

마이크로 압입 크리프 시험기 개발 및 성능평가

양경탁[†] · 김현준* · 김호경**[‡]

서울산업대학교 자동차공학과 산업대학원, *서울산업대학교 나노아이티 대학원, **서울산업대학교 자동차공학과

Development and its Performance Evaluation of a Micro-Impression Creep Machine

Kyoung-Tak Yang[†], Hyun-Jun Kim, and Ho-Kyung Kim[‡]

Graduate School of Industry and Engineering, Seoul National University of Technology

*Graduate School of NIT, Seoul National University of Technology

**Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology
172 Kongneung-dong Nowon-ku, Seoul, Korea

Abstract – A micro-implosion creep machine was designed and developed, adopting a small punch in diameter of 150 μm , displacement gage with an accuracy of sub- μm scale, and load-cell with an accuracy of mN scale in order to investigate creep behavior of small solder ball in diameter of less than 1 mm. Creep behavior of lead-free solder ball(Sn-3.0Ag-0.5Cu) in diameter of 760 μm was investigated in the stress range of 8~60 MPa and at 303 K~393 K. The applied load became decreased slightly and continuously in the creep rate of $10^{-4}/\text{s}$ range during the current experiments. Also, the machine frame was so sensitive to the environmental temperature that nm scaled displacement recording was unstable according to the change in environmental temperature.

Key words – micro-implosion creep machine, lead-free Sn-3.0Ag-0.5Cu alloy, solder ball, dislocation glide mechanism

1. 서 론

최근 전자산업 분야에서 전장부품이 소형화, 고집적화 되어감에 따라 플립 칩과 기판을 연결하는 방법으로 솔더 범핑(solder bumping) 기술이 많이 사용되고 있다. Fig. 1과 같은 칩과 솔더 볼(solder ball) 연결부는 사용온도가 솔더의 용점 대비 고온(상온의 경우 $T = 0.67 T_m$)에서 사용하므로 전장품의 신뢰성 확보 측면에서 솔더 연결부의 크리프 특성 평가는 대단히 중요하다.

기존 Sn-Pb계 대비 우수한 작업 특성을 가지고 있는 무연 솔더인 Sn-Ag-Cu 솔더는 양산후보로 가장 유력한 무연 솔더 합금이다. 지금까지 Sn-Ag-Cu 솔더의 덩어리(bulk)재의 열처리 조건, 첨가 합금 특히 희토류의 차

이에 의한 변화 등에 의한 크리프 거동에 대해서는 많은 연구[1-3]가 진행되어 왔다. 그러나 Sn-Ag-Cu 솔더의 덩어리재는 실제 기판에 솔더링시의 조건에 의한 냉각속도 차이 및 기판의 종류에 따라 미세조직이 변화함으로써 기판상의 솔더의 크리프 거동에 있어서 차이가 발생한다. 따라서 실제 솔더부의 크리프 거동은 솔더 연결부의 신뢰성 차원에서 저주기 피로강도와 더불어 설계시 중요한 정보이다. 실제 기판에 부착된 직경 1 mm 이하의 솔더 볼의 크리프 거동을 측정하기 위해서는 기존의 크리프 시험기로는 측정이 불가능하다.

최근 일부 연구자에 의하여 시도중인 압입 크리프 시험[4-8]은 국부적인 위치에 대하여 크리프 특성을 파악할 수 있어 이를 적용시 전자부품의 솔더 연결부와 같은 초소형의 제품에 대한 크리프 특성 파악이 가능하다. 그러나 기존의 대부분의 압입 크리프 실험 연구의 경우 직경이 1 mm 정도의 소형 펀치를 사용하여 통상

[†]주저자 : mongtag99@naver.com

[‡]책임저자 : kimhk@snut.ac.kr

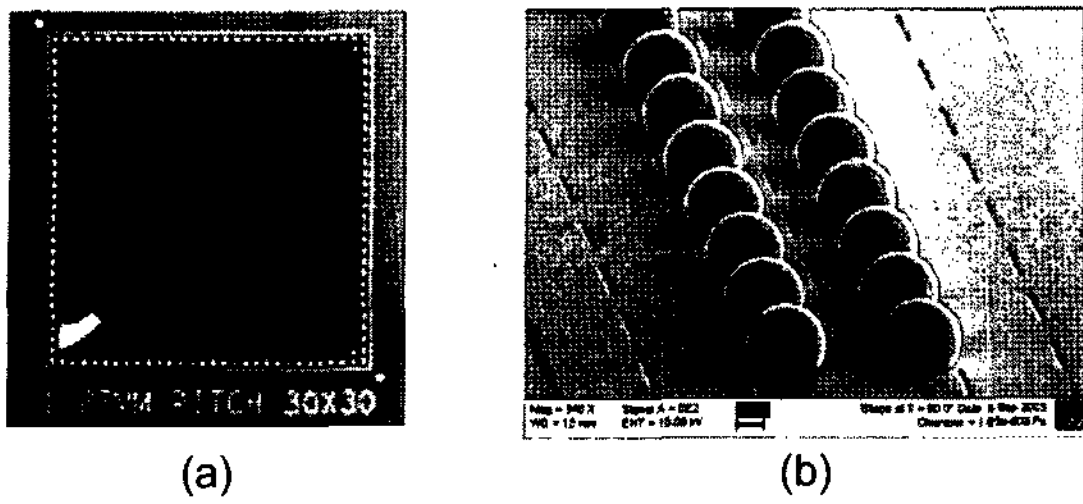


Fig. 1. (a)Microchip assembled with solder balls. (b) Solder balls mounted on a Si chip surface for bonding the microchip.

적으로 덩어리 재료에 대한 압입 크리프 시험[6-8]을 실시한 것이 일반적이다. 예를 들어 F. Yang 등의 여러 압입 크리프 연구[6]의 경우 주로 기존의 소형 유량측 정장치를 개조하여 직경 0.61 mm의 압입자를 적용하였으 며 시험기에 원래 장착된 해상도 0.5 μm의 LVDT 변위계를 적용한 시험기를 사용하여 덩어리 재료에 대 하여 압입 크리프 시험을 수행하였다. R. Mahdudi 등 의 연구[7]의 경우 서보유압시스템으로 작동하는 MTS 만능시험기를 개조하여 직경 1.5~2 mm의 압입자를 이 용하여 연구하였다. 서브밀리미터급의 압입자를 적용 한 유일한 연구인 R. Dutta 등의 연구[8]의 경우 직경 100 μm의 텅스텐 카바이드 압입자를 적용하여 직경 760 μm의 솔더 볼의 크리프를 연구하였다. 그러나 이 연구의 경우 서보유압시스템으로 작동하는 MTS 810 모델을 적용하여 이 프레임에 압입자를 설치하여 PID 제어를 통하여 일정하중으로 실험을 수행하였다. 이와 같은 장치를 사용할 경우 하나의 낮은 크리프 속도 실험을 위해서는 최소 2주일 이상이 소요되며 초소형의 압입자를 이용한 크리프 실험을 위하여 장시간 지속적 으로 유압펌프를 작동시키며 크리프 시험을 수행해야 한다. 특히 최소한 수십 개의 데이터를 확보해야 하는 크리프 실험 특성상 유압펌프를 장시간 사용에 따른 경제성을 포함한 여러 번거로움이 예상된다. 또한 기 존의 일부 나노 압입장치에 선택사항으로 초소형 압입 차를 적용하여 크리프 시험 기능이 있으나 이 경우 낮 은 크리프 속도 실험은 거의 불가능한 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 1 mm 이하 직경의 Sn-Ag-Cu 솔더 볼 상태에서의 크리프 특성 파악을 위하여 장시간 안정적인 마이크로 압입 전용 크리프 시험기를 개발하고자 한다. 이를 위하여 직경 150 μm의 압입자 를 사용하여 지렛대 원리를 이용한 하중방식으로 기존 의 장치보다 해상도가 뛰어난 변위계 및 하중계를 적 용하고자 한다. 최종적으로 개발된 시험기를 이용하여

