

Pseudo-Power Cycling을 이용한 솔더 조인트의 가속시험

김일호·이순복*

ABSTRACT

전자 부품의 신뢰성 평가를 위해서 다양한 방법의 시험법이 사용된다. 전자 부품은 반복적인 작동과 휴식에 의한 열피로를 받게 된다. 이에 대한 신뢰성 평가를 위해 오래전부터 다양한 시험 규격이 만들어지고, 그에 따라 열챔버를 이용한 챔버 사이클링 시험이 수행되고 있다. 하지만, 최근에는 이러한 시험 규격들에 대한 문제가 지적되고 있으며, 또한 챔버 사이클링을 이용한 가속 실험의 경우 실제 작동환경을 완벽히 묘사하지 못하며, 가속할 수 있는 정도가 제한되고 있다.

본 연구에서는 파워 사이클링 시험을 묘사하는 시험 방법을 제안하고, 그를 이용하여 BGA 패키지의 솔더 조인트에 대한 열피로 시험을 수행하였다. 본 연구에서 제안된 파워 사이클링 시험기는 실제 작동 환경과 유사한 온도 구배를 패키지에 만들어 준다. 그리고 패키지에 열전도를 이용하여 열을 공급함으로써, 대류를 통해 열을 공급하는 챔버 사이클링 시험에 비해 빠르게 가열 및 냉각이 가능하다. 파워사이클링 테스트 방법을 이용하여 다양한 온도 조건에 대해 열피로 수행하여 솔더 조인트의 열피로 특성을 평가하였다.

1. Introduction

전자패키지(electronic package)의 신뢰성이 중요하게 되면서 열피로에 대한 신뢰성을 평가하는 방법에 대해서 많은 연구가 되어졌다. 전자패키지의 열피로에 대한 신뢰성을 평가하는 방법으로는 크게 3가지의 방법이 사용되고 있다. 열챔버(Thermal chamber)를 이용하는 챔버 사이클링 시험(chamber cycling test), 발열칩을 이용하는 파워 사이클링 시험(power cycling test), 그리고 기계적인 힘으로 실험하는 기계적 사이클링 시험(mechanical cycling test)이다.

챔버를 이용한 챔버 사이클링 시험이 가장 널리 쓰이는 방법으로 실험단계에서 뿐만 아니라 생산된 제품을 평가할 때도 사용되어진다. 또한 대부분의 고객들은 생산자에게 일정 규격의 챔버 사이클링 시험 결과를 제공할 것을 요청한다. 보편적으로 사용되는 방법으로 많은 연구가 수행되어서 현재 테스트 규격이 여러 기관에 의해서 만들어져 있다. 미국의 군사규격인 MIL-STD-883와 EIA(electronic industries alliance)에서 만든 JEDEC standard인 JESD22-A104-B, 그리고 IPC(association connecting electronics industries)에서 지정한 IPC-9701 등이 있다. 챔버 사이클링 시험의 장점은 온도 컨트롤이 쉽고, 어떠한 패키지(package)도 부가장비 없이 바로 실험을 할 수 있다는 것이다. 반면 실제의 작동 환경과는 상당히 다른 조건을 제공하게 된다. 패키지와 PWB(printed wired board)간의 온도 차이가 발생되지 않고, 솔더 볼(solder ball)

* 한국과학기술원 기계공학과
Tel) + 82-42-869-3029
Fax) + 82-42-869-3096
Email) sblee@kaist.ac.kr

내의 온도 구배가 생기지 않게 된다. 따라서 패키지와 PWB(printed wired board)의 CTE 차이에 의한 불일치량이 과대 또는 과소평가 될 수 있다.

파워 사이클링 시험은 보다 실제적인 묘사가 가능한 실험방법이다. 패키지와 PWB 간의 온도차도 발생하게 되고, 솔더 볼(solder ball)과 각 재료에도 온도 구배가 생기게 된다. 반면 챔버 사이클링에 비해 제약 조건이 많다. 먼저 발열칩을 제작해야 하고, 발열칩을 제작한 후에도 온도 제어가 쉽지 않다. 특히 칩이 파손되어 감에 따라 저항 값이 변하기 때문에 일정온도를 계속 유지하기가 어렵다. 또한 원하는 온도 범위를 적용하기가 힘들다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 챔버 사이클링 시험법과 파워 사이클링 시험법의 장점을 취하여 새로운 파워 사이클링 방법을 개발하고 그를 이용하여 무연 솔더의 열피로 특성을 파악하여 보았다.

