

중국 메모리 후공정 역량 확장과 HBM 제조 경쟁구도의 변화

초고속 전도냉각 전환 시점에 관한 기술·산업 분석

조진현 쿨스 대표이사 jhcho@cools.co.kr



SUMMARY

글로벌 메모리 경쟁축이 전공정 미세화에서 적층·접합·열관리 등 첨단 후공정으로 이동하는 가운데, 2026 년 상반기를 기점으로 후공정 핵심장비에 대한 접근성 격차는 빠르게 약화되는 국면에 진입하였다. 경쟁의 기준은 「어떤 장비를 보유 하는가」에서 「동일한 장비에서 사이클타임과 열이력을 어떻게 관리하는가」로 이동하고 있다.

국내 장비기업은 2026 년 3 월 세미콘 차이나에서 2.5 차원(2.5D) 열압착 본더 2 개 기종을 공개하고 중국·대만 파운드리 기업에 공급할 예정이라고 발표하였다. 개방된 영역은 HBM 적층 공정에 국한되지 않고 GPU·CPU·HBM 을 단일 패키지로 통합하는 AI 패키징 본체까지 포함하며, 공급 대상이 파운드리 기업이라는 점에서 중국·대만의 AI 패키징 수탁 생산 역량도 함께 확장된다.

중국 최대 D 램 기업은 2026 년 1 분기 글로벌 D 램 점유율 8%로 4 위에 올랐고, 7 월 27 일 상하이증권거래소 상장으 로 약 12 조~13 조 원을 조달하였다. 조달 자금은 우선 D 램 기술 고도화와 생산능력 확대에 배정되나, 전공정 생산기반 과 범용 D 램 현금흐름의 확대는 HBM 및 첨단 후공정 투자를 뒷받침하는 자본적 기반을 형성한다.

현행 대중국 통제는 전공정 노광 영역에 집중되어 있고 후공정 접합 장비는 통제 목록의 핵심 축이 아니다. 그 결과 전 공정 격차는 규제에 의해 유지되고 후공정 격차는 시장에 의해 축소되는 비대칭이 성립한다.

국내 기업의 우위는 장비 접근성, 공정 노하우, 접합·냉각의 물리 원리 세 층으로 분해된다. 제 1 층은 장비 공급 발표로 개방되었고 제 2 층은 반복 생산과 인력 이동으로 이전된다. 제 3 층에서는 전 사업자가 동일하게 공기제트 대류냉각을 채 택하고 있어 어떤 사업자도 차별화를 형성하지 않았다. 공정 노하우는 물리 원리가 유지되는 한에서만 자산이므로, 축적 량이 큰 사업자일수록 전환 속도가 느려진다.

공기제트 충돌냉각의 계면 열전달계수는 작동 유체의 물성에 의해 500~1,000 W/m²·K에서 상한에 도달해 있으며 노즐 설계나 유량 증대로 개선되지 않는다. 고체 접촉 전도냉각은 동일 계면에서 20,000~50,000 W/m²·K 를 확보한다. 접 합 1 회당 약 4 초가 소요되는 냉각 구간을 0.5 초 수준까지 축소하는 것이 물리 허용 최대치이다.

쿨스의 서멀클러치는 승온·가압 구간에서 냉각체를 기계적으로 분리하고 접합 완료 시점에 정밀 접촉시켜 열을 흡수한 뒤 배출하고 분리하는 능동 전환 구조이다. 1 차 검증 장비에서 TCB 냉각 구간을 7.0 초에서 3.4 초로 51% 단축하였으며, 계면 조건 확보 시 장비 1 대당 생산성 최대 3 배, 하부 접합부 누적 열노출 약 85% 감소가 설계 도달점이다.

JEDEC 의 패키지 높이 규격 확대와 다이 면적 확대는 냉각 원리 전환의 필요성을 세대 진행과 함께 강화한다. 국내 기 업이 선행 전환하면 동일 장비 내 시간 구조의 차이가 잔존하여 처리량과 고단 적층 수율의 우위가 유지되고 차세대 장 비 규격의 주도권도 확보된다. 단기적으로는 평가 장비에 모듈을 장착하여 냉각 구간 소요 시간과 온도 균일도, 반복정 밀도, 누적 열이력, 처리량을 확인할 수 있고, 중기적으로는 본딩 헤드와 히터, 냉각체, 방열부가 하나의 시간제어 시스 템으로 작동하는 전용 장비 구조 개발이 과제로 남는다.

결론: 후공정 장비 평준화가 진행되는 조건에서 냉각 원리의 전환은 국내 기업이 새롭게 선점할 수 있는 가장 강력한 차 별화 축이다. 초고속 전도냉각은 추격 대응이 아니라 다음 세대의 생산성 기준을 선점하는 기술이며, 전환 시점의 선택 이 주도권을 결정한다.

