

전력반도체 세라믹기판 접합에서 Ag를 제거하는 Cu 소결 기술

조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

SUMMARY

Ag는 접합재 한 층이 아니라 공정체계 전체를 만든다. Ag 페이스트와 양면 Ag 도금이 함께 따라붙기 때문이다. Ag를 Cu로 바꾸면 비용은 내려가고 신뢰성은 올라가지만, Cu 표면의 수 나노미터 산화막이 저온 넥 형성을 막아 왔다. 쿨스는 환원제를 강화하는 대신 환원 기능을 산화막 바로 위에 배치했다. PDA 기능층이 분산·산화방지·계면환원을 동시에 수행하며, 압력이 접합 위치를 고르고 열이 접합 시각을 고른다. 메커니즘과 계산 근거, PoC 시험설계를 부록 18개 항목으로 싣는다.

쿨스, 전력반도체 접합비용은 크게 낮추고 신뢰성은 높이는 Cu 소결기술 개발

세계 전력반도체 업계의 오랜 숙원인 Ag-to-Cu 전환의 핵심 난제 해결

Ag 페이스트와 양면 Ag 도금을 동시에 제거하는 bare Cu 직접접합

Ag-to-Cu

세계 전력반도체 업계의 전환 방향

Ag 0

접합부에서 Ag 층과 Ag 도금을 모두 제거

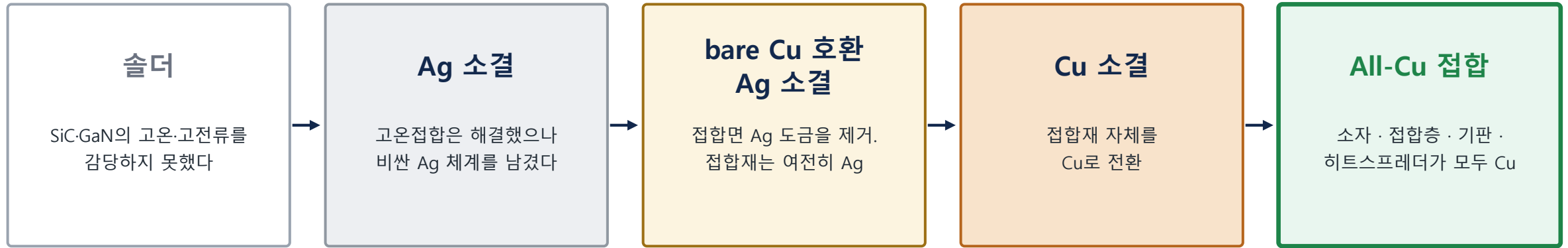
All-Cu

소자 · 접합층 · 기판 · 히트스프레더가 모두 Cu

기술명 : Cools PDA-DACP (PDA-Functionalized Die-Attach Copper Paste)

(주)쿨스 (Cools Inc.) · 2026. 09.

은을 구리로 바꾸는 것은 세계 전력반도체 업계의 오랜 숙원이다



산업이 이 축을 따라 움직인 이유

- 솔더는 SiC-GaN의 고온·고전류 조건을 감당하지 못했다.
- Ag 소결은 고온접합 문제를 해결했지만 비싼 Ag 재료와 Ag 중심 공정체계를 남겼다.
- 업계는 Ag의 고온접합 성능을 Cu의 가격과 공급망으로 구현하려 한다.
- 최종 방향은 접합면의 Ag 도금만 없애는 것이 아니라 접합재까지 Cu로 바꾸는 것이다.

세계 산업은 이미 움직이고 있다

Indium Corporation

Ag 소결재와 Cu 소결재를 함께 제품화.
Cu 소결을 SiC 다이-AMB 접합과 대면적 히트싱크 접합에 제시

Heraeus Electronics

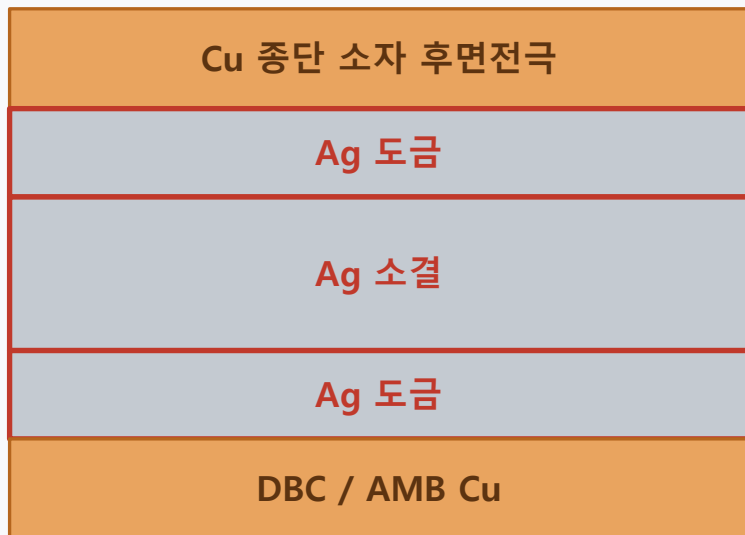
bare Cu 호환 Ag 소결재(mAgic PE340) 출시.
Ag 도금 제거가 산업의 분명한 요구임을 보여준다

Cu는 이미 전극 · 회로 · 리드프레임 · 클립 · 히트스프레더에 쓰인다.

Ag-to-Cu는 새로운 선택지가 아니라 이미 시작된 산업 전환이다.

Ag는 접합재 한 층이 아니라 비싼 공정체계 전체를 만든다

기존 Ag 접합 적층구조



붉은색 = Ag가 들어가는 층

다이접합 한 곳에 Ag 층이 세 개.
모듈접합에서 한 번 더 반복된다.

Ag 원재료 가격은 Cu 의 약

150 배

2026. 9. 4 기준 : Ag 약 US\$2,149/kg · Cu 약 US\$14.37/kg

접합재만 Cu로 바뀌도 금속 원재료 가격구조가 뒤집히며, 양면 Ag 도금과 부대공정까지 제거하면 실제 절감효과는 재료비 차이를 넘어선다.

그 위에 Ag 한 층이 데리고 오는 부대비용

- Ag 소결 페이스트
- DBC · AMB Ag 도금
- 외주 운송과 대기
- Ag 마이그레이션 관리
- 소자 후면 Ag 도금
- 도금 품질검사
- 도금 리드타임에 묶인 재공품
- 공급가격 변동과 조달 부담

Ag 접합의 실제 비용은 페이스트 가격이 아니라 Ag에 종속된 전체 시스템 비용이다.

Ag에서 Cu로 바꾸면 가격은 크게 내려가고 접합 신뢰성은 올라간다

Ag 층

3 → 0

Ag 종속공정

3 → 0

Cu/Ag 이중금속 계면

2 → 0

접합 금속

Cu 하나로 통일

비용

- Ag 페이스트 제거
- 양면 Ag 도금 제거
- 도금검사 제거
- 외주 물류 제거
- 리드타임 단축
- 재공품 감소
- 대면적 접합일수록 절감효과 확대

신뢰성

- Ag 마이그레이션 제거
- Cu/Ag 이중금속 계면 제거
- 접합 금속을 Cu로 통일
- 치밀한 Cu 전달경로 형성
- 전열·통전 유효단면 증가
- 접합층 열저항 감소
- 비재용융 고온 접합층 형성
- 다이접합과 모듈접합의 재료체계 통일

Ag-to-Cu는 값싼 대체재를 쓰는 일이 아니라 접합체계 전체를 단순하고 강하게 만드는 구조 전환이다.

이 거대한 전환을 막아온 마지막 장벽은 수 나노미터의 Cu 산화막이었다

Cu는 이미 준비되어 있었다

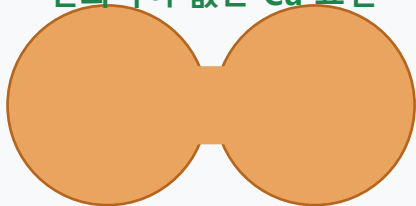
- Cu는 Ag에 근접한 열·전기전도도를 가진다.
- Cu 용점은 약 1,085 °C로 Ag보다 높다.
- 재료비와 공급망 측면에서 압도적으로 유리하다.
- 전극·회로·리드프레임·클립·히트스프레더는 이미 Cu다.

단 하나가 막고 있었다

- Cu 표면의 1~5 nm 자연산화막이 저온 표면확산을 차단한다.
- 이 산화막 때문에 200~250 °C에서 Cu-Cu 넥 형성이 어렵다.
- 기존 Cu 소결은 강한 환원분위기, 포름산, 수소 또는 다량의 환원첨가제에 의존했다.

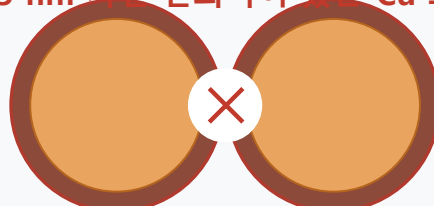
같은 온도 · 같은 시간에서 넥이 생기는가

산화막이 없는 Cu 표면



표면확산으로 Cu 넥이 성장한다

1~5 nm 자연 산화막이 있는 Cu 표면

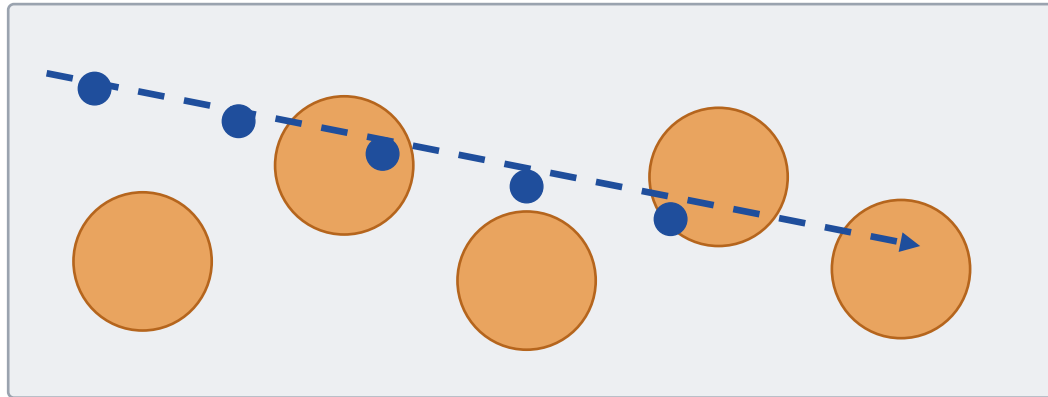


접촉해도 넥이 생기지 않는다

Cu가 부족했던 것이 아니다. 수 나노미터의 산화막을 접촉 순간에 제거하지 못했을 뿐이다.

