

Sn-37mass%Pb 솔더 및 Sn-3.5mass%Ag 무연솔더를 이용한 μ BGA 솔더접합부의 열피로수명 예측

신영의*, 이준환*, 하범용*, 정승부**, 정재필***

*중앙대학교 기계공학부

**성균관대학교 금속재료공학부

***서울시립대학교 재료공학과

Thermal Fatigue Life Prediction of μ BGA Solder Joint Using Sn-37mass%Pb Solder and Sn-3.5mass%Ag Lead-free Solder

Young-Eui Shin*, Jun-Hwan Lee*, Beom-Yong Ha*, Seung-Boo Jung** and Jae-Pil Jung***

*Department of Mechanical Engineering, Chung-ang University, Seoul 156-756, Korea

**Department of Metallurgical Engineering, Sungkyungwan University, Suwon 440-746, Korea

***Department of Material Science & Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract

This study is focussed on the numerical prediction of the thermal fatigue life of a μ BGA (Micro Ball Grid Array) solder joint. Numerical method is used to perform three-dimensional finite element analysis for Sn-37mass%Pb, Sn-3.5mass%Ag solder alloys during the given thermal cycling. Strain values, along with the result of mechanical fatigue tests for solder alloys were then used to predict the solder joint fatigue life using the Coffin-Manson equation.

In this study, a practical correlation for the prediction of the thermal fatigue life is suggested by using the dimensionless variable γ .

As a result, it could be found that Sn-3.5mass%Ag has longer fatigue life than Sn-37mass%Pb in low cycle fatigue.

In addition, the result with γ show a good agreement with the FEA results.

(Received March 2, 2001)

Key Words : Thermal fatigue life, Finite element method, Lead-free solder, Solder joint, Micro ball grid array

1. 서 론

CSP (Chip Scale Package)의 일종인 μ BGA (Micro Ball Grid Array)는 0.3~0.35mm의 Ball size, 0.75mm~0.5mm 미세 피치간격의 초경량 패키지로 핸드폰 등의 소형 전자제품에 폭넓게 사용되어지고 있다.

μ BGA는 기존에 사용되어지던 일반적인 BGA 류와 비교해 패키지 전체 구성물 중 열팽창계수가 가장 작은 실리콘 칩(Si Chip)이 차지하는 비율이 약 60%정도로 높아졌기 때문에 패키지와 PCB(Printed Circuit

Board) 사이에서 발생하는 총체적 열팽창 계수 차이로 인한 응력의 집중이 더욱 커져, 패키지 접합부의 신뢰성¹⁻⁶⁾이 문제시 되고 있다.

한편 낮은 용점과 접합성, 가격, 작업성 등이 양호하여 전자기기의 솔더링에는 Sn-Pb 계열이 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 인체에 유해한 것으로 알려진 Pb의 사용이 점차적으로 규제되고 있는 실정이다. 이러한 추세는 1997년 EU로부터 제시된 전자제품의 재활용에 관한 법안(End of Life Electrical and Electronic Equipment)을 통해서도 알 수 있다. 1998년 7월말에 수정되어진 이 법안은

Pb 등의 위험물질을 2004년 1월까지 배제할 것을 명시하고 있다. 또한 일본의 전자산업계에서는 이러한 추세를 선도하여 Pb의 사용에 대한 규제를 자발적으로 만들어 실행하고 있다. 이와 같이 전 세계적으로 Pb-free 솔더에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 상대적으로 국내에서는 이에 대한 연구와 상품화에 대한 진행이 미진한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 실정아래에서 절실하게 요구되는 μ BGA와 Pb-free 솔더에 대한 수명평가방법을 제시하기 위하여 μ BGA에 대하여 37mass%Pb-Sn 공정 솔더와 Sn-3.5mass%Ag 솔더를 채택한 3차원 유한요소해석모델을 구성하였다. 점탄소성거동에 대비하여 구성되어진 각각의 모델 중, 먼저 일반적인 솔더 형상을 가진 모델에 대하여 솔더 재질별로 온도범위 233K~393K, 253K~373K, 293K~373K의 세 가지 열 사이클을 3회씩 가하여 솔더 접합부에 집중되어진 응력과 변형률의 분포를 유한요소해석을 통해 검토하였다.

