

HBM 적층 기술 (삼성전자, SK하이닉스)

BMD

BMD Research Team 1

하지우

HBM 적층에서 NCF와 MUF는 언더필이라는 공통 명칭을 공유하지만, 제조 관점에서는 서로 다른 공정 사건을 구성하는 기술로 이해되어야 한다. HBM은 TSV가 형성된 DRAM 다이를 여러 장 적층해 하나의 스택을 만들고, 스택 내부에서 전기적 연결을 유지하면서 열과 응력을 장기적으로 통제해야 한다. 이때 적층수 증가와 높이 규격 제약은 다이 박막화를 강제하며, 박막화는 워페이지와 계면 박리, 보이드에 대한 민감도를 급격히 확대한다. 결과적으로 언더필 방식의 선택은 갭 충전이라는 단일 목적을 넘어, 보이드와 응력과 다이 이동을 어떤 공정 변수 집합으로 억제할 것인지에 관한 설계 선택으로 귀결된다.

언더필을 범프 접합부와 다이 간 갭을 비전도성 수지로 채워 기계적 보강과 장기 신뢰성을 확보하는 공정으로 정의하면, NCF와 MUF는 모두 이 정의를 충족한다. 그러나 두 방식은 언더필이 성립하는 시점과 사건이 다르다. NCF는 사전 도포형에 속하고, MUF는 사후 충전형에 가깝다. 사전 도포형은 재료가 접합 이전에 인터페이스에 존재하고, 접합 과정에서 유동과 경화가 동시에 진행되는 구조를 가진다. 사후 충전형은 접합 이후에 충전 사건이 독립적으로 존재하며, 충전과 경화의 성패가 접합 사건과 분리된 변수 집합에 의해 좌우되는 구조를 가진다. 따라서 NCF 체계에서는 보이드와 다이 이동이 본딩 사건에 귀속되는 경향이 강하고, MUF 체계에서는 보이드와 박리, 워페이지가 충전과 몰딩 사건에 귀속되는 경향이 강하다. 이 귀속 구조의 차이가 고적층 HBM에서의 수율, 처리량, 열 신뢰성의 균형점을 결정한다.

NCF는 필름형 비전도성 수지이며, 삼성전자가 채택한 핵심 경로는 열압착 본딩 기반의 TC NCF 체계로 정리된다. NCF 공정의 기본 흐름은 필름 라미네이션, 다이 준비와 절단, 적층 정렬, 열압착 본딩, 경화로 구성된다. 여기서 핵심은 언더필이 별도의 충전 공정으로 분리되지 않고, 열압착 본딩 사건에 기능적으로 결박된다는 점이다. 즉 갭을 채우는 행위는 본딩 이후에 따로 수행되는 것이 아니라, 본딩 중 재료의 점탄성 유동과 겔화, 경화가 연속적으로 일어나면서 동시에 달성된다. 따라서 NCF의 성패는 필름 두께라는 정량 공급의 장점 위에서, 본딩 프로파일이 만드는 유동과 겔화와 경화의 시간 창을 얼마나 정밀하게 맞추느냐로 결정된다.

NCF의 첫 번째 핵심은 공급량의 규격화다. 필름 두께는 재료 볼륨을 초기 단계에서 규정한다. 액상 언더필에서 흔히 문제되는 토출량 편차, 퍼짐 편차, 가장자리 넘침과 같은 변동을 후단에서 보정하는 것이 아니라, 투입량 자체를 두께 공차로 통제한다. 이 특성은 미세 피치와 초박막 갭에서 결정적이다. HBM 적층에서 갭이 얇아질수록 재료 유입 공간이 줄어드는 것에 더해, 공기 배출 경로의 단면이 급격히 축소된다. 공기가 갭 내부에 포획되면 보이드가 남고, 보이드는 열저항을 크게 증가시키며 열사이클에서 응력 집중을 유발해 장기적으로 계면 박리의 기점이 된다. 따라서 보이드 억제는 언더필의 부가 목적이 아니라 고적층 HBM에서의 필수 요건이다. NCF는 본딩 사건 동안 점탄성 유동으로 공기를 밀

