

# 무연솔더를 이용한 $\mu$ BGA 솔더접합부의 열피로수명 예측

## Thermal Fatigue Life Prediction of $\mu$ BGA Solder Joint Using Lead-free Solder Materials

고영욱\*, 이준환\*, 신영의\*

\* 중앙대학교 기계공학부

### 1. 서론

최근 소형 전자제품에 폭넓게 사용되어지고 있는 CSP의 일종인  $\mu$ BGA(Micro Ball Grid Array)는 Si Chip이 차지하는 비율이 약 60%정도 높아져 패키지와 PCB 사이에서 발생하는 총체적 열팽창 계수 차이로 인한 응력의 집중이 더욱 커지며, 고유의 복잡한 구조와 미세화로 인하여 초기 접합 강도 및 장기적인 신뢰성<sup>1)~3)</sup>에 있어 복합적인 영향을 받게되므로 이에 대한 적절한 평가 방법이 요구되어진다.

본 연구에서는  $\mu$ BGA와 Pb-free 솔더에 대한 수명평가방법을 제시하기 위해  $\mu$ BGA에 대하여 Sn-37mass%Pb 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 열사이클을 3회씩 가하여 솔더 접합부에 집중되어진 응력과 변형률의 분포를 유한요소해석을 통해 검토하였다. 이를 통해 계산되어진 솔더 재질과 형상, 온도범위에 따른 응력과 변형률 값은 Otsuka, Kagawa등<sup>4,5)</sup>에 의해 연구·발표되어진 실험 데이터와 Coffin-Manson 피로수명예측식<sup>3)</sup>에 적용되어져 각각의 조건에 따른 피로수명을 예측하는데 사용하였다.

마지막으로 본 연구에서는 온도 변화에 따른  $\Delta T$ 와 용융온도  $T_M$ 등의 변수를 이용하여 얻어진  $\gamma$ 를 이용하여 열피로수명식을 유도하였다.

### 2. 솔더접합부의 열피로파괴

솔더 접합부위의 열피로는 재료의 용융온도에 비하여 고온에서 이루어지므로, 온도에 따른 재료의 물성과 확산, 금속간 화합물 층의 형성 등에 따른 조직 변화, 고온환경으로 인한 크립 거동 등의 영향을 받아 파괴기구가 복잡해진다.

솔더 접합부에서 발생하게되는 응력과 변형률은 각 축 방향에 대해 복합적으로 작용하게 되나 Von Mises 항복조건식을 이용, 단방향성의 상당 응력과 변형률로 표현될 수 있다.

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

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

여기서,  $\sigma_i(i=1,2,3)$  : 주응력

$\epsilon_i(i=1,2,3)$  : 주변형률

위 식으로부터 온도변화에 따른 상당응력 및 변형률 값을 구할 수 있다. 여기서 발생된 전체 상당변형률은 유한 요소 해석 결과로부터 얻어진 탄성, 소성변형률 크기의 총합으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\epsilon_t = \epsilon_{el} + \epsilon_{in} \quad \text{--- (3)}$$

여기서,  $\epsilon_t$  : 전체상당변형률

$\epsilon_{el}$  : 탄성변형률

$\epsilon_{in}$  : 비탄성변형률

또한, 온도 사이클에 의한 열팽창 계수의 차이로 인해 솔더접합부 부위에서 발생된 상당 소성 변형률과 수명( $N_f$ )과의 관계<sup>6)</sup>는 식 (4)와 같고, 변형된 Coffin-Manson 식이 널리 사용되고있다.

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^\alpha = c \quad \text{--- (4)}$$

여기서,  $\Delta \epsilon_p$  : 상당 소성변형률 진폭

$\alpha$  : 피로지수

$c$  : 피로상수

본 연구에서는 유한요소해석으로 얻어진 상당 응력과 상당 소성 변형률을, Otsuka, Kagawa<sup>4,5)</sup> 등에 의해 연구·발표되었던 Sn-37mass%Pb 및 Pb-free 솔더에 대한 기계적 피로수명 실험 결과와 이를 보정해 얻은 피로상수를 적용시켜 열피로 수명을 예측하였다. 여기에 식 (4)와 같은 Coffin-Manson 관계식이 사용되었으며, 각 솔더별 피로상수는 Table 1<sup>5)</sup>에 나타낸 바와 같다.

