

## 굽힘 하중하에서 유연 및 무연 솔더 조인트의 신뢰성 평가

김일호 · 이순복\*

한국과학기술원 기계공학과

### Reliability Assessments of Lead-contained and Lead-free BGA Solder Joints under Cyclic Bending Loads

Ilho Kim and Soon-Bok Lee\*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea, 305-701

**초 록:** 최근에 모바일 기기의 사용이 늘어남에 따라 굽힘 응력에 대한 패키지 접합부의 신뢰성에 대한 관심이 다시 높아지고 있다. 기존의 굽힘실험은 생산공정 및 운반 등에 파손을 방지하기 위해서 수행되었으나 최근에는 모바일 기기의 이동 및 사용에 따라 발생하는 응력에 대한 저항성 평가나 드롭시험의 대응으로 수행되고 있다. 본 연구에서는 정확한 4점 굽힘 실험 방법을 도입하여 유연 솔더 조인트와 무연 솔더 조인트의 굽힘 피로 시험에 대한 저항성을 평가하고, 단면 관찰과 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 높은 하중이 작용하게 되면, 유연 솔더 조인트가 보다 긴 피로수명을 갖으며, 낮은 하중이 작용할 때는 무연 솔더 조인트가 긴 수명을 가지게 된다. 크랙은 시편의 외각에서 발생되어 안쪽으로 진행하게 되며, 소성변형이 손상의 대부분을 차지하게 된다.

**Abstract:** Mobile products, such as cellular phones, PDA and notebook, are subjected to many different mechanical loads, which include bending, twisting, impact shock and vibration. In this study, a cyclic bending test of the BGA package was performed to evaluate the fatigue life. Special bending tester, which was suitable for electronic package, was developed using an electromagnetic actuator. A nonlinear finite element model was used to simulate the mechanical bending deformation of solder joint in BGA packages. The fatigue life of lead-free (95.5Sn4.0Ag0.5Cu) solder joints was compared with that of lead-contained (63Sn37Pb). When the applied load to the specimen is small, the lead-free solder has longer fatigue life than lead-contained solder. The fatigue crack is initialized at the exterior solder joints and is propagated into the inner solder joints.

**Keywords:** Bending, BGA, Solder, Lead-free, Reliability

#### 1. 서 론

최근에 모바일(mobile) 전자 제품의 사용이 급격히 증가하고 있다. 현대인의 필수품이 되어가는 핸드폰을 비롯하여, 노트북, PDA(Personal Data Assistants), MP3플레이어, DVD플레이어, PMP(Portable Multimedia Player) 등 다양한 모바일 제

품이 널리 사용되고 있다. 이렇게 시장 규모가 성장하고, 업체간의 경쟁이 심해지면서 제품의 성능 및 신뢰성 향상이 중요한 이슈로 등장하고 있다. 모바일 제품들은 기존의 고정식 전자 제품과 달리 크기와 무게가 제품의 성능 척도가 되기 때문에 전자부품의 경박단소화를 이루기 위한 활발한 연구가 수행되고 있다. 이러한 전자 부품의 경박단

\*Corresponding author  
E-mail: sblee@kaist.ac.kr

소화는 전자부품의 신뢰성에 문제를 발생시킬 수 있다. 전자부품이 기계적 강성 및 감도가 감소하기 때문에 패키지(package)의 열응력에 대한 저항성은 물론, 기계적 응력에 대한 저항성 또한 떨어진다.

기존의 고정형 전자제품들은 생산 및 운반시에 작용되는 하중 및 진동, 사용중 발생하는 온도 변화로 야기되는 열응력, 냉각팬 등에 의한 진동 등이 파손을 일으키는 중요한 원인으로 작용하였다. 하지만, 모바일 제품에서는 기존의 파손 원인 외에 잦은 이동으로 인한 굽힘 및 뒤틀림 하중, 떨어뜨려 발생하는 충격하중, 키 누름 등의 작동으로 야기되는 굽힘 하중 등의 새로운 기계적인 응력이 고장을 일으키는 원인으로 작용한다.

이러한 기계적인 파손에 대한 전자 부품의 신뢰성을 향상시키기 위해 최근에 많은 연구자들이 전자 패키지의 기계적인 응력에 관한 연구를 수행하고 있다. 일반적으로 3점 굽힘 및 4점 굽힘 실험을 수행하고 있는데, Wu<sup>1)</sup>, Rooney<sup>2)</sup>, Shetty<sup>3)</sup>, Mercado<sup>4)</sup> 등은 3점 굽힘 실험을 수행하였고, Harada<sup>5)</sup>, Merchdo<sup>4)</sup> 등은 4점 굽힘 실험을 수행하였다. 4점 굽힘 실험의 경우, 내부 지지점 사이(inner span)에서는 동일 하중이 작용한다고 가정할 수 있어 4점 굽힘 실험이 패키지에 작용하는 실험 조건을 제어하기가 쉬우며, 분석도 용이하게 된다. 기존의 연구자들은 다양한 형태의 시편에 대해 연구를 수행하였는데 PCB(Printed Circuit Board)의 한쪽면에 한 개의 BGA(Ball Grid Array)패키지를 부착한 시편, 한쪽면에 많은 BGA 패키지를 부착한 시편, 양쪽면에 많은 BGA 패키지를 부착한 시편 등이 사용되었다. 많은 BGA 패키지를 동시에 실험하면, 보다 많은 데이터를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 각각의 패키지에 가해지는 응력을 정확히 제어하기 힘들게 된다.