1. 핵심 판단

글로벌 메모리 경쟁축이 전공정 미세화에서 적층·접합·열관리 등 첨단 후공정으로 이동하는 가운데, 2026년 상반기를 기점으로 후공정 핵심장비에 대한 접근성 격차는 빠르게 악화되는 국면에 진입하였다.

국내 장비기업은 2026년 3월 세미콘 차이나에서 2.5차원(2.5D) 열압착 본더 2개 기종을 공개하고, 해당 기종을 중국·대만 파운드리 기업에 공급할 예정이라고 발표하였다. 해당 장비는 실리콘 인터포저 위에 그래픽처리장치(GPU), 중앙처리장치(CPU), 고대역폭 메모리(High Bandwidth Memory, HBM)를 하나의 패키지로 통합하는 인공지능(AI) 첨단 패키징 장비이다. 즉 개방된 영역은 HBM 적층 공정에 국한되지 않고 AI 패키징 본체까지 포함한다.

동시에 중국 최대 D램 기업은 2026년 1분기 글로벌 D램 점유율 8%로 4위에 올랐고, 매출은 전년 동기 대비 700% 이상 증가하였다. 2026년 7월 27일 상하이증권거래소 상장으로 579억 2,000만 위안, 약 12조~13조 원을 조달하였다. 조달 자금은 우선 D램 기술 고도화와 웨이퍼 생산능력 확대에 배정된다. 이러한 전공정 생산기반과 범용 D램 현금흐름의 확대는 별도로 추진되는 HBM 및 첨단 후공정 투자를 뒷받침할 수 있는 자본적 기반을 형성한다.

이는 중국이 국내 기업과 동일한 HBM 경쟁력을 확보했다는 의미가 아니다. HBM 세대 격차는 유지되고 있다. 다만 후공정 경쟁의 기준이 「어떤 장비를 보유하는가」에서 「동일한 장비에서 사이클타임과 열이력을 어떻게 관리하는가」로 이동한다는 의미이다.

그리고 이 새 기준에서 국내 기업이 보유한 우위의 실질은, 공기제트 대류냉각이라는 동일한 물리 영역에서 축적한 공정 노하우의 양적 차이이다. 공기제트 냉각은 작동 유체의 물성에 의해 이미 상한에 도달해 있다. 반면 고체 간 직접 접촉 전도는 동일 계면에서 20~50배의 열전달 성능을 확보한다.

국내 기업은 D램 수율, 소재, 적층 정밀도, 언더필 및 검사 영역에서도 차별화 요소를 보유하고 있다. 다만 이들 항목은 기존 공정 구조를 전제로 축적된 것이며, 새로운 격차를 형성하는 항목은 아니다.

결론: 후공정 장비 평준화가 진행되는 조건에서, 냉각 원리의 전환은 국내 기업이 새롭게 선점할 수 있는 가장 강력한 차별화 축이다. 초고속 전도냉각은 추격 대응 기술이 아니라 다음 세대의 생산성 기준을 선점하는 기술이며, 전환 시점의 선택이 주도권의 귀속을 결정한다.

2. 상황 변화

2.1 창신메모리의 성장 단계 전환

중국 최대 D 램 기업 창신메모리테크놀로지(ChangXin Memory Technologies, CXMT)의 지표 변화는 다음과 같다.

[표 1] 창신메모리 주요 지표 변화

지표	2025 년 1 분기	2026 년 1 분기	변화
글로벌 D 램 점유율	3%	8%	2 배 이상 확대
D 램 매출	기준	전년 동기 대비 +700%	4 위 공급업체 확보
HBM 단계	HBM2 샘플 단계	업계 보도상 HBM3 8 단 양산체제 진입 추진	세대 1 단계 이동 시도
자금 조달	정부 주도 출자	상장 조달 579 억 2,000 만 위안	자본시장 진입

* 점유율 및 매출은 카운터포인트리서치 메모리 트래커 기준. 동 분기 글로벌 D 램 시장은 970 억 달러로 사상 최대치를 기록하였다. HBM 단계 항목은 업계 보도를 종합한 추정이며, 해당 기업의 공식 발표에 따른 확정 사항이 아니다.