	Sn-37Pb	Sn-3.5Ag
C	0.24	0.9
$\alpha$	0.49	0.5

**Table 1** Mechanical fatigue const. of solder alloys<sup>5)</sup>

또한, 열피로 수명은 주로 소성변형과 크립변형에 의해 결정된다. 그러나 Kariya<sup>5)</sup> 등의 연구 결과에 의하면 변형률 속도가 0.25Hz 이상의 경우에서는 크립 변형의 영향이 거의 없어, 소성 변형만을 고려해도 열피로 수명에는 크게 영향이

없는 것으로 보고 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 유한요소해석을 수행하였다. 해석대상으로는 6×8열의  $\mu$ BGA 중  $\mu$ BGA를 PCB 기판 위에 접합한 구조를 선택하였으며, 대칭구조인 전체 모듈의 1/4부분만을 모델링 하였다. 해석대상 모델은 응력과 수명에 미치는 영향을 고려하여 실리콘칩(Si chip), 봉지수지(Encapsulant), 구리패드(Cu pad), 폴리이미드필름(Polyimid film), 일라스트모(Elastomer) 재질의 누비안(Nubbian)과 FR-4 PCB등의 총 7가지의 재질로 구성하였다. 여기서, 열피로 실험시 최대응력이 집중되는 최외곽 솔더 접합부위를 세밀하게 메쉬(mesh)하여 관찰하였다. 또한 솔더에서 예상되는 점탄소성변형을 해석하기 위해 응력경화(stress stiffening), 대변형률(large strain), 대변형(largedeflection)효과를 고려했다.

솔더를 제외한 재료는 등방성(isotropy)의 선형탄성재료로 가정하였으며, 소성 변형을 고려해야 하는 솔더접합부의 비선형 해석을 위해 각각의 솔더재질과 온도에 따라 다른 항복응력값을 갖는 bi-linear kinematic hardening으로 가정하였다.

경계 조건으로는 대칭 구속조건으로  $\mu$ BGA의 1/4 절단면에서 각 축방향으로의 변위를 제한하였고, 하중 조건은 해석시간의 단축을 위하여 시간에 따라 모든 절점에서 균일한 온도분포를 갖도록 하였으며, 열팽창 계산시 기준온도는 293K으로 지정하였다. 또 이 열 사이클로부터 솔더 접합부의 솔더의 비선형성에 따른 안정된 변형경로 곡선(strain hysteresis loop)를 얻고, 일시적인 락(transient ratcheting) 현상이나 하강(shakedown) 효과를 최소화하기 위하여 완전한 3 사이클을 가하였다.

### 4. 해석결과 및 고찰

#### 4.1 응력과 변형률

Fig. 1은 3 사이클 통과한 후의 관찰된 변형된 패키지의 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 열팽창차이

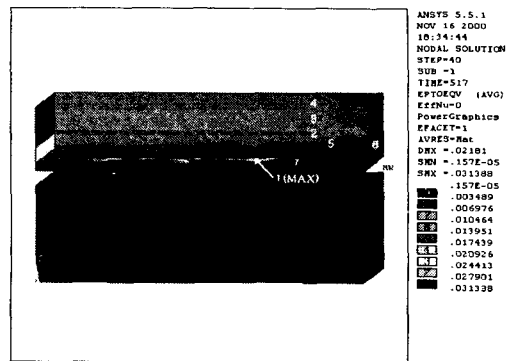


Fig. 1 Strain distribution in  $\mu$ BGA

로 인하여 솔더 접합부에 응력이 집중하게 된다.

