

전자 패키지 신뢰성 평가기술의 현황과 전망

글 ◻ 이 순 복 / KAIST 기계공학과, 교수 e-mail ◻ sblée@kaist.ac.kr

이 글에서는 전자 패키지 열적·기계적 신뢰성 평가 기술의 현황과, 전자 패키지의 신뢰성 설계를 위한 피로 실험, 미소 변형 측정, 유한요소 해석을 통한 파손 해석 등의 관련 기술들을 소개한다.

전자 패키지는 반도체 소자, 저항체, 축전체 등을 둘러싼 전기 하드웨어 구조물을 일컬으며, 전력 공급 및 신호의 분산, 회로의 보호, 열 발산 등의 목적으로 회로의 실장에서부터 최종 상품화에 이르기까지의 제작되어진 거의 모든 제품 외형을 아우른다. 지난 수 십년 간 눈부시게 발전해온 반도체, 통신, 사무 자동화 기기, 가전 제품 등 전자 제품기술에 발맞추어 전자 패키징 기술 역시 소형화, 직접화, 다기능화의 시장 요구에 끊임없이 직면해 왔으며, 많은 기술 개발이 이루어져 왔다. 특히 반도체 다이(Die)와 비

교하여 전자 패키지는 제품 원가의 대부분을 차지하여, 원가절감을 통한 시장 경쟁력 확보를 위해 끊임없는 기술 혁신 노력이 경주되어 왔다. 현재 반도체의 전자 패키징 기술은 1세대 표면실장형 반도체 패키지에서 BGA(Ball Grid Array), CSP(Chip Size Packaging) 등 차세대 패키지로 옮겨가는 추세이며, 이에 따라 반도체 패키징 및 조립 장비 시장은 2003년에 전년도 대비 15% 증가한 19억 달러에 이를 전망이다.

전자 패키지의 신뢰성 평가 기술

전자 패키지의 신뢰성 평가 기술은 컴퓨터, 통신기기, 의료기기 등 정보화시대의 핵심요소가 되고 있는 각종 첨단 전자·전기 제품에 사용되는 반도체 및 전자부품의 기계적 신뢰성을 다루는 분야이다. 전자 소자들이 다기능화, 경박 단소화 됨에 따라 지금까지 크게 문제되지 않았던 기계적인 신뢰성

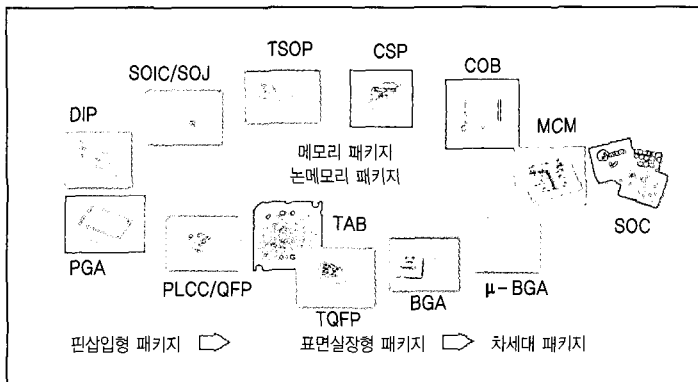


그림 1 전자 패키지의 발전 추이



문제들이 많이 노출되게 되었다. 대표적인 전자 패키지의 기계적인 파손 사례들로서, 패키지 열변형에 의한 접합부의 층간 분리,

소더 조인트의 피로파손 등이 있으며, 이러한 패키지의 기계적 파손은 전자소자의 전기적 기능 수행에 직접적인 영향을 주기 때

문에, 전자소자 자체의 신뢰성뿐만 아니라 다양한 패키지 방법에 따른 기계적 신뢰성 확보가 요구된다. 대부분의 패키지 관련 신뢰성 문제는 피로현상에 의한 균열의 발생과 밀접한 관련이 있으므로, 패키지 설계단계에서 파괴역학적 해석 및 피로강도설계기술과 관련된 기계공학적인 접근이 요구되고 있다.