2. Psuedo-Power Cycling Tester

본 연구에서 제시된 Psuedo-Power Cycling Tester는 맨 아래에 장착된 히터로부터 열을 공급받아서 칩에 열을 공급하게 된다. 이렇게 함으로써 비록 패키지자체에서 발열을 하는 것은 아니지만, 패키지에서 발열하는 효과를 얻을 수 있다. 실제 작동 환경과 유사하게 패키지로부터 솔더 볼과 PWB 방향으로 가면서 온도가 감소하는 온도구배가 발생된다. 또한 Psuedo-Power Cycling Tester는 특별한 부가장비 없이 바로 실험을 할 수 있다는 점과 온도 조절이 쉽다는 점에서 챔버 사이클링 시험의 장점 또한 가지게 된다.

시험기는 가속 실험이 가능하도록 가열 및 냉각용량을 크게 설계하였으며 되도록 많은 시편을 동시에 실험 할 수 있도록 하였다. 또한 시편에 균일하게 열이 가해지도록 유한요소법을 이용하여 열 해석을 수행하면서 설계하였다.

제안된 시험기의 개략도는 Fig. 1과 같다. 맨 아래 장착된 히터로부터 열을 공급받아서 패키지의 온도가 올라가게 된다. 이렇게 함으로써 비록 칩 자체에서 발열을 하는 것은 아니지만, 칩에서 발열하는 효과를 얻을 수 있다. 냉각할 때는 냉각수가 냉각관을 통과하면서 칩은 냉각되게 된다. 실제로 구현된 시험기는 Fig. 2와 같으면 두 가지 온도 조건에 대해서 각각 7개의 시편을 동시에 시험할 수 있다.²⁾

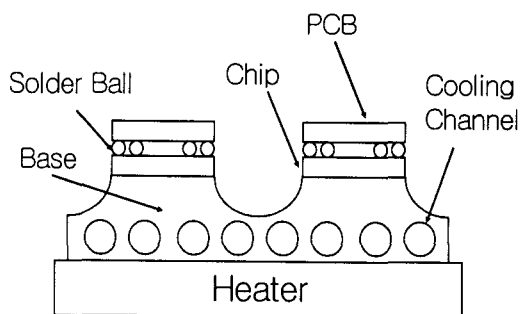


Fig. 1 A Schematic view of pseudo-power cycling tester

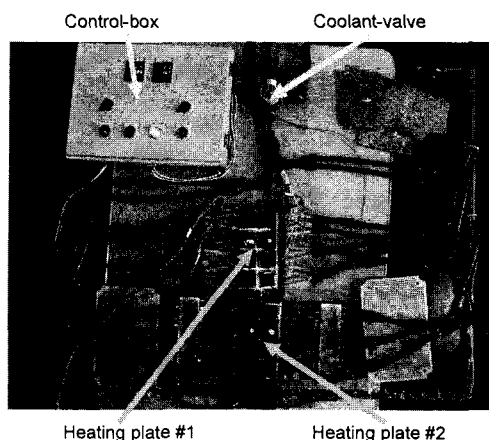


Fig. 2 Pseudo-power cycling test set-up

Table 1 Temperature Conditions

	Sn37Pb	Sn4.0Ag0.5Cu
A1	25°C~150°C	25°C~150°C
A2	25°C~125°C	25°C~130°C
A3	25°C~110°C	25°C~110°C
A4	25°C~100°C	25°C~100°C
A5	25°C~75°C	25°C~90°C
A6	-	25°C~70°C
B1	75°C~150°C	75°C~150°C
B2	50°C~125°C	50°C~125°C
B3	25°C~100°C	25°C~100°C
C1	25°C~150°C	25°C~150°C
C2	25°C~125°C	25°C~125°C