본 연구에서는 4점 굽힘 시험법으로 한쪽면에 하나의 패키지를 부착하여 실험을 수행하였다. 이렇게 함으로써, 패키지에 가해지는 하중을 정확히 조절할 수 있으며 해석이 용이하게 된다. 솔더 조인트(solder joint)에 작용하는 응력과 변형량은 직접 측정이 불가능하기 때문에 유한요소법(finite element method)을 이용하여 계산하였다. 그리고 계산 결과 얻어진 변수를 실험에서 얻어진 수명과 연관시켜 굽힘 하중하에서의 솔더 조인트의 수명

을 예측하고자 한다. 또한 본 연구에서는 유연솔더(lead-contained solder)와 무연솔더(lead-free solder)의 굽힘 실험을 모두 수행하여, 두 가지 솔더 재료에 대한 비교 평가도 수행하였다.

## 2. 굽힘 시험기

### 2.1 시험기

본 연구에서는 BGA 패키지의 효과적인 굽힘 실험을 위하여 새로운 굽힘 시험기를 개발하였다. BGA 패키지는 기존의 재료시험기의 관점에서 보면, 매우 작은 크기이기 때문에 실험을 수행하는데 어려움이 있다. 기존의 유압으로 작동하는 만능 재료 시험기는 로드셀(loadcell)이나 변위게이지(displacement gage)의 분해능(resolution)이 전자 패키지의 실험에 적당하지 않다. 또한 유압으로 구동되어 재료 시험기의 가격이 고가이고, 시스템이 차지하는 공간도 커 전자패키지의 신뢰성 평가에는 비효율적이다.

새롭게 개발된 굽힘시험기의 경우, 전자기 코일(electro-magnetic coil)을 이용하여 구동되며, 전자 패키지의 실험에 적합한 고분해능의 로드셀(50 mN)과 변위 게이지(2  $\mu$ m)를 장착하였다. Fig. 1은 굽힘시험기의 개략도를 보여주고, Fig. 2는 실제로 제작된 사진을 보여준다.

제어와 데이터 저장은 컴퓨터를 이용하여 수행되며, 하중 신호와 변위 신호, 파손 검출회로로부터 나오는 저항신호 그리고 최대 8곳의 스트레인

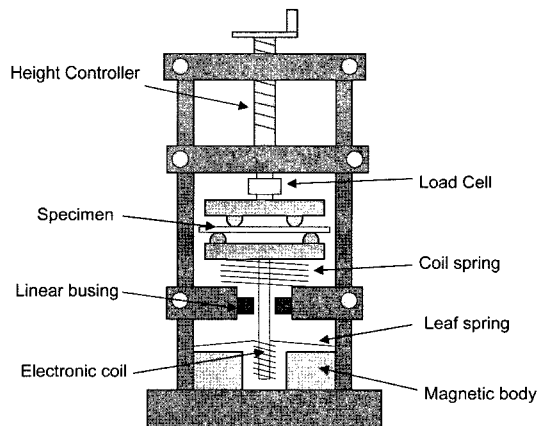


Fig. 1. Schematic diagram of a bending fatigue tester.

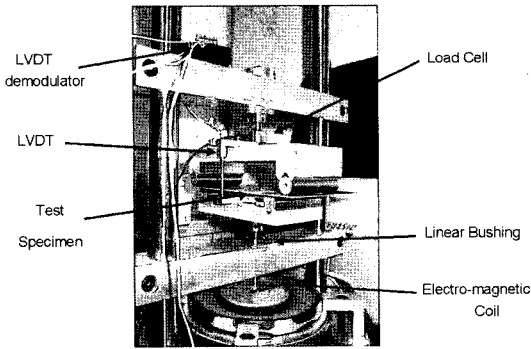


Fig. 2. A bending fatigue testing system.

신호를 동시에 측정이 가능하며, 적게는 수 뉴턴(Newton)에서부터 수십 뉴턴까지의 힘을 낼 수 있다.<sup>6)</sup>

2.2 시편의 형상 및 제작

사용된 시편은 미국의 TopLine사에서 제공하는 더미(dummy) 패키지로 256개의 솔더 조인트를 가진 BGA256T1.27-DC200 모델이다. 이 PBGA 패키지는 27×27×0.36 mm의 폴리미드(polymide) 기판(substrate)위에 10×10×0.3 mm의 실리콘 다이(silicon die)를 올리고, 에폭시(epoxy)를 1.17 mm

두께로 몰딩(molding)한 패키지이다. 솔더볼은 대략 760 μm의 지름을 가지며, 외각을 따라 4줄로 배열되어 있으며, 각각의 간격은 1.27 mm이다. 실험에 사용된 패키지의 솔더볼 조성은 63Sn37Pb와 95.5Sn4.0Ag0.5Cu이다.

패키지 주변에서 균일한 하중이 작용하도록, 간단한 유한요소해석을 수행하여, PCB 크기와 위아래 그립의 간격을 결정하였다. 해석 결과 얻어진 값으로 설계된 PCB의 크기는 폭 81 mm, 길이 175 mm이고, 내측 지지점의 간격(inner span)은 100 mm, 외측 지지점의 간격(outer span)은 135 mm이다. 1 mm 두께의 PCB를 사용하였으며, 패드 직경(pad diameter)는 0.635 mm이고, 테이지 체인을 구성하였다. 그리고 스트레인게이지(strain gage)를 부착할 위치에 미리 정렬 표식(alignment mark)를 만들어 정확하게 스트레인게이지를 장착하도록 하였다. 이와 같이 설계된 PCB와 PBGA 패키지는 리플로어 머신(reflow machine)을 이용하여 질소 분위기에서 접합되었다. 제작된 시편은 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 시험기와 시편 검증

