

BGA 패키지의 기계적 · 전기적 특성 평가 및 평가법

구자명 · 김종웅 · 김대곤 · 윤정원 · 이창용 · 정승부*

성균관대학교 신소재공학부

Evaluation and Test Method Characterization for Mechanical and Electrical Properties in BGA Package

Ja-Myeong Koo, Jong-Woong Kim, Dae-Gon Kim, Jeong-Won Yoon,
Chang-Yong Lee and Seung-Boo Jung*

School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University,
300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea

초 록: 실험과 비선형 유한요소해석을 병행하여, area array 패키지에서 솔더 접합부 특성을 판별하기 위한 전단시험 결과에 미치는 전단속도와 높이의 영향을 연구하였다. 전단속도의 증가와 전단높이의 감소에 따라 전단강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 과도하게 높은 전단높이는 비정상적으로 높은 표준편차 또는 솔더볼 표면으로부터 전단 프로브의 밀립 현상과 같은 실험오차를 발생시켰다. 반면, 낮은 전단 속도는 취약한 계면 파괴나 계면에서 가장 약한 층의 판별에 있어서 유용하였다. 한편, 리플로우 회수 증가에 따른 Sn-37Pb/Cu와 Sn-3.5Ag/Cu BGA 솔더 접합부의 기계적 · 전기적 특성에 대하여 연구하였다. Cu₆Sn₅와 Cu₃Sn으로 구성된 금속간화합물 층의 총 두께는 리플로우 시간의 1/3승에 비례하여 증가하였다. 전단 강도는 3회 또는 4회 리플로우까지 증가한 후, 이후 리플로우 회수에 비례하여 감소하는 경향을 나타내었다. 이때, 파괴는 리플로우 회수에 관계없이 솔더 내에서 발생하였다. 전기 비저항은 리플로우 회수에 비례하여 증가하였다.

Abstract: The ball shear force was investigated in terms of test parameters, i.e. displacement rate and probe height, with an experimental and non-linear finite element analysis for evaluation of the solder joint integrity in area array packages. The increase in the displacement rate and the decrease in the probe height led to the increase in the shear force. Excessive probe height could cause some detrimental effects on the test results such as unexpected high standard deviation and probe sliding from the solder ball surface. The low shear height conditions were favorable for assessing the mechanical integrity of the solder joints. The mechanical and electrical properties of the Sn-37Pb/Cu and Sn-3.5Ag/Cu BGA solder joints were also investigated with the number of reflows. The total thickness of the intermetallic compound (IMC) layers, consisting of Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn, was increased as a function of cubic root of reflow time. The shear force was increased up to 3 or 4 reflows, and then was decreased with the number of reflows. The fracture occurred along the bulk solder, in irrespective of the number of reflows. The electrical resistivity was increased with increasing the number of reflows.

Keywords: BGA (ball grid array), tin-silver (Sn-Ag) solder, shear test, finite element analysis, electrical resistivity

*Corresponding author
E-mail: sbjung@skku.ac.kr

1. 서 론

고성능 마이크로프로세서와 대용량 저장매체를 보다 작은 공간에 집적시키기 위해서는, 시스템 설계 기술과 이를 뒷받침해줄 수 있는 전자 패키징 기술 개발이 동시에 요구된다. 이에 따라, 전기적 특성이 우수하고 다핀화가 유리한 ball grid array (BGA), chip scale package (CSP) 및 플립칩 (flip chip)과 같은 area-array package 기술에 대한 수요가 점차 증가하고 있다.¹⁾ 이러한 형태의 패키징 기술은 솔더 접합부가 전기적 신호 전달 및 칩을 기계적으로 지지하는 기능을 동시에 수행한다. 또한, 전자 칩의 발달로 인하여 솔더 접합부의 다핀화·미세피치화에 대한 요구는 더욱 거세질 것으로 예상된다.²⁾ 따라서 솔더 접합부의 금속야금학적·기계적·전기적 신뢰성에 대한 연구의 중요성은 더욱 증대될 전망이다.

