전단펀치-크리프 시험에 의한 리플로우 시간별 Pb-free 솔더 합금 접합부에 대한 고온 크리프 물성 평가

함 영 필¹⁾ · 허 우 진²⁾ · 유 호 선¹⁾ · 양 성 모^{*1)}

전북대학교 기계시스템공학부¹⁾ · LS 엠트론 사출시스템사업부²⁾

Material Property Evaluation of High Temperature Creep on Pb-free Solder Alloy Joint to Reflow Time by Shear Punch-creep Test

Young Pil Ham¹⁾ · Woo Jin Heo²⁾ · Hyo Sun Yu¹⁾ · Sung Mo Yang^{*1)}

¹⁾Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

²⁾Molding Machines Division, LS Mtron, 886 Gwahangno, Bongdong-eup, Wanju-gun, Jeonbuk 565-902, Korea

(Received 27 July 2012 / Revised 2 August 2012 / Accepted 23 August 2012)

Abstract : In this study, shear punch-creep (SP-Creep) at Sn-4Ag/Cu pad the joint was tested by using environment-friendly Pb-free solder alloy Sn-4Ag of electronic components. Pb eutectic alloy (Sn-37Pb) joints limited to environmental issues with reflow time (10sec, 30sec, 100sec, 300sec) according to two types of solder alloy joints are compared and evaluated by creep strain rate, rupture time and IMC (Intermetallic Compound) behavior. As the results, reflow time increases with increasing thickness of IMC can be seen at overall 100sec later in case of two solder joints on the IMC thickness of Sn-4Ag solder joints thicker than Sn-37Pb solder joints. In addition, when considering creep evaluation factors, lead-free solder alloy Sn-4Ag has excellent creep resistance more than Pb eutectic alloy. For this reason, the two solder joints, such as in the IMC (Cu₆Sn₅) was formed. However, the creep resistance of Sn-4Ag solder joints was largely increased in the precipitation strengthening effect of dispersed Ag₃Sn with interface more than Sn-37Pb solder joints.

Key words : Shear punch-creep test(전단펀치크리프시험), Reflow time(리플로우시간), Solder joint(솔더합금 접합부), Pb-free(무연솔더), IMC(Intermetallic Compound, 금속간화합물)

1. 서 론

최근 전자회로 장치의 고밀도화 및 다기능화가 진행됨에 따라 전자기기 부품은 점차 소형화 되고 있다. 이러한 전자기기는 솔더링(Soldering)이라는 마이크로 접합기술(Micro-joint technology)에 의해 모두 제조되는데, 여기서 솔더링은 두 고체를 접합하는 방법 중 용융상태의 재료인 솔더를 이용하는 방법을 말하며 전기·전자·통신기기의 PCB(Printed circuit board) 기판과 소자(Device)의 접속 및 반도체

와 전자부품의 접합공정에 있어 매우 중요한 패키징(Packaging) 핵심기술이다.¹⁾

일반적으로 산업 현장에서 BGA(Ball grid array) 패키지를 실장하기 위해서는 리플로우 공정을 거치는데 한 번에 모든 작업이 이루어지는 것이 아니라 최소 2회 이상의 리플로우 공정이 필요하게 된다. 이때 리플로우 시간에 따라서 기판과 솔더 사이에 생성되는 금속간화합물(Intermetallic compound ; IMC)의 크기 및 성분이 달라지고 이 금속간 화합물이 과잉 생성될 경우 접합부 물성치에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 리플로우 시간에 따른 금속간화

*Corresponding author, E-mail: yangsm@jbnu.ac.kr

합물의 성장거동과 이로 인한 기계적 성질 변화에 관한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.^{2,3)}