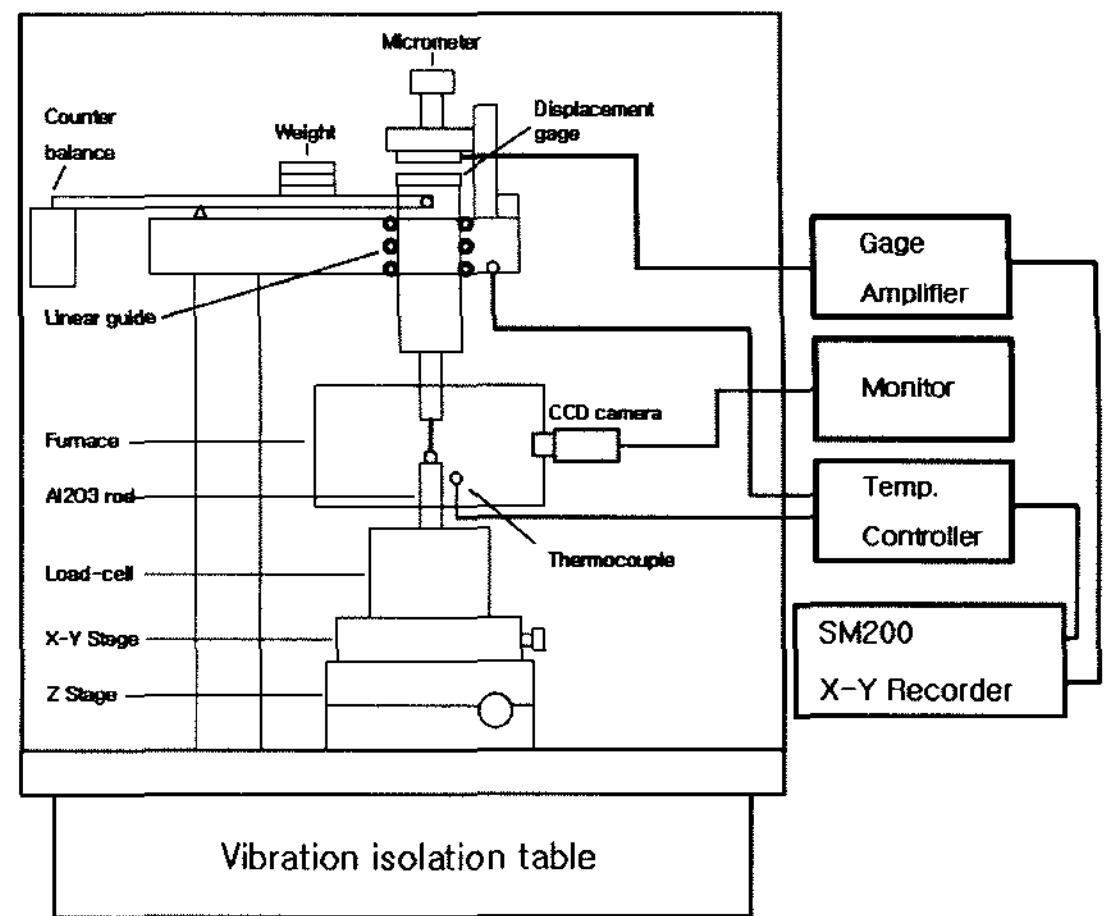


Fig. 2. Schematics of the miniature impression creep testing machine system.

솔더 볼에 대한 압입시험을 실시하여 각 온도에 대한 크리프 거동을 평가하여 솔더 연결부의 수명예측 차원 뿐만 아니라 전장품 전체의 신뢰성 확보차원에서 중요 한 정보를 제공하고자 한다.

2. 시스템 설계 및 제작

2-1. 시스템 구성

기존의 나노 인덴터에 부착된 전기로를 이용한 크리 프 측정 기능의 경우 변형률 속도가 빠른 시험의 경우 가능하나 $10^{-8}/s \sim 10^{-5}/s$ 정도의 느린 구간에서는 수일 내 지는 수주일 정도의 연속적인 사용에 어려움이 있다. 본 시스템은 추를 사용한 안정된 시스템으로 느린 구 간에서의 장기간의 시험이 가능한 크리프 전용 시험기 로써의 장점이 있다. 본 초소형 크리프 시험기는 압입 편치를 이용하여 솔더 볼과 같은 초소형 시험편의 크 리프 거동을 측정하도록 설계하였다. 이를 위하여 Fig. 2와 같이 시험편의 온도를 조절하는 소형 전기로 시스 템, 크리프 하중 및 변형량을 측정하는 하중 및 변위 측정시스템, 시험편에 하중을 전달하는 하중전달 시스 템(load train system), 전기로, 측정시스템, 하중전달 시스템을 고정 및 지지하는 프레임으로 구성하였다. 또 한 시험편이 초소형인 관계로 이를 직경 150 μm의 압 입자로 누르기 위해서는 시편의 위치를 조정하는 X-Y-Z 스테이지 및 이를 모니터링하기 위한 배울 150배 의 CCD 카메라를 설치하였다. 시간에 대한 변위계 및 열전대로부터의 신호는 스트립 차트 리코더를 이용하

여 기록하였다.

2-2. 각종 부품의 제작 및 조립

시험기의 기본 프레임은 SM45C를 사용하여 제작하였으며 시험편에 하중을 가하는 방식은 추를 이용한 지렛대 방식을 사용하였다. 레버비가 없이 단순히 추를 시험편에 가하는 방식으로는 높은 압입 응력을 작용하기 위하여 수 kg에 해당하는 추를 가해야 하는 번거로움이 있어 이를 위하여 레버를 이용하여 작은 하중으로 시험이 가능한 지렛대 방식을 채택하였다. 시험편의 하중 전달은 추를 통하여 지렛대를 거쳐 지렛대 끝단에 연결된 직경 10 mm, 길이 40 mm의 산화알루미늄(Al_2O_3) 봉을 적용하였으며 이봉에 연결된 압입 펀치로 시험편을 누르도록 설계하였다. 압입 펀치는 고정하는 부분(shank)의 직경은 1.5 mm이며 직경이 150 μm 의 초경 펀치(WC+Co12%)를 사용했다.

