

63Sn-37Pb 뿔납의 크리프 특성에 관한 연구

이억섭*, 김의상#

A Study on the Creep Characteristics of Solder of 63 Sn-37Pb

Ouk-Sub Lee*, Eui-Sang Kim#

ABSTRACT

The initiation and the propagation of solder joint crack depend on its environmental conditions, such as high temperature creep and thermal fatigue. Creep is known to be the most important factor for the mechanical failure of solder joints in micro-electronic components and micro-systems. This is mainly caused by the different thermal expansion coefficients of the materials used in the micro-electronic packages. To determine the reliability of solder joints and consequently the electronic components, the characterization of the creep behavior of this group of materials is crucial. This paper is to apply the theory of creep into solder joints and to provide related technical information needed for evaluation of reliability of solder joint to failure. 63Sn-37Pb solder was used in this study. This paper experimentally shows a way to enhance the reliability of solder joints.

Key Words : Creep (크리프), Creep Behavior (크리프 거동), Reliability (신뢰성), Solder Joint (뿔납 접합), Thermal Fatigue (열 피로), Thermal Expansion Coefficients (열 팽창 계수)

1. 서론

뿔납(솔더링) 기술은 약 5000년 전부터 사용되어온 가장 고전적인 접합기술이다. 이러한 뿔납(솔더링) 기술이 20세기에 와서 접합원리가 밝혀지고, 21세기에 들어서서는 지금 다시 한번 그 기술의 개화기를 맞는 것을 보면 뿔납(솔더링) 접합기술의 우수성과 그 영속성을 깊이 느끼게 된다.

현재 뿔납(솔더링)의 기술은 인류기술의 총아라고 할 수 있는 전자기기와 이를 구성하는 전자 부품 및 반도체의 조립에 가장 효과적인 접합 수단이라 할 수 있다. 재래의 뿔납(솔더링) 기술은 보다 집적화, 소형화, 박형화 되어가고 있는 현대 전자통신기기에 대응하기 위해, 미세화 정밀화한 마이크로 뿔납(솔더링) 기술로 변화하고 있다. 이런 뿔납(솔더링)에 있어서의 신뢰성은 무엇을

접수일: 2003년 04월 17일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
* 인하대학교 기계공학부
교신저자: 인하대학교 기계공학과
E-mail inhamce@hanmail.net Tel. (032) 860-7315

의미하는가? 납땜(솔더링)을 행한 시점에서는 양호한 상태일지라도 사용 중에 약화해 가므로 통전 단절, 단락 등의 고장에 이르는 경우가 많다. 이는 이온화 물질 내부응력 등 접합부 내에 잠재적으로 포함되어 있는 요인에 온도, 습도, 진동 등의 응력이 작용해서 접합부가 약화되기 때문이다.

신뢰성이란 제품에 부여된 조건에서 목표 기간동안 요구된 기능을 수행할 수 있는 성질을 말한다. 특히, 전자부품 실장에 이용되는 납땜(솔더링) 접합부에 있어서는 열 피로와 이온 마이그레이션이 신뢰성에 미치는 가장 중요한 인자로 알려져 있다.

열 피로와 이온 마이그레이션 외에도 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 납땜(솔더링) 접합부의 피로파괴를 일으키는 원인을 제공한다. 이들 중 납땜 접합부의 신뢰성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 서로 기계적인 성질이 틀리는 부품들 사이에 발생하는 열팽창계수의 차이에 기인하여, 납땜 접합부위(interface)의 온도 변화에 대응하는 변형과 응력이 발생하는 것이다. 이것은 곧 납땜 접합부에 열 피로 고장을 유발시키게 된다.

이러한 열 피로에 기인하는 고장 요인을 감소시키기 위하여 Fig. 1과 같이 납땜 접합부들은 보통 언더필 재료 (underfill materials)로 엔캡슐레이트 (Encapsulate)되어진다. 이러한 납땜 패키징 과정에서 이루어지는 납땜 접합부의 치명적 파손 메커니즘이 될 수 있는 것은 크리프 피로파괴이다.[1,2,3]

본 연구에서는 납땜 접합부의 신뢰성에 미치는 납땜 재료의 크리프 피로파괴 기구를 실험적으로 명확하게 규명한다. 본 연구에서 수행될 크리프 실험에서는 기존의 크리프 실험과는 달리, 납땜의 실질적 사용 환경을 구현하여 실험 결과를 도출하는 것이다. 여러 가지 경계조건에 대응시킬 수 있는 전기적 실험 장치를 설계 제작하였다.