리플로우 공정 및 작동 중에 발생한 열에 의해서 접합 계면에는 금속간 화합물 (intermetallic compound) 이 생성 및 성장하게 된다. 일반적으로, 이렇게 생성된 금속간 화합물들은 접합 계면을 강화시켜주는 역할을 한다. 하지만, 과잉으로 생성된 금속간 화합물들은 솔더 접합부를 약화시켜서, 공정 및 사용 중에 발생하는 비틀림 (bending), 피로 (fatigue), 열충격 (thermal shock) 등과 같은 외부 응력에 의해 쉽게 접합부 파괴가 발생하게 된다.³⁾ 이에 따라, 개발된 전자 패키지의 기계적·전기적 성능 및 수명을 예측하기 위한 다양한 시험법이 개발·수행되어져 왔다. 다양한 재료가 적층된 형태의 전자 부품에 가해지는 응력은 시스템 on/off

에 따른 내부 온도 차에 의해 발생된 전단 응력이 대부분을 차지한다.^{4,5)} 따라서 볼 전단 시험 (ball shear test)은 솔더 접합부의 전단 강도 특성 연구 및 신뢰성 평가를 간편하고 빠르게 수행할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다. 하지만, 전자 패키지의 솔더볼의 크기, 패드 면적, 피치 간격 등의 다양성으로 인하여 시험법의 표준화가 완전히 이루어 있지 않는 실정이다.⁶⁾ 이에 따라, 다른 전단 속도와 높이 하에서 시험한 실험 결과의 경우 비교·평가가 어렵고, 평가 결과의 효율성 및 신뢰성 저하가 문제시 되고 있다. 최근, ball shear test에 대한 JEDEC 규격 (JESD22-B117)이 공개되었으나 전단 속도에 대한 규정은 전무한 실정이다. 또한, 시편으로부터 50 μm 이상과 솔더볼 높이의 1/4 이하로 규정된 probe의 높이가 또한 솔더볼의 높이가 200 μm 이하일 경우에는 적용이 불가능한 실정이다.

그림 1은 최근 8년간 투고 및 발표된 전단시험 관련 연구 논문을 “IEEE”와 “Science Direct” 등과 같은 전자 D/B에서 검색하여, 사전 연구자들이 사용한 전단시험의 전단강도와 probe 높이 조건을 조사한 결과를 보여준다.⁷⁾ 그림에서 보는 바와 같이, 전단 시험은 매우 다양한 조건 하에서 이루어져 왔으며, 이는 표준화된 시험 규격의 부재로 비롯된 것으로 판단된다.

전자 칩이 PCB 보드 상에 접합되기 위해서는 multi-assembly와 rework 공정으로 인하여 2 회 이상의 리플로우 공정이 요구된다.⁸⁾ 이러한 리플로우 공정 중에는 금속간 화합물이 빠르게 성장하게 되어, 전자 패키지의 기계적·전기적 특성을 저하

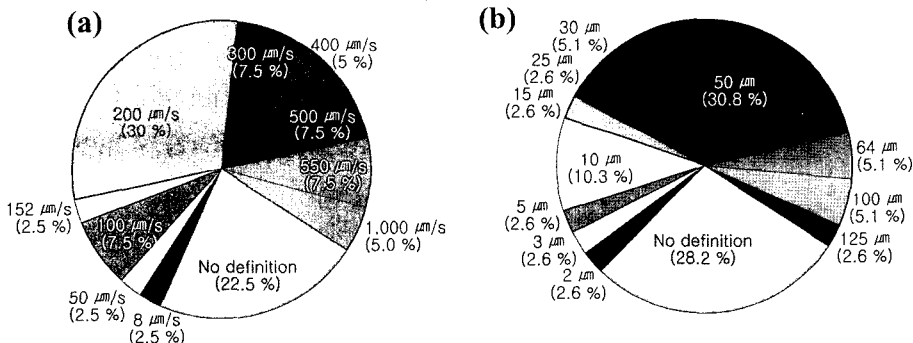


Fig. 1. BGA ball shear conditions employed in previous publications: (a) displacement rate and (b) probe height.