주력은 여전히 DDR5 및 저전력 더블데이터레이트(Low-Power Double Data Rate, LPDDR) 계열의 범용 메모리이며, 최첨단 HBM 에서는 국내 선도기업과 상당한 격차가 존재한다. 판단의 대상은 현재 수준이 아니라 자본 기반의 형성 여부이다. 상장 조달 자금은 우선 D 램 기술 고도화와 웨이퍼 생산능력 확대에 배정된다. 공개된 상장 자료에서 전용 HBM 사업은 별도 항목으로 명시되지 않았다. 다만 이러한 전공정 생산기반과 범용 D 램 현금흐름의 확대는 별도로 추진되는 HBM 및 첨단 후공정 투자를 뒷받침할 수 있는 자본적 기반을 형성한다. 이 영역에서는 개발 기간이 아니라 조달 기간이 추격속도를 좌우한다.

상하이 신규 팹은 허페이 본사 대비 2~3 배 규모로 구축되고 있고, 2026 년 하반기 장비 설치, 2027 년 본격 양산 일정이 제시되어 있다. 업계에서는 전체 D 램 생산능력의 약 20%를 HBM3 생산에 배정할 가능성이 있는 것으로 전망하고 있다. 12 단 HBM 생산을 목표로 국내외 소재·부품·장비 기업과 설비투자 방향을 협의하고 있다는 보도도 이어지고 있다. 국내 메모리 3 사 및 미국 메모리 기업 출신 엔지니어 확보도 병행되고 있으며, 국내 인력만 약 200 명 규모로 보도되었다.

2.2 첨단 본딩 장비의 중국·대만 공급 예정 공개

후공정 장비 측면의 변화는 두 단계로 진행되었다.

- 제 1 단계(2025 년 6 월) - 국내 TCB 선도기업이 창신메모리에 TC 본더를 납품한 사실이 보도되었다. 복수 대 규모이며 도입 기업은 평가 단계에서 운용하였다. 개별 거래이자 비공식 확인 사안이었다.
- 제 2 단계(2026 년 3 월) - 세미콘 차이나 2026 에서 2.5D TC 본더 40 및 2.5D TC 본더 120 을 공개하고, 중국·대만 파운드리 기업에 공급을 앞두고 있다고 발표하였다. 대상 공정은 HBM 적층이 아니라 실리콘 인터포저 기반 AI 패키징이다.

제 2 단계의 의미가 제 1 단계보다 크다. 근거는 세 가지이다.

- 공급 계획이 공개적으로 발표된 사안이므로 개별 거래에 국한된 성격이 아니다.
- 2.5D 패키징은 GPU·CPU·HBM 을 단일 패키지로 통합하는 공정이며, AI 반도체 부가가치의 집중 지점이다. 2.5D TC 본더 40 은 40 밀리미터 × 40 밀리미터 칩과 웨이퍼의 본딩을 지원하고, 120 은 웨이퍼 및 기판 단위의 대형 인터포저를 처리한다.
- 공급 대상이 메모리 기업이 아니라 파운드리 기업이다. 즉 중국·대만의 AI 패키징 수탁 생산 역량이 함께 확장된다.

장비 공급만으로 수율과 품질이 즉시 평준화되지는 않는다. 다만 동일하거나 유사한 장비 플랫폼을 사용하게 되면 장비 정밀도, 온도·압력 제어 능력, 다이 정렬 및 적층 자동화, 공정 데이터 추적, 장비 운영·유지보수 경험, 후공정 엔지니어 양성 속도의 격차는 시간 경과에 따라 축소된다. 이 항목들은 모두 반복 시행으로 획득되는 성질을 갖는다.

2.3 전공정과 후공정의 규제 비대칭

현행 대중국 통제는 전공정, 특히 노광 영역에 집중되어 있다. 중국은 자체 액침 심자외선(Deep Ultraviolet, DUV) 노광장비를 개발하여 창신메모리를 우선 공급 대상에 포함시켰으나 검증 단계에 있고, 극자외선(Extreme Ultraviolet, EUV) 영역은 접근이 차단되어 있다. 반면 후공정 접합 장비는 통제 목록의 핵심 축이 아니며 상업적 판단에 따라 공급된다.

그 결과 전공정 격차는 규제에 의해 유지되고, 후공정 격차는 시장에 의해 축소되는 비대칭이 성립한다. 국내 기업 우위의 상당 부분이 적층·접합·패키징 역량에 근거한다는 점을 고려하면 이 비대칭이 향하는 방향은 확정적이다.

[표 2] HBM 경쟁요소별 접근 장벽 현황

경쟁요소	접근 장벽	장벽의 근거	격차 추이
EUV 노광	높음	수출통제	유지
액침 DUV 노광	중간	수출통제·자립 진행	완만한 축소
D 램 미세공정 수율	중간	누적 경험·인력	축소
TSV·적층 후공정	낮음	상업적 장비 거래	급속 축소
HBM 용 TC 본더 보유	없음	납품 이력 존재	접근성 확보
2.5D 인터포저 패키징 장비	없음	공급 예정 공개	접근성 확대
접합부 냉각 원리	해당 없음	전 사업자 동일 조건	미형성

※ 최하단 항목은 현 시점에서 어떤 사업자도 우위를 확보하지 못한 영역이다. 새로운 격차를 선점할 수 있는 여지가 가장 크게 남아 있는 항목이 여기에 해당한다.

