

비아 유동공진 도금의 작동원리와 장치 구현

조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

SUMMARY

고종횡비 관통비아의 중앙부는 이온 공급을 확산에 의존해 입구가 먼저 닫히고 내부에 보이드가 남는다. 비아 축 방향으로 음파를 입사시켜 축방향 응답을 만들면 벽 경계층의 시간평균 유동이 내부 용액을 교환한다. 운전대역 선정 절차와 개구 양극 기반 장치 구성, 실제 운전 순서, 비교시험의 평가항목과 시간 단축 요인을 다룬다.

쿨스 비아 유동공진 도금 기술

작동원리와 장치 구현

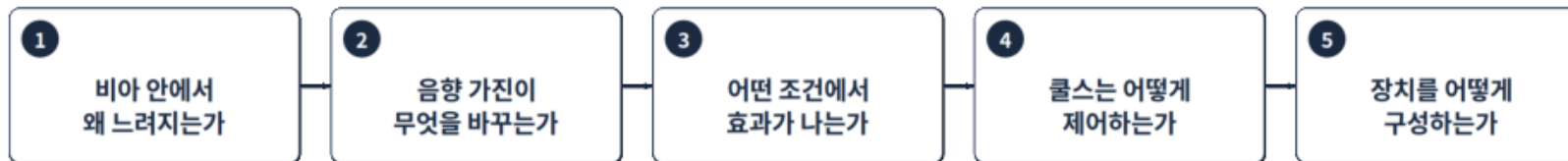
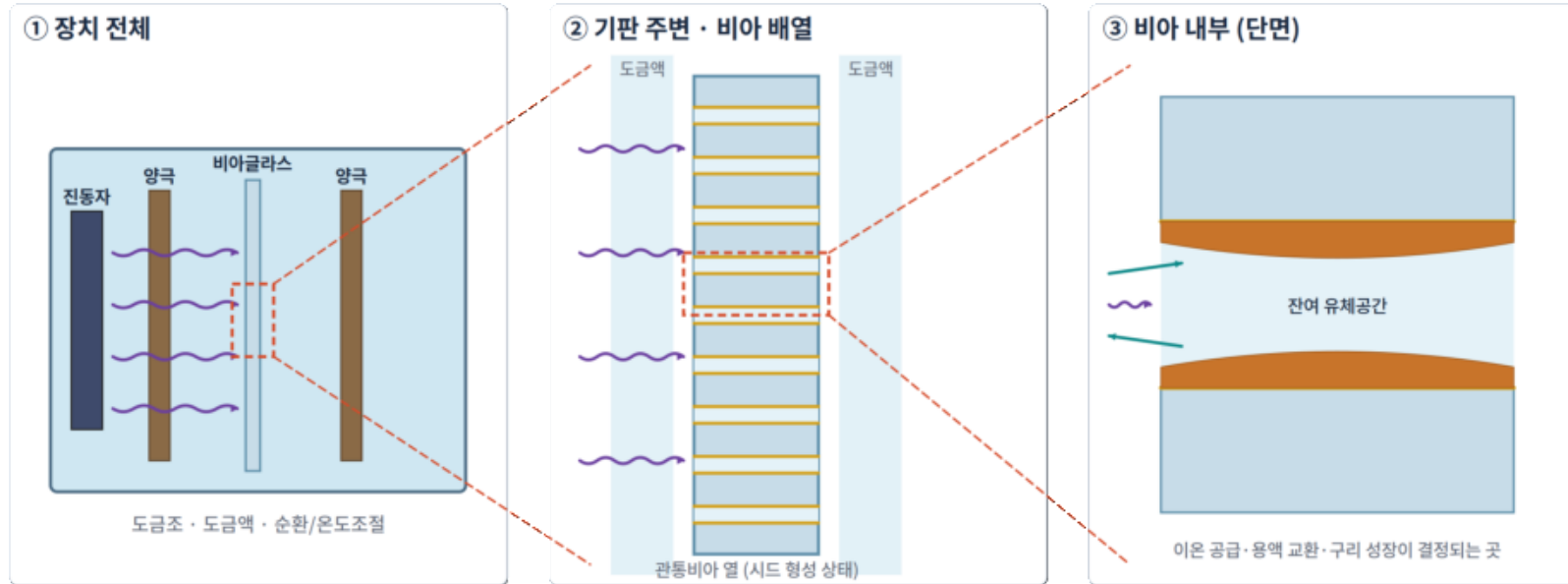
Via Flow-Resonance Plating — Operating Principle and Apparatus Implementation

기술협력사·도금·장비 담당자용 기술자료

비아 안에서 왜 도금이 느려지는가 → 음향 가진이 무엇을 바꾸는가 → 어떤 조건에서 효과가 나타나는가 → 쿨스는 이를 어떻게 제어하는가 → 실제 장치를 어떻게 구성하는가

근거 자료: Jones et al. (2018) Ultrason. Sonochem. 42, 434–444 · US 2007/0197138 A1 · 쿨스 설계값·계산값 (구분 표기)

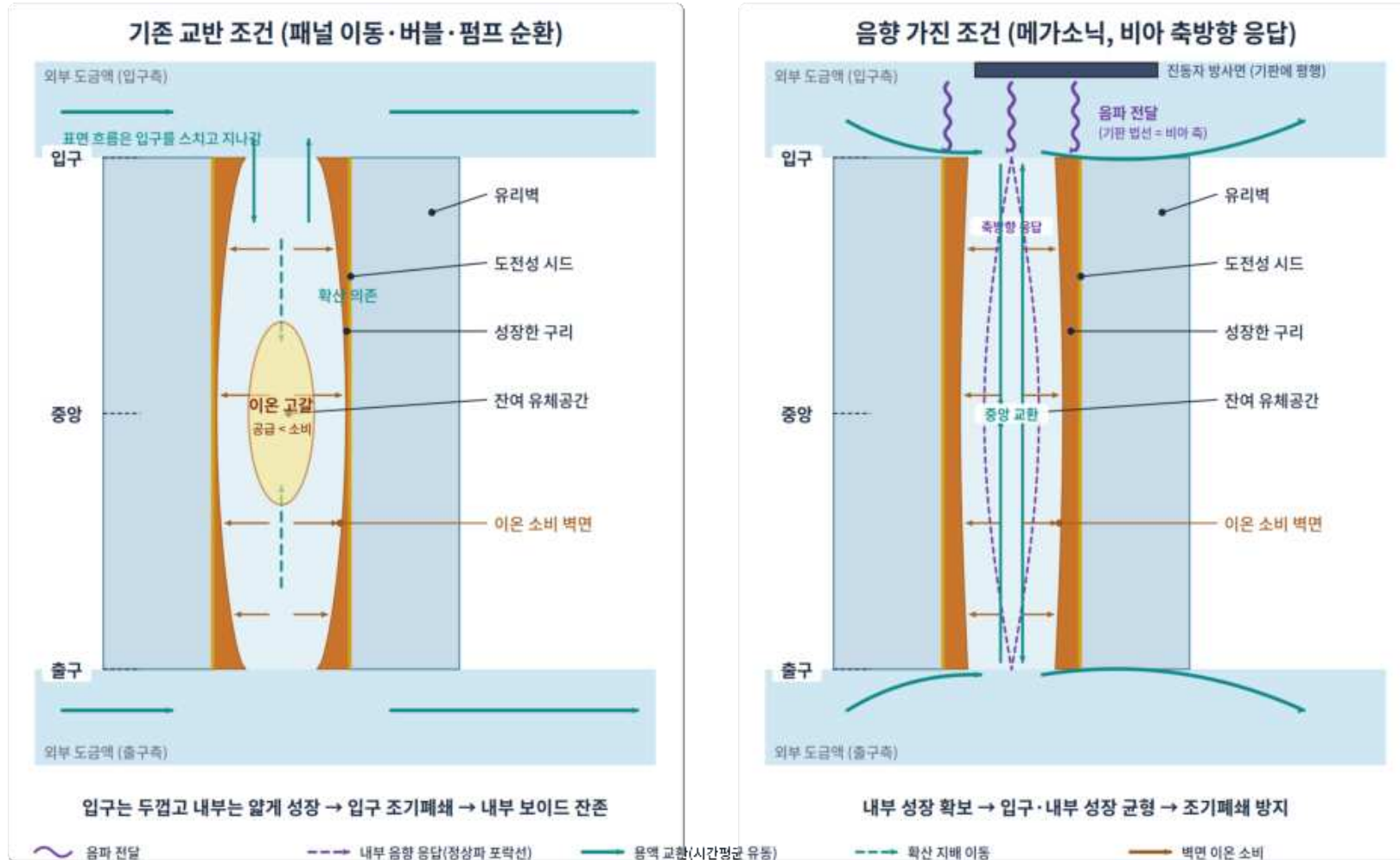
장치 전체에서 비아 내부까지 한 줄로 이어지는 원리 — 공급 제한을 음향 가진 운전조건으로 해소



※: 내부 공급 제한 → 음향 가진으로 내부 용액 교환 성립 → 내부 성장 확보 → 입구 · 내부 성장 불균형 해소 → 입구 조기폐쇄 방지 · 보이드 억제 (효과는 형상 · 잔여 유체공간 · 가진 조건에 따라 달라)

그림: 쿨스 구조 설명도(3단 줌) · 정량값은 이후 페이지에서 조건과 함께 제시

고종횡비 비아 중앙부는 이온 공급이 확산에 의존 → 입구 과성장·중앙 결핍이 기본 현상

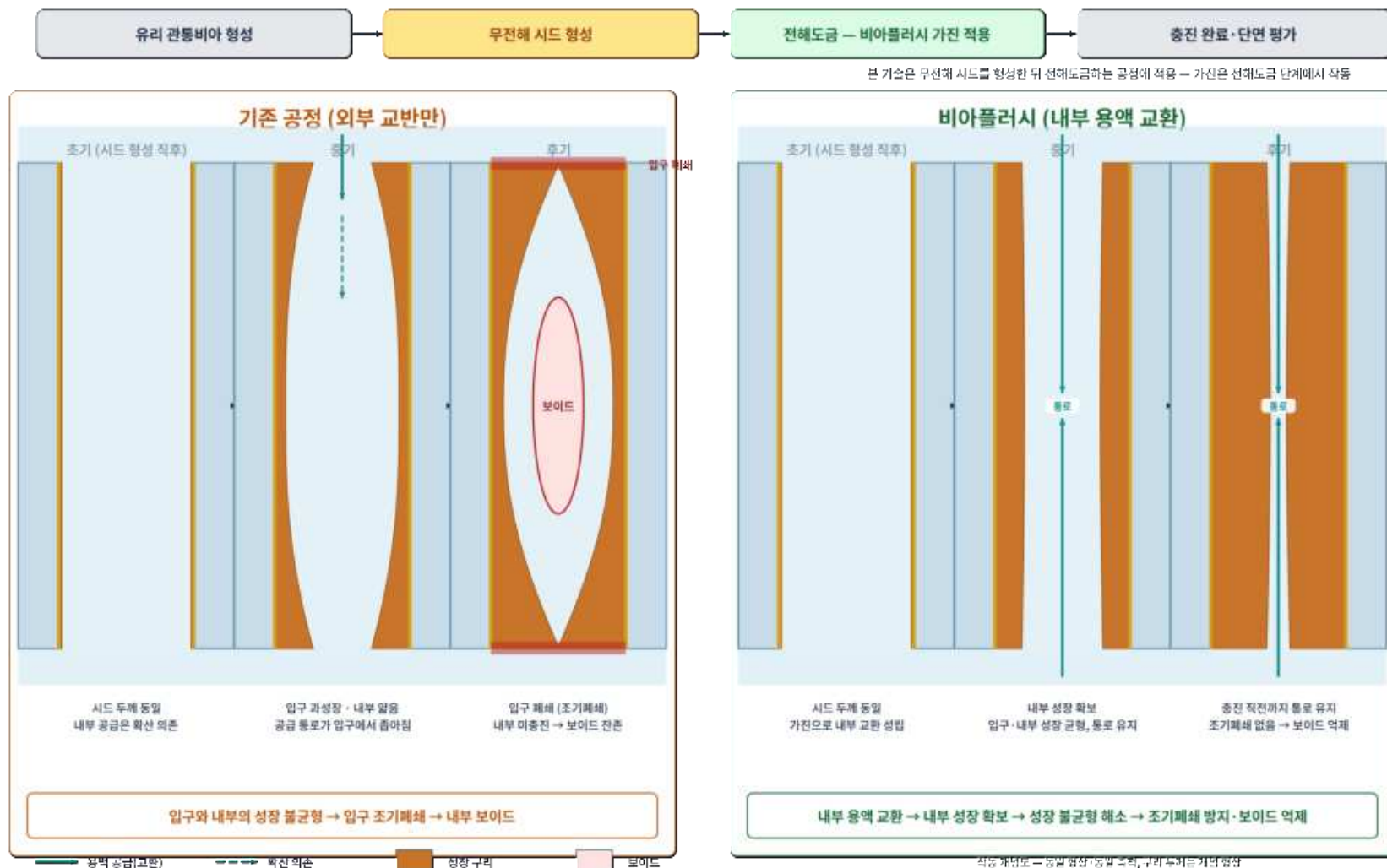


그림에서 확인할 것

- 1 왼쪽(기존 교반): 표면 흐름은 입구를 스치고 지나가며, 내부는 확산에 의존 → 내부 이온 고갈(공급 < 소비) → 입구 과성장·내부 얇음 → 입구 조기폐쇄(4쪽)
- 2 오른쪽(음향 가진): 진동자 면이 기판에 평행이므로 음파가 비아 축 방향으로 입사 → 축방향 응답이 성립
- 3 음파 전달(보라 물결)과 용액 교환(청록 실선)은 다른 현상: 음파는 에너지 경로, 교환은 시간평균 유동
- 4 벽면(시드·성장 구리)이 이온 소비면. 남은 유체공간이 줄수록 공급 경로가 좁아짐 — 폐쇄 위치는 잔여 내경과 국부 성장속도가 함께 결정(11쪽)

그림: 쿨스 구조 설명도 · 관통비아 수직 단면(입구 = 진동자 대면측) · 구리 두께는 개념 형상, 축척 비정량 · 화살표 구분: 물결=음파, 실선=용액 교환, 점선=확산

내부 용액 교환 → 내부 성장 확보 → 입구·내부 성장 불균형 해소 → 입구 조기폐쇄 방지·보이드 억제 (무전해 시드 후 전해도금 공정에 적용)



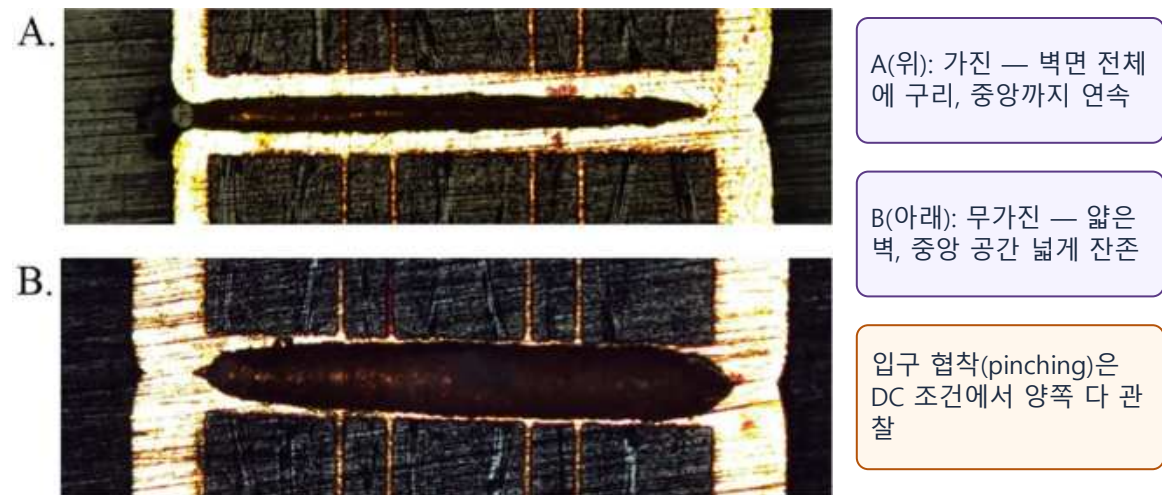
그림에서 확인할 것

- 1 기존 공정: 입구 과성장·내부 얇음(중기) → 내부가 채워지기 전에 입구가 닫힘(후기) → 내부 보이드 잔존. 3쪽 현상의 귀결
- 2 비아플러시: 내부 교환으로 내부 성장이 확보되어 입구와 내부가 함께 두꺼워짐 → 충전 직전까지 공급 통로 유지
- 3 핵심 효과는 '두께 편차 감소'가 아니라 입구 조기폐쇄 방지 — 폐쇄 시점의 내부 충전율이 평가 지표(23쪽)
- 4 적용 공정: 무전해 시드를 먼저 형성한 뒤 전해도금하는 일반 공정. 가지는 전해도금 단계에서만 작동하며 시드 공정은 변경하지 않음

