

온도사이클을 받는 Solder Joint의 피로수명에 관한 연구

(A Study on the Fatigue Life Prediction of Solder Joints under Thermal Cyclic Loading)

金 晋 基 * , 李 順 福 *

(Jin-Ki Kim and Soon-Bok Lee)

要 約

본 논문은 온도사이클을 받고 있는 소더조인트에 대하여 기존의 피로파괴이론을 적용하여 수명을 예측 하는데 목적이 있다. 소더는 하이브리드(Hybrid) IC 소더링(Soldering)에 사용되고 있는 62Sn-36Pb-2Ag 소더가 사용되었다. 이 재료의 성질을 임의의 세 온도(15℃, 50℃, 85℃)에서 인장시험을 통하여 조사하였다. 저주기 균열진전속도관계식을 균열길이 "a", 소성변형률 범위 " $\Delta\epsilon_p$ "과 온도 "T"의 함수로 표현하였다. 또한, 유한요소법을 이용하여 온도 사이클을 받는 소더조인트에 대하여 변형을 해석하였다.

위의 결과들은 임의의 소더조인트가 받는 온도 사이클에 대한 파손수명을 예측하므로써, 소더조인트의 신뢰성 향상에 도움을 줄 것이다.

Abstract

This study is to apply the theory of fatigue fracture to solder joints under thermal cyclic loading and predict life of solder joint to failure. A 62Sn-36Pb-2Ag solder was used in this study. Tensile tests were performed at temperatures of 15℃, 50℃ and 85℃ in order to find the mechanical properties of the solder. A model for crack growth rate was expressed in terms of crack length "a", plastic strain range " $\Delta\epsilon_p$ " and temperature "T". Solder joint under thermal cyclic loading was analyzed by FEM. This FEM analysis together with the crack growth rate will provide the capability of the fatigue life prediction of solder joints and enhance the reliability of solder joint.

1. 서 론

소더(Solder)란 전자부품과 부품 사이를 전기적으로 연결시켜 주기 위한 전자재료이다. 소더 를 녹여

붙여서 두 전자 부품을 연결시키는 작업을 소더링(Soldering)이라 하고 소더에 의해 연결된 부분을 소더조인트(Solder joint)라 한다.

소더는 낮은 용융온도, 여러가지 전자재료에 대한 좋은 젖음성(Wetting property), 높은 열전도율과 전기전도율, 강한 내식성 등이 요구된다. 이러한 여러가지 요구조건을 대체로 만족시키는 소더재료로 보통 주석(Sn)과 납(Pb)의 합금이 많이 사용되며,

*正會員, 韓國科學技術院 機械工學科
(Dept. of Mech. Eng., KAIST)
接受日字 : 1994年 2月 1日

63Sn-37Pb의 합금이 일반적으로 사용되어 왔다.

지금까지 소더링 방식은 외부 하중이나 충격에 큰 저항력을 가지고 있는 부품삽입방식이 보편적으로 사용되어 왔다. 이러한 방식은 다. 최근들어 부품의 소형화, 고집적화와 생산의 자동화에 대한 필요성과 중요성이 제기됨에 따라 표면실장(Surface-mount)방식의 소더링이 더욱 실용화되어가고 있다. 이것은 높은 집적도와 자동화에 필수적인 방식으로 여러가지 면에서 기존의 방식에 비하여 상당히 유리한 잇점을 가지고 있다. 하지만, 삽입형(Insert type) 소더 조인트는 부품의 전기적인 접속(Electronic interconnection)만의 역할을 가지고 있는데 반하여, 표면실장형(Surface mount type) 소더 조인트는 전기적 접속뿐만 아니라, 전자부품에 가해지는 기계적 하중에 대한 부품의 지지역할까지 겸하게 된다. 소더조인트의 크기가 아주 작아지게 됨에 따라, 절대적인 관점에서 비록 적은 힘이 가해지더라도 소더조인트에는 무시할 수 없는 큰 변형이 수반된다. 소더조인트의 변형은 여러가지 원인으로 발생할 수 있다. 생산과정에서 기판의 뒤틀림, 사용상에 있어서 외부의 충격,

발생되는 열을 대류시키기 위한 냉각팬의 회전에서의 기판의 진동 등이 있다. 여러가지 요인들이 복합적으로 작용하여 소더조인트의 피로파괴현상을 일으키지만, 가장 중요한 파괴요인은 부품간의 열팽창계수(Thermal expansion coefficient)의 차이로 인한 것이다.

소더조인트는 전원의 On-Off에 따라 온도 사이클을 겪게 된다 그림 1은 재료a와 재료b의 열팽창계수의 차이에 의한 변형을 나타낸 것이다. 이런 변형이 반복됨에 따라 소더 조인트는 저주기 피로(Low cycle fatigue)를 받게 되어 결국 파손에 이른다.

소더는 기판 위의 회로 동선과 전자부품을 접속해 주고 있다. 소더와 부품간의 접속은 동선과의 소더링의 접촉면에서 구리와 주석의 결합으로 Cu_3Sn 이나 Cu_6Sn_5 가 생성되므로써 이루어지고 이런 화합물들은 보통 소더보다 피로내성이 강하다.¹¹⁾ 그러므로 균열은 일반적으로 소더에서 발생된다. 온도 사이클 하에서 변형률은 연결부내의 위치에 따라 큰 차이가 있어서, 그로 인하여 취약한 부위에 큰 변형이 집중되어 이것이 반복되면 균열이 발생한다.

