

Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-3.0In-0.5Bi Solder를 이용한 μ BGA Solder 접합부의 열피로 수명예측

김연성* · 김형일* · 김종민** · 신영의*

*중앙대학교 기계공학부

**오사카대학교 공학연구소 생산과학

Prediction of Thermal Fatigue Life on μ BGA Solder Joint Using Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu and Sn-3.5Ag-3.0In-0.5Bi Solder Alloys

Yeon-Sung Kim*, Hyung-Il Kim*, Jong-Min Kim** and Young-Eui Shin*

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

**Department of Manufacturing and Science, Graduated School of engineering, Osaka University, Osaka, Japan

Abstract

This paper describes the numerical prediction of the thermal fatigue life of a μ BGA(Micro Ball Grid Array) solder joint. Finite element analysis(FEA) was employed to simulate thermal cycling loading for solder joint reliability. 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.

The results show that Sn-3.5mass%Ag solder had the longest thermal fatigue life in low cycle fatigue. Also a practical correlation for the prediction of the thermal fatigue life was suggested by using the dimensionless variable γ , which was possible to use several lead free solder alloys for prediction of thermal fatigue life.

Furthermore, when the contact angle of the ball and chip has 50 degrees, solder joint has longest fatigue life.

(Received April 7, 2003)

Key Words : Sn-Ag base solder, Thermal fatigue life, Finite element method, Solder joint, Micro ball grid array

1. 서 론

1990년대 이후로 전자산업은 급속한 발전을 이루었고, 더 많은 고속 및 대용량의 정보처리 능력을 요구하게 되었다. 이에 따라 현대의 전자 기기·부품은 고기능화, 소형화, 경량화의 추세에 있다. 이러한 추세에 따라 반도체 패키징 기술도 QFP(Quad flat package)¹⁻³⁾와 BGA(Ball grid array) 방식을 거쳐 CSP(Chip scale package)와 Flip chip⁴⁾의 방향으로 발전하고 있으며, 이에 대한 연구와 개발은 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.

CSP의 일종인 μ BGA(Micro ball grid array)는 0.2~0.35mm의 Ball size, 0.4mm~0.75mm 미세

피치간격의 초경량 패키지로 핸드폰 등의 소형 전자제품에 폭넓게 사용되어지고 있다. μ BGA도 COB(Chip on board)나 Flip chip assembly에서 나타나는 것과 같은 문제점을 나타내는데, 그 중 가장 중요한 문제점 중의 하나는 칩(chip) 부품과 세라믹이 아닌 다른 기판과의 열팽창계수(CTE, Coefficient of thermal expansion)의 차이에 의해 일어나는 solder 접합부의 파괴이다. 따라서, 미세 solder 접합부의 설계를 위한 적절한 열피로 수명 예측 방법이 요구된다.

또한, 오랜 기간동안 전자기기의 가장 유용한 접합재료로 사용되어 왔던 Sn-Pb계 solder가 인체에 대한 유해성 문제 때문에 선진국을 중심으로 규제될 전망이다. 선진국에서의 이러한 법적 규제는 자국에서의 유연 solder의 생산뿐만 아니라, 유연 solder를 사용한 제품

의 수명도 규제하려 하고 있고, 이것은 환경보호라는 대의적 명분이 있지만, 기술장벽의 역할을 할 수도 있기에 이에 대한 시급한 대응이 요구된다. 아직은 무연 solder가 유연 solder의 주류를 이루는 Sn-37Pb 공정 solder의 성능에 미치지 못하고 있고, 아울러 기존의 solder에 발생하지 않았던 문제들이 나타날 수 있기 때문에 신뢰성의 문제에도 대비를 하지 않을 수 없게 되었다.