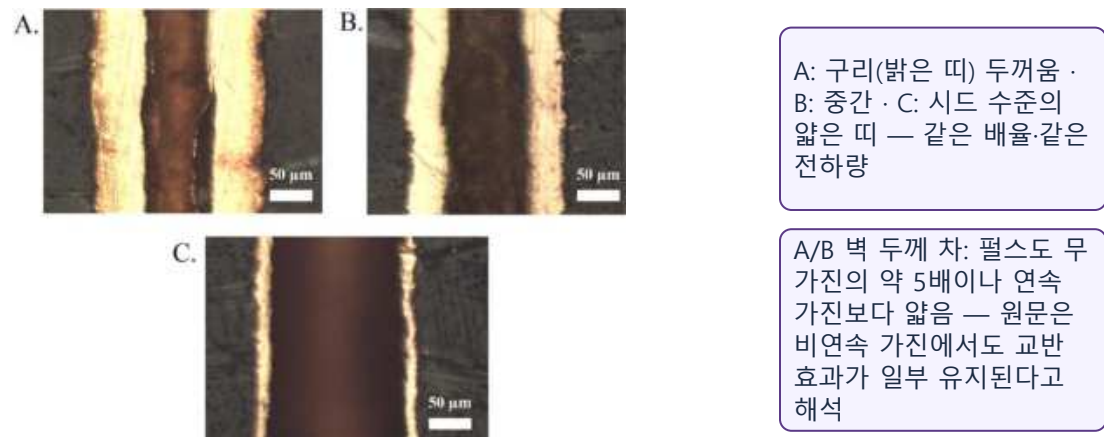
그림: 작동 개념도(구조 설명도) · 동일 형상·동일 축척의 초기·중기·후기 비교, 구리 두께는 개념 형상 · 왼쪽 기존 공정(외부 교반만), 오른쪽 비아플러시(내부 용액 교환) · 공정 위치: 유리 관통비아 → 무전해 시드 → 전해도금(가진 적용) → 평가

175 $\mu\text{m}\cdot\text{ar}$ 5.7 관통비아 중앙부: 연속 가진 3.1 $\mu\text{m}/\text{h}$, 펄스 2.1, 무가진 0.4 — 연속 가진은 무가진의 약 7.75배 (문헌값)

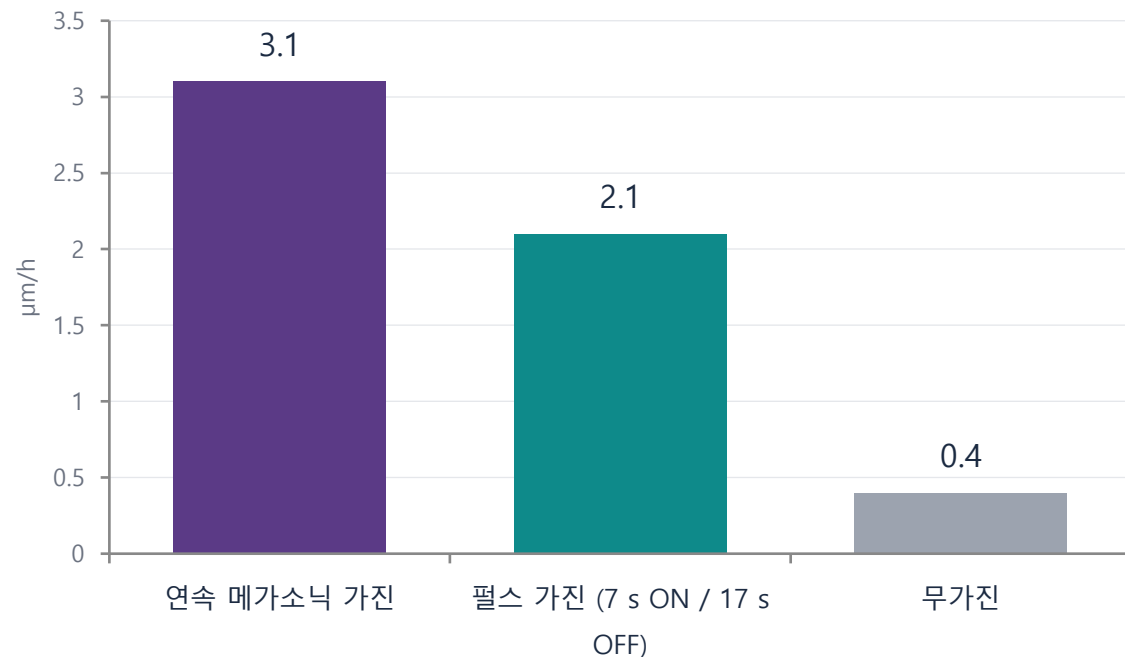
[문헌 결과] Jones 2018 Fig. 3 (PDF 6쪽) — 175 μm THV, 450 W MS(A) vs 펄프 순환만(B)



[문헌 결과] Jones 2018 Fig. 4 (PDF 7쪽) — 중앙부 단면: A 연속 가진 / B 펄스 / C 무가진 (눈금 50 μm)



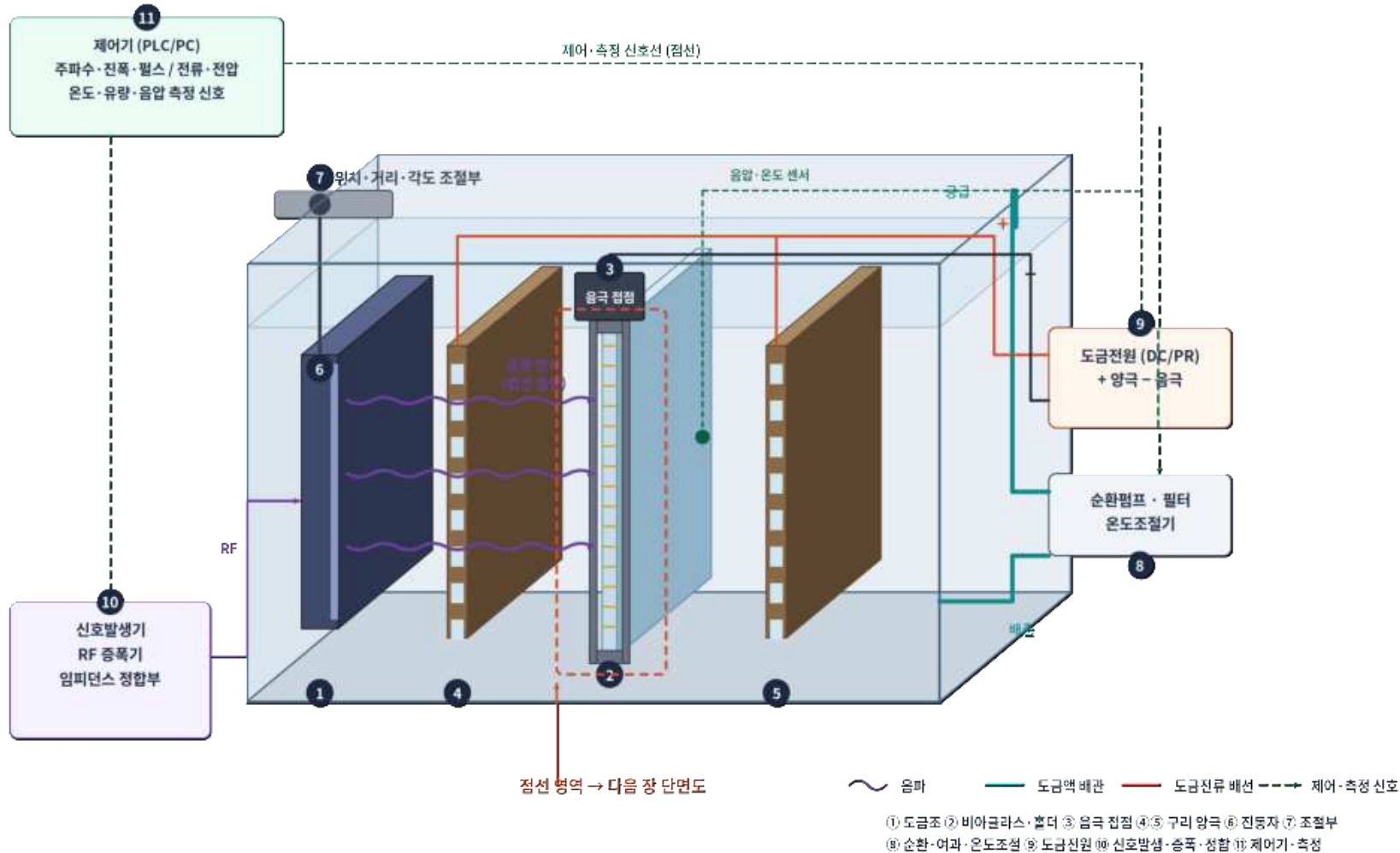
[문헌 결과] Jones 2018 Fig. 5 (PDF 7쪽) — 중앙부 평균 도금속도 (10회 측정 평균)



조건	비아 중앙부 평균 도금속도	무가진 대비
연속 메가소닉 가진	약 3.1 $\mu\text{m}/\text{h}$	약 7.75배
펄스 가진	약 2.1 $\mu\text{m}/\text{h}$	약 5.25배
무가진	약 0.4 $\mu\text{m}/\text{h}$	기준

조건(문헌): 직경 약 175 μm , 종횡비 약 5.7, 전류밀도 0.5 A/dm^2 , 약 16시간 DC 도금, 450 W MS, 진동자-PCB 45 mm, 펄스 7 s ON:17 s OFF. 수치는 논문의 PCB 관통비아 중앙부 도금속도이며 쿨스 측정값·충진시간이 아님. 출처: Jones et al., Ultrasonics Sonochemistry 42 (2018) 434–444, doi:10.1016/j.ultsonch.2017.12.004

기본 배치 = 수직 비아글라스 · 양면 도금액 접촉 · 한쪽 음향 가진 · 개구 양극 양면 — 11개 부품



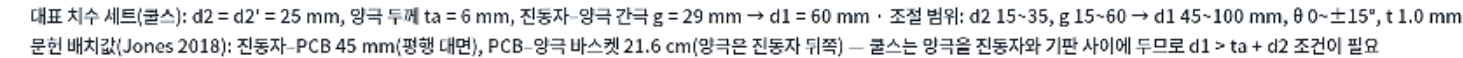
그림에서 확인할 것

- 1 진동자(⑥)는 기판에 평행하게 대면하고, 조절부(⑦)로 거리·높이·각도를 바꿀 수 있음
- 2 양극(④⑤)은 진동자와 기판 사이에 놓이므로 개구형이어야 음파가 통과(9·18쪽)
- 3 음극 접점(③)은 홀더 상단에서 시드 주변부로 연결, 비아 영역을 가리지 않음(8쪽)
- 4 순환(⑧)·전원(⑨)·음향 체인(⑩)·제어(⑪)는 조 외부에 배치, 측정 신호(음압·온도)는 조 내부에서 수집

그림: 쿨스 전체 장치 사시도(구조 설명도, 축척 비정량) · 부품 번호는 21쪽 부품표와 동일 · 점선 영역이 7쪽 단면도 범위

그림에서 확인할 것

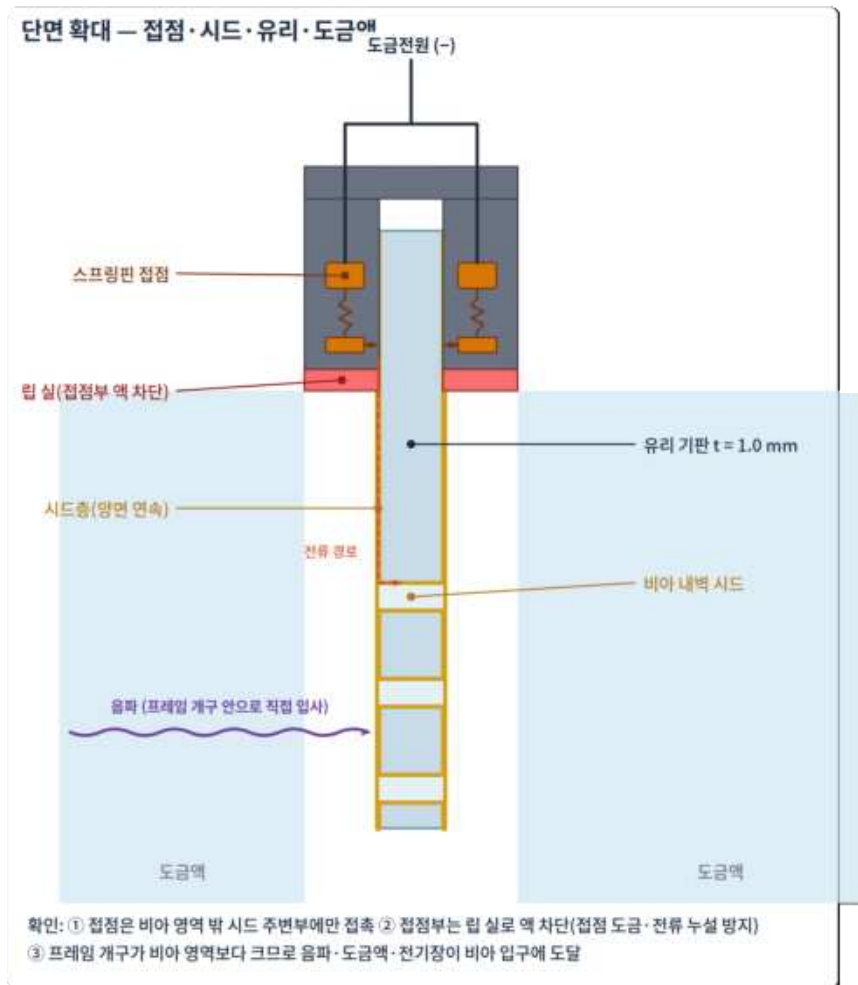
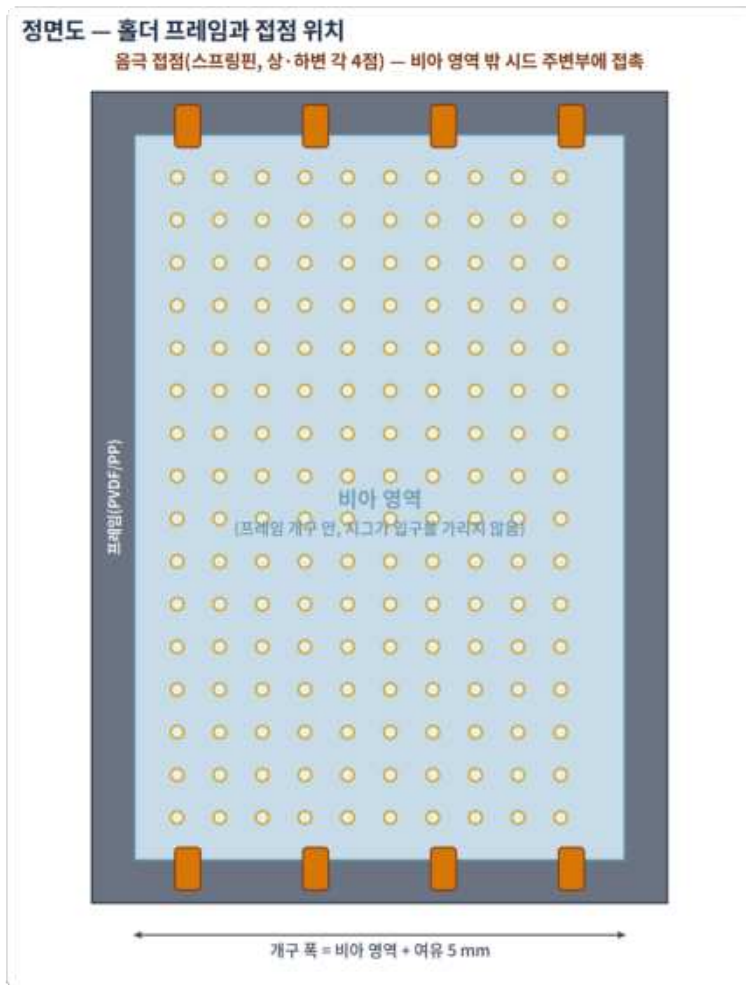
- 1 음파 진행 방향 = 기판 법선 = 비아 축. 입사각 θ 의 기준은 법선(0°)
- 2 $d1(\text{진동자}-\text{기판}) = g + ta + d2$. 대표 60 mm(조절 45~100). 문헌 45 mm는 양극이 진동자 뒤에 있던 배치의 값
- 3 $d2(\text{양극}-\text{기판})$ 대표 25 mm(조절 15~35): 전류 분포 균일성과 음향 통과율의 절충. 양면 동일 거리로 시작
- 4 양면 도금액 접촉이 전제 — 출구측도 공급 경로이며, 양측 가진 확장(19쪽)의 기초