어내야 하므로, 유동성이 부족하면 보이드가 잔존하고, 유동성이 과도하면 다른 결함이 증가한다. 이 때문에 NCF는 잘 흐르는 재료가 아니라 특정 온도 구간에서만 충분히 흐르고, 이후에는 빠르게 구조를 고정하는 재료여야 한다. 결과적으로 유동의 시작 시점, 유동의 최대 구간, 겔화 개시 시점, 경화 속도는 하나의 연속 조건으로 묶여 평가된다.

NCF의 두 번째 핵심은 정렬 안정성과 다이 이동 억제다. 열압착 본딩은 열과 압력을 동시에 가하는 과정이며, 이 과정에서 필름이 흐르면서 전단력이 발생한다. 미세 피치에서는 미세한 측방향 이동도 범프 오픈과 브리징을 유발할 수 있다. 즉 보이드 억제를 위해 유동이 필요하지만, 그 유동이 정렬을 무너뜨리면 접촉 불량도 증가한다. 따라서 NCF 체계에서는 유동성과 정렬 유지가 동시에 만족되어야 하며, 이는 재료 물성만으로 해결되지 않는다. 본딩 압력의 상승 방식, 가열 속도, 접촉 순서, 정렬 유지 메커니즘, 그리고 필름의 점탄성 곡선이 하나의 세트에 맞아야 한다. 이 조건이 무너지면 보이드와 다이 이동과 범프 불량이 동시에 악화되는 동시 실패가 발생한다. 고적층에서는 이 동시 실패의 비용이 커진다. 한 층의 미세 불량이 스택 전체 불량으로 전이되기 때문이다.

NCF의 세 번째 핵심은 잔류응력 관리다. HBM은 다이가 박막화될수록 워페이스가 증가하고, 적층수가 늘수록 응력이 누적된다. NCF는 경화 과정에서 수축이 발생하고, 재료의 열팽창 특성이 실리콘 및 패시베이션과 다르면 열사이클마다 전단 응력이 반복된다. 이 응력은 계면 박리와 크랙으로 이어지며, 층수가 늘수록 누적 리스크가 커진다. 따라서 NCF 체계에서 신뢰성 스펙은 보이드 억제와 다이 이동 억제에 그치지 않는다. 경화 후 탄성률과 열팽창, 경화 수축률, 수분 흡수, 이온 청정도 같은 항목이 장기 신뢰성의 직접 변수로 관리되어야 한다. 삼성전자가 TC NCF를 전면으로 내세우는 이유를 제조 논리로 환원하면, 미세 갭에서 두께와 공급량을 선제 통제하고, 본딩 사건에서 보이드와 정렬을 동시에 관리하며, 높이 규격과 박막 다이의 휘어짐을 공정 조건으로 흡수하려는 선택으로 정리된다. 다만 이 체계는 본딩 사건이 반복되므로 적층수가 증가할수록 본딩 이벤트 반복 자체가 처리량 병목으로 작동할 수 있고, 본딩 조건이 미세하게 벗어나도 보이드와 다이 이동과 박리가 동시 악화될 수 있다는 점에서 공정 창이 좁아질 위험을 내포한다. 즉 NCF 체계는 정밀 제어가 성립할 때 강하지만, 정밀 제어가 흔들릴 때 손실이 급격히 커지는 구조를 가진다.