Fig. 2는 유한요소해석을 통해 얻어진 각 열사이클 조건 아래에서의 솔더재질과 형상에 따른 평균 소성 변형률을 나타낸 것이다. 그림에서 알

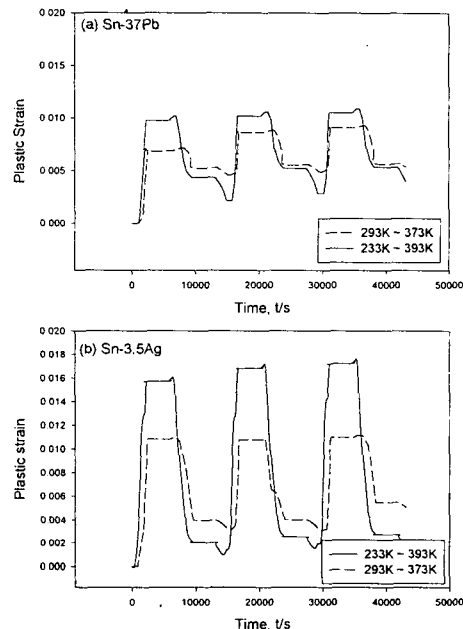


Fig 2 Strain hysteresis curve of solder materials

수 있듯이 온도폭이 작은 293~373K인 경우는 Sn-37Pb 솔더는 소성 변형률 진폭이 0.001466이고, Sn-3.5Ag솔더는 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. 3은 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-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 소

성 변형률 진폭이 약 57% 증가함을 보여 준다.

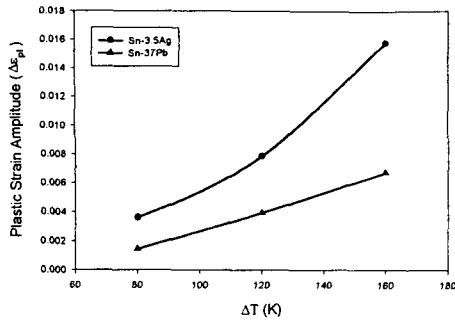


Fig. 3 Relationship between plastic strain amplitude and  $\Delta T$

#### 4.2 열피로수명 예측

4.1의 해석결과를 이용하여 온도 조건과 솔더 재질에 대한 피로수명의 차이를 검토하기 위해 유한요소해석을 통해 얻어진 각 온도재질별 소성 변형률을 Otsuka, Kagawa<sup>4,5)</sup>의 기계적 피로실험 결과에 적용시켜 각각의 피로수명을 유도하였다. 이때 low cycle fatigue에서의 Coffin-Manson법칙과 같은 대수적인 선형관계를 알아보기 위해 솔더의 열 피로에 탄성변형이 미치는 영향은 무시하였다.

Fig. 4는 각 열사이클 조건 아래에서의 솔더 재질별 열 피로수명을 나타낸 것이다. 그림에서 알

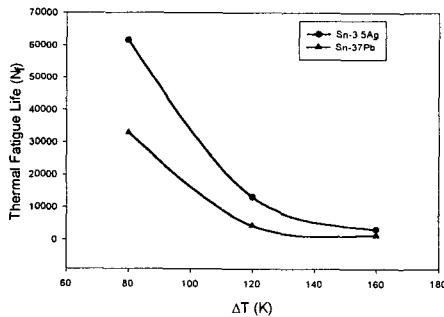


Fig. 4 Relationship between thermal fatigue life &  $\Delta T$

알 수 있듯이 온도폭이 작은 293~373K인 경우 Sn-37Pb 솔더의 경우는 열피로수명값이 33000사이클이고, Sn-3.5Ag 솔더의 경우 열피로수명값이 61606사이클이다. 또한 온도폭이 큰 233~393K인 경우는 Sn-37Pb 솔더의 경우 열 피로수명값이 1464사이클이고, Sn-3.5Ag 솔더는 열피로수명값이 3242사이클 이었다. 전체적으로 Sn-3.5Ag 솔더의 경우가 Sn-37Pb 솔더보다 약 50% 이상의 피로수명의 증가를 보여준다. 또한 온도폭이 작은 293~373K인 경우 Sn-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 열피로수명 값이 약 46% 증가함을 보여주며, 온도폭이 큰 233~393K인 경우 Sn-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb 솔더에 비해 열

피로수명 값이 약 55% 증가함을 보여 준다.