쿨스는 환원제를 더 강하게 만든 것이 아니라 환원 기능을 산화막 바로 위에 배치했다

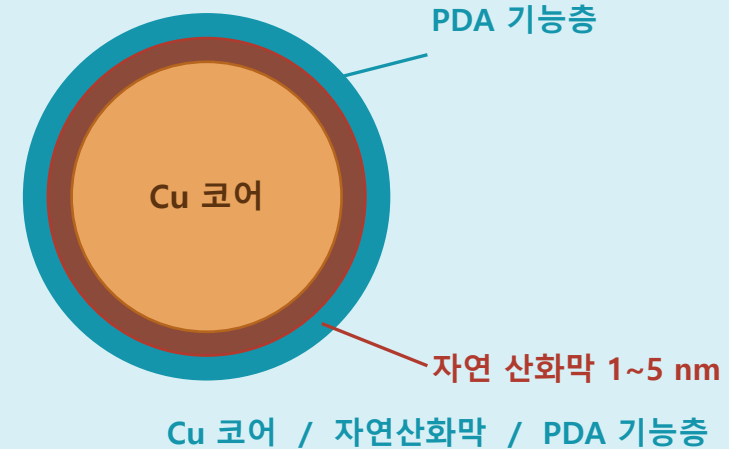
기존 방식 — 환원종이 산화막을 찾아간다



페이스트 내부의 환원종 → 수십 μm 이동 → Cu 산화막 도달

- 확산거리가 접합층 두께 수준이다.
- 위치별 환원편차가 생긴다.
- 중심부와 외곽의 성능편차로 이어진다.
- 강한 분위기와 긴 공정시간을 요구한다.

쿨스 방식 — 환원층이 산화막 위에서 기다린다



- 모든 Cu 입자 표면에 환원 기능을 미리 배치한다.
- 산화막과 환원 기능 사이의 거리를 수 nm로 축소한다.
- 보관 중에는 산화와 응집을 억제한다.
- 접합 시에는 카테콜기가 계면환원을 수행한다.
- 환원 직후 Cu-Cu 접촉과 넥 형성이 이어진다.

산화막을 찾아가는 환원제가 아니라, 산화막 위에서 기다리는 환원층이다.

PDA 기능층 하나가 분산 · 산화방지 · 계면환원을 동시에 수행한다

① 페이스트 상태

응집 억제 · 분산 안정화

입체 장벽과 표면 전하가 입자 간 접촉을 분리하여 페이스트 내 균일 충전을 만든다.

② 보관 · 승온 초기

$O_2 \cdot H_2O$ 접근 차단

연속 피복층이 산소와 수분의 접근을 막아 보관 중과 승온 중의 추가 산화를 억제한다.

③ 접합 순간

카테콜-퀴논 계면환원

산화막과 직접 접촉한 위치에서 $CuO \cdot Cu_2O$ 에 전자를 공여하여 금속 Cu 로 환원한다.

아민기 ($-NH-$, $-NH_2$)

- PDA 층을 Cu 코어 표면에 고정
- 표면 친화성 조절과 분산 안정화
- 환원 당량을 보유한 채로 붙잡아 두는 구조 역할

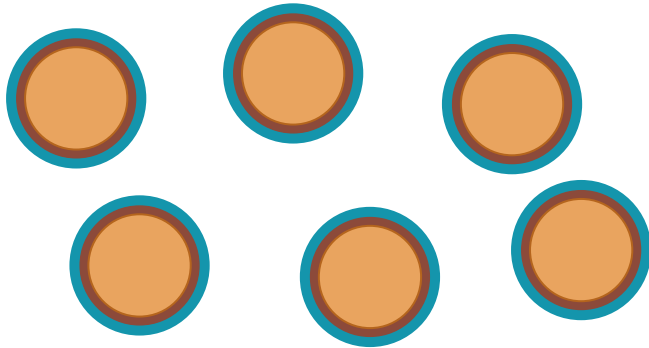
카테콜기 ($-OH \times 2$)

- Cu 표면 강한 흡착과 산화방지
- 가열 시 퀴논으로 전환되며 전자 공여
- $CuO \cdot Cu_2O$ 를 접촉 위치에서 직접 환원

별도의 분산층·보호층·환원제를 하나의 입자결합형 기능층으로 통합했다.

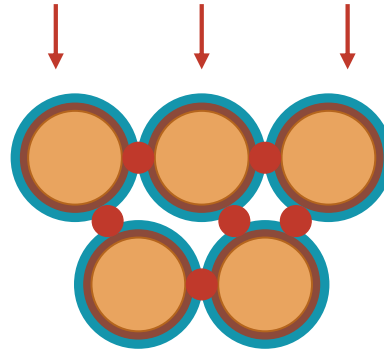
압력은 접합 위치를 고르고, 열은 접합 시각을 고른다

① PDA-Cu 입자 분산



PDA로 피복된 입자가 산화와 응집 없이 분산된다

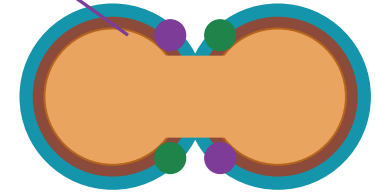
② 가압에 의한 접촉점 선택



붉은 점 = 실접촉점. 국부 응력이 여기에만 집중된다

③ 가열에 의한 환원 · 접촉 · 넥

카테콜 → 퀴논



환원과 접촉이 같은 지점, 같은 순간에 일어난다

압력 = 공간 스위치

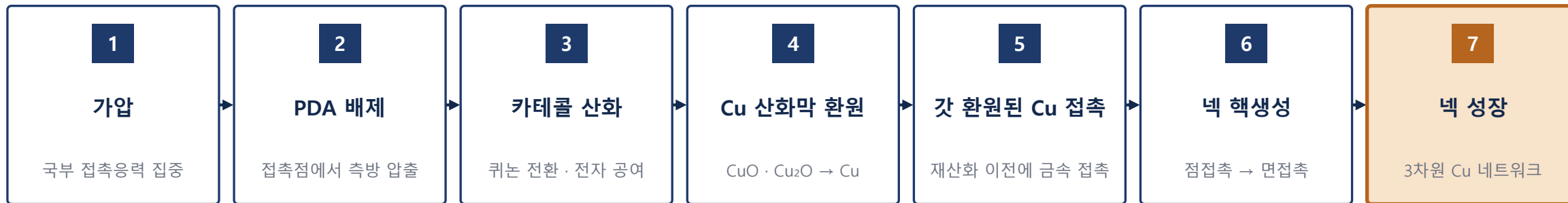
- 압력은 실제 접촉점에만 집중된다.
- PDA는 접촉점에서 압축 · 파단 · 측방 배제된다.

열 = 시간 스위치

- 열은 카테콜-퀴논 전환과 Cu 확산을 시작한다.
- 산화막 제거와 금속 접촉이 같은 위치, 같은 순간에 일어난다.

환원된 Cu가 다시 산화될 시간을 주지 않고 즉시 Cu 넥으로 고정한다.

산화막 제거에서 Cu 넥 형성까지 하나의 연속 사건으로 진행된다



Reduction-to-Contact Coupling

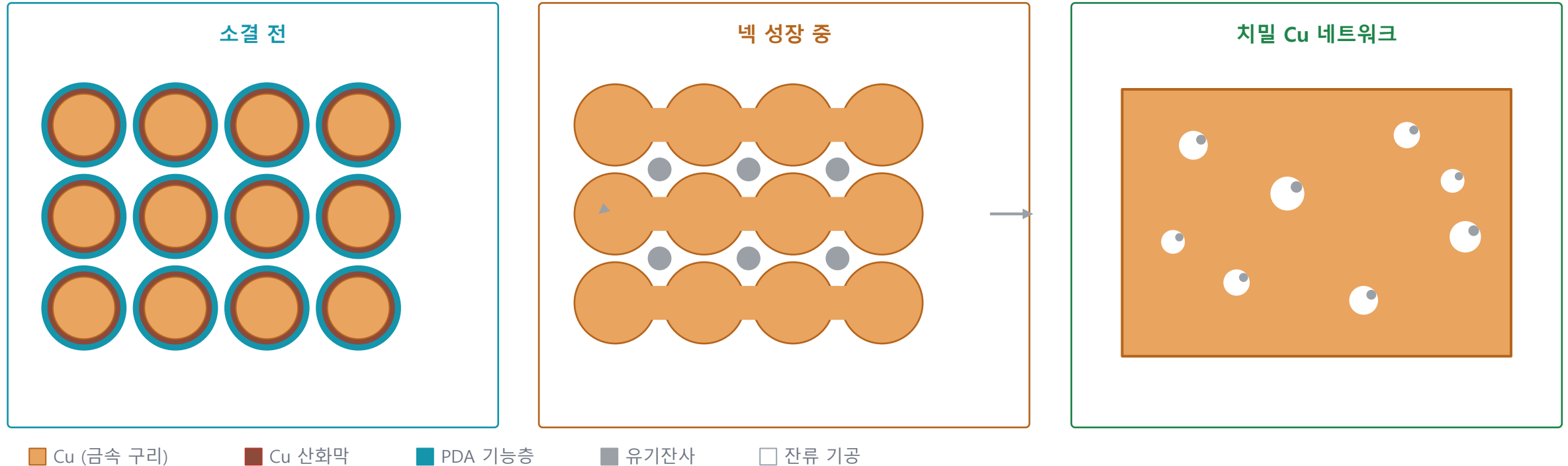
가압 → PDA 배제 → 카테콜 산화 → Cu 산화막 환원 → 갓 환원된 Cu 접착 → 넥 핵생성 → 넥 성장



- 산화막이 제거되는 순간에도 압력이 유지된다.
- 환원 개시온도가 넥 형성 개시온도보다 낮다.