시험편의 변위를 측정하기 위하여 정전용량 변위계를 사용하였다. 변위 측정구간이 50 μm 이기 때문에 펀치가 그 이상으로 압입시에는 z축 마이크로미터를 이용하여 변위계의 측정범위를 조정하여 약 $\pm 3.2 mm$ 구간에서 측정할 수 있다. 이때 정전용량 변위계의 압수 센서간의 간격이 평행을 유지하기 위하여 마이크로미터가 장착된 Z축 스테이지를 조정하여 두 센서간의 거리를 유지하였다.

미소한 시험편을 직경 150 μm 의 펀치로 압입하려면 시험편의 좌우상하 위치를 정확히 조정하는 장치가 필요하다. 이를 위하여 조정이 가능한 X-Y-Z 스테이지가

필요하다. Fig. 3과 같이 로드셀 아래 미스미사의 최소 눈금 10 μm 인 X-Y 마이크로 스테이지가 장착되어 시험편의 좌우 위치를 조정하고, 자체 제작한 Z축 스테이지를 통해 시험편 크기에 따라 높이를 조정 할 수 있게 제작하였다.

시험편 온도를 조절하기 위한 전기로는 세라믹 점토로 단열된 직경 90 mm 개폐식으로 독립된 두 개의 밴드히터가 직렬로 연결되어 400°C까지 가열하도록 제작하였으며 온도 컨트롤러는 사용온도의 $\pm 0.1^\circ C$ 를 유지하도록 제작하였다. 또한 프레임의 경우 실험결과 주변 온도의 차이에 따라 40°C 이상에서 0.25 $\mu m/^\circ C$ 의 열변형 효과가 발생하여 실제 본 실험과 같은 미세 크리프 실험의 낮은 변형률 구간에서 막대한 오차를 일으킨다. 따라서 이를 방지하기 위하여 프레임 온도를 일정 온도로 유지하기 위한 외부 챔버를 설계 제작하였다. 아크릴 상자에 세라믹 시트를 접착하여 단열시켜 챔버안의 온도를 균일하게 유지하도록 하였다. 시험기는 고정밀 3점지지형 자동 수준 조절 밸브를 사용하여 편심하중이 작용하여도 신속한 자동수평조절이 가능하며 격막 공기 스프링을 내장한 제진대위에 고정하였다.

2-3. 각종 센서의 교정

본 시스템의 크리프 변형률을 측정하기 위하여 사용범위 50 μm , 해상도 0.01 nm, 선형성 0.003%을 갖는 PI사의 정전용량 변위계 D-050을 사용하였다. 두 센서간의 간극유지 및 정렬을 위하여 배율 150배의 CCD

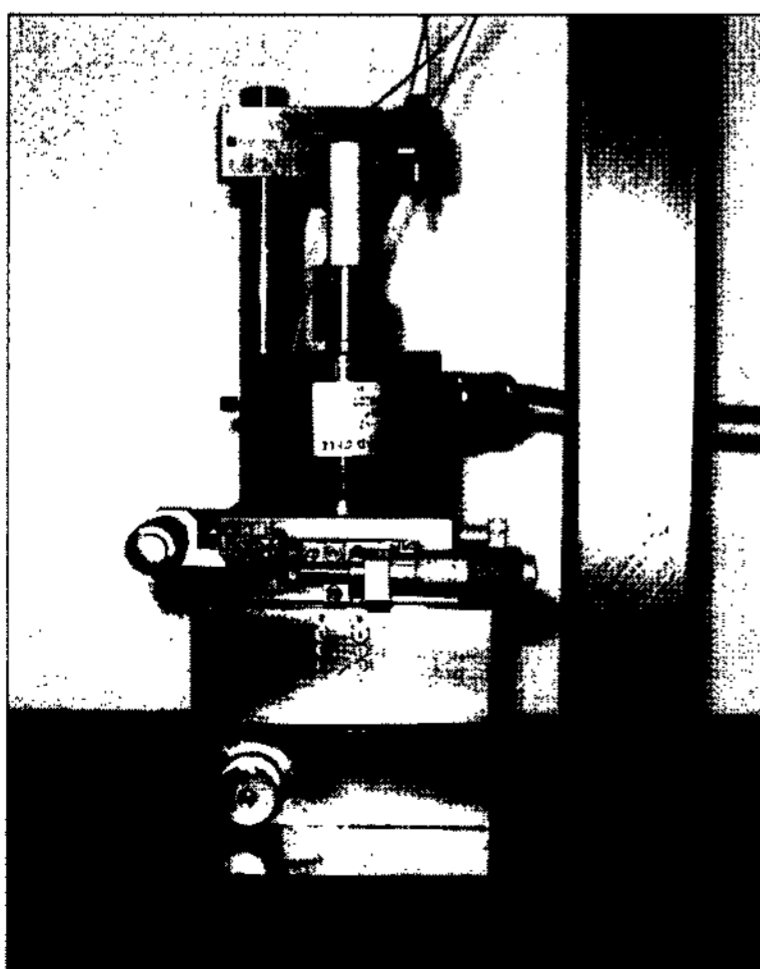


Fig. 3. Assembled X-Y-Z stage for adjusting the position of the punch on a specimen.

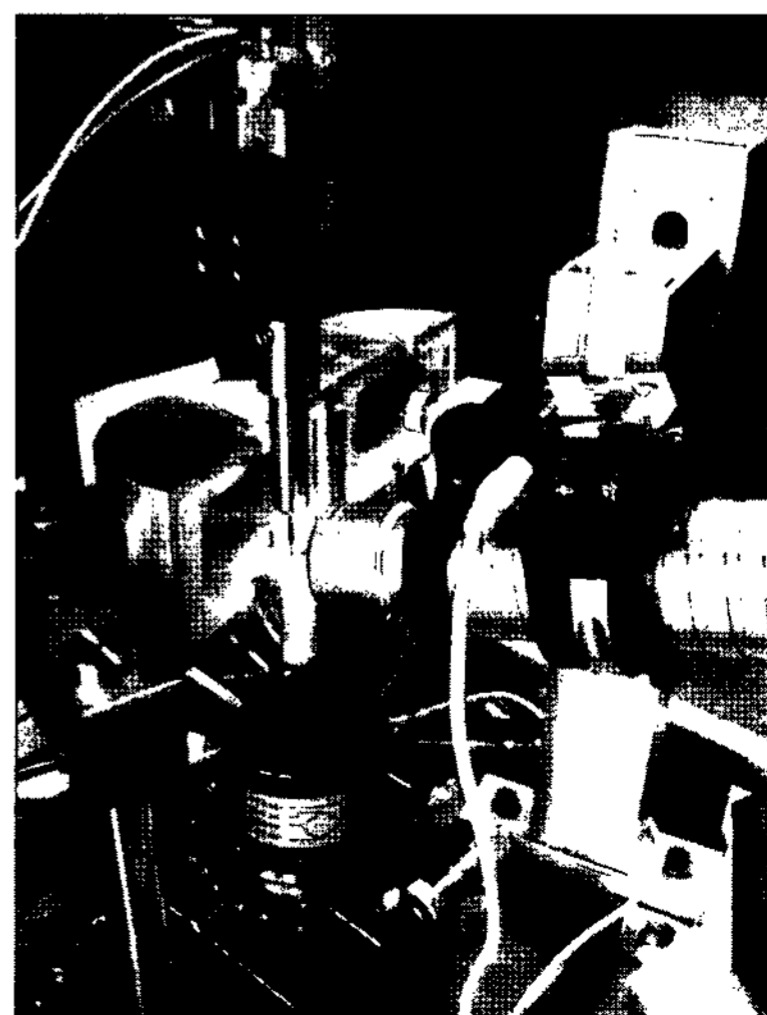


Fig. 4. Assembled the impression creep machine.