[구조 설명도] 쿨스 단면 배치도 — 문헌 배치값과 쿨스 설계값 병기

대표 치수 세트(쿨스): d2 = d2' = 25 mm, 양극 두께 ta = 6 mm, 진동자-양극 간극 g = 29 mm → d1 = g + ta + d2 = 60 mm · 조절 범위: d2 15~35, g 15~60 → d1 45~100 mm, θ 0~±15°, t 1.0 mm · 문헌 배치값(Jones 2018): 진동자-PCB 45 mm(전류 손실 최소·음압 최대의 절충점), PCB-양극 바스켓 21.6 cm(양극이 진동자 뒤) · 출처: Jones et al., *Ultrasonics Sonochemistry* 42 (2018) 434–444, doi:10.1016/j.ultsonch.2017.12.004

지그는 비아 영역 밖에서만 기판을 잡고, 접점은 시드 주변부에 립 실로 격리해 연결



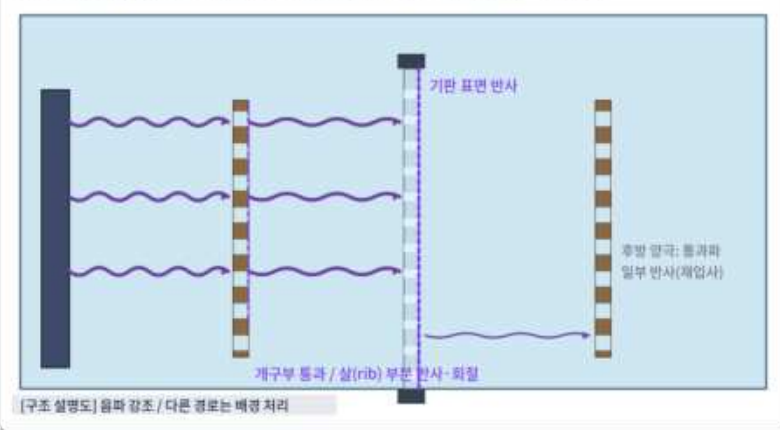
그림에서 확인할 것

- 1 접점은 상·하변 각 4점, 양면 시드에 동시 접촉 → 전면·후면 시드가 같은 전위
- 2 립 실이 접점부 도금액을 차단 — 접점 자체에 구리가 올라오거나 전류가 새는 것을 방지
- 3 프레임 개구가 비아 영역보다 크므로 음파·도금액·전기장이 모두 비아 입구에 도달
- 4 전류 경로: 접점 → 표면 시드 → 비아 내벽 시드 → 성장 구리(등전위 금속 영역, 20쪽)

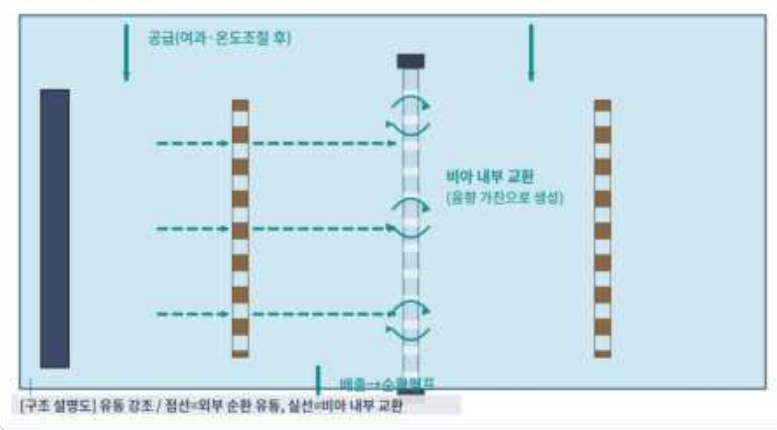
그림: 쿨스 홀더·접점 확대도(구조 설명도) · 프레임 재질 PVDF/PP, 접점 스프링핀(Ti 또는 Cu 도금 SUS), 립 실 FKM · 개구 = 비아 영역 + 여유 5 mm(설계값)

같은 단면에서 음향·유동·전류 경로를 따로 보면, 세 경로가 겹치는 곳은 개구 양극 앞의 비아 입구

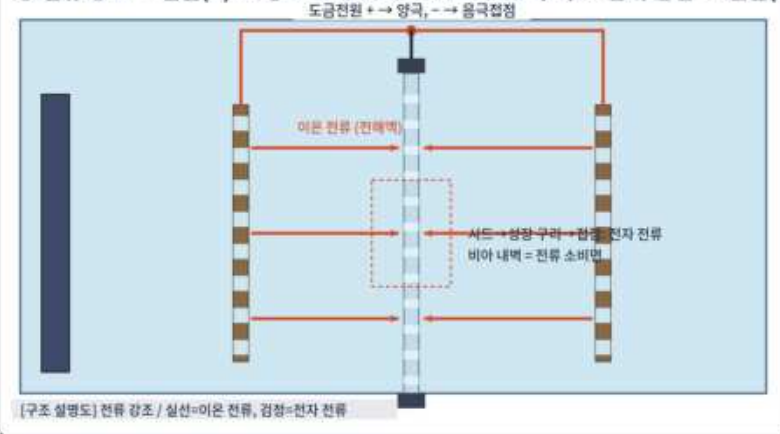
① 음향 전달 경로 — 진동자 → 도금액 → 개구 양극 통과 → 비아



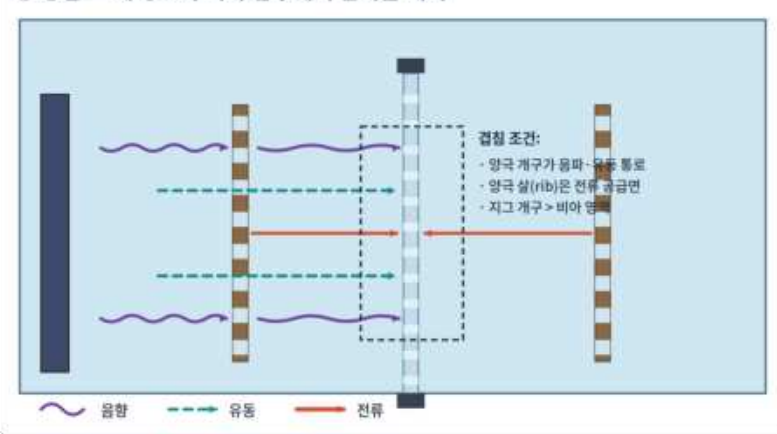
② 유액 순환 경로 — 외부 순환·공급/배출·비아 내부 교환



③ 전류 경로 — 전원(+) → 양극 → 전해액 → 시드·성장 구리 → 음극 접점 → 전원(-)



④ 종합 — 세 경로가 비아 입구에서 겹치는 배치

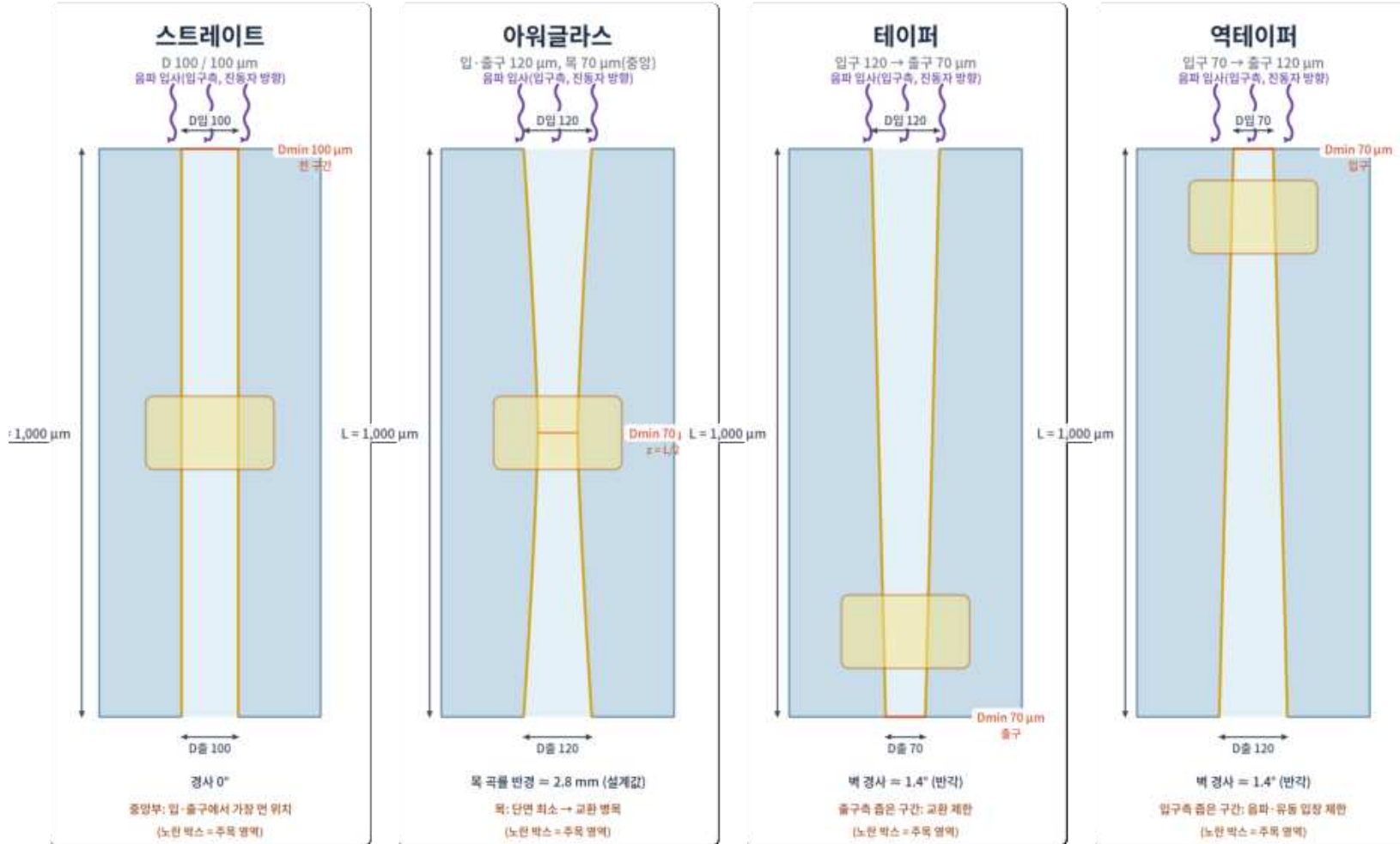


그림에서 확인할 것

- 1 음향: 진동자 → 도금액 → 개구 양극 통과(개구 폭 $\geq \lambda$) → 기판면. 판형 양극이면 여기서 차단(18쪽)
- 2 유동: 외부 순환은 공급·배출·여과를 담당하고, 비아 내부 교환은 음향 가진이 만든다 — 둘은 별개
- 3 전류: 양극 살(rib)이 공급면, 비아 내벽이 소비면. 양극 위치를 바꾸면 전류 분포가 바뀐다(18쪽)
- 4 종합: 개구 양극 + 개구 지그 조건에서 세 경로가 비아 입구에서 겹침 — 이것이 기본 배치의 판정 기준

그림: 동일 단면 4회 사용(구조 설명도) · ① 음향: 물결선, 반사면 점선 ② 유동: 점선=외부 순환, 실선=비아 내부 교환 ③ 전류: 실선=이온 전류, 검정=전자 전류 ④ 종합

네 형상을 같은 축척으로 놓으면 길이는 같아도 최소 직경의 위치가 다르고, 그곳이 용액 교환의 병목



네 형상 동일 축척 (1 px = 1.6 μm) · 유리 두께 1,000 μm · 시드 형성 상태(구리 상장 전) · 형상별 주파수는 별도 지정하지 않음

그림: 쿨스 구조 설명도, 동일 축척(1 px $\approx$ 1.6 μm) · L 1,000 μm 공통 · 테이퍼/역테이퍼 방향 정의: 음파 입사 방향(진동자 대면 = 입구) 기준 · 형상별 주파수는 별도 지정하지 않음

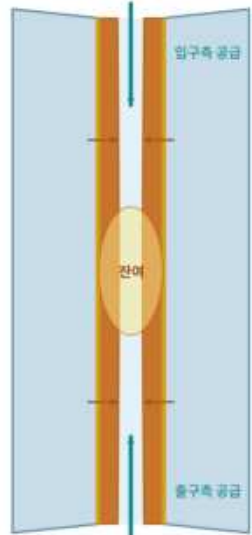
그림에서 확인할 것

- 1 스트레이트: Dmin이 전 구간 → 병목은 '거리'(중앙이 입·출구에서 가장 멀)
- 2 아워글라스: Dmin이 중앙 목 → 목 통과 유량이 병목, 목이 먼저 닫히면 두 블라인드로 분리
- 3 테이퍼: 입사측이 넓음 → 음파·유동 진입 유리, 출구측 협부가 병목
- 4 역테이퍼: 입사측이 좁음 → 입구가 음파 진입과 공급을 동시에 제한 → 반대면 접촉·양측 가진의 필요성

공급이 집중되는 곳과 제한되는 곳이 형상마다 다르고, 성장이 진행되면 제한 구간이 먼저 닫힘

스트레이트 — 중앙부

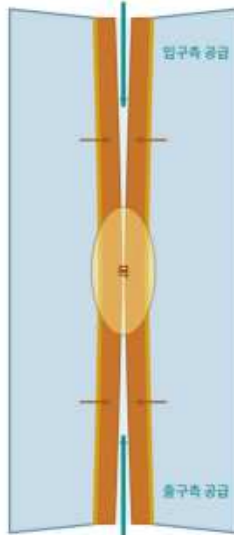
입·출구 양측에서 공급, 중앙은 두 경로의 끝

z = 280 ~ 720 μ m 구간 (배율 1.8배)

- 1 폐쇄 위치 = 잔여 내경 $\times$ 국부 성장속도로 결정
- 2 중앙 공급 부족 시 입구가 먼저 닫힘(조기폐쇄)
- 3 교환 성립 시 내부 성장 확보 $\rightarrow$ 통로 유지

아워글라스 — 목

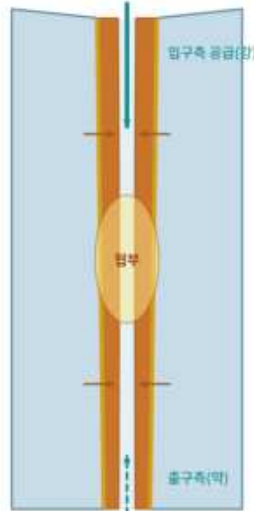
목에서 단면 최소, 목 상·하는 넓은

z = 280 ~ 720 μ m 구간 (배율 1.8배)

- 1 공급 집중: 목 상하의 넓은 공간
- 2 공급 제한: 목 통과 유형
- 3 목 내경이 작아 목에서 의도적 중앙 브리지 형성 가능

테이퍼 — 출구측

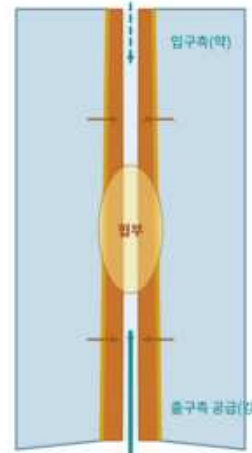
입구 넓고 출구 좁음(입사측이 넓은)

z = 580 ~ 1000 μ m 구간 (배율 1.8배)

