

고집적 AI 반도체 테스트 소켓용 미세 피치 블레이드 핀의 하프 에칭 두께에 따른 기계적 특성 분석

오지연*, 이예은*, 박선아*, 이회준*
*미르텍알앤디 주식회사

e-mail : ohjiyeon2242@naver.com, yaeun97@naver.com,
sunah123456@naver.com, mirtech77@naver.com

Mechanical Characteristic Analysis of Fine-pitch Blade Pins for High-density AI Semiconductor Test Sockets according to Half-etching Thickness

Ji-yeon Oh*, Ye-Eun Lee*, Sun-Ah Park*, Hee-Joon Lee*
*Mirtech R&D Corporation

본 연구에서는 비선형 정적 유한요소해석을 통해 블레이드 핀의 탄성 구간에 하프 에칭(Half-etching)을 적용하여, 하프 에칭이 핀의 기계적 거동 및 접촉 하중 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 가소성 모델과 선형 탄성 모델을 병행 적용하였다.

해석 결과, 하프 에칭 구간의 두께를 0.10 mm에서 0.05 mm까지 감소시킴에 따라 반력이 0.028 N에서 0.014 N으로 50% 선형 감소하는 저하중 특성을 확인하였다. 응력 및 변형률 분석 측면에서는 두께 감소에도 불구하고 최대 응력과 상당 변형률(Equivalent Strain)이 안정적인 추이를 유지하였으며, 특히 하프 에칭 구간 두께 0.06 mm 모델은 0.10 mm 단일 에칭 모델 대비 오히려 낮은 응력 및 상당 변형률을 기록하였다. 이러한 경향성은 핀의 형상 차이에도 불구하고 유사하게 나타났으며, 이를 통해 0.06 mm 조건이 구조적 안정성과 하중 저감 효과를 동시에 만족하는 최적의 설계 지점임을 도출하였다. 본 연구는 하프 에칭 공정을 통한 탄성 구간의 두께 조절이 미세 피치 검사용 소켓의 저하중 구형 및 구조 안정성 확보를 위한 유효한 설계 전략임을 시사한다.

1. 서론

최근 인공지능(AI), 고성능 컴퓨팅(HPC), 자율주행 및 데이터센터 산업의 발전에 따라 반도체 소자의 고집적화 및 고속화가 가속화되고 있으며, 이에 따라 패키지 구조의 미세 피치(Fine-pitch)화가 빠르게 진행되고 있다[1, 2]. 이러한 변화는 테스트 공정에서도 높은 정밀도와 신뢰성을 요구하게 하며, 특히 미세 피치 환경에서의 안정적인 전기적 접촉 확보는 반도체 검사 공정의 핵심 기술로 부각되고 있다.

반도체 검사용 소켓은 DUT(Device Under Test)와 반복적인 전기적 접촉을 형성하는 핵심 부품으로, 접촉 불안정은 검사 오류, DUT 손상 및 수율 저하로 직결될 수 있다[3]. 현재 널리 사용되는 검사용 소켓은 포고 핀(Pogo pin) 및 러버(Rubber) 타입으로 구분되며, 각각 장단점을 가진다. 포고 핀 타입은 높은 내구성과 안정적인 전기적 특성을 가지지만, 피치가 좁아질수록 내부 스프링 및 부품의 소형화가 물리적 한계에 이르러 제조 공정의 난이도가 급격히 상승하며, 구조적 간섭 문제로 인해 미세 피치 환경 대응에 한계가 존재한다[4]. 반면 러버 타입은 미세 피치 대응이 용이하고 구조가 단순하나, 고주파 환경에서의 신호 손실과

장기 신뢰성 확보 측면에서 한계를 가진다[5].

이러한 한계를 보완하기 위해 최근 검사용 소켓 분야에서는 에칭 공정을 기반으로 한 블레이드 핀 방식이 미세 피치 대응을 위한 대안 구조로 주목받고 있다. 블레이드 핀은 금속 박판을 정밀 에칭하여 제작되므로 형상 재현성이 우수하며, 접촉부 및 탄성부의 구조 설계를 통해 접촉 안정성, 하중 특성 및 전기적 전달 특성을 조절할 수 있다. 또한, 제작 공정이 비교적 단순하여 제조 비용 절감 측면에서도 유리하다. 기존 MEMS 공정을 이용한 블레이드 핀은 니켈(Ni) 합금 기반으로 제작되어 상대적으로 높은 하중 특성을 나타내지만[7], 에칭 공정을 통해 구리(Cu) 소재의 핀을 제작할 경우 낮은 하중 특성과 우수한 전기 전도도를 확보할 수 있다[8].