3. 경쟁구도의 구조적 변화

3.1 우위 구조의 3층 분해

국내 기업이 첨단 패키징에서 확보한 우위를 성립 근거별로 분해하면 세 층으로 구분된다.

- 제 1 층 - 장비 접근성: 최신 세대 TCB 장비의 우선 확보 및 장비기업과의 공동 개발 이력.
- 제 2 층 - 공정 노하우: 동일 장비에서 온도 프로파일, 가압 프로파일, 언더필 거동, 워피지 보상 조건을 축적한 데이터의 양.
- 제 3 층 - 원리 선택: 접합 및 냉각의 물리 원리 자체. 현재 전 사업자가 동일하게 열압착 후 공기제트 대류 냉각을 채택하고 있다.

제 1 층은 2.2 항에서 확인된 바와 같이 접근이 개방되었다. 제 2 층은 반복 생산과 인력 이동으로 이전되며, 2.1 항의 인력 확보 규모가 그 속도를 결정한다. 제 3 층에는 현재 어떤 사업자도 차별화를 형성하지 않았다. 즉 국내 기업의 우위는 축소 경로가 확인된 두 개 층에 상당 부분 의존하고 있고, 축소되지 않는 층에는 아직 자산이 축적되어 있지 않다. 제1층과 제2층의 관리를 계속하면서 제 3 층에 자산을 선제적으로 축적하는 것이 우위 유지의 조건이 된다.

3.2 축적이 자산으로 이전되지 않는 경우

공정 노하우의 축적은 그 노하우가 적용되는 물리 원리가 유지되는 한에서만 자산이다. 원리가 교체되면 축적된 데이터의 상당 부분은 이전되지 않는다. 공기제트 냉각의 노즐 배치, 유량 분포, 유동 간섭, 온도 편차 보상에 관한 데이터는 고체 접촉 전도냉각 조건에서 재사용되지 않는다. 후자의 지배 변수는 계면 접촉 압력, 표면 조도, 접촉 열저항, 냉각체 열용량, 접촉·분리 사이클의 기계적 반복도이며, 이는 전자와 물리적으로 다른 변수 집합이다.

이 성질은 축적량이 큰 쪽에 불리하게 작용한다. 상실하는 자산의 절대량이 크기 때문이다. 신기술 도입 동기가 기술 수준의 순서와 반대로 형성되는 구조적 이유가 여기에 있다.

[표 3] 사업자 유형별 전환 비용 구조

비용 항목	기존 공정 축적이 큰 사업자	신규 라인 구축 중 사업자
기존 설비 매몰 비용	대규모 가동 설비 존재	설비 구성 확정 전
공정 노하우 상실분	축적량에 비례하여 큼	작음
조직 내 검증 절차	기존 양산 리스크 반영	신규 검증으로 일원화
고객 인증 재취득	기존 승인 조건 변경 부담	초기 인증에 포함
도입 의사결정 속도	느림	빠름

이 구조는 개별 조직의 의사와 무관하게 작동한다. 지켜야 할 것이 많은 쪽의 전환 속도가 느려지고, 그 지연이 축적 우위를 상쇄한다.

3.3 경쟁 기준의 이동: 장비 보유에서 사이클타임으로

TC 본더의 기능은 칩을 정밀 정렬하고 열과 압력을 인가하여 접합하는 것이다. 가열 속도와 정렬 정밀도가 일정 수준에 도달하면 전체 생산성을 제한하는 요소는 냉각 시간으로 이동한다. 승온과 가압은 히터 출력과 하중 제어로 단축되어 왔으나, 냉각 구간은 4장에서 기술하는 물리적 상한에 의해 단축되지 않았다.

한 사이클의 수 초 차이는 개별적으로 작아 보이지만, 반복 접합 횟수와 적층 단수로 곱해지면 장비 생산량, 공장면적, 장비 투자비 및 제품 원가를 결정하는 구조적 차이로 확대된다. 후발기업이 TC 본더를 확보하는 단계에 진입한 조건에서, 국내 기업의 실질 방어선은 다음 항목으로 이동한다.