Table 2 Cycle Time Conditions

	Total cycle time	7.5 min
A & B	Heating time	3 min
	Holding time	3 min
B	Cooling time	1.5 min
	Cycles/day	196 cycles
	Total cycle time	40 min
	Heating time	5 min
C	High T. holding time	30 min
	Cooling time	2 min
	Low T. holding time	3 min
	Cycles/day	48 cycles

3. 시험 조건 및 시편

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. 시험은 크게 3가지로 구분할 수 있다. A1~A7은 총 7.5분의 사이클 시간을 가지며, 고온에서 3분간 온도를 유지하게 된다. 상온에서 다양한 온도까지를 반복적으로 가하게 된다. 이 시험을 통해서 온도차가 미치는 영향을 평가할 수 있다. B1~B3는 시간 조건은 A와 같으나 고온과 저온의 차이를 75°C로 고정하고 최고 온도를 100°C, 125°C, 150°C로 바꾸어 주면서 시험을 하였다. 이 시험을 통해 평균온도가 수명에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 마지막으로 고온유지 시간을 바꾸어 주었다. C1~C2에서는 고온 유지 시간을 30분으로 바꾸어 총 사이클 시간을 40분으로 바꾸어 주었다.

시편의 크기와 재료는 Fig. 3 과 Table 3에 나타나 있다. 본 연구에서는 실제 패키지를 사용하지 않고, PWB와 PWB를 접합하고 솔더 볼의 열피로 특성을 평가하였다. 사용한 솔더볼의 지름은 760 μ m이고 간격은 1.27mm이다. 솔더볼의 배치는 각 모서리

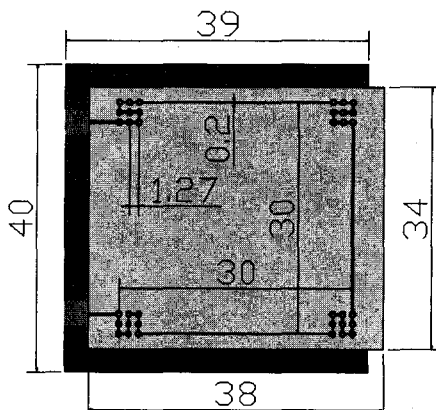


Fig. 3 Dimensions of the specimen

Table 3 Specification & Material of Specimen

	Package	PWB
Dimension(mm) (WxLxH)	40x40x2	38x34x2
Material	FR4	FR4
Finish	Ni+ Au	Ni+ Au
Solder Mask	SMD	SMD

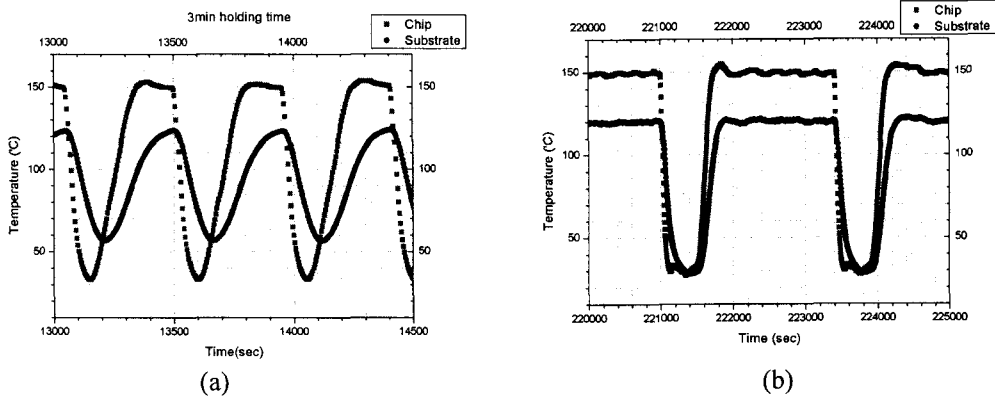


Fig. 4 Time-temperature profile during the 3min(a) & 30min(b) holding test

에 9개씩 배치하였다. 연납접(soldering)시에 솔더볼의 높이를 일정하게 하기 위해 스페이서(spacer)를 사용하였고 접합이 완료되면 데이지 체인(daisy chain)이 완성되어 파손유무를 저항 측정을 함으로써 알 수 있게 제작하였다.