새로 개발된 시험기의 작동 확인과 얼라이언트(alignment)를 확인하기 위해 스트레인게이지를

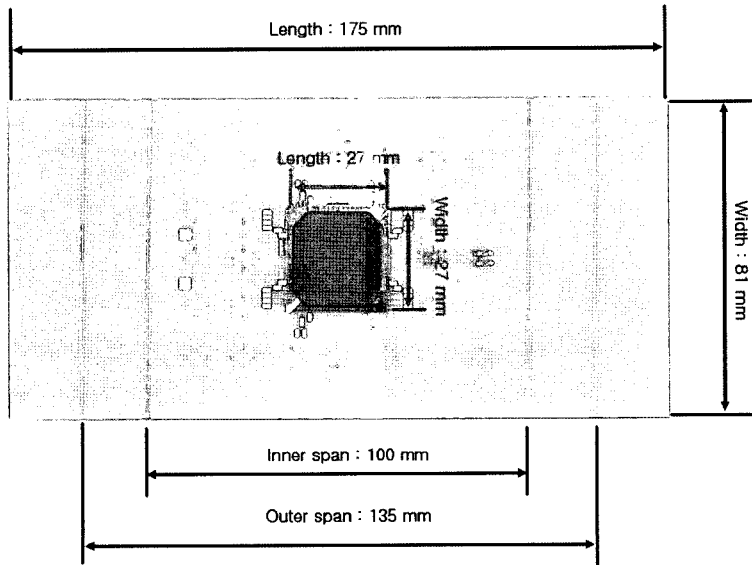


Fig. 3. Four point bending test specimen, 256PBGA package was attached to the PWB board.

PCB 양면에 부착하여 신호를 비교해 보았다. Fig. 4는 스트레인게이지의 부착 위치를 나타내면, Fig. 5와 Fig. 6은 각각 세로 방향의 변형률과 네 모서리의 변형률을 나타낸다.

Fig. 5에서 보듯이 변형률은 2, 1, 3, 4 순으로 커지게 되는데, 이는 패키지로부터 멀어지면서 그 값은 증가하게 됨을 알 수 있다. 그리고 3과 4는

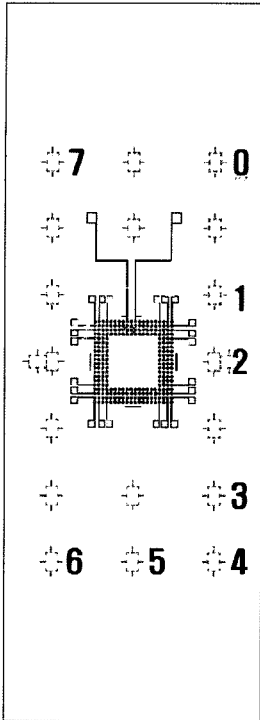


Fig. 4. Position of strain gages on the PCB.

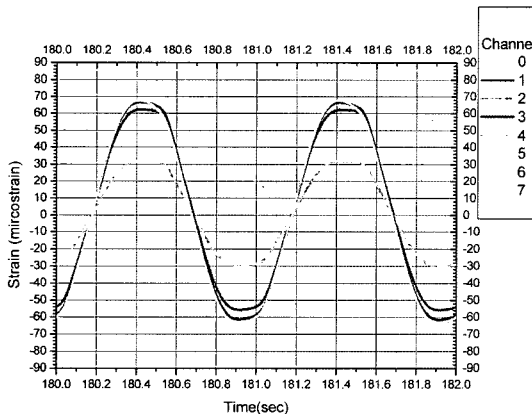


Fig. 5. Strains along the length direction.

거의 유사한 값을 갖는데 이로부터 PCB위에 패키지가 부착됨에 따라 생기는 응력재분포가 경계조건(하중작용점)으로부터 멀리 떨어져 있어 경계조건의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 보면, 네 모서리의 변형률은 무시할 수 있을 정도의 오차를 가지면서 일치하는 것을 알 수 있다. 이론적으로는 완벽히 일치해야 하나 실험결과 약2%이하의 오차를 가지며, 이 값은 실험오차로 무시할 수 있다. 측정된 변형률 값으로부터 BGA패키지에 균일한 하중이 가해짐을 알 수 있다.

### 2.4 파단면의 관찰

파손이 발생한 시편의 단면 관찰을 통해 피로 파손 위치와 피로 파손 양상을 관찰하였다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 반복 굽힘 응력이 크게 작용하는 양쪽 사이드를 절단하여 관찰하였다. 양쪽 사이드에서 최대 응력이 걸리는 이유는 패키지에 영향으로 등가 탄성계수(effective elastic modulus)가 변하면서 굽힘하중에 대해 응력 집중이 발생하게 되기 때문이다.

다음의 Fig. 8은 유연솔더의 17, 18, 19, 20번 솔더 조인트(Fig. 7 참고)를 차례로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보듯이 외각솔더(20번)으로 갈수록 피로 균열(fatigue crack)의 크기가 크게 보이고, 17번 솔더에서는 반정도까지만 피로 균열이 진척된 것을 볼 수 있다. 외각솔더로 갈수록 균열이 크게 보이는 이유는 안쪽의 솔더들이 차례로 파손됨에 따

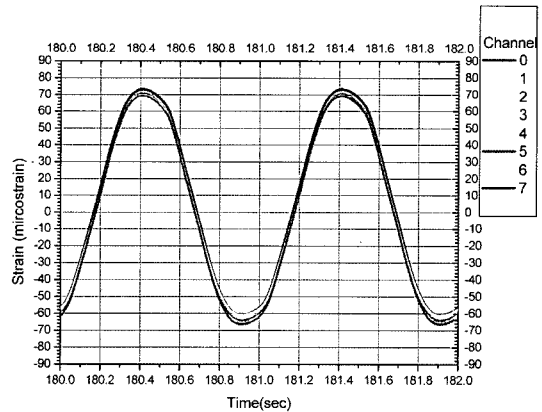


Fig. 6. Strains at the corners.