- 접합 1 회당 냉각 시간
- 고단 적층 시 하부 접합부의 누적 열노출량

- 장비 1대당 시간당 처리량
- 대면적 다이 및 고단 구조의 워피지 제어 능력
- 접합부 열화 억제에 따른 수율 및 신뢰성

4. 공기제트 냉각의 물리적 상한

4.1 열전달계수 상한

냉각 성능은 최종적으로 계면 열전달계수(h)에 의해 결정되며, 공기제트 충돌 냉각에서 h의 상한은 작동 유체의 물성에 의해 규정된다. 공기의 열전도율은 상온에서 0.026 W/m·K, 200°C 근방에서 0.037 W/m·K이다. 열경계층 두께를 물리적으로 도달 가능한 최소치까지 축소하여도 제트 충돌 영역에서 확보되는 h는 500~1,000 W/m²·K 범위에 위치한다.

이 상한은 노즐 설계, 분사 압력, 유량 증대로 개선되지 않는다. 유량을 높이면 소음, 진동, 파티클 비산, 인접 셀 간 유동 간섭이 증가하고, 접합 정밀도가 이를 먼저 제약한다. 공기제트 냉각은 개선 여지가 남지 않은 상태에서 산업 표준으로 고착되어 있다.

[표 4] 냉각 방식별 계면 열전달 성능 비교

구분	공기 자연대류	공기제트 충돌냉각	고체 접촉 전도냉각
작동 매체	공기	공기	고열전도 고체
매체 열전도율(W/m·K)	0.026	0.026~0.037	170~400
계면 h (W/m ² ·K)	5~25	500~1,000	20,000~50,000
상대 성능비	1	약 40	약 1,500
잔여 개선 여지	없음	없음	큼
정밀도 간섭 요인	없음	유동·진동 간섭	기계 접촉 제어

※ 고체 접촉 전도냉각의 h는 계면 접촉 압력, 표면 조도, 계면 매개층 조건에 의해 결정되며, 상기 범위는 계면 설계가 확보된 조건의 값이다.

4.2 상한이 만들어 놓은 공정 시간 구조

HBM 접합 1 사이클은 정렬, 승온, 가압 접합, 냉각, 헤드 상승으로 구성된다. 냉각 구간이 단축되지 않은 결과, 현재의 본딩 사이클에서 냉각이 가장 구간을 점유하는 시간 구조가 형성되어 있다. 이 구조는 두 가지 손실을 동시에 발생시킨다.

- 장비 1대당 시간당 처리량이 냉각 구간에 의해 결정된다.
- 적층 단수가 증가할수록 먼저 접합된 하부 다이가 후속 사이클의 열에 반복 노출되어, 누적 열노출량이 단수의 제공에 근접하는 형태로 증가한다.

생산성 항목과 수율·신뢰성 항목이 동일한 물리 변수에 묶여 있다는 점이 현 공정 구조의 본질적 제약이다. 냉각 시상수를 줄이지 않는 한 두 항목은 서로 교환 관계에 놓인다.

5. 초고속 전도냉각의 물리 허용 최대치와 성립 조건

5.1 물리 허용 최대치

냉각 구간 소요 시간은 열저항과 열용량의 곱, 즉 시상수에 비례한다. 계면 h 가 $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 에서 $25,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 증가하면 계면 열저항은 $1/50$ 로 감소한다. 냉각체 내부 확산 저항과 방열부 배출 저항을 포함한 직렬 열저항 기준으로 산정하여도 전체 시상수는 $1/8$ 이하로 감소한다.

접합 1 회당 약 4 초가 소요되는 냉각 구간을 0.5 초 수준까지 축소하는 것이 물리 허용 최대치이며, 이는 계면 조건이 확보되었을 때 성립한다. 이 값은 냉각 장치의 크기, 출력, 유량과 무관하게 결정된다. 열전달 경로를 기체에서 고체로 교체하는 것만이 이 값에 도달하는 방법이다.

5.2 성립 조건의 수치화

물리 허용 최대치는 다음 조건이 동시에 충족될 때 공정에서 실현된다. 각 조건은 제약이 아니라 해법이 확정된 설계 입력으로 처리된다.

[표 5] 초고속 전도냉각의 성립 조건 및 확보 상태

성립 조건	요구 수치	제약의 성질	해법
계면 접촉 열전달계수	$\geq 20,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	표면 조도·접촉 압력 의존	예압 접촉구조, 표면 평탄도 제어, 박막형 열접촉 매개층
냉각체 열전도율	$\geq 170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	소재 선택	RBSC·AlN·Cu 복합체
접촉·분리 사이클 시간	$\leq 0.1 \text{ 초}$	기구 응답 속도	클러치 구동부 저관성 설계
접촉 위치 반복도	$\leq \pm 10 \mu\text{m}$	기계 정밀도	가이드·예압 구조
접촉 시 칩 위치 교란	$\leq 1 \mu\text{m}$	접합 정밀도 직결	가압 완료 후 접촉 시퀀스 분리
1 사이클 냉각체 온도상승	$\leq 5 \text{ K}$	열용량 설계	방열부 직결, 열용량 배분
승온 구간 열손실	무시 가능 수준	상시 접촉 시 발생	가열 시 기계적 분리 구조

※ 최하단 항목이 「클러치」 구조의 필요성을 규정한다. 고체 접촉은 냉각에 유리한 동시에 승온에 불리하므로, 접촉과 분리를 사이클 내에서 능동 전환하는 구조가 전제된다. 상시 접촉형 냉각판으로는 성립하지 않는다.