소더조인트의 열피로파괴는 많은 사람들에 의하여 연구되어 왔다. 대부분 소더조인트의 수명에측은 저주기피로에 의한 Coffin-Manson의 법칙으로 다음식(1)과 같이 설명되어 왔다.^{12,4)}

$$N_f = c \cdot (\Delta\gamma_p)^{-n} \quad (1)$$

여기서, N_f : 파손수명(Life to failure)
 c, n : 재료 상수(Material constant)
 $\Delta\gamma_p$: 전단 소성 변형률범위(Shear plastic strain range)

그림1과 같은 모양에서 소성변형률폭은 단순히 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta L = \Delta T \cdot (\alpha_b - \alpha_a) \cdot L$$

$$\Delta\gamma_p = \frac{\Delta L}{h} = \frac{\Delta T \cdot (\alpha_b - \alpha_a) \cdot L}{h} \quad (2)$$

여기서, α_a : 부품의 열팽창계수(Thermal expansion coefficient)
 α_b : PCB의 열팽창계수
 $\Delta\gamma_p$: 소성변형률범위(Shear plastic strain)

그러나, 이 관계식은 실제의 소더 조인트에 적용하는 것에는 다소의 문제점이 있다. 첫째로, 소더 조인트는 대부분이 그림1과 같은 단순한 모양을 가지고

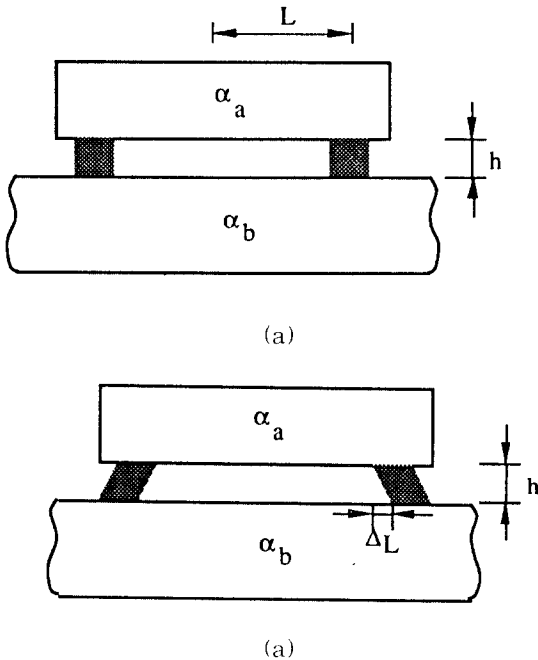


그림 1. 온도변화 대한 소더조인트의 변형($T_2 > T_1$, $\alpha_a > \alpha_b$) (a) 온도 T_1 일때 (b) 온도 T_2 일때
 Fig. 1. Deformed shape of solder joint for temperature cycle. (a) Temperature T_1 , (b) Temperature T_2 .

있지 않다는 것이다. 그로 인하여 조인트의 부위에 따라서 큰 변형률의 차이를 가지고 있다. 그러므로 소성변형률을 식(2)와 같이 나타낼 수 없다. 둘째, 온도의 변화는 소더의 재료상수 값을 크게 바꾸므로써 조인트의 변형과 균열진전속도에 큰 영향을 미친다는 점이다.

본 논문은 여러가지 실험과 해석을 통하여 균열진전속도를 몇가지 실험적상수로 표현하여 온도사이클을 받는 소더조인트의 파괴수명을 예측하는데 목적이 있다.

II. 피로균열성장이론

선형탄성파괴역학(LEFM)에서 균열의 진전속도는 보통 다음과 같이 Paris⁵⁾의 식으로 표현할 수 있다..

$$\frac{da}{dN} = c' \cdot (\Delta K)^{n'} \quad (3)$$

여기서, c' , n' : 실험적 상수
 ΔK : 응력확대계수범위
 a : 균열길이
 N : 사이클수

그러나, 소더조인트와 같이 작은 부피를 가지고 있고, 큰 변형을 받는 연성재료에 있어서는 LEFM을 적용할 수 없다. Dowling과 Begley⁶⁾에 의해 소개된 DJ는 탄소성 및 완전소성재료에 대하여 균열진전속도를 잘 설명할 수 있다

$$\frac{da}{dN} = c'' (\Delta J)^\eta \quad (4)$$

여기서, c'' , η : 실험적 상수, η = n' / 2

다음 장의 인장시험결과로부터, 소더의 응력-변형률 관계는 Ramberg-Osgood모델로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 이 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{\alpha}\right)^\beta \quad (5)$$

여기서, ε : 총변형률(Total strain)
 σ : 응력(Stress)
 α : 재료상수(Material constant)
 β : 변형률경화계수(Strain hardening coefficient), 0 < β < 1

ΔJ값은 탄성항과 소성항으로 나눌 수 있고, 표면

균열시편에 대해 Dowling⁷⁾은 다음과 같이 ΔJ를 나타낼 수 있다고 하였다.

$$\begin{aligned} \Delta J &= \frac{\Delta K^2}{E} + \Delta J_p \\ &= \left(\frac{3.2\Delta\sigma^2}{2E} + \frac{5\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon_p}{1+\beta} \right) \cdot a \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, E : 탄성계수(Elastic modulus)

소더조인트가 온도 사이클을 받을 때 큰 변형이 일어나고 소더의 재료특성을 고려하면, 탄성변형에 의한 피로파괴는 무시될 수 있다. 또한 소성 동안 변형률경화에 의해 변형률증분과 응력증분의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\sigma = \alpha \cdot (\Delta\epsilon_p)^\beta \quad (7)$$

식(6)에서, 첫번째 항을 무시하고 식(7)을 대입하면 ΔJ값은 다음과 같다.

$$\Delta J = \Delta J_p = \left(\frac{5 \cdot (\alpha \Delta\epsilon_p^\beta) \cdot \Delta\epsilon_p}{1+\beta} \right) \cdot a \quad (8)$$

식(8)에서 5α / (1 + β)를 A라 놓고, β + 1을 n이라 놓으면 식(8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta J = A \cdot (\Delta\epsilon_p)^n \cdot a \quad (9)$$

여기서, n, A : 재료상수, 1 < n < 2, A = 5α / (1+β)

식(4)에 식(9)를 대입하고 상수항을 c라고 놓으면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = c \cdot [(\Delta\epsilon_p)^n \cdot a]^\eta \quad (10)$$

한편, Tomkins⁸⁾는 높은 온도에서 사용되는 공업 재료의 저주기피로시 균열진전과모델은 다음과 같이 표현할 수 있다고 하였다.

$$\frac{da}{dN} = B \cdot a \quad (11)$$

여기서, B : 실험적 상수

식(11)과 비교하여 보았을 때, 식(10)에서 η = 1임을 예상할 수 있다.