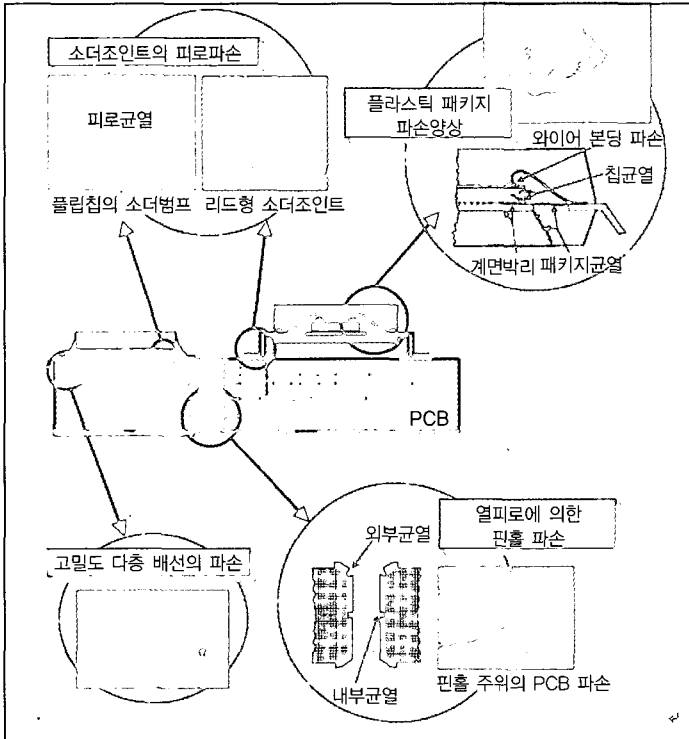


그림 2 전자 패키지의 기계적 파손 사례

전자 패키지 신뢰성 시험

서로 다른 열팽창 계수를 갖는 재료들로 구성되어 있는 전자 패키지는 전원 공급, 외부 환경 온도의 변화 등에 의한 열 응력에 노출되어 있으며, 특히 BGA 소더 조인트의 경우 리드(lead) 없이

