Journal of the KSTLE Vol. 27, No. 3, June 2011, pp. 140~146
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

마그네틱 파우더 브레이크를 이용한 소형 진자형 충격시험기 개발

유인동† · 이만석* · 김호경*‡

서울과학기술대학교 철도전문대학원
*서울과학기술대학교 자동차공학과

Development of a Miniature Pendular Type Impact Testing Machine Using a Magnetic Powder Brake

You, In-Dong, Lee, Man-Suk* and Kim, Ho-Kyung*†

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology
**Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology*
(Received March 23, 2011; Revised April 25, 2011; Accepted April 27, 2011)

Abstract – A miniature pendular type impact testing machine was designed and developed, adopting a magnetic powder brake in order to investigate tensile and shear behavior of a small solder ball at high speed. In this testing system, the potential energy of the pendulum is transferred into the impact energy during its drop. Then, the impact energy is transmitted through the striker which is connected to the push rods to push the specimen for tensile loading. The tensile behavior of lead-free solder ball in diameter of 760 μm was successfully investigated in a speed range of 0.15 m/s~1.25 m/s using this designed device. The maximum tensile strength of the solder joint decreases with the loading speed in the testing condition. The maximum tensile strength of the joint was 56 MPa in the low speed region.

Keywords – impact tensile test(충격인장실험), lead-free solder ball(무연 솔더 볼), loading device(하중장치), magnetic powder brake(마그네틱 파우더 브레이크)

1. 서 론

기존의 납 성분 솔더에서 무연의 주석 주성분 솔더로 대체된 이후 무연솔더는 기존 솔더에 비하여 강도는 향상되었으나 이로 인하여 취성의 기계적 거동을 나타내고 있다. 특히 무연 솔더는 충격이나 낙하와 같은 높은 변형률 속도 조건에서 취성 파괴에 취약한 것으로 알려져 있다[1]. 휴대용 전자 제품의 경우 경박 단소화가 되면서 솔더 연결부를 보호하는 하우징의 에너지 흡수 능력이 감소하며 결과적으로 낙하 혹은 취급시의 갑작스런 충격으로 많은 에너지가 전자 부품에 전달되어 충격 내구성이 전자제품 보드 접합부의 신뢰성에 치명적인 새로운 문제로 대두되고 있다. 따라서 휴대용 전자 제품의 충격하중에 저항하는 능력을 평가하는 방법이 전자제품의 신뢰성 확보차원에서 필수적인 연구이다.

Fig. 1은 산업체에서 사용하는 JEDEC(Joint Electronic Device Engineering Council)에서 제정한 휴대용 전자제품에 대한 보드수준(board-level)의 낙하-충격 시험기준인 JESD22-B111 (Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products)방식으로 이 기준에는 재료, 구성, PCB 배열, 충격 펄스에 대하여 상세히 기술되어 있다[2]. 그러나 JESD22-B111방식의 시험법의 경우 다음과 같은 문제점이 있다

†주저자 · 책임저자 : kimhk@snut.ac.kr

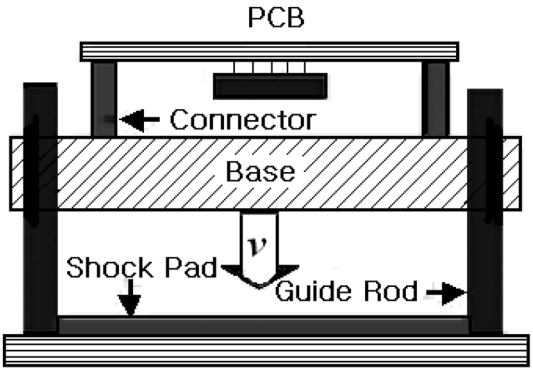


Fig. 1. Board level drop-shock test setup by JEDEC.

