

깊은 비아의 이온 공급과 나노플러싱 액교환

조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

SUMMARY

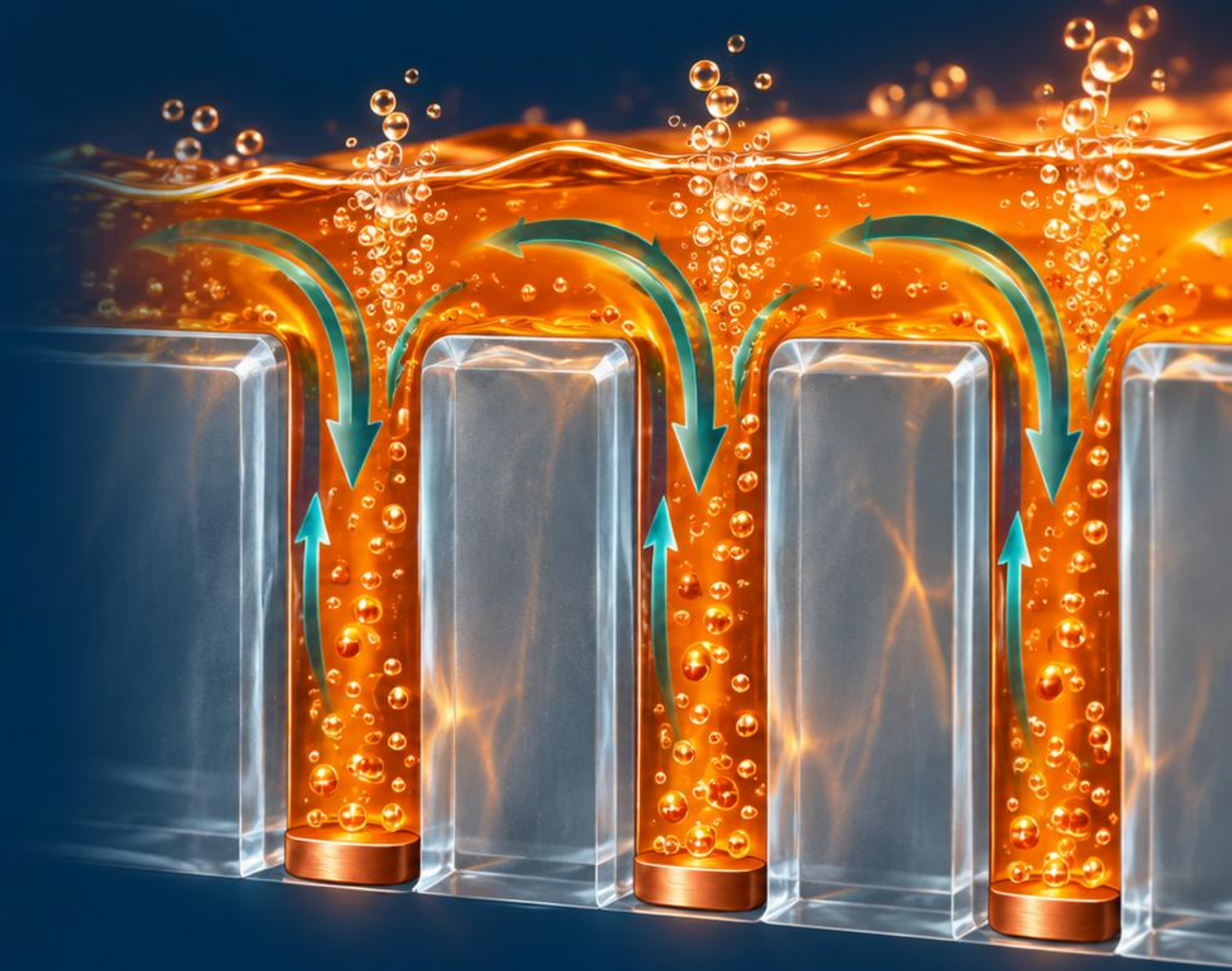
깊은 비아에서는 성장면이 소비하는 구리 이온을 확산만으로 보충하지 못해 도금이 지연된다. 질소 나노버블 함유액을 비아에 공급한 뒤 국소 자극을 주어 내부 액체를 반복 교체하면 공급 거리와 성장면 경계층이 줄어든다. 페클레 수에 기반한 설계 계산과 개발 목표, 액교환 프리테스트와 실제 도금 실증 계획을 다룬다.

나노플러싱으로 TGV 구리도금 최대 100배 고속화

페클레 수 기반 물질전달 설계와
단계별 실증

(주)쿨스 대표 조진현

2026.09 · 개발목표



깊은 비아의 이온 공급 부족이 도금을 지연시킵니다

바텀필과 센터필 모두, 성장면까지 구리 이온을 계속 공급해야 합니다

1 mm 충전 비교 사례

약 20시간

장시간 장비 점유
처리량 확대의 제약



표면에서 이온을 소비하는 속도를
비아 안으로 보충하는 속도가 따라가지 못함

해결 과제: 비아 내부의 도금액 공급을 바꾸어, 속도와 충전 품질을 함께 확보

비아가 깊어질수록 확산에 걸리는 시간은 제곱으로 증가

확산의 특성 시간 $t_D \approx L^2 / D$ · $D = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 가정

깊이 10배

확산 시간 100배

수송 거리 L	확산 특성 시간 t_D
0.1 mm	20초
0.3 mm	180초 · 3분
1.0 mm	2,000초 · 약 33분

도금조를 교반해도, 비아 깊숙한 성장면의 액교환이 핵심입니다.

이 값은 이온 수송의 시간 척도입니다.
비아 전체를 구리로 채우는 도금시간과 구분합니다.