시킬 수 있다. 이에 따라 전자 패키지의 multi-reflow에 따른 솔더 접합부의 기계적 신뢰성에 관한 연구가 진행되어 왔으나, 전기적 특성 평가에 대한 연구는 거의 보고되고 있지 않고 있는 실정이다.^{4,5,9)}

따라서 본 연구에서는 접합강도 평가에 대한 규격화를 위해서, 전단 시험 시 중요한 변수인 전단 속도와 probe 높이가 전단강도에 미치는 영향을 실험 및 유한요소해석을 통하여 연구하였으며, 얻어진 결과를 통하여 최적 조건을 도출하고자 하였다. 또한, 리플로우 회수에 따른 BGA 패키지의 기계적 · 전기적 특성에 대한 연구가 수행되었다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비

본 연구에서는 지름 500 μm 의 Sn-37wt.%Pb와 Sn-3.5wt.%Ag의 조성을 갖는 솔더볼을 사용하였다. 사용된 기판은 BT 재질로서, 패드 직경은 460 μm , 피치 간격은 1 mm 였고, Cu 패드 상에 Ni와 Au를 각각 7 μm , 0.7 μm 전해도금 하였다. 리플로우 수에 따른 기계적 · 전기적 특성 연구용 시편은 Cu 패드 상에 표면처리로서 organic solderability preservative (OSP) 처리된 FR-4 기판을 사용하였으며, 피치 간격은 2 mm이었다.

RMA 플럭스를 도포한 BT 기판의 패드 상에 솔더볼을 올려놓은 후, 리플로우 머신을 이용하여 솔더볼과 기판을 접합하였다. 이 때, 리플로우 최대 온도는 255°C (Sn-37Pb의 경우: 225°C)이었으며, 리플로우 시간은 60 초로 하였다. 접합 후, 플럭스 제거제를 이용한 초음파 세척을 통하여 기판 상의 플럭스 잔사를 제거하였다.

계면에 과도한 금속간 화합물이 생성되었을 때, probe 높이에 따른 전단 강도의 변화를 연구하기 위하여, Sn-37Pb 솔더 접합부를 150°C에서 100 시간동안 고온시효 하였다. 또한, 리플로우 회수에 따른 기계적 · 전기적 특성을 평가하기 위해서, 솔더 접합부의 리플로우를 10회까지 반복하였다.

2.2 조직 관찰

리플로우 및 시효한 시편들의 미세조직 변화를 관찰하기 위해서, 시편들을 예폭시로 mounting 하여 연마한 후, 94% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ -4% HNO_3 -2% HCl (in

vol.%) 용액으로 에칭 하였다. Scanning electron microscopy (SEM)을 사용하여 미세조직을 관찰하였으며, energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)와 electron probe micro analyzer (EPMA)를 사용하여 생성된 상들의 화학 조성을 분석하였다.

2.3 전단 시험

솔더 접합부의 기계적 특성을 평가하기 위해서, JEDEC 규격 (JESD22-B117)을 따라 볼 전단 시험 (ball shear test)을 시행 하였다. 전단 강도에 미치는 전단 속도와 전단 높이의 영향을 연구하기 위해서, 10~500 $\mu\text{m/s}$ 범위의 전단속도와 10~150 μm 의 전단 높이를 조건으로 하여, 전단 시험을 시행 하였다. 전단 시험 후, 파면은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

2.4 유한요소해석

전단 시험 시 발생할 수 있는 실험 오차들을 최소화하고, 잘 알려진 솔더 및 기판 등의 물성이 전단 조건에 어떠한 영향을 미치는지 연구하기 위해서, 유한요소 해석기법을 통한 컴퓨터 시뮬레이션을 시행하였다. 본 연구에서는 “Surface Evolver”를 이용하여, 솔더의 표면장력, 중력 및 외부 압력이 균형을 이루는 상태를 계산하여 리플로우 후 솔더볼의 형상을 예측 · 구현하였고, 이를 ANSYS로 도입하여 전단시험 시뮬레이션을 시행하였다. 솔더 접합부는 축대칭 모델이므로 2차원 plane strain 요소 (PLANE183)를 이용하여 모델링하였고, shear probe와 솔더볼과의 접촉을 구현하기 위해서 target 요소 (TARGET169)와 contact 요소 (CONTA172)를 도입하였다. 솔더는 상온에서 homologous temperature ($T_{\text{test}}/T_{\text{melting}}$)가 0.6 이상임을 감안하여 점소성 물성을 도입하였고, 솔더를 제외한 구성 요소의 물성은 선형적 거동을 하는 것으로 가정하여 탄성 물성만을 도입하였다. 이 때 솔더의 점소성 물성은 가장 널리 쓰이고 있는 Anand 모델을 이용하여 구현하되, 본 연구에서 사용한 PLANE 183 요소에 적용 가능하도록 약간의 변형을 가하였다. 이러한 변형 과정 및 상세한 실험방법은 사전연구 논문에 상세히 기술되어 있다.^{10,11)} 표 1과 2는 각각 본 연구에서 이용한 재료의 선형적 물성과 솔더의 점소성 물성을 나타낸다.