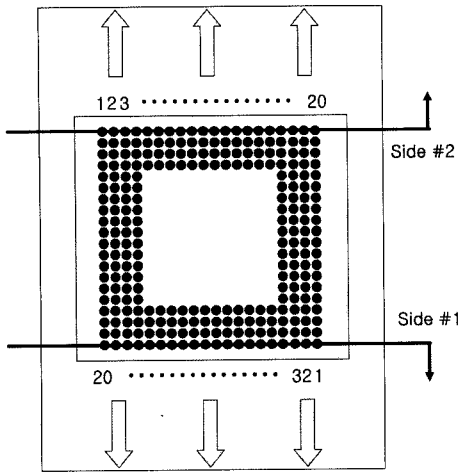


Fig. 7. The sectioning location of the specimen.

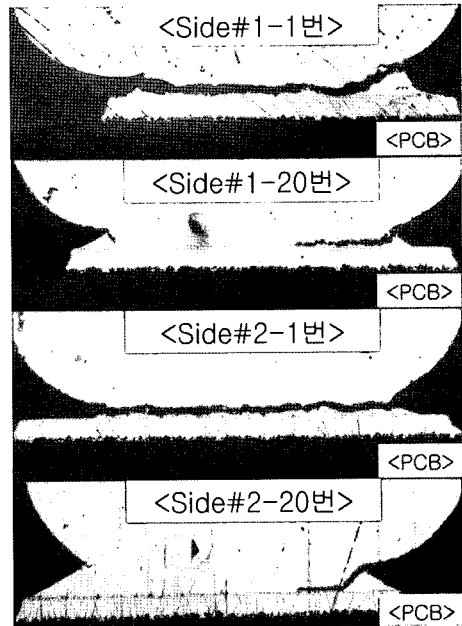


Fig. 9. The exterior solder joint at each corners in SnAgCu-PBGA package.

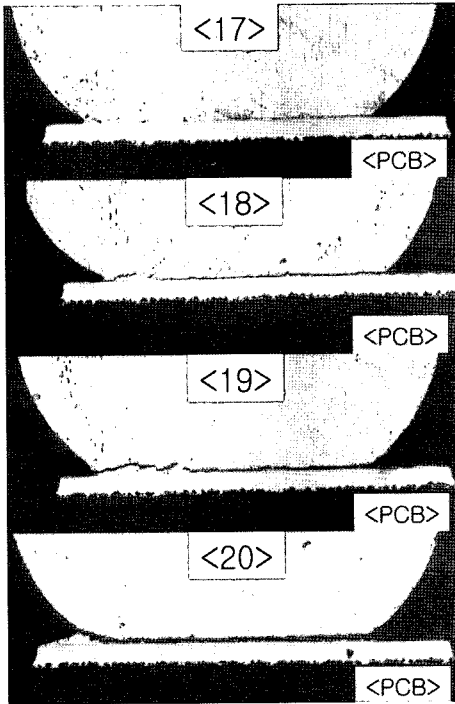


Fig. 8. Comparison between the crack length of solder joints in the SnPb-PBGA package.

라 소성변형되어 들리게 되기 때문이다. 그리고 17번 솔더가 반만 파손되어 있는 것으로부터 균열이 안쪽으로 진행해감을 알 수 있다.

균열은 시편의 4곳의 최외각 모서리 솔더 조인트에서 발생되어 진척해간다. Fig. 9은 무연 솔더

의 4곳의 최외각 모서리 솔더 조인트의 사진을 나타낸다. 이 시편의 경우 4곳의 최외각 모서리 솔더 조인트를 제외하고는 피로 균열이 관찰되지 않았다. 이로부터 피로 균열은 4곳의 최외각 모서리 솔더 조인트 동시에 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 뒤의 유한요소해석 결과와도 동일하다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 파손의 정의

솔더 조인트의 크랙(crack)이 진척하게 되면, 데이지 체인으로부터 나오는 저항신호는 급격하게 증가하게 된다.<sup>7,8)</sup> Fig. 10과 11에 이러한 현상이 잘 나타나 있다. 그리고 한번 증가하기 시작한 저항은 다시 감소하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 저항이 증가하기 시작하는 시점을 파손이라고 정의하였다. Fig. 10에서 보듯이 파손이 시작하기 전까지는 일정한 값을 갖다가 파손이 시작한 후에는 급격히 증가하여 다시 감소하지 않는다.

Fig. 11은 파손이 시작한 부분을 확대한 그림이다. 크랙이 시작되어 증가하는 모양이 잘 나타나 있다. 특히 하중이 가해질 때 저항이 증가했다가

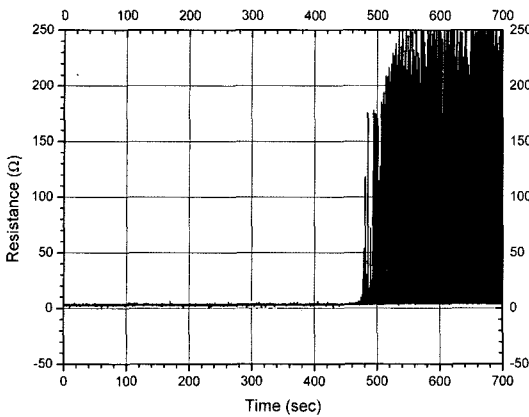


Fig. 10. The resistance of the daisy chain at the PBGA package. It is increased abruptly at failure.