이를 통해 계산되어진 솔더 재질과 형상, 온도범위에 따른 응력과 변형률 값은 Otsuka, Kagawa^{7,8)}에 의해 연구·발표되어진 실험 데이터와 Coffin-Manson 피로수명예측식⁷⁾을 적용하여 각각의 조건에 따른 피로 수명을 예측하는데 사용하였다. 또한 온도 변화에 따른 ΔT 와 용융온도 T_M 등의 변수를 이용하여 얻어진 γ 를 이용하여 열피로수명식을 유도하였다.

2. 솔더 접합부의 열 피로파괴

솔더 접합부위의 열 피로는 일정 온도의 기계적인 피로와는 달리 재료의 용융온도에 비하여 고온에서 이루어지게 되므로, 온도에 따라 변화하는 재료의 물성과 금속의 확산, 금속간 화합물 층의 형성 등으로 인한 조직 변화, 고온환경에서 장기간 방치됨으로 인한 크립 거동 등의 영향을 받으므로 파괴기구가 복잡해진다.

앞서 설명되어진 바와 같이 솔더 접합부에서 발생하게 되는 응력과 변형률은 각 축 방향에 대해 복합적으로 작용하게 되나 Von Mises 항복 조건식을 이용하여 다음과 같은 단방향성의 상당 응력과 변형률로 표현될 수 있다.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(1/2)[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eq} = \sqrt{(1/2)[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (2)$$

여기서, σ_i ($i=1, 2, 3$)는 주응력을, ϵ_i ($i=1, 2, 3$)는 주변형률을 나타낸다. 따라서, 위 식으로부터 온도변화에 따른 상당 응력 및 변형률 값을 구할 수 있다. 여기서 발생된 전체 상당변형률은 유한 요소 해석 결과로부터

터 얻어진 탄성, 소성변형률 크기의 총합으로 식(3)과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (3)$$

여기서, ϵ : 전체 상당변형률

ϵ_e : 탄성변형률

ϵ_p : 비탄성변형률

또한, 열 피로 수명 평가를 위해 온도 사이클에 의한 솔더 접합부 부위에서 열팽창 계수의 차이로 인해 발생된 상당 소성변형률과 수명(N_f)과의 관계⁹⁾는 식(4)와 같고, 변형된 Coffin - Manson 식^{10,11)}들이 널리 사용되고 있다.

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^c = c \quad (4)$$

여기서, $\Delta \epsilon_p$:상당 소성변형률 진폭

α : 피로지수

c : 피로상수

본 연구에서는 유한요소해석 결과로 얻어진 상당 응력과 상당 소성 변형률을 Otsuka, Kagawa^{7,8)}등에 의해 연구·발표되었던 Sn-37mass%Pb 및 Pb-free 솔더에 대한 기계적 피로수명 실험 결과와 이를 보정하여 얻어진 피로상수를 적용시켜 열피로 수명을 예측하였다. 수명 예측에는 식(4)와 같은 Coffin -Manson 관계식이 사용되었으며, 이 때 각 솔더별 피로상수는 Table 1^{5,8)}에 나타난 바와 같다.

Table 1 Mechanical fatigue constant of solder alloys⁵⁻⁸⁾

	Sn-37Pb	Sn-3.5Ag
α	0.24	0.9
C	0.49	0.5

또한, 열피로 수명은 주로 소성변형과 크립변형에 의해 결정된다. 그러나 Kariya⁸⁾나 Maeda¹⁴⁾등의 연구 결과에 의하면 변형률 속도가 0.025Hz 이하의 조건에서는 크립변형을 고려해야 하지만, 변형률 속도가 0.25Hz 이상의 경우에는 크립 변형의 영향이 거의 없어, 소성 변형만을 고려해도 열피로 수명에는 크게 영향이 없는 것으로 보고 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 솔더 접합부에 발생하는 비탄성 변형은 소성 변형에만 기인한 것으로 가정하였다.

3. 유한요소 해석방법

본 연구에서는 범용 패키지인 ANSYS 5.51을 이용하여

유한요소 해석을 수행하였다.