본 연구에서는 이러한 상황을 감안하여 무연 solder와 Sn-37Pb solder의 μ BGA solder 접합부에 대한 수명평가를 수행하였으며, 유한 요소 해석을 통하여 서로 다른 네가지 solder 조성에 대해 각각 세 가지의 서로 다른 solder 형상을 적용하여, solder의 기하학적인 형상 요인이 수명에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 유한요소해석을 통하여 얻어진 응력과 변형률 값을 Coffin-Manson 피로수명 예측식과 Kariya 등에 의해 연구, 발표되어진 실험데이터^{5,6)}를 이용하여 열피로 수명을 예측하였다.

아울러 본 연구에서는 온도 변화에 따른 ΔT 와 용융온도 T_M 등의 각종온도를 변수로 이용하여 얻어진 무차원 변수 v 를 이용한 새로운 열피로 수명식⁷⁾을 통하여 각종 무연 solder의 열피로 수명을 예측할 수 있음을 확인, 검토하였다.

2. 유한요소해석

μ BGA solder 접합부의 장기 신뢰성을 분석함에 있어서 열피로에 의한 파괴는 가장 중요한 영역이라 할 수 있다. 이것은 칩의 발열과 냉각이나 주변 환경으로부터의 온도의 변화에 의해 발생하는 각각의 구성물의 열팽창 계수의 차이에 기인한다. 그 결과 미세접합부 계면과 solder 접합부에 집중된 응력은 열피로 파괴를 일으킨다. 이때의 PCB와 패키지사이에서 발생하는 총체적 열팽창 계수의 차이는 온도변화에 따른 열변형을 고려함으로써 계산된다.

대개 solder 접합부는 solder의 낮은 항복 강도로 인하여 열 사이클로 하중이 가해질 경우 시간독립적이고, 비회복성 변형의 특성을 갖는 소성 변형 거동을 일으키게 된다. 특히 solder와 패키지의 기하학적인 조건으로 인하여 온도 사이클에 인한 열변형 차이로 인한 응력은 solder 접합부의 상단 부위에 집중된다. 따라서 열피로 파괴는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 solder 접합 상단부 계면부위에서 일어난다.

상당 소성 변형률(Equivalent plastic strain)과 피로수명과의 관계를 알아보기 위하여 식(1)과 같은 Coffin-Manson⁸⁾식이나 변형된 Coffin-Manson^{9,10)}

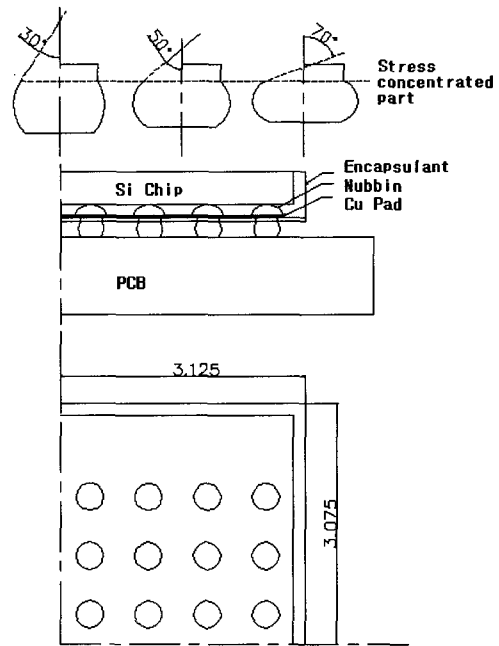


Fig. 1 Schematic diagram of μ BGA

식이 많이 사용되고 있다.

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^\alpha = c \tag{1}$$

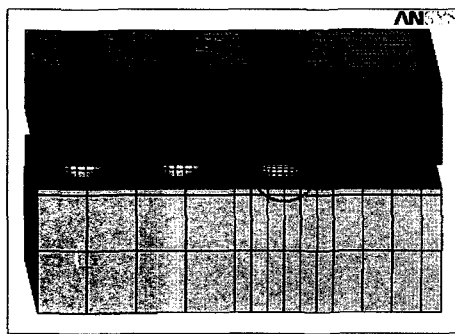
여기서, $\Delta \epsilon_p$: 상당 소성변형률 진폭
 α : 피로지수
 c : 피로상수