환원과 접착을 분리된 공정으로 수행하지 않고 동일 지점에서 시간적으로 결합한다.

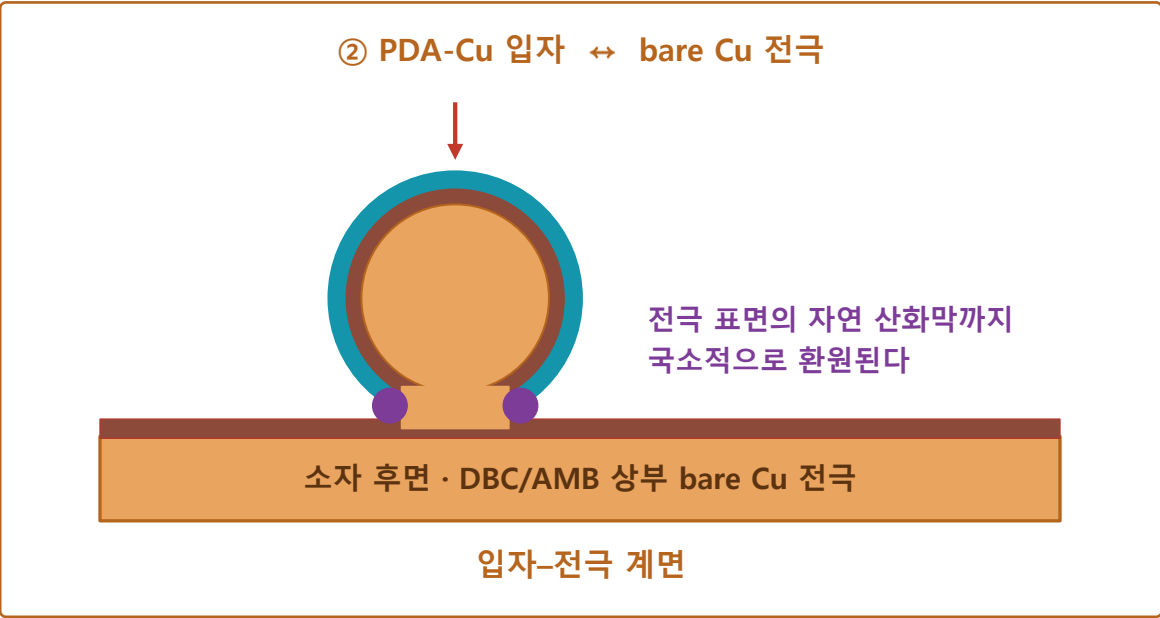
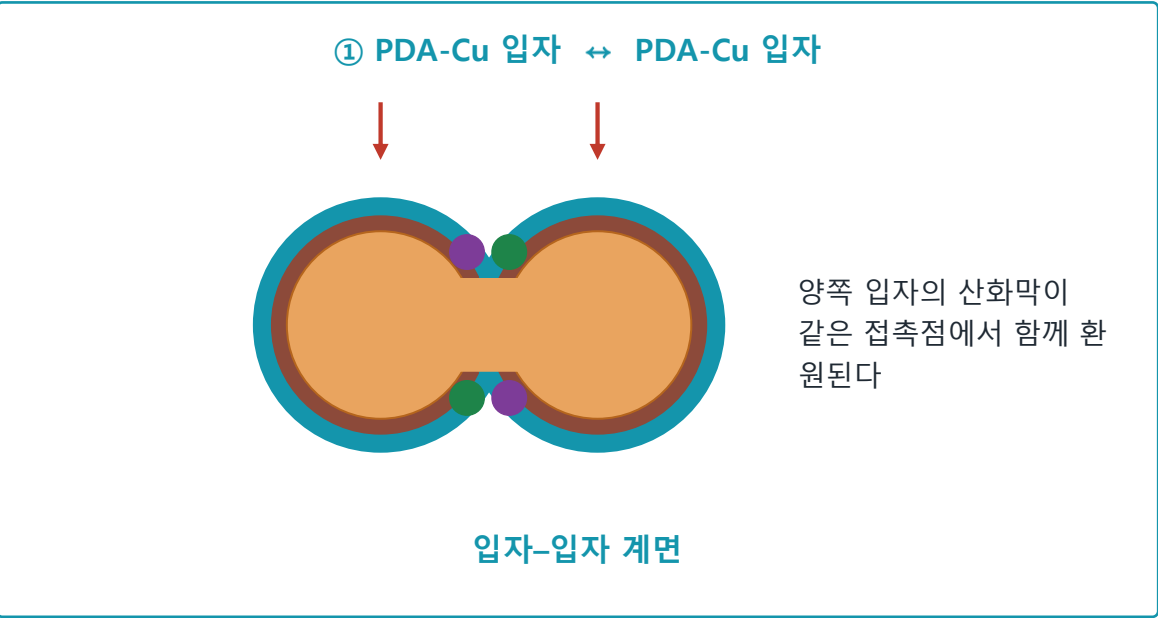
성장하는 Cu 넥이 PDA와 유기물을 전달경로 밖으로 밀어낸다



- 접촉점의 PDA와 vehicle이 측방으로 배제된다.
- 잔사는 기공벽 · 삼중점 · 비접촉영역으로 격리된다.
- Cu 넥이 3차원 금속 네트워크로 연결된다.
- 열 · 전기 전달경로 내부의 연속 유기막이 제거된다.

PDA는 접합을 방해하는 막이 아니라 접합 순간 스스로 전달경로에서 퇴장하는 기능층이다.

입자와 전극을 동일한 원리로 접합하기 때문에 양면 Ag 도금이 필요 없다



최종 구조		
Cu 종단 소자		Ag 마감 없음
치밀 Cu 소결층		
DBC · AMB bare Cu		Ag 마감 없음

소자 후면 Cu, 접합층 Cu, 기판 Cu가 하나의 연속적인 금속 전달경로를 형성한다.

Ag 페이스트와 양면 Ag 도금이 동시에 사라진다

기존 Ag 접합체계 — 다이접합



적층 8층 · Ag 3층 · Ag 종속공정 3단계

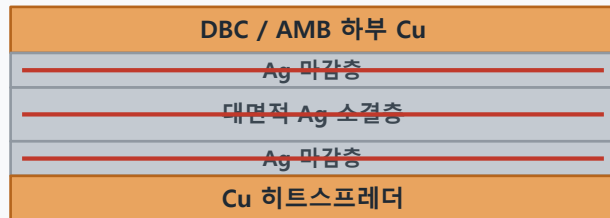
Cools All-Cu 접합체계 — 다이접합



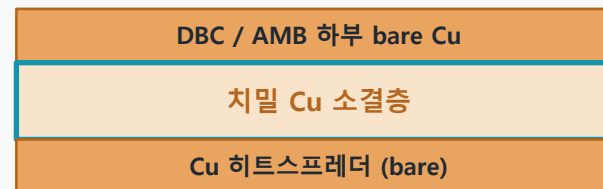
적층 6층 · Ag 0층 · Ag 종속공정 0단계

DBC · AMB – Cu 히트스프레더 모듈접합에도 같은 전환이 적용된다

기존



Cools



다이접합과 모듈접합을
동일한 Cu 재료체계로 통일

재료 하나가 바뀌는 것이 아니라 적층 수와 관리항목이 함께 줄어든다.

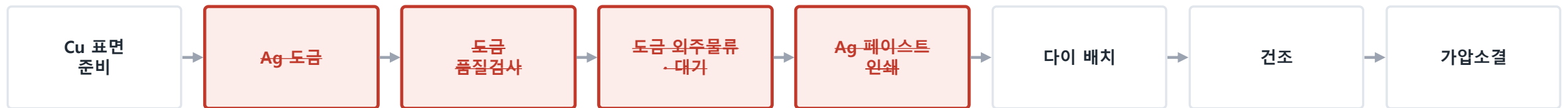
새로운 공장을 요구하지 않고 기존 소결라인에서 Ag 종속공정을 제거한다

공정 8 단계

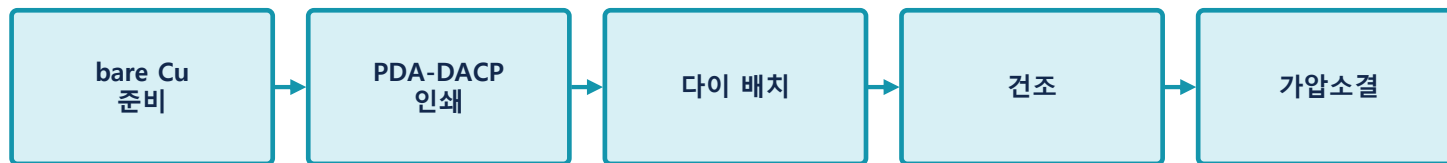


5 단계

기존 Ag 소결 공정



Cools PDA-DACP 공정



유지되는 공정

인쇄 · 다이 배치 · 건조 · 가압소결

사라지는 공정

Ag 도금 · 도금 품질검사 · 도금 외주물류와 대기

새로운 장비체계를 강요하는 기술이 아니라 기존 양산라인의 비용과 시간을 걷어내는 기술이다.