Ⅲ. 실험

1. 인장 시험

본 연구에서는 하이브리드 IC의 소더링에 많이 사용되는 62Sn-36Pb-2Ag의 기본적인 재료특성을 조사하기 위하여 인장실험을 수행하였다. 지금까지 이 재료의 물성치에 대한 연구가 거의 없었고, 연구자마다 다른 결과를 보여 왔다. 이에 62Sn-36Pb-2Ag의 피로파괴실험에 앞서 재료특성을 조사하였다. 전자부품들은 일반적으로 약 0℃~130℃의 범위에서 사용된다. 62Sn-36Pb-2Ag의 용융온도는 179℃이다. 이것은 절대온도의 기준에서 볼 때, 452°K의 용융온도에 대해 사용온도는 약 273°K~403°K에 해당된다. 즉, 소더조인트는 용융온도의 약 60%~90%의 범위에서 사용되고 있음을 나타낸다. 그러므로 소더조인트는 사용중에 온도에 따른 재료상수의 큰 변화를 겪게 된다.¹¹⁾ 이에 따라 임의의 세 온도, 15℃, 50℃, 85℃에 대하여 인장시험을 수행하였다.

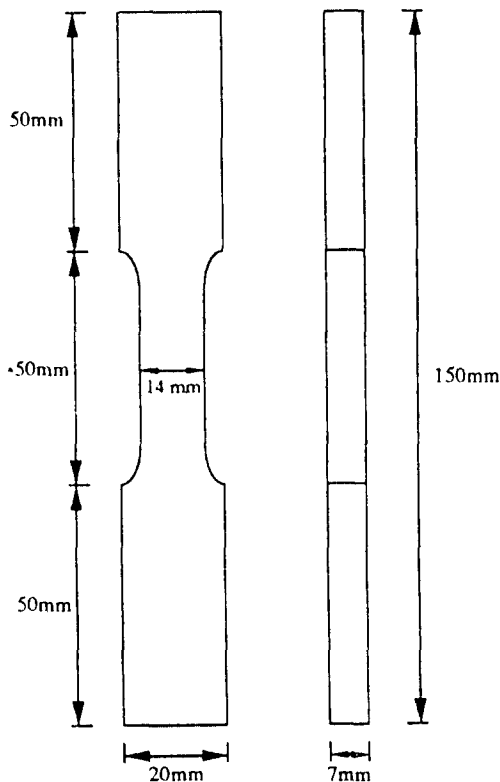


그림 2. 인장시험편(단위 : mm)

Fig. 2. Tensile specimen. (Dimension in mm)

소더합금의 제조시 주물의 냉각속도에 따라 소더는

다른 재료특성을 갖는다. 본 연구에서 62Sn-36Pb-2Ag 재료는 원통형태의 주물로 제조되었다. 원통의 크기는 지름 90mm, 길이 350mm이고, 팬에 의해 공기중에서 냉각시켰다. 시편은 그림2와 같이 기계가공에 의해 제작되었다. 가공중 발생할 수 있는 변형을 막기 위해 시편단면은 크게 하였다. 시험기는 10ton 용량의 MTS유압피로시험기가 사용되었고 시편의 온도를 올리기 위하여 열봉(Heat bar)이 사용되었다. 그림 3과 같이 두 개의 열봉을 시편의 뒷면에 고정하고, 옆면에 써머커플(Thermocouple)을 달아 시편의 온도를 체크하였다. 온도제어기(Temperature controller)를 사용하여 시편의 온도에 따라 열봉의 On-Off를 자동으로 제어할 수 있도록 하였다. 그리고 시편 주위로 막을 둘러 보온 효과 및 외부의 영향을 감소시켰다. 일정한 속도의 길이 변형 제어로 실험하였으며 변형률속도(Strain rate)는 0.00025sec⁻¹로 하였다. 스트레인게이지를 부착하여 두 방향의 변형률을 측정하였다.

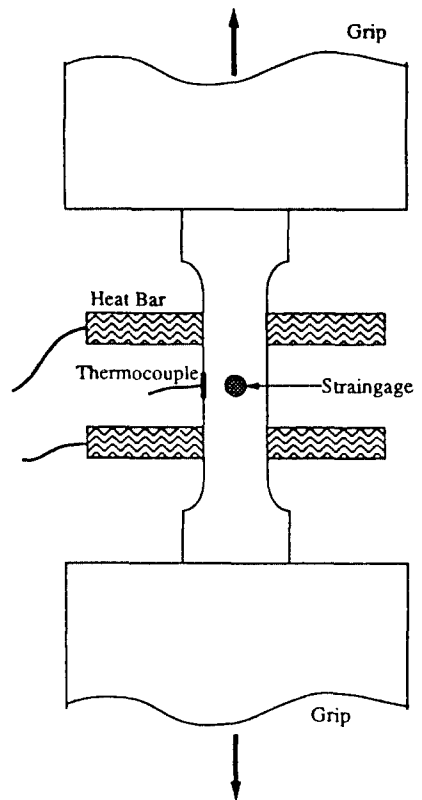


그림 3. 인장시험시 온도 제어 방법

Fig. 3. Temperature control during tensile testing.

2. 균열 진전 실험

앞서, 소더조인트가 큰 변형을 받으므로써 균열의 진전에 의해 파손되며, 균열진전기구가 저주기 피로 파괴의 균열진전 양상과 같다고 하였다. 이에 따라 일정한 변형률을 갖는 소더에 대한 균열진전실험을 통하여, 균열진전속도가 어떤 인자(Parameter)로 표현될 수 있는지를 조사하였다.

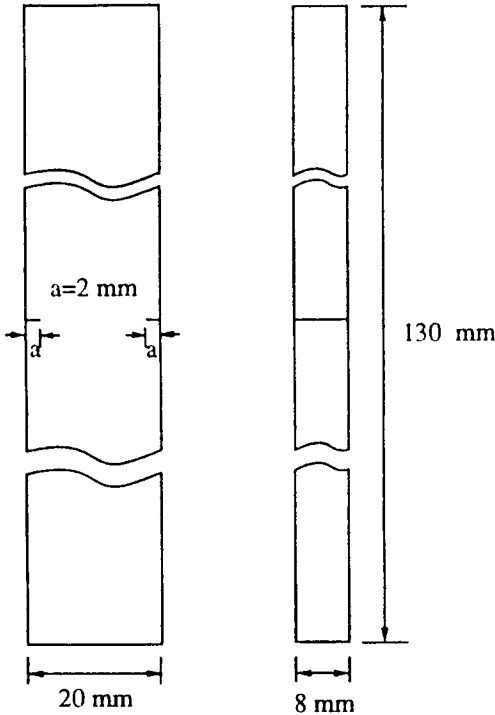


그림 4. 균열진전시험편(단위 :mm)
Fig. 4. Specimen for crack propagation testing. (Dimensions inmm)

