

열하중과 굽힘 하중 조건에서의 솔더조인트 피로 특성 비교연구

김일호 · 이순복

한국과학기술원 기계항공시스템 공학부

A Comparative study on the solder joint fatigue under thermal and mechanical loading conditions

Ilho Kim · Soon-Bok Lee

Department of Mechanical Engineering, KAIST

Abstract

In this study, two types of fatigue tests were conducted. First, cyclic bending tests were performed using the micro-bending tester. Second, thermal fatigue tests were conducted using a pseudo power cycling machine which was newly developed for a realistic testing condition. A three-dimensional finite element analysis model was constructed. A finite element analysis using ABAQUS was performed to extract the applied stress and strain in the solder joints. Creep deformation was dominant in thermal fatigue and plastic deformation was main parameter for bending failure. From the inelastic energy dissipation per cycle versus fatigue life curve, it can be found that the bending fatigue life is longer than the thermal fatigue life.

Key Word : solder, fatigue, FEM, FEA, life prediction model

1. 서 론

전자부품은 다양한 하중을 받게 되는데 이는 크게 기계적하중과 열하중으로 나눌 수 있다. 열하중은 전자부품을 구성하고 있는 물질들의 열팽창계수차이에 의해서 발생하게 된다. 열하중에 의한 파손은 오래전부터 보고되어 많은 연구들이 수행되어왔다. 반면 기계적 하중에 의한 파손은 최근에 다시 연구가 시작되었는데 이는 휴대용 기기의 증가에 기인한다. 예를 들면, 노트북의 한쪽 끝을 잡으면 노트북 메인보드에 굽힘하중이 작용하게 되고, 우리가 핸드폰의 버튼을 누르면 핸드폰 PCB가 휘게 되면서 전자부품에 기계적 하중이 작용하게 된다. 이 두 가지 하중은 독립적으로 발생하기도 하지만 때로는 동시에 작용하기도 한다.

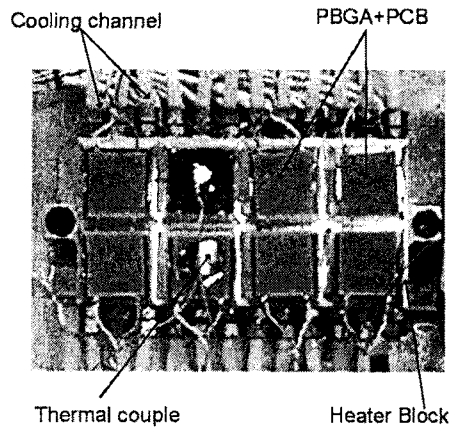
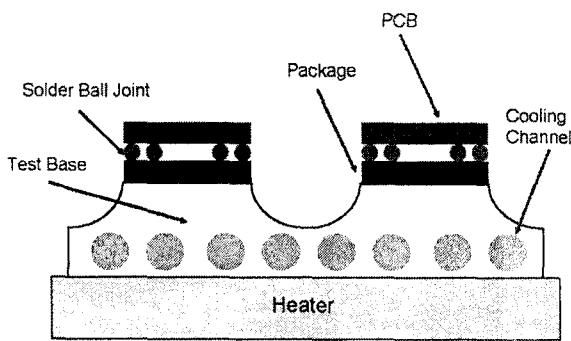
많은 연구자들이 열하중에 대해서 오래전부터 연구를 수행하여 왔고, 최근에는 굽힘하중에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근의 연구결과들은 유연 솔더 사용 제한과 더불어서 유연솔더를 대체할 무연솔더를 중심으로 수행되고 있으며, 연구자들에 따라서는 유연 솔더와 비교하면서 연구를 수행하고 있다. 많은 연구에도 불구하고 아직까지 이 두 하중에 대한 피로 특성의 관계에 대해서는 정확하게 밝혀지지 않고 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 하중에 신뢰성 평가 시험을 수행하고, 각각의 하중이 솔더조인트에 어떠한 영향을 미치는지 비교 평가하여 수명을 예측하는데 도움을 주고자 한다.