첫 상용화는 기존 Cu 페이스트에서 Cu 입자 하나만 바꾸는 것으로 시작한다

A 기존 Cu 입자 + 기존 페이스트 조성

현재의 상용 Cu 소결 페이스트 조성을 그대로 사용한다.



B PDA 기능화 Cu 입자 + 동일 페이스트 조성

Cu 입자 표면 기능만이 유일한 차이가 되도록 나머지를 고정한다.

유지 변수

용제 · 분산제 · 환원제 · 바인더 · 입도분포 · 인쇄조건 · 열이력 · 압력

후속 최적화

C

기존 환원제 감량

D

분산제 감량

E

PDA 두께와 입도 최적화

F

다중입도 충전

G

치밀도와 대면적 균일성 향상

페이스트를 처음부터 다시 만드는 것이 아니라 검증된 공정에 기능화 Cu 입자를 투입해 가장 빠르게 양산성을 확보한다.

전력반도체에서 시작해 고전력 로직칩의 열접합시장으로 확장한다

1차 시장

1

**SiC · GaN 전력반도체
die attach**

접합층 열저항이 정션 온도를 직접 좌우한다

2

**DBC · AMB – Cu 히트스프레더
대면적 접합**

면적이 넓을수록 Ag 도금 비용과 편차가 커진다

3

EV 인버터

대량 양산 물량에서 절감효과가 가장 크게 나타난다

4

**ESS와 고전력
전력변환장치**

장수명·고가동률 조건이 접합층 내구성을 요구한다

확장시장

AI · HPC 고전력 로직칩

다이 – 히트스프레더

패키지 – 냉각부

RF 파워앰프

고출력 LED와 레이저

대면적 · 고열유속 접합기술을 기반으로 Cu 열접합계면 전반으로 확장한다.

접합면적과 발열밀도가 커질수록 Ag 제거의 경제적 가치와 Cu 접합의 성능가치가 함께 커진다.

지금 필요한 것은 기술설명이 아니라 공동 양산조건을 확정하는 일이다

쿨스의 역할

- PDA 기능화 Cu 입자 설계
- 표면기능층 합성 및 제어
- 페이스트 설계
- Ag-to-Cu 접합구조와 관련 특허
- 메커니즘과 평가기준 제공

협력기업의 역할

- Cu 분말과 입도 조합
- 페이스트 제조 및 인쇄성
- 가압 · 열처리 · 소결장비
- DBC · AMB와 bare Cu 접합체 제작
- 단면 · 전단 · 열 · 전기 · 신뢰성 평가
- 양산 스케일업

공동 결과물

- 소재 사양
- 페이스트 조성
- 온도 · 압력 · 시간 프로파일
- 접합강도 · 열저항 · 전기저항 데이터
- 대면적 균일성
- 양산 원가와 사업모델

쿨스는 Ag를 대체할 또 하나의 페이스트를 제안하는 것이 아니라, 국내 소부장기업들과 All-Cu 접합 생태계를 함께 만들고자 한다.

세계가 기다려 온 Ag-to-Cu 전환을 쿨스와 함께 시작할 때다

1

세계적 숙원

Ag의 고온접합 성능을
Cu의 가격과 공급망으로 구현

2

마지막 장벽 해결

PDA 기능층으로 Cu 산화막을
접촉점에서 직접 환원

3

비용과 신뢰성 동시 혁신

Ag 페이스트와 양면 Ag 도금 제거,
All-Cu 접합체계 구현

4

즉시 사업화 가능

기존 인쇄 · 배치 · 건조 · 가압소결
라인을 활용한 공동 양산개발

공동 PoC를 통해 기술 가능성을 묻는 것이 아니라, 각사의 소재 · 장비 · 공정에 맞는 양산조건과 시장진입 방식을 확정한다.

오늘 논의할 세 가지

① 공동 PoC 참여 의사

② 적용할 Cu 분말 · 페이스트 · DBC/AMB · 소
결장비 및 담당자

③ 시편 제작, 접합평가, 양산조건 확정을 위한
착수 일정

Ag-to-Cu 전환은 이미 시작됐다. 이제 남은 것은 누가 먼저 양산체계를 확보하느냐이다.

쿨스와 함께 국내 최초의 All-Cu 전력반도체 접합 공급망을 구축하자.

Appendix

계산 근거 · 단계별 메커니즘 상세 · 검증 설계 · 적용시장 · 리스크 관리 · 참고문헌

A-1 수치와 근거의 구분 A-2 Ag·Cu 물성 비교 A-3 중량비와 부피비 A-4 다공성 A-5 환원 당량과 PDA 두께 A-6 두께·입도별 중량분율
A-7 ~ A-10 8단계 메커니즘 상세 A-11 시간-온도-압력-반응 연동 A-12 플랫폼 비교표 A-13 1차 PoC 시험설계 A-14 필수 분석
A-15 관측 신호 A-16 적용시장 A-17 기술 리스크와 관리변수 A-18 참고문헌

수치와 근거의 구분

본 자료의 모든 수치는 아래 네 범주 중 하나에 속하며, 슬라이드에서는 색으로 구분한다

공개 문헌값 제조사 데이터시트와 학술 문헌에 공개된 값. · Ag 91 wt% · 250 °C · 12 MPa · 3분 · 열이력 후 다이 전단강도 50 MPa 초과 · Cu 용점 1,085 °C / Ag 용점 961 °C · Cu 자연 산화막 1~5 nm · 표면개질 Cu 계열 275 °C 이하 가압소결에서 기공률 10 % 미만 보고	백서의 계산값 공개 물성값을 대입해 본 백서가 직접 계산한 값. · 91 wt% Ag → 약 47.8 vol% · 82 wt% Ag → 약 29 vol% · 85 wt% Cu → 약 37.5 vol% · 3 nm Cu₂O 환원에 필요한 PDA 약 14.6 nm · 3 nm CuO 환원에 필요한 PDA 약 27.6 nm	설계 목표 쿨스가 목표로 설정한 값이며 아직 측정값이 아니다. · 접합 공정온도 약 200~250 °C · 가압 조건 10~20 MPa 수준 · 연결기공·조대 폐기공이 최소화된 치밀 Cu 접합층 · 산화막 조성·두께, 카테콜 유효 활용률 및 허용 잔사량을 함께 고려한 PDA 두께 설계창	PoC 판정항목 1차 검증에서 측정하여 확인할 항목. · XPS Cu⁰/Cu⁺/Cu²⁺ 비율 변화 · 넥 형성 개시온도와 넥 크기 · 다이 전단강도와 파괴모드 · 전기비저항 · 열저항 · 기공률 · 고온저장 · 열사이클 · 파워사이클
---	--	---	--

쿨스의 접합강도·열저항·기공률은 아직 측정 전이며, 본 자료의 해당 수치는 모두 설계 목표 또는 PoC 판정항목으로 표기한다.

Ag와 Cu의 물성 및 접합특성 비교

물성값은 공개 문헌값이며, 대표 접합온도는 상용 데이터시트 및 문헌 기준이다

항목	Ag	Cu	의미
융점	약 961 °C	약 1,085 °C	Cu 접합층이 더 높은 비재용융 사용 여유를 가진다
열전도도	약 429 W/m·K	약 401 W/m·K	실용 수준에서 접합층 성능 차이가 작다
전기전도도	약 63 MS/m	약 59 MS/m	통전 성능에서 Cu가 Ag에 근접한다
마이그레이션	전계·습도 하 Ag ⁺ 이동과 덴드라이트 성장 관리 필요	위험이 낮아 별도 설계 여유 부담이 작다	Cu 전환 시 마이그레이션 관리 항목이 줄어든다
표면 산화막	산화막 장벽이 낮아 저온 소결이 용이	Cu ₂ O·CuO 1~5 nm가 저온 넥 형성을 차단	Cu의 핵심 장벽이며 본 플랫폼이 해결하는 대상이다
대표 접합온도	약 200~250 °C	약 220~300 °C 또는 공정별 상이	PDA-DACP는 약 200~250 °C에서 접합한다
표면처리 요구	대표적으로 양면 Ag 마감 사용	bare Cu 가능하나 산화막 관리 필요	PDA-DACP는 bare Cu direct sintering을 구현한다
재료비	높음	낮음	대면적 모듈접합으로 갈수록 격차가 커진다

열·전기전도도는 벌크 물성이며, 실제 접합층 성능은 치밀도와 잔사 분포에 따라 달라진다.

금속 중량비와 실제 부피비

높은 금속 중량비가 곧 높은 금속 부피비를 의미하지 않는다

계산 — 91 wt% Ag 페이스트 100 g 기준

Ag : $91\text{ g} \div 10.49\text{ g/cm}^3 = 8.68\text{ cm}^3$

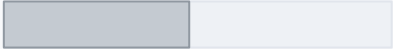
유기 vehicle : $9\text{ g} \div 0.95\text{ g/cm}^3 = 9.47\text{ cm}^3$

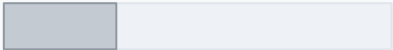
부피분율 = $8.68 \div (8.68 + 9.47) \approx 47.8\text{ vol\%}$

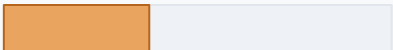
즉 91 wt%의 페이스트도 인쇄 직후 부피 기준으로는 금속이 절반 수준이며, 나머지 절반은 소결 과정에서 배출되어야 할 유기 vehicle이다.