질소 나노버블로 비아 속 액체를 반복 교체합니다

나노버블 선공급 → 국소 자극 → 다수 비아의 기포 반응 → 신선한 도금액 재유입

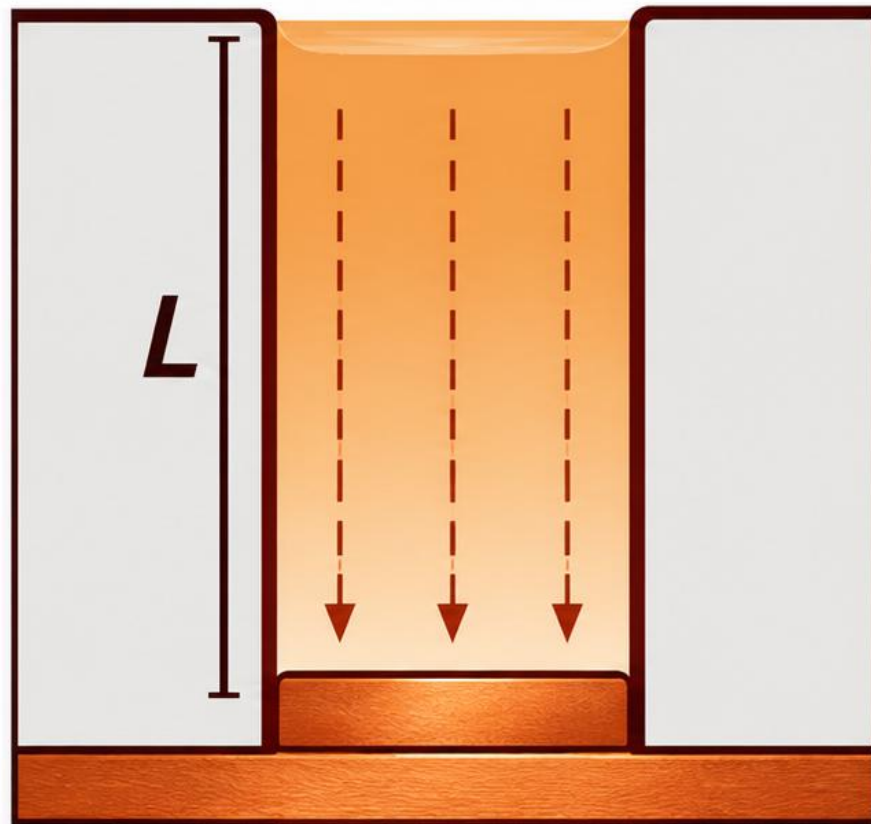


개발 구상: 국소 촉발에 따른 전역 반응과 비아 내부 액교환의 범위·반복성을 실험으로 확인

액교환으로 공급 거리를 줄이고, 성장면의 경계층을 얇게

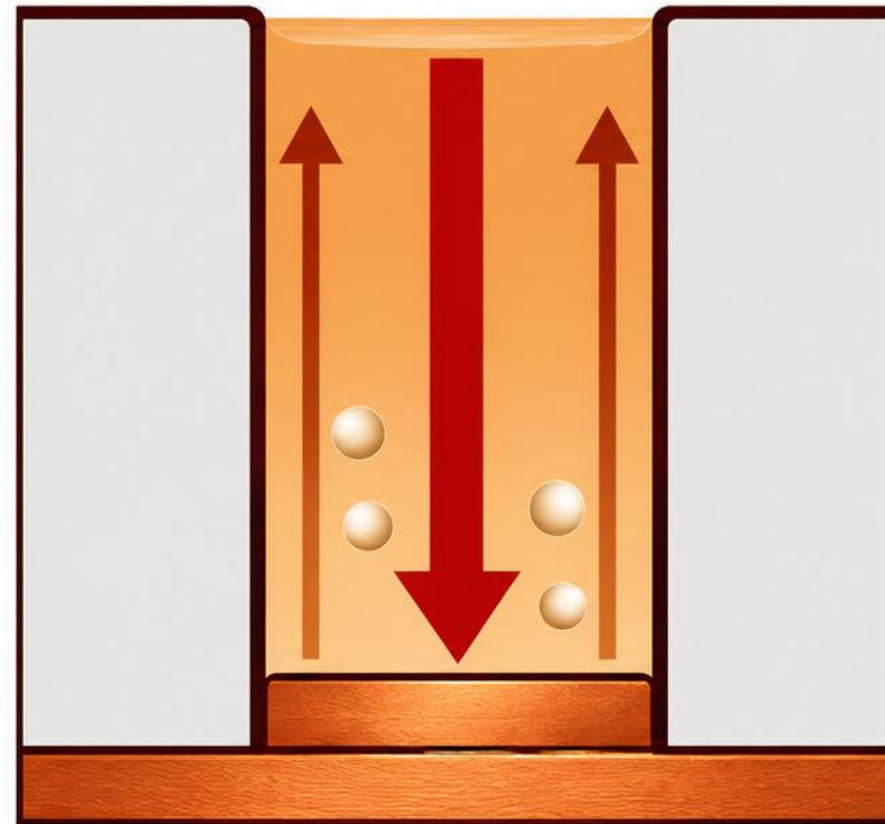
비아 안쪽까지 대류로 운반하고, 마지막 얇은 경계층은 확산으로 통과합니다