본 논문의 주된 목표는 변화되는 전류 및 전압을 납땜 재료로 제작한 시편에 가용할 수 있게 하여 보다 실질적인 크리프 거동의 특성을 실험적으로 규명하여, 납땜 접합부의 신뢰성을 향상시키고 고장률을 감소시키는데 필요한 기술적인 정보를 창출하는데 있다.

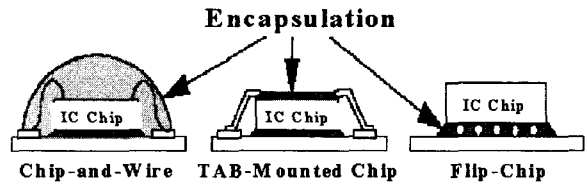


Fig. 1 Schematic of Three Major Mounting Techniques of IC Chip using Soldering Technique

2. 납땜(솔더링) 크리프 이론

금속이나 고분자재료가 일정한 외력을 받더라도, 일정온도와 일정한 하중상태에서 시간의 경과와 함께 변형량이 증가해 가는 현상을 크리프라고 한다. 일반적으로 크리프 현상을 나타내는 크리프 곡선의 구간은 천이 크리프 단계 (transient creep stage : 변형경화가 항상 연화작용보다 크게 된다), 정상 크리프 단계 (steady creep stage), 가속크리프 단계 (accelerating creep stage : 연화작용이 증가)로 나누어진다.

그러나 재료에 따라 또한 경계(사용, 시험)조건에 따라 천이 크리프 곡선의 형상은 여러 가지로 나타난다. 각 단계의, 전 크리프 변형량(total creep deformation)에 대한 비율은 일정하지 않으며 때로는 각 단계중 전혀 나타나지 않는 단계도 있다. 각 재료에 따르는 이러한 독특한 크리프 특성 때문에 각 재료에 대한 크리프 특성을 실험적으로 명확하게 규명하여 그 결과를 각종 크리프 곡선으로 나타내어 사용 환경에 대응하는 신뢰성을 유지하도록 해야 한다. 이것은 고온재료 중 어느 재료가 가장 적절한 기계적인 성능을 유지하는 지를 판단하는 중요한 기술기준 중에 하나이다. 정상 크리프에서는 변형에 의한 변형경과와 열에 의한 회복이 동시에 진행된다. 정상 크리프에서 $d\epsilon / dt$ 는 정상 크리프률(속도)이라 하며, 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\dot{\epsilon} = f(T, \sigma) \quad (1)$$

일반적으로 정상 크리프 단계의 크리프률(속도)

은 그 구간의 시간에 상관없이 일정하며, 이것을 정상 크리프률(Steady State Creep Rate)라고 한다. 이 정상 크리프률을 $\dot{\epsilon}$ 의 대수와 응력 σ 와는 직선적 관계에 있다고 모델링하여 실험 데이터를 정리한다. 일반적으로 $\dot{\epsilon}$ 와 σ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{\epsilon} = A_1 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (2)$$

여기서, A_1 , n 은 재료상수이며, n 은 3~10정도의 값을 가진다. 크리프의 형성과정을 간단한 열적 활성화과정에 의한 것이라고 가정하면, $\dot{\epsilon}$ 와 온도 T 사이에는 다음과 같은 아레니우스(Arrhenius)의 식이 성립한다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (3)$$

여기서, Q 는 크리프 활성화 에너지, k 는 볼츠만 상수이다. 만약, 외부 응력 σ 에 의해 Q 값이 변화한다면 $Q(\sigma)$ 라고 나타내는 것이 좋다. $\dot{\epsilon}_0$ 는 재료에 따라 정해지는 상수이다. 따라서 단순 열적인 효과에 의한 가속계수(acceleration factor)는 위의 아레니우스(Arrhenius)의 식을 이용하여 다음과 같이 도출 할 수 있다.[4,5,6]

$$TF = A_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (4)$$

$$AF \text{ (Ratio of TF Values, Bake / Use)} \\ = \exp\left[\left(-\frac{Q}{k}\right)\left(\frac{1}{T_{bake}} - \frac{1}{T_{use}}\right)\right] \quad (5)$$

여기서,

AF : 가속계수 (Acceleration Factor)