해석대상으로는 6×8열의 μ BGA 중 Fig. 1과 같이 μ BGA를 PCB 기판 위에 접합한 구조를 선택하였으며, 모듈 전체는 대칭 구조로 되어 있으므로 전체 모듈의 1/4부분만을 모델링 하였다. 구성되어진 모델은 응력과 수명에 미치는 영향을 고려하여 실리콘 칩(Si chip), 봉지수지(Encapsulant), 구리패드, (Cu pad), 폴리이미드 필름(Polyimid film), 일라스트모(Elastomer) 재질의 누빈(Nubin)과 FR-4 PCB등의 총 7가지의 재질로 구성되고있다. 전체 모델은 Fig. 2와 같이 19,578개의 절점과 17,180개의 요소로 구성하였다.

또한 열피로 실험시 Fig. 2와 같이 응력 집중으로 한 피로파괴가 예상되는 최외곽 솔더 접합부위를 세밀하게 메쉬(mesh)하여 관찰하였다. 유한 요소 모델링에는 8절점 3차원 열적 요소인 솔리드 70, 8절점 구조해석 요소인 솔리드 45, 8절점 점성 요소인 솔리드 107등이 사용되었다.

또한 솔더에서 예상되어지는 집탄소성 변형을 해석하기 위하여 응력 경화(stress stiffening), 대변형률(large strain), 대변형(large deflection) 효과를 고려하였다. 솔더를 제외한 모든 재료는 등방성(isotropy)의 선형 탄성재료로 가정하였으며, 소성 변형을 고려 해

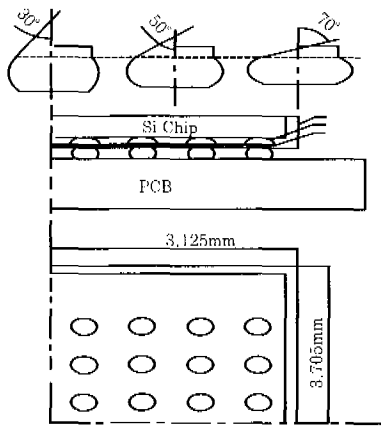


Fig. 1 Schematic diagram of μ BGA and solder ball

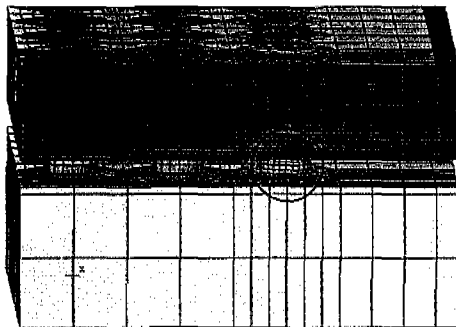


Fig. 2 Finite element model of μ BGA

Table 2 Mechanical properties of components of μ BGA

	ρ (kg/mm ³)	E (GPa)	C.T.E(ppm)	ν	
Si chip	2.33E-6	188	2.3	0.25	
Encapsulant	1.77E-6	2.54	164	0.4	
Elastomer	1.03E-6	0.25	220	0.45	
Cu Pad	8.92E-6	119	17	0.34	
Base Film	1.6E-6	4	17	0.35	
	Sn-Pb	8.42E-6	25.8	21.4	0.4
	Sn-Ag	7.36E-6	43.2	30	0.3
PCB	1.03E 6	0.25	22	0.45	

야 하는 솔더 접합부의 비선형 해석을 위하여 각각의 솔더 재질과 온도에 따라 다른 항복응력값을 갖는 bi-linear kinematic hardening으로 가정하였다. Table 2는 해석을 위해 사용되어진 각 요소의 주요 물성치를 나타내고 있다.