. (1) 실험적으로 정확히 재현성을 갖는 반사인(half-sine) 파형을 구현하기 어렵다. (2) 휴대용 전자 제품을 낙하시켜 충격을 가하는 방식이 정확히 제품의 구성부품에 대한 낙하 거동과 차이가 있다. (3) 자유낙하의 경우 낙하높이, 시험 대상물의 지면과의 경사, 고정 볼트 장력의 세기 등이 솔더 연결부의 파괴거동에 영향을 주는 주요변수로 작용한다[1]. 또한 이와 같은 보드 수준의 시험 비용은 집적 회로(IC) 부품, PCB 기판, 솔더 볼 제조업체 입장에서는 무시할 수 없는 액수이므로 단일 부품 수준에서의 좀 더 저렴한 시험이 매우 바람직하다. 즉 고가의 반도체 칩을 포함하여 다양한 단품들을 조합하여 상위 수준인 보드 수준에서 충격실험을 할 경우 비용이 증가하므로 솔더 연결부와 같은 하위 수준인 각각의 단품에 대하여 충격시험을 실시하여 각 단품의 충격 저항성을 평가하는 것이 경제적으로 바람직하다. 이를 위하여 휴대용 전자제품 업체에서는 제품의 취약 부위중 하나인 솔더 연결부의 충격 내구성을 평가하기 위하여 제품의 품질관리 차원에서 간단하고 저렴한 단일부품 수준인 솔더 볼 수준의 시험을 수행하고 있다.

지금까지 국내외적으로 솔더 볼에 대한 기계적 물성치 평가는 주로 1 mm/s 이하의 저속에서의 전단하중으로 주로 수행되어 왔다[3,4]. 그러나 휴대용 전자제품이 낙하-충격시의 파단모드를 모사하기 위해서는 집적회로 부품의 하나인 솔더 연결부의 전단시험 속도는 약 1 m/s 정도로 대단히 빨라야 한다. 최근 Charpy 진자형 충격시험기를 이용하여 솔더 볼에 대하여 고속의 충격시험을 시도하였으나 주로 변위에 대한 측정이 없이 단지 로드셀에 의한 최대 전단하중만을 측정하는 방식이 대부분이다[5]. 또한 솔더 볼 시험편에 대하여 인장하중모드에서의 실험이 거의 불가능하거나 하중-변위 선도 데이터를 획득하지 못하는 단점이 있다. 휴대용 전자 제품에 사용되는 취성의 무연 솔더 볼의 낙하-충격에서의 내구성을 평가하기 위하여 단일 솔더 볼에 대한 전단뿐만 아니라 인장하중에 대한 실험 데이터를 확보가 필수적이다. 만일 솔더 볼의 인장하중에 대한 실험 데이터를 확보한다면 설계 중인 혹은 문제가 되는 각종 IC회로와 칩들이 실장된 보드에 대하여 FEM 동적해석을 통하여 휴대용 전자 제품 보드의 낙하에 의한 충격-피로(impact-fatigue) 수명 예측이 가능하다.

그러므로, 본 연구에서는 직경 1 mm 미만의 초소형 무연 단일 솔더 볼 접합부의 인장 및 전단 하중상태에서의 1 m/s 이상에서의 고속하중 속도에 따른 강도를 평가하는데 필요한 하중속도 제어가 가능한 진자형 소형 충격시험기를 개발하고자 한다. 하중속도 조절을 위하여 진자 위치각도 뿐만 아니라 전압에 의하여 토오크 조절이 가능한 마그네틱 파우더 브레이크를 적용하여 넓은 범위에서의 하중속도 제어가 가능하도록 설계하였다.

2. 시스템 구성

통상적인 Charpy형 진자형 충격시험기의 경우 추의 낙하 속도 v는 $\sqrt{2gh(1-\cos\theta)}$ 로 결정된다. 여기서 g는 중력가속도, h는 진자 높이, θ는 진자 위치각도이다. 진자형 충격시험기를 소형으로 제작하기 위하여 시험기 진자의 길이를 350 mm 정도로 제한할 경우 각도 120도일 경우 속도는 3.13 m/s이며 각도를 줄인다고 해도 0.5 m/s 이하로는 거의 불가능한 상태이다. 본 연구에서 요구되는 0.1 m/s 정도의 속도를 구현하기 위해서는 낙하 속도를 감소시키는 방안이 요구된다. 진자의 힌지 부분이 베어링으로 구속되어 마찰이 거의 없으므로 힌지 부분에 일종의 브레이크 장치를 장착하여 제동력으로 속도를 일정하게 제어하고자 한다. 속도를 제어하는 브레이크는 여러 종류가 있다. 본 시스템에서는 전류로 코일에 의한 파우더의 점도를 제어하여 결과적으로 토크 조절이 가능한 마그네틱 파우더 브레이크(Mitsubishi사의 ZX-1.2YN-24)를 적용하여 하중속도 범위가 0.1~3.0 m/s를 목표로 정교하게 속도제어가 가능한 시스템을 구현하고자 한다. 이를 이용하여 밀리미터 이하 직경의 솔더 볼의 고속에서의 전단 및 인장 시험이 가능도록 설계 및 제작하고자 한다.

