 메시 · 스윕 · 최적화

증상	흔한 원인	즉각 해결책
초기 1패스 노치(−33.7 dB)가 수렴 후 사라진다	**거친 초기 격자의 수치 분산 허상(Artifact)!**	정상 현상입니다(14·36장). 절대 고정 거친 메시 1패스만 믿지 말고 연속 2패스 이상 $\lvert\Delta S\rvert$ 수렴 결과를 채택하세요
$\lvert\Delta S\rvert$가 줄지 않고 진동한다	해석 주파수가 영점(null)에 걸렸거나 급전 틈 격자 부족	적응 주파수를 통과대역/공진 중심으로 옮기고, 포트·슬롯에 `Mesh Operation` 국부 세분화 추가
스윕 곡선에 톱니 물결이 생긴다	넓은 대역을 성긴 Discrete 점으로 연결함	투영 차수축소 기반 `Fast` **스윕**(`_ProjectedROM`) 또는 `Interpolating` 스윕으로 전환
원거리장(Far Field) 메뉴가 비어 있다	필드 미저장(특히 `PML` 단독 사용 시)	해석 설정에서 `Save fields` 체크 후 재실행(17장)
최적화(Optimize)가 너무 오래 걸린다 UPGRADE	변수가 4개 이상인데 격자 탐색/단순 반복 사용	**Simulation ▸ Optimization…** 알고리즘을 `Bayesian (TPE)`로 바꾸고, 단일 노치는 `Solved at (retune)` 1패스 보정 활용(15·34장)

40.4 자동 합성 위저드 · 비선형 Co-sim · WPT NEW V2.3

증상	흔한 원인	즉각 해결책
위저드 합성 도면의 FEM 공진이 1~4 % 어긋난다	폐형식 공식(≈)에 T-접합·모서리 프린징 미포함	자연스러운 물리 차이입니다! 스텁은 `Solved at (retune)`(34장), 안테나는 `Auto-tune (FEM)`(20장), 급전망은 `Feed Tune`(21·33장)으로 1~2회 마감

증상	흔한 원인	즉각 해결책
`Auto-tune` **100 % 통과인데 ±5 % 수율이 48 %다**	최적점이 규격 경계선(예: −6.01 dB) 바로 끝에 걸침	**양산 +0.5 dB 마진 법칙:** 목표치를 0.5 dB 더 조여(예: −6.5 dB) 재튜닝하면 수율이 즉시 95 %로 급등합니다 (24·36장)
PA가 수백 MHz 저주파에서 자려 발진한다	게이트 무손실 초크 또는 PDN 병렬 반공진 피크	게이트 220 Ω 저항 급전 (`r_feed`) 채택 및 `Bias Network Designer`에서 직렬 댐핑 저항(R_{damp}) 삽입 (23·37장)
`PA Tuner` **튜닝 후 고조파 효율이 떨어졌다**	외부 기본파 트리머가 $2f_0/3f_0$ 고조파 위상을 회전시킴	`Class-F Auto-Stub`으로 보드 내 진성 평면 고조파 트랩을 먼저 맞춘 뒤 기본파만 미세 트리밍(24장)
정류기 HB 효율이 고입력에서 반토막 난다	쇼트키 접합 역전압 첨두치가 항복 전압 (`-BV`) 돌파	고조파 차수 $K \geq 8$ 확인 후, 고내압 다이오드(예: SMS3923, $\mathrm{BV} = 46\ \mathrm{V}$)로 교체하고 `Co-sim` 역반영 (25·35장)
`Cavity WPT` **전기장 빨간 경고가 뜬다**	고-Q_0 공동 내부 첨두 전기장($> 30\ \mathrm{kV/m}$) 집중	수신기 부하 결합으로 Q_L을 낮추고 완전 밀폐 도어 인터록·무인 구역에서만 운용(26장)

40.5 열해석 워크벤치 & 방열 설계 UPGRADE

증상	흔한 원인	즉각 해결책
`TH1~TH4` **열 디자인에서** `F5` `FAILED` **가 뜬다** NEW V2.3	열 전용 사본에는 EM Setup/포트가 의도적으로 비워져 있음	**고장이 아닙니다!** `F5`는 전자기(EM) 셋업 검사기입니다. 열 디자인은 상단 `Thermal` **리본 탭 ▸** `Run`으로 바로 실행하세요(36·39장)
접합온도 T_j가 $400 \sim 600\ ^\circ\mathrm{C}$로 비현실적이다	$35\ \mu\mathrm{m}$ 동박 수평 열확산이나 비아/코인 경로 누락	기판 표면에 `Thin Copper` 경계를 씌우는 것만으로 수백 도가 정상화됨 (28·39장 Th3: $595 \rightarrow 123.5\ ^\circ\mathrm{C}$!). `Heat Path`로 최대 병목 확인

증상	흔한 원인	즉각 해결책
얇은 솔더/그리스 층에서 격자가 폭발한다	$50\ \mu\mathrm{m}$ TIM을 실제 3D 얇은 박스로 모델링함	얇은 솔리드를 지우고 접촉면에 메시 추가가 전혀 없는 **절점 분리** `Contact / TIM` **경계** 할당(28장)
PA 냉각 비교에서 `thermal runaway` **가 뜬다**	효율 온도계수(`DE tempco < 0`)에 의한 실제 **열폭주!**	수치 오류가 아니라 물리적 열폭주 경보입니다(31·36장). 구리 코인·컷아웃 페데스탈을 적용하고 히트싱크에 **흑색 아노다이징(**$\varepsilon = 0.85$**)** 처리
히트싱크 핀을 촘촘히 늘렸는데 실측은 더 뜨겁다	자연대류 시 좁은 핀 사이의 공기 정체(Choking) 현상	본 열 솔버는 표면 h를 쓰는 고체 전도 FEM입니다(CFD 미포함, 30장). 무팬 자연대류에서는 핀 간격을 최소 $5 \sim 8\ \mathrm{mm}$ 이상 넓히세요

41 CHAPTER

단축키 총정리와 Desktop 2026 V2.3 전체 메뉴 지도



손끝에 익히면 클릭 횟수가 절반으로 줄어드는 필수 단축키 모음과, V2.3에서 대폭 확장된 11개 상단 메뉴 전체 지도입니다. 모든 단축키는 Tools ▸ Keyboard Shortcuts에서 내 손에 맞게 바꾸고 JSON으로 백업할 수 있습니다.

배울 것
파일·뷰포트·선택·스냅 핵심 단축키

해 볼 것
위저드·포트·AePlot 전용 조작키

핵심 개념
Desktop 2026 V2.3 11개 전체 메뉴 맵

41.1 필수 단축키 한눈에 보기

단축키	동작 설명
`Ctrl` + `N` / `Ctrl` + `O`	새 프로젝트 / 3D 미리보기 열기
`Ctrl` + `S` / `Ctrl` + `Shift` + `S`	저장 / 다른 이름으로 저장
`Ctrl` + `Z` / `Ctrl` + `Y`	실행 취소(Undo) / 다시 실행(Redo)
`Ctrl` + `C` `Ctrl` + `V` / `Ctrl` + `Shift` + `V`	복사·붙여넣기 / 붙여넣고 즉시 이동
`Ctrl` + `M` / `Del`	두 점 기준 정밀 이동 / 선택 객체 삭제
`M`	3D 거리·간극 측정 자(Measure)
`F5`	**Validation Check (6단계 사전 EM 무결성 검사)**
`F9`	**Analyze All (전체 적응형 FEM + 스윕 실행)**

단축키 · 마우스	동작 설명
`Ctrl` + `D` / `Ctrl` + `Shift` + `D`	전체 화면 맞춤(Fit All) / 선택 객체 맞춤
`Alt` + 빈 곳 클릭	가장 가까운 8방위 표준 시점 즉시 스냅
`O` `F` `E` `V`	**객체 · 면 · 모서리 · 꼭짓점 선택 모드 전환**
`B`	앞면 뒤에 가려진 내부 객체/면 순환 선택
`Ctrl`+클릭 / `Ctrl`+드래그	다중 선택 추가 / 박스 영역 선택
`P` / `S`	작업 평면(XY·YZ·ZX) 순환 / 격자 스냅 토글
`Tab` → `Enter` / `Esc`	그리기 중 정확한 좌표 수치 입력 → 확정 / 취소
`R` / `Shift` + `R` (부품 배치 중)	SMD 부품 90° 회전 / 역회전

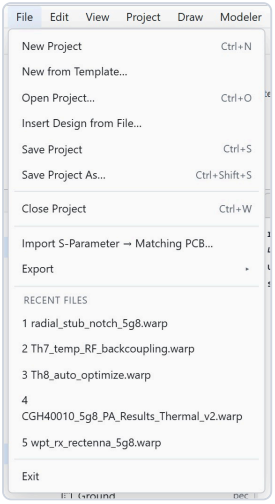
단축키	동작 설명
`Shift` + `Esc`	해석 안전 정지 (완료된 패스·스윕 결과 보존)

단축키 · 마우스	동작 설명
차트 더블클릭 NEW V2.3	`AePlot` **비모달 출판 편집기(✎ Edit) 호출**

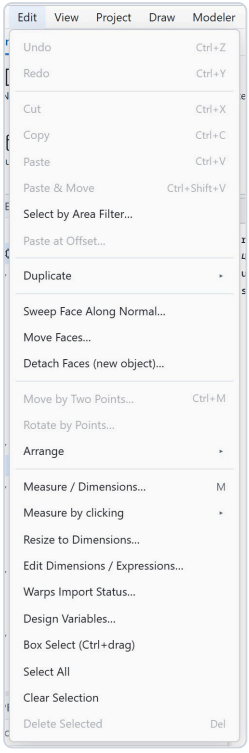
41.2 Desktop 2026 V2.3 상단 11개 전체 메뉴 지도 UPGRADE

V2.3에서는 무선전력 전용 **WPT Beam** 메뉴가 독립 신설되었고, **Tools**와 **Results** 메뉴에 안테나·PA·정합·필터·회로도 Co-sim·3-Line 디임베딩·Vector Fit 도구들이 대거 탑재되었습니다.