경계 조건으로는 대칭 구속조건으로 μ BGA의 1/4 절단면에서 각 축방향으로의 변위를 제한하였고, 하중 조건은 해석시간의 단축을 위하여 Fig. 3^{[12],[13]}과 같이 시간에 따라 모든 절점에서 균일한 온도분포를 갖도록 하였으며 열팽창을 계산하기 위한 기준온도로는 293K으로 지정하였다. 또 이 열 사이클로부터 솔더 접합부의 솔더의 비선형성에 따른 안정된 변형 경로 곡선(strain hysteresis loop)를 얻고, 일시적인 텀(transient ratcheting)현상이나 하강(shakedown)효과를 최소화하기 위하여 완전한 3 사이클을 가하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 응력과 변형률 분포

Fig. 4는 3 사이클 통과한 후의 관찰된 변형된 패키지

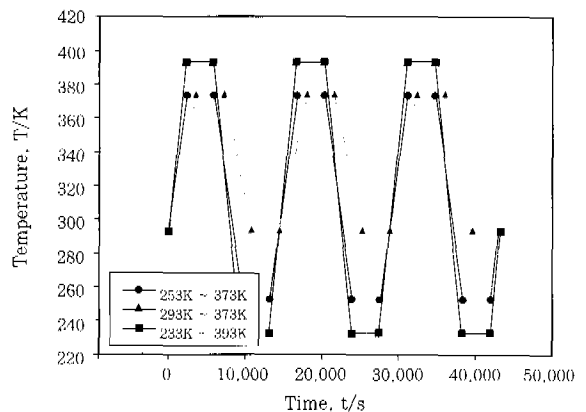


Fig. 3 Temperature profile of thermal cycling test^{[12],[13]}

의 형상을 나타내고 있다. 패키지는 열팽창계수가 작은 실리콘 칩(Si-Chip) 부분에 비해 상대적으로 열팽창계수가 큰 봉지수지(Encapsulant)층에서 많은 변형을 하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 변형 경향은 결국 패키지 내부에서도 실리콘 칩(Si Chip)과 봉지수지(Encapsulant), 그리고 솔더내부의 이종 구성물들의 열팽창차이로 인하여 솔더 접합부에 응력이 집중하게 된다. 같은 순간에 μ BGA의 각 구성 부위에서의 응력 분포와 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 누비안 역시 패키지의 최외곽 부분에서 최대응력이 집중되는 것을 알 수 있다.

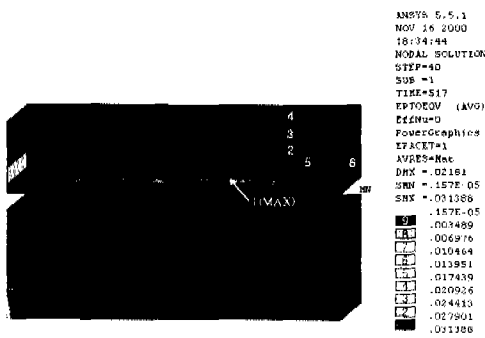


Fig. 4 Strain distribution in μ BGA

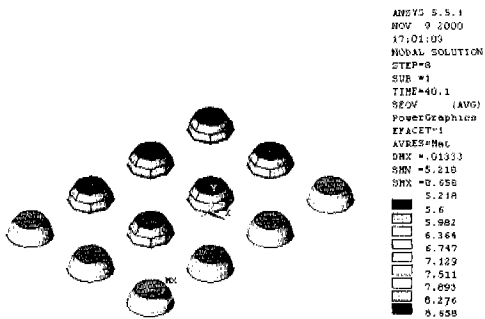


Fig. 5 Stress distribution of nubbian in μ BGA

Fig. 6은 유한요소해석을 통해 얻어진 각 열사이클 조건 아래에서의 솔더재질과 형상에 따른 평균 소성 변형률을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도 폭이 작은 293~373K인 경우는 Sn-37Pb 솔더는 소성 변형률 진폭이 0.001466이고, Sn-3.5Ag 솔더는 소성 변형률 진폭이 0.003626이다. 또한 온도폭이 큰 233~393K인 경우는 Sn-37Pb 솔더는 소성 변형률 진폭이 0.006745이고, Sn-3.5Ag 솔더는 소성 변형률 진폭이 0.015806이다. 즉, 소성 변형률 진폭은 전반적으로 Sn-37Pb를 사용한 경우보다 Sn-3.5Ag를 사용한 경우가 더 크게 나타났다.