확산 공급



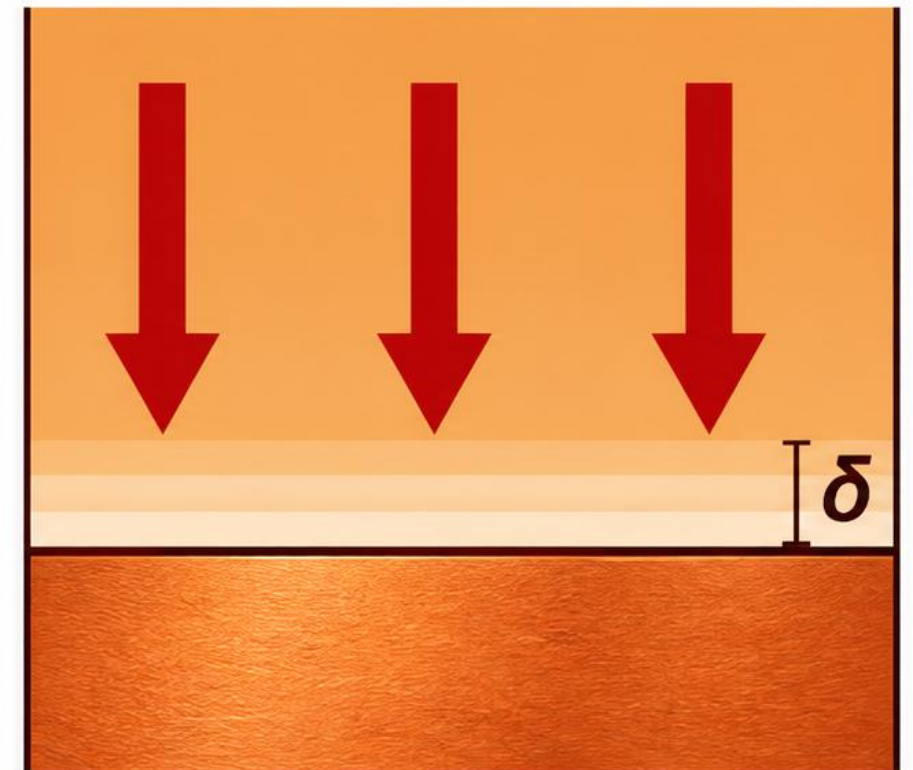
긴 거리 L 을 확산으로 이동

나노플러싱



신선액을 바닥까지 재공급

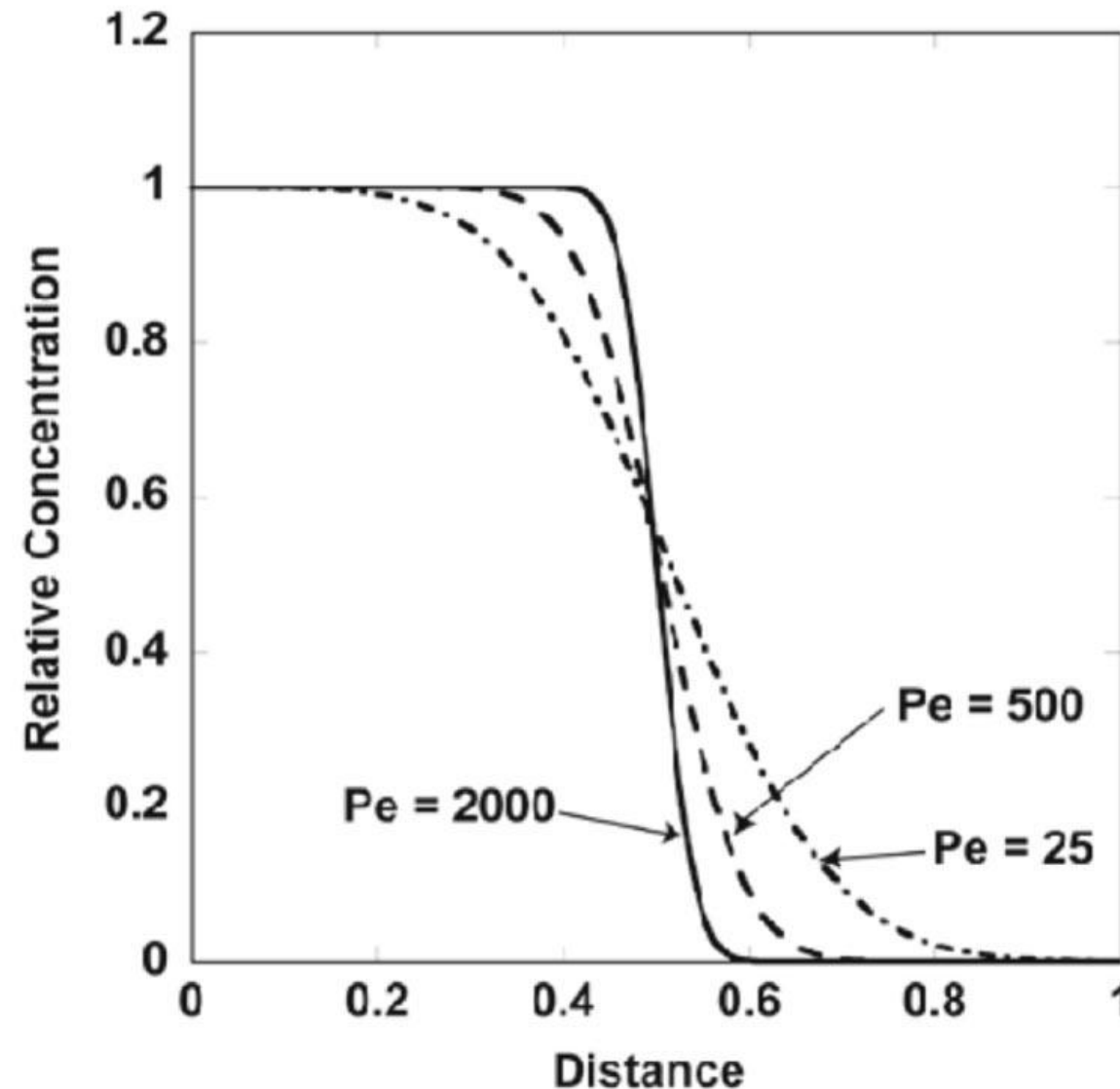
성장면 경계층



얇은 δ 가 높은 공급량을 지원

페클레 수: 대류가 확산보다 얼마나 빠르게 운반하는가

$Pe = \text{대류 수송} / \text{확산 수송} \cdot \text{비아의 길이} \cdot \text{유속} \cdot \text{확산계수를 하나의 수로 비교}$