2. 시험 장치 및 시험 결과

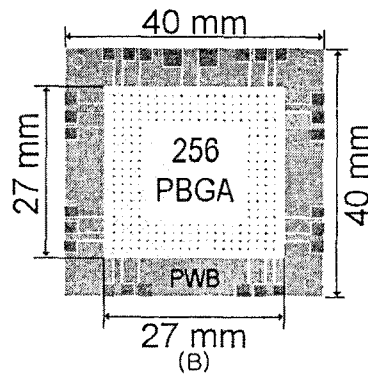
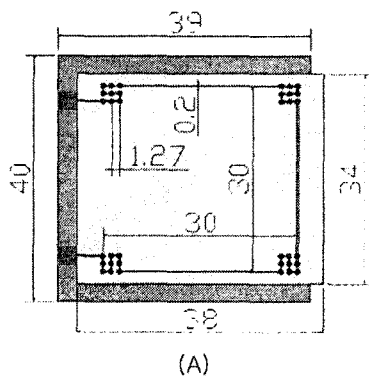
본 연구에서는 열하중을 가하기 위해 유사파워사이클링 기법을 이용하였다. 이 방법은 현재 널리 쓰이고 있는 챔버를 이용한 열사이클을 가하는 방법에 비해 보다 현실적인 상황을 묘사할 수 있고, 가속시험이 용이하다. 이 시험기와 시편에 대한 자세한 내용은 다른 논문에 나타나 있다. 시험기의 개략도와 형상은 다음의 그림 1과 2에 나타내었고 시험 조건은 표 1과 2에 나타내었다. 표2에 나타나 있는 시간은 3분의 고온 홀딩 시간을 가질 때의 시간 조건으로 30분 홀딩 시험을 제외하고는 이 시간에 따라서 온도를 가해주었다. 시험은 크게 4가지의 조건으로 수행하였다. 첫 번째는 3분의 홀딩 시간을 가지는 시험으로 넓은 온도 범위에서 수행하여 기본 데이터를 만들었다. 두 번째는 30분의 홀딩 시간을 가지는 시험으로 홀딩 시간이 미치는 영향을 평가하기 위해 수행하였고, 세 번째는 ΔT 를 $75^{\circ}C$ 로 유지하는 시험으로 평균 온도의 효과를 평가하기 위해서 수행하였다. 이렇게 3가지의 시험은 특별히 고안된 시편(그림3(A))을 이용하여 실험하였고, 네 번째 시험은 실제 사용되는 PBGA 패키지(그림3(B))를 이용하여 수행하였다. 실제 PBGA를 시험해본 이유는 우리가 고안해서 사용한 시편의 결과가 실제 PBGA 패키지에도 사용이 가능한지를 확인해보기 위해서이다. 반복굽힘하중시험은 작은 전자부품 평가에 적합하도록 소용량 시험기를 개발하여 시험을 수행하였다. 시험기와 시편에 대한 자세한 설명은 다른 논문에서 수록되어있다. 시험기와 시험 조건은 그림4와 표3에 나타냈다.

시험이 끝난 후에 시험한 시편의 단면을 관찰해 보았다. 관찰한 시편은 PBGA 패키지로 열하중과 기계적 하중 조건에서 시험하였다. 미리 구성된 데이지 체인(daisy chain)으로부터 솔더조인트가 파괴가 된 시점을 알 수 있는데, 하나의 솔더조인트가 파손된 시점에서 시험을 멈

춘 것이 아니라, 일정한 반복하중을 더 가한 후에 시험을 멈추었다. 파괴가 일어난 시점에서 시험을 멈추게 되면, 균열이 발생된 위치만을 확인할 수 있으나, 일정한 반복 하중을 추가로 가해주면 균열의 진행방향까지 알 수 있기 때문이다. 각 시편을 대각선 방향으로 절단하고 절단면을 사포와 다이아몬드 용액(diamond compound)으로 폴리싱(polishing)하였다. 각 절단면에는 좌우 4개씩 총 8개의 솔더조인트가 보이게 되는데 이는 PBGA 패키지가 4줄로 솔더조인트를 가지기 때문이다. 그림5와 6은 각각 열하중과 굽힘하중이 가해질 때 솔더



<그림 5> 유사파워사이클링 시험기의 개략도 <그림 6> 유사파워사이클링시험기의 사진



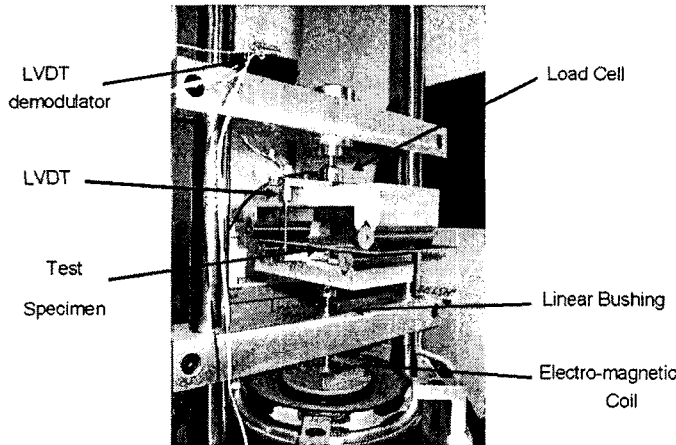
<그림 7> 반복열하중 시험을 위해 특별히 고안된 시편(A)과 PBGA 시편(B)

<표 6> 온도 시험 조건

3min holding time	30~150 ° C, 30~130 ° C
	30~110 ° C, 30~100 ° C
	30~90 ° C, 30~70 ° C
30min holding time	30~150 ° C, 30~125 ° C
$\Delta T=75^{\circ} C$	50~125 ° C, 75~150 ° C
PBGA (3min)	30~150 ° C

<표 7> 사이클링 시험 시간 (3분 홀딩 경우)

Total cycle time	7.5 min
Heating time	3 min
Holding time	3 min
Cooling time	1.5 min
Cycles per day	196 cycles



