

무연솔더(SnAgCu)와 유연솔더(SnPb)의 피로 수명 비교 연구

김일호* · 박태상* · 이순복†

(2004년 4월 16일 접수, 2004년 11월 1일 심사완료)

A Comparative Study of the Fatigue Behavior of SnAgCu and SnPb Solder Joints

Ilho Kim, Tae-sang Park and Soon-Bok Lee

Key Words: Fatigue(피로), Lead-Free Solder(무연솔더), Power Cycling Test(파워사이클링 테스트)

Abstract

In the last 50 years, lead-contained solder materials have been the most popular interconnect materials used in the electronics industry. Recently, lead-free solders are about to replace lead-contained solders for preventing environmental pollutions. However, the reliability of lead-free solders is not yet satisfactory. Several researchers reported that lead-contained solders have a good fatigue property. The others published that the lead-free solders have a longer thermal fatigue life. In this paper, the reason for the contradictory results published on the estimation of fatigue life of lead-free solder is investigated. In the present study, fatigue behavior of 63Sn37Pb, and two types of lead-free solder joints were compared using pseudo-power cycling testing method, which provides more realistic load cycling than chamber cycling method does. Pseudo-power cycling test was performed in various temperature ranges to evaluating the shear strain effect. A nonlinear finite element model was used to simulate the thermally induced visco-plastic deformation of solder ball joint in BGA packages. It was found that lead-free solder joints have a good fatigue property in the small temperature range condition. That condition induce small strain amplitude. However in the large temperature range condition, lead-contained solder joints have a longer fatigue life.

기호설명

PEEQ : 등가 소성 변형

$$\overline{\epsilon^{pl}} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{pl} : \dot{\epsilon}^{pl}} dt$$

CEEQ : 등가 크리프 변형

$$\overline{\epsilon^{cr}} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{cr} : \dot{\epsilon}^{cr}} dt$$

1. 서론

전자 부품의 결합에는 연납접(soldering)을 많이 사용하고 있다. 현재 사용되고 있는 대부분의 솔더(solder)는 납(lead, Pb)을 포함하고 있다. 그런데 최근 환경오염에 대한 관심이 높아지면서 납의 사용을 규제하는 제도가 속속 규정되고 있다. 일본에서는 지난 2001년부터 전자제품의 납 함유사실을 명기화하도록 하였고, 유럽에서는 2002년 12월에 전자제품 관련 폐기 처리 지침을 발표하였는데 그 내용에는 2006년 5월부터 전기, 전자 제품에 납 사용을 불허하는 조항이 포함되어 있다. 따라서 친환경적인 무연솔더(lead-free solder)

† 회원, 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

E-mail : sblee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3029

* 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

의 개발의 필요성이 대두되고 있다.^(1,2)

최근에 많은 연구자들이 무연솔더(lead-free solder)에 대해서 연구하고 있다. 그 결과 많은 조성의 무연솔더가 만들어 졌고, 그 무연솔더의 특성을 파악하려는 연구도 수행되고 있다. 무연솔더 중에서 주석(tin, Sn)에 은(silver, Ag)과 구리(copper, Cu)를 넣은 재료가 특히 주목을 받고 있으며, 많이 연구되고 있다. 그런데 피로 수명 연구 결과를 보면, 연구자들마다 서로 상반되는 결과를 보여주고 있다. A. Schubert의 결과⁽³⁾에서는 Sn37Pb이 SnAgCu보다 더 좋은 수명을 보이나 Shi-Wei Lee의 실험 결과⁽⁴⁾에서는 반대의 결과가 나온다. 한편 Ahmer Syed의 실험 결과⁽⁵⁾에서는 때로는 Sn37Pb가 때로는 SnAgCu계열이 좋은 피로 특성을 가지게 된다.

본 연구에서는 이와 같이 다양한 결과를 보여주고 있는 Sn37Pb와 SnAgCu 솔더(solder)의 피로 특성을 파악해 보고자 한다.