시험기 시스템 구성은 Fig. 2와 같이 시험편의 낙하

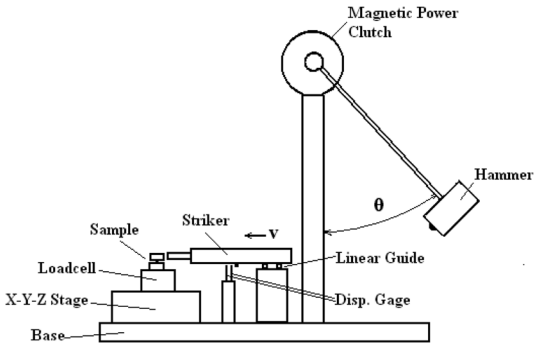


Fig. 2. Schematic illustration of the impact testing system.

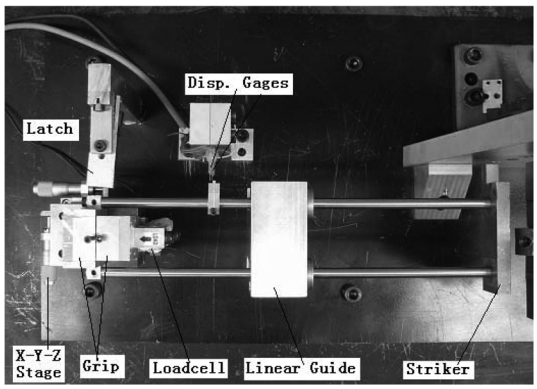


Fig. 3. Experimental setup of the striker, displacement gages, load-cell, grip, and X-Y-Z stage of the impact testing machine.

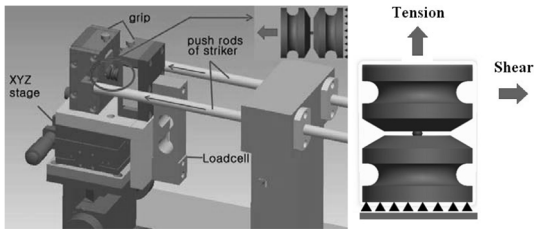


Fig. 4. Tensile and shear loading system for the miniature solder joint.

충격하중을 발생시키는 진자 햄머와 낙하속도를 조절하는 마그네틱 브레이크, 작용 하중 및 변형량을 측정하는 하중 및 변위 측정시스템, 시험편에 직선방향으로 하중을 전달하는 striker, 시험편을 고정하고 지지하는 그립 및 지그, 시스템 기반(base)으로 구성하였다.

통상적인 진자형 충격시험기로 실험시 시험편을 진자가 낙하하는 최저의 위치에 설치를 하여도 진자가 원호형상으로 낙하하는 이유로 정확하게 시험편에 요구되는 전단 혹은 인장 하중을 전달하는데 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하고자 진자의 위치에너지를 진자가 낙하하면서 striker에 충격 에너지를 가하면 Fig. 3과 같이 linear guide를 따라 직선으로 이동하는 두 개의 축으로 이루어져 있으며 시험편을 고정하는 그립부와 연결된 striker가 시험편에 정확하게 Fig. 4와 같이 수직(인장) 혹은 평행(전단) 방향으로 하중을 가하도록 설계하였다. 한편 striker가 시험편을 가격한 후에 다시 반동으로 튀기는 현상을 방지하기 위하여 한쪽 방향으로 작동하는 걸쇄(latch)를 설치하였다.