solder 접합부의 열응력 해석을 위하여, 범용 유한요소 해석 패키지인 ANSYS 5.7을 사용하였다. 해석대상으로는 볼의 지름이 0.35mm, 피치가 0.7mm인 6×8열의 μ BGA를 PCB기판 위에 접합한 구조를 선택하였으며, 전체 모듈을 대칭(symmetric) 구조로 가정하여 1/4 부분만을 모델링 하였다. 모델의 구성은 응력과 수명에 미치는 영향을 고려하여, 실리콘 칩(Si chip), 인캡슐란트(Encapsulant), 구리 패드(Cu pad), 폴리마이드 필름(Polyimid film), Low modulus elastomer 재질의 누빈(Nubbin)과 FR-4 PCB등의 총 6가지의 재질로 단순화하였다. Table 1에 각각의 재료의 물성치를 나타내었으며 Fig. 1, Fig. 2에는 각각 해석에 이용된 μ BGA의 개략도와 유한요소모델을 나타내었다. 전체 모델은 19,578개의 절점(node)과 17,180개의 요소(element)로 이루어져있다.

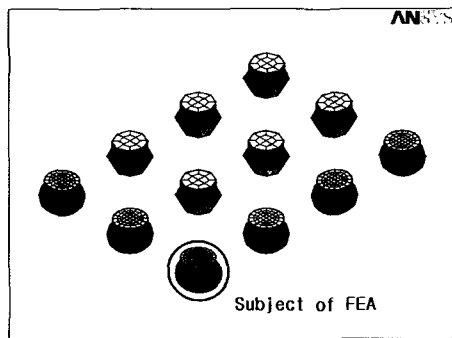
또한 열피로 실험시 Fig. 2(b)와 같이 응력 집중으로 인한 피로파괴가 예상되는 최외곽 solder 접합부위는 요소를 더욱 세밀하게 분할하였다. 유한 요소 모델에는 8절점 3차원 열해석 요소인 solid 70, 8절점 구

Table 1 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	0.343	
Base film	1.6E-6	4	17	0.35	
Solder	Sn-37Pb	8.42E-6	25.8	21.4	0.4
	Sn-3.5Ag	7.36E-6	43.2	30	0.3
	Sn-3.5Ag-0.7Cu	7.4E-6	45.1	23	0.3
	Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi	7.4E-6	42.0	25	0.3
PCB	1.03E-6	0.25	22	0.45	



(a) Whole System



(b) Solder joint

Fig. 2 Finite element model of μ BGA

조해석 요소인 solid 45, 8절점 점성 요소인 solid 107이 사용되었다. solder를 제외한 모든 재료는 등방성 선형 탄성재료로 가정하였다. 또 소성 변형을 고려해야 하는 solder 접합부의 물성은 Fig. 3^{11,12)}과 같이 각각의 solder 재질과 온도에 따라 서로 다른 항복응력 값을 갖는 등방성 비선형 탄성인 bi-linear kinematic hardening 조건으로 가정하였다.

각 solder별 피로상수는 Table 2^{6,12)}에 나타난 것을 사용하였으며, 경계조건으로는 대칭조건으로 μ BGA의 1/4 절단면에서 각 축방향으로의 변위를 제한하였다. 또한 해석시간의 단축을 위하여 Fig. 4^{13,14)}와 같이 시간에 따라 모든 절점에서 균일한 온도분포를 갖도록 열하중 조건을 적용하였으며, 열팽창을 계산하기 위한 기준온도를 293K로 가정하였다. 한 사이클은 온도상승, 하강 시간이 각각 60분이며 고온, 저온 유지 시간이 각각 60분이다. 여기에 열사이클로부터 얻어진 solder접합부의 solder의 비선형성에 따른 안정된 변형을 이력