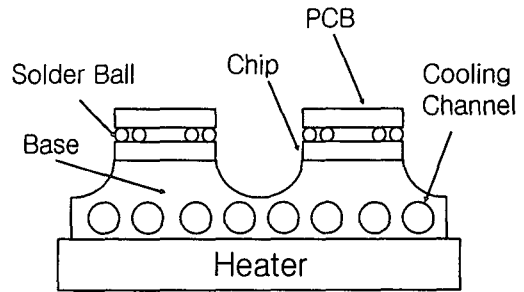


Fig. 1 A Schematic view of pseudo-power cycling tester

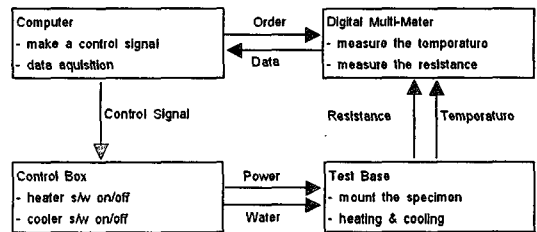


Fig. 2 System flow chart

2. 실험 방법

2.1 신뢰성 평가 방법

전자 제품에 사용되는 솔더재료의 신뢰성 평가 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 먼저 현재 실제 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 챔버 사이클링 테스트(Chamber cycling test)가 있다. 이 방법의 장점은 온도 조절이 쉽고, 실험하기가 편리한 장점이 있다. 하지만 등온조건(iso-thermal condition)으로 실제 전자 부품의 신뢰성을 평가하는데 한계를 가지게 된다.

두 번째로 파워 사이클링 테스트(Power cycling test)가 있다. 이 방법은 전자 부품에 실제로 전원을 공급하여 자체 발열을 이용하여 실험하는 방법으로 실제 작동 환경을 묘사해 줄 수 있다는 장점이 있으나, 온도 조절이 어렵고 실험을 수행하기가 힘들다는 단점을 가지고 있다.

마지막으로 기계 사이클링 테스트(Mechanical cycling test)가 있다. 이 방법은 온도 변화에 의해 유발되는 응력과 변형을 기계적으로 가해 주는 방법이다. 이 방법은 작용되어지는 응력과 변형량을 정확하게 알 수 있기 때문에 분석적으로 접근하기 용이하다는 장점을 가지고 있다.⁽⁶⁾

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

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 편리하다.

2.2 시험기 개발

시험기는 가속 실험이 가능하도록 가열 및 냉각용량을 크게 설계하였으며 되도록 많은 시편을 동시에 실험할 수 있도록 하였다. 또한 시편에 균일하게 열이 가해지도록 유한요소법(Abaqus 6.2.1)을 이용하여 열 해석을 수행하면서 설계하였다.

사용되어진 시험기의 원리는 Fig. 1과 같다. 맨 아래 장착된 히터로부터 열을 공급받아서 칩온도가 올라가게 된다. 이렇게 함으로써 비록 칩 자체에서 발열을 하는 것은 아니지만, 칩에서 발열하는 효과를 얻을 수 있다. 냉각할 때는 냉각수가 냉각관(cooling channel)을 통과하면서 칩은 냉각되게 된다.

시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. 컴퓨터의 AD보드(Analog to Digital board)를 이용하여 히터와 냉각수 밸브를 조절하면서 디지털 멀티 미터(DMM, Digital Multi-Meter)로부터 온도와 저항값

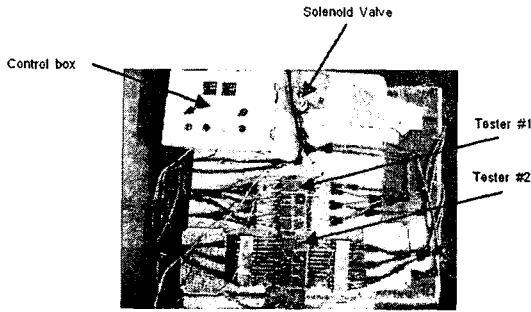


Fig. 3 Pseudo-power cycling test set-up

Table 1 Temperature Conditions

	Sn 37Pb	Sn 4.0Ag 0.5Cu	Sn 3.0Ag 0.5Cu
1	30℃~150℃	30℃~150℃	30℃~150℃
2	30℃~125℃	30℃~130℃	30℃~130℃
3	30℃~110℃	30℃~110℃	30℃~110℃
4	30℃~100℃	30℃~100℃	30℃~90℃
5	30℃~75℃	30℃~90℃	-
6	-	30℃~70℃	-

Table 2 Cycle Time Conditions

Cycle time	7.5 min
Holding time	3 min
Heating time	3 min
Cooling time	1.5 min
Cycles/day	196 cycles

을 얻게 된다.