- 1 공급 집중: 입구측(음파·유동 입장 용이)
- 2 공급 제한: 출구측 좁은 구간
- 3 잔여 내경이 작은 출구측이 닫히기 쉬움 — 공급 유지 시 지연

역테이퍼 — 입구측

입구 좁고 출구 넓은(입사측이 좁음)

z = 0 ~ 370 μ m 구간 (배율 1.8배)

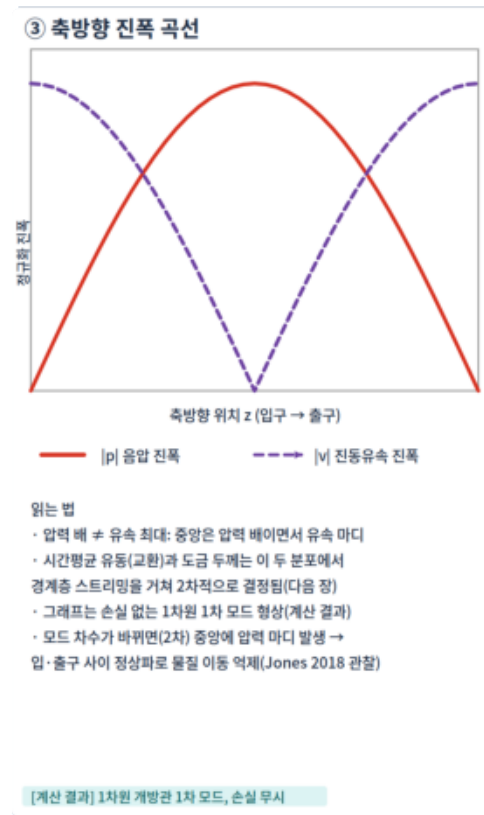
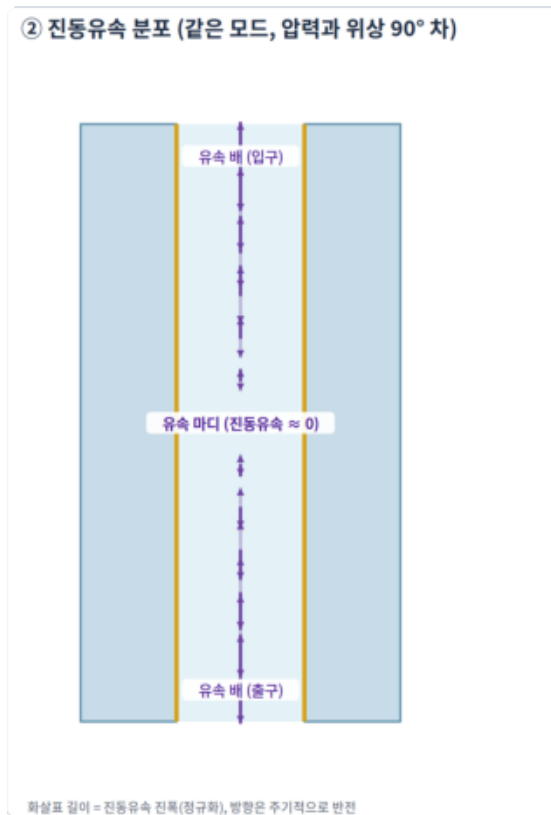
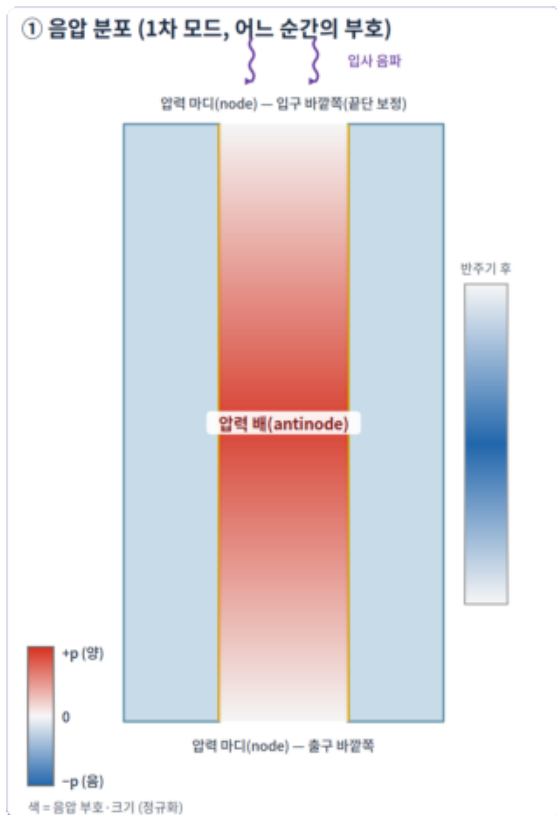
- 1 공급 제한: 입구(음파 입장 단면 작음)
- 2 공급 집중: 출구측 — 반대면 접촉이 필수
- 3 잔여 내경·성장속도 모두 입구가 불리 $\rightarrow$ 조기폐쇄 위험 최대

그림에서 확인할 것

- 1 공급 집중부는 넓은 쪽 입구 근처, 제한부는 최소 단면 구간 — 폐쇄 위치는 잔여 내경과 국부 성장속도가 함께 결정
- 2 스트레이트도 내부 공급이 부족하면 잔여 내경이 넓은 중앙이 아니라 성장속도가 큰 입구가 먼저 닫힘(3·4쪽) — 형상만으로 폐쇄 위치를 단정하지 않음
- 3 입구 조기폐쇄(비의도, 내부 미충진)와 의도적 중앙 브리지(내부 성장 확보 후 중앙을 먼저 잇는 운전)는 구별 — 14쪽
- 4 역테이퍼는 입사측이 좁아 잔여 내경·성장속도 모두 입구가 불리 $\rightarrow$ 후면 접촉·양측 가진이 실질 공급 경로. 어느 면을 입구로 둘지가 형상별 첫 결정

그림: 각 형상의 특징 부위(스트레이트 중앙, 아워글라스 목, 테이퍼 출구측, 역테이퍼 입구측) 1.8배 확대(구조 설명도) · 구리 두께는 개념 형상 · 실선/점선 화살표 = 공급 강/약(정성)

1차 모드에서 중앙은 압력 배이면서 유속 마디 — 음압이 높은 곳을 곧바로 유속·도금 최대로 읽지 않음



그림에서 확인할 것

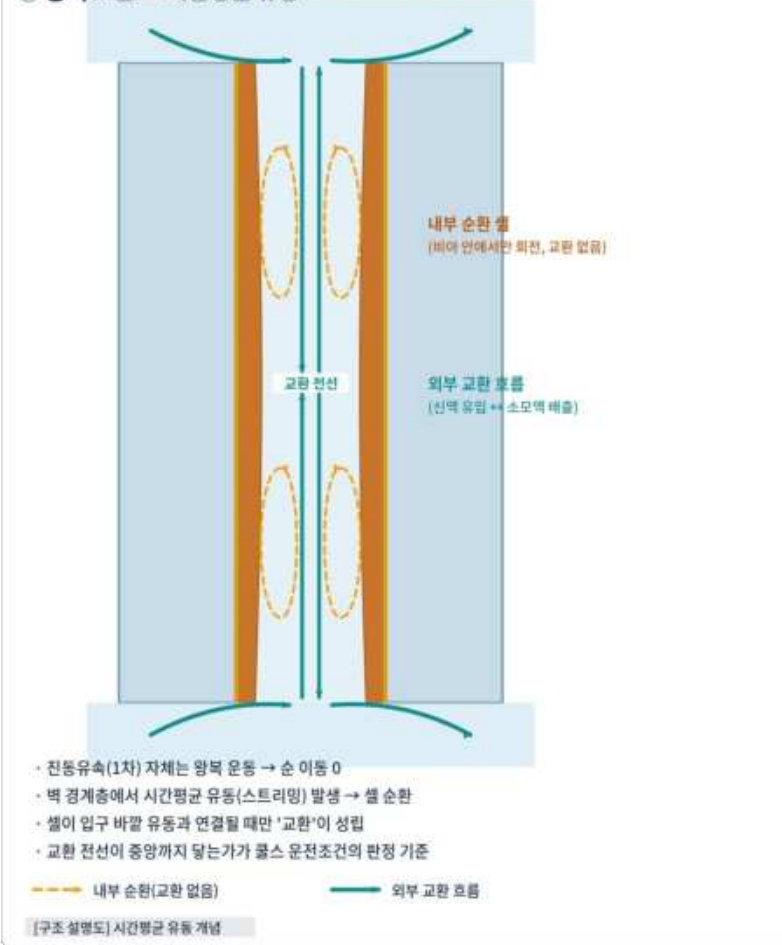
- ① 압력: 중앙에 배, 마디는 입·출구 바깥(끝단 보정). 부호는 반주기마다 반전 — 범례 참조
- ② 진동유속: 압력과 90° 위상차. 입·출구에서 최대, 중앙에서 0 — 왕복 운동이므로 순 이동은 0
- ③ 곡선: $|p|$ 와 $|v|$ 는 서로 어긋난 분포. 시간평균 유동(교란)은 벽 경계층에서 2차적으로 생김(13쪽)
- ④ 2차 모드(중앙에 압력 마디)가 서면 입·출구 사이 정상파로 물질 이동이 억제됨 — 15쪽 문헌 관찰

본 그림은 '압력'과 '진동유속'만 나타냄. 농도·도금두께 분포는 별도 그림(용액 교환·금속 성장)에서 제시

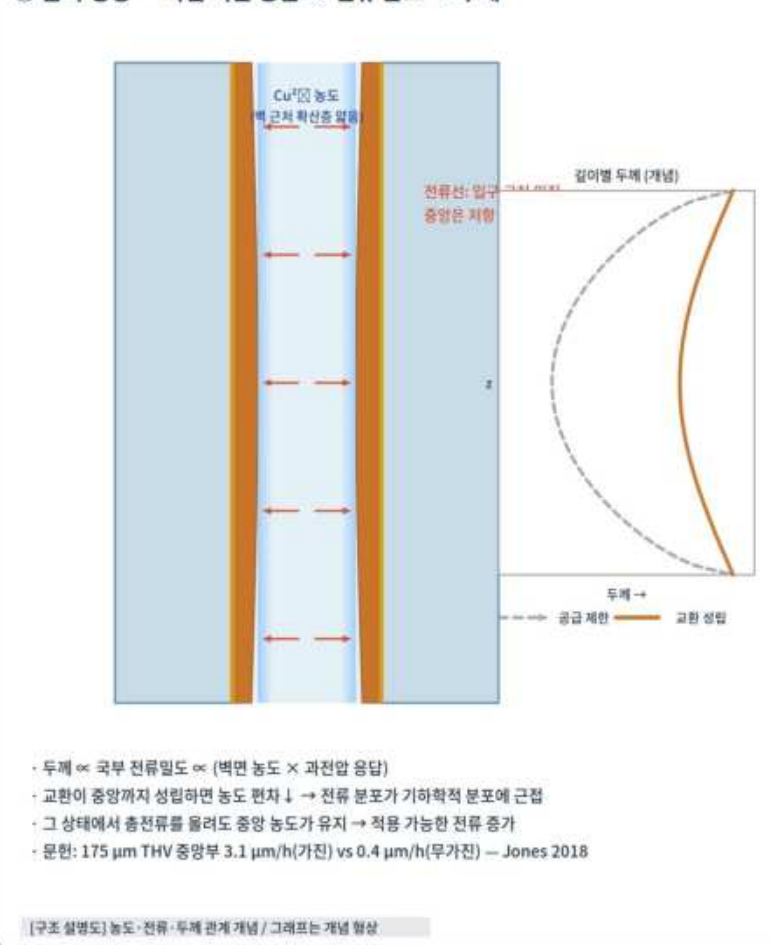
그림: 1차원 개방관 1차 모드의 압력·진동유속 분포(계산 결과, 손실 무시, 끝단 보정으로 마디가 입·출구 바깥) · 색 범례: 빨강 +p, 파랑 -p, 흰색 0 · 농도·도금두께는 다음 쪽

내부 순환만 도는 흐름과 외부 신액을 끌어들이는 흐름은 다르며, 교환이 중앙까지 닿을 때 두께 편차가 줄어듦

② 용액 교환 — 시간평균 유동



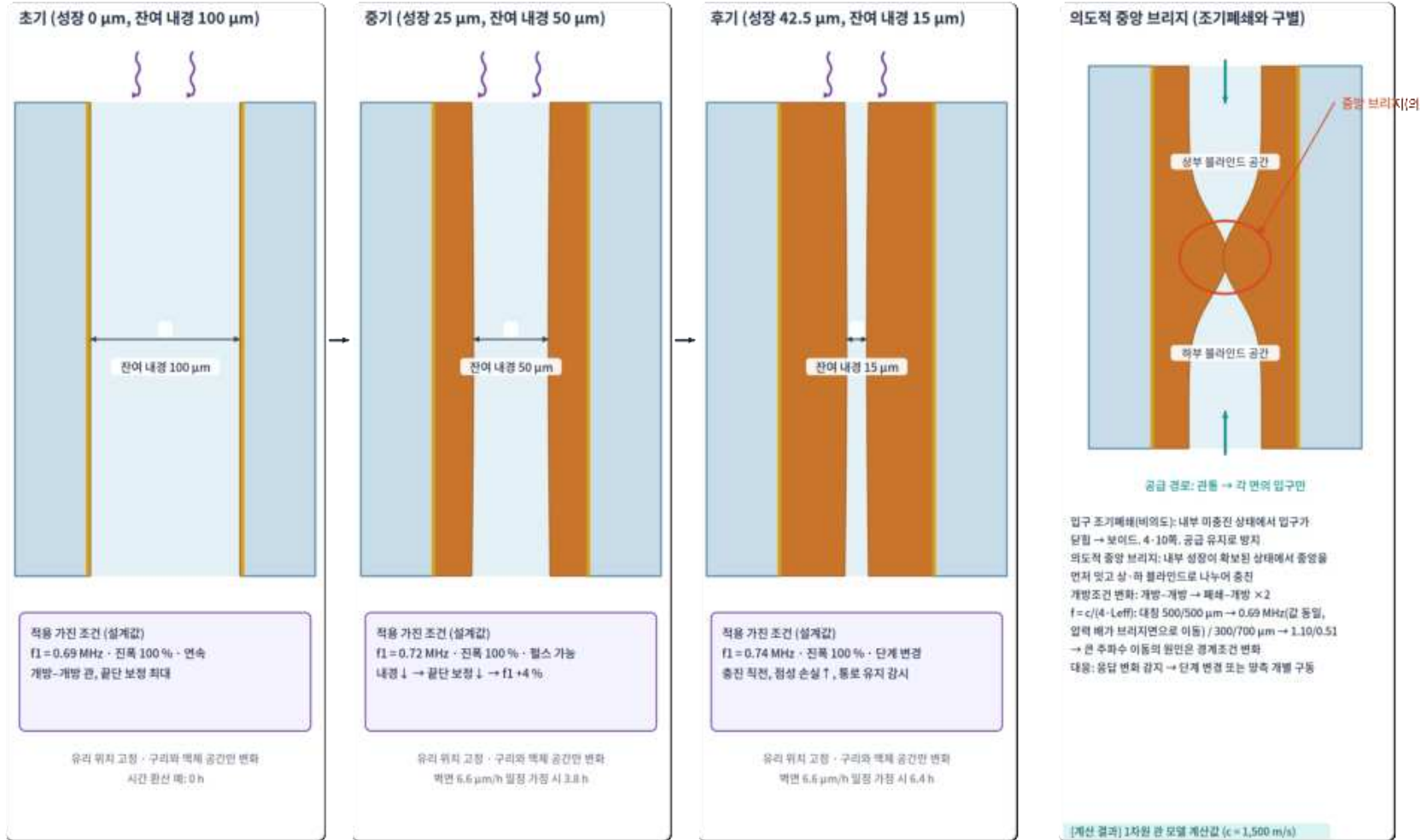
③ 금속 성장 — 벽면 이온 공급 × 전류 분포 → 두께



그림에서 확인할 것

- ② 노란 점선 = 비아 안에서만 도는 순환 셀(교환 없음), 청록 실선 = 외부 신액을 끌어들이는 흐름(교환 있음)
- ② 교환 전선이 중앙까지 닿는가 — 쿨스 운전조건 판정 기준. 도달하지 못하면 중앙은 여전히 확산 지배
- ③ 벽면 농도 $\times$ 전류 분포 → 두께. 교환이 성립하면 농도 편차가 줄어 전류 분포가 기하학적 분포에 근접
- ③ 그 상태에서 총전류를 올려도 중앙 농도가 유지 → '적용 가능한 전류 증가'가 시간 단축의 세 번째 원인(23쪽)