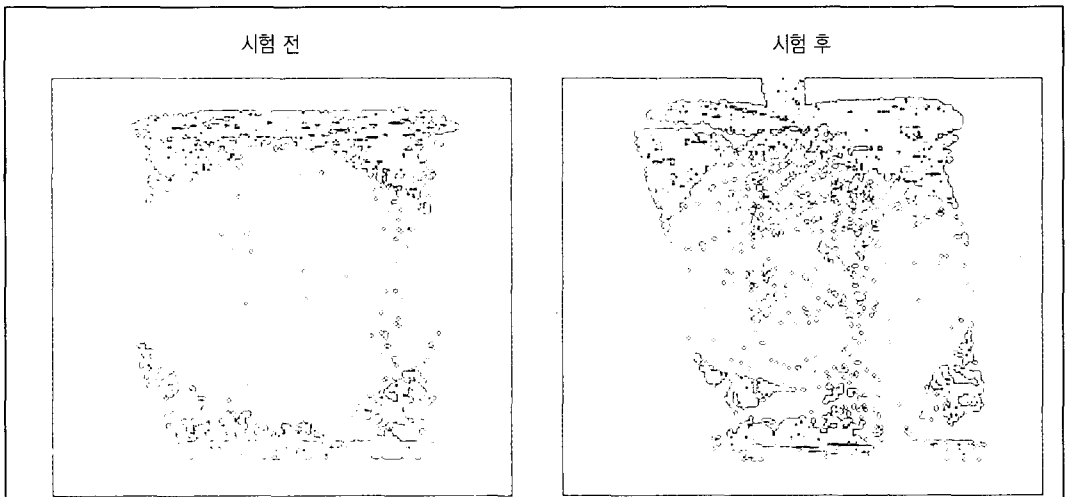


그림 3 열변형에 의한 소더 조인트의 파손 사례

소더 재료만으로 열 하중을 지지하게 되어 소더의 열피로가 파손의 큰 원인이 될 수 있다. 패키지를 구성하는 재료들의 열팽창 계수차이에 의한 열변형과 온도 구배로 인한 뒤틀림(warpage)으로 인한 전자 패키지의 신뢰성을 평가하기 위하여 여러 환경 시험법이 개발되어 왔다. 국제 규격으로는 IEC(International Electro-technical commission), ISO(International Organization for Standardization) 등이 있고, 국가 규격으로 KS(Korea (industrial) Standard), MIL(Military standards of the Department of Defense of US), JIS (Japanese Industrial Standards), BS(British Standards) 등이 있으며, JEDEC(Joint Electron Device Engineering Council)이나 EIAJ(Electronic Industries Association of Japan)와 같은 단체 규격들이 존재 한다. 이중 전자 패키지의 신뢰성을 평가하기 위한 시험법은 주로 열피로 실험으로, 챔버 내에 시편을 넣고 열하중을 주는 방법 이다. 챔버에서 시편의 온도는 챔버 안의 온도 환경으로 조절되며 시편 전체에 균일한 온도 사이클을 가하게 된다. 이 시험법으로 확인된 소더 조인트의 수명에 영향을 미치는 인자들로는 소더 조인트에 가해지는 온도 범위, 사이클 주파수, 높은 온도에서의 지속시간, 온도 변화 속도 등이 있다. 일반적으로 온도 범위 및 시험 시간은 각 규격과 신뢰성 평가기준에 따라 조금씩 차이는 있으나 $-55\sim 150^{\circ}\text{C}$, $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$ 등의 온도 범위로 한 시간에 2사이클로 실험하는 것이 보통이다. 테스트되는 소더 조인트들은 전기적으로 연결된 daisy chain으로 연결되어 저항 측정을 통해 소더 조인트

의 파손 여부를 결정하며, 통계처리를 통해 소더 조인트의 신뢰성을 평가한다.

이와 같이 챔버의 온도를 조절하여 실험하는 열피로 시험법 외에, 실제 디바이스가 On/Off될 때마다 나타나는 온도 구배와 열변형에 대한 신뢰성 실험을 위해, 칩의 발열을 통해 열피로 실험을 하는 파워 사이클링(power cycling) 테스트가 있으며, 초기 불량 영역에 해당하거나 정상상태의 수명 이전에 파손이 일어날 수 있는 디바이스를 제거 하기 위한 고온 유지 실험, 습도 영향성을 고려하기 위한 포화 혹은 불포화 증기 가압실험 등이 사용되고 있다.

전자패키지의 변형 측정 기법

전자패키지가 고성능화, 경박 단소화 됨에 따라 온도 변화에 의한 열변형 문제는 더욱 더 심각해지고 있고, 이로 인해 유발되는 응력 및 변형률을 추정하기 위해서 유한요소 해석(Finite Element Analysis) 등의 수치적인 해석이 집중적으로 이루어져 왔다. 수치적인 접근 방법이 전자패키지와 같은 미소 구조물의 해석에 용이하게 사용될 수 있지만, 그 결과는 보통 다른 방법에 의한 검증을 필요로 한다. 결과적으로 전자패키지의