실제로 구성된 실험기의 형상은 Fig. 3과 같이 두 개의 테스터(tester)가 있으며, 각각의 테스터에서는 동시에 7개의 시편을 동일한 온도 조건으로 실험을 할 수 있다.

실험 조건은 온도가 낮은 지점의 온도를 일정하게 유지하면서 최고 온도를 바꾸어 주면서 실험하였다. 온도 조건은 Table 1에 표시하였고, 각 구간별 시간 조건은 Table 2에 표시하였다.

온도 측정은 칩의 온도와 기관의 온도를 측정하였다. 최고 온도가 150℃일 때의 온도 분포를 나타내면 Fig. 4와 같다.

Table 3 Specification & Material of Specimen

	Chip Part	Substrate Part
Dimension(mm) (WxLxH)	40x40x2	38x34x2
Material	FR4	FR4
Finish	Ni+Au	Ni+Au
Solder Mask	SMD	NSMD

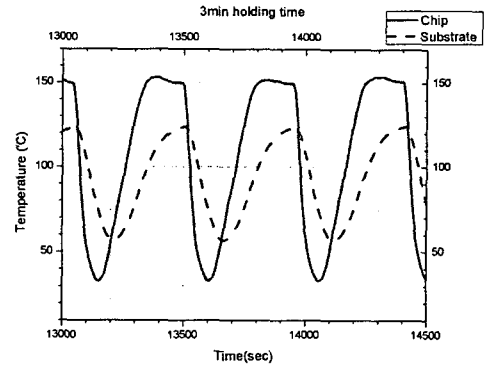


Fig. 4 Time-temperature profile of pseudo-power cycling test (— chip, - - - - - substrate)

2.3 시편의 형상 및 제작

시편의 크기와 재료는 Table 3에 나타나 있다. 시편은 크기는 가장 큰 패키지(package)와 비슷하다. 이와 같이 큰 시편을 사용한 이유는 가속 실험이 용이하기 때문이다. 시편이 클수록 보다 큰 응력(high stress)이 작용되게 할 수 있다. 따라서 동일한 시편으로 넓은 영역의 응력 범위에서 실험이 가능하다. 그리고 시편에 사용되어진 솔더볼 조인트(solder ball joint)의 수는 적게 하였다. 솔더볼 조인트가 많을수록 발생하는 응력을 나누어 받게 되고 수명이 길어지게 되어 제한된 시간 동안 모든 실험을 끝낼 수 없다. 따라서 솔더볼 조인트의 수는 시편의 거동에 영향을 미치지 않는 범위에서 최소의 수만을 사용하였다. 사용한 솔더볼의 지름은 760 μ m이고 간격(pitch)는 1.27mm이다. 솔더볼의 배치는 각 모서리에 9개씩 배치하였다. 시편의 형상은 Fig. 5에 나타나 있다. 연납접(soldering)시에 솔더볼의 높이를 일정하게 하기 위해 스페이서(spacer)를 사용하였다. 그리고 시편이 접합되면 데이지 체인(daisy chain)이 완성되어 파손유무를 저항 측정을 함으로써 알 수 있게 제작하였다.