위쪽 PWB와 아래쪽 PWB의 시간에 따른 온도를 관찰해 보면, Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 25~150 로 온도 컨트롤을 하면서 고온에서 3분을 유지한 경우이고, Fig. 4(b)는 온도는 동일하나 고온 유지시간을 30분으로 늘린 경우이다. 두 PWB의 온도차를 그래프로 나타내면, Fig. 5와 같다. 최저 온도는 동일하기 때문에 최고 온도에 따라 나타내었다. 발생하는 온도차는 진폭만 변화할 뿐, 모양은 유사하다.

4. 실험 결과 및 분석

먼저 솔더 조인트의 파손을 정의해야 한다. 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 올라갔을 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.

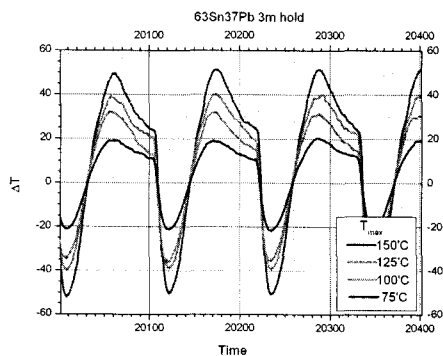


Fig. 5 Temperature difference between PWBs

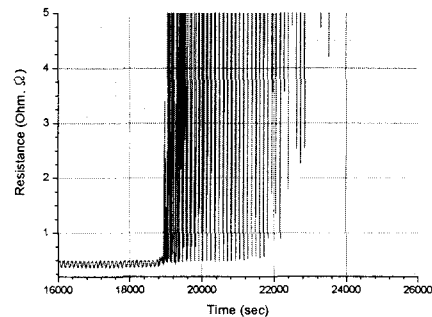


Fig. 6 Trend of a resistance change

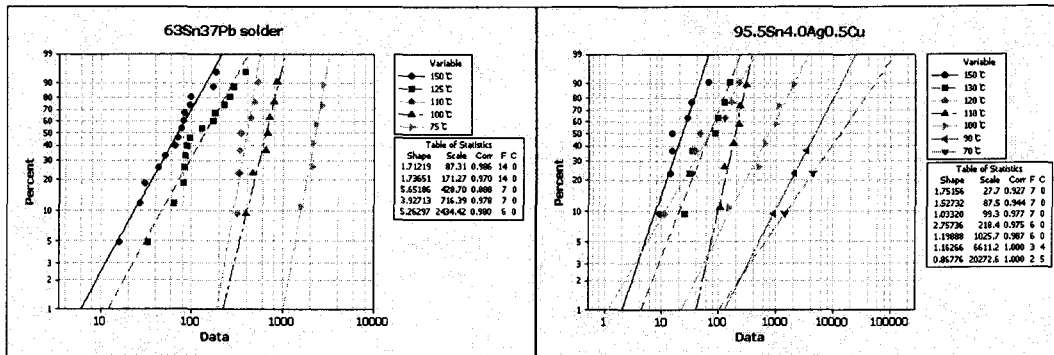


Fig. 7 Weibull plot of 3min holding test results (A1~A7)

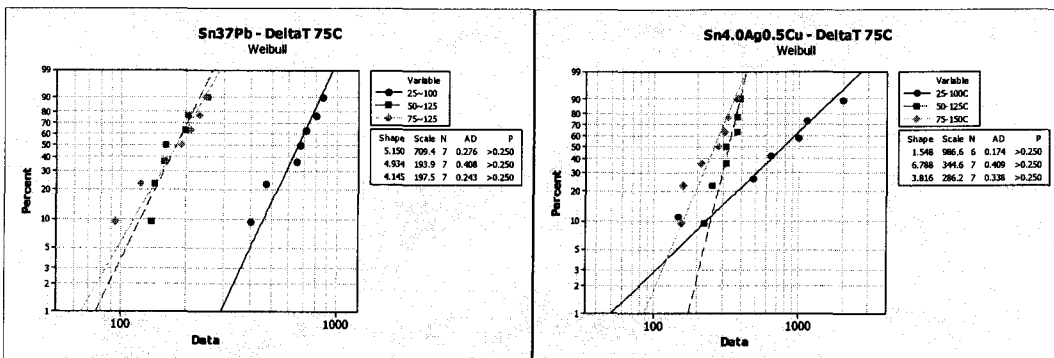


Fig. 8 Weibull plot of same ΔT test results (B1~B3)