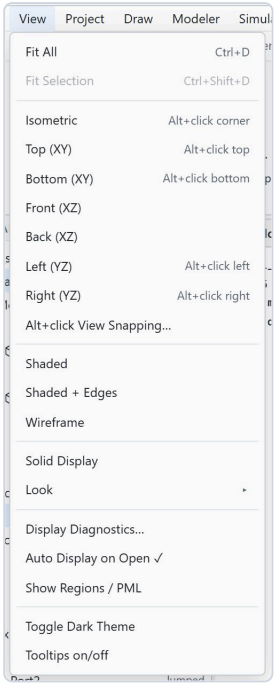
1 · File



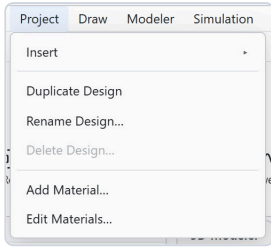
2 · Edit



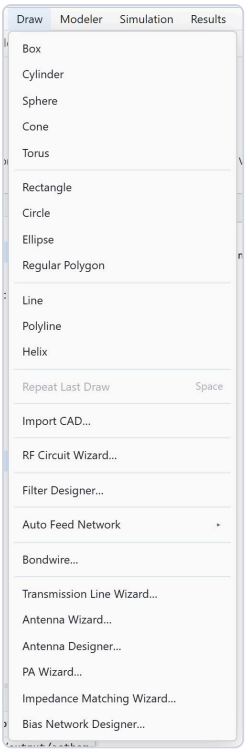
3 · View (6종 Look 포함)



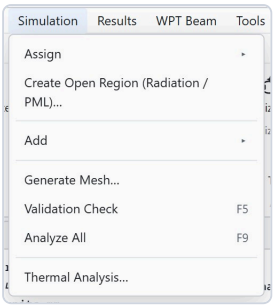
4 · Project (멀티 디자인)



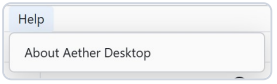
5 · Draw



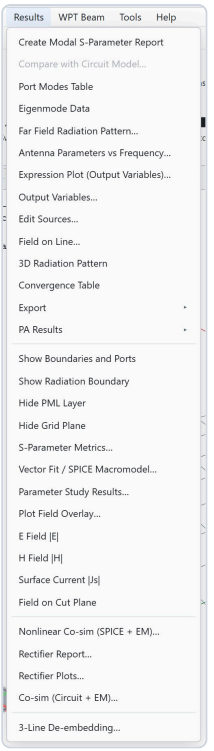
7 · Simulation



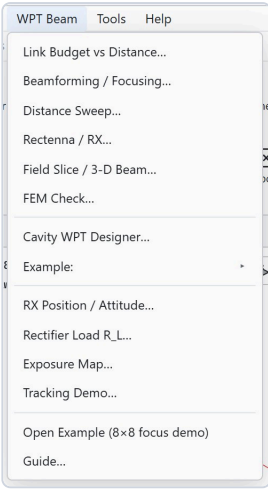
11 · Help



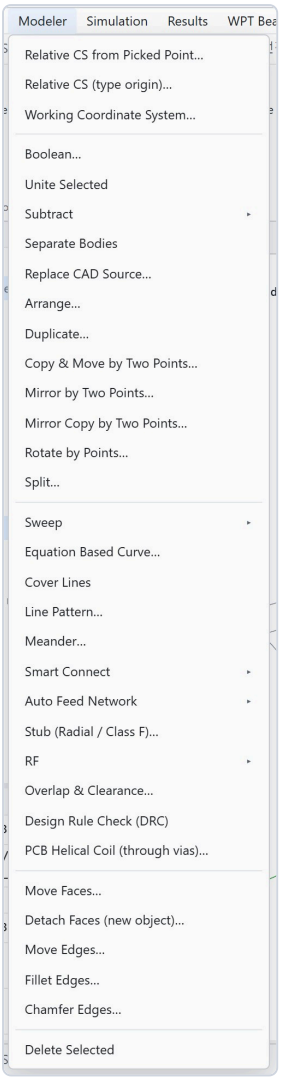
8 · Results (AePlot · PA)



9 · WPT Beam NEW V2.3



6 · Modeler (3D 형상 · 직접 편집 · RF 승격 · DRC)

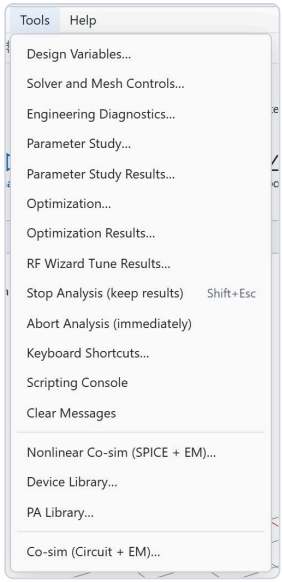


Modeler는 CAD와 RF 레이아웃의 심장입니다.

- 좌표계·불리언 (Unite/Subtract/Intersect)
- 스윕·본드와이어·`Step to RF Line…`
- `Smart Connect` · `Auto Feed Network`
- 래디얼·버터플라이·Class-F 스텁과 `Via Fill`
- 겹침 검사·`Push Neighbours`·DRC
- `Faces` 직접 편집(Offset / Delete & Heal)

10 · Tools (12대 합성 위저드 · Co-sim · 측정 보정)

NEW V2.3



Tools는 V2.3 자동 설계 생태계의 총사령부입니다.

- `Transmission Line` · `RF Circuit` · `Filter`
- `Impedance Matching` (듀얼 스미스·TLT)
- `Antenna Wizard` (22종 배열·메타표면 ·FPRA)
- `Antenna Designer` (Chu 한계·FEM 자동 튜닝)
- `PA Wizard` · `PA Library` · `Bias` · `Class-F`
- `Nonlinear Co-sim` · `Co-sim (Circuit + EM)`
- `3-Line De-embed` · `Vector Fit / SPICE`

42 CHAPTER

지원 범위 매트릭스 · 물리 한계 요약 · 핵심 용어 사전

좋은 엔지니어는 도구가 무엇을 할 수 있는지뿐 아니라 '어디까지가 모델의 가정이고 무엇을 계산하지 않는지'를 정확히 압니다. Desktop 2026 V2.3의 정직한 물리 경계와 핵심 기술 용어를 총정리합니다.



배울 것
7대 영역별 지원·미지원 정직한 매트릭스

해 볼 것
해석 결과를 신뢰하기 위한 6원칙

핵심 개념
EM·위저드·WPT·열해석 필수 용어 사전

42.1 Desktop 2026 V2.3 지원 범위와 정직한 물리 경계

영역	Desktop 2026 V2.3 정식 지원 범위	물리적 한계 · 미지원 (실측/외부 도구 영역)
3D EM 솔버	Driven Modal, Eigenmode, Nédélec 0·1·Mixed/2차 요소, 사후 오차 적응 메시, Discrete·Interpolating·`_ProjectedROM` Fast 스윕, 병렬 워커, Optuna TPE 최적화	시간 영역 과도 솔버(FDTD/FIT), 순수 무한 주기 Floquet 단위셀 경계 (메타표면은 유한 개구면 FEM으로 검증)
포트 · 경계	Wave Port(다중 모드·적분선·디임베딩), Lumped Port, Auto Port, PEC/PMC, Radiation, 6면체 PML, 표피 거칠기 유한 도체, 직·병렬 Lumped RLC(`.s2p` 포함), 대칭면(E/H)	차동 Terminal 전용 모드 분리 자동 표기 (일반 다중 포트 S-행렬 조합으로 계산)
CAD · PCB	바이너리 캐시 고속 STEP/IGES/BREP/STL/OBJ, NURBS 보존 DXF, KiCad·Gerber 스택업, `Faces` 직접 편집, `Step to RF Line`, JEDEC 본드와이어, 54종 Murata `.s2p`	암호화된 독점 Parasolid/ACIS 바이너리 직접 열기(원본 CAD에서 STEP AP214로 변환 권장)
합성 위저드	전송선(벤치 동박 역산), 안테나 22종+메타표면+Chu 소형화, Smart Connect/Auto Feed, 정합(p95·TLT), 필터(선보상), PA 4단계 파이프라인 (KiCad/ADS 경쟁) + 공간 사상 보정	초기 합성(≈)은 폐형식/전송선 근사이므로 접합 기생·표면파·하우징 결합은 반드시 3D FEM으로 마감
비선형 · 회로	다중 포트 EM + SPICE 쇼트키 다이오드 하모닉 밸런스(HB, 배압기 200× 가속), 자유 배선 SVG 회로도 `Co-sim`, 실시간 0.1초 `PA Tuner` (E24 스냅), Lumped RLC 원클릭 역반영	풀 트랜지스터 파형 물리 모델 (Angelov/EEHEMT) 직접 다중톤 HB 적분(PA 튜너는 실측 S2P·로드풀·행동 압축 모델 기반)
WPT · 공동	Goubau 빔 포집 효율(BCE), 프레넬 근거리 초점 이동(N_F), 역지향성 파일럿 위상 공액, $10\ \mathrm{W/m^2}$ 인체 안전선, 433 MHz `Cavity WPT` 모드·절연파괴 진단	생체 조직 내부 국부 SAR 3D 복셀 정밀 인증 해석(보수적 전력밀도 안전 반경 가이드 제공)
열해석 · 방열	독립 고체 전도 3D FEM($\lvert\Delta S\rvert = 0$), 정상·자동 5τ 과도, Transistor·`RF Loss→Heat`, 절점 분리 TIM, `Thin Copper`, 열비아·구리코인·히트싱크·PCM·펄스, `Optimize Tj`, `Temp→RF`, 아노다이징(ε)·열폭주 진단	나비에-스토크스 유체역학(CFD, 좁은 핀 공기 정체는 사용자 h 판단 필요), 면 대 면 뷰팩터 상호 복사, 비선형 $k(T)$

42.2 시뮬레이션 결과를 100 % 내 것으로 만드는 6가지 엔지니어 습관

01
거친 1패스를 믿지 마라
수렴표의 $|\Delta S|$가 기준 이하로 연속 안착했는지 먼저 봅니다.