<그림 8> 굽힘 시험기의 사진

<표 8> 굽힘 시험조건

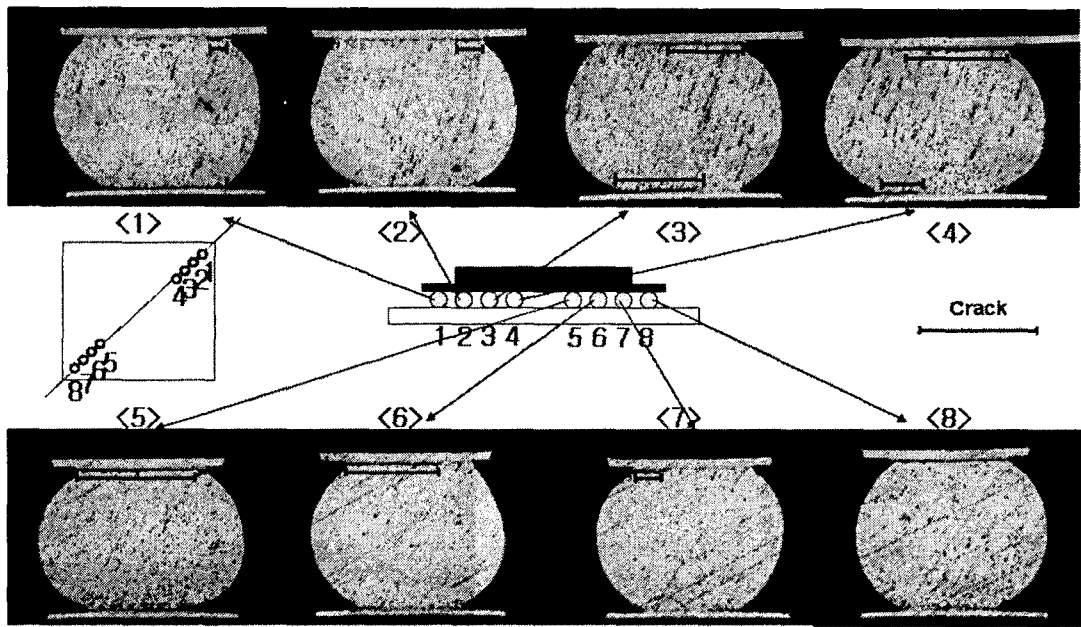
Loading Ranges
1~26 N
1~31 N
1~41 N
1~51 N
1~61 N

조인트의 파손 형상을 보여주고 있다. 그림의 마크는 균열의 위치를 나타내고 있다. 마크가 없음에도 마치 균열처럼 솔더조인트와 패드의 경계면이 떨어져 있는 것처럼 보이는 곳이 있는데, 이곳은 두 물질의 경도 차이에 의해 폴리싱과정에서 갈아져 나가는 양의 차이가 생겨서 마치 균열처럼 보이는 것이다. 하지만 보다 높은 배율로 관찰해보면 균열이 아니라는 것을 확인할 수 있다.

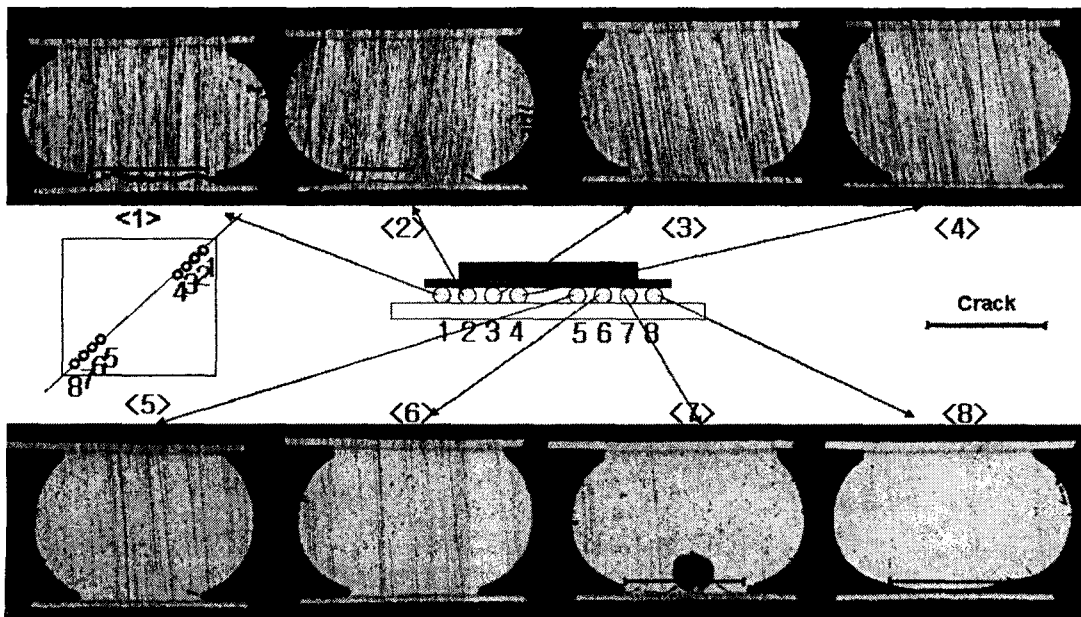
그림 5와 6의 위쪽은 PBGA 패키지이고, 아래쪽은 PCB이다. 그림5는 30~150° C로 열하중을 가했을 경우의 단면을 보여주고 있다. 균열이 한 지점에서만 발생하는 것이 아니라 여러 곳에서 동시에 발생하게 되는데, 내측 솔더조인트(4번, 5번)에서 최대가 된다. 그리고 그 길이는 외각으로 갈수록 짧아지게 된다. 균열은 주로 PBGA 패키지와 솔더조인트의 경계면에서 발생하게 되나, PCB와 솔더조인트 경계에서도 일부 존재한다. 이는 열하중이 가해지게 되면, 열팽창계수차이에 의해 시편이 호형으로 휘어지게 되고, 그 때 솔더조인트들은 회전하게 된다. 3번과 4번의 경우에는 솔더조인트가 시계방향으로 회전하게 되면서 오른쪽 윗부분과 왼쪽 아랫부분에 인장력을 받아 균열이 생기게 된다. 반대로 5번과 6번 솔더조인트의 경우에는 3번과 4번의 대칭적인 위치에 있기 때문에 대칭적인 위치, 즉 왼쪽 위와 오른쪽 아랫부분에 인장력을 받게 된다. 절단면 관찰 결과는 뒤에서 보일 유한요소해석 결과와 일치한다.