Fig. 7은 소성변형률 진폭과 온도폭의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도폭이 작은 293~373K인 경우는 Sn-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 소성 변형률 진폭이 약 60% 증가함을 보여주며, 온도폭이 큰 233~393K인 경우는 Sn-폭이 3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 소성 변형률 진 약 57% 증가함을 보여 준다.

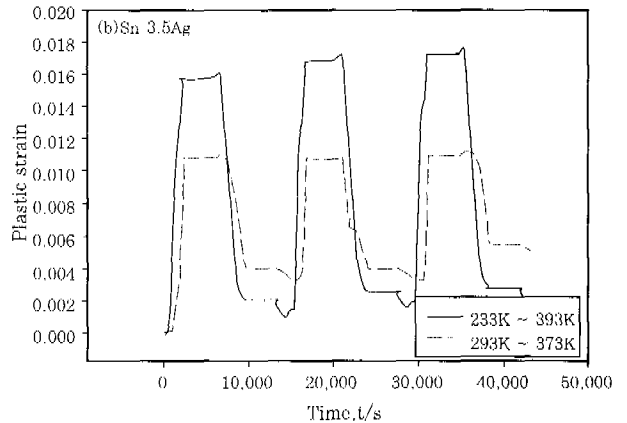
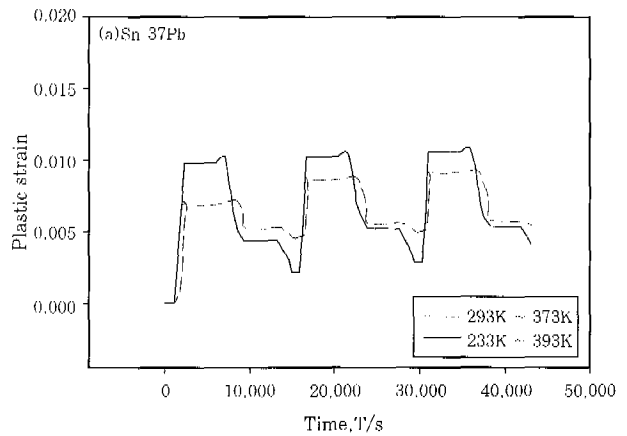


Fig. 6 Strain hysteresis curve of two different solder alloys

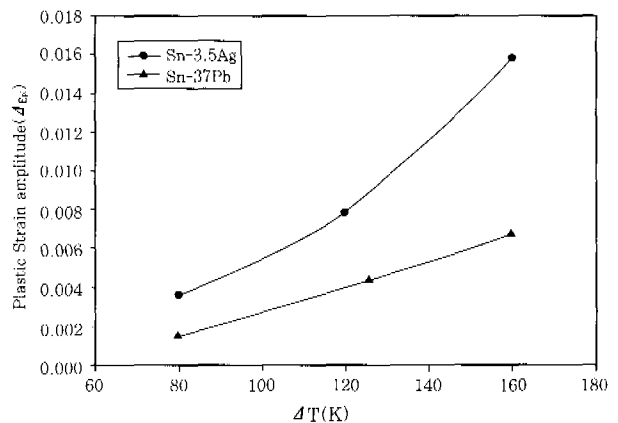


Fig. 7 Relationship between plastic strain amplitude and ΔT

4.2 열피로 수명 예측

4.1의 해석결과를 이용하여 온도 조건과 솔더 재질에 대한 피로수명의 차이를 검토하기 위해 유한요소해석을 통해 얻어진 각 온도재질별 소성 변형률을 Otsuka, Kagawa^{7,8)}의 기계적 피로실험 결과로 얻어진 Table 1의 피로상수 값을 Coffin-Manson 수명식에 적용시켜 각각의 피로수명을 유도하였다 이때 low cycle fatigue에서의 Coffin-Manson법칙과 같은 대수적인 선형관계를알아보기 위해 솔더의 열 피로에 탄성변형이 미치는 영향은 무시하였다.

각 열사이클 조건 아래에서의 솔더 재질별 열 피로수명을 살펴보면, 온도폭이 작은 293~373K인 경우는 Sn-37Pb 솔더의 경우는 열 피로수명값이 33,000사이클이고, Sn-3.5Ag 솔더의 경우는 열 피로수명값이 61,606사이클이다.