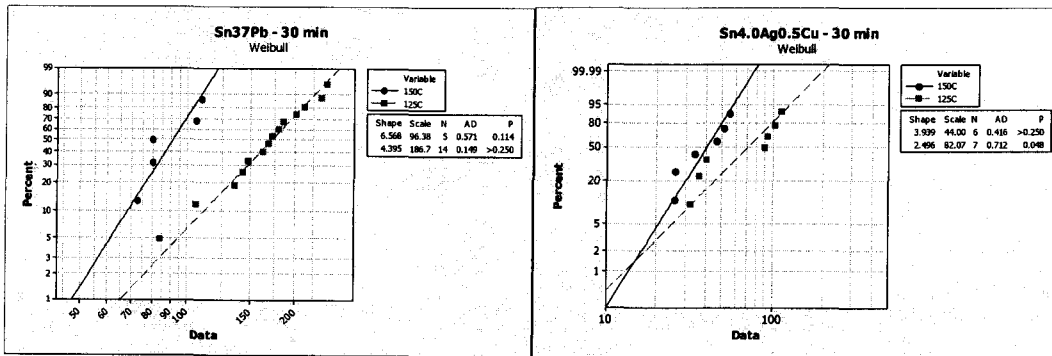


Fig. 9 Weibull plot of 30min holding test results (C1~C2)

실험한 결과를 Weibull plot으로 통계 처리를 하였다. Fig. 7 8, 9은 각각 3min holding test(A1~A7), same ΔT test(B1~B3), 30min holding test(C1~C2)를 나타낸다. 각 실험 결과의 대표 값으로 63.2%의 수명을 잡아주었다.

A1~A7까지의 시험 결과를 종합해서 Fig 5.에 나타난 위쪽 PWB와 아래쪽 PWB의 온도차를 수명과 비교해 보면 Fig. 10과 같게 된다. 가해진 온도 차가 커서 높은 열응력이 작용하게 되면, 열피로 수명은 감소하게 된다. 가해진 온도 차가 적은 경우에는 상대적으로 적은 열응력이 작용하기 때문에 열피로 수명은 길어지게 된다. Fig. 10에서 보면 Sn37Pb는 온도차가 큰 경우에 수명이 상대적으로 길고 온도차가 적은 경우

에는 Sn4.0Ag0.5Cu 솔더가 상대적으로 수명이 길게 나타난다.³⁾

최근에 환경오염을 방지하기 위해 최근에 Sn37Pb 솔더의 사용이 제한을 받고 있고, Sn4.0Ag0.5Cu 솔더의 사용이 증가하고 있다.⁴⁾⁵⁾ Fig. 10의 결과에서 보듯이 Sn4.0Ag0.5Cu는 큰 하중 레벨이 작용하게 되면, Sn37Pb에 비해 열피로에 대한 신뢰성이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 큰 하중 레벨을 갖는 구조의 패키지의 솔더를 Sn4.0Ag0.5Cu로 대체할 때에는 주의가 필요함을 알았다.