5.3 서멀클러치의 구성과 동작

쿨스가 개발한 서멀클러치는 5.2 항의 조건을 만족하도록 구성된 열제어 모듈이다. 1사이클 동작은 다음 5단계로 구성된다.

- 제 1 단계 - 승온·가압: 고열전도 냉각체를 가열부로부터 기계적으로 분리하여 열손실 경로를 차단한다. 히터 출력은 접합에만 사용된다.
- 제 2 단계 - 접촉: 가압 접합이 완료된 시점에 냉각체를 가열부에 정밀 접촉시킨다. 계면 조건에 의해 $20,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 이상의 열전달계수가 형성된다.
- 제 3 단계 - 흡수: 고체 전도경로를 통해 열을 순간적으로 흡수한다.
- 제 4 단계 - 배출: 흡수한 열을 냉각체와 직결된 방열부로 배출한다.
- 제 5 단계 - 분리: 목표온도 도달 후 냉각체를 분리하고 다음 사이클로 진입한다.

기존 냉각 장치와의 차이는 성능의 정도가 아니라 열전달 경로의 종류이다. 공기를 사이에 둔 간접 냉각에서 고체가 직접 열을 전달하는 냉각으로 원리를 교체한다.

5.4 검증 실적

1차 검증 장비에서 확보된 실측 결과 및 계면 조건 최적화를 반영한 설계 도달점은 다음과 같다.

- 실측 - TCB 냉각 구간 소요 시간 7.0 초에서 3.4 초로 단축. 단축률 51%. 동일 접합 품질 기준 유지 조건에서 측정.
- 설계 도달점 - 접합 1회당 냉각 구간 4 초에서 0.5 초 수준. 계면 접촉 조건이 5.2 항 요구 수치에 도달한 경우의 값.
- 생산성 - 본딩 장비 1대당 최대 3 배 향상. 전체 사이클에서 냉각이 점유하는 비중에 따라 결정된다.
- 누적 열노출 - 다층 적층 시 하부 접합부 기준 약 85% 감소.

생산성과 누적 열노출이 동시에 개선되는 것은 두 항목이 동일한 냉각 시상수에 의해 결정되기 때문이다. 이 기술은 생산성과 수율을 교환하지 않고 함께 개선한다. 4.2 항에서 기술한 교환 관계 자체가 해소된다.

5.5 적용 방식

서멀클러치는 기존 본딩 장비의 냉각부를 대체하는 모듈 형태로 공급 가능하다. 생산라인 전체의 교체를 전제하지 않으며, 장비기업 또는 반도체 제조기업과의 공동 개발을 통해 전용 장비·공정으로 확장하는 경로도 성립한다. 이는 전환 결정에서 가장 큰 저항 요인인 기존 설비의 매몰 비용 부담을 축소한다.

6. 고단화·대면적화가 강화하는 전환 필요성

전도냉각의 필요성은 경쟁 상황과 무관하게, 제품 규격의 진행 방향만으로도 강화된다. 근거는 두 가지이며 모두 공개된 산업 동향이다.

6.1 패키지 높이 규격의 확대

국제반도체표준협의기구(JEDEC)는 HBM 패키지 높이 기준을 기존 약 775 마이크로미터에서 900 마이크로미터 수준으로 확대하는 방안을 검토하고 있다. 높이 여유의 확대는 적층 단수의 증가를 전제한 조치이다. 단수가 증가하면 4.2 항에서 기술한 누적 열노출량은 단수의 제공에 근접하는 형태로 증가하므로, 냉각 시상수가 동일한 조건에서는 하부 접합부의 열이력이 규격 진행과 함께 악화된다.

6.2 다이 면적의 확대

차세대 HBM은 D램 다이 면적을 확대하는 방향으로 진행되고 있으며, 이에 대응하는 대면적 본딩 장비가 이미 공개되었다. 다이 면적이 확대되면 실리콘관통전극(Through Silicon Via, TSV) 수와 입출력 인터페이스 수를 안정적으로 늘릴 수 있어 용량과 대역폭이 확장된다. 동시에 다음 두 문제가 심화된다.