시험편의 재료 및 제작은 인장시험편과 동일하다. 시험편은 그림 4와 같이 양단에 초기균열 2mm를 가진 양단균열시험편(Double edge cracked specimen)을 사용하였다. 62Sn-36Pb-2Ag는 큰 연성을 가지고 있으므로 실험중에 그림과 시험편에서의 미끌림이 발생하지 않도록 그림에 요철을 두었고 그림으로 물리는 시험편의 면적을 최대로 하였다. 또한 시험편에 좌굴이 일어나지 않도록 시험부위의 길이를 최대한 작게하였다. 실험은 MTS유압시험기로 수행하였으며 변형률비는 -1로 하중점변위제어를 통해 일정한 변형률을 반복적으로 가했다. 이때, 사이클수에 대한 균열길이를 이동현미경으로 측정하였다. 소성변형률폭을 네

가지로 달리하여 균열진전을 측정하였다. 마찬가지로 저주기 피로파괴에 미치는 주기와 온도의 영향을 평가하였다. 온도를 높이기 위한 방법으로 인장시험에서와 같은 방법을 사용하였다.

IV. 실험 결과 및 검토

1. 인장 시험

그림 5는 온도에 따른 인장시험결과로 소더의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 이 그림에서 온도 85℃에 대한 항복응력은 15℃에 대한 항복응력에 비하여 거의 절반으로 줄어드는 현상을 보인다. 마찬가지로, 15℃에서의 탄성계수는 85℃에 비해 약 3배의 증가를 나타낸다. 이것은 소더조인트가 약 0℃~130℃의 온도변화를 겪는다는 것을 감안할 때 조인트의 피로 파괴수명에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있게 한다.

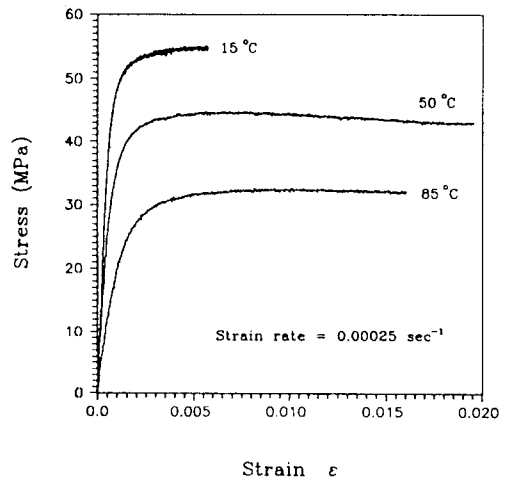


그림 5. 62Sn-36Pb-2Ag 소더의 응력-변형률 곡선
Fig. 5. Stress-strain curve of 62Sn-36Pb-2Ab solder.

둘째, 축방향 변형률과 그에 수직인 변형률의 비, 즉 포아송비가 그림 6에 그려져 있다. 이것은 세 온도에서 탄소성에 구분없이 약 0.5로 일정한 값을 보여주고 있다. 이것으로부터 62Sn-36Pb-2Ag의 응력-변형률관계는 Ramberg-Osgood모델로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 또한 소성에 이르는 변형률이 매우 작다는 것이다. 그림 5로부터 완전히 항복되었을 때의 변형률은 온도에 따라 약 0.0008~0.0015에 불과하였다. 즉, 이 재료는 거의 완전소성재료

(Fully-plastic material)에 가까운 거동을 보여준다는 점이다. 이런 재료특성을 가진 소더조인트가 온도 사이클을 받을 때 발생하는 변형은 유한요소법(Finite element method)으로부터 예상될 수 있다.

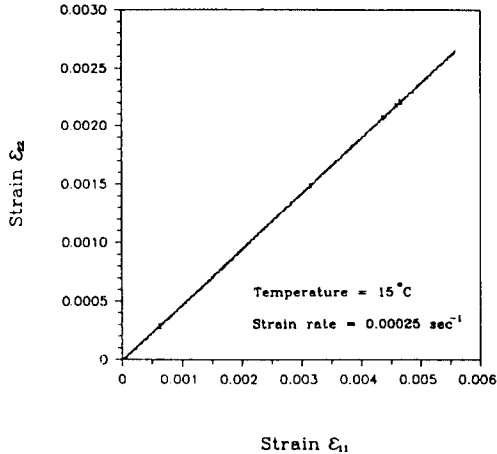


그림 6. 62Sn-36Pb-2Ag소더재료의 포이송비 (온도 15°C)

Fig. 6. Poisson's ratio of 62Sn-36Pb-2Ag at 15°C.

2. 균열진전실험

첫째로, 소성변형률범위(Plastic strain range)를 달리할 때 사이클수에 대한 균열길이에 대한 실험결과가 그림 7에 나와있다.

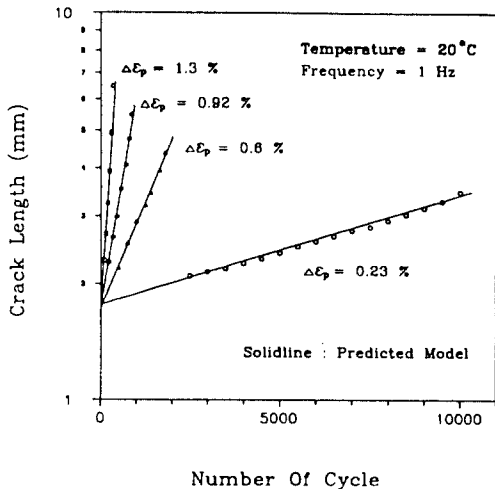


그림 7. 62Sn-36Pb-2Ag소더의 사이클수에 대한 균열길이의 변화

Fig. 7. Crack length versus number of cycles for 62Sn-36Pb-2Ag solder.