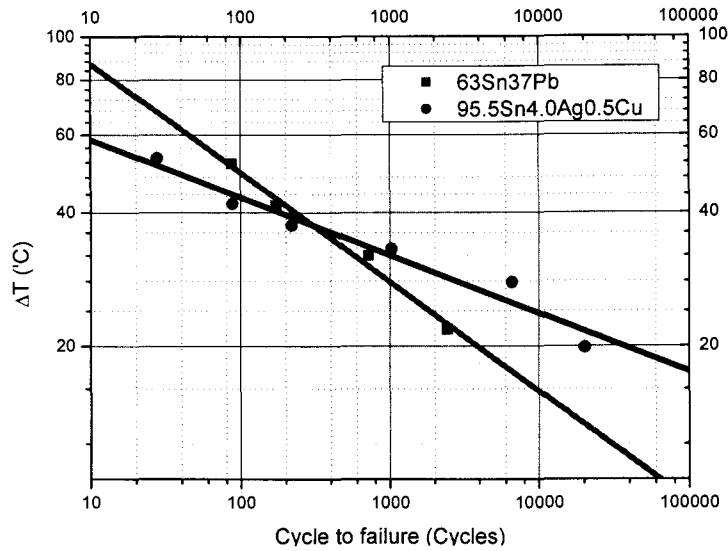


Fig. 10 $\Delta \bar{T}$ vs. Cycle to failure

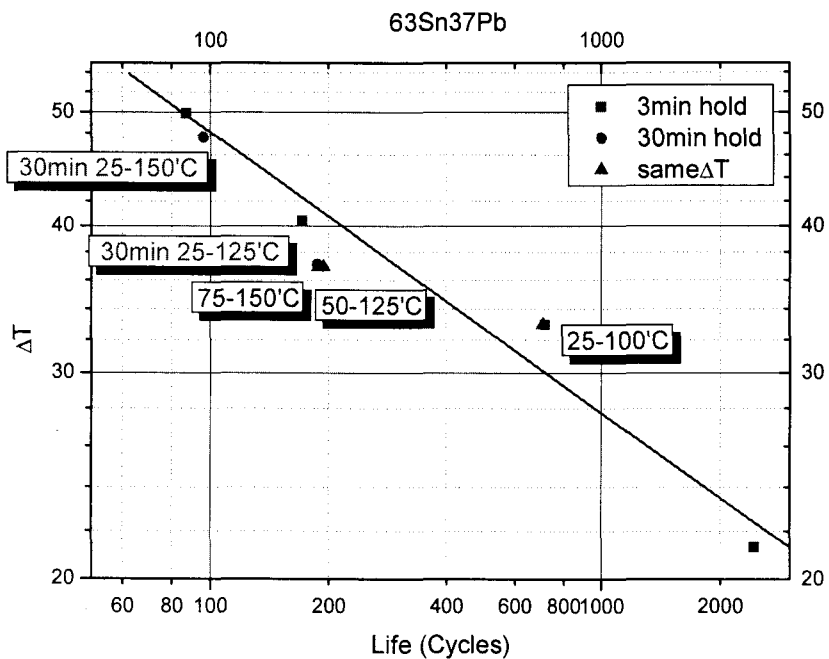


Fig. 11 Thermal load level vs. Cycle to failure in Sn37Pb

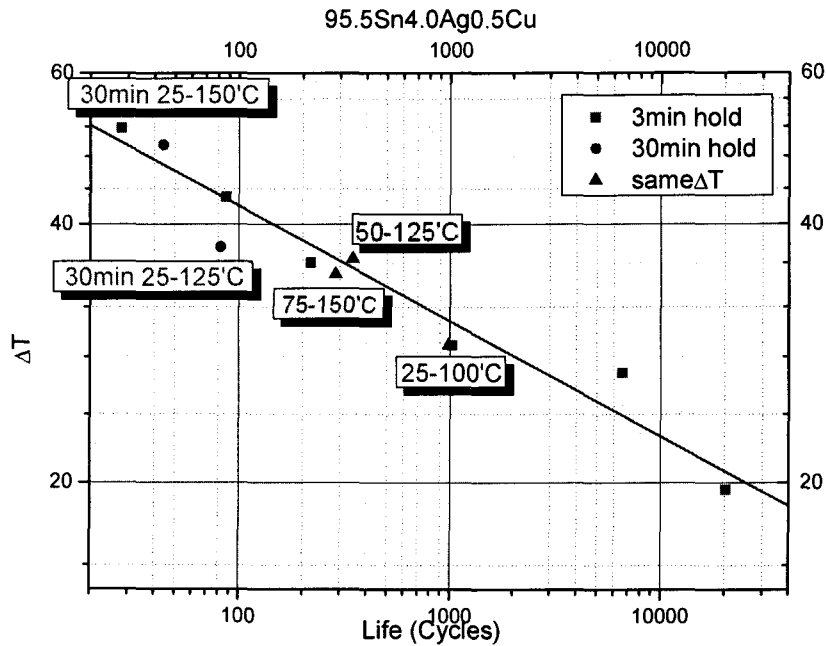


Fig. 12 Thermal load level vs. Cycle to failure in Sn4.0Pb0.5Cu

두 PWB 사이의 온도차와 열피로 수명과의 관계를 나타내면 Fig. 11과 12와 같다. 각각은 Sn37Pb와 Sn4.0Ag0.5Cu에 대한 것을 나타낸다. 그림에서 보듯이 Sn37Pb와 Sn4.0Ag0.5Cu의 가해진 온도차와 열피로 수명의 관계는 로그-로그 스케일 상에서 선형적인 관계를 갖는다. 또한 ΔT 를 75도로 고정시키고 평균 온도를 올리면, 평균 온도가 올라갈수록 수명이 감소하는 것을 알 수 있다. Sn4.0Ag0.5Cu인 경우에는 평균온도에 따라 차례로 수명이 작게 나오게 된다. 그러나 수명의 감소폭은 평균 온도가 올라갈수록 감소하게 된다. Sn37Pb의 경우 75~150°C와 50~125°C가 거의 동일하게 나타난다. 이는 가해진 온도가 Sn37Pb의 녹는점 183°C에 비해 매우 높기 때문에 두 조건의 차이가 크게 나타나지 않는 거 같다. 고온 유지 시간을 증가시킨 경우에는 대체로 수명이 감소되어 나타나게 된다. 크리프는 고온에서 특히 많이 발생되는데, 30분간 고온을 유지하는 경우 크리프가 발생되는 시간이 길어져 보다 많은 크리프에 의한 손상을 받게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 Pseudo-Power Cycling Tester라는 새로운 개념의 열피로 특성 평가 방법을 제시하였다. 이 방법은 열전달을 이용하여 기존의 챔버 사이클링 시험의 단점과 파워 사이클링 시험의 단점을 보완하도록 고안되었다. 새롭게 제시된 Pseudo-Power Cycling Tester를 이용하여 Sn37Pb 솔더와 Sn4.0Ag0.5Cu 솔더의 열피로 특성을 평가하였다. 온도 범위를 늘려서 실험을 하면 보다 많은 열응력이 작용하게 되어 수명이 감소하게 된다. 로그-로그 스케일 상에서 두 PWB 사이의 온도와 열피로 수명과의 관계를 비교해 보면, 선형 관계를 가짐을 알 수 있다. 열하중이 큰 경우에는 Sn37Pb가 열피로 강한 특성을 보이고 열하중이 작으면 Sn4.0Ag0.5Cu가 좋은 열피로