TF : 파손시간 (Time to Failure)

- A_0 : 임의 스케일 계수 (Arbitrary Scale Factor)
- Q : 기구를 위한 활성화 에너지 (Activation Energy for The Mechanism (0.75 is Conservative))
- k : 볼츠만의 상수 (Boltzmann's Constant ($8.625 \times 10^{-5} eV/^\circ K$))
- T : 절대온도 (Temperature in $^\circ K$)

3. 재료 및 실험방법

3.1 크리프 실험

3.1.1 재료

뿔납(솔더)은 주석(Sn)을 주성분으로 하는 연납(용점 450°C이하)이 주종을 이루며, Sn계 이외에 Pb, Au, In을 주성분으로 하는 솔더도 있으나, 지금까지 (60~63)%Sn - (37~40)%Pb 성분 범위를 갖고 있는 합금 솔더가 주로 사용되어 왔다. 솔더는 일반적으로 용점이 낮고, 용융 솔더의 표면 장력, 점성, 유동성이 적절하여 모재와 잘 젖어야(윤착되어야)한다. 또 솔더링 후에는 접합부의 강도나 전기 전도도 등이 사용목적에 부합되어야 한다.[5]

본 연구에서는 용융온도가 가장 낮은 주석-납계 솔더로서 63Sn-37Pb의 조성을 가지고 있는 솔더를 선택하였다. 시편의 형상은 Fig. 2와 같이 기계가공에 의해 제작되었다. 가공 중 발생 할 수 있는 변형을 막기 위해 시편 단면은 가능한 한 크게 하였다.

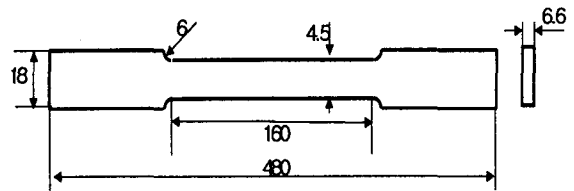


fig. 2 Geometry of Specimen (dim.=mm)

3.1.2 실험방법

고온에서 시편의 크리프 특성을 측정하기 위해서는 하중장치, 적정 온도로 제어되는 가열로 장치, 변형을 정밀하게 측정 할 수 있는 측정 장치가 구비되어야 한다.

본 연구에서 설계 제작하여 사용한 실험기에는 실험온도를 임의로 조절 할 수 있는 전기로가 장착되어 있다. 크리프 실험기에 내재된 시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식으로 제작하였으며, Control Console에 부착된 로의 온도를 제어하는 자동온도 조절장치는 300℃까지 전 범위의 ±1.5℃이다. 노 전체의 구간은 상부, 중간부, 하부의 3영역으로 구분되어 있으며, 온도 구배는 2℃정도이다.

본 연구에서 사용한 시험편의 가열공정과 크리프시험 주요 사항은 다음과 같다.

- 1) 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 약 3 ~ 5℃/min으로 원하는 온도까지 가열한다.
- 2) 부하를 작용시키기 전에 시험편의 온도부하가 균일하게 유지되도록 30 ~ 40분 정도 가열시킨 후 하중을 작용시켜 시험을 수행하였다.
- 3) 크리프 실험 중 발생하는 연신(변형)을 측정하기 위하여 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)로 측정하여 Control Console에 부착된 리코더(Recorder)로 기록하였다.
- 4) 또한 일반 전자기기의 실질적 사용 환경을 구현하기 위하여 기존의 크리프 실험과는 달리, 정밀하게 조정할 수 있는 전기적 장치를 설치함으로써 전류 및 전압을 시험에 가용하여, 데이터의 신뢰성을 높였다.