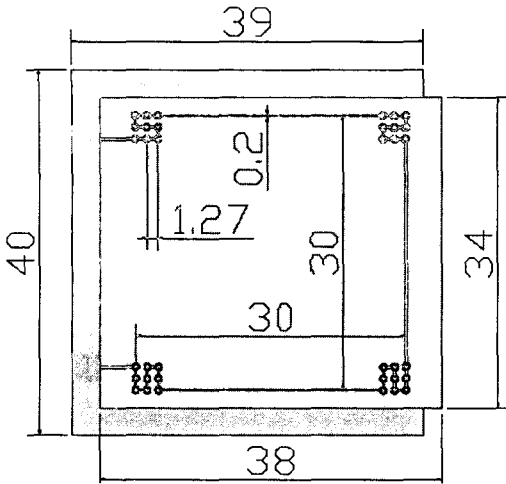


Fig. 5 Dimensions of the specimen

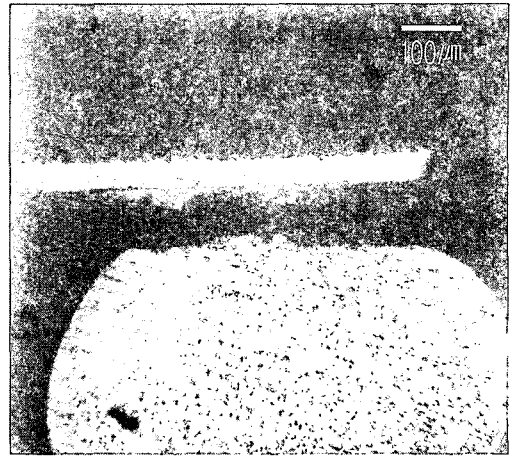


Fig. 7 Fatigue failure

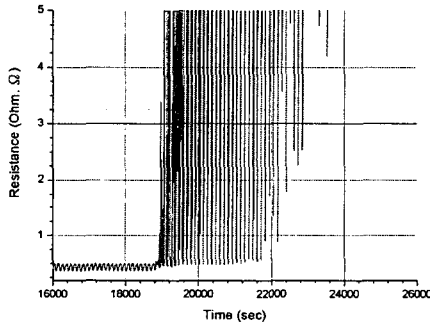


Fig. 6 Trend of a resistance change

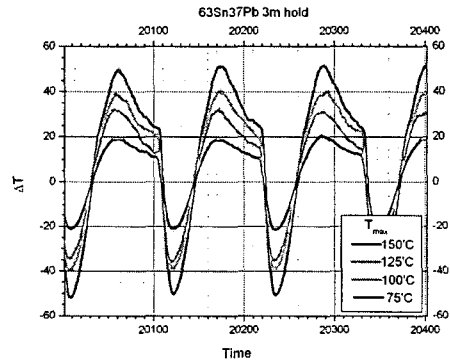


Fig. 8 Temperature difference between a chip and a substrate

3. 실험 결과

3.1 피로 파손의 정의(fatigue failure criterion)

솔더볼의 파손의 정의는 다양한 방법이 사용되고 있다. 저항값이 어느 한계값보다 클 때는 파손으로 정의하기도 하고, 초기 저항값의 몇 배를 파손으로 정의하기도 한다. 본 연구에서는 저항값이 0.6Ω 이상이 되면 그 때를 파손이 되었다고 정의하였다.

시편의 초기 저항은 0.35Ω이며, 온도가 올라갈 경우 0.5Ω까지 증가하게 된다. 이와 같이 온도에 따라 저항이 변하는 이유는 열팽창에 의해서 시편에 그려진 구리도선의 길이가 변화하여 유발되는 현상으로 판단된다.

Fig. 6은 전형적인 저항값의 변화를 나타내고 있다. 처음에는 온도가 올라갔다 내려옴에 따라서 주기적으로 저항값이 변화하다가 파손이 된

이후에는 저항값이 급격하게 증가함을 알 수 있다.

파손된 형상을 보면 Fig. 7과 같다. 구리 패드(pad)와 솔더볼의 접합부에서 크랙(crack)이 진척하여 파손되어지게 된다. 이는 솔더의 형상으로 인하여 계면 근처에서 응력 집중이 발생하며, 금속 원자의 확산에 의해 계면 근처가 경화되기 쉽기 때문이다.

3.2 실험 결과

칩의 온도와 기판의 온도의 차를 시간에 따라 나타내면 Fig. 8과 같다. 최저 온도는 동일하기 때문에 최고 온도에 따라 나타내었다. 발생하는 온도차는 진폭만 변화할 뿐, 모양은 유사하다. 이 온도차는 열팽창으로 인하여 발생하는 변형률(strain)과 밀접한 관계를 가지고 있다.