$$Pe = UL / D$$

$$= t_D / t_C$$

U 비아 내부의 유효 공급유속

L 구리 이온이 이동할 거리

D 구리 이온의 확산계수

$$Pe = 100$$

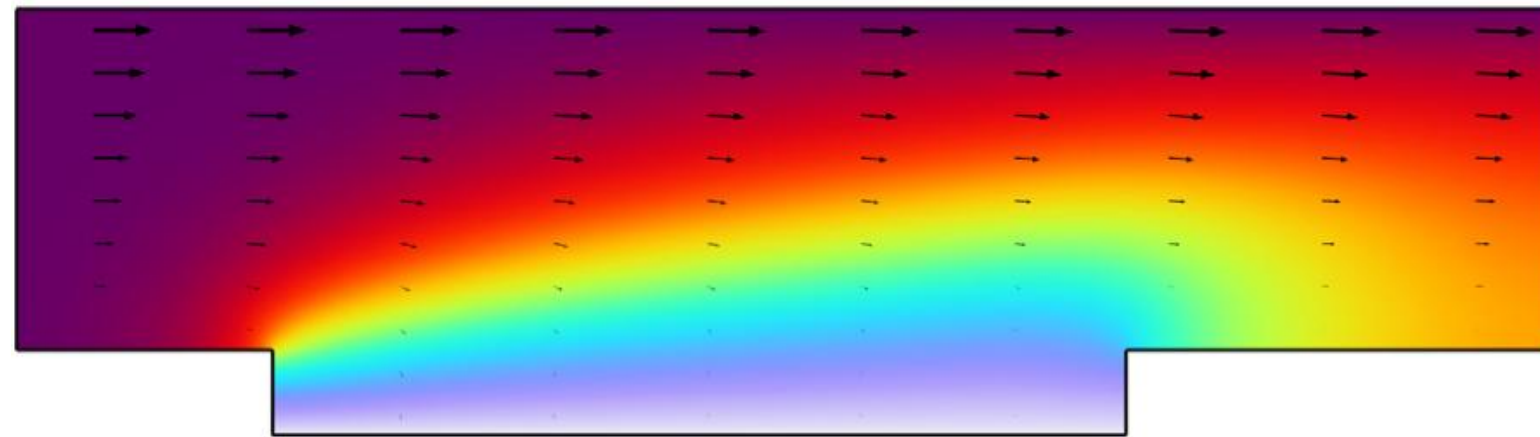
같은 거리의 대류 이동시간은
확산 특성 시간의 1/100

Source figure (non-editable): Penn State CE574, Fig. 3 (Steefel et al., 2005)