유리는 고정, 구리와 액체 공간만 변함 — 균일한 내경 감소는 주파수를 7 % 이내로만 옮기고, 큰 이동은 경계조건 변화(브리지)에서 생김



성장 단계 개념도 — 성장 두께·잔여 내경·주파수는 같은 성장 상태 기준 · 주파수는 1차원 개방관 계산값(끝단 보정 0.85a) · 진폭·펄스는 설계 조건

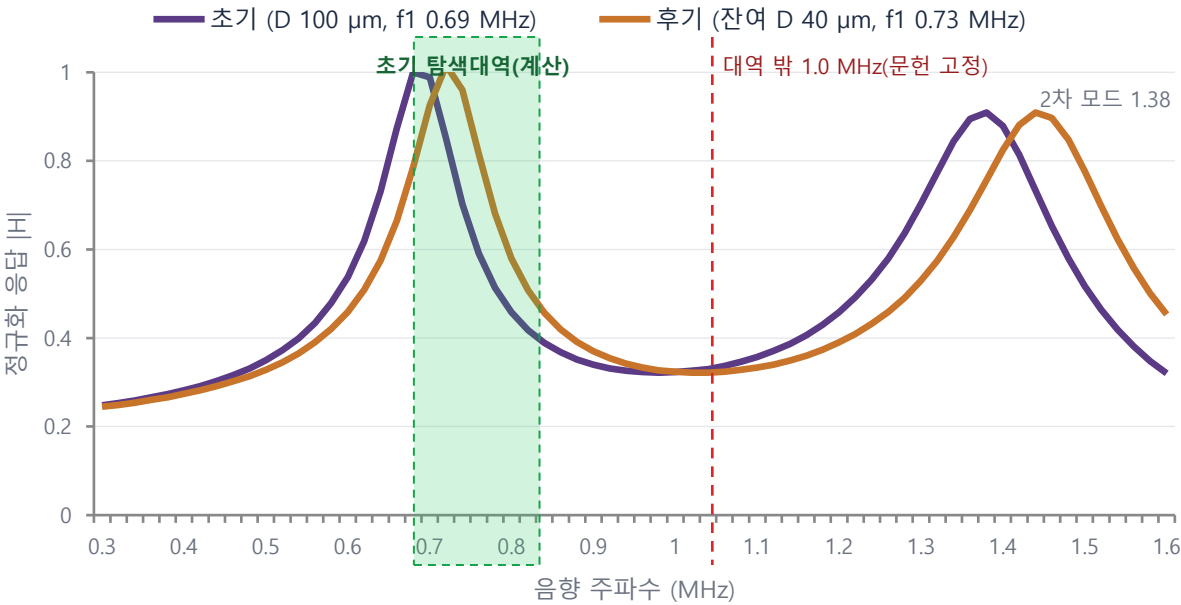
그림: 성장 단계 개념도 — 동일 비아의 초기(잔여 내경 100 μm)·중기(50)·후기(15) 단면, 성장 두께·잔여 내경·주파수는 같은 성장 상태 기준 · 주파수: 1차원 개방관 계산값($c = 1,500 \text{ m/s}$, 끝단 보정 0.85a) · 시간 환산은 벽면 6.6 $\mu\text{m/h}$ 일정 가정 · 우측: 의도적 중앙 브리지(조기폐쇄와 구별)

그림에서 확인할 것

- 초기→후기 적용 조건: 잔여 내경 100 → 50 → 15 μm 에서 f_1 0.69 → 0.72 → 0.74 MHz(계산값), 진폭 100 %, 후기에 펄스 전환(설계)
- 내경 100→15 μm 균일 감소 시 끝단 보정만 줄어 f_1 이 약 +7 % — 크게 옮기지 않음
- 입구 조기폐쇄(비의도, 4쪽)는 방지 대상, 우측 중앙 브리지는 내부 성장 확보 후 의도적으로 만드는 운전 — 개방-개방 → 폐쇄-개방×2: 대칭이면 값 동일·분포 이동, 비대칭이면 1.10/0.51 MHz
- 운전 방식: 고정(대역 중심) / 단계 변경(응답·누적전하 기준 전환) — 16쪽

기준 형상(D 100 μm·L 1,000 μm) 축방향 1차 응답 0.69 MHz 부근 ±10 %는 초기 탐색대역이며, 운전 대역은 내부 성장·입구 개방 평가로 선정

[계산 결과] 기준 형상 응답곡선(Q = 8 가정 단순 모델) — 초기 탐색대역 0.62~0.78 MHz 설정용



선정 기준	값	비고
탐색대역 중심	f1(초기) 0.69 MHz	끝단 보정 후 계산값(단순 모델)
탐색대역 폭	0.62~0.78 MHz (±10 %)	f1 이동(0.69→0.74) 포함, 모듈 A 대역과 일치
운전대역 선정	음압 응답 측정 → 단면 평가(내부 성장·입구 개방)	22쪽 운전 순서
대역 밖 비교	1.0 MHz 응답 ≈ 0.3 (모델상 골)	2차 모드 1.38: 문헌 0.5×1.6 mm에서 억제 관찰

[문헌 결과] 같은 1 MHz에서 비아 조건에 따라 촉진과 억제가 갈림 (Jones 2018)

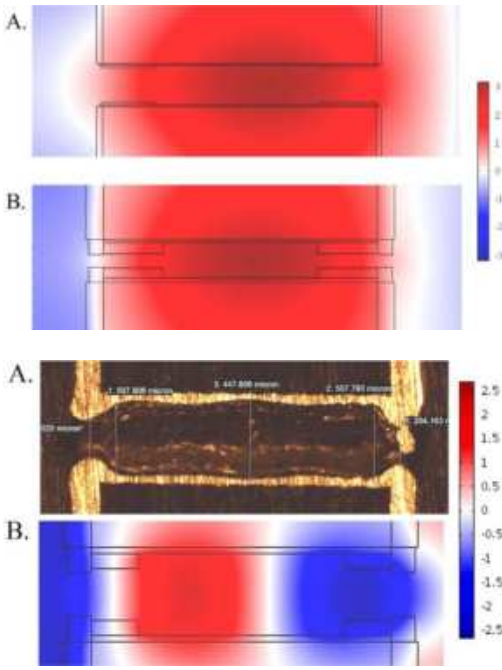
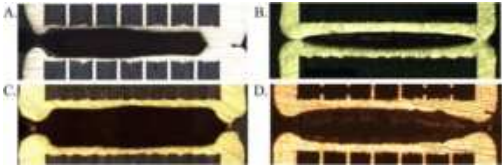


Fig. 7 — 0.15 mm·ar 5.7: 배 1개(1차 모드) → 촉진. Cu 성장(B)하면 마디가 입구로 끌려옴

Fig. 6 — 0.5 mm·1.6 mm: 배 2개(2차 모드) → 입·출구 사이 정상파, 물질 이동 억제 → 얇은 구리·굴곡

Fig. 2 — 0.325/0.475 mm THV: 가진(A,C)이 기존 교반(B,D)보다 얇고 λ/2(≈0.65 mm) 주기 굴곡



→ 쿨스: 계산 탐색대역 → 음압 응답 측정 → 내부 성장·입구 개방 단면 평가 → 운전대역 선정 (곡선만으로 확정하지 않음)

범례(Fig. 6-7 색): 빨강 압력 최대, 파랑 최소, 흰색 마디(정규화 음압)
문헌 Fig. 6의 억제는 0.5 mm×1.6 mm THV의 1 MHz 조건에서 관찰된 결과이며 2차 모드 일반의 성질로 단정하지 않음 · 쿨스 1차원 모델(Q 가정)은 탐색대역 설정용이고, 운전대역은 내부 공급·성장 균일도 기준으로 선정(22쪽)

계산: 1차원 개방관, c 1,500 m/s, Leff = L + 2×0.85a, |H| 로렌츠 응답 Q = 8(설계 가정), 1·2차 모드 합성, 정규화 · 끝단 보정 전 0.75 MHz · 문헌 그림: 출처: Jones et al., Ultrasonics Sonochemistry 42 (2018) 434–444, doi:10.1016/j.ultsonch.2017.12.004 (Fig. 2 PDF 6쪽, Fig. 6-7 PDF 8쪽) · 곡선의 Q는 설계 가정이므로 곡선만으로 유리 대역을 확정하지 않음

고정·펄스·스윙·단계 변경 — 네 방식 모두 대역 안에서 동작하며, 단계 변경은 응답·누적전하로 전환점을 판정

① 고정 운전

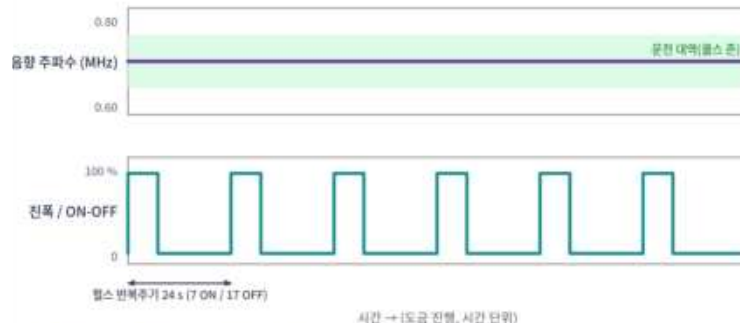
미리 정한 대역 중심 주파수로 연속 가진



조건: f 고정 · 진폭 고정 · 연속

② 펄스 운전

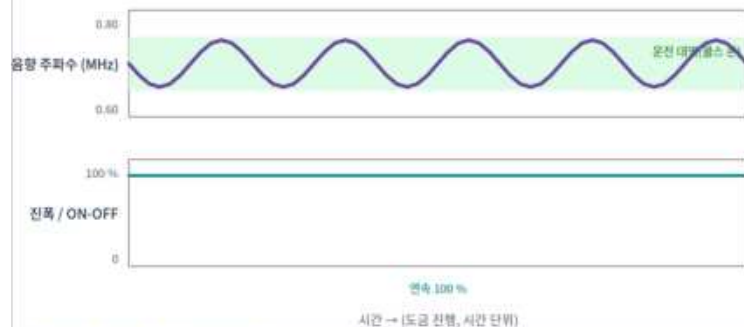
가진 ON/OFF 반복 (반복주기 = 초 단위)



조건: f 고정 · ON 7 s / OFF 17 s (문헌 조건) 등

③ 스윙 운전

대역 안에서 주파수를 연속 왕복



조건: f 대역 내 왕복 · 정상파 마디 이동

④ 단계 변경 운전

도급 진행(응답·전하량) 기준으로 조건 전환



조건: f · 진폭 · 펄스를 단계별 전환

그림에서 확인할 것

- ① 고정: 선정된 운전대역 중심(탐색 기준 0.70 MHz) 연속 — 가장 단순, 초기 설치 안의 기본
- ② 펄스: 주파수는 고정하고 진폭만 ON/OFF — 기포 재순환·표면 발열 억제(문헌 7/17 s는 중앙부 속도 2.1 $\mu\text{m/h}$)
- ③ 스윙: 대역 안 왕복 — 정상파 마디 고정점 해소(Tang & Clement 위상·주파수 변조 원리)
- ④ 단계 변경: 응답 피크 추적 + 누적전하 Q로 f·진폭·펄스를 전환 — 브리지 이후 양측 비대칭 구동과 결합

그림: 쿨스 운전 방식 시간선도(설계조건) · 위 트랙 = 음향 주파수(MHz), 아래 트랙 = 진폭/ON-OFF · 펄스 반복주기(초)와 음향 주파수(MHz)는 별개 축 · 펄스 7 s/17 s는 문헌 조건(Jones 2018 §3)

특허의 세 구조(순차 구동 어레이·전극 통과 전달·임계각 경사 전극)를 쿨스 진동자·개구 양극(살 두께 $\lambda_e/2$, Cu 기준)·각도 조절부로 대응

[문헌 구조] US20070197138A1 Fig. 31 / Fig. 48-49 (원문)

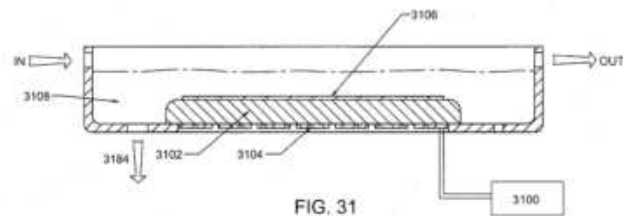


FIG. 31

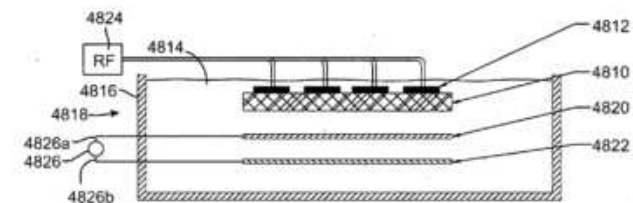


FIG. 48

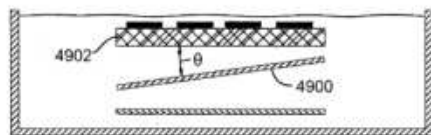
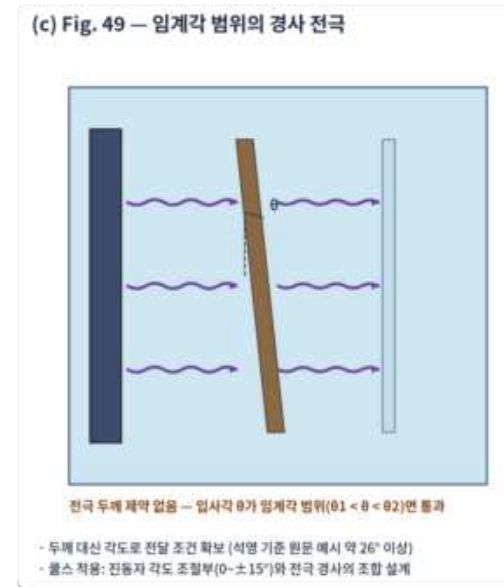
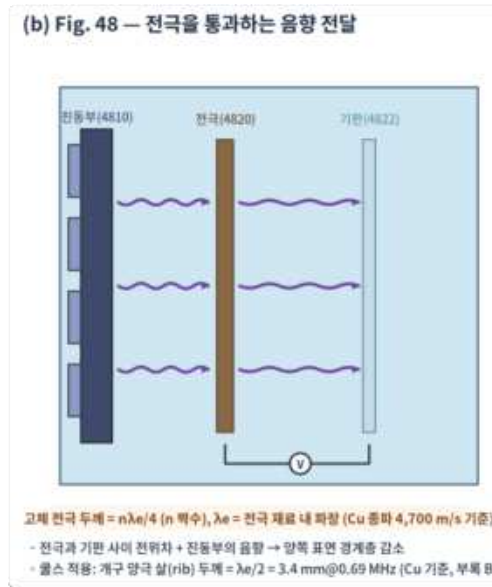
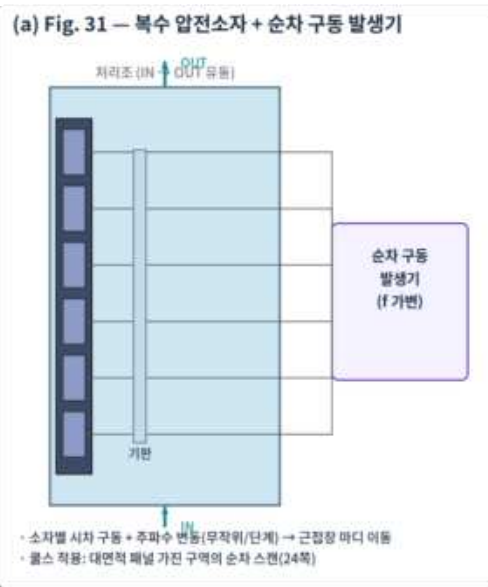