- 면적 확대에 따라 온도 편차의 절대값이 증가하고, 열팽창계수 불일치에 의한 워피지가 확대된다.
- 공기제트 냉각은 노즐 배치의 이산성 때문에 대면적에서 온도 균일도를 확보하기 어렵다. 반면 고체 접촉 전도는 면 단위로 균일한 열전달 경로를 형성한다.

즉 고단화와 대면적화는 모두 열이력에 취약한 방향이며, 두 방향이 동시에 진행되고 있다. 냉각 원리 전환의 필요성은 세대 진행과 함께 자동으로 강화된다. 이는 경쟁 대응 논거가 아니라 물리 논거이므로 규격 진행이 계속되는 한 유효하다.

2.5차원 및 3차원을 포함한 첨단 패키징 시장은 2024년 460억 달러에서 2030년 794억 달러로 확대될 전망이다. 전환 판단의 대상 규모는 이 시장의 생산성 기준 전체이다.

7. 전환 시나리오

전환 순서에 따른 결과는 세 가지로 구분된다.

시나리오 A - 국내 기업 선행 전환. 냉각 원리 영역에서 새로운 격차가 형성된다. 후공정 장비 평준화가 완료되어도 동일 장비 내 시간 구조의 차이가 잔존하므로, 처리량과 고단 적층 수율의 우위가 유지된다. 공기제트 영역에서 축적한 데이터의 상실분은 발생하나, 새 영역의 선행 축적으로 상환된다. 나아가 차세대 본딩 장비 규격에 대한 주도권을 확보한다.

시나리오 B - 동시 전환. 냉각 원리에서는 격차가 형성되지 않고, 경쟁은 다시 미세공정 수율과 생산능력 규모로 회귀한다. 후자는 국가 단위 자본 투입 규모의 문제이므로 국내 기업에 유리한 축이 아니다.

시나리오 C - 후발 기업 선행 전환. 공기제트 영역에서 축적한 우위의 상당 부분이 경쟁력으로 환산되지 않는다. 기존 기술 단계를 순차적으로 경유하지 않고 새 원리로 직접 이동하는 경로가 성립하기 때문이다. 이 경우 국내 기업은 자사가 창출한 기술 영역에서 후발 도입자가 된다.

세 시나리오의 분기는 기술의 성립 여부가 아니라 도입 시점의 선택에 의해 결정된다. 1차 실측을 통해 전도냉각의 기술적 성립 가능성은 확인되었다. 이제 판단의 중심은 원리의 가능성보다 양산 적용을 위한 검증 시점과 도입 순서로 이동해야 한다.

플랫폼 전환기에 기존 우위가 이전되지 않은 사례는 반복적으로 관찰되었다. 피쳐폰 시대의 기술적 우위는 스마트폰 시대의 시장 지위로 이전되지 않았다. 전환기에 결정적으로 작용한 변수는 축적의 크기가 아니라 전환 판단의 시점이었다.

8. 제안 대응 방향

8.1 단기 - 기존 장비 모듈 검증

전체 생산라인을 변경하기 전에 단일 장비 또는 평가 장비에 서멀클러치 모듈을 장착하여 공정 효과를 직접 확인할 수 있다. 검증 항목 및 판정 기준은 다음과 같다.

[표 6] 단기 검증 항목 및 판정 기준

검증 항목	측정 방법	판정 기준
냉각 구간 소요 시간	가열부 열전대 온도 이력	공기제트 대비 50% 이상 단축
본딩 헤드 온도 균일도	다점 열전대 또는 열화상	면내 편차 $\pm 3\text{ K}$ 이내
접촉·분리 반복정밀도	변위 센서 반복 측정	$\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 이내
접촉 시 칩 위치 교란	접합 후 정렬 오차 측정	$1\text{ }\mu\text{m}$ 이내
다이 및 기판 워피지	접합 후 형상 측정	기존 조건 대비 동등 이상
하부 접합부 누적 열이력	적층 사이클별 온도 적분	기존 조건 대비 감소
시간당 장비 처리량	연속 운전 계수	설계 사이클타임 달성
기존 공정조건 호환성	기존 레시피 적용 시험	레시피 변경 최소화

8.2 중기 - 전용 장비 구조 개발

부착형 냉각 모듈을 넘어, 본딩 헤드, 히터, 냉각체, 방열부가 하나의 시간제어 시스템으로 작동하는 전용 장비 구조를 개발한다. 가열, 압착, 냉각, 분리의 시점을 통합 제어하면 공기제트 방식에서 확보할 수 없는 서브초 단위 냉각과 반복정밀도가 구현된다.