또한, 하프 에칭(Half-etching) 공정은 블레이드 핀 전체가 아닌 변형이 집중되는 탄성 구간의 두께를 선택적으로 감소시키는 설계 방법으로, 해당 구간의 굽힘 강성을 낮추고 동일 변위 조건에서 발생하는 반력, 즉 접촉 하중을 조절하는 데 활용될 수 있다. 이러한 설계는 접촉부와 고정부의 형상 및 강성을 유지하면서 탄성 구간의 변형을 유도할 수 있어, DUT 패드에 가해지는 기계적 부담을 줄이는 데 유리하다. 그러나 두께 감소는 응력 및 변형률의 상승을 초래하여 구조적 안정성을 저해할 수 있는 요소

이다. 이에 따라 핀 형상 및 에칭 두께에 따른 변형 거동과 구조 안정성의 정량적 비교 연구가 요구되나, 현재 관련 선행 연구는 미비한 상태이다[9, 10].

따라서 본 연구에서는 하프 에칭 공정이 블레이드 핀의 기계적 성능 최적화에 미치는 효율성을 검증하고자 한다. 이를 위해 비선형 정적 유한요소해석을 수행하여 탄성 구간의 에칭 두께 변화에 따른 기계적 거동 및 하중 저감 특성을 정량적으로 분석하였다. 특히 가소성 모델과 선형 탄성 모델의 교차 활용을 통해 해석의 신뢰성을 확보하였으며, 이를 통해 최대 응력과 재료 내부의 변형 집중 정도를 나타내는 상당 변형률 및 일정 변위 인가 시 발생하는 저항력인 반력을 종합적으로 분석하여 미세 피치 환경에 적합한 최적의 설계 지표를 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 해석 조건 및 방법

본 연구에서는 블레이드 핀의 형상 및 하프 에칭 두께에 따른 기계적 거동을 정량적으로 분석하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SolidWorks를 활용하여 비선형 정적 유한요소해석(FEA)을 수행하였다. 해석 모델은 반도체 검사용 소켓에 적용되는 블레이드 핀 단일 구조를 기반으로 구성하였으며, 외부 하중 인가 시 변형이 집중되는 탄성 구간을 중심으로 분석을 진행하였다.

소재는 높은 기계적 강도와 우수한 전기적 특성을 갖추어 반도체 검사용 접촉 구조의 표준으로 널리 쓰이는 베릴륨 구리(BeCu, C17200)를 채택하였다. 본 해석은 블레이드 핀 1개를 사용한 핀 단독 모델로 수행되었으며, 가소성 모델만 적용할 경우 응력이 소성 영역에서 포화(Saturation)되는 현상이 발생한다. 이로 인해 하프 에칭 두께 변화에 따른 미세한 응력 분포 및 집중 경향의 변별력을 확보하기 어렵다.

따라서 하프 에칭 두께가 블레이드 핀의 기계적 응답 특성에 미치는 구조적 민감도를 파악하기 위하여 가소성(von Mises) 모델과 선형 등방성 탄성 모델을 병행하였다.

가소성 모델은 실제 작동 환경과 동일한 눌림 변위에서 발생하는 상당 변형률(Equivalent Strain) 및 반력(Reaction Force)을 물리적으로 정확히 산출하기 위해 적용되었으며, 이에 사용된 가소성 물성치는 [표 1]과 같다. 이와 함께 설계 변수에 따른 최대 응력(Max Stress)의 변화는 선형 등방성 모델을 통해 정량적으로 검토하였으며, 해석에 사용된 탄성 물성치는 [표 2]에 정리하였다.