솔더 볼 시험편에 작용하는 하중과 변위를 동시에 측정하기 위하여 변위의 경우 폭 12.7 mm, 두께 0.3 mm, 길이 105 mm의 스테인리스 스틸 판재로 제작된 외팔보에 게이지 팩터 2.09, 길이 5 mm, 저항 120 오옴의 스트레인 게이지가 부착된 변위계를 제작하였다. 이 변위계가 Fig. 3과 같이 시험편에 충격하중을 가하는 striker의 돌기와 직각으로 접촉을 하면서 2개를 설치되어 변위를 측정하였다. 솔더볼에 작용하는 순간적인 고속의 하중을 모니터링하기 위하여 600 N 용량의 막대형 로드셀 및 변위계로부터 검출된 신호는 다이나믹 앰프(Vishay Micro-Measurements, 2300 Signal Conditioning Amplifier)를 통하여 증폭하였다. 시간에 대한 변위계 및 로드셀로부터의 신호는 데이터 획득장치(National Instrument, PCMCIA)를 이용하여 기록 및 저장하였다. 데이터 획득 및 제어에 사용한 소프트웨어는 v8.0 LabVIEW를 사용하였다.

시험편에 인장 및 전단하중이 작용하도록 구리 홀더와 정교하게 제작된 시험편 그립부를 Fig. 4와 같이 설계 제작하였다. 미소한 솔더 시험편을 시험기에 장착시 약간의 하중에도 시험편에 비틀림 혹은 굽힘 하중이 발생하여 이로 인하여 정확한 솔더부의 강도에 많은 오차를 유발한다. 이를 방지하기 위하여 시험편의 좌우 상하 위치를 정확히 조정하여 고정시키는 장치가 필요하다. 이를 위하여 최소눈금 10 um으로 미세조정이 가능한 X-Y-Z 마이크로 스테이지를 장착하여 시편의 좌우 위치를 조정할 수 있게 제작하였다. 소형 CCD 카메라를 이용하여 좌우 상하의 위치를 수동 X-Y-Z stage를 이용하여 시험편의 위치를 조정하였다. Fig. 5는 최종적으로 제작된 소형충격시험기이며 Table 1은 개발된 시험기의 상세정보이다.

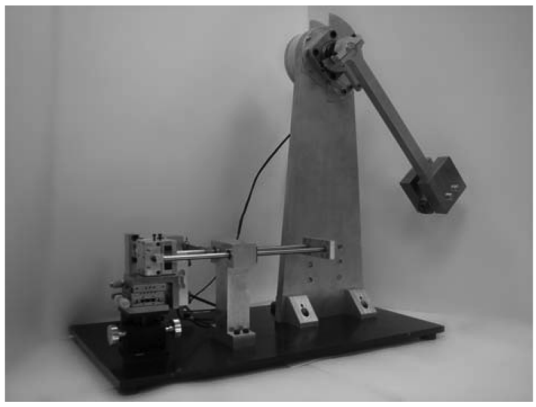


Fig. 5. Photograph of the developed impact testing machine system.

Table 1. Specification of the miniature impact testing machine

Specification (unit)	
Size (L×W×H) (mm)	600×320×630
Pendulum Swing Radius (mm)	350
Pendulum Weight (kg)	4.56
Max. Pendulum Angle (degree)	120
Max. Speed (mm/s)	1260
Min. Speed (mm/s)	150

3. 속도 조정 및 측정 시스템 교정

일반적으로 시험편에 작용하는 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 사용할 수 있으나 고속으로 시험편에 하중을 가할 경우 LVDT 지시기로부터의 출력 신호가 느려서 정확한 변위 및 하중속도의 측정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 스트레인 게이지를 부착한 외팔보 형태의 변위계를 제작하여 사용하였다. 외팔보 형태의 스트레인게이지를 장착한 변위계의 신호를 다이나믹 앰프를 통하여 증폭 처리하여 변위를 측정하였다. 최종적으로 Fig. 6과 같이 외팔보형 스트레인 게이지에서 나오는 출력전압(V_o)을 통하여 실제 변위를 식(1)과 같이 결정하였다.

$$Disp.\ (mm) = -0.000608 + 1.1456 V_o \quad (1)$$

시험편에 실제 작용하는 하중 속도는 시험편에 하중이 가해지는 구간에서의 속도보다 시험편이 파단 후에 striker가 이동하는 구간에서 더 빠름을 여러 실험을 통