02
위저드(≈)는 출발선이다
`Solved at` · `Auto-tune`으로 FEM과 닫힌 고리를 만드세요.

03
S11 너머의 효율을 보라
방사 효율(η), 진성 고조파 임피던스, 열 손실을 함께 봅니다.

04
양산 +0.5 dB 마진을 두라
400장 공차 주사위에서 살아남으려면 규격선 안쪽으로 여유를 둡니다.

05
온도와 RF를 엮어라
고출력 회로는 `DE tempco` 열폭주와 고온 드리프트까지 점검합니다.

06
벤치 실측으로 완성하라
3-Line 디임베딩과 동박 테이프 역산으로 모델과 실물을 일치시킵니다.

42.3 전자기 · 위저드 · WPT · 열해석 핵심 용어 사전

용어	명쾌한 실무 정의
Nédélec 벡터 요소	절점이 아닌 사면체 모서리(Edge)에 접선 전기장 자유도를 두어 경계면 불연속과 허위 해(Spurious mode)를 원천 제거한 3D EM 표준 유한요소
`_ProjectedROM`	소수의 앵커 주파수에서 푼 고정밀 해 공간으로 전체 FEM 행렬을 투영(Projection)하여 수백 개 주파수 응답을 수 초 만에 복원하는 차수축소 고속 스윕
공간 사상 (Space Mapping)	빠른 폐형식 위저드 모델과 느리지만 정확한 3D FEM 모델의 주파수/임피던스 편차만 역산해 단 1~2회 반복으로 목표에 명중시키는 보정 기법(`Solved at`)
Chu 한계 (Chu Limit)	안테나를 감싸는 최소 구(ka)가 작아질수록 달성 가능한 최소 공진 Q가 $1/(ka)^3$으로 치솟아 대역폭·효율 곱이 제한된다는 근본 물리 법칙
진성 드레인 평면 (Intrinsic Plane)	트랜지스터 패키지 리드·본드와이어 기생(L_{pkg}, C_{ds})을 걷어낸 실제 반도체 다이 전류원 위치. Class-F $2f_0$ 단락/$3f_0$ 개방이 맺혀야 할 진짜 기준면
MAG 기반 보드 손실	임피던스 변환 정합망의 단순 $\lvert S_{21}\rvert$에서 부정합 반사를 수학적으로 분리하고 순수 동박·유전체 열 소산 손실만 발라내는 $-10\log_{10}(\text{MAG})$ 지표
하모닉 밸런스 (HB)	비선형 소자(다이오드 등)는 시간 영역 파형으로, 선형 EM 보드는 주파수 영역 고조파 행렬로 두고 키르히호프 전류 오차가 0이 되도록 푸는 정상상태 해법
3-Line 디임베딩	길이가 다른 세 균일 전송선 측정값만으로 커넥터·런치 픽스처의 오차 박스를 추출해 순수 DUT S-파라미터를 발라내는 비표준기 교정 기법
Vector Fitting & 수동성	EM S-파라미터를 유리함수 극점-유수 합으로 근사해 SPICE 등가회로로 바꾸되, 전 주파수에서 에너지를 스스로 만들지 않도록($\lVert\mathbf{S}\rVert_2 \le 1$) 보정하는 기법
Goubau τ · BCE	송수신 개구면 크기와 거리로 정해지는 무선전력 회절 한계 파라미터(τ)와 이론 최대 빔 포집 효율(Beam Collection Efficiency)
절점 분리 TIM · 박막 동박	수십 μm 솔더/써멀패드의 두께 방향 온도 단차(절점 분리)와 35 μm 구리층의 수평 열확산(접선 전도)을 3D 얇은 격자 없이 정확히 모사하는 경계 기법
흑색 아노다이징 (ε)	알루미늄 방열판 표면을 양극산화 처리해 적외선 방사율 ε을 $0.10 \to 0.85$로 높임으로써 팬 없이도 스테판-볼츠만 복사 냉각을 5배로 극대화하는 기법

용어	명쾌한 실무 정의
열폭주 (Thermal Runaway)	온도 상승이 PA 효율 저하(`DE tempco < 0`)를 부르고, 늘어난 손실 열이 다시 온도를 밀어 올려 결국 소자 파괴 온도까지 폭주하는 양성 피드백 현상

PART 10

10

개정 보강편
2026-11 업데이트 & 결과·내보내기·AI



본문 9부가 정리된 뒤 도구에 들어온 기능과, 그동안 빠져 있던 결과 해석·내보내기·무선전력 2차 기능·AI 연계를 한곳에 모았습니다. 모든 숫자는 실제 해석과 실제 화면에서 가져왔습니다.

43 해석 전에 먼저 보는 Setup Advisor와 새 속도 기본값

44 결과를 파일로: Export 총정리

45 다이폴 하나로 읽는 전류 · E · H · 방사

46 무선전력 2차 기능: 추적 · 노출 · 자세 · 정류기 · 공진기

47 AI 에이전트와 Physical AI 연계

+ 현장 치트시트 · 찾아보기

10.0 이 부를 읽는 법

9부까지의 본문은 그대로 두고, 새 내용은 이 부에 모았습니다. 아래 표는 '어느 본문 장을 읽다가 어디를 이어 보면 되는지'를 보여 줍니다.

본문 장	이어서 볼 보강 장	보강되는 내용
14장 Solution Setup	43장 Setup Advisor	해석 전 설정 점검, Fast 스윕 기본값
15장 검사 · 실행	43장	Apply / Ignore 흐름, 측정 근거
16–17장 결과 읽기	45장 다이폴 4종 결과	S11 · Smith · 전류 · E · H · 방사를 한 예제로
18장 공유	44장 Export 총정리	3D 뷰어, 리포트, Paper, DXF, Touchstone, CSV
26장 WPT Beam	46장 WPT 2차 기능	이동 RX 추적, 노출 지도, 자세, R_L, 공진기
39장 Python 스크립트	47장 AI · Physical AI	에이전트 루프, 검증된 CLI 출력

10.1 개정 요약: 무엇이 새로 들어왔나 NEW

영역	추가 · 변경	장
해석 설정	Setup Advisor(Simulation 메뉴), 새 스윕은 Fast 기본, wave 포트 저랭크 기본 ON	43
내보내기	three.js 3D 뷰어(복소 E·H·Js, 임의 단면·프로브), HTML·PDF 리포트, IEEE 논문 초안, DXF 2D·3D	44
결과 읽기	Smith 차트 마커, 전류 · E · H 위상 애니메이션, 3D 이득 패턴	45
무선전력	Exposure Map, Tracking Demo, RX Position / Attitude, Rectifier Load R_L, Resonator WPT, Cavity Resonator Designer	46
자동화	aether new · solve · validate · info, Python API, 텍스트 .warp 흐름	47
그림	본문의 GUI 그림 26장을 최신 화면으로 교체, 깨진 그림 3장(19-2 · 20-1 · 26-1) 복구	전체



에테르의 한마디

숫자 옆의 '측정'과 '추정'을 구분해 읽으세요. 이 부의 표에서 **측정**은 실제로 돌린 값, **설계 계산**은 모델식으로 구한 값입니다.

43 CHAPTER

해석 전에 먼저 보는 Setup Advisor와 새 속도 기본값



해석 버튼을 누르기 전에 모델을 읽고, 정확도 목표에 맞는 설정을 **근거와 함께** 제안하는 도우미입니다. 아무것도 자동으로 바꾸지 않고, 고른 것만 적용합니다.

배울 것
Setup Advisor를 여는 곳과 읽는 순서

해볼 것
Simulation ▸ Setup Advisor...로 내 모델 점검

핵심 개념
정확도 목표 대 속도, 측정 · 추정 · 보류 라벨

43.1 무엇을 읽고 무엇을 제안하나 NEW V2.3

`Simulation ▸ Setup Advisor…`를 엽니다. 해석을 시작(Analyze Start)하기 전에도 자동으로 표시되며, 위쪽에는 모델 요약, 아래쪽에는 추천 목록이 나옵니다.

읽는 항목	예: 5.8 GHz 빔포밍 예제
Frequency	5.725 – 5.925 GHz
Model size	174.63 × 65.52 × 26.55 mm (3.45 λ0)
Substrate	εr 3.55, h 0.813 mm
Copper · Vias	시트 0 · 비아 0
Ports	4개(wave 0), 방사 경계 있음 → 날카로운 공진 가능
Memory	여유 10.6 GiB. 해석이 들어가는지 미리 확인

'설명' 열은 그 값이 해석에 어떤 의미인지(예: λ0, 유효 유전율로 구한 λg, h/λg)를 알려 줍니다. 모델이 바뀌면 값도 바뀝니다.



그림 43-1 Setup Advisor. 위: 정확도 목표와 모델 요약, 가운데: 차수별 측정표, 아래: 추천 목록(Apply all · Apply selected · Ignore).

43.2 정확도 목표와 추천 읽기

도우미의 기준은 **S21 위상이 수렴한 참값에서 1° 이내**, 그리고 **fast 스윕이 같은 메시의 discrete 스윕과 0.5 dB · 2° 이내**입니다. 추천은 Apply를 눌러야만 적용되고, Ignore는 설정을 하나도 바꾸지 않습니다. 근거는 창의 Evidence ▸ show에서 펼쳐 봅니다.