MUF는 충전과 봉지를 몰딩 사건으로 수행하는 언더필이며, SK하이닉스가 채택한 대표 경로는 MR MUF 체계로 정리된다. MR MUF는 범프 접합을 리플로우 중심으로 구성하고, 이후 또는 연동된 몰딩 과정에서 에폭시 몰딩 컴파운드로 다이 사이 갭과 범프 주변을 채워 구조를 고정하고 방열과 내구를 개선하는 접근이다. 여기서 핵심은 언더필이 본딩 사건에 결박되지 않고, 충전과 몰딩 사건이 독립적으로 존재한다는 점이다. 따라서 MUF의 성패는 본딩 중 유동 창이 아니라, 충전 사건에서의 압력, 진공, 금형 유로, 충전 속도, 탈기, 점도, 필러 분산과 같은 변수 집합에 의해 지배된다. 이 구조는 보이드 억제를 목표 함수로 독립시킬 수 있다는 강점을 제공한다. 공기 배출과 충전을 진공과 압력, 유동 경로 설계로 직접 통제할 수 있기 때문이다. 또한 몰딩은 스택 외곽까지 봉지해 구조 강성을 부여하므로 기계적 신뢰성을 강화할 수 있고, 재료 설계 측면에서는 필러를 통해 열팽창을 낮추고 열전도 경로를 설계해 언더필을 열 관리 구성요소로 활용할 수 있다.

그러나 MUF는 충전 사건을 독립시킨 만큼 그 사건이 새로운 병목과 결함 모드를 만든다. 첫째는 충전성이다. HBM의 갭은 얇고 경로가 길며 층수가 많아 유동 저항이 크다. 열과 응력에 유리하도록 필러 함량을 높이면 점도가 상승해 미세 갭 침투가 어려워지고, 충전 불량과 보이드가 증가할 수 있다. 즉 MUF는 물성을 강화할수록 충전성이 악화될 수 있는 상충을 내포한다. 둘째는 계면 접촉과 박리다. 몰

딩은 다이 측면과 패시베이션과 금속과 주변 구조물 등 다양한 계면을 동시에 만들고, 어느 계면에서든 접착이 약하면 열사이클에서 박리가 시작되어 전파될 수 있다. 셋째는 경화 수축과 잔류응력의 총량이다. 몰딩은 재료량이 커질 수 있어 경화 수축이 만드는 응력의 절대량이 증가할 수 있으며, 박막 다이에서는 이 응력이 워페이지로 전환되어 정렬 수율에 영향을 준다. 넷째는 열 이력이다. MR MUF는 리플로우와 결합되며, 리플로우의 고온 열 이력은 박막 다이 워페이지를 증폭시킬 수 있다. 따라서 MUF는 보이드 억제의 장점만으로 고적층에서 자동 우위를 확보하지 못한다. 보이드를 줄이는 동시에, 워페이지와 박리를 억제하고, 충전 불량 없이 높은 처리량을 유지해야 한다.

이 지점에서 MUF의 한계와 직접 충돌한 사례가 SK하이닉스의 고적층 확장 과정이다. SK하이닉스는 MR MUF를 핵심 차별 요소로 정립했으나, 적층수가 증가하고 다이가 더 얇아지는 구간에서는 워페이가 수율과 공정 창을 결정하는 우선 변수로 부상한다. 워페이가 커지면 정렬이 흔들리고, 정렬이 흔들리면 리플로우 접합과 몰딩 충전이 각각 설계대로 수행되더라도 스택 전체 수율은 하락한다. 또한 워페이는 몰딩 중 유동 분포를 불균일하게 만들어 보이드와 박리의 공간 분포를 악화시킬 수 있다. 결과적으로 MUF 체계에서 워페이는 보이드와 별개의 문제가 아니라, 보이드와 박리를 동시에 증폭시키는 상위 변수로 작동한다. 따라서 SK하이닉스가 개선형 MR MUF에서 워페이지 제어와 방열 특성 개선을 전면에 두는 것은, MR MUF가 고적층 확장에 충분조건이 아니라 워페이지 통제가 전제될 때에만 성립하는 필요조건임을 보여준다. 즉 MUF 체계가 고적층으로 진입하면서 직면한 가장 큰 장벽은 충전 자체의 성공 여부라기보다, 박막화가 만든 구조적 불안정성과 그 불안정성이 충전과 접합의 모든 결합 모드를 증폭시키는 방식이었다.