Pe 증가에 따른 구리 이온 고갈영역 축소

공개 구리도금 해석 비교 · 동일 형상에서 $Pe = 1.31$ 과 41.6 의 농도분포

Pe = 1.31

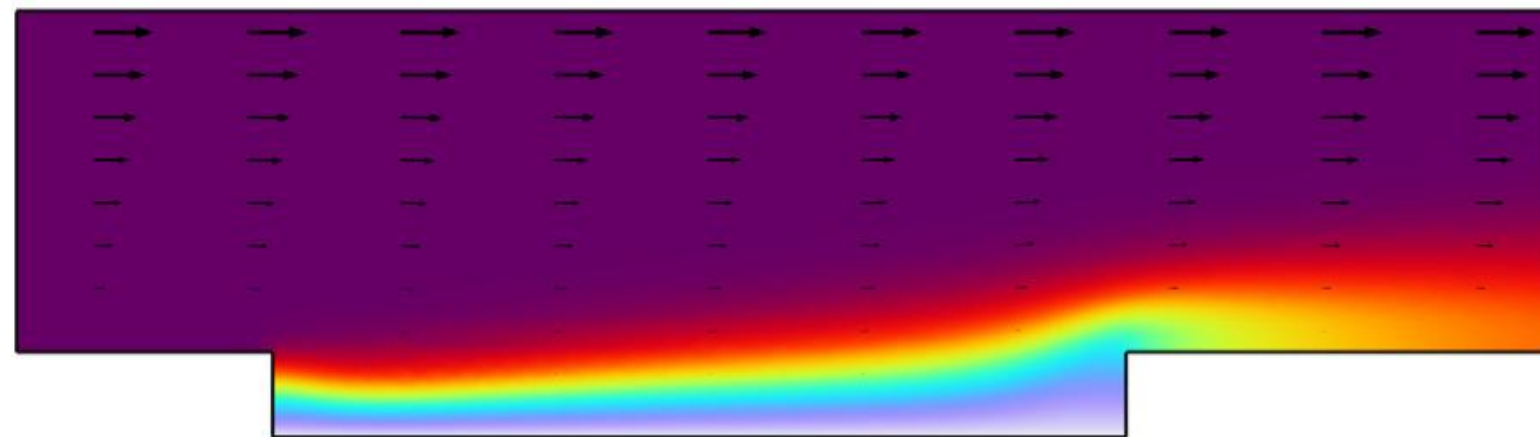


mol/m³

이온 고갈영역이 넓음

성장면 주변의 이온 보충에
확산이 크게 관여

Pe = 41.6

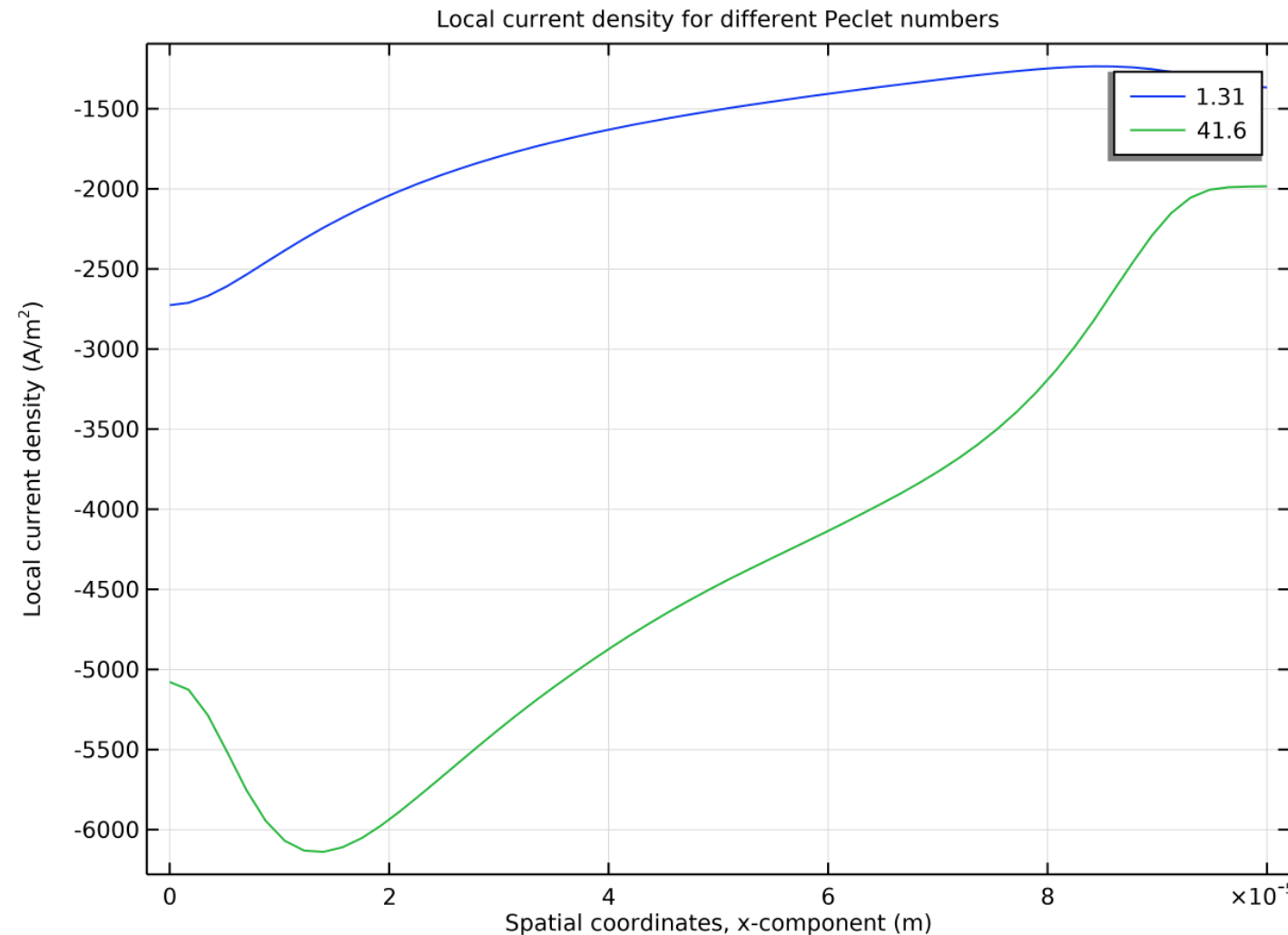


고갈영역이 얇아짐

대류가 신선한 도금액을
성장면 가까이 운반

Pe 증가가 이온 공급과 도금 전류를 높입니다

물질전달 제한 조건에서는 성장면으로 들어오는 구리 이온량이 도금속도를 결정



음극전류: 아래로 갈수록 전류의 크기 $|j|$ 가 큼

Source figure (non-editable): COMSOL Fig. 6 · 오른쪽 계산: $D = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $C = 0.40 \text{ mol/L}$ 의 막 모델 계산 예시