밀도 가정 : Ag 10.49 g/cm³ · Cu 8.96 g/cm³ · 유기 vehicle 0.95 g/cm³

동일 계산의 세 가지 경우

91 wt% Ag (가압형)  약 47.8 vol%

82 wt% Ag (무가압형)  약 29 vol%

85 wt% Cu  약 37.5 vol%

회색 막대 = 페이스트 전체 부피 · 채색 구간 = 금속이 차지하는 부피

유기 vehicle 배출이 두께수축과 기공을 만드는 이유

① 유기 vehicle이 배출되고 입자가 수축하는 과정에서 접합층 두께가 크게 줄어든다. 상용 데이터시트가 인쇄 스텐실 두께를 최종 접합층 목표 두께의 두 배로 설계하도록 안내하고, 인쇄 두께 대비 약 50 %의 두께 손실을 명시하는 것은 이 부피 관계의 직접적인 결과이다.

② 배출된 자리가 완전히 메워지지 않으면 그대로 기공으로 남는다. 따라서 낮은 유기물 함량과 적절한 배출 경로 설계가 치밀도의 선결 조건이 된다.

③ PDA 기능층은 이 유기물 총량에 더해지는 성분이므로, 두께의 상한은 환원 당량이 아니라 허용 잔사량이 결정한다 (A-5, A-6 참조).

출처 : 상용 가압 Ag 소결재 데이터시트 (Ag 91 wt%, 인쇄 두께 대비 약 50 % 두께 손실).

다공성은 기능이 아니라 불완전 치밀화의 결과

기공이 CTE 부정합 응력을 완화한다는 설명이 통용되지만, 응력 완화는 접합층 두께와 모듈 구조로 다뤄야 한다

열전달 단면 감소

기공이 유효 전열 단면적을 줄여 접합층 열저항을 높인다. 열저항 상승은 그대로 정선 온도 상승으로 나타난다.

전기전도 단면 감소

유효 통전 단면적이 줄어 접합층 비저항이 올라간다. 전류밀도가 높은 SiC-GaN 모듈에서 손실이 커진다.

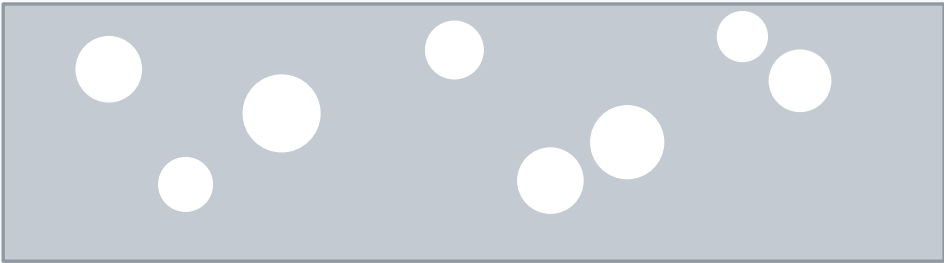
산소·수분 침투 경로

연결기공은 외부의 수분과 산소가 접합층 내부로 들어오는 통로가 되어 고온저장 중 계면 열화를 유발한다.

균열 개시점

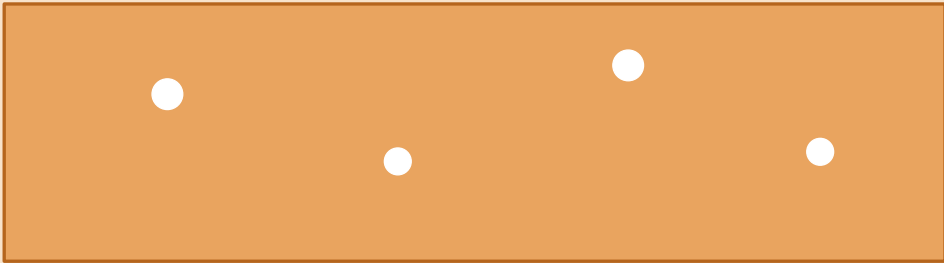
조대 기공은 열사이클 응력 하에서 균열의 개시점이 되며, 파괴모드를 접합층 내부파괴에서 계면박리로 이동시킬 수 있다.

다공성 접합층



연결기공과 조대 기공이 전열·통전 단면을 줄인다

Cools가 목표로 하는 최종 구조



연결기공과 조대 폐기공이 최소화된 치밀 Cu 접합층 (설계 목표)

참고 : 표면개질 Cu 계열 페이스트에서 275 °C 이하 가압소결로 기공률 10 % 미만의 벌크형 미세조직이 보고된 바 있다 (공개 문헌값).

PDA 두께와 산화막 환원 당량

표면층 두께의 하한은 산화막 두께가 결정한다

필요 표면층 두께의 설계식

$$t_f \geq (2 \cdot M_f \cdot \rho_{ox} \cdot t_{ox}) / (n \cdot f \cdot \rho_f \cdot M_{ox})$$

t_{ox} 산화막 두께 · $\rho_{ox} \cdot M_{ox}$ 산화물의 밀도와 물질량 · $\rho_f \cdot M_f$ 표면층의 밀도와 작용기 물질량 · n 작용기 1개가 공여하는 전자 수 · f 유효 활용률
이 식에서 입경이 소거되므로, 필요한 두께 조건은 입도와 무관하게 산화막 두께만으로 결정된다.

대입 가정

- PDA 카테콜 단위 물질량 약 151 g/mol
- PDA 밀도 약 1.3 g/cm³
- $n = 2$ (카테콜 → 퀴논, 2전자)
- $f = 1$ (유효 활용률 100 % 가정)
- 산화막 두께 $t_{ox} = 3$ nm

3 nm Cu₂O 환원에 필요한 PDA 두께

약 14.6 nm

3 nm CuO 환원에 필요한 PDA 두께

약 27.6 nm

이 값은 $f = 1$ 의 이론값이며 설계 기준이다.

실제 유효 활용률은 1보다 작으므로 필요한 두께는 위 값보다 커지고, 산화막이 두꺼울수록 요구 두께는 비례하여 증가한다. 반대로 표면층은 소결 후 잔사의 원천이므로 두께를 무한정 늘릴 수 없다.

PDA 두께와 입도에 따른 중량분율

표면층 두께의 하한은 환원 당량이, 상한은 허용 잔사량이 결정한다

구형 입자 가정에서의 표면층 중량분율

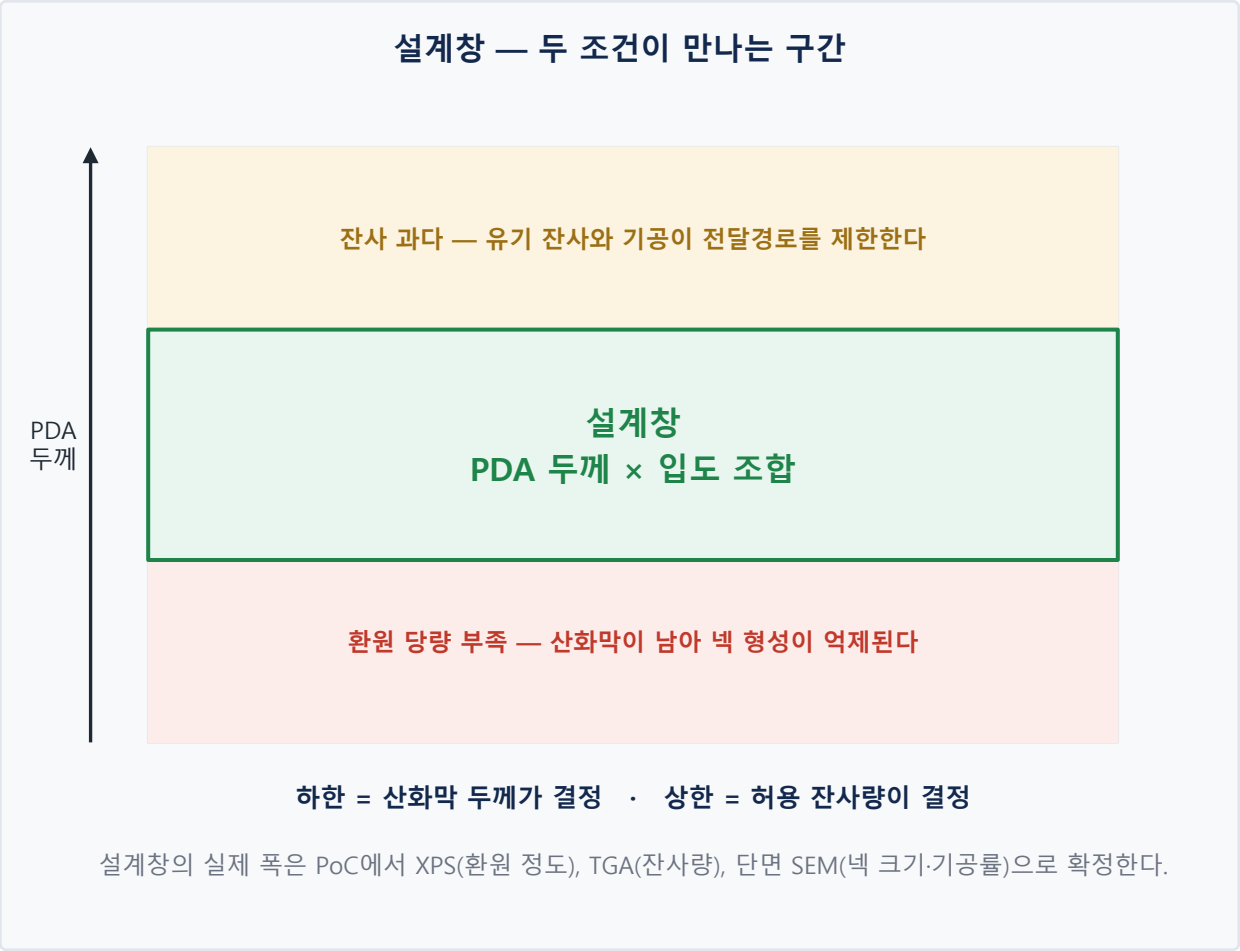
$$w_f = 6 \cdot t_f \cdot \rho_f / (\rho_{Cu} \cdot D50)$$

PDA 두께 20 nm 기준의 계산 결과

D50	PDA 중량분율 (20 nm 기준)	특성
0.2 μm	약 8.7 wt%	소결 활성이 높지만 잔사 부담이 크다
1 μm	약 1.7 wt%	환원 당량과 잔사량의 균형 구간
3 μm	약 0.6 wt%	잔사 부담이 작지만 소결 활성이 낮다

미세 입자는 소결 활성이 높지만 잔사 부담이 크고, 조대 입자는 그 반대이다.
따라서 나노·서브마이크론·마이크론 입자를 조합하는 다중 입도 충전은 충전율을 높이기 위한 선택이자, 접합층 전체의 잔사 총량을 관리하기 위한 설계 수단이다.