이 그래프로 부터, 어떤 일정한 소성변형률범위를 갖는 실험에서 균열길이에 자연로그를 취한 것은 사이클수와 비례관계에 있다는 결론을 얻을 수 있다. 이것을 수식화하면 다음과 같다.

$$\ln a \propto N \tag{12}$$

여기서, a : 균열길이
N : 사이클수

식(12)의 양변을 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{da}{dN} = C_1 \tag{13}$$

여기서, C₁ : 비례상수

즉, 균열진전속도는 다음과 같이 균열길이로 표시될 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C_1 \cdot a \tag{14}$$

여기서, 실험식(14)는 식(11)과 같은 형태이며 식(10)에서 h=1임을 재확인 시켜주고 있다.

그림8은 임의의 두 균열길이(a=3 및 4 mm)에서, 서로 다른 네 가지 소성변형률범위에 대한 균열진전속도를 나타낸 것이다.

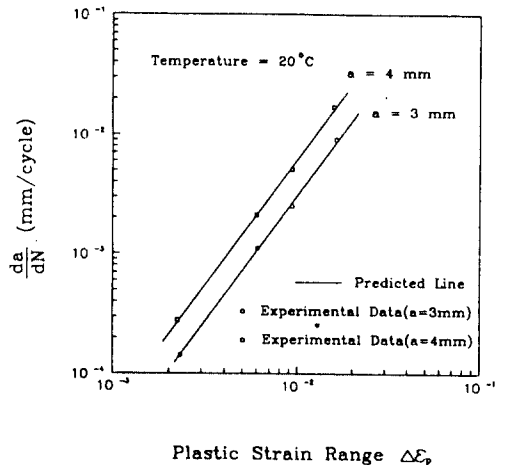


그림 8. 62Sn-36Pb-2Ag소더의 소성변형률범위에 대한 균열진전속도의 변화

Fig. 8. Crack growth rate versus plastic strain range for 62Sn-36Pb-2Ag solder.

이 그림은 균열진전속도와 소성변형률범위가 로그단위에서 서로 비례하고 있음을 나타낸다. 이 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\ln\left(\frac{da}{dN}\right) \propto \ln(\Delta\epsilon_p) \quad (15)$$

여기서, $\Delta\epsilon_p$: 소성변형률범위(Plastic strain range)

식(15)에서 비례상수를 n이라 하고 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} \propto (\Delta\epsilon_p)^n \quad (16)$$

여기서, n : 재료 상수(Material constant)

이 실험결과로부터 n은 약 1.8~1.9의 값을 보여주고 있다.

또한 그림 8에서 $\Delta\epsilon_p$ 가 일정할 때 a가 크면 da/dN도 비례적으로 큰값을 보이고 있다. 따라서, 위의 식(14)와 식(16)을 서로 비교하여 볼때 결국 다음과 같은 실험관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C_2 \cdot (\Delta\epsilon_p)^n \cdot a \quad (17)$$

여기서, C_2 : 비례상수

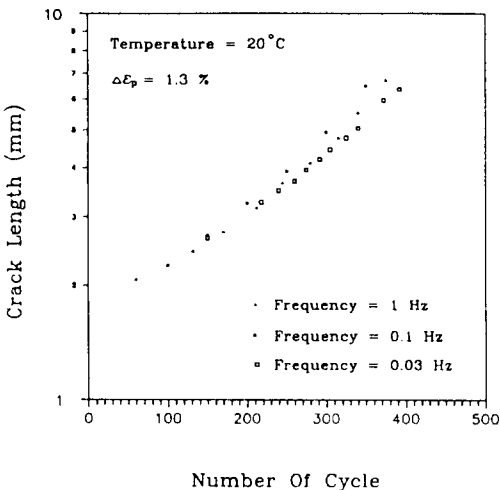


그림 9. 여러 주기에서 소더의 사이클수에 대한 균열길이의 변화

Fig. 9. Crack length versus number of cycle data of solder at various frequencies.

이 실험식(17)은 h=1일 때의 균열진전속도예상식(10)과 잘 일치하고 있음을 보여준다. 그림 7과 8에서 직선은 균열진전속도예상식에 의한 결과이다.

둘째, 주기를 달리하여 주었을 때 사이클수에 대한 균열진전관계는 그림 9와 같다. 주기는 1Hz, 0.1Hz, 0.03Hz로 하였다. 62Sn-36Pb-2Ag의 연성으로 인하여, 주기가 낮아질 수록 그림부위에서 밀리는 현상이 발생하여 0.03Hz이상에서 주기효과를 관찰하지 못하였다. 특이할만한 점은 세 가지 주기의 실험에서 균열진전은 아무런 차이점을 보이지 않았다는 점이다.

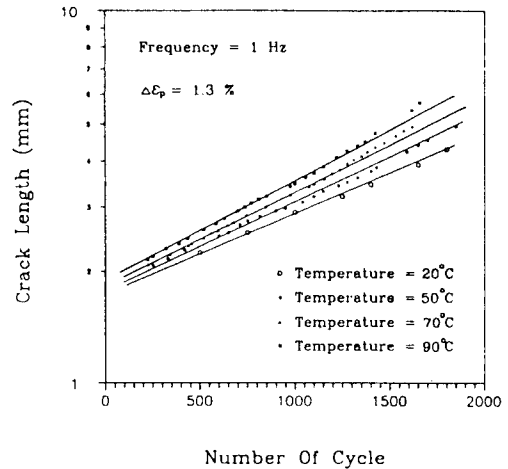


그림 10. 여러 온도에서 소더의 사이클수에 대한 균열 길이의 변화

Fig. 10. Crack length versus number of cycle data of solder at various Temperatures.

셋째, 소성 변형률범위로 $\Delta\epsilon_p = 1.3\%$ 로 일정하게 하고 온도를 달리하여 1Hz에서 균열성장실험을 수행하였다. 그림 10은 온도의 변화에 따른 균열진전의 결과를 나타낸다. 온도가 증가할 수록 그래프의 기울기가 증가하는 효과가 있음을 실험결과는 보여주고 있다. 이 온도효과는 활성화에너지의 관계로 나타낼 수 있다.¹¹ 즉, 균열진전속도식(17)에 활성화에너지의 항을 추가하면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta\epsilon_p)^n \cdot a \cdot \exp\left(-\frac{m \cdot Q}{k \cdot T}\right) \quad (18)$$

여기서, Q : 활성화 에너지(Activation energy, eV)
a : 균열길이
n : 재료상수(Material constant)

- C, m : 실험적 상수(Experimental constant)
- k : 볼츠만상수(Boltzmann constant, eV/0K)
- T : 절대온도(Temperature)

여기서 62Sn-36Pb-2Ag소더의 볼츠만상수가 $k=8.617E-5$ eV/K의 값을 가질 때^[13], 균열진전실험 데이터로부터 저주기피로에 대한 62Sn-36Pb-2Ag 소더의 활성화에너지를 구할 수 있다. 계산결과로부터 활성화에너지는 약 $Q=0.05eV$ 를 갖는다. 앞에서 보인 것과 같이 n 은 약 1.8~1.9의 값을 얻었다.