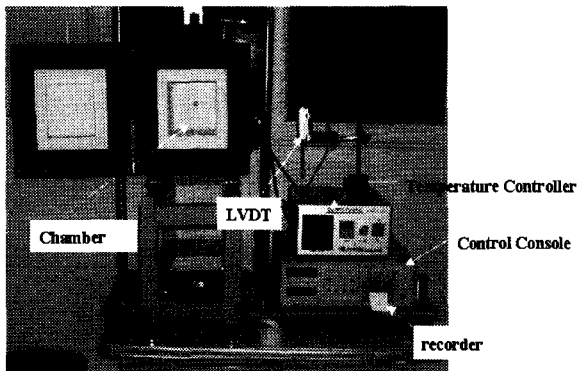


Fig. 3 Experimental Equipment for Creep Test

4. 실험결과 및 고찰

4.1 인장 실험

본 연구에서는 실험에 사용될 63Sn-37Pb재질의 시편에 대하여 기본적인 기계적인 특성을 조사하기 위하여 정적 인장 실험을 수행하였다. 지금까지 이 재료의 기계적인 물성치에 대한 결과가 연구자마다 다르게 발표되었기 때문에 본 연구에서는 인장실험을 독립적으로 수행하여 63Sn-37Pb의 재료특성을 조사하였다. Fig. 4는 인장실험 결과로 슬더의 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. Table 1은 인장실험의 결과를 정리한 것이다.

Table 1 Elastic Properties of 63Sn-37Pb(Eutectic)

	Melting Point (°C)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Poisson's Ratio (ν)
63Sn-37Pb	183	31~46	52.5	28.4	0.4

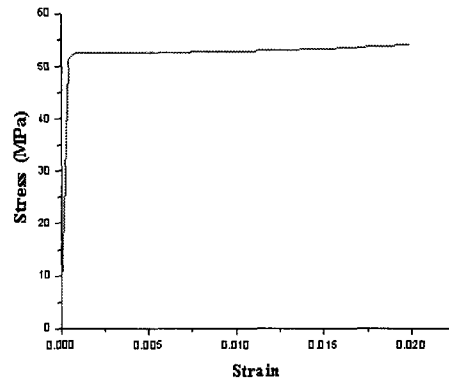


Fig. 4 Stress - Strain Curve of 63Sn-37Pb under static tensile loading condition

인장실험으로 획득한 인장 특성에 대한 사항은 다음과 같다.

- 1) 축 방향 변형률과 그에 수직인 변형률 비(푸아송 비)가 탄소성에 관계없이 약 0.4로 일정한 값을 갖고 있다.
- 2) 또한 소성에 이르는 변형률이 매우 작음을 알 수 있다.
- 3) Fig. 4로부터 알 수 있는 바와 같이 항복되었을 때의 변형률은 약 0.0009에 불과 하기 때문에 이 재료는 완전소성재료에 가깝다.

4.2 크리프 실험

4.2.1 온도, 응력조건 크리프실험

전자부품들은 일반적으로 약 0°C ~ 130°C의 범위에서 사용된다. 63Sn-37Pb의 용융온도는 183°C ~ 184°C이다. 이것은 절대온도의 기준에서 볼 때, 456K ~ 457K의 용융온도에 대해, 사용 온도는 약 273K ~ 403K에 해당된다. 즉, 솔더 조인트는 용융 온도의 약 60% ~ 90%의 범위에서 사용되고 있음을 나타낸다. 그러므로 솔더 조인트는 사용 중에 온도에 따른 재료상수의 큰 변화를 겪게 된다. 이에 따라 임의의 세 온도 25°C, 75°C, 125°C와 9가지 응력 1.5, 3.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 (MPa)에 대하여 다음 사항에 유의하면서 크리프 실험을 수행하였다.

- 1) 크리프 실험에 있어서 일정하중(일정응력), 일정 온도의 유지와 함께 정확한 변형 량을 측정하는 것이 중요하며,
- 2) 위의 크리프 이론에서 언급했듯이 크리프 곡선은 세 개의 크리프 영역, 즉 1차 크리프(primary creep stage), 2차 크리프 (secondary creep stage), 3차 크리프 (tertiary creep stage)로 나뉘지만, 솔더의 파괴 수명은 정상상태크리프(Secondary)의 영역에서 지배적으로 나타나기 때문에 2차 크리프영역에서 주목해 보아야 한다.
- 3) 크리프 변형률 (creep strain rate)은 크리프 곡선 상에서 크리프 시간과 크리프 변위로 결정 할 수 있는데, 최소 변형률 (Minimum Rate)은 정상크리프 (2차 크리프)일 때이다.[4,5] 실험에 적용된 응력에 대한 크리프 변형률의 결과는 Fig. 5와 같다.