특히, 이들 솔더 접합부의 작동온도 범위가 최고 150°C임을 고려할 때 접합부의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 열응력과 외부응력은 장시간 가동 중인 상태에서 솔더 접합부의 고온 크리프 변형을 발생시키고, 최종적으로 전자기기의 단선과 입출력 단자의 단락을 초래하게 된다. 이때 솔더 접합부에는 인장응력(Tensile stress), 압축응력(Pressure stress), 전단응력(Shear stress)과 같은 3종류의 응력성분이 발생되는데 이 중 전단응력 성분은 솔더 접합부의 파단에 큰 영향을 주는 인자이라고 알려져 있다.^{4,5)}

따라서 솔더 접합부에 대한 정량적 고온 크리프 특성 평가 및 D/B 확보는 전자기기의 장시간 신뢰성 확보 측면에서 매우 중요하다고 말할 수 있다. 또한 Pb-free 솔더 접합부의 주요 응력인 전단응력 조건에서의 고온 크리프 특성 평가의 실험적 보고는 매우 적음을 고려할 때 이에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 2원계 무연 솔더 합금을 이용하여 리플로우 시간에 따른 솔더 접합부의 특성을 조사하였으며, 미소시험편을 이용하는 전단편치-크리프 실험(Shear punch-creep test; SP-Creep Test)⁶⁾에 의해 전단응력 조건하에서 무연 솔더 접합부의 장시간 신뢰성과 관련된 고온 크리프 특성을 연구하였다.

2. 실험방법 및 실험재료

2.1 실험재료

현재 무연 솔더 합금의 설계방향은 기존의 Sn-Pb 공정합금의 용점(183°C)을 고려하여 Sn을 기본 주성분으로 하고, 여기에 Pb 대신 다른 원소들을 첨가한 합금개발이 주축을 이루고 있다. 이러한 이유는 Sn이 환경문제를 발생하지 않고, 자원이 풍부하며 용점(232°C)이 낮으면서 접합부의 성질은 합금화에 의해 개선이 가능하기 때문이다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 실험재료로 Sn-37Pb와

Table 2 Melting point temperature of Pb-free and eutectic Sn-Pb solders

System	Melting point temp. (°C)
Sn-37Pb	183
Sn-4Ag	225

Fig. 1 Microstructures of Pb-free and eutectic Sn-Pb solders by SEM

Sn-4Ag의 솔더 합금을 선정하였다. 무연솔더와 Sn-Pb 공정합금의 화학적 조성은 Table 1과 같으며 각 솔더의 용점은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 전자현미경을 이용하여 두 솔더 합금에 대한 미세조직을 나타낸 사진으로 (a)의 Sn-37Pb 솔더합금을 살펴보면 Pb-rich(β)와 Sn-rich(γ)로 구성된 이중(Duplex) 조직으로, (b)의 Sn-4Ag 솔더는 Sn 덴드라이트 조직과 Ag_3Sn 의 금속간화합물로 구성되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

2.2 시험편과 실험방법

종래 솔더접합부의 크리프 특성을 평가하는데 사용된 시험편은 주로 인장-전단시험편이었다.⁸⁾ Fig. 2는 본 연구에서 사용된 실제 시험편의 모습과 기존에 사용되던 시험편의 모양이다. 그러나 기존에 사용되던 인장-전단시험편은 전단 변형 시 솔더 접합부에 회전모멘트가 발생하여 접합부가 전단변형 외의 비틀림 변형을 하게 되어 전단응력 상태에서 기계적 특성을 평가하기 어려움이 있다. 또한 실제 전자부품의 미세 솔더 접합부의 크기와 비교해 볼 때 종래 시험편의 크기가 상대적으로 크기 때문에 시

Table 1 Chemical compositions (wt%)

Element (wt%)	Sn	Pb	Sb	Cu	Bi	Zn	Fe	Al	As	Cd	Ag	Ni
Sn-37Pb	Bal.	37.0	0.100	0.030	0.030	0.002	0.020	0.002	0.030	0.002	0.002	0.010
Sn-4Ag	Bal.	0.050	0.100	0.030	0.030	0.002	0.020	0.002	0.030	0.002	4.0	0.010