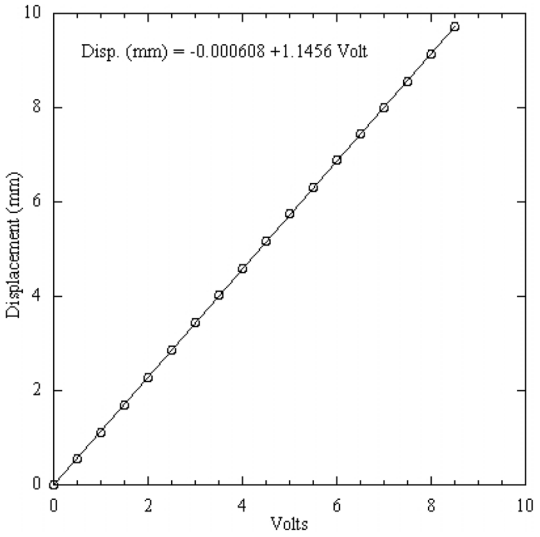


Fig. 6. Relationship between the displacement and strain gage output voltage.

하여 확인하였다. 따라서 시험편이 파단 전과 후의 구간을 넓게 설정하여 속도를 결정한다면 속도 측정에 있어서 많은 오차가 발생하게 된다. 또한 빠른 속도로 시험편에 하중을 가하는 striker의 속도를 측정하기 위해서 1개의 변위계를 이용할 경우 비록 필터를 사용하더라도 노이즈가 발생하며 노이즈와 실제 신호를 구분하기 대단히 어렵다. 따라서 실제 시험편의 변위가 발생하는 구간에서의 하중 및 변위 신호를 구분하기 위해서는 시험편에 하중이 작용하는 구간에서 2개의 변위계를 이용하여 평균 변위속도를 결정하면 이 구간에서의 하중 신호를 구분이 가능하다. 본 연구에서는 스트레인 게이지가 장착된 두 개의 외팔보형 변위계를 사용하였다. linear guide를 따라 직선 운동을 하는 striker 측면에 돌기를 장착하여 striker가 직선운동을 하면서 첫 번째 변위계에 접촉을 가하면서 이동한 후에 첫 번째 변위계로부터 1.55 mm 떨어져 위치한 두 번째 변위계에 접촉을 하면서 이동하게 된다. 두 변위계의 간격은 시험편의 연신율을 고려하여 최소 길이인 1.55 mm로 결정하였다.

Fig. 7은 두 변위계에서 나온 신호와 하중 신호를 저장한 그래프 예이다. Fig. 7을 통하여 비록 다이나믹 앰프에서 10 kHz의 노이즈 필터를 적용하였으나 변위 및 하중 센서로부터의 신호의 경우 많은 노이즈가 발생함을 알 수 있다. 두 변위계의 간격(δ)이 1.55 mm이고 두 변위계의 신호의 시간 차이(dt)를 그래프를 통하여 측정한다면 시험편에 충격을 가하는 하중속도 v는

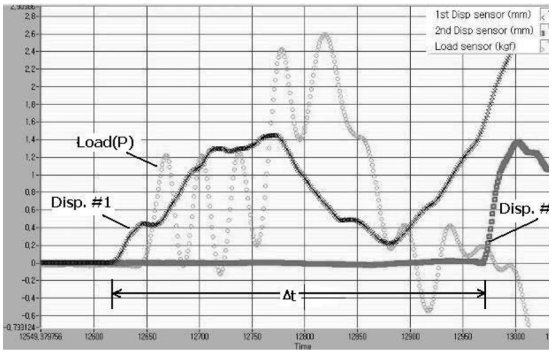


Fig. 7. An example of applied load and displacements from two displacement gages as a function of time for the single solder ball at speed of 1.25 m/s.

v=δ/Δt로 결정이 가능하다. 첫 번째 변위계에 striker가 접촉하는 순간에 시험편에 하중을 가할수 있도록 시험편을 설치하였다. 시험편의 연신율이 실험 후 파단 연신율을 측정한 결과 20% 미만으로 이를 환산할 경우 약 0.06 mm정도 수준으로 이를 적용할 경우 실제 실험하중 신호의 경우 첫 번째 피크를 가지는 선도가 해당함을 알 수 있다. 그 이후의 선도의 피크는 노이즈로 판정하였으며 통상적으로 첫 번째 피크를 최대 하중으로 결정하였다.