또한 온도폭이 큰 233~393K인 경우는 Sn-37Pb 솔더의 경우는 열 피로수명값이 1,464사이클이고, Sn-3.5Ag 솔더는 열 피로수명값이 3,242사이클 이었다. 전체적으로 Sn-3.5Ag 솔더의 경우가 Sn-37Pb 솔더보다 약 50%이상의 피로수명의 증가를 보여준다. 또한 온도폭이 작은 293~373K인 경우는 Sn-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 열 피로수명값이 약 46% 증가함을 보여주며, 온도폭이 큰 233~393K인 경우는 Sn-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 열 피로수명 값이 약 55% 증가함을 보여 준다.

Fig. 8은 앞에서 기술한 열사이클 조건 아래에서의 솔더 재질별 열 피로수명을 대수 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 솔더 재질별 피로수명과 온도범위를 대수관계로 나타내었을 때 대체적으로 선형적인 관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이때 기계적 피로실험결과⁷⁾와 마찬가지로 열피로에서

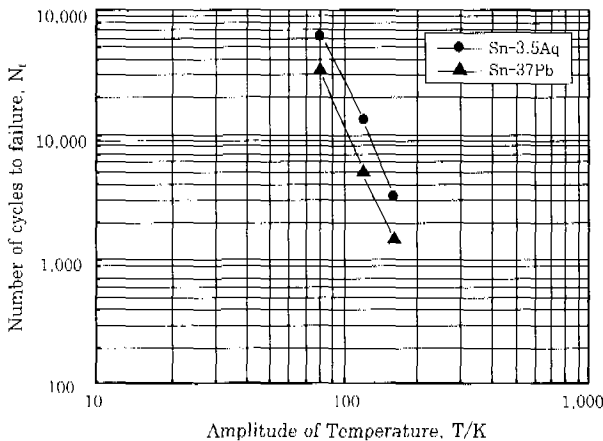


Fig. 8 Log-log graph of ΔT vs. N_f

도 Sn-3.5Ag가 Sn-37Pb에 비해 우수한 열 피로수명을 나타내는 것을 알 수 있다.

4.3 수명예측을 위한 온도의존성 무차원 변수 γ

Fig. 8를 통해 온도범위에 따른 솔더접합부 피로수명의 선형성과 변화경향을 검토하였으나, 열피로 파괴에서 솔더 재질에 따라 용융온도의 차이와 이로 인한 물성의 변화, 열사이클의 평균온도가 열피로에 미치는 영향 등도 고려되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 솔더 재질의 용점에 대한 상대적인 온도 폭과 소성변형 기준 온도에 대한 평균온도의 효과를 감안하기 위해 식(5)와 같은 온도의존성 무차원변수 γ 를 가정하여 γ 와 피로수명간의 관계를 검토하였다.

$$\gamma = \frac{\Delta T \cdot T_{mean}}{I \cdot T_M \cdot T_0} \tag{5}$$

- 여기서, ΔT : 온도폭
- $T_{mean}(K)$: 평균온도
- $T_M(K)$: 용융온도
- $T_0(K)$: 기준온도, 상온

Fig. 9는 각 솔더별 γ 값과 피로수명간의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 8에 비해 보다 선형적인 형태를 나타내주고 있다. 즉, 솔더접합부의 열피로 수명을 예측할 때, 솔더 재질과 평균 온도의 영향이 감안된 변수 γ 를 이용하는 것이 온도폭만을 변수로 사용한 것보다 정확한 수명예측이 가능함을 보여주고 있다. Fig. 9의 선형적인 관계를 이용하여 각각의 솔더에 대한 새로운 열피로 예측식과 피로상수를 구해보면 식(6), (7)과 Table 3과 같이 유도할 수 있다.