또한 Fig. 5는 앞에서 기술한 Fig. 4를 대수 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 솔더 재질별 피로수명과 온도범위를 대수 관계로 나타내었을 때 대체적으로 선형적인 관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이때 기계적 피로실험결과<sup>7)</sup>와 마찬가지로 열피로에서도 Sn-3.5Ag가 Sn-37Pb에 비해 우수한 열 피로수명을 나타내는 것을 알 수 있다.

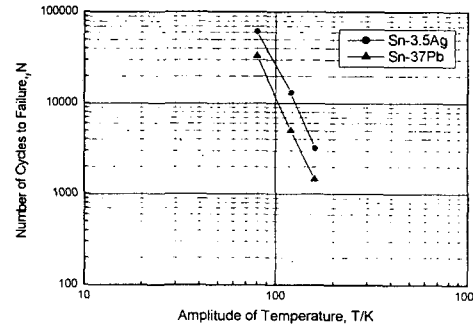


Fig. 5 Log-log graph of  $\Delta T$  vs  $N_f$

#### 4.3 수명예측을 위한 온도의존성 무차원변수 $\gamma$

Fig. 5를 통해 온도범위에 따른 솔더접합부 피로수명의 선형성과 변화경향을 검토하였으나, 열피로 파괴에서 솔더재질에 따라 용융온도의 차이와 이로 인한 물성의 변화, 열사이클의 평균온도가 열피로에 미치는 영향 등도 고려되어야 한다.

$$\gamma = \frac{\Delta T \cdot T_{mean}}{\frac{1}{2} T_M \cdot T_0} \quad \text{--- (5)}$$

여기서,  $\Delta T$  : 온도폭  
 $T_{mean}(K)$  : 평균온도  
 $T_M(K)$  : 용융온도  
 $T_0(K)$  : 기준온도, 상온

따라서, 본 연구에서는 솔더재질의 용점에 대한 상대적 온도폭과 소성변형 기준온도에 대한 평균온도의 효과를 감안하기 위해 식 5와 같은 변수  $\gamma$ 를 가정,  $\gamma$ 와 피로수명간의 관계를 검토하였다.

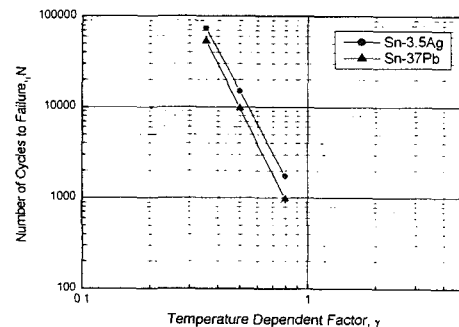


Fig. 6 Log-log graph of  $N_f$  vs  $\gamma$

Fig. 6은 솔더별  $\gamma$  값과 피로수명간의 관계를 대

수그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 6에 비해 보다 선형적인 형태를 나타내 주고 있다. 즉, 솔더접합부의 열피로 수명을 예측할 때, 솔더재질과 평균온도의 영향이 감안된 변수  $\gamma$ 를 이용하는 것이 온도폭만을 변수로 사용한 것보다 정확한 수명예측이 가능함을 보여주고 있다. Fig. 6의 선형적 관계를 이용하여 각 솔더에 대한 새로운 열피로 예측식과 피로상수를 구해보면 식(6), (7)과 Table 2와 같이 유도할 수 있다. 식 (6), (7)을 통해 구해진 각각의 열피로수명과 기존의 FEA로 구한 예측수명과의 관계를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 그림에서 알 수 있듯이