본 연구에서 요구되는 하중속도를 0.1~3.5 m/s 범위로 구현하기 위해서는 토크 조절이 가능한 마그네틱 파우더 브레이크에 진자 위치각도 120, 90, 60, 45, 30도에 대하여 전압을 변화시키면서 속도변화를 측정하였다. Fig. 8은 진자각도에서 인가전압에 대한 시험편 하중속도 결과이다. Fig. 8을 통하여 120도의 경우 선도가 전압과 속도에 대하여 일정한 형상이 아니라 낮은 전압과 높은 전압에서 속도에 대한 양상이 상이하여 2차방정식으로 표현하는데 어려움이 있다. 그러나 90도의 경우 인가전압(Volt)과 하중속도(v)가 식(1)과 같다.

$$\upsilon = 3.983 - 0.4949 Volt + 0.02496 Volt^2 \quad (1)$$

이때 상관관계 99.0%정도로 정확한 상관관계가 존재하였다. 90도의 경우 0볼트에서는 상관식과는 다른 결과가 도출되어 제외하였다. 따라서 본 시스템에서 제어가 가능한 최대 속도는 3.5 m/s로 나타났다. 또한 90도의 경우 최저 속도가 약 1.5 m/s인 관계로 그 이하의 속도 조절이 필요할 경우 다른 진자 각도에서의 제어가 필요하다. Fig. 8을 통하여 60, 45, 30도에서 2차 방정식으로 인가전압으로 하중 속도예측이 가능한

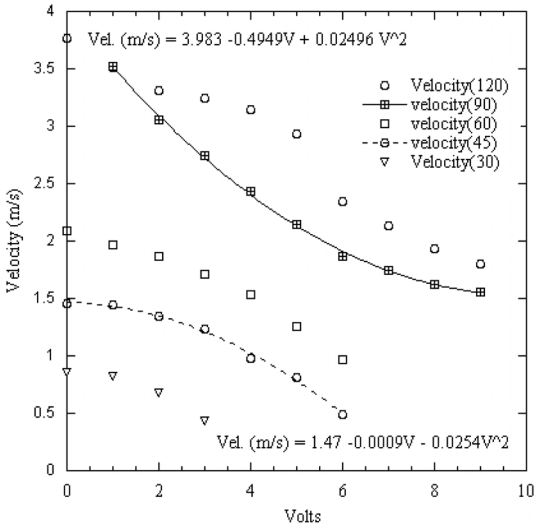


Fig. 8. Relationship between velocity and input voltage for various pendulum angles.

양상을 나타내고 있다. 그러나 1.5 m/s 이하에서 제어를 위해서는 45도에서 최고 속도 1.5 m/s에서 약 0.5 m/s까지 제어가 가능하여 인가전압과 하중속도와의 관계식을 도출한 결과 식(2)와 같다.

$$\upsilon = 1.47 - 0.0009 Volt - 0.0254 Volt^2 \quad (2)$$

따라서 본 시스템에서는 하중속도를 제어하기 위하여 최종적으로 두 개의 구간으로 나누어 3.5~1.5 m/s 구간에서는 진자각도 90도로 수행하고 1.5~0.5 m/s에서는 45도로 수행하도록 프로그래밍을 하였다.

4. 솔더 시험편 준비

인장 및 전단시험에 사용한 시험편은 직경 760 μm의 Sn-3Ag- 0.5Cu 솔더 볼을 사용하였다. 시험편은 Fig. 9(a)와 같이 무산소동으로 된 직경 10 mm 높이 7 mm의 2개의 유리시계형상의 홀더 사이에 솔더볼을 솔더링한 시험편을 사용하였다. 2개 구리 홀더 중간에 솔더볼을 올려 놓은 상태에서 전기로에서 온도 도로 가열하여 리플로우(reflow)를 하였다. 전단 시험은 온도 15ºC(= 0.59 T_m, T_m = 217ºC)에서 실시하였다. Fig. 9(b)는 솔더 시험편의 실제 단면의 치수이다.