FIG. 49



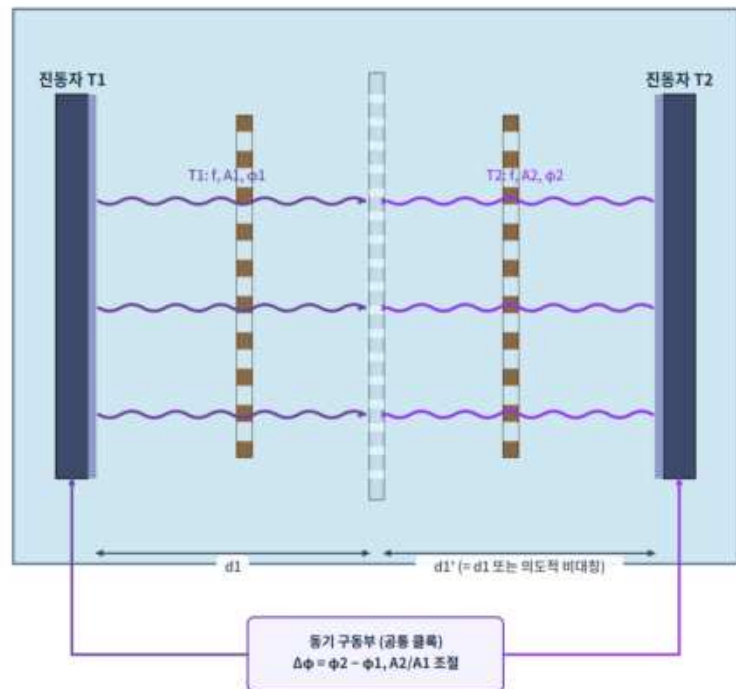
원문 구조 ↔ 쿨스 부품 대응 (원문에서 가져온 구조는 회색, 쿨스 신규 배치는 주황)

원문 구조 (US20070197138A1)	쿨스 대응 부품	구분	쿨스 적용 비교
진동부 4810 + 압전소자 4812 + RF 4824	진동자·방사면 + 신호발생·증폭·정합부	원문 구조	1 MHz급 서브머시블 모듈, 위치·각도 조절부 추가
전극 4820 (고체, $n\lambda_e/4$ 두께, 전극 재료 파장)	개구 양극 (살 두께 $\lambda_e/2$ Cu 기준, 개구 폭은 액체 파장 λ 기준으로 $\geq \lambda/5$ 권장) (부록 B 참조)	쿨스 배치	Fig. 52-53 개구 전극과 결합, 양면 배치
기판 4822 + 전압원 4826	비아글라스 + 홀더·음극 접점 + 도금전원	원문 구조	양면 접촉·양면 양극, 시드 주변부 접점
경사 전극 4900 (임계각)	진동자 각도 조절부 0~±15°	쿨스 배치	전극 경사 대신 진동자 경사로 동일 효과
순차 구동 발생기 3100	가진 구역 순차 스캔 제어기	원문 구조	대면적 패널·복수 비아군 순차 운전

출처: US 2007/0197138 A1 (Montier et al.), Method and apparatus to process substrates with megasonic energy · Fig. 31(PDF 40쪽), Fig. 48-49(PDF 47쪽) · 원문 [0532]~[0539]: 고체 전극 두께 $n\lambda_e/4$ (n 짝수, λ_e = 전극 재료 내 파장), 경사 전극(임계각 범위)은 두께 제약 없음, 전극-진동부 결합은 홀수 배[0541] · 회색 = 원문 구조, 주황 = 쿨스 신규 배치

양측 가진은 위상차로 압력 배를 축방향으로 옮기고, 복수 비아군은 구역별 대역을 순차 또는 동시에 운전

양측 가진 — 두 진동자의 위치·동기화·위상·진폭 조절



- 두 진동자는 공동 클럭으로 동기 — 위상차 $\Delta\phi$ 로 비아 내부 압력 배의 위치를 축방향으로 이동
- $\Delta\phi = 0$: 중앙 대칭 응답 / $\Delta\phi$ 가변: 배 위치 스캔(정상파 고정점 해소, Tang & Clement 위상 변조 원리)
- $A2/A1$ 비대칭: 한쪽 면 입구를 우선 공급(테이퍼·역테이퍼·브리지 후 상·하 공간 개별 구동)
- 전체 장치도 대비 추가 부품: 진동자 T2 + 조절부, 동기 구동부, 후면 순환 노즐

복수 비아군 — 같은 기판의 다른 크기·형상 순차/복수 대역 운전

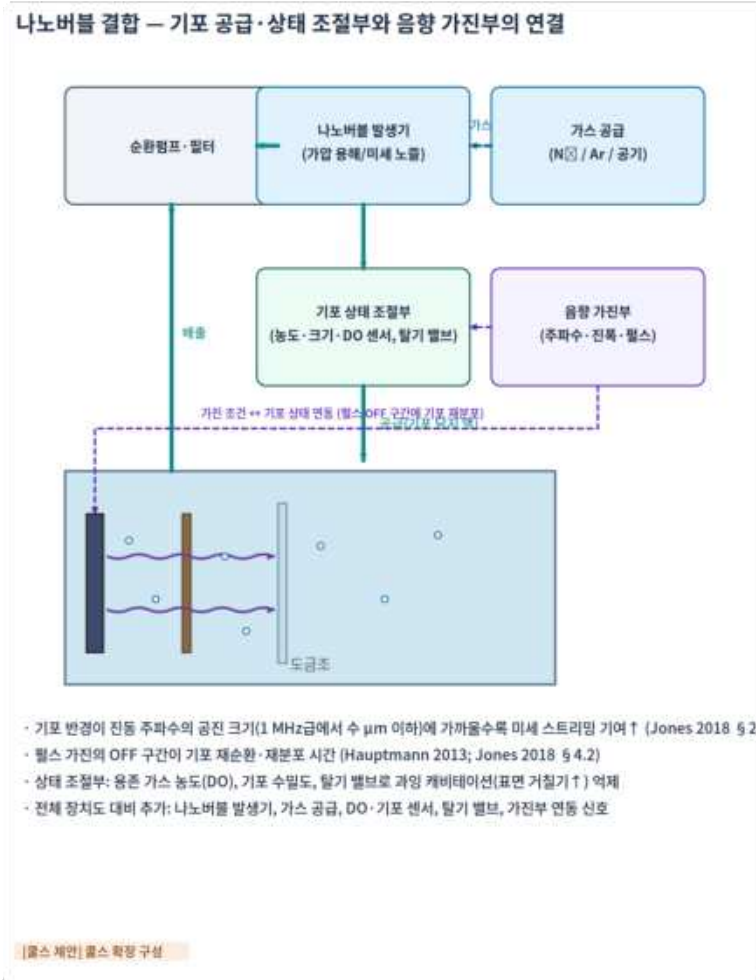
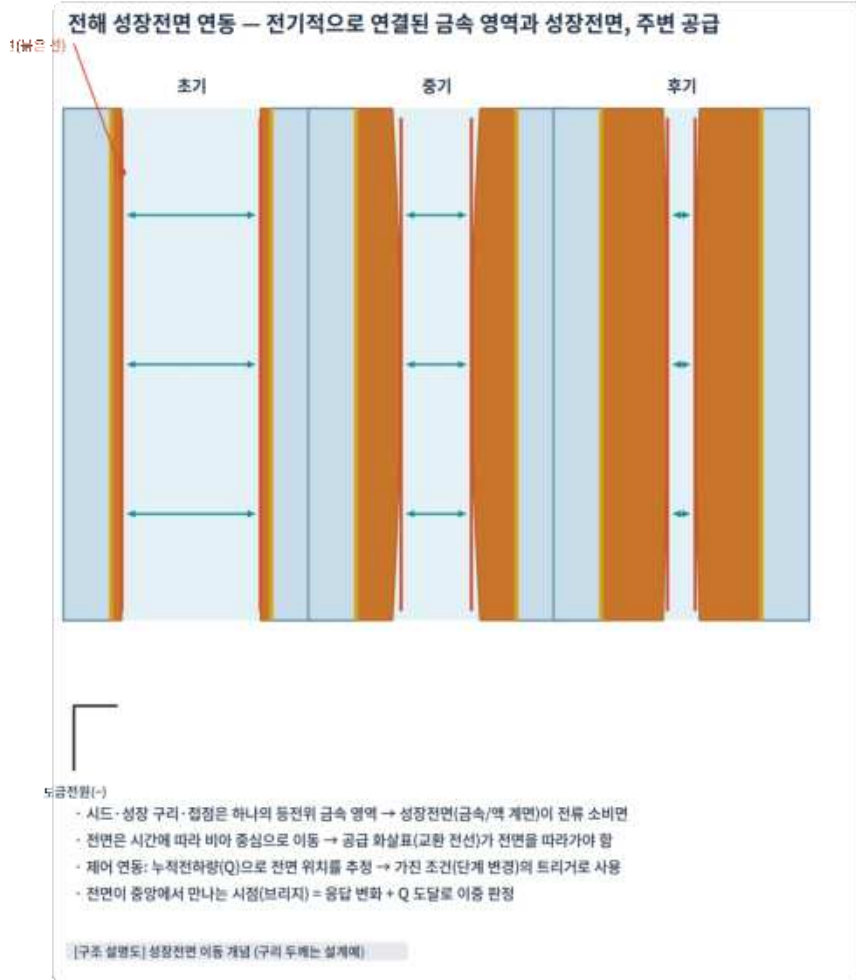


- 각 구역의 대역은 기준 형상 계산법(부록 B)을 형상별로 적용해 산출
- 순차 대역: 신호발생기 1대 + 광대역 진동자 / 복수 대역: 모듈 교체형 진동자 다수
- 판정 신호: 구역별 음압 응답(하이드로폰) + 단면 평가 — 진동자 임피던스 피크는 진동자 공진(상태 감시용)
- 전체 장치도 대비 추가: 다중 채널 신호발생·정합부, 모듈형 진동자 마운트

그림에서 확인할 것

- 1 양측 가진 추가 부품: 진동자 T2 + 조절부, 2채널 위상 동기 발생기, 후면 순환 노즐(6 쪽 장치도 대비)
- 2 $\Delta\phi$ 로 배 위치 스캔, $A2/A1$ 로 면별 공급 비대칭 — 역테이퍼·브리지 후 상·하 공간 개별 구동에 사용
- 3 복수 비아군: ① 순차 대역(발생기 1대·광대역 진동자) ② 복수 대역 동시 ③ 구역별 모듈 — 21쪽 대역폭 구분 참조
- 4 판정 신호: 구역별 음압 응답(하이드로폰)과 단면 평가. 진동자 임피던스 피크는 진동자 자체 공진이므로 비아 응답 판정에 쓰지 않고 상태 감시에 사용

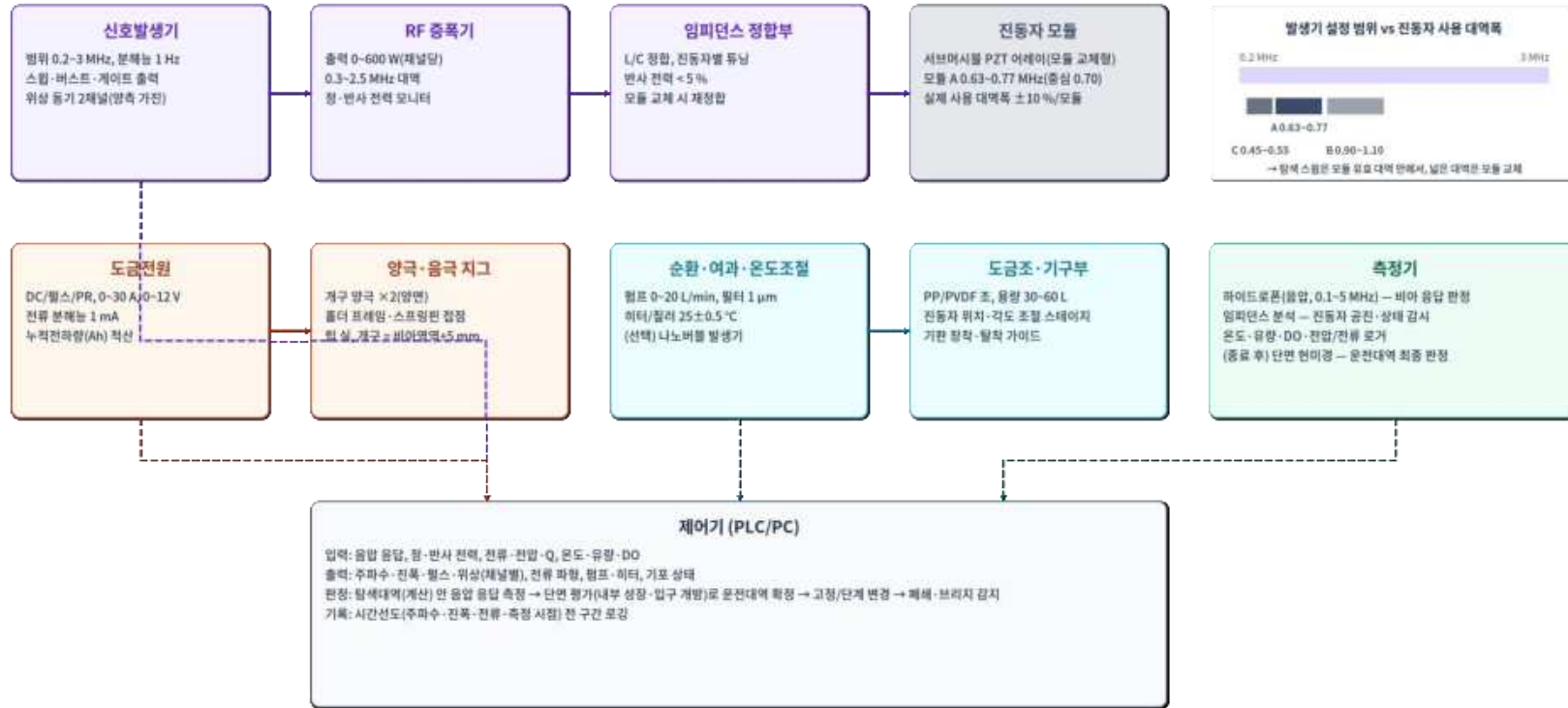
성장전면은 누적전하로 추적해 가진 조건 전환의 트리거로 쓰고, 나노버블부는 기포 상태를 가진 펄스와 연동



그림에서 확인할 것

- 1 성장전면(붉은 선) = 금속/액 계면 = 전류 소비면. 시드·구리·접점은 등전위이므로 전면 위치만 이동
- 2 누적전하 Q → 전면 위치 추정 → 단계 변경 운전의 전환점, 브리지는 Q 도달 + 응답 급변으로 이중 판정
- 3 나노버블 추가 부품: 발생기, 가스 공급, DO·기포 센서, 탈기 밸브, 가진부 연동 신호(6쪽 장치도 대비)
- 4 과잉 캐비테이션은 표면 거칠기·첨가제 간섭을 키움(문헌 40→450 W에서 Ra 400→760 nm) → 탈기 밸브로 상한 관리

신호발생기의 설정 범위(0.2~3 MHz)와 진동자의 실제 사용 대역폭(± 10 %/모듈)은 다르므로, 탐색은 장착 모듈 대역 안에서 하고 넓은 대역은 교체형·복수 모듈로 구현



구분: 음향 체인(보라) · 전기 체인(주황) · 유체 체인(청록) · 측정(녹색) · 제어(점선)
주파수 표기: 음향 주파수는 MHz, 펄스 반복주기는 초(s) 단위 → 두 속은 별도 파라미터