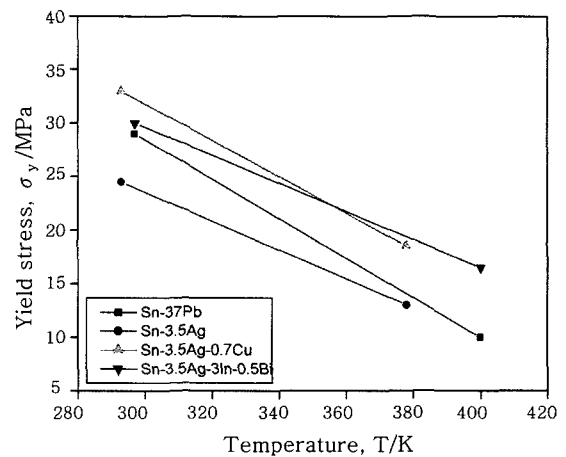


Fig. 3 Correlation of yielding stress with temperature^{11,12)}

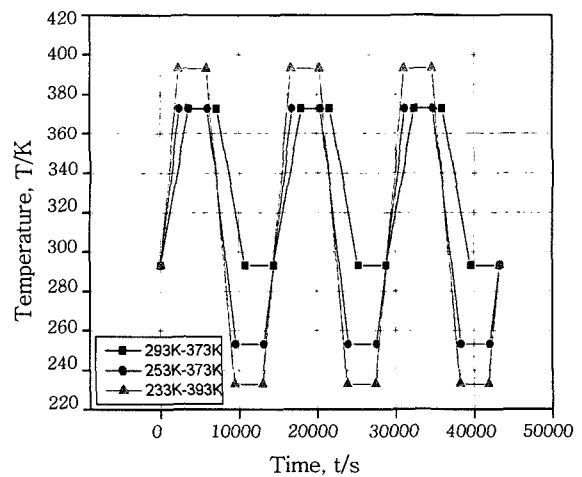


Fig. 4 Temperature profiles of thermal cycling test^{13,14)}

Table 2 Fatigue constant of four different solder alloys

	Sn-37Pb	Sn-3.5Ag	Sn-3.5Ag-0.7Cu	Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi
C	0.24	0.9	0.46	0.60
a	0.49	0.5	0.43	0.51

Table 3 Elastic-plastic strain of solder joint

		T _{cycle} (K)	Sn-37Pb	Sn-3.5Ag	Sn-3.5Ag-0.7Cu	Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi
$\Delta\epsilon_{el}$	293-373		0.000592	0.000267	0.000347	0.000303
	253	30°	0.000799	0.000248	0.000427	0.000317
		50°	0.000599	0.000209	0.000321	0.000257
	373	70°	0.000718	0.000332	0.000372	0.000383
		233-393		0.000915	0.000381	0.000489
$\Delta\epsilon_{pl}$	293-373		0.001466	0.003626	0.003713	0.000848
	253	30°	0.003957	0.007859	0.008242	0.004778
		50°	0.003030	0.004945	0.004996	0.002363
	373	70°	0.007546	0.008768	0.008377	0.005347
		233-393		0.006745	0.015806	0.014786

(strain hysteresis loop), 천이적 라쳇팅(ratcheting) 현상이나 셰이크다운(shakedown) 효과를 최소화하기 위하여 완전한 세 사이클을 가하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 Solder 재질별 피로수명 및 온도와의 관계

Table 3에는 유한요소해석을 통해 얻어진 각 열사이클 조건 아래에서의 solder재질과 형상에 따른 평균 탄·소성 변형률 진폭을 나타내었다. 소성 변형률은 온도 범위가 293K~373K로 작은 경우에는 Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi < Sn-37Pb < Sn-3.5Ag < Sn-3.5Ag-0.7Cu 의 순으로 나타났으며, 온도범위가 커질수록 Sn-37Pb < Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi < Sn-3.5Ag-0.7Cu < Sn-3.5Ag 순으로 변해 가는 것을 확인할 수 있었다. 또한 293K~373K 온도구간을 제외하고는 탄성변형률 진폭이 소성변형률 진폭에 비해 매우 작다는 사실을 알 수 있으며, 이를 통해 소성영역의 영향만을 고려한 피로수명의 예측이 타당함을 알 수 있다.