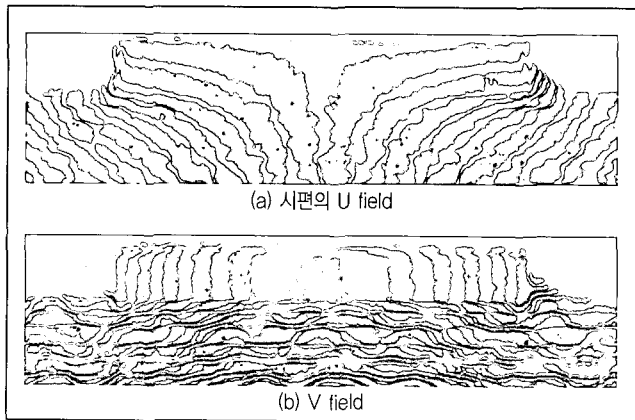


그림 4 ACA 플립 칩의 모어레 변형장



변형해석에 있어서 수치적인 해석 방법의 정확도를 높이기 위해, 발전된 실험적인 기술이 요구되었고 그 대표적인 예로 광학적인 측정기법들이 많이 활용되고 있다. 그 광학적인 측정기법 중 하나인 모아레 간섭계를 이용한 변형측정은 다소 새로운 기술이기는 하지만, 급속하게 발전되어 유용한 공학적 도구로 활용되고 있다. 모아레는 두 개 이상의 주기적인 패턴이 겹쳐질 때 만들어지는 간섭무늬로 실제 물체의 움직임을 증폭하여 표현하여, 물체의 변형해석이나 비접촉 형상 측정 분야에 주로 이용되어 왔다. 최근에는 이 방법의 응용 분야가 전자부품 소자들의 열변형 해석에 이르기까지 확장되었다. 이와 같이 모아레 간섭계를 이용한 소더 조인트의 평면 변형을 측정 기법 외에도, 그림자식 모아레 혹은 Fizeau 간섭계를 이용한 전자패키지의 뒤 틀림 측정 기법, 시편의 표면에 레이저를 조사할 때 나타나는 스페클(speckle) 패턴을 이용한 모아레 간섭계 등이 전자패키지 소더 조인트의 변형을 측정하는데 사용되고 있다.

전자 패키지 소더 조인트의 기계적 물성 측정

전자패키지의 소더 조인트는 DIP(Dual Inline Packaging)에서 CSP (Chip Size Packaging), Flip chip 등의 차세대 패키지 기술에 이르기까지 광범위 하게 사용되며, 리드를 사용하여 구조물의 변형을 지지하던 PTH(Pin Through Hole) 타입의 기존의 패키지에서 리드없이 소더 조인트 만으로 칩을 연결하는 BGA 타입의 표면실장형 차세대 패키지의 사용이 늘어남에 따라 그 신뢰성 확보에 많은 관심이 기울어 지고 있다. 또한 환경에 대한 관심과 규제가 강화되면서 지금까지 전자패키지에 사용되어 오던 소더 조인트에 납 성분을 사용하지 않는 무연 소더를 사용하고자 하는 시도가 활발히