[표 1] BeCu 17200 가소성 von Mises 물성치

속성	값	단위
탄성계수	125000	N/mm ²
포이송비	0.3	-
인장강도	469	N/mm ²
항복강도	172	N/mm ²
질량 밀도	8250	kg/m ³

[표 2] BeCu 17200 선형 등방성 탄성 물성치

속성	값	단위
탄성계수	125000	N/mm ²
포이송비	0.3	-
전단계수	50000	N/mm ²
질량 밀도	8250	kg/m ³
인장 강도	469	N/mm ²
항복 강도	172	N/mm ²

위 해석 모델을 기반으로, 실제 반도체 검사 공정에서의 반복 접촉 조건을 모사하기 위해 블레이드 핀 상단부에 0.10 mm의 강제 변위(Displacement)를 인가하였다. 모든 모델에는 동일한 하중 및 구속 조건을 적용하여 형상 및 하프 에칭 두께 변화에 따른 기계적 거동을 비교할 수 있도록 하였으며, 이를 통해 최대 응력, 상당 변형률 및 반력 특성을 분석하였다.

하프 에칭 공정이 핀의 기계적 거동에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위하여, 탄성 구간의 두께를 주요 설계 변수로 설정하였다. 단일 에칭 모델(두께 0.10 mm)을 대조군(Control Group)으로 설정하고, 탄성 구간의 두께를 0.01 mm 간격으로 0.05 mm까지 감소시켜 총 6개의 해석 모델을 구성하였다(0.10, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06 및 0.05 mm). 각 설계 조건에 따라 선형 등방성 탄성 모델과 가소성 모델을 병행 적용하여 최대 응력, 상당 변형률(Equivalent Strain) 및 반력(Reaction Force)을 산출하고, 이를 바탕으로 두께 변화에 따른 기계적 특성의 비교 분석을 수행하였다.

2.2 핀 형상 설계 및 특징

본 연구에서는 접촉 방식과 구조적 목적에 따라 차별화된 두 가지 블레이드 핀 형상을 설계하여 해석을 수행하였다. 각 형상의 구체적인 구조와 접촉부 설계 특징은 [그림 1]에 나타내었다.



[그림 1] 블레이드 핀 형상: (a) 형상 1, (b) 형상 2

형상 1은 상·하부 접촉부에 돌출 구조를 적용한 형상으로, DUT 및 테스트 보드와의 접촉 위치를 명확히 형성하기 위해 설계하였

다. 돌출된 접촉부는 초기 접촉 시 국부 접촉압을 확보하는 데 유리할 수 있으며, 패드 표면의 산화막 또는 미세 오염층에 의한 접촉 불안정성을 완화하는 데 도움을 줄 수 있다. 그러나 돌출부 형상은 특정 위치에서 응력 및 변형이 집중될 가능성이 있으므로, 본 연구에서는 하프 에칭 두께 변화에 따른 기계적 거동을 형상 2와 비교하여 분석하였다.

형상 2는 상·하부 접촉부를 단순화한 블록형 구조로, 형상 1 대비 접촉부 형상이 단순하여 제작 및 치수 관리가 용이하도록 설계하였다. 해당 구조는 돌출부가 없는 평탄한 접촉부를 기반으로 하므로, 접촉부 형상 변화에 따른 기계적 거동을 비교하기 위한 기준 형상으로 활용하였다. 본 연구에서는 형상 2에도 형상 1과 동일한 하프 에칭 두께 조건을 적용하여, 접촉부 형상 차이와 하프 에칭 변수에 따른 응력, 변형률 및 반력 특성을 비교하였다. 본 연구에서는 [그림 1]과 같이 서로 다른 기하학적 특성을 가진 두 가지 형상 모델에 동일한 하프 에칭 변수를 적용함으로써, 디자인의 차이와 관계없이 하프 에칭 공정이 기계적 특성 개선 및 하중 저감에 미치는 일관된 효과를 검증하고자 하였다.

3. 결과 및 분석

본 연구에서는 블레이드 핀의 하프 에칭 공정을 통한 탄성 구간 두께 변화에 따른 기계적 거동을 분석하기 위하여 최대 응력, 상당 변형률 및 반력 변화를 비교 분석하였다.

3.1 최대 응력 및 변형 특성

선형 등방성 모델을 통한 최대 응력(Max Stress) 분석 결과, 두께 감소에도 불구하고 응력 값은 급격한 상승 없이 안정적인 추이를 보였다. 특히 형상 2의 경우, 두께 0.06 mm 조건에서 전체 모델 중 가장 낮은 응력 수치를 나타내며 구조적 안정성이 극대화됨을 확인하였다.