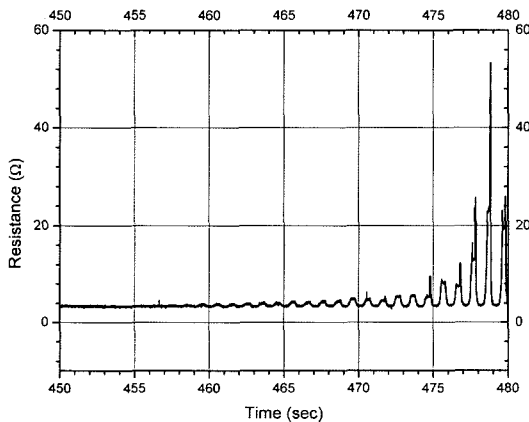


Fig. 11. Magnified view of resistance at failure.

하중이 제거되면, 크랙이 닫혀 저항이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 주기 단위(1sec)로 반복되면서 전체적인 저항이 증가하게 된다.

3.2 실험 과정

실험 조건은 하중진폭을 25N에서 60N까지 변화시키면서 하중 제어 실험(load control test)을 수행하였다. (25N, 30N, 40N, 50N, 60N) 모든 실험은 1 Hz의 속도로 수행되었고, 각 하중 조건 당 3개 이상의 시편을 실험하여 평균을 취하였다. 시편은 위나 아래쪽 그림에 고정되지 않고, 단지 그림 위에 올려져 있게 된다. 따라서 그림과 접촉을 유지시키기 위해 1N의 하중을 추가로 가해주었다. 즉 하중진폭을 30N으로 제어할 때, 1N에서 31N까지 변화하는 하

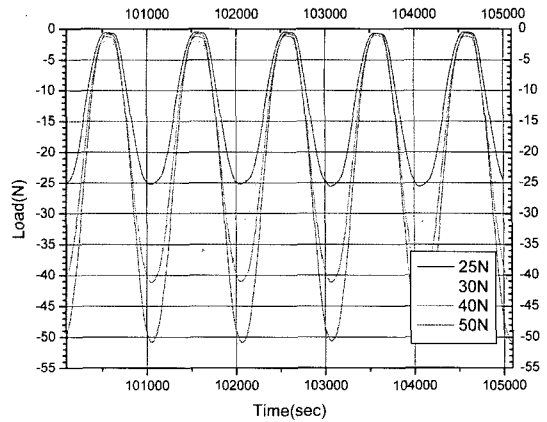


Fig. 12. Applied load profiles.

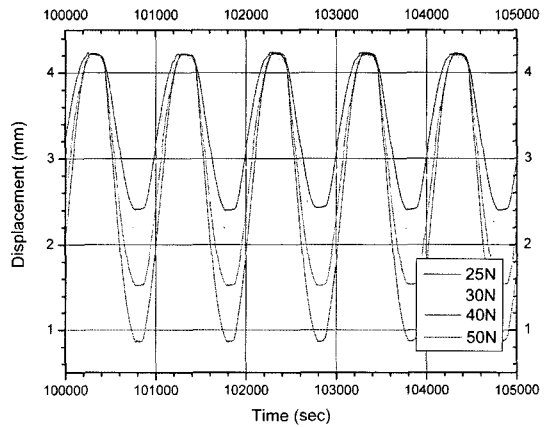


Fig. 13. Displacement profiles.

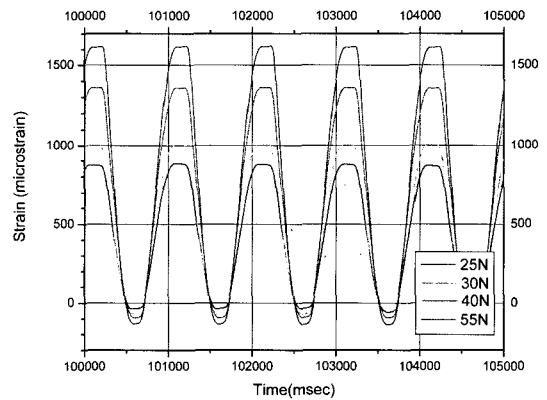


Fig. 14. Strain profiles.

중을 사인파(sine wave)형태로 가해주게 된다.

Fig. 12에서 Fig. 14는 각각 실험 도중에 측정되

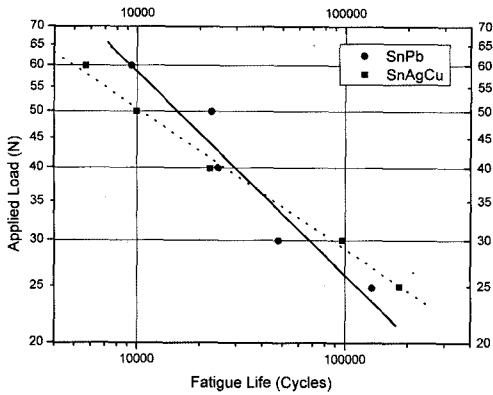


Fig. 15. Applied load versus bending fatigue life curve of lead-contained and lead-free solder.

는 하중, 그립사이의 변위, 그리고 변형률을 나타낸다. 각각의 그래프는 50N, 40N, 30N, 25N에서의 값을 나타낸다. 하중이 변함에 따라 사인파형의 진폭은 변화하나, 그 형태나 주기는 일정함을 알 수 있다.

### 3.3 실험 결과

Fig. 15는 제어해준 하중진폭과 피로 수명과와의 관계를 나타낸다. 25N의 하중진폭을 가진 경우, 유연솔더의 경우 130,000사이클(cycle)의 수명을 갖는 반면, 무연솔더는 180,000사이클의 수명을 갖는다. 하중진폭이 커짐에 따라 수명의 차이는 줄어들어 하중진폭이 40N인 경우, 무연솔더보다 유연솔더가 커지게 되는데, 이때 유연솔더는 24,000사이클, 무연솔더는 22,000사이클의 수명을

갖는다. 하중진폭이 커져서 60N이 되면, 완전히 수명 역전이 일어나 유연솔더가 보다 긴 수명을 갖는 것으로 나타난다. 유연솔더는 9,400사이클, 무연솔더는 5,600사이클의 수명을 갖는다.