열사이클 수의 영향을 받는 비탄성 변형은 소성, 크립 변형으로 분류할 수 있다. 열피로 수명의 결과들^{6,9,15)}이 주로 소성, 크립 변형의 영향을 받기 때문에, 변형율의 주파수가 0.025Hz 이하 일때는 특히 크립 변형을 고려할 필요가 있다. 그러나, 변형율의 주파수가 0.025Hz 보다 큰 경우, 즉 전체 변형률이 최대 크립 변형률 보다 커지게 되면, solder 접합부에서 발생하는 변형은 전적으로 소성 변형만 일어나게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 solder 접합부에서 발생하는 비탄성 변형은 오직 소성 변형에 의한 것으로 가정하였다.

해석결과를 이용하여 온도 조건과 solder 재질에 대한 피로수명의 차이를 알아보기 위해 유한요소해석을 통해 얻어진 각 온도재질별 소성 변형률의 진폭이 사용되었으며, 이때 저주기 피로(Low Cycle Fatigue)에서의 소성 변형이 피로에 미치는 영향을 알아보기 위해서 탄성변형이 미치는 영향은 무시하였다. Fig. 5는 각 열사이클 조건 아래에서의 solder 재질별 피로수명을 대수적으로 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 각각의 solder 재질별 피로수명과 온도 범위를 대수관계로 나타내었을 때 대체적으로 선형적인 관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 이때 온도범위가 293K~373K(ΔT :80K)로 작은 경우의 열피로 수명은 Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi > Sn-3.5Ag-0.7Cu > Sn-3.5Ag > Sn-37Pb 순위임을 알 수 있다. 또한 온도범위가 233K~393K(ΔT :160K)로 증가함에 따라 열피로 수명의 우수정도는 Sn-3.5Ag > Sn-3.5Ag-0.7Cu > Sn-37Pb > Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi 순위임

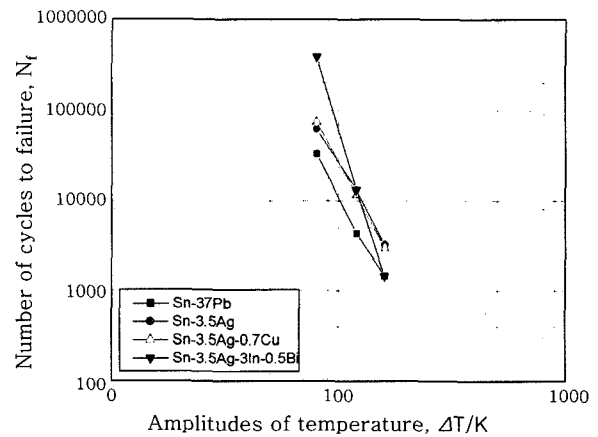


Fig. 5 Log-log graphs of ΔT vs N_f

을 해석 결과 확인할 수 있었다. 즉, 온도범위가 증가했을 때, Sn-3.5Ag가 가장 우수해지고 Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi는 그 피로수명이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 In과 Bi의 성분^{1,2,16)}이 포함된 solder의 경우 저온강도는 우수하나 고온에서는 쉽게 취약해지는 고온 취성의 경향과 함께 순수한 Sn-3.5Ag solder 합금의 연성이 Bi, In등의 첨가물이 함유되어진 Sn-Ag계열의 solder에 비해 우수한 연성을 가지기 때문이라고 판단된다.

