

취성/연성 파괴에 대한 수명예측 모델 및 신뢰성 설계

김일호*·이순복†

Development of Reliability Design Technique and Life Prediction Model for Electronic Components

Ilho Kim and Soon-bok Lee

Key Words: BGA, Fatigue(피로), Life prediction(수명예측), Reliability(신뢰성)

Abstract

In this study, two types of fatigue tests were conducted. First, cyclic bending tests were performed using the micro-bending tester. A four-point bending test method was adopted, because it induces uniform stress fields within a loading span. Second, thermal fatigue tests were conducted using a pseudo power cycling machine which was newly developed for a realistic testing condition. The pseudo-power cycling method makes up for the weak points in a power cycling and a chamber cycling method. Two compositions of solder are tested in all test condition, one is lead-free solder (95.5Sn4.0Ag0.5Cu) and the other is eutectic lead-contained solder (63Sn37Pb).

In the cyclic bending test, the solder that exhibits a good reliability can be reversed depending on the load conditions. The lead-contained solders have a longer fatigue life in the region where the applied load is high. On the contrary, the lead-free solder sustained more cyclic loads in the small load region. A similar trend was detected at the thermal cycling test.

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. A constitutive model which includes both creep and plasticity was employed. Thermal fatigue was occurred due to the creep. And plastic deformation is main damage 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.

기호설명

$\Delta W_{\text{inelastic}}$: 비탄성 에너지 방출률 (MJ/m^3)

$\Delta W_{\text{plastic}}$: 소성 에너지 방출률 (MJ/m^3)

ΔW_{creep} : 크리프 에너지 방출률 (MJ/m^3)

1. 서론

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 한 쪽 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 작용하

† 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sblee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3069 FAX : (042)869-5013

* 한국과학기술원 기계공학과 seamark@kaist.ac.kr

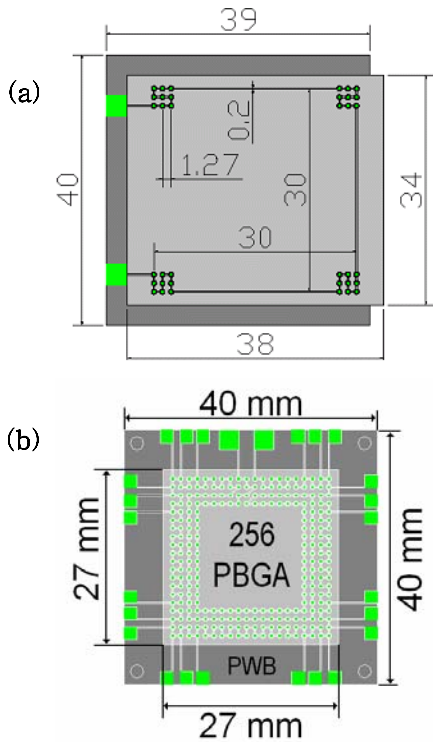


Figure 1. (a) acceleration-oriented tested specimens
(b) PBGA tested specimens.

기도 한다. 본 연구에서는 이 두 가지 하중에 대한 연구를 수행하고 각각의 하중이 솔더조인트에 어떠한 영향을 미치는지 비교 평가하여 수명을 예측하는데 도움을 주고자 한다.

2. 실험장치 및 실험 결과

2.1 시험 시편 결과

본 연구에서는 열피로 시험을 가속해서 수행하기 위해 특별히 고안된 시편(Fig. 1(a))와 실제 사용되는 PBGA 패키지(Fig. 1(b))를 이용하여 유사파워 사이클링 시험(Pseudo-Power Cycling Test) 수행하였다. 실제 PBGA를 시험해본 이유는 우리가 고안해서 사용한 시편의 결과가 실제 PBGA 패키지에 사용이 가능한지를 확인해보기 위해서이다. 그리고 굽힘 시험은 시험기의 성능상 가속이 가능하기 때문에 특별히 고안된 시편을 사용하지 않고 유사파워 사이클링과 동일한 PBGA를 시편으로 사용하였다.

2.2 유사파워 사이클링 시험 및 시험 결과

본 연구에서는 챔버 사이클링 테스트와 파워 사이클링 테스트의 장점을 가지면서 파워 사이클

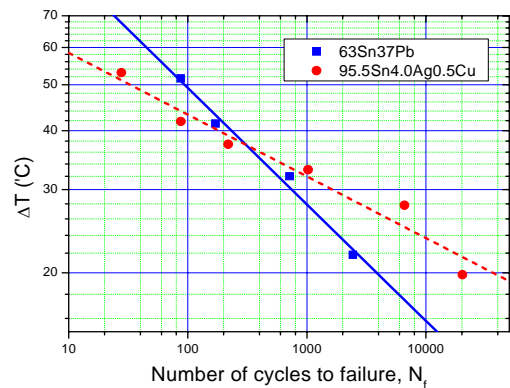


Figure 2. The relation between ΔT and thermal fatigue life for acceleration-oriented specimens.