Fig. 2 Schematic diagram of specimen

험편의 사이즈 효과가 존재하게 되어 미세 솔더 접합부의 크리프 특성 평가에 있어 그의 신뢰성은 낮다고 사료된다. 반면, 본 연구에서 사용된 시험편의 경우 크기가 작은 미소시험편이기 때문에 상대적으로 사이즈 효과를 최소화시킬 수 있으며 전단응력 조건에서 크리프 특성을 평가할 수 있어 기존 시험편보다 우수하다고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 미소시험편(10×10×0.5mm) 사진과 시험편 체결부위의 개략도는 Fig. 3과 같다. 이때 솔더 접합부를 구성하기 위해 채택한 Sn-4Ag와 Sn-37Pb 솔더 합금의 리플로우 온도는 솔더 자체의 융점을 고려하여 각각 240°C, 200°C로 선정하였으며, 리플로우 시간은 10sec, 30sec, 100sec, 300sec으로 하였다. 준비된 시험편을 이용한 전단편치-크리프 시험은 직경 2.8mm를 갖는 펀치를 이용하여 시험편의 중앙에 일정 응력을 가하는 방식으로 실

Fig. 3 SP-specimen and uniaxial specimen

시하였다. 크리프 시험온도는 30°C와 50°C이며 5MPa에서 20MPa 범위의 응력조건에서 크리프 실험을 수행하였다. Fig. 4에 SP-Creep 실험 장치의 개략도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Pb-free 솔더 접합부의 IMC 거동

Fig. 5는 솔더 플럭스 레진 안에서 다양한 리플로우 시간에 따른 Sn-4Ag 솔더 접합부의 리플로우 시간 별 SEM 관찰사진이다. 리플로우 시간이 증가할

Fig. 4 SP-Creep tester

Fig. 5 SEM micrographs of IMC behavior for Sn-4Ag solder joints with reflow time

Fig. 6 SEM micrographs of IMC behavior for Sn-37Pb solder joints with reflow time

수록 IMC의 두께와 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 리플로우 시간이 증가됨에 따라 IMC 층에서 Cu_6Sn_5 의 입자 크기가 점차 성장되었으며 IMC의 모양도 넓적한 모양의 Flat 형태에서 둥근 모양의 Scallop 형태로 변화함을 관찰할 수 있다. 그리고 300sec의 리플로우 시간에서는 솔더 합금 내까지 IMC가 성장된 모습을 볼 수 있다. 또한 Sn-4Ag 솔더 접합부에서는 Ag_3Sn 화합물이 IMC의 계면에 모여 드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Sn-37Pb 솔더 접합부의 금속간 화합물을 관찰한 SEM 사진이다. Sn-4Ag 솔더 접합부와 마찬가지로

Fig. 7 IMC thickness at solder joint for reflow time

가지로 리플로우시간이 증가할수록 IMC의 두께가 증가하였으며 10sec에서는 Pb-rich상이 관찰되지 않았지만 30sec에서부터는 Pb-rich상이 관찰되었다.

Fig. 7은 Sn-4Ag와 Sn-37Pb의 솔더 접합부에 대한 IMC 두께를 측정된 결과이다. 두 솔더 접합부 모두 리플로우 시간이 증가할수록 IMC 두께가 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 30sec에서 100sec 사이에서 IMC 두께가 급격히 증가함을 관찰할 수가 있다. 전반적으로 리플로우 100sec 이후에는 Sn-4Ag 솔더 접합부의 IMC 두께가 Sn-37Pb 솔더 접합부 보다 매우 두꺼웠다.