실험한 결과를 Weibull plot으로 통계 처리를 하

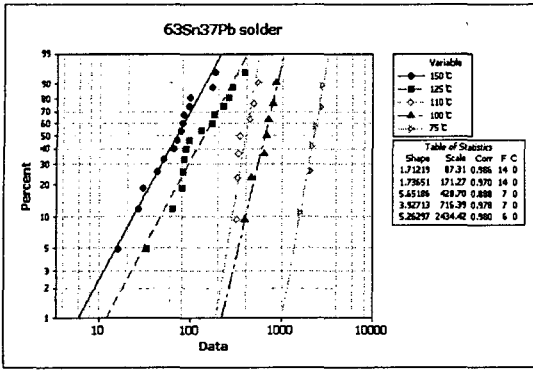


Fig. 9 Weibull plot of Sn37Pb test data

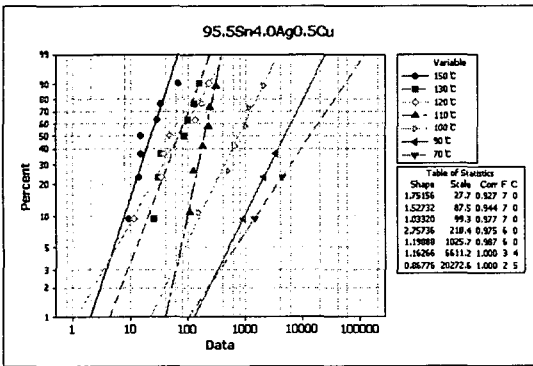


Fig. 10 Weibull plot of Sn4.0Ag0.5Cu test data

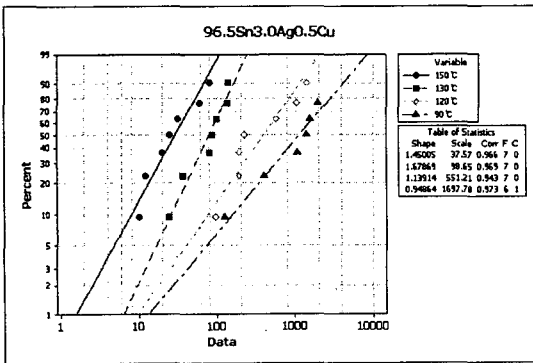


Fig. 11 Weibull plot of Sn3.0Ag0.5Cu test data

였다. Fig. 9, 10, 11은 각각 Sn37Pb, Sn4.0Ag0.5Cu, Sn3.0Ag0.5Cu 솔더의 수명을 나타낸다. 각 실험 결과의 대표 값으로 63.2%의 수명을 잡아주었다.

결과를 종합해서 온도차와 수명과의 관계를 나타내면 Fig. 12와 같게 된다. Fig. 12에서 확인할 수 있는 바와 같이 Sn37Pb는 온도차가 큰 경우에

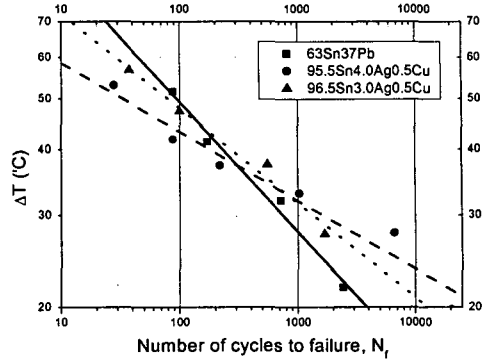


Fig. 12 ΔT vs Life

수명이 긴 반면 온도차가 적은 경우에는 SnAgCu 계열의 솔더가 수명이 길게 나타난다. 이와 같은 결과는 솔더의 피로 특성이 실험 조건에 따라 바뀌는 것을 알려주고 있다. 즉, 여러 연구자들의 실험 결과가 상반되게 나오는 것은 그들이 실험한 조건이 서로 다르기 때문임을 알 수 있다.

4. FEM 해석

파워 사이클링 실험을 통해서 솔더볼 조인트에 작용되어지는 응력과 변형량을 알 수 없다. 따라서 이를 알기 위해서 유한요소법을 이용하였다.

4.1 모델링

모델링은 Fig. 13과 같이 1/4만을 모델링하였다. 사용된 요소수는 14,617개, 질점수는 18,124개이다. 해석툴로는 Abaqus 6.2.1을 사용하였다.