이온 공급량이 늘면 전류 상한 상승

$$j_{\text{lim}} = 2F k_m C$$

$$k_m = D / \delta$$

같은 전류효율에서
성장속도는 $|j|$ 에 비례

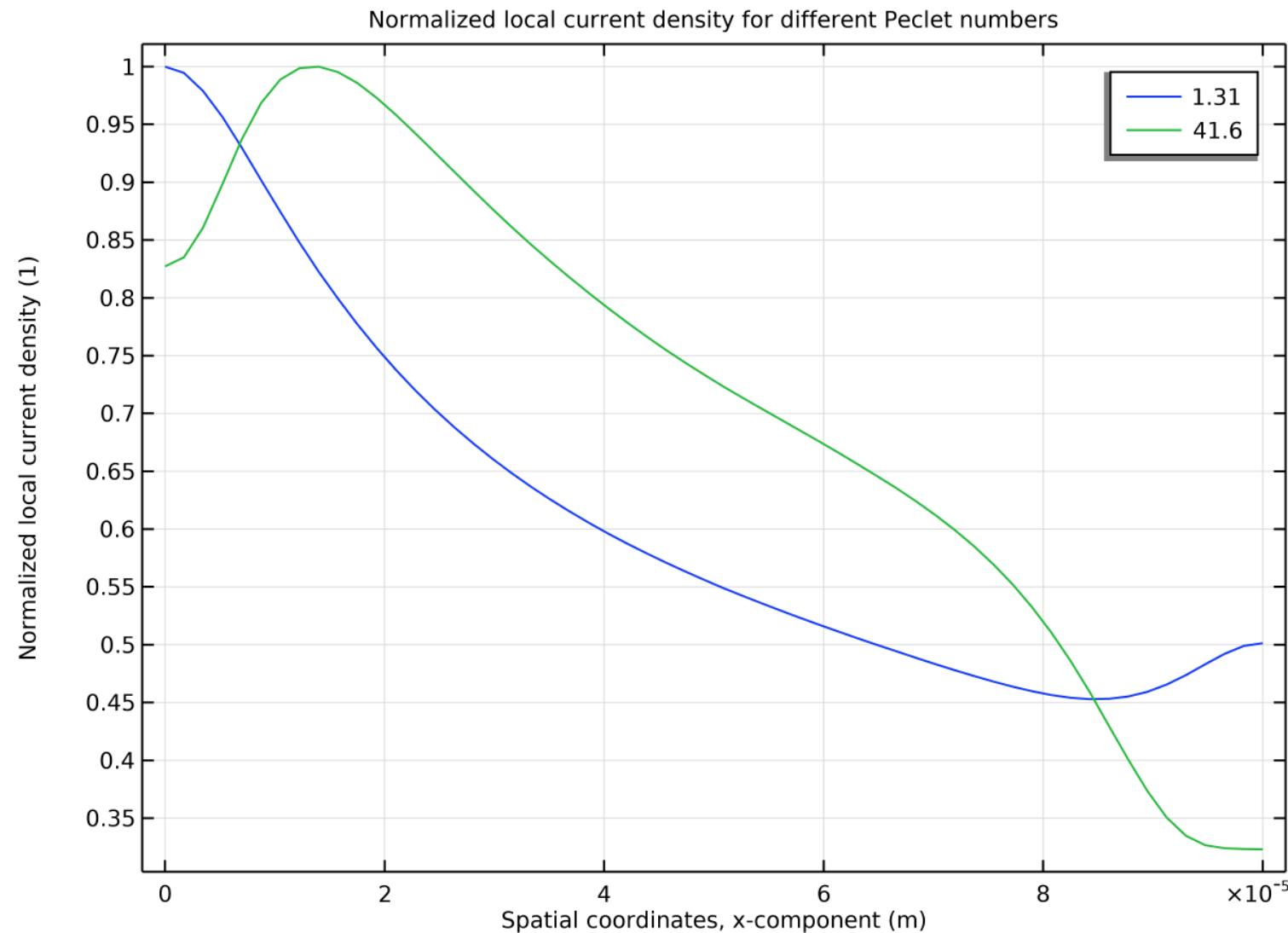
100배 목표의 물질전달 조건

$$\delta \quad 100 \mu\text{m} \rightarrow 1 \mu\text{m}$$

$$j_{\text{lim}} \quad 3.9 \rightarrow 386 \text{ A/dm}^2$$

Pe로 고속화·충전 균일도·확장 조건을 함께 설계

유효 유속과 공급거리를 정량화하고, 성장면 전체의 전류 분포까지 평가합니다



1 mm 비아의 설계 검토점

$Pe \approx 1,000$

$U \approx 0.5$ mm/s
대류 2초 / 확산 2,000초

최대 100배 도금 목표

20시간 → 12분

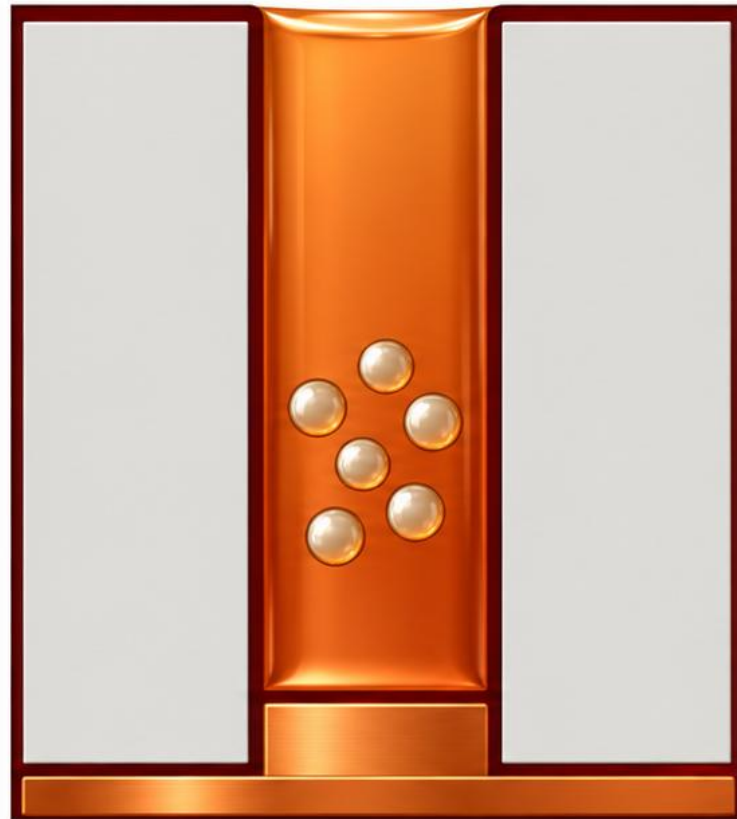
필요 전류 ≈ 378 A/dm²
유동·자극 분포와 충전 품질을 함께 검증

Source figure (non-editable): COMSOL Fig. 7 · 오른쪽: 성장면 기준, $\eta = 100\%$, $C = 0.40$ mol/L의 별도 설계 계산