그림6은 1~51N의 굽힘하중을 가해주었을 경우의 절단면을 보여준다. 굽힘하중이 가해지는 경우는 균열의 길이가 바깥쪽 솔더조인트가 가장 길고, 안으로 오면서 줄어드는 것을 알 수

있다. 1번 8번 솔더조인트는 관통균열을 가지고 있다. 7번 솔더조인트도 관통균열을 가지고 있으나 이는 기공(void)에 의해서 균열이 빠르게 성장된 것이다. 그리고 2번은 균열이 반만발생되어 있다. 이로부터 균열이 최외각 솔더조인트에서 시작되어서 안쪽으로 진행하는 것을 알 수 있다. 그리고 균열은 PCB와 솔더조인트의 경계에서만 관찰되게 된다. 본 연구에서는 4점 굽힘 시험을 수행하여 패키지 주변에 균일한 하중이 가해지게 되는데, 이 하중에 의해 팽창된 PCB가 솔더조인트를 바깥쪽으로 당기게 된다. 따라서 외각솔더조인트의 PCB와의 경계부분에서 큰 하중이 작용하게 되고 그곳에서 파손이 발생하게 된다. 이 역시 유한요소해석 결과와 일치한다.



<그림 9> 30~150° C의 열하중이 가해졌을 때의 절단면

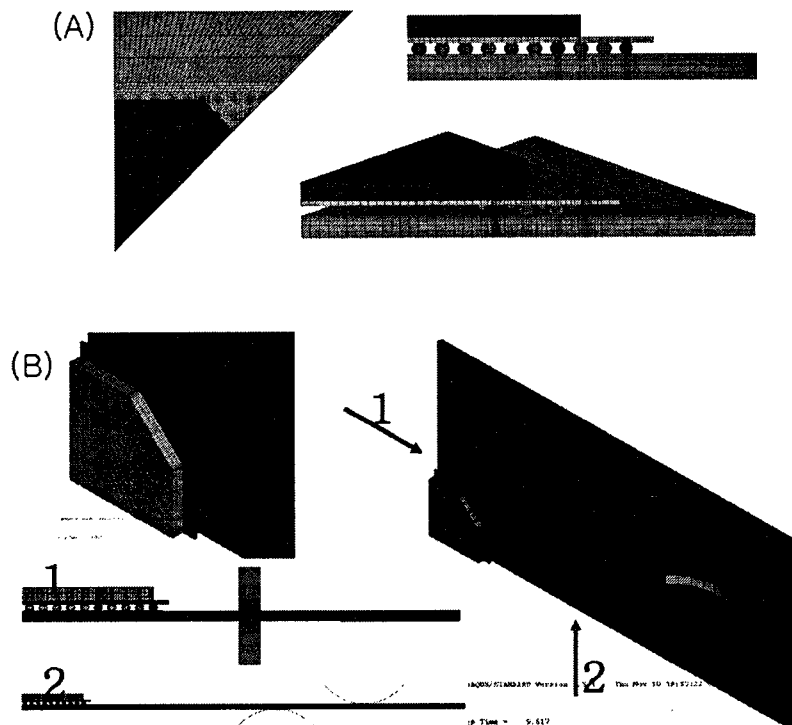


<그림 10> 1~51N의 굽힘하중이 가해질 때의 절단면

3. 유한요소해석

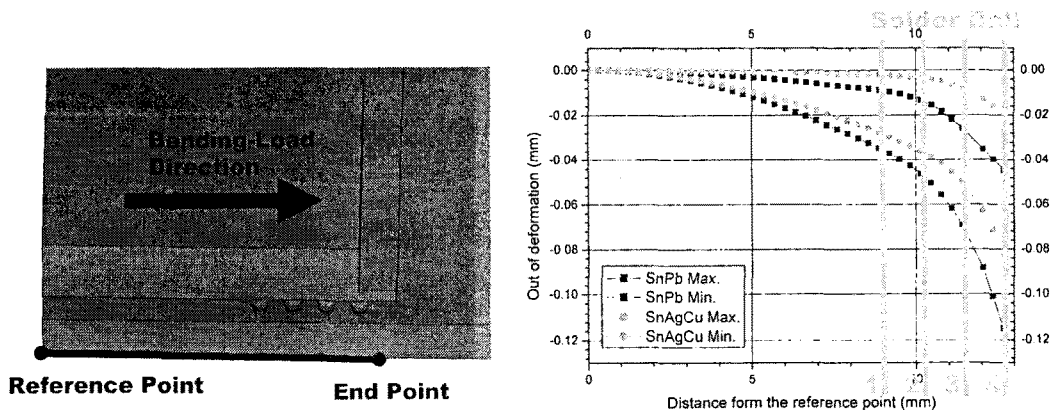
공학적인 분석을 위해서는 변형률과 응력 등의 공학적으로 의미 있는 값들이 필요하게 되나, 실험으로는 정확히 측정할 수 없다. 솔더조인트의 경우 그 형상이 복잡하고 하중이 패키지와 PCB 등의 특징에 연관되어 작용하기 때문에 직접적으로 측정하기가 불가능하다. 따라서 유한요소해석을 이용하여 솔더조인트의 응력과 변형률 등을 계산하였다. Partran을 이용하여 형상모델링 및 메쉬를 짜고, Abaqus를 사용하여 해석을 수행하였다. 모델링 과정에서 대칭성을 이용하여 열하중이 가해지는 모델은 1/8만을, 굽힘하중이 가해질 때는 1/4만을 모델링하였다. 그리고 계산 효율을 높이기 위해서 중요한 솔더조인트는 메쉬를 잘게 자르고 나머지는 좀 더 크게 짜주었다. 모든 모델에서 사용한 물성치는 동일하며, 솔더조인트의 형상이나 메쉬의 크기 또한 동일하게 해주었다.

반복열하중시험을 묘사하는 모델은 그림7(A)에 나타냈으며, 31,945개의 요소(element)와 39,091개의 절점(node)을 가지고 있다. 1/8 모델로 대칭면에 대칭경계조건을 주었다. 중간 구형이 솔더조인트를 나타낸다. 반복굽힘시험을 묘사하는 모델은 그림7(B)에 나타냈으며, 이 모델은 60,656개의 요소와 75,343개의 절점을 가지고 있다. 하중바는 강체로 모델링 했으며, 그림 상에서 호형태도 위치만 표시되어 있다. 크리프와 소성 변형을 모두 고려해주었으며, 온도에 따라 물성이 많이 변하는 것들은 온도 또한 고려해주었다.