사용된 물성치는 Table 4와 같다. Sn37Pb의 물성치는 B. Z. Hong이 해석에 사용한 값이고,⁽⁷⁾ Sn4.0Ag0.5Cu의 물성치는 현재까지 공포된 것이 없어서 John Lau가 Sn3.9Ag0.6Cu의 물성치로 사용한 것을 이용하였다.⁽⁸⁾

실제의 실험 조건과 동일하게 칩으로 열전달을 통하여 열을 공급하고 빼앗았으며, 자연 대류에 의한 열방출도 고려하였다. 실험을 통해 측정된 온도와 FEM 해석을 통해서 나온 온도를 비교하면 Fig. 14와 같다.

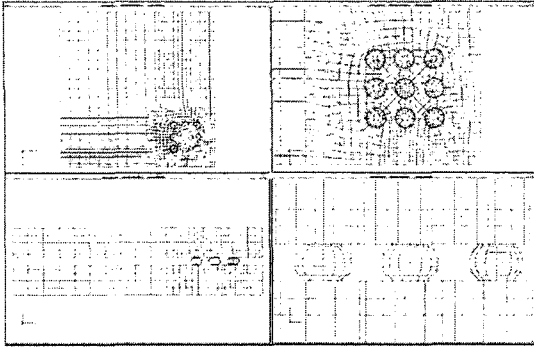


Fig. 13 Finite element model

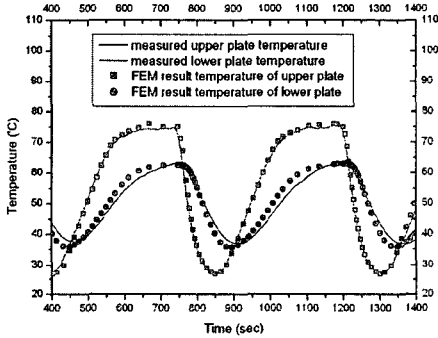


Fig. 14 Measured Temp. vs FEA Temp.

4.2 해석 결과

최외각 솔더에 발생되어지는 변형량을 보면 Fig. 15와 같다. 변형이 가장 많이 발생하는 지점은 N1860이고 그다음은 대칭부인 N1083이다. 한 사이클 동안에 두 번의 큰 변형을 하게 된다. 이는 가열시에 발생하는 온도차와 냉각시에 발생하는 온도차에 의한 것이다.

Fig. 16과 Fig. 17의 x축은 실험을 통해 얻은 수명을 나타낸다. 그리고 y축은 실험에 사용된 온도 조건을 경계조건으로 유한요소해석을 통해 얻은 등가변형률(equivalent strain)을 나타낸다.

Fig. 16은 Sn37Pb 솔더의 수명과 등가변형률을 비교한 그림이고 그 값은 Table 5에 나타내었다. 여기서 IEEQ는 CEEQ와 PEEQ를 합친 양이다. 고온 실험(30°C~150°C, 30°C~125°C)인 경우 소성변형이 차지하는 비율이 크다. 반면에 저온 실험(30°C~75°C, 30°C~100°C)인 경우는 상대적으로 크리프 변형의 비율이 커지게 된다.

Fig. 17에 Sn4.0Ag0.5Cu 솔더의 수명과 등가변형률을 비교하였고, Table 6은 데이터이다. 발생되어지는 크리프변형량은 소성변형양보다 모든 실험 조건에서 작게 나타났다.

Table 4 Material Properties

	Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Specific Heat	Thermal Conductivity (W/mK)	CTE (ppm/°C)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Yield Strength (MPa)
Sn 37Pb	0	8470	150	51	25.2	26447	0.360	36.4
	50				26.1	12521	0.365	15.2
	100				27.3	6909	0.378	9.6
Sn 4.0Ag 0.5Cu	0	7400	226	33	21.3	53000	0.3	21.0
	50				22.15	49000	0.3	16.0
	100				23	45000	0.3	10.5
	150				23.85	41000	0.3	10.5
FR-4	25	1938	879	13	15.0	18200	0.25	elastic
Copper	25	8942	385	389	16.7	117000	0.34	69.0

$$\text{creep behavior } \dot{\epsilon} = A [\sinh(B\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