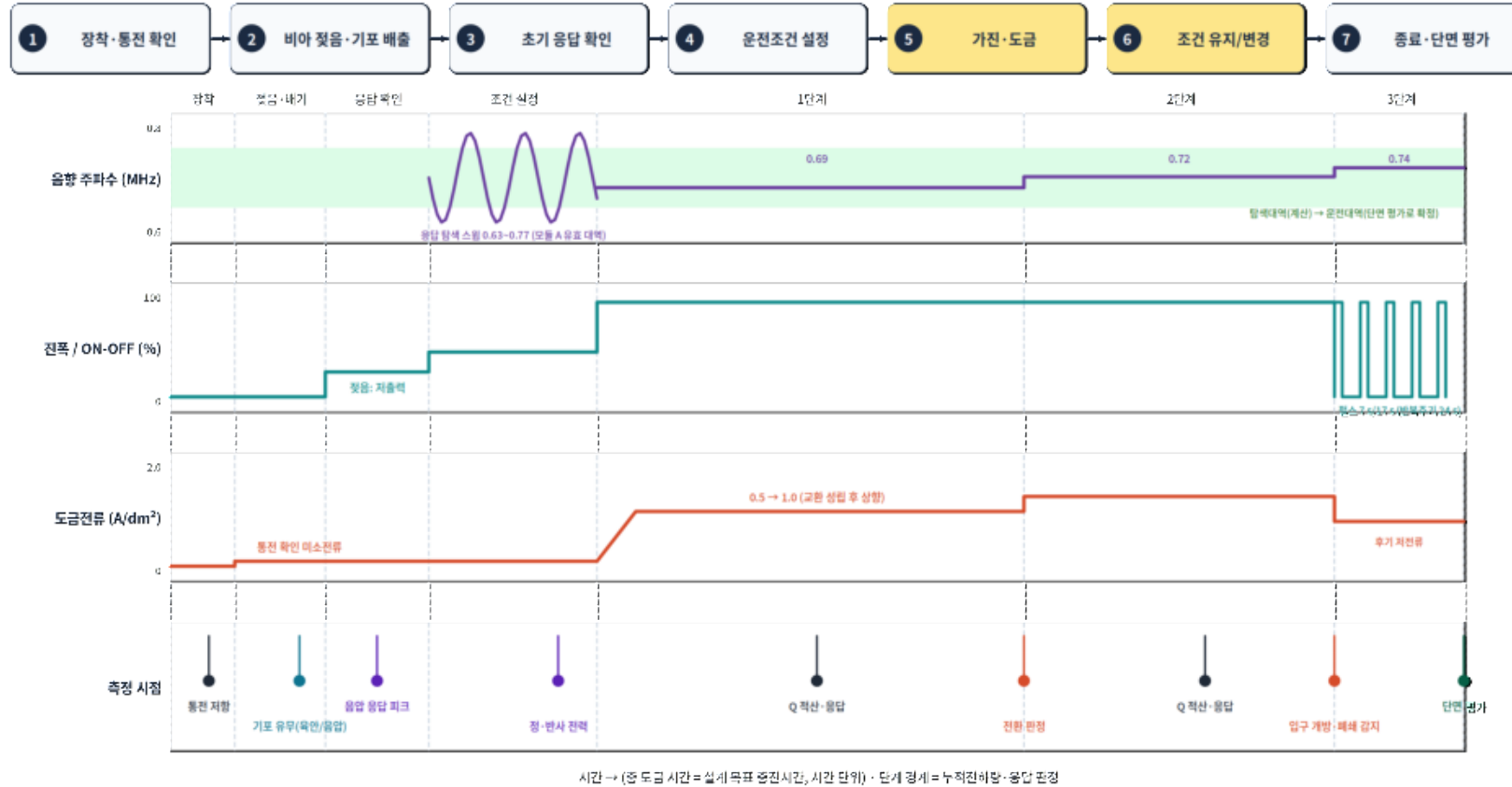
[설계조건] 불소 초기 설치 기준 사양 (설계조건)

그림에서 확인할 것

- 음향 체인: 발생기 → 증폭기(정·반사 전력 모니터) → 정합부 → 진동자 모듈. 모듈 교체 시 재정합
- 대역폭 구분: 발생기는 0.2~3 MHz 설정 가능하지만 진동자 1개는 중심 ± 10 %만 유효 → 모듈 A 0.63~0.77 / B 0.90~1.10 / C 0.45~0.55, 탐색 스위치는 장착 모듈 대역 안에서만
- 전기 체인: DC/펄스/PR 전원 + 누적전하 적산. 유체 체인: 순환·여과·온도 + (선택) 나노버블
- 제어기 판정 순서: 탐색대역 안 음압 응답 측정 → 단면 평가로 운전대역 확정 → 고정/단계 변경 → 입구 개방·폐쇄 감지 → 종료

그림: 쿨스 부품·제어 블록도(설계조건) · 사양은 초기 설치 기준 · 상세 부품표는 부록 C · 음향 주파수(MHz)와 펄스 반복주기(s)는 별도 파라미터

장착·통전 → 젖음·기포 배출 → 초기 응답 확인 → 조건 설정 → 가진·도금 → 유지/변경 → 종료·단면 평가



단위 구분: 음향 주파수 MHz(위 트랙) ↔ 펄스 반복주기 s(전폭 트랙) ↔ 도금전류 A/dm²(기판 투영면적 기준) · 주파수 값은 기준 형상 계산값, 전류·시간은 설계조건
3단계 후가: 입구 개방 상태를 유지하며 충전, 의도적 브리지 운전 시에는 양측 비대칭(A₂/A₁) 또는 주파수 재설정으로 상·하 공간 개별 구동

[설계조건] 운전 시간선도 (설계조건)

그림에서 확인할 것

- 1 젖음·기포 배출 단계는 저출력 가진 — 비아 내부 기포가 남으면 음향 응답·전류 경로 모두 왜곡
- 2 초기 응답 확인 = 모듈 A 유효 대역 0.63~0.77 MHz 스위프로 하이드로폰 음압 피크 측정 → 계산값(0.69)과 대조. 운전 대역 확정은 단면 평가(내부 성장·입구 개방) 결과로
- 3 가진·도금 3단계: 교환 성립 확인 후 전류 상향(0.5→1.0 A/dm², 기판 투영면적 기준), 후기에는 펄스·저전류로 입구 개방 상태 유지
- 4 종료 후 단면 평가 항목은 23쪽과 동일 — 입구 폐쇄 여부·폐쇄 시점의 내부 충진율 포함

그림: 쿨스 운전 시간선도(설계조건) · 주파수 값은 기준 형상 계산값, 전류·시간은 설계조건 · 단위 구분: 음향 주파수 MHz / 펄스 반복주기 s / 전류 A/dm² · 측정 시점은 제어기 로깅 항목

다섯 조건을 같은 항목으로 평가하되 입구 폐쇄 여부·폐쇄 시점의 내부 충진율을 핵심 지표로 두고, 시간 단축은 세 원인으로 귀속

비교 조건	가진	교반	예상 위치(개념)	근거 구분
① 무가진	없음	없음	내부 결핍 최대 → 입구 조기폐쇄	문헌: 0.4 μm/h(중앙)
② 기존 교반	없음	패널 이동·버블·순환	표면 개선, 내부 개선 소폭	문헌: BV 바닥 21.3 vs 9.2 μm
③ 대역 밖 가진	1.0 MHz 고정 등	순환	형상에 따라 촉진/억제 갈림	문헌: Fig. 2 vs Fig. 3
④ 대역 안 고정	운전대역 중심 연속	순환	내부 성장 확보, 입구 개방 유지	설계: 운전대역 선정 후
⑤ 성장 연동	단계 변경 + 펄스/양측	순환	충진 직전까지 통로 유지	설계: 응답·Q 전환

평가항목 (전 조건 공통)

항목	측정 방법	단위	판정 방향
입구 폐쇄 여부·시점	단면(시간별 시료) 또는 전류·전압 응답 변화로 입구 폐쇄 시점 판정	유/무, h	폐쇄 없음 또는 충진 완료 직전
폐쇄 시점의 내부 충진율	입구 폐쇄 시점 단면의 내부 구리 면적비	%	높을수록(100 % = 보이드 없음)
중앙부·입구 도금두께	단면 현미경, 깊이 3점(입구·중앙·출구)×원주 4점	μm	중앙 ↑, 입구/중앙 비 → 1
깊이별 균일도	(최대-최소)/평균, 깊이 5구간	%	낮을수록
충진율 · 보이드	단면 면적비, 보이드 수·최대 치수	%, 개, μm	충진율 ↑, 보이드 0
표면 과도금	기판면 두께 / 비아 벽 두께	비	1에 가까울수록
목표 충진 도달시간 · 누적전하량	동일 목표(충진 95 %) 도달까지 시간, Ah 적산	h, C	짧을수록 / 낮을수록

시간 단축의 세 원인 (④⑤ vs ①②)

1. 내부 공급 개선
교환 전선이 내부까지 도달 → 벽면 농도 유지. 문헌: 중앙부 0.4→3.1 μm/h(약 7.75배)

2. 석출 분포 변화 → 조기폐쇄 방지
입구 집중 → 벽 전체로 분산. 입구·내부 성장 균형으로 통로 유지 → 같은 전하량으로 보이드 없이 더 깊은 충진

3. 적용 가능한 전류 증가
확산층 두께 ↓ → 한계전류밀도 ↑(문헌: 초음파 조건 확산층 600→0.7 μm, Marken 1996). 기판 기준 전류밀도를 올려도 내부 농도가 유지되는 범위가 넓어짐

충진시간 환산값 — 벽면 성장속도 일정 가정, 반경 50 μm ÷ 벽면 속도 (부록 B)

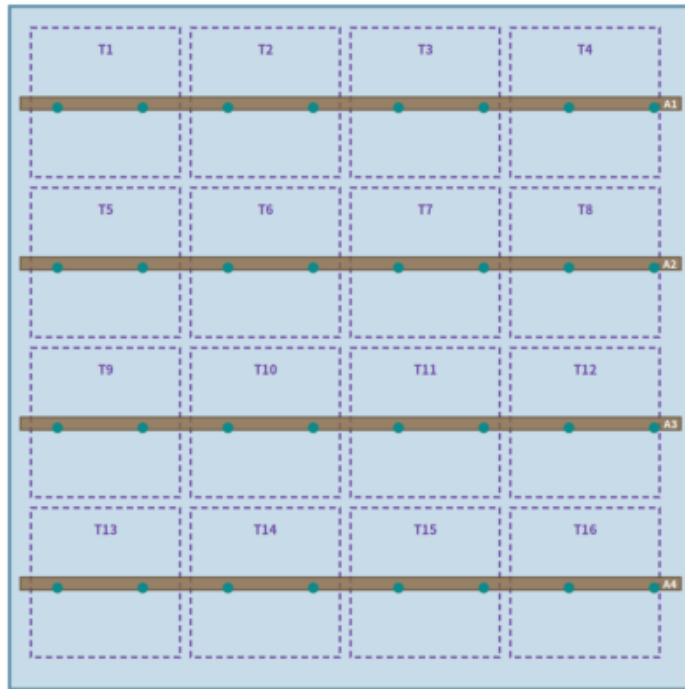
벽면 성장속도(가정)	환산 시간	속도의 출처
3.1 μm/h	16.1 h	문헌 중앙부 실측(175 μm THV)
6.6 μm/h	7.6 h	기판 기준 0.5 A/dm²를 벽면에 그대로 적용
13.2 μm/h	3.8 h	기판 기준 1.0 A/dm²를 벽면에 그대로 적용

실제 벽면 속도는 내부 전류 분배율과 성장에 따른 벽면적 감소로 달라짐 → 환산값은 비교 기준일 뿐 예측치가 아님

문헌 실험값 = 문헌 결과 / 쿨스 설계값 = 설계조건 / 계산값 = 계산 결과로 구분 · 문헌 근거: Jones 2018 Fig. 5(THV 중앙부), Table 4(BV 바닥 9.2/21.3/35.2 μm) · 충진시간은 벽면 성장속도 일정 가정의 환산값(부록 B) · 전류밀도는 기판 투영면적 기준이며 비아 벽면 국부 전류밀도와 다름

패널은 가진 타일·분할 전극·매니폴드 공급의 세 구역으로 나누고, 인접 타일은 순차 구동으로 간섭을 피함

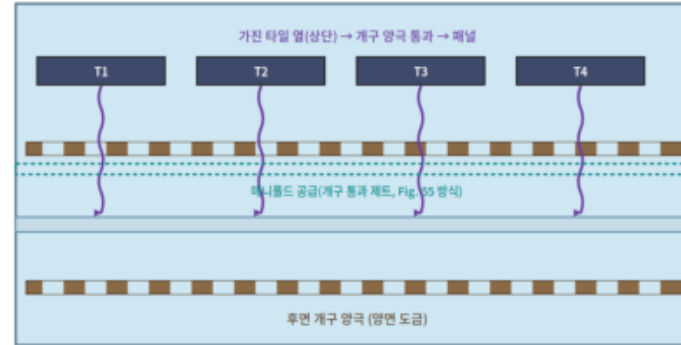
패널 정면 — 가진 구역·전극 구역·용액 공급 구역의 배치 (510 × 515 mm 급)



가진 구역 T1~T16 (모듈형 진동자 타일)
분할 전극 구역 A1~A4 (개구 살 = 전류 공급면)
용액 공급 노즐(전극 개구 통과 제트, 매니폴드)

구역 크기: 가진 타일 120 mm, 전극 구간 폭 120 mm, 노즐 피치 60 mm (설계값)

수평 단면과 순차 구동



순차 구동 (Fig. 31 방식) — 인접 타일 간섭 회피



시간 → (타일 ON 순서 T1→T2→T3→T4 반복, 위상 회전 옵션)

- 전체 장치도 대비 변경: 진동자 1대 → 타일 16대 + 다채널 정합·구동, 양극 1쌍 → 분할 전극 4구간×2면
- 인접 타일 동시 구동 시 근접장 간섭 → 순차 구동 또는 위상 회전으로 마디 이동
- 전류 분포: 분할 전극별 독립 전류 채널(4ch) → 구역별 두께 편차 보정
- 공급: 매니폴드 제트가 전극 개구를 통과해 패널 면에 도달(펄스 유동 옵션, Fig. 55 [0559])

[쿨스 제안] 쿨스 대면적 확장 배치

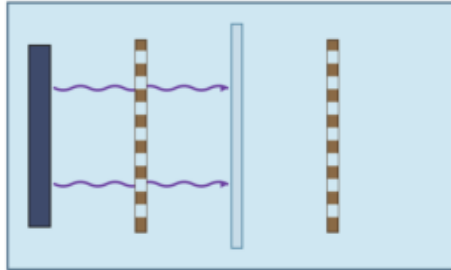
그림에서 확인할 것

- 가진 구역 T1~T16: 모듈형 진동자 타일이 패널면에 평행, 타일별 정합·구동 채널
- 전극 구역 A1~A4(양면): 분할 개구 전극 + 독립 전류 채널 → 구역별 두께 편차 보정
- 용액 공급 구역: 매니폴드 노즐이 전극 개구를 통과해 패널면에 제트 공급(펄스 유동 옵션)
- 6쪽 장치도 대비 변경: 진동자 1 → 타일 N + 다채널, 양극 1쌍 → 분할 4구간×2면, 노즐 매니폴드 추가

그림: 쿨스 대면적 확장 배치(쿨스 제안) · 구역 치수(타일 120 mm, 전극 구간 120 mm, 노즐 피치 60 mm)는 설계값 · 순차 구동 원리: US20070197138A1 Fig. 31 [0440]; 매니폴드 제트: Fig. 55 [0558]~[0561]

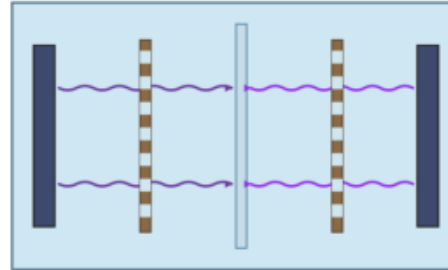
초기 설치안(한쪽 가진·개구 양극)의 부품은 그대로 두고, 양측 가진·복수 모듈·나노버블·대면적은 추가 부품만 붙임

① 초기 설치안 (기본): 수직 기관·양면 접착·한쪽 가진·개구 양극



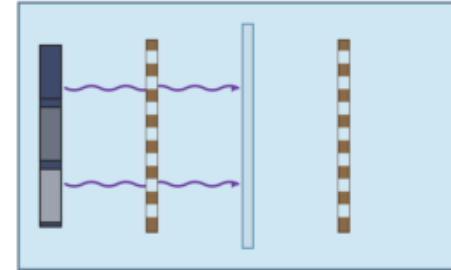
진동자 1 + 조절부, 신호발생·증폭·정합 1ch, 개구 양극 × 2
 도금전원 1, 순환·여과·온도조절, 하이드로본·임피던스 측정
 목표: 기존 형상 운전대역 확장 → 고정/단계 변경 운전 확립