MEASURED
실제로 돌려서 나온 숫자입니다. 가장 믿을 수 있습니다.

ESTIMATED · PENDING
추정은 외삽한 값, 보류는 기능은 있지만 목표 검증 전이라 필요할 때만 씁니다.

차수 선택의 측정 근거 (같은 정확도 목표)

모델	차수	시간	메모리	위상 오차
마이크로스트립 15 mm	1차(p1)	122.8 s	2.68 GiB	0.8°
	2차(p2)	47.8 s	1.88 GiB	0.5°
	혼합(mixed)	80.2 s	2.54 GiB	0.1°
마이크로스트립 50 mm	1차(p1)	91.7 s	2.94 GiB	1.1°
	2차(p2)	60.2 s	2.22 GiB	0.6°
	혼합(mixed)	81.4 s	2.51 GiB	0.2°

빔포밍 예제에서 나온 추천 (4건 중 처음 2건)

- **Adaptive convergence** estimated: ΔS 0.03 · 8패스 → ΔS 0.02 · 10패스 이상. 방사 경계가 있는 패치 · 안테나 모델이라 반사 |S11|과 공진 주파수는 ΔS 0.02에서 이미 수렴하고, 0.003까지 강제하면 패스만 늘 뿐 결과는 거의 같다고 설명합니다.
- **Refinement marking** measured: fraction → Dörfler(θ 0.6). 오차가 큰 요소만 골라 다듬어 패스당 tet 증가가 작고, solid 모델에서 208.6 s → 96.7 s로 줄었습니다.

나머지 추천은 창을 아래로 스크롤하면 보입니다. 추천의 개수와 내용은 모델마다 다릅니다.

HOW TO · 5단계

1. 모델을 연 뒤 `Simulation ▸ Setup Advisor…`를 엽니다.
2. 위쪽 모델 표가 내 모델과 맞는지 확인합니다(주파수, 크기, 포트 수).
3. 추천마다 **측정** 라벨과 근거를 읽습니다.
4. 쓸 것만 체크하고 **Apply selected**를 누릅니다. 전부 쓰려면 Apply all.
5. Analyze를 실행합니다. 적용한 값은 Setup 창에서 확인하고 바꿀 수 있습니다.



위즈의 경고
pending 추천은 검증 결과 '같은 정확도에서 이득 없음'으로 나온 것도 있습니다(예: via lowpoly). 근거를 읽고 필요할 때만 켜세요.

43.3 새로 바뀐 속도 기본값 2026-11-05

정확도는 그대로 두고(같은 메시에서 |ΔS| < 1e-3 기준, 실측은 1e-13 수준) 느린 곳만 고쳤습니다. 모두 설정이나 환경변수로 끌 수 있습니다.

항목	기본	설명 · 끄는 법
Fast 스윕	새 스윕 기본	새로 만드는 스윕이 Fast이고 포트 보간(port_interp)이 켜집니다. `AETHER_PORT_INTERP=0`으로 끕니다. 이미 저장된 스윕은 바뀌지 않습니다.
Wave 포트 저랭크	ON	Woodbury 저랭크 갱신을 씁니다. 큰 포트면은 sparse shift-invert로 풉니다. `AETHER_PORT_LOWRANK=0`
Mixed 차수 규칙	opt-in	`AETHER_MIXED_RULE=band2`: 금속·포트 근처는 2차, 바깥은 1차. 측정에서는 기본 field 규칙보다 낫지 않았습니다.
병렬 · 배치 조립	opt-in	`AETHER_ASSEMBLY_WORKERS=N`: 병렬 조립이 38–48 % 줄지만 작은 모델은 전체 시간이 거의 같습니다. `AETHER_FAST_ASSEMBLY=1`: 배치 조립은 조립 단계가 2–2.4배 빨라집니다.
기판 z 늘림 메시 · 구리 합집합 · 포트 imprint	opt-in / 자동	구리 시트의 2-D 합집합은 shapely가 있을 때만 쓰고, 없으면 기존 OCC 방식으로 동작합니다.

대역통과 필터 전체 시간
53.0 → 25.4 s (2.1배)

PA 예제 전체 시간
41.9 → 33.9 s (1.24배)

이전 판과 |ΔS| 차이
≈ 1e-14

출처: 속도 개선 문서의 측정(2026-11-01, 4스레드, 같은 PC에서 이전 판과 번갈아 실행). 모델과 PC에 따라 달라지며, 적응 패스 · 메시 · full solve 횟수는 이전 판과 동일했습니다.

HOW TO · 업데이트를 적용한 뒤

1. 브라우저에서 `Ctrl+F5`로 강력 새로고침합니다.
2. 새 스윕을 만들어 Fast가 기본으로 들어갔는지 확인합니다.
3. 이전 프로젝트의 스윕은 그대로이니, 필요하면 Fast로 바꿔 다시 풉니다.



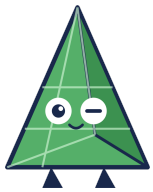
메시의 팁

속도 옵션을 바꾼 뒤에는 같은 모델에서 S11 한두 점을 이전 결과와 겹쳐 보세요. 정확도가 같은지 눈으로 확인하는 가장 빠른 방법입니다.

44 CHAPTER

결과를 파일로: Export 총정리

해석 결과는 화면에서 끝나지 않습니다. 3D 뷰어, 리포트, 논문 초안, 도면, 표준 데이터 파일로 그대로 가져갈 수 있습니다.



배울 것	해볼 것	핵심 개념
내보내기 형식과 메뉴 위치	File ▸ Export 3D Viewer로 공유용 HTML 만들기	받는 사람이 Aether 없이 열 수 있는가

44.1 내보내기 지도 UPGRADE

형식	메뉴	담기는 것 · 열기
three.js 3D 뷰어 .html	File ▸ Export 3D Viewer (three.js)...	모델과 결과. 브라우저로 열며 Aether · 파이썬 · 네트워크가 필요 없음
PDF 리포트	File ▸ Export Report...	모델 뷰, 재료 · 경계 · 포트 · 설정, S 파라미터, 수렴 이력, 필드 · 열 그림
HTML 리포트	aether solve ... --out NAME	요약 타일과 표 한 장. S 파라미터 · CSV와 함께 한 번에 생성
Touchstone .sNp	Results ▸ Export S-parameters...	포트 이름이 주석으로 들어감(Port[1] = p1)
CSV	그래프 창의 CSV 버튼 · NAME_sparams.csv	주파수별 dB와 위상 열
IEEE 논문 초안	File ▸ Export ▸ Paper...	IEEEtran 2단 .tex + figs/ + .bib, 요청 시 .docx · .pdf
DXF 도면	File ▸ Export ▸ DXF Drawing...	2D 레이아웃 또는 3D 표면, 단위 mm
CAD · 해 데이터	Export CAD Geometry... · Export Solution Data...	형상은 CAD 파일로, 해는 데이터 파일로



에테르의 한마디

고객이나 동료에게 보낼 때는 **3D 뷰어 .html** 하나면 충분합니다. 받는 쪽이 아무것도 설치하지 않아도 단면을 옮기고 위상을 돌려 볼 수 있습니다.

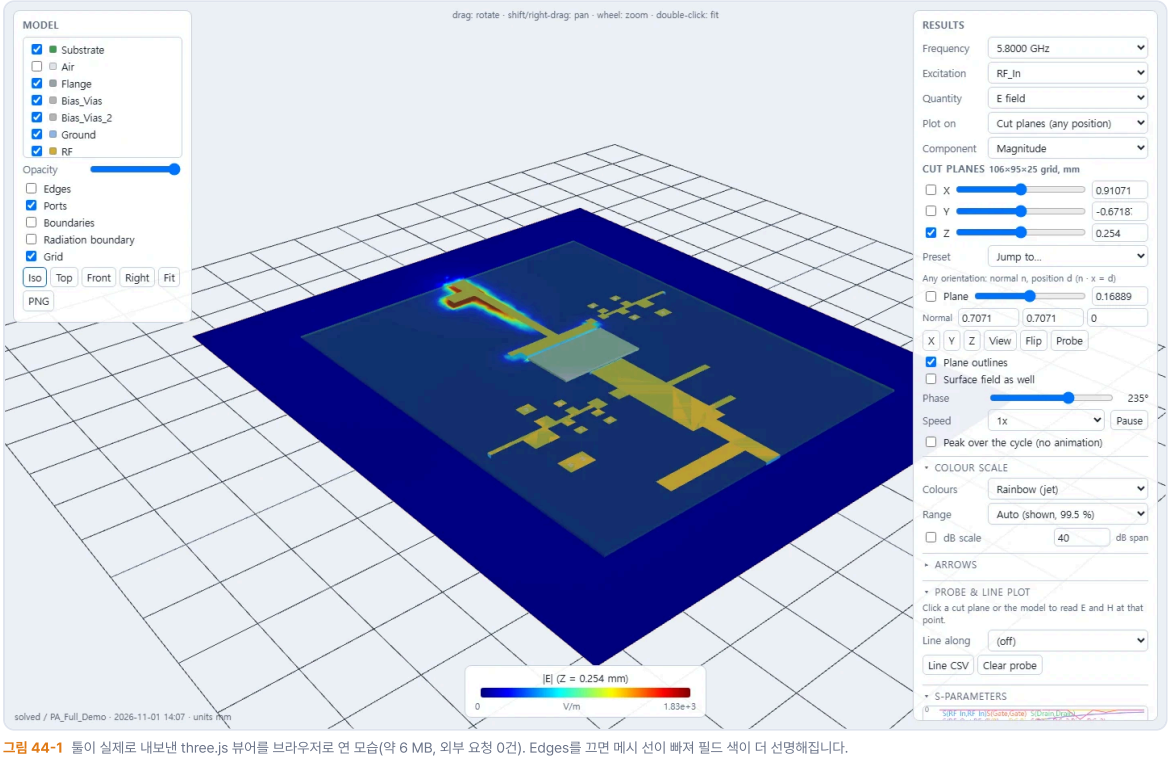


그림 44-1 툴이 실제로 내보낸 three.js 뷰어를 브라우저로 연 모습(약 6 MB, 외부 요청 0건). Edges를 끄면 메시 선이 빠져 필드 색이 더 선명해집니다.