결국, ΔJ 로부터 유도한 식과 실험적인 입증을 통해, 저주기피로를 받는 62Sn-36Pb-2Ag의 소더재료에 대한 피로수명예측을 위하여 균열진전속도식(18)을 제안한다.

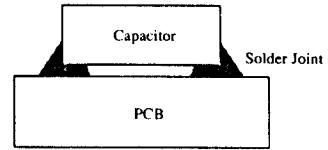
V. 소더조인트의 유한요소해석

앞 장의 균열진전속도식(18)을 소더조인트에 적용시키는데 있어서 몇가지 문제점이 있다. 첫째로, 온도 변화에 따른 소더조인트의 변형은 조인트의 모양에 따라 조인트내의 위치마다 국부적인 변형률의 차이가 심하다. 둘째, 땀납의 재료상수가 온도에 따라 상당한 변화가 있기 때문에 계산에 의해서 소성변형률폭을 구한다는 것은 불가능하다. 이에 따라 소더 조인트의 유한요소(Finite element)해석을 통하여, 온도 변화를 받을 때 균열이 생성될 수 있는 가장 취약한 부위를 예상하고 그 부위의 소성변형률을 구하므로써 식(18)을 보다 효율적으로 이용할 수 있고, 균열이 진전할 것으로 예상되는 경로를 찾아낼 수 있다.

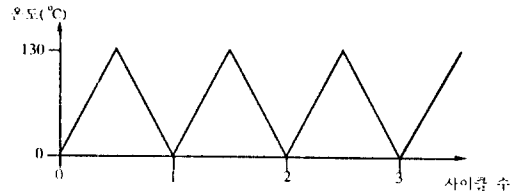
유한요소해석은 상용 FEM프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석하였다.

표 1. 콘덴서와 PCB기판의 재료상수
Table 1. Material constants of capacitor and PCB.

| | Capacitor | PCB기판 |
|-------------|-----------|----------|
| 재료 | Titanium | Polymide |
| 포아송의비 | 0.34 | 0.3 |
| 열팽창계수(1/°C) | 8.82e-6 | 45e-6 |
| 탄성계수(GPa) | 110 | 4 |



(a)



(b)

그림 11. 해석 모델

- (a) 콘덴서와 기판사이의 소더링 모델
- (b) 소더조인트가 받는 온도사이클

Fig. 11. FEM analysis model

- (a) Solder joint connecting capacitor and PCB
- (b) Temperature cycles for solder joint.

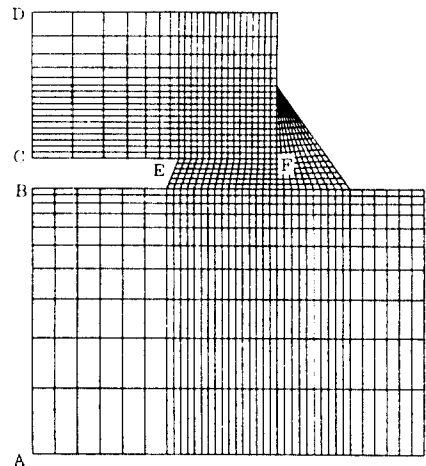


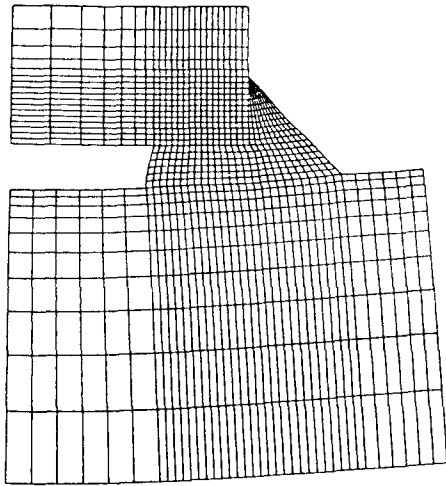
그림 12. 해석 모델의 요소분할

Fig. 12. Mesh for solder joint model.

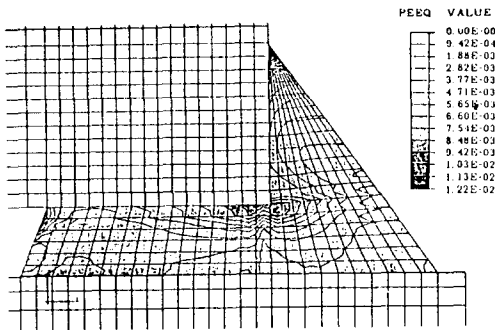
해석하려 하는 소더조인트의 모델은 표면실장형 가운데 실용화되어 있는 콘덴서(Capacitor)와 PCB기판사이의 소더조인트이며, 모양은 그림11(a)와 같다.

콘덴서와 PCB 기판의 재료 및 재료상수는 표1과 같다고 가정하였다. 소더는 62Sn-36Pb-2Ag를 사용하였고, 구성방정식은 탄성-완전소성 모델을 따른다고 가정하였으며, 앞의 인장시험을 통해 얻은 결과를 온도의 함수로 입력하였다. 이 소더 조인트가 연속적인

온도 사이클을 받는다고 하였을 때 변형되는 모양과 잔류응력 및 변형률을 각 사이클마다 조사하였다. 여기서 가해진 온도사이클은 그림 11(b)와 같다. 즉, 일정한 시간동안 0℃에서 130℃까지 일정하게 온도를 증가시키고, 다시 반대의 과정을 겪는 것을 한 사