이와 같이 작용되는 하중에 따라 긴 수명을 보이는 솔더가 변화하는 현상은 다른 연구에서도 볼 수 있다.<sup>7,9)</sup> 열피로 실험에서도 온도차가 커서 발생하는 응력이 큰 경우 유연솔더가 긴 수명을 갖고, 응력이 작은 경우에는 무연솔더가 긴 수명을 갖는다.<sup>7,8)</sup>

## 4. 유한요소해석

### 4.1 모델링

BGA패키지의 실험에서는 직접적으로 솔더 조인트에 가해지는 응력과 변형률을 측정할 수 없다. 따라서 유한요소해석을 통해 그 값을 예측해야한다. 유한요소모델은 대칭성을 이용하여 1/4만을 모델링하였다. 계산 속도를 높이기 위해서 기초해석(pre-analysis)을 통해 응력 집중이 발생하는 솔더 조인트를 찾아내고, 그 솔더 조인트들만을 미세 메쉬(fine mesh)로 모델링하고 그 외의 솔더 조인트는 거친 메쉬(coarse mesh)를 사용하여 모델링하였다. 사용된 요소수(element)는 60,656개이고, 질점수(node)는 75,343개가 사용되었다.

소성특성은 물론, 크리프(creep)까지 묘사해주었다. 사용된 물성치는 박태상<sup>10)</sup>, B. Z. Hong<sup>11)</sup>, J. Lau<sup>12)</sup>이 연구에 이용한 값을 사용하였고 그 값은

Table 1. Material Properties

	Elastic Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Yield Strength(MPa)	Tangent Modulus(MPa)
Sn37Pb	43251	0.3628	29.1	-
Sn4.0Ag0.5Cu	53000	0.4	30	1500
Copper	117000	0.34	69.0	-
FR-4	22000(x,y)	0.28	elastic	elastic
	10000(z)	0.11	elastic	elastic
Silicon	130008	0.2782	elastic	elastic
Epoxy	25845	0.35	elastic	elastic

creep behavior $\dot{\epsilon} = A[\sinh(B\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$				
	A(1/s)	B(1/MPa)	n	Q(J/mole)
Sn37Pb	12423	0.126	1.89	61417
Sn4.0Ag0.5Cu	44100	0.005	4.2	44995

Table 1에 나타내었다. 경계조건으로는 1/4모델에 맞도록 대칭조건을 주고, 실제 실험과 동일하게 하중이 가해지도록 모델링하였다. 그러기 위하여 그림을 해석적 강체(analytical rigid body)로 묘사하고 실제 실험과 동일한 위치에서 동일한 하중을 가하도록 모델링을 하였다. Fig. 16에 해석에 사용된 유한요소 모델이 나타나 있다. 이 모델을 아바쿠스(Abaqus 6.5.1)을 이용하여 해석하였다.

4.2 해석 결과

Fig. 17는 솔더 조인트에 작용하는 등가(Von Mises) 응력의 분포를 나타낸다. 하중을 가해주는 그림에서 가까운 솔더 조인트에 커다란 응력이 작용하고 패키지의 중앙쪽으로 갈수록 작용되는 하중이 줄어들음을 알 수 있다. 또한 PCB가 폭방향으로 휘어짐에 따라서 폭방향으로 최외각에 있는 솔

더 조인트들이 내부의 솔더 조인트에 비해 커다란 응력을 견디게 된다. 따라서 Fig. 17에서 보듯이 패키지의 최외각 모서리 솔더 조인트에 가장 큰 응력이 작용하게 되고 이 지점에서 균열이 시작될 거라는 것을 예상할 수 있다. 이는 최외각 모서리 솔더 조인트에서 균열이 발생하여 안으로 진행된다는 앞선 단면관찰 결과와 일치하게 된다.

BGA 패키지는 패키지 전체에서 동일한 등가탄성(equivalent modulus)를 가지지 않는다. EMC 몰딩(molding)이 사각형이 아닌 팔각형 형상으로 덮여져 있어 4곳의 모서리는 상대적으로 작은 등가탄성을 갖게 된다. 따라서 변형이 보다 자유로워 응력감소효과가 발생한다. 그래도 최외각 모서리 솔더 조인트에서 가장 큰 응력이 작용하게 되고, 많은 소성 변형과 크리프 변형이 발생하게 된다.

실험이 1Hz라는 빠른 속도로 수행되고, 작용하는 하중 또한 크기 때문에 소성변형이 크리프변형에 비해 크게 나타나게 된다. 크리프 변형에 의한 비탄성에너지밀도(inelastic energy density)는 소성 변형에 의한 비탄성에너지밀도의 1/20이하이다. Fig. 18와 19에서는 유연솔더와 무연솔더의 소성 에너지밀도(plastic energy density)변화를 나타내고 있다. 1초가 한 사이클을 나타내며, 사이클이 진행할수록 소성에너지밀도가 증가하게 된다. 그리고 하중이 증가할수록 증가되는 소성에너지의 속도, 즉 기울기가 커짐을 알 수 있다.