44.2 three.js 3D 뷰어 속을 들여다보기

뷰어 파일은 모델의 삼각형, 색과 투명도, 포트·경계면, 모서리뿐 아니라 저장한 주파수와 여기별 **복소 E · H · 표면 전류**와 복소 원거리장을 담습니다. 필드는 각 경계에서 세분된 격자로 담겨 있어서 임의의 위치에 단면을 만들 수 있습니다.

보는 법

- X · Y · Z 단면 슬라이더, 임의 법선 단면 하나
- Phase 슬라이더와 속도(1x), Pause, 한 주기 피크 보기
- Probe: 점을 눌러 E · H 값 읽기, Line CSV

보기 옵션

- 색 범위 Auto(99.5 %), dB 스케일, 컬러맵
- Edges · Ports · Boundaries · Grid 표시, PNG 저장
- Iso · Top · Front · Right 시점, 투명도

용량을 줄이는 방법

모든 이진 배열은 zlib으로 압축하고 같은 배열은 한 번만 저장합니다. 복소 필드는 10비트 로그 크기(80 dB, 0.08 dB 단위)와 8비트 위상(1.4°)으로 담고 차분 부호화하며 three.js 자체도 압축해 넣습니다.

HOW TO · 공유용 뷰어 만들기

1. 해석할 때 **Save fields**를 켜고 Analyze를 실행합니다.
2. `File ▸ Export 3D Viewer (three.js)…`를 고르고 파일 이름을 정합니다.
3. 만들어진 .html을 더블클릭해 브라우저에서 확인합니다.
4. 보낼 때 위상을 돌려 한 주기를 보여 줄 단면(Z 슬라이더)을 먼저 맞춰 둡니다.



위즈의 한마디

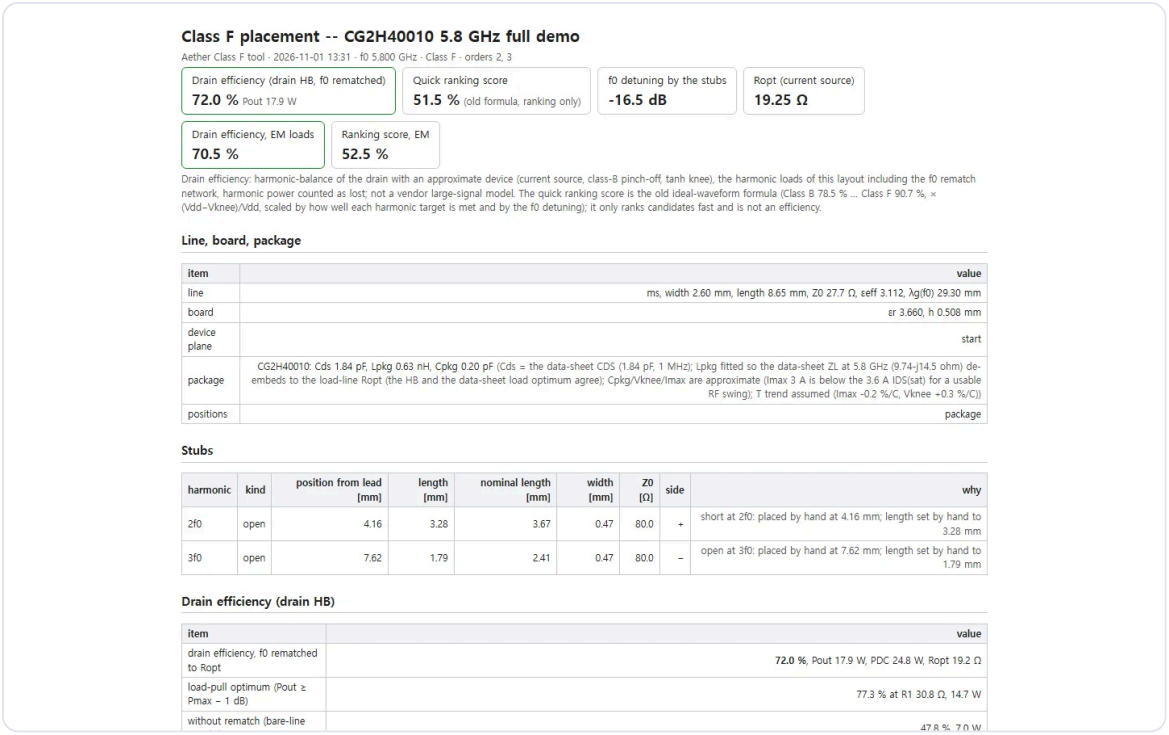
뷰어 배경은 받는 사람의 시스템 색 구성표를 따릅니다. 문서에 넣을 이미지는 밝은 구성표에서 Edges를 끄고 PNG로 저장하면 깔끔합니다.

44.3 숫자로 가져가기: Touchstone · CSV

```
! Touchstone file written by Aether-EM
! 2-port S-parameters, 10 frequency points
! Port[1] = p1
! Port[2] = p2
# GHz S RI R 37.673
1 -2.688e-09 -6.080e-09 0.91343 -0.40700 0.91343 -0.40700 ...
```

포트 이름이 주석으로 들어가므로 다른 도구나 Co-sim이 포트 매핑을 그대로 읽습니다. CSV는 `Freq[Hz], dB(S11), ang(S11)[deg], …` 열로 나옵니다.

44.4 리포트 · 논문 초안 · 도면



Class F placement -- CG2H40010 5.8 GHz full demo

Aether Class F tool · 2026-11-01 13:31 · f0 5.800 GHz · Class F · orders 2, 3

Drain efficiency (drain HB, f0 rematched)	Quick ranking score	f0 detuning by the stubs	Ropt (current source)
72.0 % Pout 17.9 W	**51.5 %** (old formula, ranking only)	**-16.5 dB**	**19.25 Ω**

Drain efficiency, EM loads	Ranking score, EM
70.5 %	**52.5 %**

Drain efficiency: harmonic-balance of the drain with an approximate device (current source, class-B pinch-off, tanh knee), the harmonic loads of this layout including the f0 rematch network, harmonic power counted as lost; not a vendor large-signal model. The quick ranking score is the old ideal-waveform formula (Class B 78.5 % ... Class F 90.7 %, × (Vdd−Vknee)/Vdd, scaled by how well each harmonic target is met and by the f0 detuning); it only ranks candidates fast and is not an efficiency.

Line, board, package

item	value
line	ms, width 2.60 mm, length 8.65 mm, Z0 27.7 Ω, εeff 3.112, λg(f0) 29.30 mm
board	εr 3.660, h 0.508 mm
device plane	start
package	CG2H40010: Cds 1.84 pF, Lpkg 0.63 nH, Cpkg 0.20 pF (Cds = the data-sheet CDS (1.84 pF, 1 MHz); Lpkg fitted so the data-sheet ZL at 5.8 GHz (9.74-j14.5 ohm) de-embeds to the load-line Ropt (the HB and the data-sheet load optimum agree); Cpkg/Vknee/Imax are approximate (Imax 3 A is below the 3.6 A IDS(sat) for a usable RF swing); T trend assumed (Imax -0.2 %/C, Vknee +0.3 %/C))
positions	package

Stubs

harmonic	kind	position from lead [mm]	length [mm]	nominal length [mm]	width [mm]	Z0 [Ω]	side	why
2f0	open	4.16	3.28	3.67	0.47	80.0	+	short at 2f0: placed by hand at 4.16 mm; length set by hand to 3.28 mm
3f0	open	7.62	1.79	2.41	0.47	80.0	–	open at 3f0: placed by hand at 7.62 mm; length set by hand to 1.79 mm

Drain efficiency (drain HB)

item	value
drain efficiency, f0 rematched to Ropt	**72.0 %**, Pout 17.9 W, PDC 24.8 W, Ropt 19.2 Ω
load-pull optimum (Pout ≥ Pmax − 1 dB)	77.3 % at R1 30.8 Ω, 14.7 W
without rematch (bare-line	47.8 %, 7.0 W

그림 44-2 툴이 내보낸 HTML 리포트 예(Class F 배치 리포트). 요약 타일과 표의 값은 모두 해에서 계산됩니다.

형식	알아 둘 점
PDF 리포트	모델의 여러 각도 뷰, 객체 · 재료 · 경계 · 포트 · 해석 설정, S 파라미터(dB · 위상 · Smith), 공진 표, 수렴 이력, 필드 · 열 그림을 다쪽 PDF로 만듭니다. 한글 폰트(NanumGothic)를 내장해서 어디서 열어도 같게 보입니다.
IEEE 논문 초안	본문의 모든 숫자는 설계 · 해 · 내장 해석 모델에서 옵니다. 기여 · 관련 연구 · 논의는 `[TODO: …]`로 비워 두고, 참고문헌은 앱에 내장된 목록에서만 가져옵니다. 초안이므로 사람이 채워야 합니다.
DXF 도면	2D는 닫힌 외곽선(LWPOLYLINE, 원호는 bulge, 원은 CIRCLE)과 선택적 HATCH, 3D는 3DFACE 표면과 CAD 모서리 폴리선입니다. 레이어는 객체 · 재료 · z 평면 기준입니다.

HOW TO · 논문 초안 만들기

1. 해석을 마친 디자인을 열어 둡니다.
2. `File ▸ Export ▸ Paper…`에서 .docx · .pdf가 필요한지 고릅니다.
3. 만들어진 .tex와 figs/를 열어 `[TODO]` 문단을 직접 채웁니다.
4. pdflatex가 있으면 그것으로, 없으면 내장 ReportLab 2단 렌더러로 PDF가 만들어집니다.