Table 1. Linear elastic material properties for BGA assemblies.

Material	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Density (g/cm ³)
Sn-37Pb	29,800	0.40	8.4
Sn-3.5Ag	49,800	0.40	7.5
Cu	117,000	0.34	8.9
Ni	213,000	0.31	8.9
BT Substrate	14,000	0.39	1.2

Table 2. Input parameters for steady state creep analysis

	A (1/sec)	α (1/KPa)	m	Q/R (K)
Sn-37Pb	1.09E7	8.7E-5	0.316	9,400
Sn-3.5Ag	9.00E5	4.5E-4	0.182	8,690

2.5 전기적 특성

리플로우 회수에 따른 BGA 솔더 접합부의 전기 비저항을 측정하기 위해서, 솔더 접합부 20개를 직렬로 연결한 daisy-chain을 설계하였다. 패키지의 전체 전기 저항을 측정하기 위해서 Keithly사의 나노볼트미터와 전원공급장치를 사용하여, 0.01에서 0.1 A로 전류가 증가함에 따라, 전압의 증가량을 측정하여 그 기울기로 저항을 구하였다. 사전 실험에 따르면, Cu trace의 저항 (R_{Cu})은 리플로우 회수에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났으며, 따라서 본 연구에서는 29.28 m Ω 의 상수로 가정하였다. 본 연구에서 솔더 접합부의 전기 비저항 (psolder joint)을 구하기 위해서 사용한 식은 다음과 같다.

$$\rho_{solder\ joint} = (R_{package} - R_{Cu}) \times \frac{A}{nl} \quad (1)$$

여기서, $R_{package}$ 는 측정된 패키지의 총 저항, R_{Cu} 는 구리 패턴의 총저항의 측정값, n 은 솔더 접합부의 수 (본 연구에서는 20개), l 은 측정된 솔더 접합부의 높이이다. 솔더볼의 단면적은 BGA 패키지의 Cu 패드의 단면적으로 가정하여, $1.66 \times 10^{-7} m^2$ 로 고정하였다. 솔더 접합부의 높이는 리플로우 회수를 달리한 시편들의 단면을 SEM으로 촬영한 후, image analyzer를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성 평가법에 관한 연구

그림 2(a)와 (b)는 Sn-37Pb 및 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 계면 사진을 보여준다. 일반적으로 알려진 바와 같이 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 조직들은 각각 Pb-rich와 Sn-rich 상들과 Sn-rich와 Ag₃Sn 상들의 공정조직으로 이루어져 있음을 알 있었다. 리플로우 공정 후, 접합 계면에 생성된 금속간 화합물은 모두 Ni₃Sn₄임을 EPMA 분석 결과 알 수 있었으며, 두 솔더 모두 약 1 μm 정도의 금속간 화합물이 계면에 생성되었다.

그림 4(c)는 취약한 금속간화합물이 두껍게 성장했을 때 기계적 특성 변화를 관찰하기 위해서 Sn-37Pb 솔더 접합부를 150°C에서 100시간동안 시효한 계면 조직사진이다. Pb-rich와 Sn-rich로 이루어진 솔더 조직이 조대화된 것과 동시에 솔더와 Ni₃Sn₄ 금속간화합물 층 사이에 약 3.5 μm 두께의 새로운 금속간 화합물 층이 성장하였다. EPMA 분석 결과, 이 층은 (Au,Ni)Sn₄로 확인되었다. 계면에 생성된 이 (Au,Ni)Sn₄ 층의 경우 매우 취약한 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.¹²⁾