5. 개발된 충격시험기 평가

구리 홀더상에 무연 솔더로 리플로우된 단일 솔더

볼에 대하여 본 연구에서 개발된 시험기를 사용하여 인장 시험을 실시하였다. 변위 속도 v를 변화시키며 변위 속도에 따른 인장 강도의 변화를 측정하였다. 시험편이 없는 무부하 상태에서 최대변위속도는 Fig. 8에서와 같이 3.5 m/s였으나 실제 시험편을 장착하여 실험한 결과 1.26 m/s로 나타났다. 이는 실제 striker가 시험편에 하중을 가할 때 시험편의 변형에 의한 저항으로 감소한 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서의 실험변위 속도는 v=0.15~1.26 m/s로 수행하였다. Fig. 10(a)는 0.15~1.26 m/s로 수행한 인장 시험의 최대하중과 속도와의 관계이다. 하중 속도가 증가하면서 최대하중도 증가함을 알 수 있다. 낮은 속도(v=0.0035~2 mm/s)에서는 하중 속도가 증가하면서 최대 하중도 증가하는 것으로 보고되어 있다 [3]. 그러나 고속에서는 이와 상반대의 결과를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 하중 속도에 따른 효과로 판단된다. 다른 연구와의 강도를 비교하기 위하여 하중을 응력으로 환산이 필요하다. 이를 위하여 파단이 발생하는 면에서의 단면적으로 나누어 솔더 연결부의 최대하중을 응력으로 표기하면 Fig. 9(b)와 같다. Fig. 9(b)를 통하여 낮은 속도 구간에서의 최대인장강도는 약 56 MPa로 나타났다. 이와 같은 값은 유사한 합금인 Sn-4Ag와 Cu와의 결합부의 인장강도 59.2 MPa[6]과 거의 일치한다.

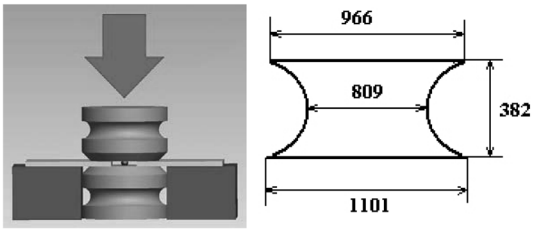


Fig. 9. (a) Miniature single solder ball specimen preparing for reflowing and (b) shape and dimensions of the single solder ball joint (in micrometers).

Fig. 11(a), (b)는 각각 낮은 하중 속도 (0.15 m/s)와 빠른 속도 (1.26 m/s)에서의 파단면의 형상을 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. 특히 v = 0.15 m/s의 시험편의 경우 솔더 합금이 구리 기판에 비교적 많이 달라 붙어있는 혼합 파단면(mixed fracture surface)을 알 수 있다. 그러나 속도가 증가하면서 파단면이 구리와 솔더 연결부된 경계면에서 취성 파단면으로 파단됨을 알수 있다. 즉 하중 속도가 증가하면서 솔더 연결부의 경우 취성화됨을 알 수 있다.

기존의 시험기로는 초소형 볼에 대한 고속의 인장 시험이 불가능하여 이를 위한 마그네틱 브레이크를 이용한 초소형 충격시험 장치를 설계하여 제작하였다. 본 시험기를 사용하여 직경 760 μm의 초소형 솔더 볼 시험편에 대하여 0.15~1.26 m/s 속도범위에서 인장 시험이 가능하였다. 또한 시험편 그립을 90도 회전할 경우 전단시험도 가능하도록 설계하였다. 초소형의 매우 예민한 시험편을 시험기에 무부하로 장착하는데 매우 정교한 x-y-z 스테이지를 적용하였다. 시험편에 고속의 충격 전단 하중이 가하는 순간에 약간의 순간적인 휨 현상이 종종 발생하였다. 따라서 추후 고속의 정교한 마이크로 시험기의 설계를 위해서는 스테이지 및 그립부와 같이 하중을 전달 혹은 지지하는 연결부품들의