가소성 모델을 통해 산출된 상당 변형률(Equivalent Strain) 역시 두께 감소에 따라 형상 1은 7.8×10^{-2} 에서 9.7×10^{-2} , 형상 2는 6.4×10^{-2} 에서 7.7×10^{-2} 수준의 안정적인 범위를 유지하였다. 형상별 두께 조건에 따른 세부 수치 결과는 [표 3] 및 [표 4]와 같다.

[표 3] 형상 1에 대한 탄성 구간 두께 변화에 따른 결과

탄성 구간 두께 [mm]	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05
응력 [MPa]	3373	3368	3497	3359	3371	3384
상당 변형률	8.743 E-02	7.884 E-02	8.365 E-02	9.748 E-02	7.950 E-02	9.068 E-02
반력 [N]	0.0281	0.025	0.0225	0.0196	0.017	0.014

[표 4] 형상 2에 대한 탄성 구간 두께 변화에 따른 결과

탄성 구간 두께 [mm]	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05
응력 [MPa]	3353	3412	3425	3428	3320	3412
상당 변형률	6.922 E-02	7.687 E-02	6.905 E-02	7.713 E-02	6.475 E-02	6.839 E-02
반력 [N]	0.0279	0.0255	0.0224	0.0197	0.0167	0.014

3.2 반력 특성 분석

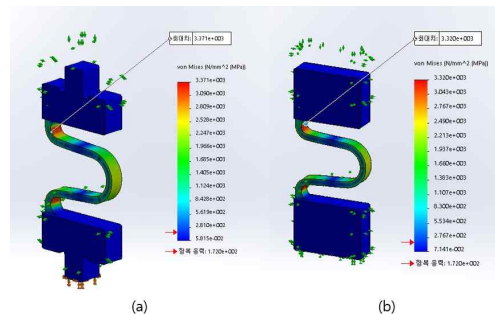
[그림 2]는 하프 에칭에 따른 탄성 구간의 두께 변화와 반력 (Reaction Force) 간의 관계를 나타낸다. 해석 결과, 반력은 두께가 감소함에 따라 뚜렷한 선형적 감소 경향을 보였으며, 0.10 mm에서 0.05 mm로 감소할 경우 약 0.028 N에서 0.014 N으로 50% 감소하였다. 이는 하프 에칭을 통한 탄성 구간의 두께 제어가 동일 변위 조건에서 접촉 하중을 효과적으로 저감할 수 있음을 의미한다.



[그림 2] 탄성 구간 두께 변화에 따른 반력(Reaction Force) 그래프

3.3 응력, 반력 및 변형률 특성 종합 분석

[그림 3]은 탄성 구간 두께 0.06 mm 조건에서 형상 1과 형상 2의 응력 분포를 비교한 유한요소해석 결과이다. 두 형상 모두 최대 응력은 주로 탄성 구간의 곡률이 큰 부위에서 발생하였으며, 이는 압축 변위가 인가될 때 해당 구간에서 굽힘 변형이 집중되기 때문으로 판단된다. 형상 1과 형상 2는 접촉부 형상에 차이가 있음에도 불구하고, 주요 응력 집중 위치와 전체적인 응력 분포 경향은 유사하게 나타났다.



[그림 3] 탄성 구간 두께 0.06 mm에서의 응력 분포: (a) 형상 1, (b) 형상 2

탄성 구간 두께 0.06 mm 조건은 탄성 구간의 굽힘 유연성을 확보하면서도, 과도한 응력 집중을 유발하지 않는 균형 조건으로 판단된다. 특히 앞선 반력 분석 결과에서 확인한 바와 같이, 탄성 구간의 두께가 감소함에 따라 반력은 감소하는 경향을 보였으며, 0.06 mm 조건에서는 하중 저감 효과와 구조 안정성을 동시에 고려할 수 있는 설계 지점으로 나타났다.

또한 가소성 모델 분석 결과, 탄성 구간 두께 0.06 mm 모델은 0.10 mm 기본 모델 대비 낮은 상당 변형률(Equivalent Strain)을 나타내었다. 이는 두께 감소에 따라 탄성 구간의 구조적 유연성이 증가하면서, 동일 변위 조건에서 국부적인 변형 집중 및 소성 변형 가능성이 완화되었음을 의미한다.