포티의 체크

도면을 받는 제작사가 요구하는 **단위와 층 규칙**을 먼저 확인하세요. 이 도구의 DXF는 mm 단위이고 레이어를 객체 · 재료 · z 평면 중에서 고릅니다.

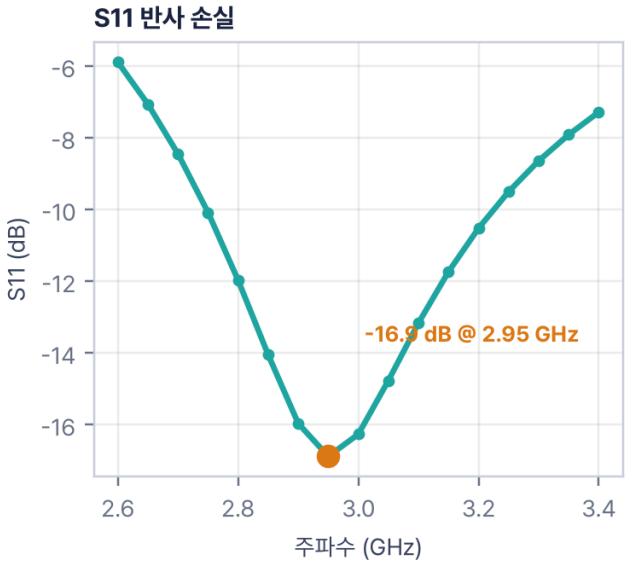
45 CHAPTER
다이폴 하나로 읽는 전류 · E · H · 방사

같은 해에서 나온 네 가지 결과를 한 예제로 비교합니다. 눈에 보이지 않는 현상이 서로 어떻게 맞물리는지 보면 16–17장의 읽는 법이 한 번에 정리됩니다.



배울 것	해볼 것	핵심 개념
S11 · Smith · Js · E · H · 방사의 연결	examples/dipole_antenna.warp를 풀고 위상을 돌려 보기	전류가 크면 H가 크고, 끝에서는 E가 크다

45.1 S11과 Smith 차트



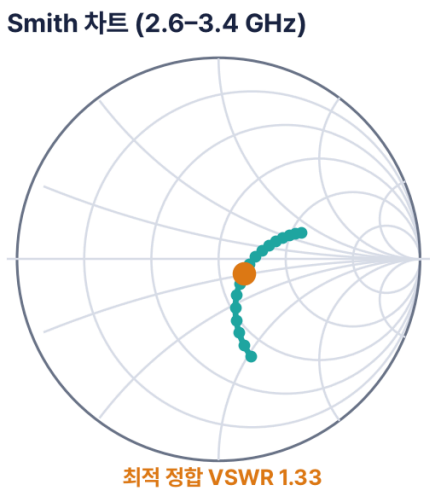


그림 45-1 다이폴 예제(3 GHz 급)의 S11(왼쪽)과 같은 점들을 Smith 차트에 옮긴 것(오른쪽). 2.95 GHz에서 −16.9 dB, VSWR 1.33으로 가장 잘 맞습니다.

최적 정합	VSWR	Zin (그 점)
−16.9 dB @ 2.95 GHz	**1.33**	**64 − j9 Ω**

Smith 차트에서 궤적이 정중앙(50 Ω)에 가까울수록 잘 맞는 것입니다. 주파수가 오르면 궤적이 시계 방향으로 돌아가고, 최적점은 실수축 근처의 점입니다. 위쪽은 유도성, 아래쪽은 용량성입니다.



에테르의 한마디

S11 곡선의 최저점과 Smith 차트의 중앙 근처 점은 **같은 주파수**여야 합니다. 어긋나 있으면 포트 기준 임피던스를 먼저 의심하세요.

45.2 표면 전류 `Results ▸ Surface Current |Js|`

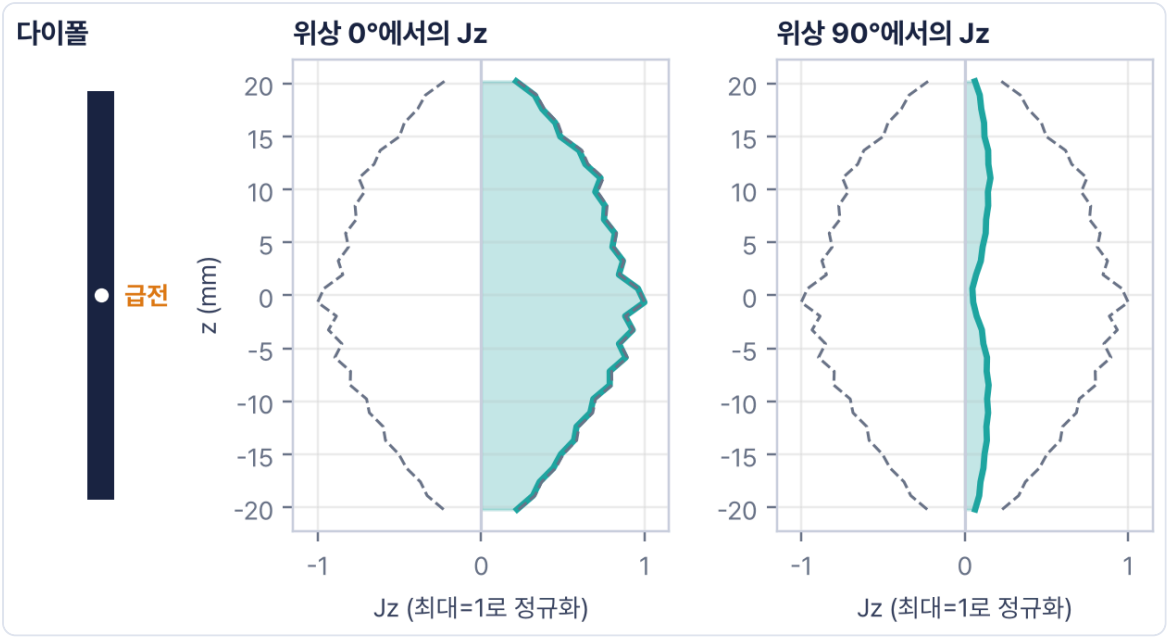


그림 45-2 다이폴 표면의 z 방향 전류 Jz. 점선은 위상과 무관한 크기(포락선), 실선은 지정한 위상에서의 순간값입니다. 값은 최댓값을 1로 정규화했습니다.

전류는 **급전점(z ≈ −0.7 mm)에서 최대**이고 팔 끝으로 갈수록 줄어드는 정재파 모양입니다. 팔 끝의 크기는 최대의 약 23 %입니다. 위상을 90° 돌리면 순간값이 거의 0으로 내려가는데, 전류와 전압이 서로 90° 어긋나 있기 때문입니다.

45.3 E 필드와 H 필드 `Results ▸ E Field |E| · H Field |H|`

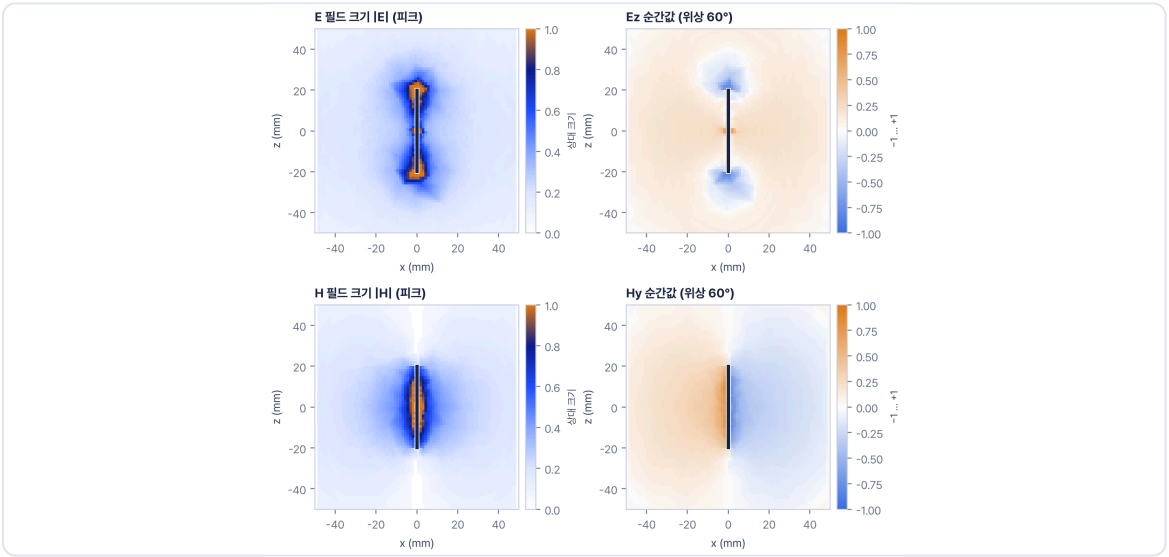


그림 45-3 x–z 단면(y = 0)의 E(위)와 H(아래). 왼쪽은 위상과 무관한 크기, 오른쪽은 위상 60°에서의 순간 성분(Ez, Hy)입니다. 색 범위는 상위 0.5 %를 잘라 낸 99.5 % 분위를 1로 정규화했습니다.

- **E는 팔 끝에서 가장 셉니다.** 급전 간극을 뺀 |Ez| 최대는 팔 끝(x = −0.6, z = −20.9 mm)입니다. 전하가 끝에 모이기 때문입니다.
- **H는 전류를 감쌉니다.** 이 단면에서는 단면에 수직한 Hy가 전체 필드 에너지의 약 98 %이고, 급전 근처(x = 1.9, z = 4.4 mm)에서 가장 큽니다.