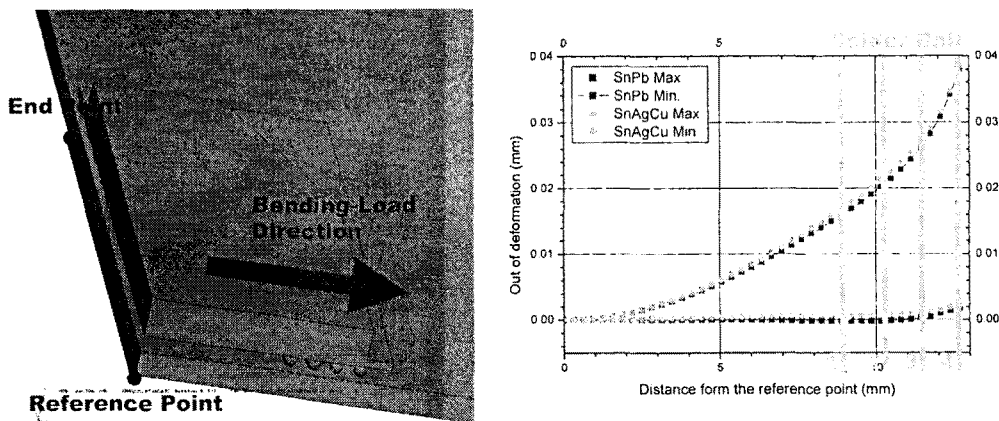


<그림 11> 반복열하중시험(A)과 반복굽힘하중시험(B)을 묘사하기위한 유한요소해석모델

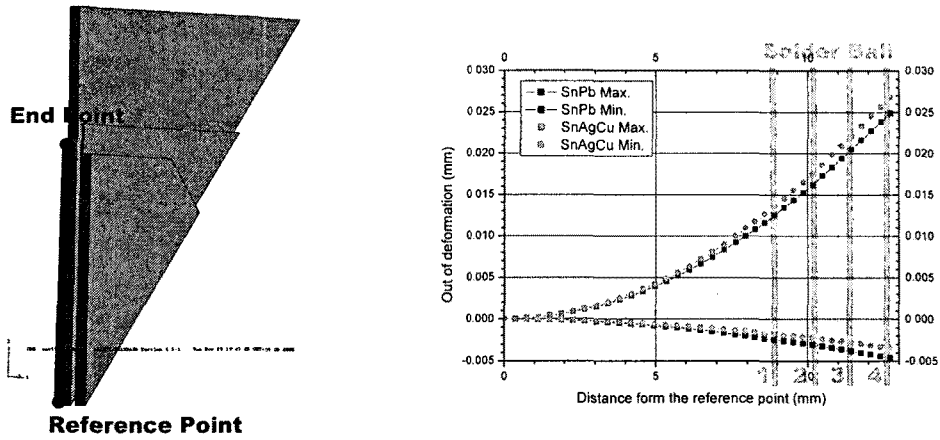
굽힘하중과 열하중이 가해질 때의 PCB의 변형은 매우 큰 차이를 보이게 된다. 그림8과 그림9는 굽힘하중이 작용할 때의 변형거동을 나타낸 것으로 최대하중이 가해질 때와 하중이 제거되었을 때의 변형거동을 나타내고 있다. 그림8은 하중이 작용하는 방향 (그림7(B)에서 1방향)을 따라가면서 PCB의 변형거동을 나타낸 그림으로 유연솔더(SnPb)와 무연솔더(SnAgCu)의 변형거동을 하나의 그림으로 나타내었다. 동일하중임에도 불구하고 유연솔더와 무연솔더의 변형량이 다를 수 있는데, 이는 유연솔더가 보다 무연솔더보다 연성이 크므로 변형이 많이 발생하기 때문이다. 그림8~10에 표기된 숫자는 솔더볼 조인트가 위치하는 곳으로 내부부터 1, 2, 3, 4라고 번호를 붙이였다. 