3.2 무차원 변수 γ 를 이용한 피로수명 평가

Fig. 5를 통해 온도범위에 따른 solder 접합부 피로수명의 특성과 선형성을 확인할 수 있었다. 하지만, 열피로 파괴 수명식에서 solder 합금의 재질에 따른 용융 온도 차이와 이로 인한 물성의 변화, 열사이클의 평균 온도가 열피로에 미치는 영향 등을 고려한 논문은 찾아보기 어렵다. 따라서 본 논문은 전편에서 발표한 논문⁷⁾에서 solder 합금재질의 용융점, 온도변화의 폭, 기준 온도 및 평균온도의 변수들을 감안한 새로운 수식(2)을 이용하여 각종 무연 solder 합금의 열피로 수명예측의 타당성을 비교, 검토하였다.

$$\gamma = \frac{\Delta T \cdot T_{mean}}{\frac{1}{2} T_M \cdot T_0} \tag{2}$$

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

Fig. 6은 각 solder합금별 γ 값과 열피로 수명간의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 6은 Fig. 5에 비해 보다 선형적인 형태를 나타내주고 있다. 이를 통하여 solder합금 재질과 평균 온도의 영향이 감안된 변수 γ 를 이용하는 것이 온도 폭만을 변수로 사용한

것보다 solder 접합부의 열피로 수명예측에 유리함을 알 수 있다. Fig. 6의 선형적인 관계를 이용하여 각각의 solder합금에 대한 새로운 열피로 수명식과 피로상수를 구해보면 식(3), (4)와 Table 4와 같다.

$$N_f = 10^{\log A + \beta \log \gamma} \tag{3}$$

$$N_f = A (\gamma)^\beta \tag{4}$$

여기서, A : 계산된 피로상수
 β : 계산된 피로지수

이를 통해 새롭게 구해진 각각의 수명을 Table 5에 나타내었다.

Fig. 7은 변수 γ 를 통해 얻어진 피로수명 값을 유한 요소해석을 통해 얻어진 피로수명 값과 비교한 것이며, 두 값이 선형적으로 거의 일치함을 알 수 있다.

열피로 수명의 예측에 사용되어질 수 있는 γ 가 갖는

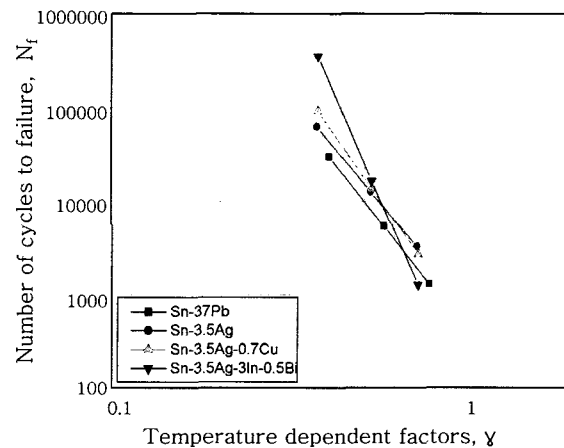


Fig. 6 Log-log graphs of γ vs N_f

Table 4 Calculated fatigue constant of four different solder alloys

	Sn-37Pb	Sn-3.5Ag	Sn-3.5Ag-0.7Cu	Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi
logA	2.492	2.774	2.565	1.716
β	-4.967	-4.660	-5.561	-8.887

Table 5 γ and number of cycles to failure of four different solder alloys

T(K)	Sn-37Pb		Sn-3.5Ag		Sn-3.5Ag-0.7Cu		Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi	
	γ	Nf	γ	Nf	γ	Nf	γ	Nf
293-373	0.399	29782	0.368	62682	0.371	91140	0.371	349119
273-373	0.562	5433	0.519	12627	0.523	13502	0.523	16507
253-393	0.750	1295	0.692	3304	0.698	2712	0.698	1269

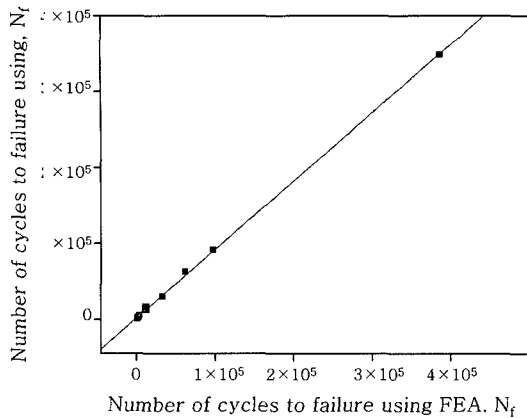


Fig. 7 Thermal fatigue life with γ vs FEA

물리적 의미를 알아보기 위해 식(2)를 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.