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

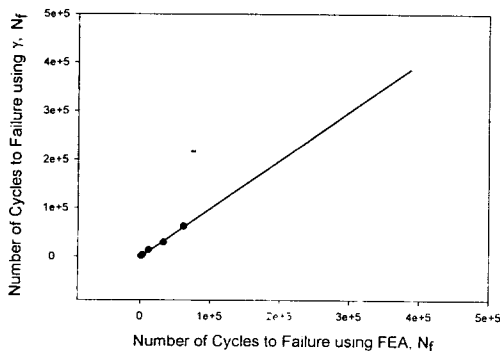
$$N_f = A(\gamma)^\beta \quad \text{--- (7)}$$

여기서,  $A$ : 계산된 피로상수  
 $\beta$ : 계산된 피로지수

**Table 2** Calculated fatigue constant of two different solder alloys using  $\gamma$

	Sn-Pb	Sn-Ag
logA	2.492	2.774
$\beta$	-4.967	-4.660

기존의 FEA로 구한 수명과의 차이가 거의 없이 선형적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, 온도의존성 변수  $\gamma$ 와 식 (6), (7)을 이용한 수명 예측은 실험이나 유한요소해석을 통한 예측수명을 대신할 수 있음을 알 수 있다. 즉  $\gamma$ 는 장기 신뢰성에 있어 대상물질이 얼마나 취약한 환경에 위치하는지를 확인하는 지표가 될 수 있다. 이를 본 연구에서의 해석결과와 비교해보면 동일한 온도조건에서 Sn-Ag계열의 솔더보다 상대적으로 높은  $\gamma$  값을 갖는 Sn-37Pb가 다른 솔더에 비해 열악한 피로수명을 갖는다.



**Fig. 7** Thermal fatigue life with  $\gamma$  vs FEA

## 5. 결론

본 연구에서는 Sn-37mass%Pb와 Sn-3.5mass%Ag 솔더의 재질에 따른  $\mu$ BGA 솔더 접합부의

열피로수명을 유한요소해석법을 이용하여 검토하였다. 해석을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) Sn-37Pb 솔더 및 Sn-3.5Ag 솔더를 사용하여  $\mu$ BGA 솔더접합부의 소성 변형을 진폭을 검토한 결과, 온도폭이 커질수록 소성변형을 진폭의 변화율이 컸다. 또한, Sn-3.5Ag 솔더를 사용한 경우가 Sn-37Pb 솔더 경우보다 소성변형을 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)  $\mu$ BGA의 수명예측에 있어  $\Delta T$ ,  $T_M$ ,  $T_{mean}$  등을 이용하여 얻어진 무차원 변수  $\gamma$ 를 이용하여  $N_f = 10^{\log A + \beta \log \gamma}$ ,  $N_f = A(\gamma)^\beta$  인 열피로 수명식을 새로이 유도하였다. 또한 새로 고안한 수식과 종래의 FEA를 통한 열피로 수명식의 결과와 선형적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 아울러 온도의존성 변수  $\gamma$ 는 열피로 환경에서의 고온영향을 판단하는 지표로도 사용될 수 있는 것으로 판단되어진다.

## 참고문헌

1. Q. Yao, et al : Estimate the Thermomechanical Fatigue Life of Two Chip Scale Packages, IEEE Proceedings of the 49th Electronic Components & Technology Conference, (1999), pp 797-802
2. M. Amagai : Characterization of chip scale packaging materials, Microelectronics Reliability 39, (1999), pp 1365-1377
3. 신영의, 김경섭 : 패키지유형에 따른 솔더접합부의 열피로에 관한 연구, 대한 용접학회 논문집, Vol. 17, No. 6, (1999), pp 78~83
4. M. Otsuka, et al : Shear Fatigue Characteristics of Sn-Ag-Bi, Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-In Solder Joint, Mate 98, (1998), pp 253~258
5. Y. Kariya, et al : Effect of Strain Rate, Hold Time and Third Element on the Fatigue, Mate 98, (1998), pp 259~264
6. 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), pp 932-950