종합적으로, 하프 에칭을 통한 탄성 구간의 두께 조절은 블레이드 핀의 반력, 응력 및 변형률 특성을 제어하는 데 유효한 설계 변수로 확인되었다. 두 가지 핀 형상 모두에서 유사한 개선 경향이 나타난 점을 고려할 때, 하프 에칭 기법은 특정 접촉부 형상에만 제한되지 않고 미세 피치 검사용 소켓의 저하중 및 구조 안정성 확보를 위한 설계 전략으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 블레이드 핀의 하프 에칭 두께 변화에 따른 기계적 거동을 정량적으로 분석하고, 구조적 안정성과 설계 유효성을 평가하였다. 두 가지 핀 형상에 대하여 가소성 및 선형 등방성 모델을 병행 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 하프 에칭을 통한 탄성 구간의 두께 감소에도 불구하고 최대 응력은 급격한 상승 없이 안정적인 추이를 유지하는 것으로 나타났다. 특히 형상 2의 두께 0.06 mm 조건에서 최소 응력 수치가 도출되었다. 이는 하프 에칭을 적용하지 않은 단일 에칭 모델(0.10 mm) 대비 응력 집중을 완화하여, 두께 감소가 구조적 파손의 원인이 아닌 오히려 응력 분산의 효과적인 수단이 될 수 있음을 증명한다.

둘째, 상당 변형률 역시 두께 변화와 관계없이 안정적인 범위 내에서 유지되었다. 이는 하프 에칭 적용 시에도 변형이 특정 구간에 과도하게 집중되지 않고 안정적인 기계적 추종성을 보임을 의미하며, 하프 에칭 두께 조절이 박판 구조에서도 구조적 건전성을 확보하기 위한 유효한 설계 방법이 될 수 있음을 시사한다.

셋째, 반력 분석 결과, 하프 에칭 적용 시 탁월한 하중 저감 효과가 확인되었다. 단일 에칭 모델(0.10 mm)의 반력이 0.028N이었던 것에 비해, 두께를 0.05 mm로 감소시켰을 때의 반력은 0.014N으로 50%의 뚜렷한 감소를 보였다. 이러한 하중 저감 특성은 미세 피치 환경에서 DUT(Device Under Test)의 손상을 방지하고 테스트 인터페이스의 수명을 향상시키는 결정적인 요소로 작용할 수 있다.

종합적으로, 하프 에칭 공정을 적용한 블레이드 핀은 단일 에칭 모델 대비 구조를 안정적으로 유지하면서도 접촉 하중을 효과적

으로 낮출 수 있음이 확인되었다. 특히 두께 0.06 mm 조건은 구조적 안정성과 반력 저감 효율을 동시에 만족하는 최적의 설계 지점으로 도출되었다.

결론적으로 본 연구는 하프 에칭 두께 조절이 블레이드 핀의 기계적 거동을 최적화하기 위한 유효한 설계 변수임을 확인하였으며, 향후 고집적 반도체 검사용 소켓의 저하중 및 고신뢰성 설계를 위한 정량적 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 과학기술정보통신부 RS-2026-25537827의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. G. Pecht and R. R. Tummala, "Fundamentals of Microsystems Packaging," 2nd Edition, McGraw-Hill Education, 2019.
- [2] International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), "More Moore: 2023 Update," IEEE, 2023.
- [3] 함승주, 김준성, 조승현, "반도체 테스트용 마이크로 프로브 핀의 접촉 역학 및 전기적 저항 분석," IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 882-890, 2018.
- [4] P. G. Slade, "Electrical Contacts: Principles and Applications," 2nd Edition, CRC Press, 2017.
- [5] 김희남, 김경호, 최재혁, "전도성 엘라스토머 소켓의 고속 성능 특성 분석," 마이크로전자 및 패키징 학회지, Vol. 25, No. 3, pp. 45-52, 2018.
- [6] D. M. Allen, "Photochemical Machining: A Review of High-Precision Chemical Etching Processes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 110-115, 2004.
- [7] J. R. Davis, "Copper and Copper Alloys: ASM Specialty Handbook," ASM International, 2001.
- [8] 김영진, 정승부, "미세 피치 에칭 핀의 기계적 거동에 대한 유한요소해석," IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 11, No. 9, pp. 1421-1428, 2021.
- [9] 김민수, 윤상원, "미세 피치 테스트 애플리케이션을 위한 블레이드형 프로브 핀의 강성 최적화," Microelectronic Engineering, Vol. 245, 111584, 2021.
- [10] Dassault Systèmes, "SolidWorks Simulation: Nonlinear and Material Plasticity Analysis Theory Guide," Release 2024.