또한, γ 를 결정하는 다른 변수들이 일정할 때에는 ΔT 의 값에 따라 γ 의 값이 달라지게 된다. Table 3를 보면 γ 가 커질 때 즉 ΔT 가 커질수록 소성 변형률 폭은 점점 커지게 되며, 전체 온도 사이클에서의 고온파괴거동의 영향을 받게되는 영역 또한 넓어지게 된다. 한편, ΔT 가 작아지는 경우에는 γ 도 작아지며 소성 변형률의 값이 작아지고 총 변형률 진폭 중 탄성 변형률 진폭이 차지하는 영역이 점차 커지게 된다. 이 경우 피로수명의 예측에 있어 탄성변형의 영향을 무시할 수 없게 된다. 그러나 대부분의 물질에 있어 탄성변형, 또는 탄성 변형과 소성변형의 동시발생으로 인해 발생하게 되는 피로파괴는 고주기 피로파괴(High Cycle Fatigue)의 영역에 위치하게 되므로, 식(3)은 293K~373K와 같은 적은 범위의 온도조건에서는 저주기 피로파괴 이론과 고주기 피로파괴 이론의 복합적인 적용이 요구된다.

3.3 접합부 형상에 따른 피로수명 평가

한편, Table 3를 통해 solder 접합부의 형상에 따른 열피로 변형과 수명의 변화를 살펴보면 solder볼의 형상이 패키지 밑면과 수직을 이루는 축을 기준으로 50° 의 각을 이룰 경우 가장 작은 소성변형과 가장 큰 피로수명을 갖는 것을 알 수 있다. 그 원인을 알아보기 위해 먼저 응력이 집중되는 solder 접합 상단부위의 형상을 국부적으로 살펴보면 해당부위는 solder의 전체적인 형상인 볼록형보다는 오히려 오목형에 가까움을 알 수 있다. 이러한 국부적인 형상으로 인하여 solder 접합부는 50° 의 형상을 이루었을 경우 다른 형상에 비하여 응력 분산 효과가 큰 것으로 판단된다. 이러한 형상에 의한 수명 영향은 Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi처럼 다른

solder에 비하여 경한 성질을 나타낼 경우 더욱 커지게 된다. 이와 같이, solder의 형상이 피로수명에 미치는 영향은 매우 크며, 좀 더 구체적인 형상과 수명과의 관계 규명을 위한 심도있는 연구가 필요할 것이다.

결론적으로 유한요소해석을 통해 얻어진 결과는 다양한 작업 조건에서 사용되어지는 서로 다른 종류와 모양을 가진 μ BGA의 열피로 수명 예측에 사용되어질 수 있을 것이다. 하지만, 본 연구에서는 작업 프로세스와 조건에 따른 접합면의 금속학적 구조의 변화 때문에 발생하는 미세 균열에 대한 영향은 고려하지 않았다. 몇몇 종류의 물질에는 적용되지 않는 크립 거동의 영향도 고려하지 않았다. 하지만, 열피로 수명의 예측을 위하여 제안된 온도의존성 변수 γ 의 이용은 대부분의 Pb-free solder의 경우 열 피로 수명과 크립 거동 등에 대한 연구가 아직 시작 단계임을 감안할 때, 연구목적에 따른 실험환경을 선정하고 고온에서의 취약 환경을 판단하는데 유용할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Sn-37mass%Pb 및 Sn-Ag계 무연 solder 합금의 조성과 형상에 따른 μ BGA solder 접합부에서의 열피로 수명을 유한요소해석법을 이용하여 검토하였다. 그 결과를 간략하게 요약하면 다음과 같다.