Table 1. Chemical compositions of solder ball (wt.%)

Element	Ag	Cu	Ge	Bi	Fe	Pb	Sb	Ni	Sn
wt.%	2.9900	0.5260	0.0100	0.0009	0.0019	0.0241	0.0207	0.0032	Rem

카메라를 이용하여 정확히 고정하였다. 프레임에 장착된 변위계의 적절한 작동여부를 확인하기 위하여 z축 마이크로미터를 이동시키며 총 1020 um 구간에서 변위계를 검증하였다. 한편 시험편에 작용하는 펀치의 압축하중을 모니터링 하기 위하여 높이 45 mm, 직경 52 mm, 최대용량 2 kg의 소형 압축 원통형 로드 셀을 사용하였다. 미소 시험편의 정확한 압입 위치를 조정하기 위하여 배율 150배의 CCD 카메라를 사용하였으며 이를 이용하여 최종적으로 조립된 시험기의 시험편의 위치를 조정하는 장면은 Fig. 4와 같다.

2-4. 시험편 준비

크리프 시험에 사용한 시험편은 직경 760 μm의 솔더 볼을 사용하였으며 화학성분은 Table 1과 같다. 한편 구형의 솔더 볼 시험편에 대한 크리프 시험을 위하여 시험편을 마이크로미터가 장착된 지그를 사용하여 2 um급 마이크로미터로 압축시켜 두께 약 500 um의

팬 케익 형태로 가공하였고 압축 후 솔더 볼의 직경은 평균 약 800 um로 측정되었다. 150배 CCD 카메라를 이용하여 시험편의 압입위치를 조정하는 모습은 Fig. 5와 같다. 솔더 볼 단면의 미세조직을 관찰하기 위해 0.05 um 크기의 산화알루미늄으로 연마 후 부식액 H₂O+4%NHO₃+2%NF을 사용하여 5초간 에칭하여 1000배로 관찰한 그림은 Fig. 6과 같다. 사진을 통하여 솔더 볼 조직이 통상적인 주조 조직인 수지상정 조직을 형성하고 있음을 알 수 있다. 1차 수지상정 사이의 간격은 약 6 um정도로 판단된다. 크리프 시험은 온도 30°C(=0.6 T_m, T_m=217°C), 75°C(=0.7 T_m), 120°C(=0.8 T_m)에서, 압입 응력은 7~60 MPa의 범위에서 실시하였다.

3. 개발된 마이크로 압입 크리프 시험기 평가

3-1. 시험기 검증 예비실험

압입 크리프 시험에서는 압입속도 ν 를 통하여 크리프 변형률 속도와 응력의 관계를 환산하는 방법은 다음과 같은 식(1)을 사용한다[4].

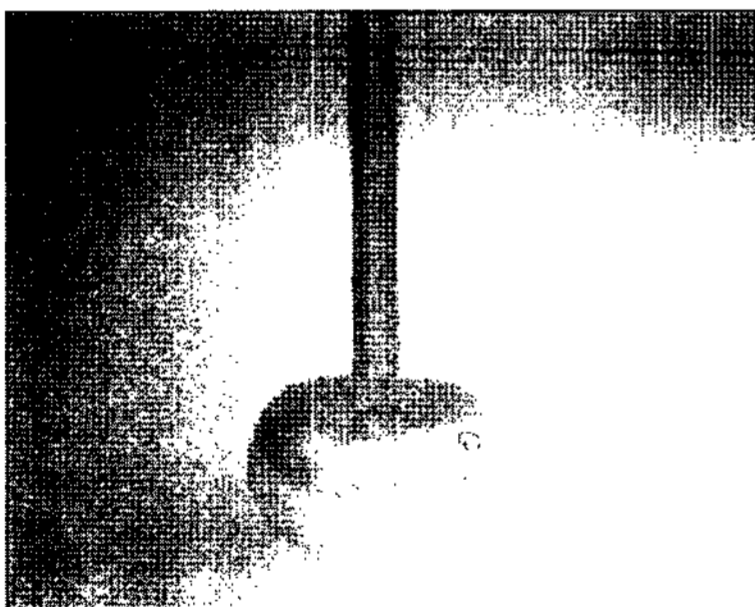


Fig. 5. A pan cake shaped solder ball with a diameter of about 800 μm after up-setting and a punch with diameter of 150 μm.

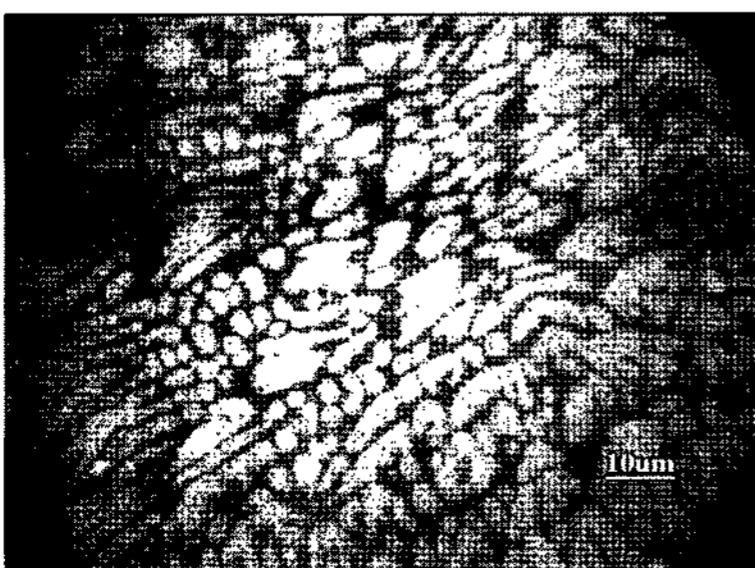


Fig. 6. Optical micrographs of the test sample.