밀도 가정 : PDA 1.3 g/cm³ · Cu 8.96 g/cm³. 계산 결과는 백서의 계산값이며 실측값이 아니다.



8단계 메커니즘 상세 (1/3) — 보관에서 접촉점 선택까지

Stage 0 ~ Stage 2 : 페이스트 상태에서 가압에 의한 접촉점 선택까지

Stage 0 · 상온 보관 / P = 0 보관 · 분산 · 각 Cu 입자는 수 nm에서 수십 nm 두께의 PDA 표면층으로 기능화되어 있다. · PDA가 Cu 표면에 대한 산소와 수분의 접근을 억제하여 보관 중 산화막의 성장을 늦춘다. · 아민기와 PDA 네트워크가 입자 사이의 접촉을 분리하여 응집을 억제한다. · 기존의 용제·분산제·환원제·바인더와 함께 안정적인 페이스트를 형성한다. · PDA가 기존 첨가제를 처음부터 모두 대체해야 하는 것은 아니다. 초기 조성에서 PDA는 기존 vehicle 위에 더해지는 입자 표면 기능이다. 관리 지표 : 보관 안정성 시험 — 보관시간에 따른 Cu 산화상태와 페이스트 물성 변화	Stage 1 · 인쇄 · 다이 배치 / P = 0 인쇄 · 배치 · PDA-DACP를 bare Cu DBC/AMB 또는 Cu 히트스프레더 위에 스텐실 인쇄한다. · Cu 종단 소자 또는 부품을 배치한다. · 용제의 젖음성과 페이스트의 틱소트로피가 소결 전까지 초기 위치를 유지한다. · 이 시점에서 상·하부 Cu 전극 표면에는 자연 산화막이 존재한다. 이는 결함이 아니라 전제 조건이며, 플랫폼은 이 산화막을 별도 공정으로 제거하지 않는다. 관리 지표 : 인쇄 두께와 형상 유지 — 스텐실 두께는 목표 접합층 두께의 두 배 수준으로 설계한다	Stage 2 · 가압 10~20 MPa 가압 · 입자 재배열 · 압력에 의해 Cu 입자가 재배열되어 충전율이 상승한다. · 입자 간 접촉점과 입자-전극 접촉점에서 국부 접촉응력이 집중된다. 평균 인가 압력이 10~20 MPa 수준이라도 실접촉면적이 작으므로 접촉점의 국부 응력은 그보다 훨씬 높다. · PDA 층이 접촉점에서 압축·변형·절단된다. · PDA와 유기 vehicle이 접촉점 외곽으로 압출된다. · 아직 접촉하지 않은 입자 표면의 PDA는 그대로 남아 산화방지 기능을 유지한다. Pressure-Selected Contact Activation — 압력이 접합이 일어날 지점을 공간적으로 선택한다
---	---	---

Stage 0~2에서는 아직 금속 접촉이 존재하지 않는다. 이 구간의 목적은 접합이 일어날 위치를 선택하는 것이다.

8단계 메커니즘 상세 (2/3) — 계면환원에서 넥 핵생성까지

Stage 3 ~ Stage 5 : 열이 들어오면서 환원, 즉시 접촉, 넥 형성이 연속적으로 일어난다

Stage 3 · 150 → 250 °C

용제 배출 · 계면환원

- 저온 구간에서 용제와 저비점 성분이 배출되며, 이때 형성되는 열린 기공망이 이후 반응생성물의 배출 통로가 된다.
- PDA의 카테콜기가 Cu 산화막과 밀착된 상태에서 카테콜-퀴논 전환을 일으킨다.
- CuO 및 Cu₂O가 금속 Cu로 환원된다.
- 반응생성물인 물과 유기분해물이 아직 열려 있는 기공망을 통해 외부로 이동한다.
- 환원 기능이 산화막 바로 위에 존재하므로 확산 거리가 표면층 두께 수준으로 축소되고, 반응이 확산 율속에서 벗어난다.

관리 지표 : XPS Cu⁰/Cu⁺/Cu²⁺ 비율 변화 · FTIR 또는 Raman의 카테콜-퀴논 전환 확인

Stage 4 · 압력 유지 상태

갓 환원된 Cu 즉시 접촉

- 산화막이 제거되는 순간에도 압력은 계속 유지된다.
- 새로 노출된 Cu 표면이 산소에 다시 노출되기 전에 반대편 Cu와 접촉한다.
- 입자-입자 및 입자-전극 사이에서 금속 접촉 패치가 형성된다.
- 환원과 기계적 접촉이 시간적으로 결합된다. 환원이 먼저 끝나고 나중에 접촉하는 순차 공정이 아니라, 같은 지점에서 같은 시각에 일어나는 결합 현상이다.

Reduction-to-Contact Coupling — 성립 조건은 환원 개시온도 < 넥 형성 개시온도

Stage 5 · 고상소결 (용융 없음)

Cu 넥 핵생성 · 성장

- 나노 Cu 표면의 높은 곡률과 표면에너지가 물질이동의 구동력을 제공한다.
- 표면확산 및 입계확산에 의해 접촉점에서 Cu 넥이 핵생성된다.
- 점접촉이 면접촉으로 확대된다.
- 미세입자의 높은 화학퍼텐셜이 넥 방향의 원자이동을 구동한다.
- 별도의 용융 없이 고상소결로 진행된다. 공정온도는 Cu 용점의 약 5분의 1 수준이다.
- bare Cu 전극 표면과도 동일한 방식으로 Cu 넥이 형성된다.

관리 지표 : 단면 SEM/FIB로 측정된 넥 크기와 넥 형성 개시온도

Stage 3~5가 플랫폼의 핵심 구간이다. 환원과 접촉이 같은 지점에서 같은 시각에 결합되는 것이 성립 조건이다.

8단계 메커니즘 상세 (3/3) — 유기물 배제에서 고온 사용까지

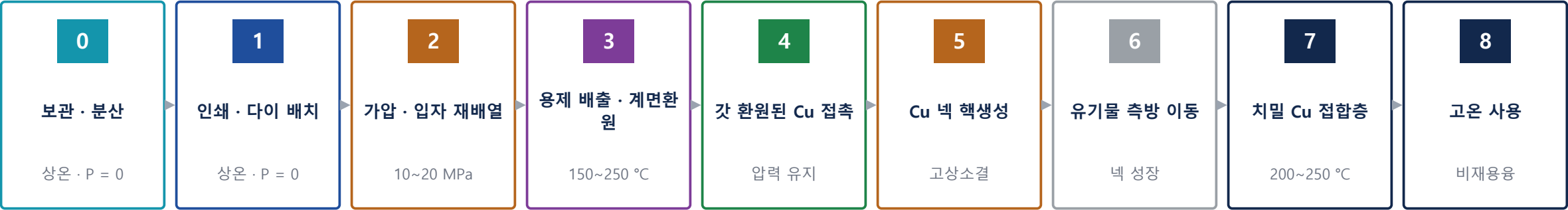
Stage 6 ~ Stage 8 : 넥 성장이 유기물을 밀어내고 치밀 Cu 접합층이 완성된다

Stage 6 · 넥 성장 구간 유기물 측방 이동 · Cu 넥이 접촉 중심에서 바깥쪽으로 성장한다. · PDA, PVP, 분산제 및 바인더 분해물이 넥의 외주부로 밀려난다. · 유기잔사가 기공벽, 삼중점 및 비접촉 영역으로 재배치된다. · Cu-Cu 넥 영역에는 연속된 유기막이 남지 않는다. · 완전한 무잔사가 아니라 잔사의 공간적 격리가 접합 성립의 조건이다. Neck-Growth-Driven Organic Sweeping — 관리 지표 : EDS/EELS 또는 ToF-SIMS로 본 C·N 잔사의 공간 위치	Stage 7 · 약 200~250 °C 공정 치밀 Cu 네트워크 · Cu 넥들이 서로 연결되어 3차원 금속 네트워크를 형성한다. · 입자 경계가 이동하고 개별 나노입자의 형상이 소멸한다. · 가압에 의해 조대 기공이 감소하고, 연결기공이 차단되며 치밀도가 상승한다. · 최종적으로 Cu 종단 소자, Cu 소결층, DBC/AMB의 Cu가 하나의 연속적인 열·전기 경로를 이룬다. · 접합 온도는 약 200~250 °C를 목표로 하지만, 형성된 접합층은 Cu 융점 약 1,085 °C에 대응하는 비재용융 금속층으로 존재한다. 관리 지표 : 접합층 밀도와 기공률 · 전기비저항 · 열전도 또는 열저항	Stage 8 · 사용 온도 구간 고온 사용 중의 구조 · 솔더와 달리 사용 온도 구간에서 재용융하지 않는다. · 연속적인 Cu 네트워크를 통해 높은 열전도와 전기전도를 유지한다. · 잔류 유기물은 연속 계면층이 아니라 기공벽과 비접촉 영역에 국한된다. · PDA에서 유래한 탄소계 잔사가 잔류 기공 내부의 Cu 표면에서 산소 접근을 억제할 가능성이 있으며, 이는 고온저장 시험에서 확인할 항목이다. · 고온 신뢰성은 접합층 치밀도, 연결기공의 유무, Cu 넥 크기, 계면 접합강도로 평가한다. 관리 지표 : 고온저장 · 열사이클 · 파워사이클 시험 후 전단강도와 파괴모드
---	---	--

PDA는 소멸하지 않는다. 최종적으로는 비접촉 영역과 기공벽·삼중점에 국한된 유기 잔사로 남는다.