하지만 개선형 도입이 곧 한계의 소멸을 의미하지는 않는다. 층수가 증가할수록 워페이지와 박리의 위험은 비선형적으로 커지고, 높이 규격을 맞추기 위한 추가 박막화는 다이 강성을 더 낮춰 열 이력과 경화 응력에 대한 민감도를 급상승시킨다. MUF는 몰딩 재료의 경화 수축과 열팽창 차이를 동반하므로, 워페이가 충분히 억제되지 않으면 충전 품질이 좋아도 후속 적층 정렬과 장기 신뢰성에서 손실이 발생한다. 따라서 고적층 구간에서 MR MUF만으로 공정 창을 유지하려면, 워페이지 제어와 계면 접착, 충전성, 열 이력 관리가 동시에 만족되어야 하며, 이 동시 만족의 조건은 적층수가 늘수록 급격히 좁아진다. 이 상황에서 SK하이닉스가 하이브리드 본딩을 병행 검토하는 흐름은, MUF 체계의 한계를 늦추는 개선과 별개로, 접합 패러다임 자체를 바꿔 높이와 열 경로, 미세 피치 대응에서 구조적 여유를 확보하려는 선택으로 이해된다. 즉 개선형 MR MUF는 MUF 체계 내부에서 공정 창을 확장하려는 시도이고, 하이브리드 본딩 검토는 MUF 체계의 구조적 제약을 다른 접합 구조로 우회하려는 시도다. 이 둘이 동시에 진행되는 것은 모순이 아니라, 고적층에서 요구되는 목표 함수가 보이드 억제, 워페이지 억제, 처리량 유지, 열 신뢰성 확보로 다중화되어 어느 하나의 개선만으로는 충분조건이 되기 어렵다는 점을 반영한다.

결론적으로 NCF와 MUF의 비교는 언더필 재료의 우열 판단이 아니라 결합 통제의 귀속 구조 선택이다. 삼성전자의 NCF 체계는 본딩 사건에 갭 충전을 결박시키고, 필름 두께로 초기 조건을 고정한 뒤, 본딩 프로파일의 정밀 제어로 보이드와 다이 이동과 높이 규격 문제를 동시에 관리한다. 따라서 정밀 제어가 성립할수록 미세 갭에서의 예측 가능성이 높다. 반면 본딩 사건 반복이 처리량 병목이 되기 쉬우며, 공정 창이 흔들릴 경우 보이드와 정렬 불량과 박리가 동시 악화될 위험이 크다. SK하이닉스의 MUF 체계는 충전과 몰딩 사건을 독립시켜 보이드 억제를 목표화하고, 구조 봉지로 강성과 열 경로를 설계할 수 있다. 그러나 충전성, 계면 접착, 경화 응력, 리플로우 열 이력이라는 독립 변수들을 동시에 관리해야 하며, 고적층과 박막화가 진행될수록 워페이지가 상위 변수로 작동해 모든 결합 모드를 증폭

시킨다. SK하이닉스가 개선형 MR MUF에서 워페이지 제어를 전면화하고, 동시에 하이브리드 본딩을 병행 검토하는 것은, MUF의 장점을 유지하면서도 고적층에서 공정 창이 좁아지는 구조적 한계를 완화하기 위한 복수의 해법이 필요하다는 점을 보여준다. 따라서 고적층 HBM에서 언더필 방식 선택은 보이드 제거만으로 평가될 수 없고, 박막 다이가 강제되는 조건에서 워페이지와 계면 신뢰성과 처리량을 동시에 제약으로 놓고 어느 사건에 공정 변수를 집중할 것인지에 의해 결정된다.