1) μ BGA의 수명예측에 있어 ΔT , T_M , T_{mean} 등을 이용하여 얻어진 변수 γ 를 이용하여 각종 무연 solder 합금의 열피로 수명을 예측이 가능하다는 것을 해석을 통해서 확인하였다. 아울러 유한요소해석 결과와도 거의 일치하므로 열피로 환경에서의 고온영향과 소성변형의 영향을 판단하는 지표로도 사용될 수 있음을 확인하였다.

2) 전반적인 열피로 수명에 있어 Sn-Ag 계열의 solder 합금이 Sn-Pb에 비해 우수하며, 열사이클 온도 영역이 293K~373K와 같은 작은 온도범위에서는 Sn-3.5Ag-3In-0.5Bi가 가장 우수한 피로수명을 나타내었으며, 온도범위가 233K~393K와 같이 커짐에 따라 Sn-3.5Ag가 상대적으로 우수한 열피로 수명을 나타내는 것을 확인하였다.

3) Solder 볼의 형상이 패키지 밑면에 수직인 방향에 대하여 50° 의 형상을 이룬 경우 가장 작은 소성변형과 가장 큰 피로수명을 나타냄을 알 수 있었으며, 이를 통하여 solder 접합부의 형상이 열피로 수명에 직접적인 영향을 미친다는 것을 해석을 통하여 확인하였다. 따라서 조립 공정에서 solder 접합부의 형상을 고려한 설계, 제작이 제품수명의 신뢰성과 직결된다는 것을 제시하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Rao R. Tummala : *Fundamentals of Microsystems Packaging*, Mc Graw Hill Book Co, (2001), 660-683
2. M. Amagai : Characterization of chip scale packaging materials, *Microelectronics Reliability* **39**, (1999), 1365-1377
3. Ikemizu, M.; Fukuzawa : CSP solder ball reliability, *IEEE*, 1997., 447-451
4. J. Partridge and P. Boysan : Influence of Process Variables on the Reliability of Micro BGA Package Assemblies, *IEEE* , (1998), 451-457
5. 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
6. Y. Kariya, H. Kagawa and M. Otsuka : Effect of Strain Rate, Hold Time and Third Element on the Fatigue, *Mate* **98**, (1998), 259~264
7. Young-Eui Shin, Jun-Hwan Lee and Beom-Yong Ha : Thermal Fatigue Life Prediction of μ BGA Solder Joint Using Sn-37mass%Pb Solder and Sn-3.5mass%Ag Lead-free Solder, *Journal of KWS*, **19-3**, (2001), 406-412 (in Korean)
8. 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
9. Engelmeier, W. : Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints During Power Cycling, *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol CHMT6, **No.3**, (1983), 232-237
10. W.W.Lee, L.T.Nguyen and G.S. Selvaduray : Solder joint fatigue models : review and applicability to chip scale package, *Microelectronics Reliability* **40**, (2000), 231-244
11. John H. Lau and Yi-Hsin Pao : *Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip and Fine Pitch SMT Assemblies*, (McGraw-Hill, 1998), 118
12. Young-Eui Shin and Jong-Min Kim : A Study on the Prediction and Quality Improvement of Joint in IC Package, *Journal of KWS*, **17-1**, (1999), 124-132
13. Yu, Q. and Shiratori, M., : A study of the effects of BGA solder geometry on fatigue life and reliability assessment, *ITHERM '98*, The Sixth Intersociety Conference, (1998), 229 -235
14. John H. Lau, Suresh Golwalkar and Steve Erasmus : Advantages and Disadvantages of TSOP with Copper Gull-Wing Leads, *Advanced in Electronic Packaging ASME*, **EEP-Vol. 4-2**, (1993), 1119-1126
15. K. Maeda : Creep Effects on Solder Fatigue and Life Time Prediction, *Microjoining and Assembly Technology in Electronics '99*, (1999), 57~62
16. K. Habu : *Proceeding of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and Environment*, (1999), 21-24