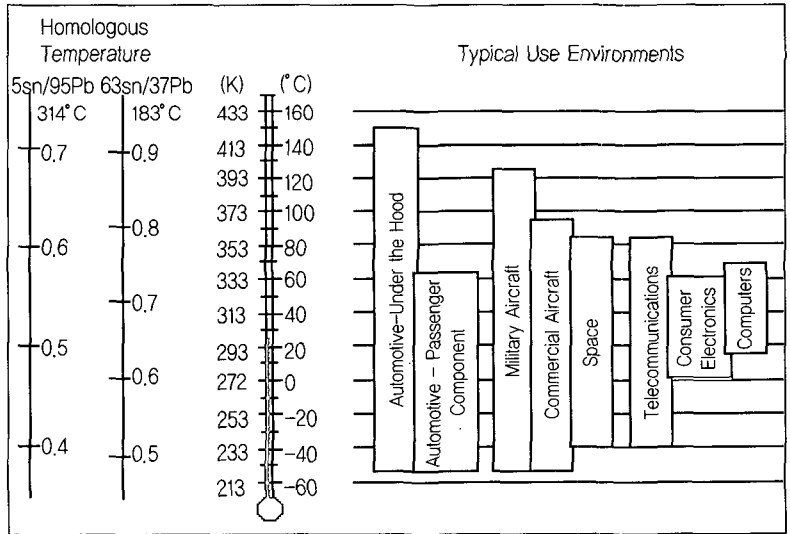


그림 5 전자 패키지의 사용 온도

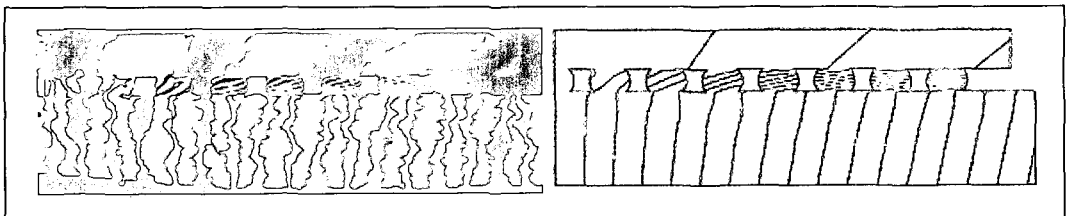


그림 6 모아레와 유한요소 해석을 이용한 변형 측정



진행되고 있다. 그러나 지금까지 개발된 무연 소더들은 대부분 녹는 점이 기존에 사용되던 납을 포함하는 소더 재료에 비해 높아, 패키징 공정 온도가 따라서 상승하는 단점이 있어, 전자 패키지 전체 재료의 온도에 따른 신뢰성 문제를 다시 검토해야 하는 어려움이 있다. 특히 무연 소더의 기계적 신뢰성은 크리프, 탄소성 변형 해석, 열피로 실험 등 실험이 까다롭고 영향인자가 많아 특별히 많은 주의가 기울여지고 있다. 전자 패키징에 주로 사용되는 소더 재료는 녹는점이 낮아 일반적으로 사용되는 온도 범위가 상대적으로 고온에 속하여 크리프현상이 많이 나타나며, 패키지 재료의 열팽창 계수 차이에 의한 열하중에 노출 되어 있어 반복 응력에 대한 기계적 거동을 측정하고 평가하는 것이 매우 중요하다. 최근 소더 조인트의 피로 파손에 의한 파손 인자 평가 및 신뢰성을 평가하기 위하여 미소 시험기를 이용한 시험 기법들이 개발되어 응용되고 있다. 특히 이와 같이 미소 시험기를 이용한 여러 시험은 열피로 시험과 비교하여 상대적으로 짧은 시간 내에 실험 결과를 얻을 수 있어, 무연 소더 조인트의 크리프 및 피로 특성을 평가하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

유한 요소 해석을 통한 파손 해석

유한요소법은 1930년대에 개발된 Matrix 이론을 사용하여 1960년대에 영국과 미국에서 개발되었으며, 1970년대 이후 컴퓨터의 발전과 더불어 구조해석, 진동해석, 기구 운동해석, 소성가공해석, 열유체 해석, 전자계 해석 등 각 분야에 응용되며, 급속히 발전해 왔다. 구조물에 대해 요소의 공통되는 점, 선 및 면 등에서 여러가지 경계조건을 사용하여 수식을 만들고, 이를 이용해 구조물 전체에 대한 연립 대수 방정식을 만들어

근사해를 구하는 유한요소해석은 여러 가지 엔지니어링(engineering) 분야에 적용이 가능하지만, 구조분야에서 가장 먼저 적용이 되었고, 현재는 다양한 분야에서 적용이 되고 있다. 전자패키지의 신뢰성 평가에 있어서도 유한요소해석은 빼놓을 수 없는 신뢰성 평가기술의 하나로, 열전달 해석, 패키지의 변형 및 응력 해석, 최적 설계, 크리프 및 탄소성 거동하의 파손 인자 검출을 위해 다각도로 사용되고 있다. 전자 패키지의 경우, 유한요소해석은 '의사결정을 위한 참고용이 아니라 정확하게 의사 결정을 할 수 있게 결과를 제공해주는 수단'이 될 수 있을 정도의 높은 수준이 요구되며, 이를 위해서 해석의 신뢰성을 높일 수 있도록 많은 연구와 체계적인 기술 축적을 요한다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 유한요소 해석과 더불어 변형 측정 기법, 물성 측정 기법들의 세밀화를 요하며, 상호 보완적으로 적용되고 있다.

전자 패키지 신뢰성 평가 기술의 전망

극심한 반도체 경기의 불황을 지나오면서 국내 반도체 제조 업계들은 이전의 메모리 위주의 시장을 비메모리 분야 및 광소자, MEMS 구조물의 패키징에 이르기까지 다양한 분야로 확대하고 있다. 국내의 연구환경도 이전보다는 나아져서 신뢰성에 대한 인식이 많이 개선되었고 특히나 고가의 제품을 생산하기 위해서는 가격적인 면뿐만 아니라 품질에 대한 요구 조건들도 만족시켜야 하는 상황에서 신뢰성 확보 및 향상에 대한 연구개발이 많이 요구되고 있다. 그 중 전자 패키지의 열적/기계적 신뢰성 설계기술은 물성 측정, 변형 측정, 해석에 이르기까지 종합적인 기계 기술을 필요로 하는 기술이며, 앞으로도 많은 연구 개발이 이루어져야 할 분야라 할 수 있다.