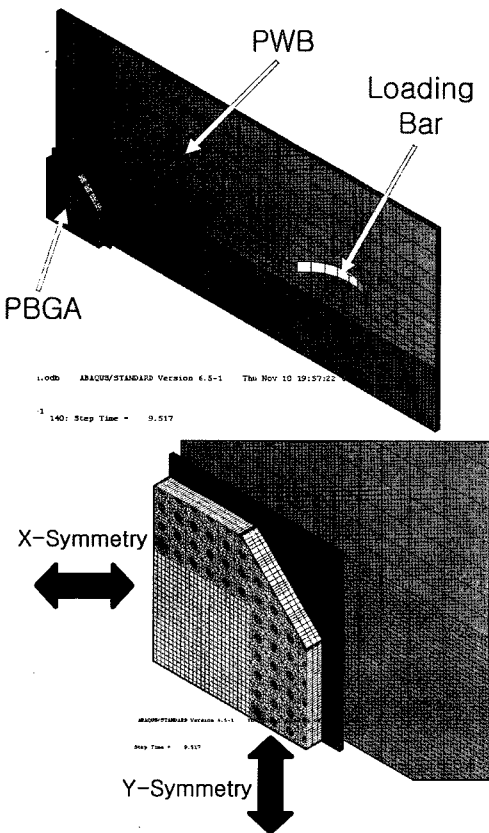


Fig. 16. Visco-plastic finite element model for the bending fatigue tests.

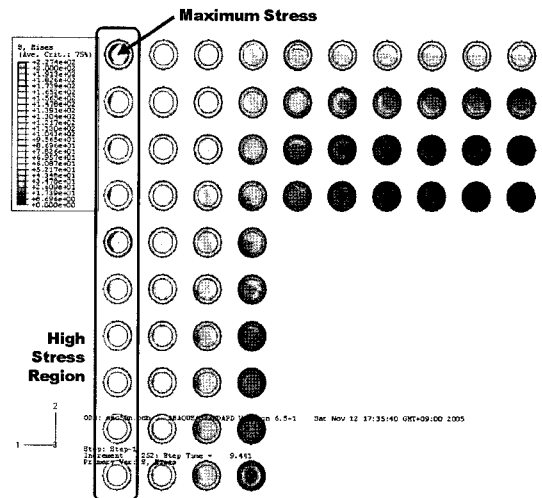


Fig. 17. Von Mises stress distribution at solder joint.



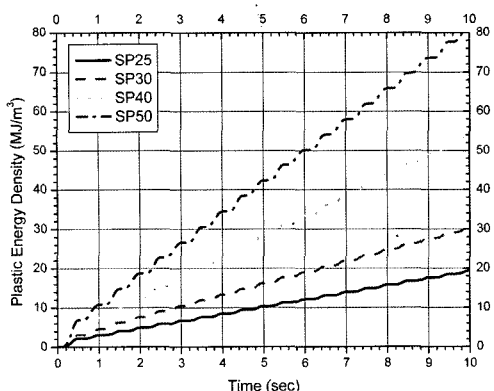


Fig. 18. Creep energy density at the critical points in the lead-contained solder.

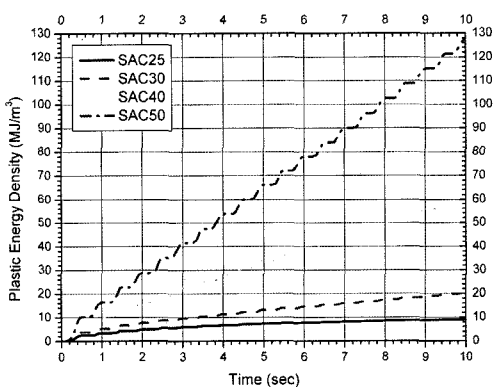


Fig. 19. Creep energy density at the critical points in the lead-free solder.

소성에너지밀도와 크리프에너지밀도(creep energy density)를 합친 총비탄성에너지밀도(total inelastic energy density)를 계산하고, 총비탄성에너지밀도의 사이클에 따른 증가를 계산하여 굽힘피로수명과 비교해 보면 Fig. 20과 같이 나타낼 수 있다. 에너지밀도를 계산할 때에는 식(1)을 이용하였다. 여기서  $V$ 는 부피를 나타내는데, 솔더 조인트 전체를 평균하지 않고, 솔더 조인트가 PCB와 만나는 부분의 요소들만의 평균하였다. 왜냐하면, 솔더 조인트가 파손이 일어나는 부분이 솔더 조인트와 PCB의 경계이기 때문이다.

$$\Delta W_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n dW_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad \text{식(1)}$$

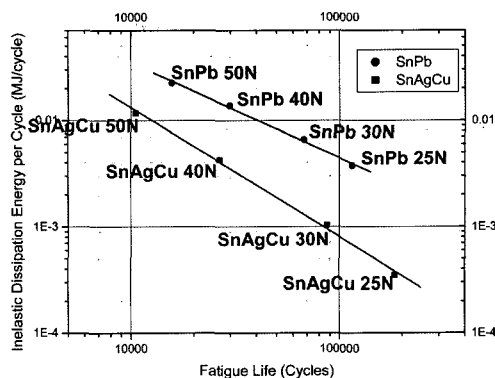


Fig. 20. Inelastic dissipation energy per cycle verse fatigue life curve.

사이클 당 비탄성 에너지 방출을 유연솔더와 무연솔더에 대해 비교해 보면, 같은 에너지 방출이 있을 경우 유연솔더가 긴 수명을 가짐을 알 수 있다. 하지만, 이 두 재료는 다른 물질로 이루어져 있기 때문에 직접적인 비교는 불가능하다. 두 재료의 총비탄성에너지와 굽힘피로수명과 관계는 재료의 고유한 피로특성으로 본 연구에서는 그 관계를 측정해 보았다. 총비탄성에너지와 굽힘피로수명에 대한 보다 심도 깊은 원인 분석은 앞으로 원자 단위 분석이나 전위론 관점에서 연구해 볼 대상이다.