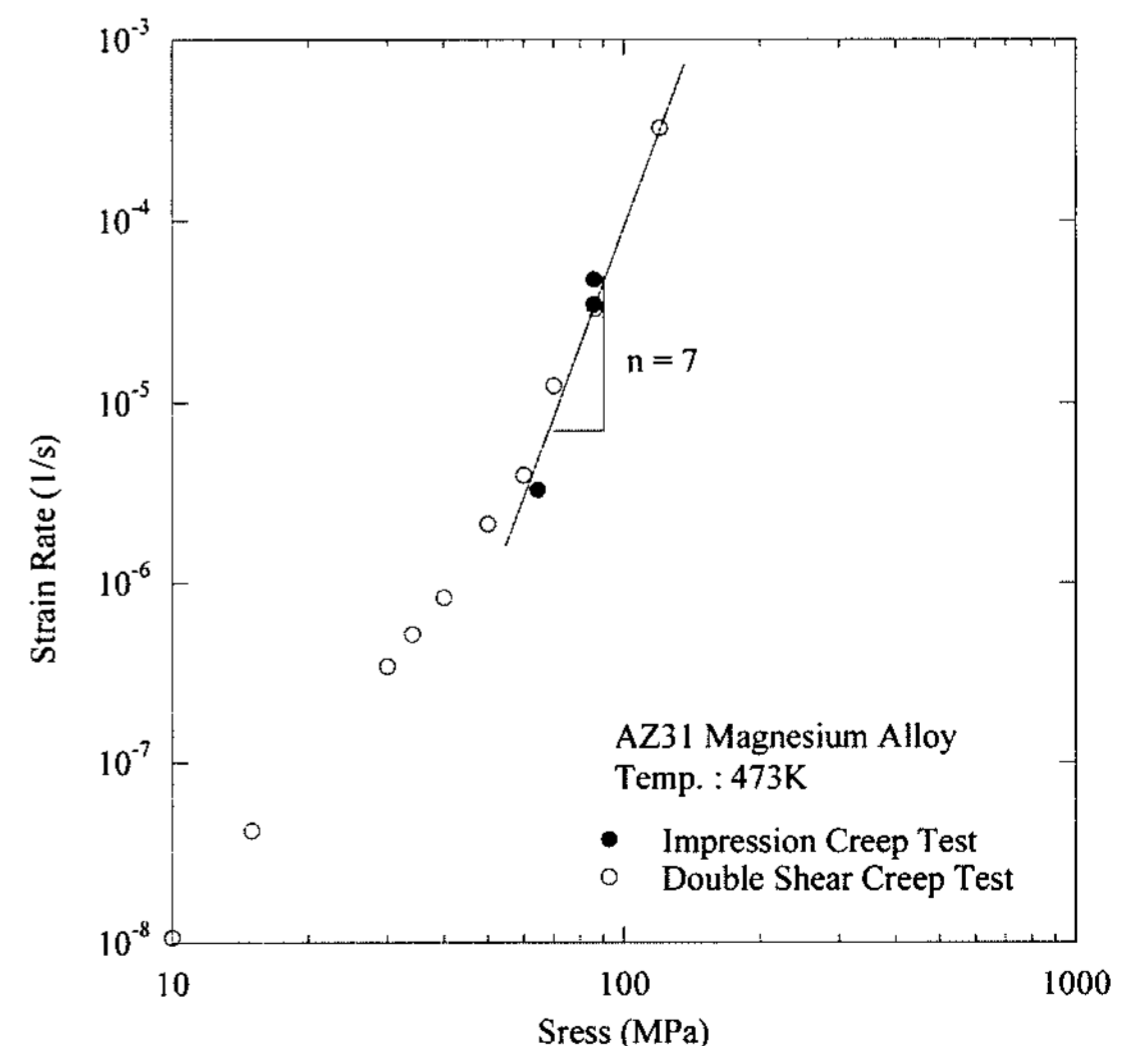


Fig. 7. Comparison between data from impression creep tests and those from double shear creep tests[6].

$$\dot{\epsilon} \left(= \frac{v}{d} \right) \propto \left(\frac{\sigma}{m} \right)^n \quad (1)$$

여기서 v 는 단위시간당 압입속도, d 는 압입자 직경, m 의 경우 압축응력(=P/A)을 인장 크리프 응력으로 환산시 나누는 인자로 재료에 따라 3~4[4, 5]이며, n 은 크리프 응력지수이다.

크리프 시험에 앞서 시스템의 검증을 위해 예비 실험을 통해 시험기의 성능을 평가 하였다. 평가 방법으로는 온도 473 K, 응력범위 15~120 MPa에서 AZ31 마그네슘 합금의 이중전단 크리프(double shear creep) 시험으로 기존에 수행한 크리프 실험 데이터[9]와 개발된 시험기의 예비실험 데이터를 이용하여 정상상태에서의 변형률과 크리프 응력을 Fig. 7에서 비교하였다. 이중전단 크리프시험에서 AZ31 마그네슘 합금의 경우 낮은 응력에서 응력지수 n 은 3.5로 나타나고 높은 응력에선 n 은 6으로 나타난다. 압입 압력을 크리프 응력으로 환산하는 환산계수가 통상적으로 3.5를 적용하고 있으나 본 연구에서는 환산계수를 4.9를 적용할 경우 일치하였다. 개발된 마이크로 압입 크리프 시험기에서는 높은 응력에서 응력지수 n 이 7로 나타내며 비교적 유사한 값을 가지므로 본 시험기를 이용한 초소형 솔더 볼 크리프 실험이 유효성이 있는 것으로 판단된다. 다만 환산계수를 3.5대신 4.9로 환산하여 적용한 것에 대한 정확한 이유를 파악하는 것이 추후 검토가 필요하나 일반적으로 인장과 전단 그리고 압축의 경우 응력지수와 활성화 에너지와 같은 크리프 거동은 동일하나 크리프 식 $\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$ 에서 K_1 은 동일하지 않을 수 있다고 판단된다.

3-2. 크리프 변형률 측정

압입시험에서 압축응력(=P/A)을 인장 크리프 응력으로 환산시 적용하는 환산인자 m 의 값은 3.5를 적용하여 압입 크리프 실험식을 결정하였다. 온도 303 K에서 크리프 응력 60 MPa에서의 시간에 따른 압입 변위 및 변형률은 각각 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)와 같다. Fig. 8(a)를 통하여 압입하중이 작용한 후 약 300초간이 경과한 후 정상상태 크리프 변형 거동을 나타내고 있다. 이와 같은 구간은 통상적인 인장 크리프 거동에서의 1차 크리프 주기와 약간 차이가 있다. 인장의 경우 비교적 오랜 1차 크리프 주기가 발생하는 반면에 비교적 짧은 주기가 발생하고 있다. Fig. 8(a)에서 2차 크리프 주기의 경우 인장에 비하여 비교적 뚜렷한 2차 크리프