본 연구에서 정상 상태의 크리프를 해석하는데 사용될 아레니우스(Arrhenius) 식은 아래와 같다.[7,8]

$$\frac{dr_{creep}}{dt} = A_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \tau^n \quad (6)$$

여기서,

$\frac{dr_{creep}}{dt}$: 전단 크리프 변형률속도(Shear

Creep Strain Rate)

n : 응력지수(Stress Exponent)

Q : 활성화에너지(Activation Energy)

k : 볼츠만의 상수(Boltzmann's Constant)

T : 온도(Temperature)

A_0 : 재료상수(Material Constant)

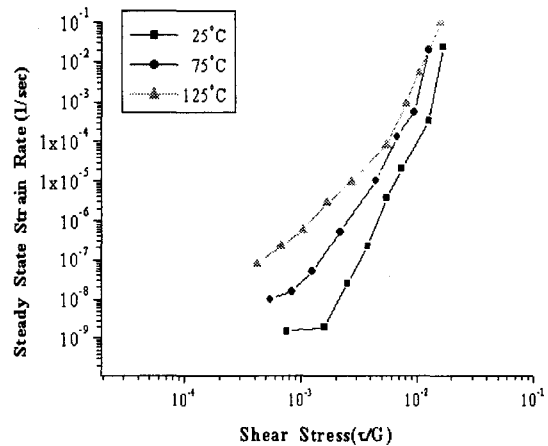


Fig. 5 Steady - State Creep Behavior at Different Temperatures

본 연구에서 실험적으로 결정된 63Sn-37Pb의 크리프 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2 Creep Properties of 63Sn-37Pb obtained in this study

	$A_0(MPa^{-1}s^{-1})$	Q(eV)	n
63Sn-37Pb	0.205	0.49	5.25

4.2.2 63Sn-37Pb의 가용 전압 크리프실험

일반적으로 PCB(Printed Circuit Board)는 두께 35 μm 또는 70 μm 등의 동박 또는 도금한 동판에 전류를 인가하여 그 동작을 수행하기 때문에 이러한 동박에 인가할 수 있는 전류에는 한계가 있게 된다. 예를 들면 두께 35 μm 의 동박에 3A의 전류를 인가할 경우 온도상승을 10 $^{\circ}C$ 이하로 유지하기 위해서는 Fig. 6에 의해서 도체 폭을 약 2.2mm로 설정하여야 한다. 이와 같이 도체의 허용전류는 전류 인가시의 포화온도 상승 값에 의해 결정할 수 있다. 다시 말하면 온도 상승을 어느 정도로 할 것인지에 따라 전류 값을 결정하게 된다. 따라서 PCB에 흐르는 전류와 전압은 솔더에도 거의 같은 전류, 전압 량이 통전 되고 있다고 볼 수 있다.

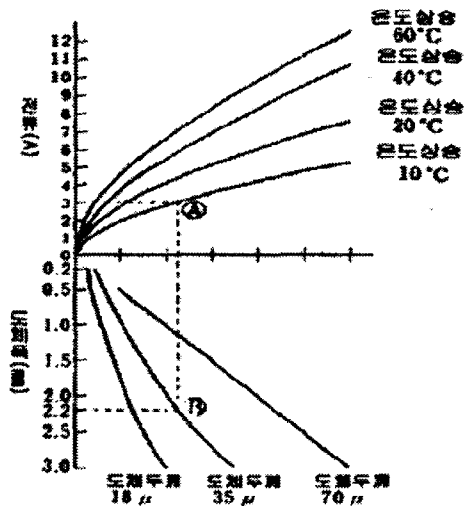


Fig. 6 Current Value for Temperature Rises and Current Widths

본 실험에서의 특이한 사항은 기존의 크리프 실험과는 달리, 일반 전자기기의 실질적 사용 환경을 구현하기 위하여 크리프 실험장비에 전기적 장치를 설치하므로써 전류 및 전압을 시편에 가용하여, 데이터의 신뢰성을 높였다는 부분이다. 이러한 전기적 장치구현은 일반 PC(Personal Computer)의 파워 서플라이(Power Supply)에서 공급하는 전압을 CPU가 수용할 수 있는 전압을 기준으로 삼고 실험을 수행할 수 있게 하였으며, 실험에 적용된 가용 전압 3.3V에 대한 가용전류 3A의 크리프 변형률의 결과는 Fig. 7과 같다.