8단계 메커니즘의 한 화면 요약

Store Protected → Pressure-Selected Contact → Interfacial Redox Activation → Fresh Cu Contact → Cu Neck Growth → Dense Cu Joint



압력 = 공간 스위치

압력은 계 전체에 균일하게 작용하지 않고 실접촉점에만 집중되므로 접합이 일어날 위치를 선택한다. Stage 2 → Stage 3

열 = 시간 스위치

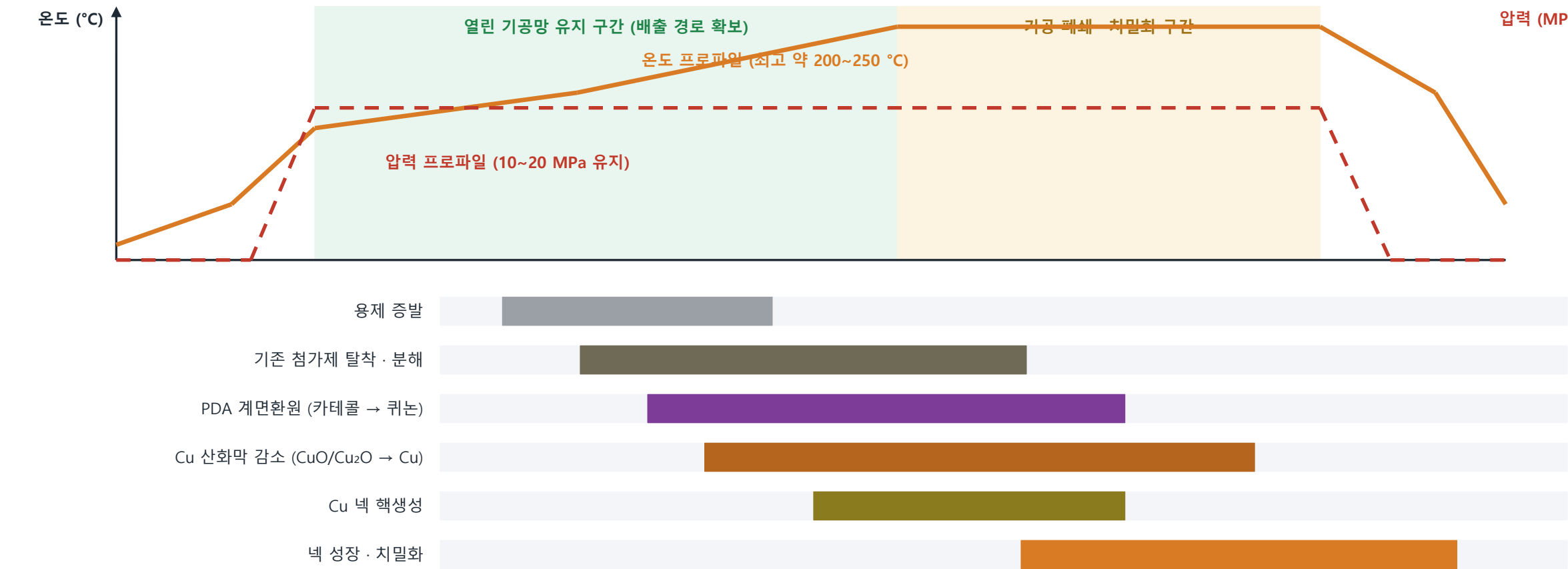
열은 계면환원과 Cu 확산이 시작되는 시각을 결정한다. Stage 3 → Stage 5 / 환원과 기계적 접촉은 동일 지점·동일 시각에 결합된다. Stage 3 → Stage 4



하나의 층이 위치(공간)와 시간에 따라 다르게 작동한다는 점이 플랫폼 설계 논리의 핵심이다.

시간 - 온도 - 압력 - 반응의 연동

유기물과 반응생성물이 빠져나갈 수 있는 열린 기공망이 유지되는 동안 환원과 배출이 진행되고, 그 이후에 넥 성장과 치밀화가 본격화되어야 한다



설계 원리 — 환원·배출 구간과 치밀화 구간의 시간적 분리
환원 생성물(H₂O)과 유기분해물이 배출될 통로가 닫히기 전에 계면환원이 완료되어야 하며, 잔류 가스가 갇히면 조대 기공과 계면 박리의 원인이 된다. 반대로 환원이 지나치게 늦게 시작되면 넥 형성 구간에 산화막이 남아 접합 강도가 낮아진다.

본 그림은 설계 원리를 나타내는 개념 프로파일이며, 실제 구간 폭은 PoC의 TGA/DSC와 in-situ 관측으로 확정한다.

기존 Ag 소결 · 기존 Cu 소결 · PDA-DACP 비교

읽어야 할 것은 우열이 아니라 구조의 차이이다

항목	기존 Ag 소결	기존 Cu 소결	Cools PDA-DACP
접합 금속	Ag	Cu	PDA 기능화 Cu
목표 접합온도	약 200~250 °C	약 220~300 °C 또는 공정별 상이	약 200~250 °C 목표
표면처리	대표적으로 Ag 마감 사용	bare Cu 가능하나 산화막 관리 필요	bare Cu direct sintering
산화막 대응	Ag 산화막 장벽이 낮음	포름산 · 수소 · 환원첨가제 등 외부 환원종	입자결합형 계면환원 + 기존 환원계 병행
마이그레이션	Ag 마이그레이션 관리 필요	낮음	낮음
유기물	용제 · 리간드 · 바인더 존재	용제 · 분산제 · 환원제 · 바인더 존재	기존 vehicle 유지 가능 + PDA 기능층
최종층	다공성 Ag 네트워크	Cu 네트워크	고밀도 Cu 네트워크 (목표)
핵심가치	검증된 고온접합	저가 · 고온 Cu 접합	분산·산화방지·계면환원이 통합된 bare-Cu 접합

기존 Cu 소결은 환원 기능을 페이스트 또는 분위기에 두므로 환원종이 산화막까지 도달해야 하고, 그 과정이 확산 율속이 되며 접합층 위치에 따라 환원 정도가 달라진다. Cools PDA-DACP는 환원 기능을 각 입자의 산화막 바로 위에 두므로 그 확산 문제를 구조적으로 회피한다.

1차 PoC 시험설계 — 단일 변수 분리

관측되는 차이를 PDA 기능화의 효과로 귀속시킬 수 있어야 한다

비교군 설계

A · 대조군

기준 Cu 입자 + 기준 페이스트 조성
현재의 상용 Cu 소결 페이스트 조성을 그대로 사용하여 기준 성능을 확보한다.



B · 시험군

PDA 기능화 Cu 입자 + A와 동일한 페이스트 조성
Cu 입자 표면 기능만이 유일한 차이가 되도록 나머지 변수를 모두 고정한다.

동일하게 유지하는 조건

용제	분산제	환원제	바인더
입도 분포	인쇄 조건	열이력	압력 프로파일

여러 변수를 동시에 바꾸면 실패의 원인을 특정할 수 없고, 성공하더라도 그 원인을 알 수 없다.
따라서 1차 PoC에서는 PDA 기능화 유무 외의 모든 조건을 동일하게 유지한다.

접합체 사양 (공동 협의 항목)

접합 대상	Cu 종단 SiC/GaN 다이 – DBC 또는 AMB 상부 bare Cu
표면 상태	양쪽 모두 bare Cu, Ag 마감 없음
접합 조건	약 200~250 °C · 10~20 MPa · 분 단위 유지
대면적 확장	DBC/AMB 하부 Cu – Cu 히트스프레더 접합으로 2차 확장

후속 최적화군 C(환원제 감량) · D(분산제 감량) · E(PDA 두께·입도 최적화) · F(다중 입도 충전)는 1차 결과 확인 후 착수한다.

필수 분석 항목

메커니즘 검증 · 접합층 성능 · 신뢰성의 세 계층으로 구성한다

메커니즘 검증	접합층 성능	신뢰성 · 보관
· XPS Cu⁰ / Cu⁺ / Cu²⁺ 상태 변화 — 계면환원의 직접 증거 · FTIR 또는 Raman 가열 전후 카테콜-퀴논 전환의 확인 · TGA / DSC 용제·기존 유기물·PDA의 분해 및 배출 구간과 발열·흡열 거동 · EDS / EELS 또는 ToF-SIMS C-N 잔사의 공간적 위치 — 넥 내부인지 기공벽인지	· 단면 SEM / FIB Cu 넥 크기, 기공 크기와 분포, 계면 연속성 · 전단강도 다이 전단강도 및 계면 파괴 모드 · 전기비저항 접합층의 통전 성능과 잔사 영향 · 열전도 또는 열저항 모듈 수준 성능으로 환산 가능한 지표 · 밀도 · 기공률 치밀화 목표의 정량 확인	· 고온저장 장시간 고온 노출 후 접합층 및 계면 열화 · 열사이클 CTE 부정합 응력에 대한 접합층 내구성 · 파워사이클 실사용 조건에 가까운 반복 발열 하 수명 · 보관 안정성 보관시간에 따른 Cu 산화상태와 페이스트 물성 변화

메커니즘 검증 항목은 계면환원과 넥 형성의 결합을 직접 확인하고, 성능·신뢰성 항목은 그 결합이 접합 성능으로 전달되는지를 확인한다.