3.2 고온 크리프 물성 평가

3.2.1 SP-Creep 곡선 거동

Fig. 8~Fig. 10은 시험온도 30°C에서 다양한 리플로우 시간에서 얻은 두 솔더 접합부의 크리프 변형을 곡선이다. 모든 경우에 전단-크리프 곡선의 전체적인 변형거동은 작용응력에 따라 매우 뚜렷하게 변화되고 있음을 알 수 있다. Sn-4Ag 솔더 접합부의 결과 모두 종래의 크리프 곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 초기 크리프 영역(Primary creep stage), 정상상태 크리프 영역(Steady state creep stage), 가속 크리프 영역(Accelerative creep stage)이 뚜렷이 나타났다. 또한 리플로우 시간에 따라 전체적인 변형거동이 뚜렷하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 16.64MPa의 크리프 응력이 가해졌을 때, 30sec, 10sec, 300sec, 100sec 순으로 파단수명이 증가하였다. Sn-37Pb 솔더 접합부의 경우 30sec, 300sec, 100sec, 10sec순으로 파단수명이 증가하였으며, Sn-4Ag 솔더 접합부에 비

Fig. 8 Shear-Creep curves for solder joint of Sn-4Ag at 30°C for reflow time

Fig. 9 Shear-Creep curves for solder joint of Sn-4Ag at 30°C for reflow time

Fig. 10 Shear-Creep curves for solder joint of Sn-37Pb at 30°C for reflow time

해 초기 크리프영역이 잘 나타나지 않았고 정상상태 크리프 영역과 가속 크리프 영역이 주로 나타나

다. 합금 종류에 따라 크리프 변형률 곡선은 달리 나타남을 알 수 있다.

3.2.2 SP-Creep 초기 변형률 거동

Fig. 11은 두 솔더 접합부의 크리프 초기 변형률(γ_0)을 리플로우 시간에 따라 나타낸 그림이다. 일반적으로 크리프 초기 변형률은 시간 의존적인 크리프 변형과는 독립적인 변수이나 크리프 응력과 온도에는 매우 민감한 변수로 알려져 있다.⁹⁾ 본 연구에서 초기 변형률은 하중을 작용시킨 후 1분이 경과 되었을 때의 변위 값으로 정의하였다.¹⁰⁾ 두 솔더합금 모두 리플로우시간이 30sec일 때 최대 초기변형률 값을 보였으나 전반적으로 모든 리플로우 시간에서 기존솔더 보다 무연솔더인 Sn-4Ag 솔더 합금이 높은 초기변형률 값을 보여 내 크리프 특성의 우수성을 예견할 수 있다.

Fig. 11 Initial creep strain of Sn-4Ag and Sn-37Pb solder joint with reflow time

3.2.3 리플로우 시간에 따른 크리프 변형률 속도와 파단수명

Fig. 12는 두 솔더 합금의 크리프 변형곡선에서 제 2차 크리프 영역의 기울기로 정의되는 정상상태의 크리프 변형률 속도($\dot{\gamma}_{ss}$)를 리플로우 시간에 대해 살펴본 그림으로 두 솔더 접합부 모두 리플로우 시간의 증가에 따라 크리프 변형률 속도는 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 특히 두 솔더 모두 리플로우 30sec일 때 크리프 변형률 속도가 가장 높고, 100sec일 때 가장 낮은 것을 알 수 있다. 전반적으로 무연솔더 Sn-4Ag 솔더 접합부는 기존솔더인 Sn-37Pb 솔더합금 보다 리플로우 시간에 따른 크리프 변형

Fig. 12 Creep rupture time for Sn-4Ag and Sn-37Pb solder joint with reflow time

Fig. 13 Relationship between SP-Creep rate and reflow time for Sn-4Ag and Sn-37Pb solder joint

속도가 월등히 적음을 알 수 있는데 그 차이가 약 100 배 이상임을 고려할 때 기존솔더 보다 Sn-4Ag의 내 크리프 변형 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

Fig. 13은 두 솔더 접합부의 크리프 파단수명(t_r)을 나타낸 그림으로 Sn-4Ag 솔더 접합부는 리플로우 시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으나, 기존 Sn-37Pb는 큰 차이를 보이고 있지 않았다. Sn-4Ag의 솔더 접합부의 경우 100sec로 리플로우 한 경우에 파단수명이 약 37시간으로 가장 긴 수명을 보였고, Sn-37Pb 솔더 접합부에서는 10sec로 리플로우 한 경우 파단수명이 0.26시간으로 가장 긴 파단수명을 보였다. 전반적으로 앞서 설명한 크리프 변형률 속도 거동과 같이 Sn-4Ag 솔더 접합부의 크리프 파단수명이 Sn-37Pb 솔더 접합부 보다 월등히 큰 파단수명을 보여 우수한 내 크리프 특성을 확인할 수 있다.