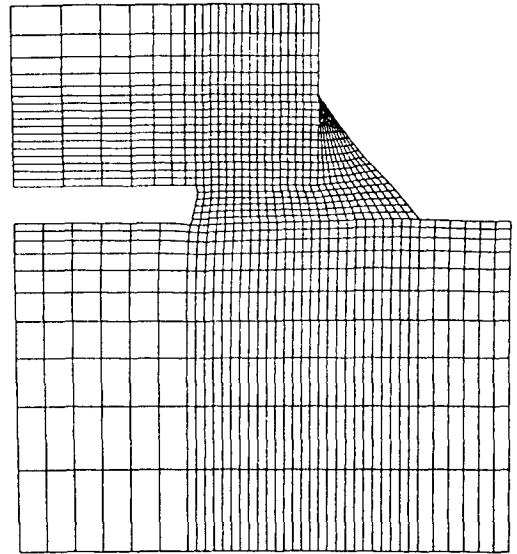
(a)



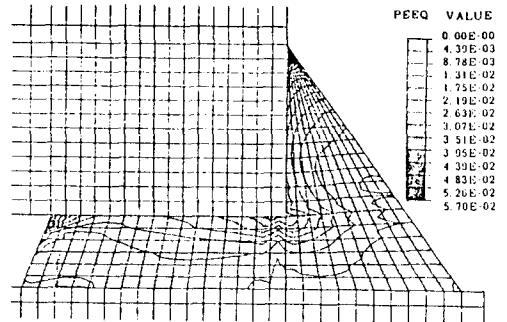
(b)

그림 13. 첫 사이클의 최대온도 130℃에서 소더조인트의 변형 (a) 변형된 모양(변위는 25배 확대되었다.) (b) 등가소성변형률의 등고선

Fig. 13. Deformation of solder joint at maximum temperature 130℃ in the first cycle (a) Deformed shape of solder joint (25 times enlarged in displacement) (b) Contour for equivalent plastic strain.



(a)



(b)

그림 14. 세 사이클이 지난 후에 소더조인트의 변형 (a) 변형된 모양(변위는 25배 확대되었다.) (b) 등가소성변형률의 등고선

Fig. 14. Deformed shape of solder joint after the third cycle (a) Deformed shape of solder joint (25 times enlarged in displacement) (b) Contour for equivalent plastic strain.

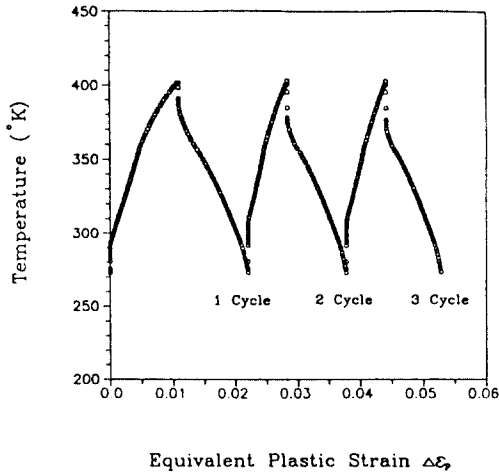


그림 15. 온도에 따른 등가소성변형률의 변화
Fig. 15. Temperature versus equivalent plastic strain curve.

이클로 하였다. 이때, 소더조인트의 각 사이클당 변형된 모양 및 변형률 분포를 해석하였다. 그리고 소더 조인트내의 변형이 집중되는 포인트에 대해 온도 변화에 따른 변형률 및 응력의 변화를 조사하였다. 여기서 응력은 Von Mises 응력이고 변형률은 등가소성변형률로 표시하였다.

그림 12는 이 모델에 대해 영역을 분할한 모습을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 소더부분을 더 세밀하게 나누었으며 9절점을 가진 사각형요소를 사용하였다. 절점의 총 갯수는 3704개이고, 요소의 총 갯수는 1047개이다. 좌우대칭이므로 한 쪽 부분에 대해서만 해석하였다. 경계조건은 AB면과 CD면에 대해 x방향 변위와 A점의 y방향 변위를 고정시켜 좌우대칭의 효과를 갖게 하였다. 또한 초기 조건에서 응력과 변형률을 모두 0으로 하였고 모든 절점에 초기 온도(0°C)를 주었다. 온도사이클을 받게하기 위해서 모든 절점의 온도가 동시에 0°C에서 130°C로 모두 똑같이 일정하게 올라가는 온도하중을 부과하였다.

그림13은 온도를 초기상태인 0°C에서 130°C로 올린 후 발생된 변형(Deformation)과 등가소성변형률(Equivalent plastic strain)의 등고선(Contour)을 보여주고 있다. 최종적으로 그림 14는 3사이클 후의 결과를 나타낸다. 사이클이 증가하면서 소더 조인트는 변형이 집중되는 세 점을 갖는다는 것이 발견되었다. 첫번째 사이클중 130°C에서는 F점에서 가장 큰 등가소성변형률을 가졌다. 그렇지만 한 사이클이 지난 후에는 E점이 더 큰 변형률을 보이기 시작하여 두

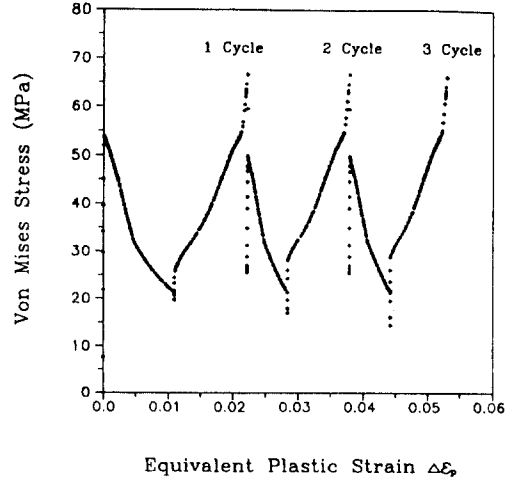


그림 16. Von Mises 응력과 등가소성변형률의 변화
Fig. 16. Von Mises stress versus equivalent plastic strain curve.

사이클 후에는 이 점에서 변형의 축적이 가장 커졌다. 그러므로 E점에서 균열이 생성되리라고 생각되며, 등가소성변형률 분포도를 볼 때 균열은 콘덴서와 소더의 접촉면을 따라 진행할 것으로 예상된다.