	A(1/s)	B(1/MPa)	n	Q(J/mole)
Sn37Pb	12423	0.126	1.89	61417
Sn4.0Ag0.5Cu	44100	0.005	4.2	44995

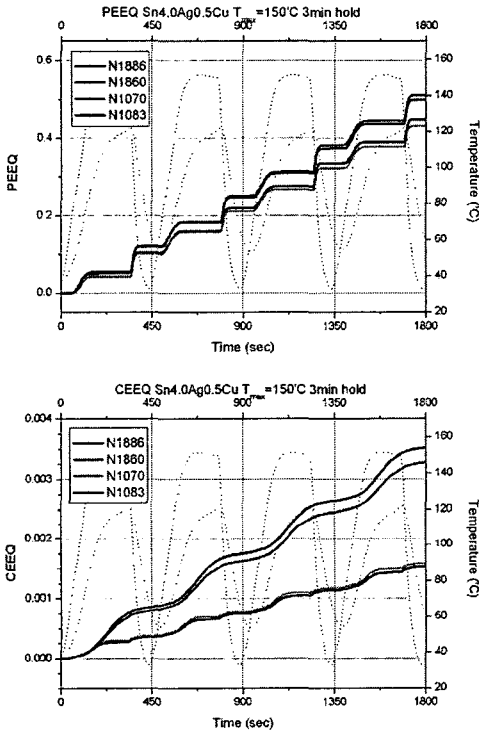
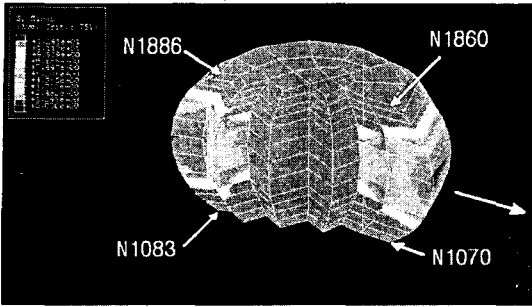


Fig. 15 Equivalent strains at node edges

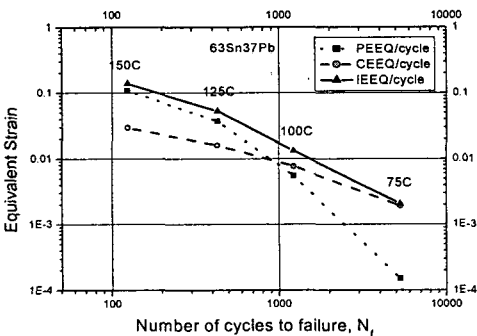


Fig. 16 Equivalent strain vs. Life (Sn37Pb)

Table 5 Comparison of the equivalent strain per cycle (Sn37Pb)

Test condition	$\Delta PEEQ$ /cycle	$\Delta CEEQ$ /cycle	$\Delta IEEQ$ /cycle	Life (63.2%)
30°C~150°C	0.1090	0.0299	0.1390	124
30°C~125°C	0.0370	0.0160	0.0530	428
30°C~100°C	0.0055	0.0077	0.0132	1222
30°C~75°C	0.00015	0.0019	0.0021	5274

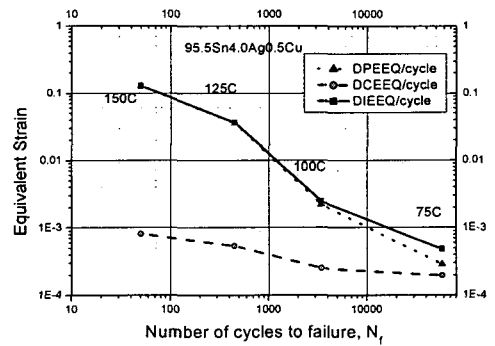


Fig. 17 Equivalent strain vs. Life (Sn4.0Ag0.5Cu)

Table 6 Comparison of the equivalent strain per cycle (Sn4.0Ag0.5Cu)

Test condition	$\Delta PEEQ$ /cycle	$\Delta CEEQ$ /cycle	$\Delta IEEQ$ /cycle	Life (63.2%)
30°C~150°C	0.1280	0.0008	0.1290	50
30°C~125°C	0.0357	0.0005	0.0362	447
30°C~100°C	0.0022	0.00025	0.0025	3417
30°C~75°C	0.00029	0.00020	0.00048	57362

Fig. 16, Fig. 17을 통해 수명예측식을 제시하면, 식 (1) 과 식 (2)와 같다. 여기서 $\Delta \epsilon_{eq}^{in}$ 은 사이클 당 비탄성 등가변형률(inelastic equivalent strain)의 변화량이다.