② 확장 A: 양측 가진 (진동자 T2 + 동기 구동부 추가)



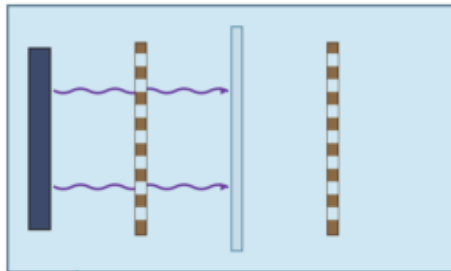
추가: T2·조절부, 2ch 위상 동기 발생기, 후면 순환 노출
 효과: 위상차로 압력 배스면, 비대칭 진폭으로 면별 공급

③ 확장 B: 복수 대역 모듈 (교체형/복수 진동자)



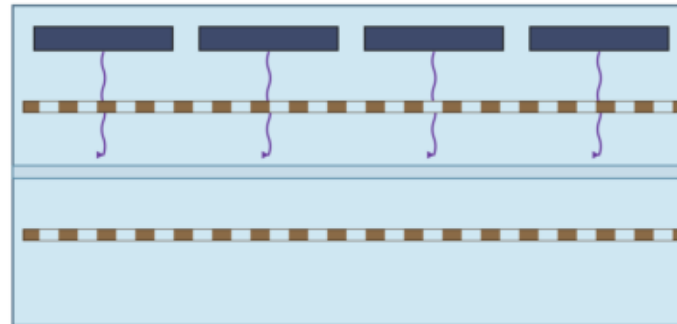
추가: 모듈 마운트, 다재널 정합, 대역별 임피던스 추적
 효과: 다른 크기·형상 비이군의 순차/동시 운전

④ 확장 C: 나노버블 결합



추가: 발생기·가스 공급·DC/기포 센서·탈기 밸브
 효과: 미세 스트리밍 기어, 펄스 OFF 구간 재분포

⑤ 확장 D: 대면적 패널 (타일 가진 + 분할 전극 + 매니폴드 공급)



추가: 타일 진동자 × N,
 다재널 구동·정합,
 분할 전극(면당 4구간)
 + 독립 전류 채널,
 매니폴드 제트 공급,
 순차/위상 회전 제어

①→②→③→④→⑤ 순으로
 기본 장치에 부품을 추가

①의 부품은 모두 유지, 각 확장은 추가 부품만 붙는 구조 (도금조·전원·순환계 공용)

문헌 실험조건(Jones 2018 Table 2 요약)과 쿨스 기준 형상·설계조건의 대조

항목	문헌 (Jones 2018)	쿨스 기준 (설계조건)
기판	FR4 PCB, 두께 1.0/1.6 mm, 무전해 Cu 시드 1~2 μm	유리 기판, 두께 1.0 mm, 도전성 시드(양면+내벽)
비아	THV 0.175/0.325/0.475/0.5 mm; BV 0.15/0.2 mm ar 1:1:2:1	기준: 스트레이트 D 100 μm , L 1,000 μm (ar 10); 4형상 비교
음향	1 MHz $\pm$ 0.05 MHz, 225/450 W(최대 500 W, 효율 ~90 %), 4소자 2.5 $\times$ 11 cm, 강판 1.03 dm ²	초기 탐색대역 0.62~0.78 MHz(계산), 운전대역은 단면 평가로 확정, 0~600 W/ch, 모듈 A/B/C(각 $\pm$ 10 %)
진동자 배치	PCB에 평행, 거리 4.5 cm(전류 손실 최소·음압 최대 절충)	평행 기본, 양극이 진동자와 기판 사이: d1 = g + ta + d2, 대표 60 mm(45~100), d2 25 mm(15~35), θ 0~ $\pm$ 15°
펄스	7 s ON / 17 s OFF (반복주기 24 s)	펄스는 후기 단계 옵션, 반복주기 10~60 s 설정 가능
전기	DC 0.5~2.0 A/dm ² , RP 10 ms/0.5 ms(1:3), 15.5~16.8 h	DC/펄스/PR, 0.5→1.0 A/dm ² (기판 투영면적 기준) 단계 상향, 누적전하 적산
도금액	SLOTOCOUP CU110: CuSO ₄ 80 g/L, H ₂ SO ₄ 100 mL/L, Cl ⁻ 80 mg/L, 첨가제 Cu111/114 5 mL/L	산성 황산구리 계열, 첨가제는 가진 조건에서 재선정
순환	500 L 조, 외부 펌프 여과 1,000 L/h, 양극 바스켓 21.6 cm	30~60 L 조, 0~20 L/min, 1 μm 필터, 25 $\pm$ 0.5 °C
측정	단면 현미경(Nikon Labophot 2.5~20 $\times$, 1 μm), 10점 평균; 하이드로폰(0.2 mm, Fig. 1)	하이드로폰·임피던스·전류/전압/Q 로깅 + 종료 후 단면
주요 결과	THV 중앙 3.1/2.1/0.4 $\mu\text{m}/\text{h}$; BV 바닥 35.2/21.3/9.2 μm ; >0.3 mm THV 억제	— (설계 목표: 23쪽 평가항목)

출처: Jones et al., Ultrasonics Sonochemistry 42 (2018) 434–444, doi:10.1016/j.ultsonch.2017.12.004 · 쿨스 값은 설계조건(실측 아님)

운전대역·주파수 이동·도금속도·충진시간의 계산 방법과 입력조건

1) 축방향 공진 — 개방-개방 관

$f_n = n \cdot c / [2 \cdot (L + 2\Delta L)]$, $\Delta L = 0.85 \cdot a$ (플랜지 끝단)

입력: $c = 1,500 \text{ m/s}$, $L = 1,000 \text{ }\mu\text{m}$, $a = 50 \text{ }\mu\text{m} \rightarrow \Delta L = 42.5 \text{ }\mu\text{m}$, $L_{\text{eff}} = 1,085 \text{ }\mu\text{m}$

끝단 보정 전 $f_1 = 0.750 \text{ MHz} \rightarrow$ 보정 후 $f_1 = 0.691 \text{ MHz}$, $f_2 = 1.382 \text{ MHz}$ (비플랜지 $0.61a$ 가정 시 0.707 MHz)

2) 내경 감소에 따른 f1 이동 (균일 성장)

$D \ 100 \rightarrow 80 \rightarrow 60 \rightarrow 40 \rightarrow 20 \text{ }\mu\text{m} : f_1 \ 0.691 \rightarrow 0.702 \rightarrow 0.714 \rightarrow 0.725 \rightarrow 0.737 \text{ MHz}$ (이동 $\leq +6.7 \%$)

3) 브리지 이후 — 폐쇄-개방 관

$f = c / [4 \cdot (h + \Delta L)]$, $h =$ 잔여 깊이. $500/500 \text{ }\mu\text{m}$ 대칭: 0.691 MHz (개방-개방과 동일, 분포만 이동) · $300/700 \text{ }\mu\text{m}$: $1.095 / 0.505 \text{ MHz}$

4) 응답곡선(15쪽) — 초기 탐색대역 설정용 단순 모델

$|H(f)| = \sum_n [(1 - (f/f_n)^2)^2 + (f/(f_n \cdot Q))^2]^{-1/2}$, $n = 1, 2$, $Q = 8$ (설계 가정 — 곡선만으로 운전대역을 확정하지 않음), 최대값으로 정규화 · 점성 경계층 $\delta = \sqrt{2\nu/\omega} = 0.68 \text{ }\mu\text{m} \ll a \rightarrow$ 광관 영역

5) 도금속도·충진시간 — 환산값 (파라데이, 효율 100 %, 벽면 성장속도 일정 가정)

$r = j_{\text{wall}} \cdot M / (z \cdot F \cdot \rho)$: $j_{\text{wall}} \ 0.5 \text{ A/dm}^2 \rightarrow 6.6 \text{ }\mu\text{m/h}$, $1.0 \rightarrow 13.2$, $2.0 \rightarrow 26.5$ · 기준면적 구분: 문헌·설계의 전류밀도 j_{sub} 는 기판 투영면적(양면 합) 기준이고, 비아 벽면 국부

전류밀도 $j_{\text{wall}} = \eta_{\text{in}} \cdot i / A_{\text{wall}}(t)$ 로 다름(η_{in} 내부 전류 분배율, $A_{\text{wall}} = 2\pi \cdot r(t) \cdot L$ 은 성장에 따라 감소)

충진시간 $t = \int dr / r_{\text{wall}}(r)$ — 벽면 속도 일정 가정 시 $t = a / r_{\text{wall}}$: $3.1 \text{ }\mu\text{m/h} \rightarrow 16.1 \text{ h}$, $6.6 \rightarrow 7.6 \text{ h}$, $13.2 \rightarrow 3.8 \text{ h}$ ($j_{\text{wall}} = j_{\text{sub}}$ 가정의 환산값, 예측치 아님) · 비아 1개

충진 전하량 $Q = \rho \cdot V \cdot z \cdot F / M = 0.214 \text{ C}$ ($V = \pi \cdot 50^2 \cdot 1,000 \text{ }\mu\text{m}^3$)

6) 전극의 음향 설계 치수 — 고체 전달은 전극 재료 음속, 개구는 액체 파장 (원문 [0537], [0538], [0553]~[0554])

구리 종파 음속 $c_{\text{Cu}} = 4,700 \text{ m/s} \rightarrow \lambda_e = c_{\text{Cu}}/f$: $0.691 \text{ MHz} \rightarrow 6.80 \text{ mm}$, $1 \text{ MHz} \rightarrow 4.70 \text{ mm}$ · 고체 전극 두께 $= n\lambda_e/4$ (n 짝수): $n = 2 \rightarrow 3.40 \text{ mm}$ (0.691 MHz) / 2.35 mm (1 MHz); 경사 배치(임계각 범위)는 두께 제약 없음; 전극-진동부 결합은 홀수 배 $n\lambda/4$

개구 폭(액체 파장 $\lambda = 1,500/f$ 기준): $0.691 \text{ MHz} \lambda = 2.17 \text{ mm}$ — 통과형 $\geq 2.2 \text{ mm}$ 또는 회절형 $< 2.2 \text{ mm}$ (주파수·위상 변조로 패턴 이동, 원문 [0554]) · $1 \text{ MHz} \lambda = 1.5 \text{ mm}$ — 통과형 $\geq 1.5 \text{ mm}$ / 회절형 $< 1.5 \text{ mm}$ · rev1의 1.09 mm (액체 파장을 구리 두께에 적용)는 폐기

모든 값은 계산 결과(1차원 모델·파라데이 법칙)이며 실측치가 아님 · 기호: c 음속, L 비아 길이, a 반경, ΔL 끝단 보정, n 모드 차수, j 전류밀도, M 63.55 g/mol , F $96,485 \text{ C/mol}$, ρ 8.96 g/cm^3 , $z = 2$

초기 설치안 부품과 확장별 추가 부품 — 역할과 필요 사양

번호	부품	역할	필요 사양	확장 시 추가
①	도금조·도금액	양면 접촉, 온도·농도 유지	PP/PVDF 30~60 L, 25±0.5 °C	D: 패널 규격 조
②	비아글라스·홀더	기판 고정, 비아 영역 개방	PVDF 프레임, 개구 = 비아 영역 + 5 mm	D: 패널 홀더
③	음극 접점	시드에 전류 공급	스프링핀 8점, 립 실(FKM), 접촉저항 < 10 mΩ	D: 변별 다점 접점
④⑤	구리 양극(개구형)	전류 공급 + 음파·유동 통과	인 함유 Cu, 두께 ta 6 mm(대표), 살 두께 λe/2 = 3.4 mm@0.69 MHz(Cu 음속 기준) 또는 경사 배치, 개구 폭 통과형 ≥ 2.2 mm / 회절형 < 2.2 mm	B/C/D: 분할·후면·4구간
⑥	진동자·방사면	음향 에너지 방사	서브머시블 PZT, 모듈 A 0.63~0.77 MHz(중심 0.70, ±10 %), 0~600 W	A: T2 / B: 모듈 B·C / D: 타일 N
⑦	위치·거리·각도 조절부	d1·θ·높이 설정	d1 45~100 mm(대표 60), d2 15~35 mm(대표 25), θ 0~±15°, 재현성 0.5 mm/0.5°	A: T2용 추가
⑧	순환·여과·온도조절	공급·배출·여과·온도	펌프 0~20 L/min, 필터 1 μm, 히터/칠러	C: 나노버블 발생기·가스·DO·탈기
⑨	도금전원	DC/펄스/PR 전류 공급	0~30 A, 0~12 V, 분해능 1 mA, Ah 적산	D: 분할 전극별 4ch
⑩	신호발생·증폭·정합	구동 파형 생성·전력·정합	0.2~3 MHz/1 Hz, 스위프·버스트, 600 W/ch, 반사 < 5 %	A: 2ch 위상 동기 / D: 다채널
⑪	제어기·측정	조건 설정·판정·로깅	PLC/PC, 하이드로폰 0.1~5 MHz(비아 응답 판정), 임피던스 분석(진동자 상태 감시), 온도·유량·DO 로거	C: 기포 상태 연동 / D: 순차 스캔
—	평가 장비	종료 후 단면 평가	단면 연마·광학/전자현미경, 1 μm 분해능	—

사양은 초기 설치 기준 설계조건 · 부품 번호는 6쪽 장치도와 동일 · 확장 A~D는 25쪽

원문 그림·수치의 출처와 본 자료의 그림 구분 원칙

원문 자료

- [1] T.D.A. Jones, A. Bernassau, D. Flynn, D. Price, M. Beadel, M.P.Y. Desmulliez, Copper electroplating of PCB interconnects using megasonic acoustic streaming, *Ultrasonics – Sonochemistry* 42 (2018) 434–444. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.004> — 사용 그림: Table 1(PDF 2쪽), Fig. 1(5쪽), Fig. 2·3(7쪽), Fig. 4·5(8쪽), Fig. 6·7(9쪽), Table 3·4·Fig. 8(10쪽), Fig. 9(11쪽)
- [2] G.L. Montierth, H.R. Miranda, S.L. Maraviov, A.A. Busnaina, Method and apparatus to process substrates with megasonic energy, US 2007/0197138 A1 (2007. 8. 23). <https://patents.google.com/patent/US20070197138A1/en> — 사용 그림: Fig. 31(PDF 40쪽), Fig. 48·49(47쪽), Fig. 50·51(48쪽), Fig. 52(49쪽), Fig. 53~55(50쪽); 본문 [0440], [0532]~[0561]
- [3] Jones 2018 인용 문헌 중 본 자료에서 원리 근거로 언급한 것: Marken et al. (1996) 확산층 두께 [24]; Tang & Clement (2009, 2010) 정상파 억제 [15,16]; Hauptmann et al. (2013) 펄스 메가소닉 기포 [28]; Brothie et al. (2009) 기포 크기-주파수 [36]; Nyborg (1957) 경계층 스트리밍 [47]

그림 구분 원칙

- [문헌 결과] 원문 그림·수치를 그대로 사용(공개번호/논문명, Figure 번호 표기). 쿨스 측정값·충진시간으로 바꾸어 표시하지 않음
- [문헌 구조] 원문 특허의 장치 구조를 한글로 재구성한 그림(회색 표기)
- [구조 설명도] 쿨스가 원리·배치를 설명하기 위해 그린 그림. 축척·두께는 개념 형상이며 정량 지시가 아님
- [계산 결과] 입력조건과 계산방법을 함께 제시한 직접 산출값(1차원 개방관 모델, 파라데이 법칙 등, 부록 B)
- [설계조건 / 쿨스 제안] 쿨스가 설정한 장치·운전 설계값과 신규 배치(주황 표기). 실측치가 아님

용어·단위

음향 주파수: MHz · 펄스 반복주기: s · 도금전류밀도: A/dm² · 도금속도: μm/h · 누적전하량: C 또는 Ah · 종횡비 ar = 길이/직경 · '쿨스 존' = 형상·주파수·진폭·시간조건·도금조건으로 정의한 운전영역이며 계산 탐색대역과 구별(15쪽)



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