그림 15는 E점 요소에서 세 사이클동안 온도에 따른 등가소성변형률의 변화를 그린 것이다. 이 그림으로부터 E점에서 사이클당 등가소성변형률을 구할 수 있다. 그림 16은 세 사이클 동안 E점 요소에서 Von Mises응력과 등가소성변형률의 변화를 나타낸 것이다. 그림 15와 그림 16으로부터 균열예상점에서 사이클당 등가소성변형률은 약 1.6%에 이른다는 결과를 얻을 수 있다.

유한요소해석으로부터 그림 11(a)와 같은 소더조인트에서 가장 취약하다고 판단되는 E점에 마이크로단위의 초기균열이 존재한다고 가정할때, E점의 사이클당 등가소성변형률 1.6% 를 균열진전속도식(18)에 대입하므로써 표면실장형 소더조인트의 피로수명을 보다 정확하게 예측할 수 있게 해준다.

Ⅶ. 검토 및 결론

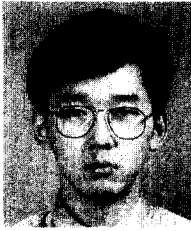
본 연구에서 62Sn-36Pb-2Ag소더(Solder)에 대한 인장시험을 통해 이 재료가 온도에 따라 재료의 성질이 매우 변하고 Ramberg-Osgood모델로 잘 표현될 수 있음을 알았다. 그리고 DJ로 부터 예측된 균열진전식과 여러가지 조건에서 균열진전실험 수행하여 서로 비교하므로써 식(18)과 같은 균열진전속도식을 제안하였다. 이 식은 소더조인트가 초기균열을 가지고

있을때, 균열이 진전하여 정의된 파손길이에 이를 때까지의 파괴수명을 나타내고 있고 소더조인트가 아무리 완벽히 제조되었다고 하더라도, 실제로는 미세한 마이크로 단위의 초기균열을 갖고 있고 첫 사이클에서부터 균열이 진전한다는 가정을 가지고 있다. 또한, 소더조인트(Solder joint)의 유한요소(Finite element)해석을 통하여 표면실장형 소더조인트에 대하여 온도 사이클에 의한 변형을 해석하였다. FEM 해석을 통하여 소더조인트내에서 균열이 발생할 수 있는, 즉, 가장 변형이 집중되는 부위 및 이 위치에서의 소성변형률의 변화와 균열진전예상경로를 얻으므로써 피로파괴수명을 예측할 수 있는 논리적인 기반을 얻을 수 있었다. 식(18)에서, $\Delta\epsilon_p$ 는 임의의 소더 조인트가 온도 사이클을 받을 때 발생하는 균열에 상위의 사이클당 소성변형률변화로 앞에서와 같이 FEM해석을 통해 얻게 된다. 균열진전속도식(18)은 온도사이클을 받는 소더조인트의 수명예측시 한 사이클 내에서 온도변화를 고려할 수 있고 파손수명의 결정이 명확하다는 점은 수명예측에 있어서 Coffin-Manson식에 비하여 유리하다.

參考文獻

- [1] D.Frear, D.grivas and J.W.Morris,Jr. "A Microstructural Study of the Thermal Fatigue Failures of 60Sn-40Pb Solder Joints." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 17, No. 2, pp. 171~180, 1988.
- [2] L.C.Coffin. Fatigue in Machines and Structures-Power Generation. "Fatigue and Microstructure." American Society for Metal, Metals Park, Ohio, pp. 1~27, 1979.
- [3] H. D. Solomon. "Fatigue of 60/40 Solder." *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol.*, Vol. CHMT-9, pp. 423~432, 1986.
- [4] T.D.Dudderar, N.Nir, A.R.Storm and C.C.Wong. "Fatigue Property of Microelectronics Solder Joints." *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, Vol.13, pp. 92-101, 1991.
- [5] P.Paris and F.Erdogen. "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws." *Trans. ASME*, pp. 528~534, 1963.
- [6] N. E. Dowling and J. A. Begley. "Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J Integral, in the Mechanics of Crack Growth." *ASTM STP 590*, Philadelphia, pp. 82-103, 1976.
- [7] N. E. Dowling. "Crack Growth During Low-Cycle Fatigue of Smooth Axial Specimens." *ASTM STP 637*, Philadelphia, pp. 97-121, 1977.
- [8] B.Tomkins. "The Development of Fatigue Crack Propagation Models for Engineering Application at Elevated Temperatures." *Trans. ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, pp. 289~297, 1975.
- [9] K.Kaqashima, T.Ito and M.Sakuragi. "Strain-rate and Temperature-dependent Stress-Strain Curve of Sn-Pb Eutectic Alloy." *J. Mater. Sci.* 27, pp.6387-6390, 1992.
- [10] H.J.Frost, R.T.Howard, D.R.Lavery and S.D.Lutender. "Creep and Tensile Behavior of Lead-Rich Lead-Tin Solder Alloys." *IEEE Trans., Comp., Hybrids, Manuf., Technol.*, Vol. 1, No. 4, pp.371~379, 1988.
- [11] E. P. Busso, M.Kitano and T. Kumaazawa. "A Visco-Plastic Constitutive Model for 64/40 Tin-Lead Solder Used in IC Package Joints." *Trans. ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, pp. 331~337, 1992.
- [12] R.P.Skelton. "High Strain Fatigue Testing at Elevated Temperature." *Trans. Indian Inst. Metal*, Vol.35, No. 6, pp. 519~534, 1982.
- [13] John H. Lau. "Creep of 62Sn-36Pb-2Ag Solder Interconnects." *EFP-Vol. 4-2, Advances in Electronic Packaging ASME*, 995~1003, 1993.

著 者 紹 介



金 晋 基(正會員)

1968年 12月 13日生. 1991年2月
한양대학교 기계설계학과 졸업.
1994年 2月 한국과학기술원 기계
공학과(공학석사). 1988年 6月 6
月 ~ 현재 만도기계중앙연구소
연구원. 주관심 분야는 Elec-

tronic packaging failure, Life estimation 등임.



李 順 福(正會員)

1951年 12月 17日生. 1974年 2
月 서울대학교 기계공학과 졸업.
1976年 2月 한국과학기술원 기계
공학과(공학석사). 1980年 10月
미국 스텐포드 대학원 기계공학과
(공학박사). 1980年 4月 ~ 1988

年 5月 한국기계연구소 책임연구원. 1988年 6月 ~
현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수. 주관심 분
야는 Electronic packaging failure, Fatigue,
Fracture, Life estimation 등임.