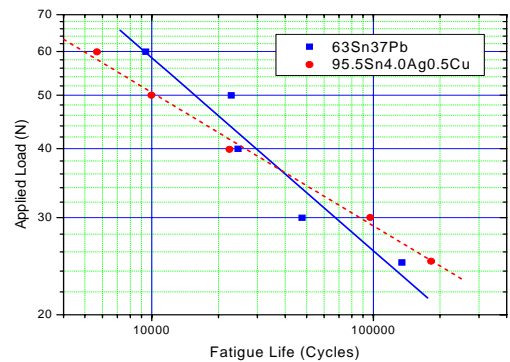


Figure 3. The relation between applied load and thermal fatigue life.

링 테스트를 묘사하는 새로운 실험 방법을 개발하여 실험을 수행하였다. 이 방법은 칩에 전력을 공급하여 발열시키는 대신에 열전달을 이용하여 칩의 온도를 높이는 방법으로 파워 사이클링 테스트와 거의 같은 효과를 낼 수 있으며, 온도 조절이 쉽고, 실험을 수행하기가 편하다. 다양한 온도 조건으로 시험을 수행하였고, 그 결과를 보면 다음 Fig. 2과 같다.⁽¹⁾

2.3 반복 굽힘 시험 및 결과

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 전자패키지의 실험에 적당하지 않다. 또한 유압

으로 구동되어 재료 시험기의 가격이 고가이고, 시스템이 차지하는 공간도 커 전자패키지의 신뢰성 평가에는 비효율적이다. 새롭게 개발된 굽힘 시험기의 경우, 전자기 코일(electro-magnetic coil)을 이용하여 구동되며, 전자 패키지의 실험에 적합한 고분해능의 로드셀과 변위 게이지를 장착하였다. 시험 결과는 다음의 Fig. 3와 같다.⁽²⁾

3. 유한요소해석

3.1 모델링

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 Fig. 4(a)에 나타냈으며, 31,945개의 요소(element)와 39,091개의 절점(node)을 가지고 있다. 1/8 모델로 대칭면에 대칭경계조건을 주었다. 중간의 구형이 솔더조인트를 나타낸다. 반복굽힘시험을 묘사하는 모델은 Fig. 4(b)에 나타냈으며, 이 모델은 60,656개의 요소와 75,343개의 절점을 가지고 있다. 하중받는 강체로 모델링 했으며, 그림 상에서 호형태도 위치만 표시되어 있다. 해석에서 사용된 물성치는 표4에 나타나있다. 크리프와 소성 변형을 모두 고려해주었으며, 온도에 따라 물성이 많이 변하는 것들은 온도 또한 고려해주었다.

3.2 해석 결과

에너지 방출률은 솔더 조인트의 수명 예측에 많이 쓰이는 손상 변수(damage parameter)이다. 하지만 에너지 방출률 계산을 솔더조인트의 경계면

Table 1. The ratio of inelastic energy between the interface and whole solder ball

	경계면 (a) (mJ)	솔더볼 (b) (mJ)	비율(a/b) (%)
25~75℃	136	324	42
25~100℃	1358	4440	31
25~125℃	4760	18580	26
25~150℃	6480	30700	21
1~26N	217	227	95
1~31N	867	931	93
1~41N	4113	4370	94
1~51N	11189	11590	97
1~61N	13160	13610	97

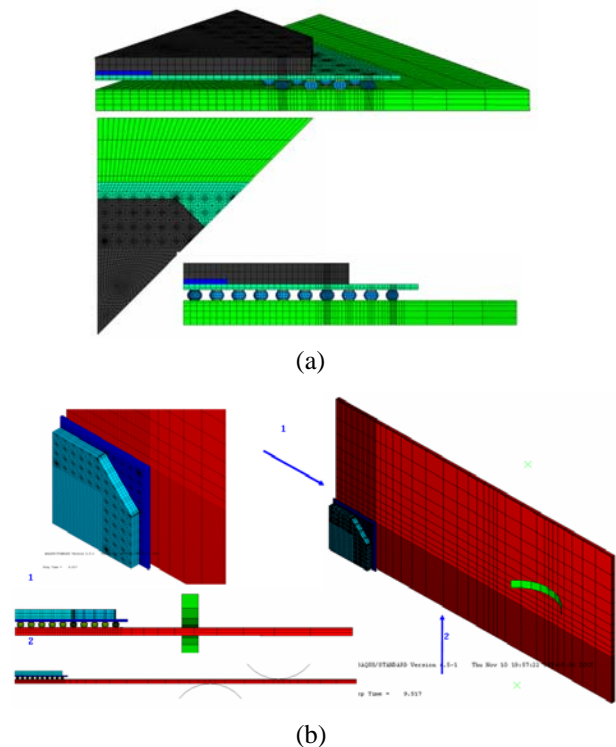


Figure 4. FE model for (a) thermal cycling test and (b) cyclic bending test.