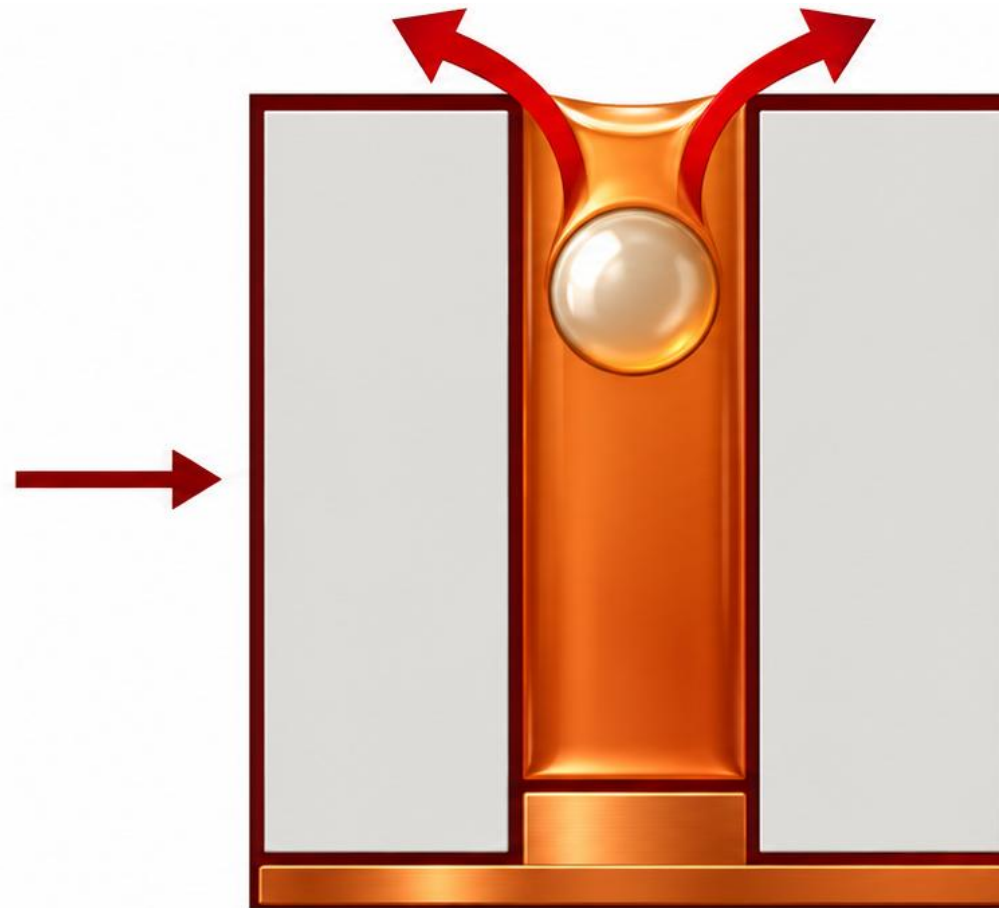
열린 비아에서 확인한 뒤, 바텀필과 센터필로 확장

바텀필에서는 같은 입구로 배출과 재유입 · 센터필은 결과에 따라 적용할 후속 경로

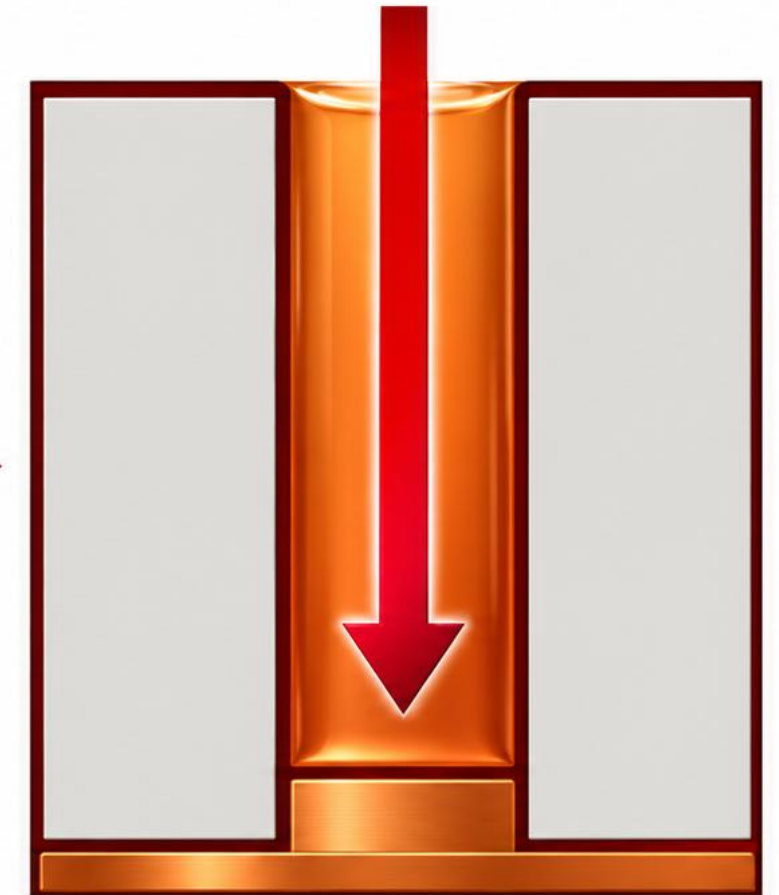
① 나노버블 선공급



② 기포 팽창과 액체 배출



③ 신선한 도금액 재유입



검증 순서: 양면 개방 비교 → 한쪽 폐쇄 바텀필 → 필요 시 센터필 대안

프리테스트에서 액교환 속도와 전역 반응을 정량화

일반수와 N₂ 나노버블수에 동일한 자극을 주고, 비아 내부 색소 감소를 비교



실제 도금에서 속도와 충전 품질을 함께 검증합니다

액교환 효과 확인 후, 전류를 단계적으로 높여 성장량·충전시간·단면 품질을 측정

단계	핵심 실험	확보할 지표
기준 공정	일반액 · 기존 운전조건 재현	성장속도, 전류효율, 단면
10배 중간 목표	나노버블액 · 전류 단계 증대	고속 성장과 보이드 억제
최대 100배 목표	공급량 · 전류 · 자극 조건 통합	1 mm 충전 12분 도전
공정 적용성	다수 비아 · 반복 운전 · 면적 확대	위치 편차, 반복성, 품질 유지