45.4 방사패턴 `Results ▸ 3D Radiation Pattern`

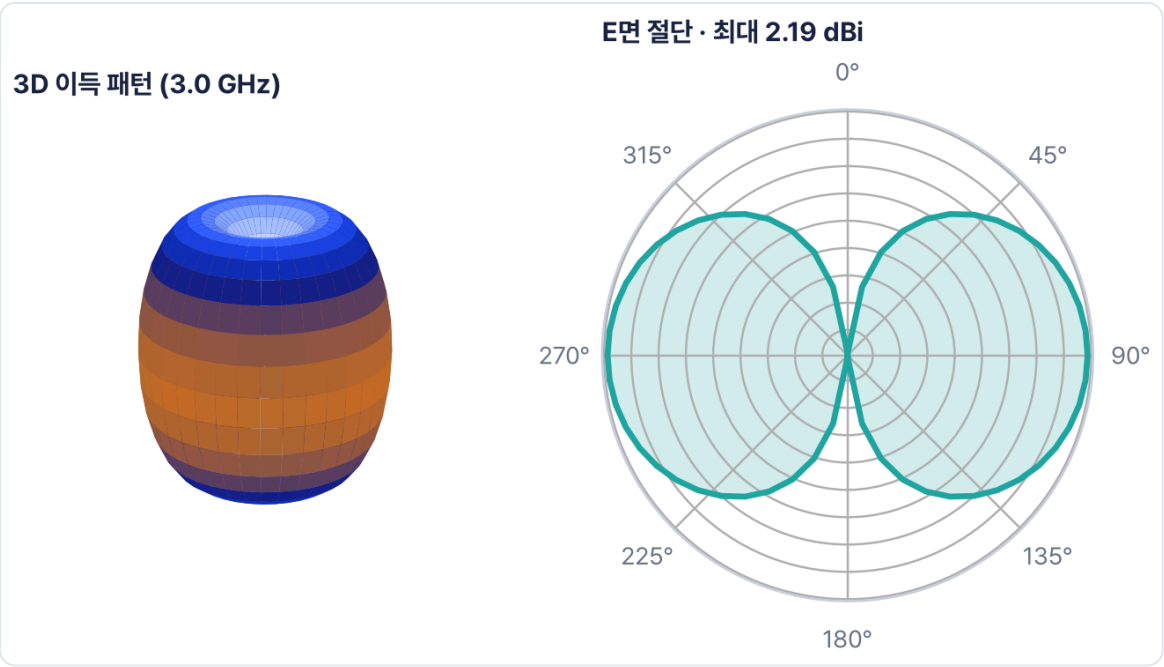


그림 45-4 3 GHz 3D 이득 패턴(왼쪽)과 E면 절단(오른쪽). 반지름은 필드 진폭에 비례하게 그려 도넛 모양이 보입니다.

최대 지향성	이론(반파 다이폴)	축 방향 최소
2.19 dBi	**2.15 dBi**	**−54.8 dBi**

다이폴은 팔 축에 수직인 방향(θ = 90°)으로 가장 세게 방사하고 축 방향에는 거의 방사하지 않습니다. 방위각(φ)에 따른 변화는 약 0.05 dB로 사실상 원형입니다.

45.5 네 결과를 한 줄로 연결하기

결과	무엇을 말해 주나	이상하면 의심할 것
S11 · Smith	입력에서 얼마나 되돌아오나	포트 기준 임피던스, 공진 주파수 어긋남
표면 전류 Js	어디가 방사에 쓰이나	끊어진 급전, 예상 밖의 전류 경로
E 필드	전하가 모이는 곳(끝 · 모서리)	메시가 거친 곳의 가짜 피크
H 필드	전류 둘레의 고리	대칭이어야 하는데 한쪽만 세다면 급전 비대칭
방사패턴	어느 방향으로 얼마나 나가나	null이 한쪽으로 기울면 경계 · 접지 문제



위즈의 경고

이 예제는 기본 메시(6,060 사면체)로 푼 결과라서 급전 간극과 모서리 근처의 국소 값은 거칠 수 있습니다. 정확한 수치가 필요하면 17장처럼 국부 메시를 보강하세요.

46 CHAPTER

무선전력 2차 기능: 추적 · 노출 · 자세 · 정류기 · 공진기



26장에서 익힌 WPT Beam 탭에 더해진 기능들입니다. 움직이는 수신기를 따라가고, 사람이 가까이 올 때의 한도를 지키고, 자세가 바뀌어도 효율을 계산합니다.

배울 것
이동 RX 추적, 노출 지도, RX 자세, R_L, 공진기

해볼 것
WPT Beam ▸ Tracking Demo...에서 8자 경로 돌리기

핵심 개념
역지향 재조준은 수신기 위치를 몰라도 된다

46.1 메뉴 한눈에 NEW V2.3

메뉴 (WPT Beam)	하는 일
Link Budget · Beamforming / Focusing · Distance Sweep	링크 버짓, 조향 대 집속, 거리에 따른 전력
Rectenna / RX · Field Slice / 3-D Beam · FEM Check	수신기 효율, 필드 단면과 3D 빔, FEM 검증
Tracking Demo...	RX가 직선 · 원 · 8자 경로로 움직일 때 매 스텝 재조준
Exposure Map...	빔 평면 전력밀도를 한도 대비 dB 지도로, 권장 송신 전력
RX Position / Attitude...	RX 위치 오프셋 · 기울기 · 회전 · 편파 손실
Rectifier Load R_L...	부하 저항에 따른 PCE · Vdc
Resonator WPT · Cavity WPT · Cavity Resonator Designer...	평면 공진기 CMT 링크, 공동 공진기 WPT 자동 설계

46.2 움직이는 수신기를 따라가기

RX가 경로를 따라 움직이면 매 스텝(또는 N 스텝마다) 레트로디렉티브 재조준을 합니다. 파일럿 위상에는 잡음 1/√(2·SNR) rad를 더하고 위상은 비트 수에 맞춰 양자화합니다. 추적, 이상적 추적, 고정 빔을 비교합니다.

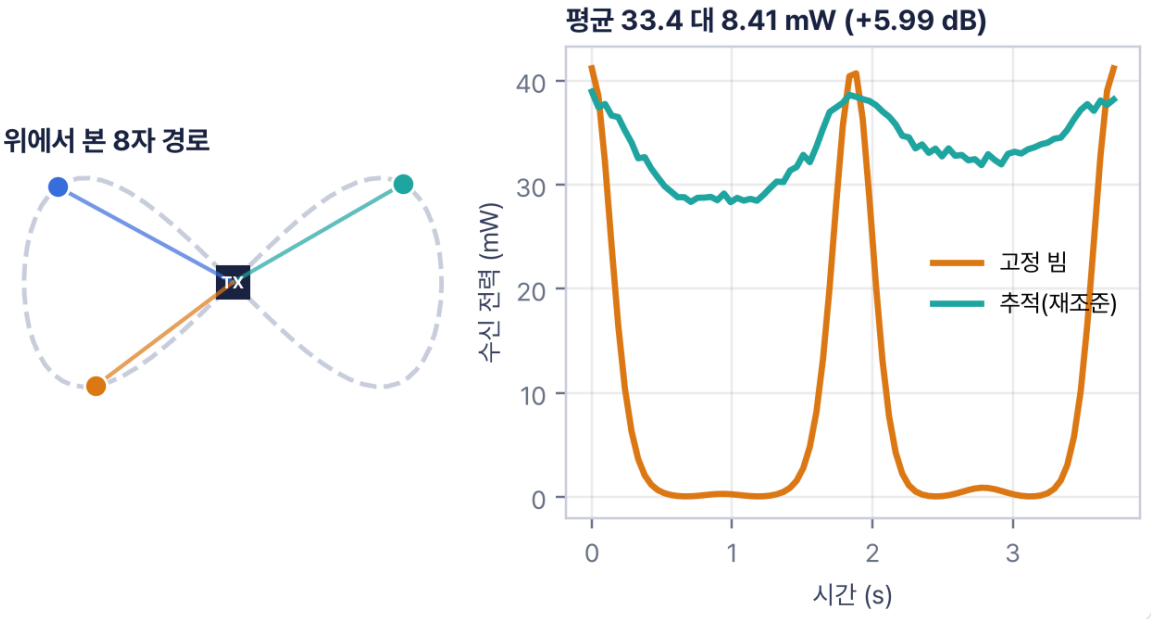


그림 46-1 8자 경로(0.6 m, 0.5 m/s), 위상 3비트, 파일럿 SNR 10 dB. 왼쪽은 위에서 본 경로와 세 시점의 빔 방향, 오른쪽은 시간에 따른 수신 전력입니다. 툴의 추적 계산을 그대로 실행한 값입니다.

고정 빔 대비 이득	평균 수신 전력	평균 DC	이상 추적 대비
+5.99 dB	**33.4 / 8.41 mW**	**21.4 / 5.2 mW**	**−0.35 dB**

고정 빔은 경로를 따라 수신 전력이 **0.03 mW까지** 떨어지지만 추적은 28.3 mW 이상을 유지합니다. 3비트 위상과 SNR 10 dB 조건에서도 이상 추적보다 0.35 dB만 낮습니다.

46.3 사람 곁에서의 한도 `Exposure Map…`

기준	한도	출처
한국 일반인 2–300 GHz	10 W/m²	전자파인체보호기준 제2019-4호
FCC 일반인 1.5–100 GHz	1.0 mW/cm² (= 10 W/m², 30분 평균)	47 CFR §1.1310 Table 1(B)
ICNIRP 2020 일반인 2–300 GHz	10 W/m² (30분 평균)	Health Phys. 118(5), Table 5
FCC 직업인	5 mW/cm² (= 50 W/m², 6분 평균)	47 CFR §1.1310 Table 1(A)

지도의 흰 선이 한도와 같아지는 keep-out 경계입니다. '사람이 r_min보다 가까이 오지 않는다'는 가정에서 모든 점이 한도 이하가 되는 송신 전력을 제안하고, **Apply suggested Pt**로 바로 적용합니다. 예제(8×8 배열, 10 W, 1 m 집속)는 최대 1290 W/m²로 한도의 129배라서, r_min 0.2 m 기준 21.1 dB 백오프, 약 **77.8 mW**가 권장됩니다. EIRP 한도는 승인서의 값을 직접 입력합니다.