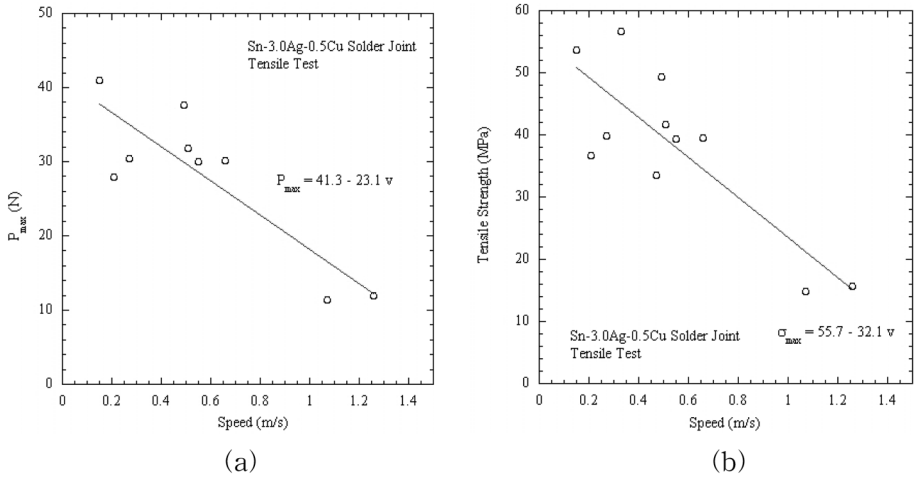
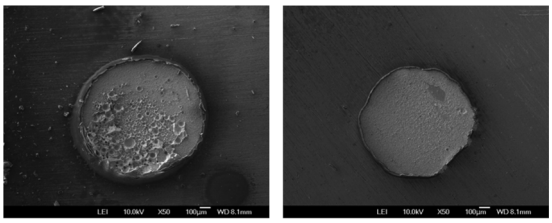


Fig. 10. (a) Maximum tensile force and (b) tensile strength as a function of speed for single solder joints.



(a) (b)

Fig. 11. Fracture surfaces of tensile test specimens at (a) v = 0.15 m/s and (b) v = 1.26 m/s.

강성도를 증가시키는 새로운 기구적 설계가 필요하다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 직경 1 mm 미만의 초소형 단일 솔더 볼 접합부의 인장 및 전단 하중상태에서 고속의 하중속도제어가 가능한 초소형 진자형 충격 시험 장치를 개발하고자 하였다. 정교한 하중속도제어를 위하여 진자형 충격시험기 진자의 위치각도와 더불어 마그네틱 파우더 브레이크를 사용하였다. 본 시험기를 사용하여 직경 760 μm의 초소형 솔더 볼 시험편에 대하여 0.15 ~ 1.26 m/s까지 인장 시험이 가능하였다. 실험하중 속도 구간에서는 하중 속도가 증가하면서 최대인장강도가 감소함을 알 수 있다. 낮은 속도 구간에서의 최대 인장강도는 약 56 MPa로 나타났다.

후 기

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 일반연구자지원사업으로 지원을 받아 연구되었음(2011-0002628)

참고문헌

1. E.H. Wong, S.K.W. Seah, and V.P.W. Shim, “A Review of Board Level Solder Joints for Mobile Applications,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp. 1747-1758, 2008.
2. JEDEC Standard JESD22-B111, “Board level drop test method of components for handheld electronic products,” 2000.
3. 권용상, 고국종, 김호경, “피에조를 이용한 초소형 단일 솔더볼 연결부의 전단 시험장치 개발,” *한국윤활학회지*, 제26권, 제1호, pp. 44-51, 2010.
4. V. Sivasubramaniam, M. Galli, J. Cugnoni, J. Janczak-Rusch, and J. Botsis, “A Study of the Shaer Response of a Lead-free Composite Solder by Experimental and Homogenization Techniques,” *J Electronic Mat*., Vol. 38, No.10, pp. 2122-2131, 2009.
5. M. Date, T. Shoji, M. Fujiyoshi, K. Sato, and K.N. Tu, “Ductile-to-brittle Transition in Sn-Zn Solder Joints Measured by Impact Test,” *Scripta Mater*., Vol. 51, pp. 641-645, 2004.
6. Q.K Zhang, H.F. Zou, and Z,F. Zhang, “Tensile and Fatigue Behavior of Aged Cu/Sn-4Ag Solder Joint,” *J Electronic Mat*., Vol. 38, No. 6, pp. 852-859, 2009.