판정 기준

같은 형상과 목표 충전량에서 도금시간을 줄이고,
사전에 정한 단면·보이드·저항 기준을 함께 충족

10~12월 선행검증으로 후속 도금 개발의 기준을 확정

쿨스가 설계·해석을 주도하고, 외부 실험기관과 비교 실험을 수행

기간	실행 항목	산출물
2026년 10월	시편·N ₂ 나노버블·대조조건 준비 양면 개방 비아 비교	기준 영상 · t ₉₀ · 조건 기록
11월	한쪽 폐쇄 비교 자극 거리·반복성 평가	바텀필 적용성 · 반응 분포
12월	조건 재현 · 도금액 적합성 점검 후속 도금 시험조건 설계	통합 데이터 · 후속 개발계획

이번 단계

비아 내부 액교환의 효과와 반복성을 데이터로 확보

후속 단계

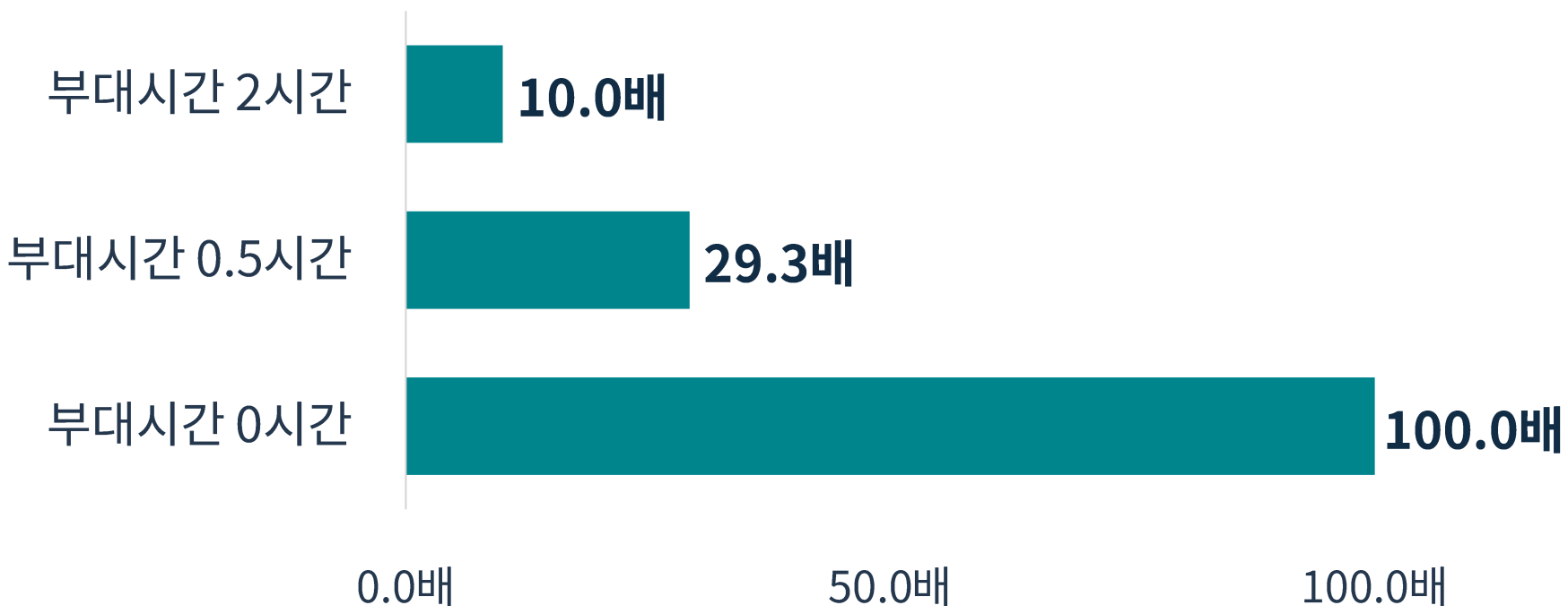
10배 고속화부터 최대 100배 충전까지 실제 도금으로 실증

도금시간 단축은 장비 처리량과 생산성 개선으로 연결

100배 도금 고속화 달성 시의 시나리오 · 부대시간을 포함해 전체 처리량 효과를 계산

도금 20시간 → 12분

전체 사이클 처리량 향상 [배]



같은 장비의 처리량 확대

충전 대기과 재공시간 감소

두꺼운 유리·깊은 비아의
공정 선택지 확대

처리량 배율 = (20 + 부대시간) / (0.2 + 부대시간) · 같은 배치량, 다른 병목이 없다는 계산 가정

비아 내부 액교환을 고속 구리충전으로 연결합니다

원리 설계와 물리적 오더 분석을 바탕으로, 비교 실험과 실제 도금 실증을 진행

최대 100배

1 mm 충전 20시간 → 12분

설계 검토점

$Pe \sim 1,000$ · 등가 공급속도 $\sim 0.5 \text{ mm/s}$

쿨스의 핵심 개발자산

기포 조건 · 자극 조건 · 액교환 데이터 · 도금 품질

선행검증 성공 → 고속도금 정식 개발 프로젝트로 확대



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