3.2.4 응력과 SP-Creep 파단수명의 관계

Fig. 14와 Fig. 15는 10sec와 30sec에서 리플로우한 두 솔더 접합부의 크리프 파단수명의 작용응력에 대한 의존성을 나타낸 그림으로 크리프 응력이 증가할수록 파단시간이 줄어드는 것을 알 수 있다. 10sec로 리플로우 한 경우 Sn-4Ag와 Sn-37Pb 솔더 접합부의 크리프 응력지수는 각각 1.29, 5.55를 나타내었고 30sec로 리플로우 한 경우 두 솔더의 응력지수는 2.04과 4.42를 나타내었다.

Fig. 14 Power law relationship in terms of rupture time of Sn-4Ag and Sn-37Pb solder joint with reflow time 10sec

Fig. 15 Power law relationship in terms of rupture time of Sn-4Ag and Sn-37Pb solder joint with reflow time 30sec

3.2.5 L.M.P를 통한 SP-Creep 결과

Fig. 16은 리플로우 시간에 따른 Sn-4Ag 솔더 접합부와 Sn-37Pb 솔더 접합부의 L.M.P 관계를 나타

Fig. 16 Relationship between L.M.P and reflow time for Sn-4Ag and Sn-37Pb solder joint

낸 그림이다. L.M.P 거동이란 크리프 시험에서 온도와 파단시간의 종합적인 결과를 나타내는 평가인자로서 시험재료에 따른 내 크리프 특성 평가에 사용하거나 다른 온도의 시험결과를 추정할 때 또는 서로 다른 온도에서 시험된 재료간의 내 크리프 강도를 평가하는데 매우 유용한 방법이다.¹¹⁾ L.M.P 거동은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L.M.P = T(\log t_r + C) \quad (1)$$

여기서 T 는 재료의 온도(K), t_r 은 크리프 파단시간, C 는 재료의 종류에 따라 결정되는 값이다. L.M.P가 낮은 값을 보일수록 내 크리프 특성은 저하하는 것으로 알려져 있는데 두 솔더 접합부 모두 리플로우 시간이 30sec일 때 가장 낮은 L.M.P 거동을 나타내었다. 두 솔더를 비교했을 때, Sn-37Pb 솔더 접합부가 Sn-4Ag 솔더 접합부보다 약 81% 낮은 L.M.P 값을 보였다. 전반적으로 파단 수명의 결과와 같이 Sn-37Pb 솔더 접합부보다 Sn-4Ag 솔더 접합부의 내 크리프 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

3.3 솔더 접합부의 크리프 특성과 IMC 거동과의 관계

Fig. 17은 Sn-Ag 솔더 접합부의 IMC 두께와 크리프 파단수명의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 리플로우 시간이 10sec와 30sec 일 때 IMC 평균두께는 비교적 작은 약 $1\mu m$ 내외 정도로 크리프 파단시간은 다른 시험조건 보다 상대적으로 작게 나타났다. 반면 리플로우 100sec 일 때 약 $2.84\mu m$ IMC 평균

Fig. 17 Relationship between IMC thickness and rupture time at solder joint of Sn-4Ag by reflow time