특성을 보인다. 따라서 Sn4.0Ag0.5Cu를 열하중이 큰 환경에서 사용할 때는 주의를 하여야 한다.

평균 온도의 영향을 알아보기 위해 ΔT 를 75도로 고정하고 평균온도를 높이면서 실험을 하였다. 대체로 평균온도가 올라가면 수명이 감소됨을 알 수 있었다. 이는 고온이어서 재료의 열피로 특성이 낮아지고, 크리프 등의 손상은 더욱 많이 발생하기 때문이다. 고온 유지 시간을 3분에서 30분으로 늘려서 시험을 수행할 경우 대체로 수명이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 고온 유지 시간이 증가함에 따라 크리프의 발생량이 많아지기 때문이다.

6. 감사의 글

본 논문은 과학기술부/한국과학재단 ‘전자부품 신뢰성 설계기술개발’사업의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

7. 참고 문헌

- 1) 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.
- 2) Kim, I., A study on thermal fatigue behavior of BGA package, Master thesis MME 04018, KAIST, 2004
- 3) I. Kim, T.-S. Park, S.-B. Lee, "A Comparative Study of the Fatigue Behavior of SnAgCu and SbPb Solder Joints." *Trans. of the KSME(A)*, 28(12), 1856~1863 (2004).
- 4) IPC, 2000, *A Guide for Assembly of Lead-Free Electronics Draft IV*, IPC, Northbrook, pp. 1~21, www.ipc.org.
- 5) Soldertec, 2003, *Second European Lead-Free Soldering Technology Roadmap*, Soldertec, Uxbridge, pp. 1~24, www.lead-free.org