포티의 체크

노출 지도는 자유공간 점원 합 모델입니다. 반사와 인체에 의한 섭동은 무시하므로, 최종 승인에는 측정 또는 FEM 검증을 더하세요.

46.4 자세가 바뀌어도: RX Position / Attitude

RX 위치는 초점과 따로 지정합니다. 기울기(x · y축)와 회전 ψ는 소자 패턴과 편파 투영으로 계산합니다(LP–LP, LP–CP 3 dB, CP–CP, dual-LP). 예제(오프셋 50 mm, 기울기 30°, 회전 20°)의 손실입니다.

모드	오프셋	패턴	편파	합계
focus (고정)	0.58 dB	1.42 dB	0.42 dB	2.42 dB
retro (추적)	0.03 dB	1.42 dB	0.42 dB	1.86 dB

retro · optp · BCE 표시 모드는 RX를 따라 재조준하므로 오프셋 손실이 거의 없습니다. 상호결합과 RX 배열의 scan blindness는 모델에 없습니다.

46.5 정류기 효율과 부하 `Rectifier Load R_L…`

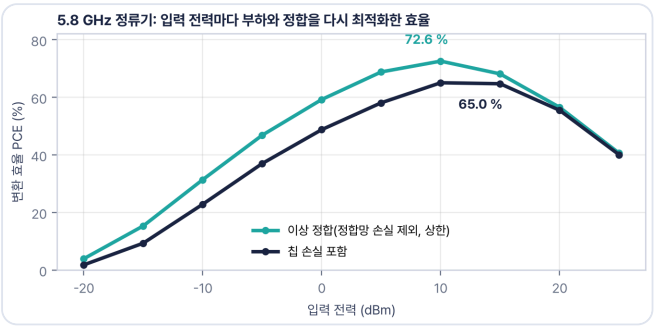


그림 46-2 5.8 GHz 정류기의 변환 효율(PCE). 입력 전력마다 부하와 정합을 다시 최적화했습니다. '이상 정합'은 정합망 손실을 뺀 상한이고, 칩 손실을 넣으면 최고 효율이 낮아집니다.

- 이상 정합 최고 **72.6 %**(10 dBm, 입력 반사 −27 dB), 칩 손실 포함 최고 **65.0 %**(10 dBm).
- R_L 스윕(10 dBm 예제): 최적 R_L ≈ 1159 Ω에서 PCE 65.1 %, 입력 2000 Ω에서는 PCE 45.2 %, Vdc 3.0 V(최적보다 1.58 dB 낮음).
- 효율은 입력 전력이 낮으면 급격히 떨어지고 너무 높아도 다시 내려갑니다. 저전력 설계는 정합과 다이오드 선택이 핵심입니다.

46.6 공동 공진기와 평면 공진기

도구	내용 (예제)
Cavity WPT Designer	433 MHz, 500 W PA, 로봇 영역 0.4 × 0.4 m, 높이 0.25 m. TE101 공동 496 × 250 × 483 mm, 무부하 Q 약 38,900, 평균 송신 효율 약 94 %(설계 계산)
Cavity Resonator Designer	직육면체 · 원통 공동의 모드 차트, Q, 루프 · 아이리스 결합, 소형화, PT-symmetric 2-공동
Resonator WPT Designer	스파이럴 · SRR · 미앤더 · Hilbert · IDC 루프 평면 공진기의 CMT 거리 링크와 PT 대칭 모드, EM 설정 생성



웨이비의 한마디

433 MHz의 파장은 0.69 m라서 2 × 2 배열도 0.7 m이고, 공동 안은 대부분 반응 근거리입니다. 자유공간 모델은 경향만 보여 주니 실제 값은 공동 모드를 포함한 FEM으로 확인하세요.

47 CHAPTER

AI 에이전트와 Physical AI 연계

Aether에는 LLM이 내장되어 있지 않습니다. 대신 Claude Code, Codex 같은 AI 에이전트가 파이썬 API, CLI, 텍스트 .warp를 그대로 다룰 수 있게 열려 있습니다.



배울 것
CLI · Python · .warp 세 가지 입구

해볼 것
aether new → solve → validate 한 바퀴

핵심 개념
에이전트가 고친 파일은 validate로 확인

47.1 에이전트가 설계 루프를 도는 방법



그림 47-1 에이전트가 CLI · Python으로 해석을 돌리고, 결과 파일을 읽어 .warp를 고치는 루프. 점선은 수정 후 다시 해석하는 반복입니다.

```
$ aether new demo.warp --template microstrip
  ports      : 2 -> 2 excitation(s)
  setups     : Setup1
$ aether solve demo.warp --out demo_out
Solution for design 'PlateLine'  (10 frequency point(s), 7.37 s)
    pass 2:     212 tets,     1652 DOF, dS = 0.00003
    max singular value = 1.000000 (passive)
wrote demo_out.s2p, demo_out_sparams.csv, demo_out_modes.csv, demo_out_report.html
$ aether validate demo.warp
```

위 출력은 실제로 실행한 결과입니다. .warp는 사람이 읽을 수 있는 텍스트라서 에이전트가 읽고 수정할 수 있습니다. 수정한 뒤에는 반드시 `aether validate`로 확인하고 다시 풉니다.

47.2 Python API와 프롬프트 예시

```
import aether as ae
design, _ = ae.open_warps("examples/dipole_antenna.warp")
sol = design.solve(progress=False, save_fields=True)
print(f"{sol.sparams.db(1, 1).min():.1f} dB")                    # -16.9 dB
ff = sol.farfield(freq=3e9)
print(f"{ff.summary()['peakDirectivityDbi']:.2f} dBi")          # 2.19 dBi
```

에이전트에게 이렇게 시켜 보세요

- “examples/dipole_antenna.warp 예제를 풀어서 최적 정합 주파수와 최대 지향성을 표로 정리해줘.”
- “마이크로스트립 프로젝트를 만들고 해석한 뒤 S 파라미터가 수동(passive)인지 알려줘.”
- “이 .warp를 읽고 선로 폭을 10 % 넓힌 다음 aether validate로 확인하고 다시 풀어서 S11을 비교해줘.”

47.3 Physical AI: 움직이는 기기에 전력이 따라가게

로봇, 드론, 센서는 움직이고 자세가 바뀝니다. 전력을 계속 보내려면 빔이 위치를 따라가야 하고, 그 설계는 먼저 시뮬레이션으로 확인합니다. 46장의 추적 계산이 이 루프의 핵심입니다.



그림 47-2 파일럿 → 재조준 → 정류 → 안전 한도의 폐루프. 에이전트는 이 루프의 매개변수(위상 비트, 배열 크기, 송신 전력)를 바꿔 가며 설계 공간을 탐색합니다.

- **움직임**: 이동 RX 추적(46.2)으로 경로 전체의 최저 수신을 확인합니다.
- **자세**: RX Position / Attitude(46.4)로 기울기와 편파 손실을 계산합니다.
- **안전**: Exposure Map(46.3)으로 사람 곁의 한도를 지킵니다.
- **탐색**: Parameter Study와 Optimization(Nelder-Mead, Pattern, L-BFGS-B, Differential evolution) 결과를 에이전트가 읽어 다음 설계를 고칩니다.



위즈의 한마디

에이전트가 낸 숫자는 **툴이 계산한 결과 파일**에서 가져오게 하세요. 모델이 기억으로 숫자를 말하게 두면 틀릴 수 있습니다.

10.X 현장 치트시트: 새 기능 한 장 요약

하고 싶은 일	메뉴 · 명령	장
해석 전에 설정 점검	Simulation ▸ Setup Advisor… → Apply selected	43
동료에게 3D 결과 보내기	File ▸ Export 3D Viewer (three.js)… (Save fields 켜기)	44
S 파라미터를 다른 도구로	Results ▸ Export S-parameters… (.sNp) · CSV	44
논문 초안 · PDF 리포트	File ▸ Export ▸ Paper… · Export Report…	44
전류 · 필드 · 방사 보기	Results ▸ Surface Current · E Field · H Field · 3D Radiation Pattern	45
움직이는 수신기 추적	WPT Beam ▸ Tracking Demo…	46
사람 곁 안전 한도	WPT Beam ▸ Exposure Map… → Apply suggested Pt	46
자세와 편파 손실	WPT Beam ▸ RX Position / Attitude…	46
정류기 부하 최적화	WPT Beam ▸ Rectifier Load R_L…	46
로봇 영역 공동 WPT	WPT Beam ▸ Cavity WPT Designer…	46
AI 에이전트로 자동화	aether new · solve · validate · info / import aether	47
업데이트 후 화면이 이상할 때	브라우저 Ctrl+F5	43



에테르의 마무리

여기까지 오셨다면 Aether로 안테나에서 PA, 정류기, 열, 무선전력 링크까지 한 프로젝트 안에서 설계하고 결과를 파일로 가져가는 흐름을 모두 익히신 겁니다. 다음 장은 찾아보기입니다.



이제 여러분의 상상을 현실 회로와 안테나로 깨울 차례입니다!

위저드로 대담하게 첫 도면을 그리고, 포트는 깐깐하게 의심하며, 적응형 메시로 수렴을 확인하고,
열폭주 없는 시원한 방열과 벤치 실측으로 완벽한 설계의 마지막 고리를 닫으세요.

WARPSOLUTION Inc.

www.warpsolution.com

Aether EM 실전 설계 가이드 (Desktop 2026 V2.3) · 만든 사람 이경학 · 에테르·포티·웨이비·메시·위즈·써미 여섯 친구와 함께