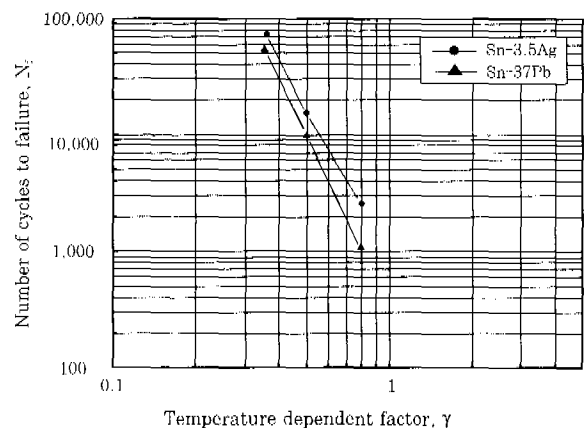


Fig. 9 Log-log graph of N_f vs. γ

Table 3 Calculated fatigue constant of two different solder alloys using γ

	Sn-37Pb	Sn-3.5Ag
logA	2.492	-4.660
β	-4.967	2.774

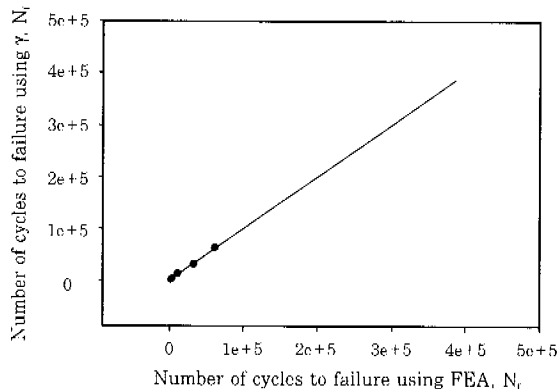
$$N_f = 10^{\log A + \beta \log \gamma} \quad (6)$$

$$N_f = A(\gamma)^\beta \quad (7)$$

여기서, A : 계산된 피로상수

β : 계산된 피로지수

식(6), (7)을 통해 구해진 각각의 열피로 수명과 기존의 FEA를 통해 구한 예측수명과의 관계를 나타낸 것이 Fig. 10이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존의 FEA를 통해 구한 수명과의 차이가 거의 없이 선형적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, 온도의존성 변수 γ 와 식(6), (7)을 이용한 수명예측은 실험이나 유한요소해석을 통한 예측수명을 대신할 수 있음을 알 수 있다. 여기서, 열피로 수명의 예측에 사용되어질 수 있는 γ 가 갖는 물리적 의미를 알아보기 위해 식(6)을 보면 다른 변수들이 일정할 경우 $\frac{1}{2}T_M$ 의 값이 작아지거나 T_{mean} 이 커질수록 γ 의 값은 커지는 것을 알 수 있다. 한편 γ 를 결정하는 다른 변수들은 일정한 상황에서 ΔT 가 커지는 경우에는 γ 도 커지게 된다. 이 경우 온도변화에 따른 소성 변형을 폭은 점점 커지게 되며, 전체 온도 사이클에서의 고온과피로거동의 영향을 받게 되는 영역 또한 넓어지게 된다. 결국 ΔT 가 증가 하게 될 경우 비탄성 변형으로 인하여 재료의 장기신뢰성에서의 열피로로 인한 부정적인 영향은 점차 커지게 된다. 또, ΔT 가 작아지는 경우엔 γ 도 작아지며 평균 온도와 재질에 따라 차이가 있긴 하나 대상부위에서 발생하게 되는 탄성 변형률 진폭의 총변형률 진폭에 대한 비율은 점차 커지게 된다. 즉 γ 는 장기신뢰성에 있어 대상물질이 얼마나 취약한 환경에 위치하는지를 확인하는 지표가 될 수 있다. 이를 본 연구에서의 해석

**Fig. 10** Thermal fatigue lift with γ vs. FEA

결과와 비교해보면 동일한 온도조건에서 Sn-Ag계열의 솔더보다 상대적으로 높은 γ 값을 갖는 Sn-37Pb가 다른 솔더에 비해 열악한 피로수명을 갖는다.