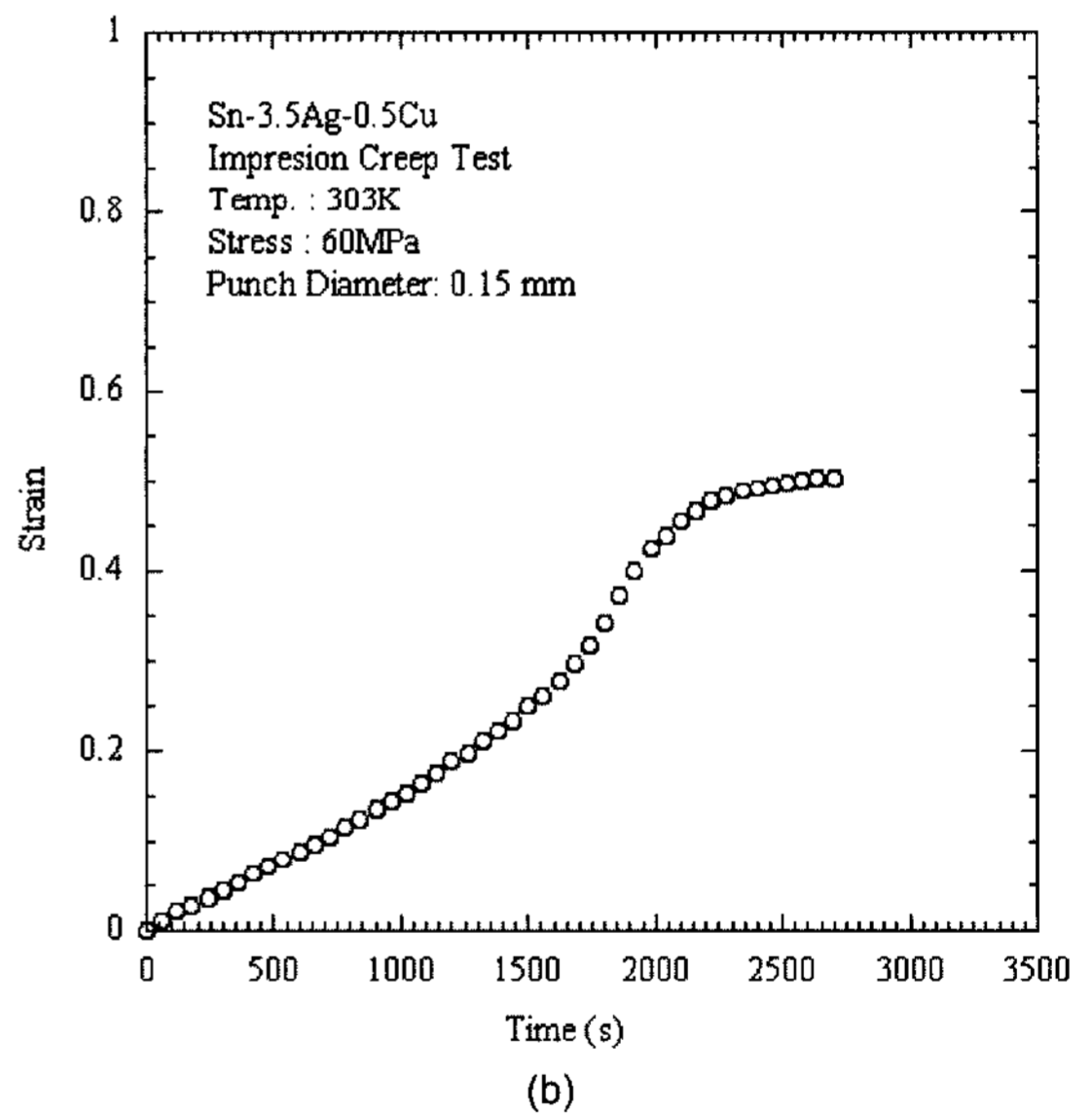
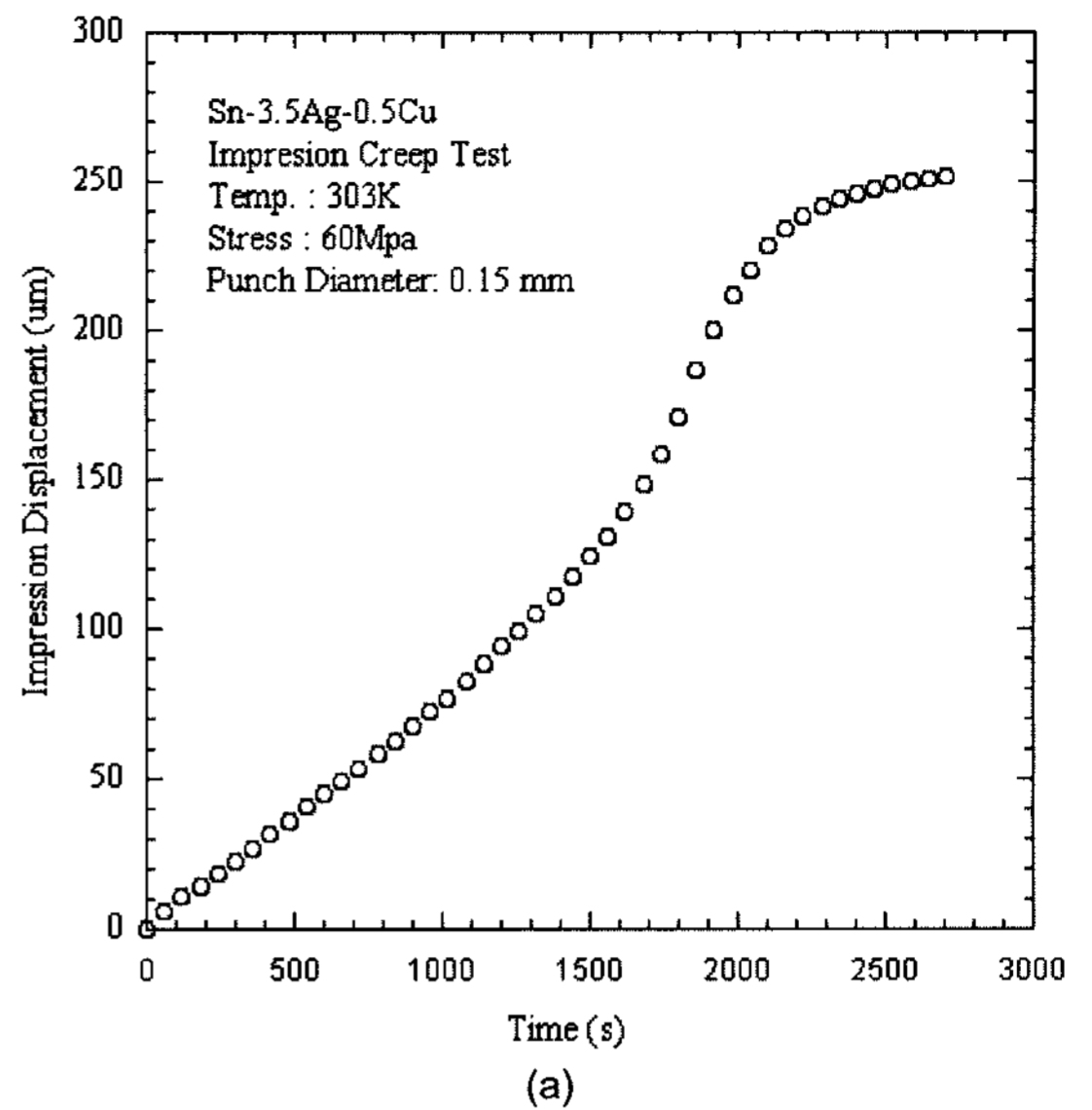


Fig. 8. Impression displacement (a) and strain (b) curves under 60 MPa at 303 K.