(interface)에서 하는 것과 솔더조인트 전체를 하는 것은 상당히 다른 결과를 보인다. 다음의 Table 1은 유사파워사이클링과 반복굽힘시험에서의 비탄성에너지 방출률을 경계면과 전체 솔더에서 비교한 표이다. Table 1.에서 보듯이 열피로 시험의 경우 인터페이스로의 에너지 집중도가 적은 반면 굽힘피로 시험에서는 거의 모든 에너지가 인터페이스에 집중되어 있다. 이는 뒤에서 설명하게 될 동일 에너지에서의 굽힘피로의 경우가 수명이 짧

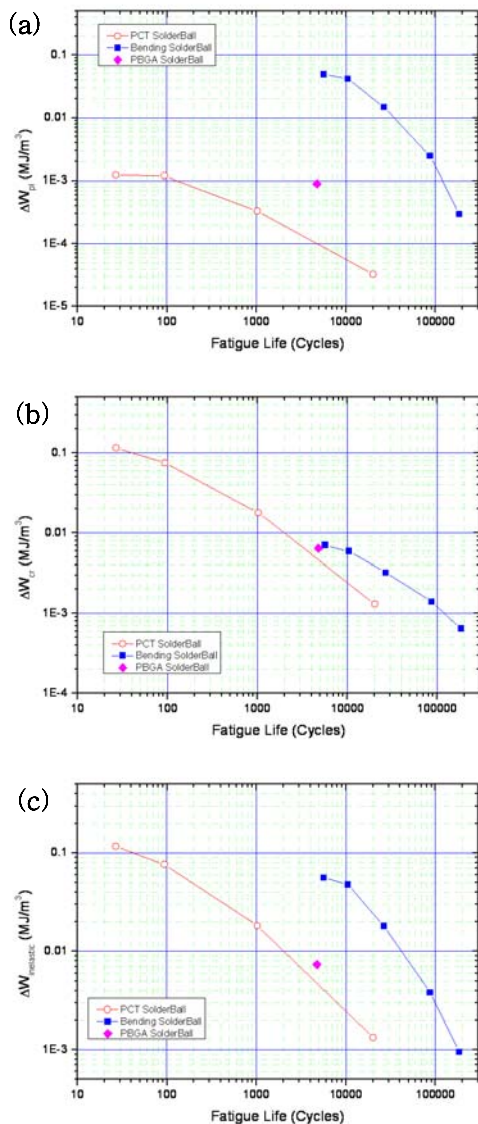


Figure 5. (a) Plastic, (b) Creep and (c) Inelastic energy and fatigue life curve.

음을 설명할 수 있다.

유한요소해석을 통해 얻은 에너지 방출율을 수명과 비교해보면 다음의 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 무연솔더에 대한 데이터를 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 소성에너지 방출률(plastic energy dissipation rate)과 수명과의 관계를 나타내고, Fig. 5(b)는 크리프에너지 방출률(creep energy dissipation rate)과 수명과의 관계를 나타낸다. 그리고 Fig. 5(c)는 소성과 크리프 에너지의 합, 즉 비탄성에너지 방출률(inelastic energy dissipation rate)과 수명과의 관계를 나타내고 있다.

Fig. 5(a)에서 보듯이 유사과워사이클링시험에

서 소성변형에너지의 영향은 굽힘시험보다 적은 것을 알 수 있다. 반대로 유사과워사이클링시험에서 크리프에너지의 영향성은 Fig. 5(b)에서 보듯이 굽힘시험보다 큰 것을 알 수 있다. 이렇듯 열피로시험과 기계적피로 시험에서 솔더 조인트의 파손에 주로 영향을 주는 인자가 틀린 것을 확인하였다. 따라서 소성변형에너지와 크리프에너지의 합인 비탄성에너지와 수명을 같이 그린 Fig. 5(c)에서 보면 동일한 비탄성 에너지일지라도 수명은 틀리게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 동일한 비탄성 에너지가 방출될지라도 열피로 시험에서의 수명이 짧음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 반복열하중 시험과 반복굽힘하중 시험을 수행하고, 유한요소해석을 통해 그 특성을 비교해보았다. 크리프와 소성변형의 영향을 비교해보면, 반복열하중시험에서는 크리프가 주요 손상변수로 작용하며 반복굽힘시험에서는 소성변형이 주요한 손상변수임을 알 수 있었다. 동일한 비탄성 에너지에서 반복열하중이 가해지는 경우 수명이 반복적으로 기계적 하중이 가해질 때보다 짧아지게 되는데 이는 크리프가 중요한 손상변수로 작용하기 때문이다.

후 기

연구는 과학기술부의 “전자부품신뢰성 설계 기술” 개발 사업의 “전자부품의 취성/연성파괴에 대한 수명예측모델 및 신뢰성 설계 기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김일호, 박태상, 이순복, 2004, “무연솔더(SnAgCu)와 유연솔더(SnPb)의 피로 수명 비교 연구”, *대한기계학회논문집A*, 28권 12호, pp.1856-1863.
- (2) 김일호, 이순복, 2006, “굽힘 하중하에서 유연 및 무연 솔더 조인트의 신뢰성 평가”, *마이크로 전자 및 패키징 학회 (IMAPS)*, vol. 13, no. 1, pp63-72