Sn37Pb

$$N_f = 26.17(\Delta \epsilon_{eq}^{in})^{-0.87} \quad (1)$$

Sn4.0Ag0.5Cu

$$N_f = 4.79(\Delta \epsilon_{eq}^{in})^{-1.20} \quad (2)$$

5. 결 론

본 연구를 통해서 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

(1) Sn37Pb와 SnAgCu 솔더는 실험 환경에 따라 피로에 대한 저항의 특성이 바뀔 수 있다. 고온 실험(30°C~150°C, 30°C~125°C)에서는 SnPb솔더가 SnAgCu솔더보다 더 좋은 피로특성을 갖는다. 반면, 저온 실험(30°C~75°C, 30°C~100°C)에서는 SnAgCu 솔더가 SnPb솔더 보다 더 좋은 피로 특성을 가지고 있다.

(2) Sn3.0Ag0.5Cu 솔더가 Sn4.0Ag0.5Cu 솔더보다 고온 실험에서는 수명이 더 좋고, 저온 실험에서는 Sn4.0Ag0.5Cu 솔더가 수명이 더욱 좋다.

(3) SnAgCu 솔더의 경우, 크리프에 의한 변형이 거의 없으며 소성 변형량보다 작다. 반면 SnPb 솔더는 크리프가 저온 실험 영역(30°C~75°C, 30°C~100°C)에서는 소성변형량보다 많다.

(4) Sn37Pb 솔더와 Sn4.0Ag0.5Cu 솔더의 수명은 다음의 식으로 예측 가능하다.

Sn37Pb

$$N_f = 21.50 (\Delta \epsilon_{eq}^{in})^{-0.91}$$

Sn4.0Ag0.5Cu

$$N_f = 3.16 (\Delta \epsilon_{eq}^{in})^{-1.22}$$

후 기

본 연구는 CPEM(전자패키징 연구센터) ERC 지원하에 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) IPC, 2000, *A Guide for Assembly of Lead-Free Electronics Draft IV*, IPC, Northbrook, pp. 1~21, www.ipc.org.
- (2) Soldertec, 2003, *Second European Lead-Free Soldering Technology Roadmap*, Soldertec, Uxbridge, pp. 1~24, www.lead-free.org.
- (3) Schubert, A., Dudek, R., Walter, H., Jung, E., Gollhardt, A., Michel, B. and Reichl, H., 2002, "Reliability Assessment of Flip-Chip Assemblies with Lead-free Solder Joints," *2002 ECTC (2002 Electronic Components and Technology Conference)*, pp. 1246~1255.
- (4) Lee, S.W., Hoi, B., Lui, W. and Kong, Y.H., 2002, "Assessment of Board Level Solder Joint Reliability PBGA Assemblies with Lead-Free Solders," *Soldering and Surface Mount Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 46~50.
- (5) Syed, A., 2001, "Reliability and Au Embrittlement of LeadFree Solders for BGA Applications," *2001 International Symposium on Advanced Packaging Materials*, pp 143~147.
- (6) Tummala, R. R., Rymaszewski, E. J. and Klopfenstein, A. G., 1997, *Microelectronics Packaging Handbook part I 2nd edition*, Chapman&Hall, New York, pp. 469~471.
- (7) Hong, B. Z., 1998, "Thermal Fatigue Analysis of a CBGA Package with Lead-free Solder Fillets," *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, pp. 205~211.
- (8) Lau, J., Dauksher, W. and Vianco, P., 2003, "Acceleration Models, Constitutive Equations, and Reliability of Lead-Free Solders and Joints," *2003 ECTC (2003 Electronic Components and Technology Conference)*, pp. 229~236.