주기가 나타났으며 팬 케익 타입의 솔더볼의 2차 크리프 주기는 압입 깊이가 약 150 um에 해당된다. 이와 같은 깊이를 압입 변형률로 환산할 경우 Fig. 8(b)와 같이 압입 변형률이 20%로 이 변형률 값 이후부터는 3차 크리프 주기가 나타나며 30% 이후에는 급격히 변형률 속도가 증가하다 50% 정도에서는 그 속도가 갑자기 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 팬 케익 타입의 솔더볼의 두께가 얇아지면서 크리프 변형이 작

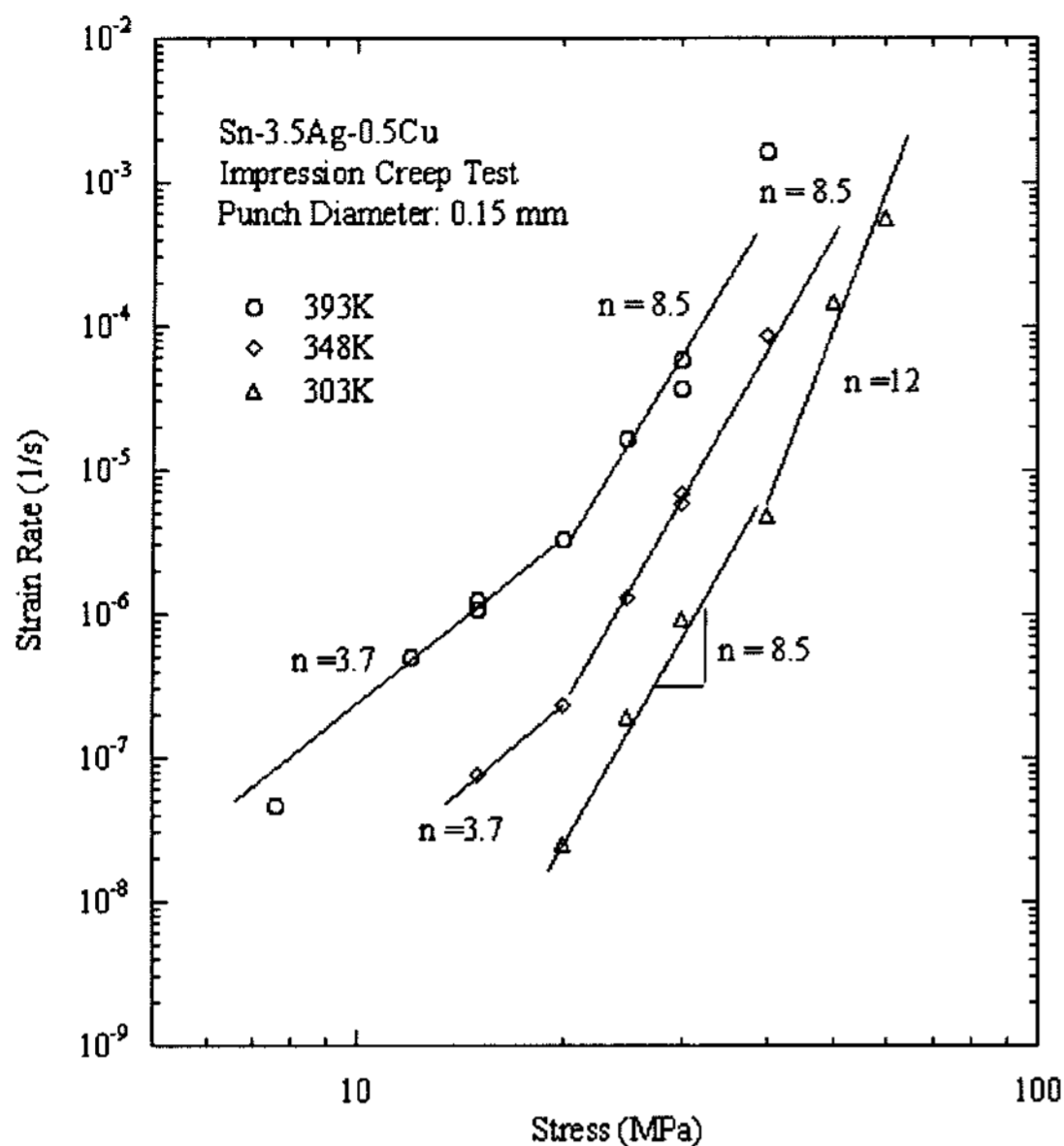


Fig. 9. Impression creep rate as a function of stress at various temperatures.

용하는 시험편의 재료 부피가 급격히 감소하면서 발생한다고 판단된다. 10 μm 이내의 거칠기를 가진 압입 펀치와 세라믹 앤빌의 면을 고려할 경우 압입 펀치의 일부가 거의 세라믹 압입 앤빌 바닥과 접할 수 있는 상황으로 변형률이 감소하는 것으로 판단된다. 솔더볼 시험편의 두께가 약 500 μm 임을 고려한다면 실제 실험 할 수 있는 시험편의 변위 구간은 0~250 μm 로 두께의 반 이하인 것으로 사료된다.

3-3. 각 온도에 대한 정상상태 크리프 변형률 측정

솔더 볼에 대하여 온도 303 K~393 K, 응력범위 8~60 MPa에서 크리프 실험한 결과에 대한 크리프 응력과 변형률 속도의 관계는 Fig. 9와 같다. 3개의 온도 중간 응력 구간에서의 크리프 응력지수 $n=8.5$ 로 나타났다. 통상적으로 응력지수 n 이 4.5 근처일 경우와 3.5일 경우 변형 메커니즘이 각각 전위의 활주(dislocation glide)나 전위의 상승(dislocation climb)으로 예측한다[10]. 그러나 응력지수 8.5는 변형 메커니즘이 전위의 활주나 상승이 아닌 다른 메커니즘으로 높은 응력에서 주로 발생하는 power-law break-down 현상인 것으로 추정된다. 그러나 303 K 온도구간에서 응력이 증가하면서 응력지수 $n=12$ 로 증가하였다. 이는 응력이 증가하면서 다른 크리프 메커니즘이 발생한 것으로 판단된다. 348 K구간의 경우 응력이 낮아지면

서 20 MPa 근처에서부터 응력지수가 3.7로 나타났다. 이와 같은 응력지수 값은 크리프 변형을 주도하는 메커니즘이 전위 활주를 암시한다. 이와 같은 메커니즘은 온도 393 K구간에서도 낮은 응력 구간인 20 MPa 이하에서도 동일하다. 한편 393 K구간에서는 응력이 30 MPa 이상에서는 응력지수가 중간 구간의 8.5에서 더 큰 값으로 증가함을 나타낸다.