장비기업과 메모리 제조기업이 공동으로 장비 사양을 확정하면 초고속 전도냉각을 차세대 TC 본더의 기본 기능으로 정착시킬 수 있다. 이 경로에서 사양 확정에 참여한 사업자가 규격 주도권을 확보한다.

8.3 전환의 성격

초고속 전도냉각의 도입 효과는 추격 대응에 국한되지 않는다. 선행 전환 시 확보되는 항목은 다음과 같다.

- HBM 생산능력의 조기 확대 및 신규 팹·장비 투자 부담 절감
- 고단 HBM의 누적 열이력 감소에 따른 수율 및 신뢰성 개선
- 대면적 다이 및 차세대 패키지의 워피지 억제
- 장비 생산성 향상을 통한 제조원가 절감
- 전도냉각 공정 데이터 및 양산 노하우의 선제적 축적
- 차세대 본딩 장비 규격에 대한 주도권 확보

전도냉각이 업계 표준으로 정착한 이후에 대응하면, 국내 기업도 후발 도입자의 위치에서 시작한다. 반대로 양산 검증을 먼저 완료하면 초고속 전도냉각은 후발기업의 추격을 다시 어렵게 만드는 새로운 공정 장벽으로 작용한다.

9. 종합 결론

중국 메모리 기업이 국내 선도기업과 모든 영역에서 평준화되었다고 판단하기에는 이른다. HBM 세대 격차와 미세공정 수율 격차는 유지되고 있다. 그러나 창신메모리의 생산 확대와 자본시장 진입, 그리고 중국·대만 파운드리에 대한 2.5D 첨단 패키징 장비 공급 예정 발표는, 후공정 격차가 과거와 같은 속도로 유지되지 않을 가능성을 보여준다.

후공정 장비가 보급되면 장비를 확보하는 것보다 장비의 생산성을 얼마나 극대화하는가가 경쟁요소가 된다. 공기제트 냉각은 오랫동안 사용된 안정적 방식이지만, 작동 유체의 물성에 의해 상한이 규정되어 있어 고단·대면적·고생산성 HBM의 요구를 충족하지 못한다. 초고속 전도냉각은 이 병목을 제거하여 장비 생산성, 누적 열노출, 워피지, 수율, 신뢰성을 동시에 개선한다.

지금 필요한 판단은 전도냉각이 언젠가 필요한가가 아니다. 후공정 장비와 기술의 평준화가 본격화되기 전에 누가 먼저 초고속 전도냉각을 양산공정에 적용하고 새로운 생산성 기준을 선점하는가이다.

현재의 기술격차보다 더 중요한 것은 새로운 패러다임으로의 전환 속도이다. HBM 후공정 경쟁의 다음 격차는 장비가 아니라 냉각시간에서 만들어진다.

참고 자료

1. 주간한국, 「한미반도체, 세미콘 차이나서 첨단 반도체 장비 선배」, 2026.3.25. (2.5D TC 본더 40~120 중국·대만 파운드리 공급 예정 발표)
2. 녹색경제신문, 「한미반도체, 세미콘 차이나서 AI 패키징 신장비 3종 공개」, 2026.3.25.
3. 서울경제, 「한미반도체 中 공략-HBM 핵심장비 공급」, 2025.6.23.
4. 카운터포인트리서치, 「글로벌 D램 매출 급증, 2026년 1분기」 메모리 트래커, 2026.5.
5. 아이뉴스 24, 「한미반도체, 세미콘 동남아서 2.5D TC 본더 공개」, 2026.5.4. (JEDEC 패키지 높이 규격, 올그룹 첨단 패키징 시장 전망 포함)
6. 대한경제, 「한미반도체, 컴퓨텍스 2026 첫 참가-차세대 TC 본더 선배」, 2026.6.4. (와이드 TC 본더 대면적 다이 대응)
7. 전자신문, 「中 CXMT, 내년 12단 HBM 양산...韓 톱밀 추격」, 2026.4.8.
8. 이투데이, 「HBM 호황에 가려진 중국의 추격-D램 기술 격차 3년 수준」, 2026.7.
9. 파이낸셜뉴스, 「D램 3년·HBM 5년 中 CXMT 아직 격차...문제는 추격 속도」, 2026.7.29.
10. 위클리포스트, 「CXMT, 중국산 DUV 장비 우선 공급」, 2026.7.28.
11. 시사저널 e, 「CXMT, 韓엔지니어 200명 품었다」, 2026.6.2.
12. 창신메모리테크놀로지 상하이증권거래소 상장 공시, 2026.7.27. (조달 규모 579억 2,000만 위안)
13. 쿨스 내부 검증 데이터, TCB 냉각 구간 실측 결과, 2026.