그림8에서 보면, 변형되는 기울기가 1에서 4로 갈수록 급격해지는 것을 알 수 있으며, 이는 4번 솔더 위치, 즉 외각의 솔더에 하중이 보다 집중됨을 알 수 있다. 그림9는 하중이 가해지는 방향과 수직인 방향(그림7(B)에서의 2방향)을 따라가면서 변형을 관찰한 것인데, 그림8과 반대방향으로 변형이 생기게 된다. 이는 즉 패키지 아랫부분의 PCB가 튀틀림 변형을 하는 것을 의미한다. 변형의 크기는 굽힘 하중 방향의 1/3정도 이다. 그림10은 열하중이 가해질 때의 면외변위를 나타내는데, 열하중이 가해질 때는 방사상으로 대칭으로 변형이 된다. 그리고 기울기의 변화도 완만하게 되는데 이는 굽힘하중과 달리 하중이 내부적으로 발생되기 때문이다.



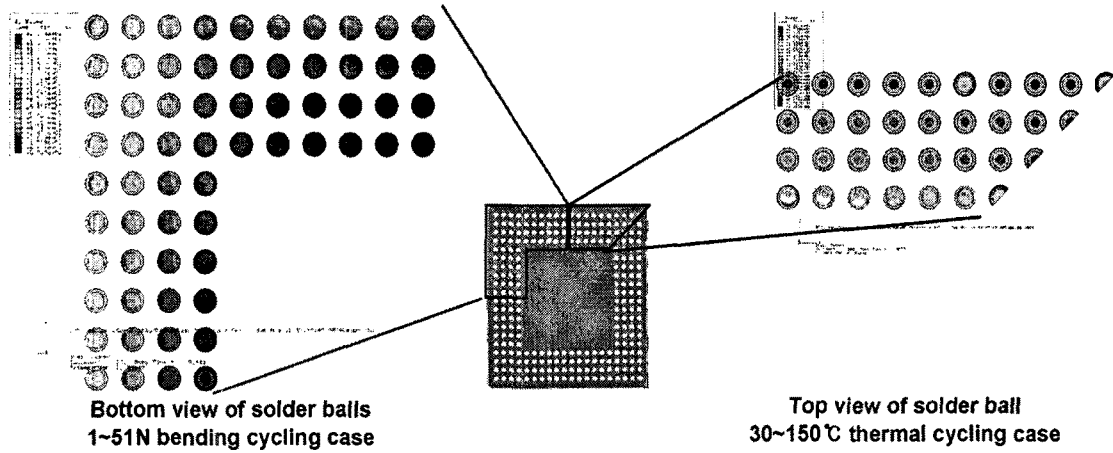
<그림 12> 굽힘하중이 작용할 때 굽힘하중 방향으로의 면외 변형 거동



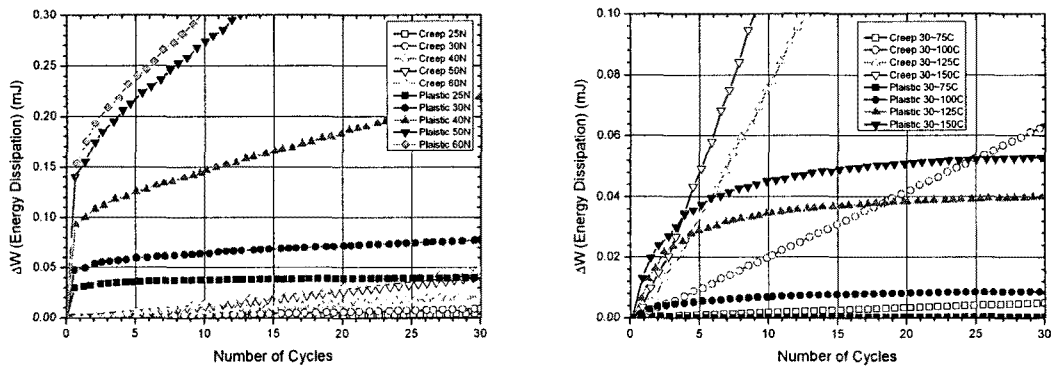
<그림 13> 굽힘하중이 작용할 때의 굽힘하중과 수직 방향으로의 면외 변형 거동