5. 결 론

본 연구에서는 Sn-37mass%Pb와 Sn-3.5mass%Ag 솔더의 재질에 따른 μ BGA 솔더 접합부의 열피로 수명을 유한요소해석법을 이용하여 검토하였다. 해석을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) Sn-37Pb 솔더 및 Sn-3.5Ag 솔더를 사용하여 μ BGA 솔더 접합부의 소성 변형률 진폭을 검토한 결과, 온도폭이 커질수록 소성 변형률 진폭의 변화율이 컸다. 또한, Sn-3.5Ag 솔더를 사용한 경우가 Sn-37Pb 솔더 경우보다 소성 변형률 진폭이 상대적으로 컸다.

2) 열피로 수명은 전반적인 온도영역에서 Sn-3.5Ag 솔더가 Sn-37Pb 솔더에 비해 우수하다는 것을 확인하였다. 전체적으로 Sn-3.5Ag 솔더의 경우가 Sn-37Pb 솔더에 비해 약 50% 이상의 피로수명의 증가를 보여주었다.

3) μ BGA의 수명예측에 있어 ΔT , T_m , T_{mean} 등을 이용하여 얻어진 무차원 변수 γ 를 이용하여 $N_f = 10^{\log A + \beta \log \gamma}$, $N_f = A(\gamma)^\beta$ 인 열피로수명식을 새로이 유도하였다. 또한 새로 고안한 수식과 종래의 FEA를 통한 열피로 수명식의 결과와 선형적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 아울러 온도의존성 변수 γ 는 열피로환경에서의 고온영향을 판단하는 지표로도 사용될 수 있는 것으로 판단되어진다.

후 기

본 논문은 한국과학재단(특정기초연구, 과제번호: 2000-1-30100-006-3)의 지원하에 이루어진 것으로 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Q. Yao, J. Qu, and S.X. Wu : Estimate the Thermomechanical Fatigue Life of Two Chip Scale Packages, IEEE Proceedings of the 49th Electronic Components & Technology Conference(1999), 797-802
2. M. Amagai : Characterization of chip scale packaging materials, Microelectronics Reliability 39(1999), 1356-1377
3. Q. Yao, J. Qu : Three-Dimensional Versus Two Dimensional finite Element Modeling Finite Element Modeling of Flip-Chip Packages, Transactions of the ASME, Vol.121(1999), 196-201
4. J. Partridge, P. Boysan : Influence of Process

- Variables on the Reliability of Micro BGA Package Assemblies, IEEE (1998), 451-457
5. 신영의, 김종민 : 플라스틱 IC 패키지 접합부의 수명예측 및 품질 향상에 관한 연구, 대한용접학회 논문집, Vol. 17, No. (1999), 124-132
 6. 신영의, 김정섭 : 패키지 유형에 따른 솔더 접합부의 열피로에 관한 연구, 대한용접학회 논문집, Vol. 17, No. 6(1999), 78-83
 7. Y. Oguchi, Y. Kariya and M. Otsuka : Shear Fatigue Characteristics of Sn-Ag-Bi, Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-In Solder Joint, Mate 98(1998), 253-258
 8. Y. Kariya, H. Kagawa and M. Otsuka : Effect of Strain Rate, Hold Time and Third Element on the Fatigue, Mate98(1998), 259-264
 9. Coffin, L.F., Jr. and Schenectady, N.Y. : A study of the Effect of Cyclic Thermal Stress on a Ductile Metal, Transactions of the ASME, Vol. 76(1954), 932-950
 10. Engelmeier, W. : Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints During Power Cycling, IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol CHMT-6, No.3(1983), 232-237
 11. W.W.Lee, L.T.Nguyen, G.S. Selvaduray : Solder joint fatigue models : review and applicability to chip scale package, Microelectronics Reliability 40(2000), 231-244
 12. Robert Darveaux : Optimizing the Reliability of Thin SmallOutline Package(TSOP) Solder Joints, Advanced in Electronic Packaging ASME, EEP-Vol. 10-2(1995), 673-685
 13. John H. Lau, Suresh Golwalkar, Steve Erasmus : Advantages and Disadvantages of TSOP with Copper Gull-WingLeads, Advanced in Electronic Packaging ASME, EEP Vol. 4-2(1993), 1129-1126
 14. K. Maeda : Creep Effects on Solder Fatigue and Life Time Prediction, Microjoining and Assembly Technology in Electronics '99(1999)... 57-62