3-4. 개발 결과 고찰

기존의 시험기로는 초소형 솔더볼과 같은 미세부품에 대한 크리프 시험이 불가능하여 마이크로 스케일의 부품의 크리프 거동을 측정하기 위한 마이크로 압입 크리프 시험 장치를 설계하여 제작하였다. 추가 직경 150 μm 의 소형의 압입 펀치를 사용하여 직경 760 μm 의 초소형 시험편에 대하여 장시간 시험이 가능하여 결과적으로 낮은 크리프 변형률 속도 구간에서의 데이터 획득이 가능하였다. 그러나 실험의 결과로 프레임의 온도 변화에 대하여 변위계의 반응이 매우 민감하였다. 예로 40°C에서 0.25 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 의 열변형 효과가 발생하여 이를 보완하기 위한 프레임의 온도 고정용 외부 전기로가 필요하였다. 혹은 프레임의 온도변화에 무관하게 시험편만의 변형률을 측정이 가능한 변위 연신계(extensometer)의 설계가 요구된다. 또한 시험편에 하중을 가하는 방식의 경우 시험편 상단의 하중 전달 시스템의 무게를 상쇄시키기 위하여 counter balance를 적용하였으며 지렛대 원리를 이용하여 추에 의한 일정한 하중을 가하는 방식을 채택하였다.

하중 전달 시스템의 정확한 직진성, 낮은 마찰저항, 높은 강성을 유지하기 위하여 소형 볼들이 배열된 선형모터(linear motor) 가이드를 사용하여 연결하였다. 변형률 속도가 낮은 구간에서는 속도가 낮은 관계로 시험편에 작용하는 하중이 시간에 대하여 대단히 안정적으로 일정한 경향을 나타냄을 로드 셀의 하중 지시기를 통하여 알 수 있었다. 그러나 $10^{-4}/\text{s}$ 정도의 변형률 속도가 빠른 구간에서는 선형모터 가이드를 따라 하중 전달 연결봉이 하강하면서 시간에 따라 마찰계수가 달라져 추의 중량을 약간 보충해주어야 하는 문제가 발생하여 이에 대한 새로운 기구의 설계가 필요하다고 판단된다. 결론적으로 본 연구에서는 기존의 압입 크리프 시험장치의 경우 1 mm 정도의 소형 펀치를 사용하여 오직 덩어리 재료에 대한 압입 크리프 시험이 가능하거나 장시간 지속적으로 유압펌프를 작동시키며 크리프 시험을 수행해야 하는 번거로움을 개선한

마이크로 압입 전용크리프 시험 장치를 개발하였다. 개발된 마이크로 압입 크리프 시험기 개발을 통하여 전장품의 솔더 연결부와 같은 미세 구조물이나 부품의 고온에서의 크리프 물성치 측정을 위한 연구에 활용이 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 스케일의 부품의 크리프 거동을 측정하기 위하여 기존의 압입 크리프 시험장치의 문제점을 개선한 마이크로 압입 전용 크리프 시험 장치를 설계하여 제작하였다. 소형의 압입 펀치를 사용하여 직경 760 μm 의 초소형 Sn-3Ag-0.5Cu 솔더 볼 시험편에 대하여 제작된 시스템을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 프레임의 온도 변화에 대하여 변위계의 반응이 매우 민감하여 프레임의 온도변화에 무관하게 시험편만의 변형량을 측정이 가능한 변위 연신계의 설계가 요구된다.

2. 지렛대의 원리를 이용한 하중 전달 시스템에서 선형 모터 가이드를 적용하여 변형률 속도가 낮은 구간에서 하중이 대단히 안정적이었으나 $10^{-4}/\text{s}$ 정도의 빠른 변형률 속도 구간에서는 시간에 따라 하중이 약간씩 감소하는 문제가 발생하여 이에 대한 새로운 기구의 설계가 필요하다.

3. 온도 303 K~393 K에서 Sn-3Ag-0.5Cu 솔더 볼에 대한 크리프 실험 결과에 중간 응력 구간에서의 크리프 응력지수 $n=8.5$ 로 나타났다. 또한 솔더볼 시험편의 두께가 약 500 μm 임을 고려한다면 실제 실험 할 수 있는 시편의 변위 구간은 0~250 μm 로 두께의 50% 이하인 것으로 평가된다.

4. 개발된 마이크로 압입 크리프 시험기 개발을 통하여 전장품의 솔더 연결부와 같은 미세 구조물이나 부품의 고온에서의 크리프 물성치 측정을 위한 연구에 활용이 예상된다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부지원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-311-D00279).

참고 문헌

1. I. Dutta, D. Pan, R.A. Marks, and S.G. Jadhav, "Effect of Thermo-mechanically Induced Microstructural Coarsening on the Evolution of Creep Response of SnAg-based Microelectronic Solders," *Mat. Sci. Eng., A* vol. 410-411, pp. 48-52, 2005.
2. J. Villain, O.S. Brueller, and T. Qasim, "Creep Behavior of Lead Free and Lead Containing Solder Materials at High Homologous Temperatures with Regard to Small Solder Volumes," *Sensors and Actuators A*, vol. 99, pp. 194-197, 2002.
3. C.M.L. Wu et. al. "Properties of Lead-free Solder Alloys with Rare Earth (RE) Element Additions," *Mat. Sci. Eng., R* vol. 44, pp.1-44, 2004.
4. D.H. Sastry, "Impression Creep Technique-An Overview," *Mat. Sci. Eng., A*, vol. 409, pp. 66-75, 2005.
5. J.C.M. Li, "Impression Creep and Other Localized Tests," *Mat. Sci. Eng., A*, vol. 322, pp. 23-42, 2002.
6. F. Yang and L. Peng, "Impression Creep of Sn3.5g Eutectic Alloy," *Mat. Sci. Eng., A*, Vol. 409, pp. 87-92, 2005.
7. R. Mahdudi, A.G. Geranmayeh, and A. Rezaee-Bazzaze, "Impression Creep Behavior of Lead-free Sn-5Sb Solder Alloy," *Mat. Sci. Eng., A*, Vol. 448, pp. 287-293, 2007.
8. D. Pan, R.A. Marks, and R. Dutta, "Miniaturized Impression Creep Testing of Ball Grid Array Solder Balls Attached to Microelectronic Packaging Substrates," *Rev. Sci. Inst.*, Vol. 75, No. 12, pp. 5244-5252, 2004.
9. K.T. Yang and H.K. Kim, "Elevated Temperature Deformation Behavior in an AZ31 Magnesium Alloy," *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 20, No. 8, pp. 1209-1216, 2006.
10. W.D. Nix and J.C. Gibering, "Mechanisms of Time Dependent Flow and Fracture of Metals," Stanford University, 1993.