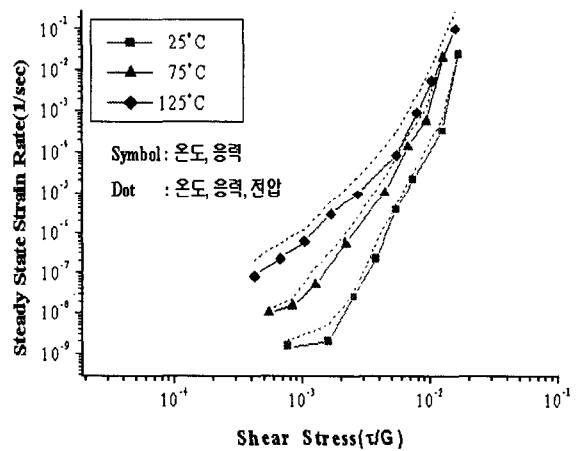


Fig. 7 Comparison of Creep Strain Rates Obtained from Creep Tests under varying temperatures stresses

이러한 크리프률은 기존의 (6)식에 가용 전압의 항을 추가하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dr_{creep}}{dt} = A_0 \cdot V^{-N} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \tau^n \quad (7)$$

여기서,

V : 전압(Voltage)

N : 상수(전압에 대하여 실험적으로 결정(An Experimentally Determined Constant for Voltage))

여기서, 63Sn-37Pb 솔더의 볼츠만 상수는 $8.625 \times 10^{-5} eV/^\circ K$ 의 값을 갖는다.

5. 결론

본 연구에서는 땀납의 균열기구 시험법 개발 및 신뢰성평가에 대한 방법론을 구축하기 위하여 63Sn-37Pb 솔더 재료에 대한 새로운 크리프 실험을 수행하였다. 이 실험 결과와 이론적인 연구를 통하여 땀납의 신뢰성 향상 방안을 면밀하게 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 63Sn-37Pb재료의 온도에 따르는 크리프 특성이 매우 급격히 변하고 있음을 실험을 통하여 규명하였다.
2. 온도, 응력 조건의 변형률과 전기적 요인이 부가된 변형률의 차이가 고온으로 갈수록 커지는 경향을 보이고 있지만, 다양한 온도 변화로 검증이 필요하다(Fig. 7).
3. 크리프 실험 데이터(Fig. 5)를 기준으로 하여 그 결과를 이론식(식(6))으로 모델화 할 수 있음을 확인하고, 통전이라는 전기적인 새로운 경계조건을 추가한 데이터를 비교하여 이론식(식(6))을 보정한 보정 이론식(식(7))을 도출하였다.
4. 보정 이론식(식(7))은 재료의 성질에 결정적 영향을 미칠 수 있는 온도뿐만 아니라 이러한 온도에 영향을 줄 수 있는 전기적인 요인을 함께 고려할 수 있는 새로운 모델로서, 이 모델을 사용하면 보다 정확하게 여러 가지 경계 조건 하에서 크리프 특성을 모델 할 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성 분석연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정재필, 신영의, 임승수, "무연 마이크로 솔더링" 삼성실업, 2001
2. 정재필, 신영의, 임승수, "솔더링 기술의 실무" 삼성실업, 1999
3. Lee, Seong Min, "Creep Strength Eutectic Solder Used for Micro-electronic Application" 대한 금속학회지, Vol. 32, No. 8, 1994
4. 박성길, "크리프시험기 및 시험 종류." R & B Newsletter Vol. 2 No. 5, 2000
5. Xie, D. J., "A New Experimental Method to Evaluate Creep Fatigue Life of Flip-Chip Solder Joint with Underfill." Micro-electronics Reliability 40(2000)1191-1198
6. 오길환, 채두병, 김학윤, 연윤모, 송건, 장군오, "재료 시험법" 기전 연구사, 1996
7. Villain, J., Brueller, O. S., Qasim, T., "A Comparison of the Creep Characterization of Solder Materials by Using Viscoplastic and Arrhenius Theories" 2003, 3rd International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials, 17. - 20. 9. 2000
8. Kanchanomai, C., Miyashita, Y., Mutoh, Y., "Strain-Rate Effect on Low Cycle Fatigue Mechanism of Eutectic Sn-Pb Solder." International Journal of Fatigue 24 (2002) 987-993
9. Masami Fujiwara, Masahisa Otsuka, "Indentation Creep of β -Sn and Sn-Pb Eutectic Alloy" Materials Science and Engineering A 319-321 (2001) 929-933
10. Frear, D. R., Burchett, S. N., Morgan, H. S., Lau, J. H., The Mechanics of Solder Alloy Interconnects, Van Nostrand Reinhold, New York, (1994), pp. 199-313, 363-385