같은 하중이 가해지는 경우라도 두 재료는 탄성계수나 항복응력이 틀려, 응력과 변형률이 다른 값을 갖게 된다. 따라서 응력과 비탄성 변형률로부터 계산되는 비탄성 에너지 또한 틀려지게 된다. 이는 Fig. 20에서 확인할 수 있다. Fig. 20에서 보이는 것처럼 유연솔더는 하중이 25N에서 50N으로 변할 때 에너지 방출률은  $3.73 \times 10^{-3} \text{ MJ/cycle}$ 에서  $2.26 \times 10^{-2} \text{ MJ/cycle}$ 으로 변하는 반면, 무연 솔더는 다른 에너지 방출률을 가짐은 물론  $3.49 \times 10^{-4} \text{ MJ/cycle}$ 에서  $1.17 \times 10^{-2} \text{ MJ/cycle}$ 까지 변하게 된다. Fig. 20에서 보듯이 로그로그스케일(log-log scale) 상에서 사이클 당 비탄성에너지 방출과 굽힘피로수명은 선형관계를 가지고 있고, 이로부터 비탄성 에너지 방출률은 좋은 손상 변수(damage parameter)로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

비탄성 에너지 방출률을 이용한 수명 비교에서는 모든 영역에서 유연 솔더가 더 긴 피로수명을 갖는 것처럼 보인다. 그러나 동일 하중으로 수행

한 신뢰성 평가 시험에 있어서는 무연솔더가 긴 피로 수명을 갖기도 한다. 이는 하중 조건에 따라 비탄성 에너지 방출률이 바뀌게 되기 때문이다. 따라서 하중 조건이 정해진 대부분의 패키지의 신뢰성 평가에서는 앞선 Fig. 15가 보다 유용하게 사용될 것이다. 비탄성 에너지 방출률을 이용한 수명 예측은 패키지의 종류가 변화한다거나 구속 조건이 바뀌는 경우에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

1) 유연솔더와 무연솔더에 대한 굽힘피로실험이 다양한 하중진폭에 대해서 수행되었다. 하중진폭이 작은 경우 무연솔더가 긴 굽힘피로수명을 가지는 것으로 나타났고, 하중진폭이 큰 경우 유연솔더가 보다 긴 굽힘피로수명을 보였다.

2) 유한요소해석을 통하여 솔더 조인트에 작용하는 응력과 변형률을 계산해보았다. 점소성모델을 만들어 굽힘피로시험을 묘사해보았다. 최외각 모서리 솔더 조인트에서 가장 큰 응력과 변형률이 작용하는 것으로 나타났다. 로그로그스케일에서 사이클 당 비탄성에너지방출과 피로 수명은 선형 관계를 갖는 것으로 밝혀졌으며, 사이클 당 비탄성에너지 방출률이 좋은 파손변수로 사용될 수 있음을 알아냈다.

#### 감사의 글

본 논문은 과학기술부/한국과학재단 전자패키지재료연구센터(우수연구센터)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. (R11-2000-085-09003-0)

#### 참고문헌

1. J.D. Wu, S.H. Ho, P.J. Zheng, C.C Liao. and S.C. Hung, "An Experimental Study of Failure and Fatigue

- Life of a Stacked CSP Subjected to Cyclic Bending", 2001 Electron. Comp. Technol. Conf. 1081-1086 (2001).
2. D.T. Rooney, N.T. Castello, M. Cibulsky, D. Abbott and D. Xie, "Materials characterization of the effect of mechanical bending on area array package interconnects", *Microelectron. Reliab.*, 44, 275-285 (2004).
3. S. Shetty, T. Reinikainen, "Three- and Four-Point Bend Testing for Electronic Packages", *J. Electron. Packaging*, 125(4), 556-561 (2003).
4. L.L. Mercado, B. Phillips, S. Sahasrabudhe, J.P. Sedillo, D. Bray and E. Monroe, "Use-Condition-Based Cyclic Bend Test Development for Handheld Components", 2004 Electron. Comp. Technol. Conf., 1279-1287 (2004).
5. K. Harada, S. Baba, Q. Wu, H. Matsushima, T. Matsunaga and Y. Uegai, "Analysis of Solder Joint Fracture Under Mechanical Bending Test", 2003 Electron. Comp. Technol. Conf., 1731-1737 (2003).
6. I. Kim, S.-B. Lee, "Reliability Assessment of BGA Solder Joints under Cyclic Bending Loads", *Electronic Materials and Packaging (EMAP2005)*, 27-32 (2005).
7. I. Kim, T.-S. Park, S.-B. Lee, "A Comparative Study of the Fatigue Behavior of SnAgCu and SnPb Solder Joints." *Trans. of the KSME(A)*, 28(12), 1856-1863 (2004).
8. I. Kim, T.-S. Park, S. Y. Yang and S.-B. Lee, "A Comparative Study of The Fatigue Behavior of SnAgCu and SnPb Solder Joints.", *Key Eng. Mater.*, 297-300, 831-836 (2005).
9. A. Schubert, R. Dudek, E. Auerswald, A. Gollhardt, B. Michel and H. Reichl, "Fatigue Life Models for SnAgCu and SnPb Solder Joints Evaluated by Experiments and Simulation", 2003 Electron. Comp. Technol. Conf., 603-610 (2003)
10. T.-S. Park, "A study on mechanical fatigue behaviors of ball grid array solder joints for electronic packaging", in Ph.D thesis, DME 04041, KAIST, Daejeon (2004).
11. B.Z. Hong, "Thermal Fatigue Analysis of a CBGA Package with Lead-free Solder Fillets", *InterSociety Conference on Thermal Phenomena*, 205-211 (1998).
12. J. Lau, W. Dauksher and P. Vianco, "Acceleration Models, Constitutive Equations, and Reliability of Lead-Free Solders and Joints", 2003 Electron. Comp. Technol. Conf. 229-236 (2003).