두께를 보인 솔더 접합부에서는 가장 긴 크리프 파단수명을 보였다. 반면 IMC 두께가 가장 큰 $3.37\mu m$ 를 보인 리플로우 300sec에서는 100sec의 경우보다 약 68% 감소한 크리프 파단시간을 보였는데 이는 솔더 접합부내에 과도하게 성장된 IMC로 인해 접합부의 취성이 증가되었기 때문에 사료된다. 이러한 결과로부터 솔더 접합부의 크리프 거동은 접합부에 형성된 IMC 두께와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

Fig. 18은 Sn-37Pb 솔더 접합부에 대한 결과로 리플로우 시간의 증가에 따라 IMC의 두께는 증가하지만 크리프 파단수명의 거동은 Sn-4Ag의 솔더 접합부와 같이 리플로우 30sec일 때 가장 낮은 파단수명을 보이고 100sec일 때 파단수명이 증가하다가 이후 300sec에서 수명이 다시 감소하는 거동을 보였다. 이때 100sec에서 300sec의 크리프 파단수명의 감소는 약 60%를 보여 Sn-4Ag 솔더 접합부가 IMC의 성장에 따른 크리프 강도 저하가 기존 솔더 합금보다 더 큼을 알 수 있다. 또 리플로우 100sec의 경우에 두 솔더 접합부의 크리프 파단수명이 모두 증가함을 고려할 때 100sec에서의 각 솔더 접합부의 IMC 두께는 내 크리프 특성을 증가시키는데 적절한 IMC 두께임을 알 수 있다. 이상과 같은 크리프 파단수명의 결과로부터 Sn-37Pb 솔더 접합부보다 Sn-4Ag 솔더 접합부의 내 크리프 특성이 매우 우수함을 알 수 있는데, 이러한 가장 큰 이유는 두 솔더 합금의 IMC

Fig. 18 Relationship between IMC thickness and rupture time at solder joint of Sn-37Pb by reflow time

거동의 차이 때문이다. 즉, 두 솔더 접합부에는 모두 Cu6Sn5의 IMC가 형성되었지만 Sn-4Ag 솔더 접합부는 기존 솔더합금 보다 성장된 Cu6Sn5와 함께 계면에 존재하는 분산 강화된 Ag3Sn의 조대화로 인해 솔더 접합부의 내 크리프 특성이 크게 증가된 것으로 판단된다.¹²⁾ 그러나 100sec 이후 보다 성장된 IMC는 솔더 접합부의 취성의 성질을 증가시켜 내 크리프 특성을 저하시키기 때문에 전기전자 패키지 생산 과정에서 과도한 리플로우 공정은 솔더 접합부의 장기 신뢰성 측면에서 주의가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자 부품의 환경 친화적 Pb-free 솔더인 Sn-4Ag 합금과 기존 솔더인 Sn-37Pb 합금을 대상으로 미소시험편을 이용한 전단편치-크리프 시험(SP-Creep test)을 수행하였으며 얻어진 시험결과를 다음과 같다.

- 1) 두 솔더 접합부 모두 리플로우 시간이 증가할수록 IMC 두께가 증가하는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 리플로우 100sec 이후에는 Sn-4Ag 솔더 접합부의 IMC 두께가 Sn-37Pb 솔더 보다 매우 두꺼웠다.
- 2) 크리프 변형률 속도의 경우 두 솔더 합금 모두 리플로우 30sec일 때 가장 높았고, 100sec일 때 가장 낮았다. 크리프 파단수명의 경우 Sn-4Ag 솔더

접합부는 리플로우 시간이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나, 기존 Sn-37Pb는 큰 차이를 보이지 않았다. 전반적으로 Sn-4Ag 솔더 합금은 기존 솔더인 Sn-37Pb 합금 보다 리플로우 시간별 내 크리프 변형률 속도 및 크리프 파단수명이 약 100배 정도 높아 Sn-4Ag의 우수한 내 크리프 특성을 확인할 수 있었다.