<그림 14> 열하중이 작용할 때의 면외 변형 거동



<그림 15> 솔더조인트의 응력분포 (Von Mises Stress Distribution)



<그림 16> 반복굽힘시험에서 사이클에 따른 에너지 방출 <그림 17> 반복열하중시험에서 사이클에 따른 에너지 방출

응력분포를 보면 다음의 그림 11와 같다. 굽힘하중이 가해지는 경우에는 패키지 센터로부터 가장 멀리 떨어진 솔더조인트에 최대응력이 작용하게 된다. 반면 열하중 조건에서는 패키지 센터에서 가장 가까운 곳에 최대응력이 작용된다. 또한 굽힘하중 조건에서는 PCB와 솔더

조인트사이에서 최대응력이, 열하중 조건에서는 패키지과 솔더조인트 사이에서 최대응력이 나타난다. 이 결과는 앞장의 절단면 관찰 결과와 일치한다.

그림 12과 13은 사이클에 따른 소성에너지(Epl)와 크리프에너지(Ecr)를 나타낸다. 에너지는 각 요소의 에너지 밀도에 그 요소의 부피를 곱해서 계산하게 되는데, 그림 12과 13에서는 가장 에너지가 높은 솔더조인트 하나 전체의 에너지를 나타내며, 식 (1)과 식(2)를 이용하여 계산하게 된다.

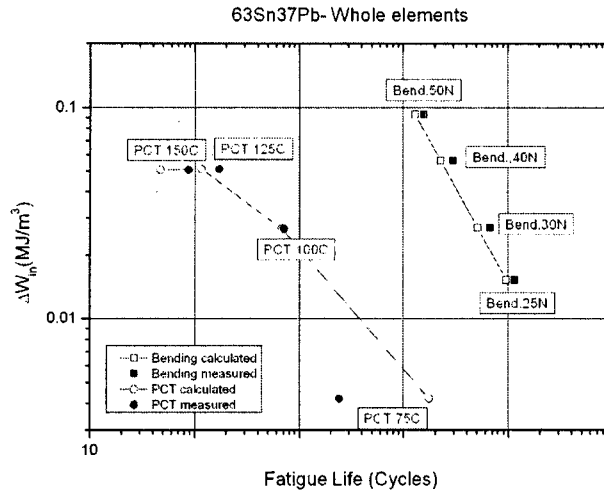
$$E = \sum_{i=1}^n W_i V_i \tag{식1}$$

$$\Delta W = \frac{\sum_{i=1}^n dE_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \tag{식2}$$

여기에서 E는 에너지, W는 에너지 밀도를 V는 요소의 부피를 나타낸다. 각각의 단위는 J, J/m³, m³이다. 그리고 ΔW는 사이클당 방출되는 에너지 밀도를 나타낸다. 그리고 dE는 안정된 사이클에서의 사이클당 에너지증가량을 나타낸다. ΔW의 경우 초기 사이클에서는 급격히 증가하다가 어느 정도 시간이 지나고 난 후에 수렴하여 일정한 값을 가지게 된다. 하중 조건에 따라 안정화되기까지 소요되는 사이클 수가 틀리기는 하나 보통 30사이클 후에는 안정화되기 때문에 총 30사이클을 묘사하였다.

열하중이 가해지는 경우에는 그림 12에서 보듯이 Ecr이 Epl보다 모든 경우 크게 된다. 열하중이 커짐에 따라 Ecr과 Epl은 증가하게 되는데, 특히 Ecr이 크게 증가하게 된다. Epl은 10~20사이클이 지난 후에는 수렴해서 그 양이 감소하게 되는 반면, Ecr은 초기부터 선형적으로 증가하게 된다. 안정화된 후에 ΔWcr은 ΔWpl에 비해 40~90배정도 큰 것으로 나타났다. 실제 PBGA를 해석한 경우에도 ΔWcr이 7배 크게 나타났다. 이것으로부터 초기에는 소성변형이 많이 발생하나 안정화 된 이후에는 소성변형의 발생량은 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서 열하중조건에서는 크리프에 의한 손상이 주요 파손 변수(damage parameter)가 됨을 알 수 있다.

급힘하중이 가해지는 경우에는 ΔWpl이 ΔWcr보다 큰 경우가 많았다. 하중이 작은 1~26N 인 경우에는 ΔWcr이 ΔWpl보다 컸으나 이를 제외하고는 ΔWpl이 ΔWcr보다 2~7배정도 크게 나타났다. 그림 13에서는 Epl이 Ecr보다 커서 1~26N인 경우에도 소성변형이 더 클 것 같으나 증가량인 ΔW를 비교해보면, ΔWcr이 ΔWpl보다 크게 나온다. 하중이 증가할수록 ΔWpl과 ΔWcr의 차이가 커지게 된다. 그리고 하중폭이 30N이 넘어가게 되면, Epl은 수렴하지 않고 일정한 값으로 증가하면서 손상으로 누적된다. 이로부터 큰 하중조건에서는 ΔWpl이 중요한 파손 변수가 됨을 알 수 있다.