메커니즘이 맞다면 나타나야 할 관측 신호

앞의 세 항목은 메커니즘의 직접 증거이고, 뒤의 항목들은 그 결합이 접합 성능으로 전달되는지를 확인한다

01 CuO · Cu₂O 감소

동일 온도·동일 시간에서 PDA-Cu의 산화물 비율이 A 대비 감소한다.

확인 수단 : XPS

02 벅 형성 개시온도 저하

Cu 벅이 생기기 시작하는 온도가 낮아진다.

확인 수단 : 단면 SEM · in-situ 관측

03 동일 조건에서 벅 크기 증가

동일 압력·동일 시간에서 형성된 벅의 크기가 커진다.

확인 수단 : 단면 SEM / FIB

04 파괴모드의 이동

계면 박리에서 접합층 내부 파괴로 파괴모드가 이동한다.

확인 수단 : 다이 전단 후 파면 분석

05 비저항 및 열저항 감소

접합층의 전기비저항과 열저항이 함께 감소한다.

확인 수단 : 4단자 비저항 · 열저항 측정

06 bare Cu 계면박리 감소

소자 후면 및 DBC/AMB 계면에서의 박리가 감소한다.

확인 수단 : SAT · 단면 SEM

07 보관 후 성능저하 감소

일정 기간 보관 후에도 접합강도와 치밀도 저하가 작다.

확인 수단 : 보관 안정성 시험

이 신호들이 A/B 비교에서 일관되게 관측되면 입자결합형 계면환원 모델이 실제로 작동한다고 판정한다.

적용시장과 우선순위

고온 · 고전류 · 대면적 조건에서 금속 접합층이 필요한 영역에 집중한다

1 SiC · GaN 전력반도체 die attach

접합층의 열저항이 정선 온도를 직접 좌우하는 영역이며, 소자 후면 Cu 전극과 DBC/AMB 사이를 bare Cu 상태로 접합할 수 있다는 점이 그대로 원가와 리드타임의 이점이 된다.

2 DBC/AMB – Cu 히트스프레더 대면적 접합

면적이 넓을수록 Ag 도금 비용과 도금 품질 편차의 영향이 커진다. 다이접합과 동일한 재료 체계를 대면적에 적용할 수 있다는 점이 자재·공정 관리의 단순화를 만든다.

3 EV 인버터

높은 전류밀도와 가혹한 파워사이클 조건을 다루며, 대량 양산 물량으로 인해 재료비와 공정 단계 축소의 효과가 가장 크게 나타난다.

4 고전력 충전기 및 전력변환장치

높은 가동률과 장수명 요구가 접합층의 열피로 저항을 요구한다.

5 ESS 전력모듈

설계 수명이 길고 유지보수 접근성이 낮아 접합부 신뢰성의 비중이 크다.

6 RF 파워앰프

방열 경로가 짧고 접합층 두께가 성능에 직결되며, 고온 사용 조건에서 금속 접합층이 요구된다.

7 고출력 LED 및 레이저

광출력이 접합부 열저항에 민감하고, 다공성 접합층의 열화가 광출력 저하로 곧바로 나타난다.

1차 진입시장은 SiC·GaN 전력반도체와 DBC·AMB 기반 전력모듈이다. 이후 대면적·고열유속 접합기술을 기반으로 AI-HPC용 고전력 로직칩의 다이-히트스프레더, 패키지-냉각부 및 기타 Cu 열접합계면으로 확장한다.

기술 리스크와 관리변수

각 위험에 대응하는 시험과 판정기준을 연결한다

리스크	발생 시 현상	대응 시험	판정기준
PDA 두께 불균일	입자별 환원 당량 편차 → 넥 크기 산포 확대	TGA · 입자 단면 TEM · XPS	동일 배치 내 잔사 중량분을 편차와 넥 크기 산포가 관리 범위 이내
환원 당량 부족	산화막 잔존 → 넥 형성 억제, 계면 박리	XPS Cu ⁰ /Cu ⁺ /Cu ²⁺ · 단면 SEM	가열 후 Cu ²⁺ ·Cu ⁺ 비율이 A 대비 유의하게 감소
과도한 유기잔사	잔류 탄소 증가 → 비저항·열저항 상승	TGA · EDS/EELS · 전기비저항	접합층 잔류 탄소와 비저항이 A 대비 악화되지 않음
용제·부산물 배출 지연	가스 포집 → 조대 기공, 계면 박리	TGA/DSC · 단면 SEM · SAT	기공 폐쇄 이전에 환원·배출이 완료되는 프로파일 확보
가압 불균일	접촉점 선택의 편차 → 국부 미접합	가압 프로파일 계측 · 압흔 분포 · SAT	다이 면내 접합률 및 전단강도 산포가 관리 범위 이내
bare Cu 표면의 보관 중 산화	전극 산화막 과성장 → 계면 환원 부담 증가	보관 시간별 XPS · 계면 전단강도	규정 보관 조건 내에서 계면 파괴모드가 유지됨
기공률 · 접합층 두께 편차	열저항 산포 확대 → 정선 온도 편차	밀도·기공률 · 열저항 · 단면 계측	기공률과 접합층 두께가 설계 목표 범위 이내

이 항목들은 플랫폼의 약점이 아니라 관리 대상이며, A-14의 분석 체계가 그대로 관리 지표가 된다.

참고문헌

산업 기준값과 물성값의 출처. 본 자료의 도면은 모두 Cools의 메커니즘 설명을 위해 새로 작성되었다.

제품 데이터시트 및 제조사 자료

[1]

Indium Corporation, InFORCE® MF Pressure-Assisted Ag Sinter Paste for Die-Attach, Product Data Sheet, Form No. 100320 (2025).

Ag 91 wt%, 250 °C · 12 MPa · 3분, 인쇄 두께 대비 약 50 %의 접합층 두께 손실 → 본편 2장, A-3

[2]

Indium Corporation, Pressure Sintering Materials / InFORCE® Series 제품 자료.

열사이클·열충격 후 다이 전단강도 50 MPa 초과 → 본편 3장

[3]

Heraeus Electronics, mAgic® DA295A Factsheet.

금속 함량 82 %, 소결 온도 200 °C 이상, 호환 표면 Ag-Au → 본편 3장, A-3

[4]

Heraeus Electronics, mAgic® PE340 Pressure Sinter Paste 제품 자료.

230 °C 미만 · 15 MPa · 3분, bare Cu 표면 호환 표방 → 본편 2장

[13]

LBMA Silver Price (London Bullion Market Association) 및 LME Copper Price, 2026. 9. 4 기준.

Ag 약 US\$2,149/kg · Cu 약 US\$14.37/kg — 약 150배 차이 → 본편 3장

학술 문헌

[5]

H. R. Kotadia et al., “Die-Attach Bonding with Etched Micro Brass Metal Pigment Flakes for High-Power Electronics Packaging”.

275 °C 이하 소결, 기공률 10 % 미만의 벌크형 미세조직 → A-4

[6]

동 연구그룹, “Development of sinter paste with surface modified copper alloy particles for die-attach bonding”.

PEG600을 환원성 바인더로 사용 → 본편 6장

[7]

Y. Yong, M. T. Nguyen, H. Tsukamoto, M. Matsubara, Y.-C. Liao, T. Yonezawa, Scientific Reports 7, 45150 (2017).

저온 소결 Cu 막에서 유기 잔사와 비저항의 관계 → 본편 10장

[8]

T. Yonezawa et al., “Copper Particle Sintering for Low-Temperature Electronic Joining”, Advanced Engineering Materials (2026).

압력·온도·용제·분위기·기판 금속화의 최적화 전략 총설 → A-12

[9]

Cu 페이스트에 아스코르브산을 첨가한 자기완원·자기보호형 다이접합재 연구, Materials & Design (2018).

1.3 wt% 첨가 시 전단강도 24.8 MPa, 무첨가 시 9.7 MPa → 본편 6장

[10]

US 11,929,341 — 나노 Cu 소결 분말 및 페이스트.

말론산계 활성제 0.5~3 wt%, 분산제 0.5~2 wt%, 용제 10~15 wt% → 본편 14장

[11]

H. Lee, S. M. Dellatore, W. M. Miller, P. B. Messersmith, Science 318 (5849), 426–430 (2007).

홍합 모사 표면화학 — PDA의 범용 부착성 → 본편 7장

[12]

Y. Liu, K. Ai, L. Lu, Chemical Reviews 114 (9), 5057–5115 (2014).

폴리도파민과 그 유도체의 합성 및 응용 → 본편 7장

카테콜계 화합물의 산화환원 거동 자체는 알려져 있으나, 이를 Cu 입자 표면에 화학결합된 층으로 선배치하여 소결 가열 중 산화막 환원과 넥 형성을 시간적으로 결합시키는 설계가 본 플랫폼의 기술적 출발점이다.



주식회사 쿨스

대표이사 조진현

본사 | 경상남도 창원시 의창구 중동북로 23

지사 | 경기도 화성시 동탄구 삼성1로 160

M. 010-2280-9414

E. jhcho@cools.co.kr

H. www.cools.co.kr