- 3) 두 솔더 합금 모두 리플로우 100sec의 경우에 접합부의 크리프 파단수명이 가장 높아 각 솔더 합금에서 100sec의 IMC두께는 내 크리프 특성을 증가시키는데 적절한 IMC 두께로 사료된다. 그러나 100sec 이후 크게 성장된 IMC는 접합부의 내 크리프 특성을 저하시키기 때문에 신뢰성 측면에서 주의가 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 이상과 같은 시험결과로부터 Sn-4Ag 솔더 접합부의 내 크리프 특성이 매우 우수함을 알 수 있으며, 이러한 가장 큰 이유는 두 솔더 접합부에는 모두 Cu6Sn5의 IMC가 형성되었지만 Sn-4Ag 솔더 접합부는 기존 솔더 합금 보다 성장된 Cu6Sn5와 함께 계면에 존재하는 분산 강화된 Ag3Sn의 조대화로 인해 솔더 접합부의 내 크리프 특성을 크게 증가하는 것으로 판단한다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 0023724).

References

- 1) M. I. Kim, K. S. Shin and J. P. Jung, "Research Trends of Sn-Ag Based Pb-Free Solders," The Journal of KWJS, Vol.19, No.1, pp.15-20, 2001.
- 2) W. J. Heo, S. S. Baek, Y. H. Jung, I. H. Kwon, S. M. Yang and H. S. Yu, "A Study on Mechanical Properties for Pb-free Solders of Electronic Packages," The Journal of KWJS, Vol.2, pp.83-85, 2003.
- 3) H.-Y. Hsiao, C.-C. Hu, M.-Y. Guo, C. Chen and K. N. Tu, "Inhibiting the Consumption of Cu during Multiple Reflows of Pb-free Solder

- on Cu,” *Scripta Materialia*, Vol.65, Issue101, pp.907-910, 2011.
- 4) Q. K. Zhang and Z. F. Zhang, “In Situ Observations on Creep Fatigue Fracture behavior of Sn-4Ag/Cu Solder Joints,” *ACTA Materialia*, Vol.59, Issue.15, pp.6017-6028, 2011.
- 5) C. W. Han, C. M. Oh, N. C. Park and W. S. Hong, “Creep Lifetime Prediction of Solder Joint for Heat Sink Assembly,” *Microelectronics Reliability*, Vol.50, Issues.9-11, pp.1645-1649, 2010.
- 6) H. Yu, “Miniaturized Shear-Punch Tester and Evaluating Method of Shear Strength and Shear Strain for Solder Joint,” KR Patent: 10-2003-0010858, 2003.
- 7) C. Y. Kang, “Research Trend in Development of Pb Free Solder,” *The Journal of KWJS*, Vol.13, Issue 4, pp.1-6, 1995.
- 8) Y. Kanda and Y. Kariya, “Evaluation of Creep Properties for Sn-Ag-Cu Micro Solder Joint by Multi-temperature Stress Relaxation Test,” *Microelectronics Reliability*, In Press, Corrected Proof, 2012.
- 9) J. H. Yoon and K. C. Hwang, “Creep Behaviour of Al-Zn-Mg Ternary Aluminum Alloy,” *Transactions of KSAE*, Vol.12, No.1, pp.203-208, 2004.
- 10) S. S. Baek, A Study on the Creep Characterization and Life Assessment for Weldments of Heat Resistance Material in Power Plant Using Micro Test Method, Ph. D. Dissertation, Chonbuk National University, Korea, 2006.
- 11) S. I. Lee, I. H. Kwon, Y. J. Kim, S. S. Baek, B. G. Ahn, H. K. Ahn and H. S. Yu, “A Study on Small Punch-Creep Test Using Finite Element Analysis II,” *Transactions of the KSME A*, Vol.A, pp.111-116, 2001.
- 12) W. S. Hong, W. S. Kim, B. S. Song and K. B. Kim, “Thermal Shock Cycles Optimization of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/OSP Solder Joint with Bonding Strength Variation for Electronic Components,” *The Journal of Materials Research Society of Korea*, Vol.17, Issue 3, pp.152-159, 2007.