<그림 18> 유연 솔더 (63Sn37Pb)에서의 ΔW_{in} 와 피로수명과의 관계

$$N_f = 7.121 \times 10^{-7} \Delta W_{in}^{-1.111} e^{\frac{0.5356}{8.62 \times 10^{-3} \times T_{max}}} \quad (식3)$$

피로수명을 예측하기 위한 모델은 다양한 방법이 제안되어 있다. 본 연구에서는 에너지를 기초로 한 모델을 도입하였다. 변형량에 기반을 둔 모델은 시험 규격에 맞춰서 만들어진 시편에 적용가능하나 본 연구와 같이 솔더조인트인 경우, 각지점에서의 변형률이 틀리기 때문에 적용하기는 쉽지 않다. 또한 균열성장모델은 현재 균열성장속도를 알 수 없기 때문에 적용되기 힘들다. ΔW_{in} 은 ΔW_{cr} 과 ΔW_{pl} 의 합을 나타낸다. ΔW_{in} 과 피로수명과의 관계를 그래프로 나타내면, 유연솔더인 경우에 그림 14와 같게 된다. 내부가 차있는 포인트는 실험으로 구한 값을 나타내고 있으며, 내부가 비어있는 포인트는 위에 제시한 식3으로 예측한 값을 나타내고 있다.

유사파워사이클링 시험기를 이용하여 수행한 반복열하중시험의 결과는 보다 짧은 수명을 나타내고 있다. 유사파워사이클링과 반복굽힘 시험 결과가 차이를 보이는 것은 다른 메커니즘에 의한 것임을 알 수 있다. 앞의 그림 12과 13에서 보았듯이 열하중이 작용할 때와 기계적하중이 작용할 때 손상으로 누적되는 비탄성 에너지가 다른 것을 알 수 있다. 열하중일 때 주로 크리프로 누적되는 손상이 기계적 하중에 의해 누적되는 소성변형에 의한 손상보다 수명을 급격히 감소시킨다고 생각된다. 즉 같은 에너지를 가져도 크리프에 의한 비탄성에너지가 수명을 더욱 감소시킨다.

4. 결 론

본 연구에서는 반복열하중 시험과 반복굽힘하중 시험을 수행하고, 유한요소해석을 통해 그 특성을 비교해보았다. 시편의 절단면 관찰과 유한요소해석을 통해 열하중이 가해질 때는 패키

지 센터에서 가까운 솔더조인트부터 파손되기 시작해서 바깥쪽 솔더조인트로 균열이 진전함을 알았다. 이는 열하중이 가해지면, PCB가 호모양으로 휘면서 솔더조인트가 회전하기 때문이다. 반면, 굽힘하중이 가해질 때는 패키지 센터로부터 멀리 떨어진 솔더조인트에서 균열이 시작되어 안쪽으로 진행됨을 알았다. 4점굽힘시험으로부터 늘어나게 되는 PCB가 솔더조인트를 잡아당기고, 포아송비 때문에 가로방향으로 수축되는 것이 더해져서 최외각솔더가 파손되게 된다.

크리프와 소성변형의 영향을 비교해보면, 반복열하중시험에서는 크리프가 주요 손상변수로 작용하며 반복굽힘시험에서는 소성변형이 주요한 손상변수임을 알 수 있었다. 반복열하중이 가해지는 경우에는 반복적으로 기계적 하중이 가해질 때보다 수명이 짧아지게 되는데 이는 크리프가 중요한 손상변수로 작용하기 때문이다.

참 고 문 헌

- [1] Kim, I. and Lee, S.B. (2007), Reliability and Failure Analysis of Lead-free Solder Joints for PBGA package under a Cyclic Bending Load, IEEE trans. CPT, submitted.
- [2] Lee, W. W. et al (2000), "Solder Joint Fatigue Models: Review and Applicability to Chip Scale Packages", Microelectronics Reliability, vol. 40 , pp. 231-244.
- [3] Mercado, L.L. et al (2004), "Use-Condition-Based Cyclic Bend Test Development for Handheld Components", Proc 54th Electronic Components and Technology Conf, Las Vegas, NV, 1-4 June, pp. 1279-1287.
- [4] Rooney, D.T. et al (2004), "Materials Characterization of the Effect of Mechanical Bending on Area Array Package Interconnects", Microelectronics Reliability, vol. 44, pp. 275-285.
- [5] Schubert, A. et al (2002), "Reliability Assessment of Flip-Chip Assemblies with Lead-free Solder Joints", Proc 52th Electronic Components and Technology Conf, San Diego, CA, 28-31 May, pp. 1246-1255.
- [6] Shetty, S. et al (2003), "Three- and Four-point Bend Testing for Electronic Packages", J. Electronic Packaging, vol. 125, no. 4, pp. 556-561.
- Syed, A. (2001), "Reliability and Au Embrittlement of Lead Free Solders for BGA Applications", Proc 21th International Symposium on Advanced Packaging Materials, Braselton, GA, 11-14 March, pp.143-147.
- [7] Towashiraporn, P. et al (2005), "A Hybrid Model for Computationally Efficient Fatigue Fracture Simulations at Microelectronic Assembly Interfaces", Int. J. Solids and Structures, vol. 42 , pp. 4468-4483.
- [8] 김일호 (2004), 석사학위논문 MME04018, BGA 패키지의 열피로 특성에 관한 연구, KAIST