BGA 패키지를 리플로우 한 후의 솔더볼 접합부

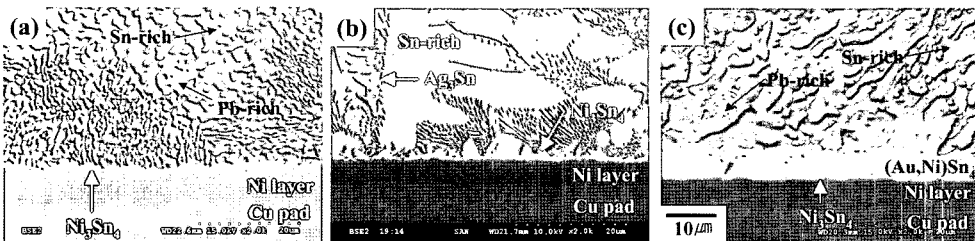


Fig. 2. SEM micrographs of (a,c) Sn-37Pb and (b) Sn-3.5Ag solder joints after (a,b) as-reflow and (c) aging at 150°C for 100 hr.

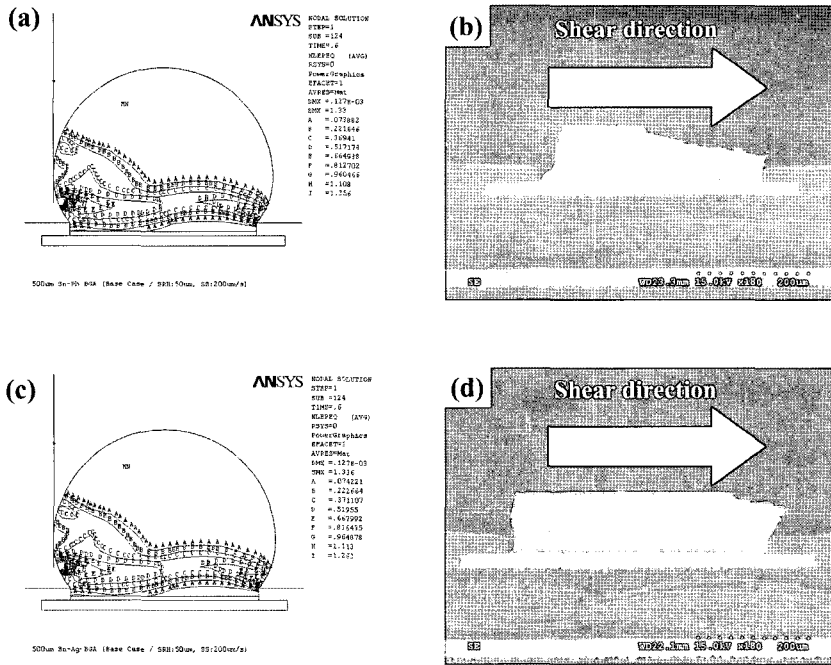


Fig. 3. (a,c) Contour plots of averaged equivalent plastic strain analysis and (b,d) cross-sectional views after ball shear test in the base case condition (Displacement rate: 200 $\mu\text{m/s}$ and probe height: 50 μm): (a,b) Sn-37Pb and (c,d) Sn-3.5Ag.

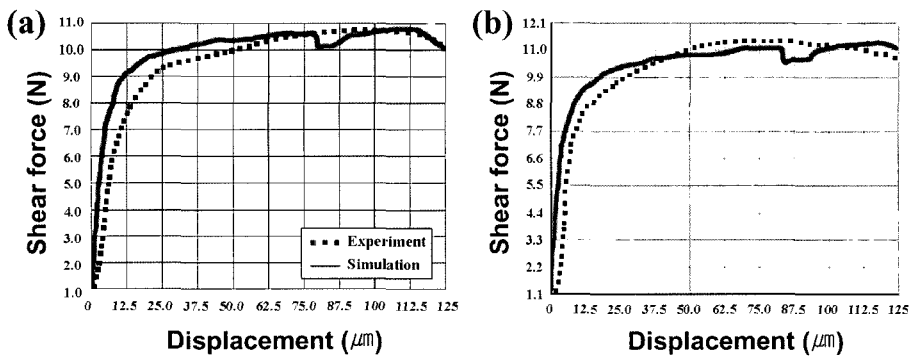


Fig. 4. Force-displacement curves of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag solder joints in the base case conditions (probe height: 50 μm and displacement rate: 200 $\mu\text{m/s}$).

형상을 구현하기 위해서 “Surface Evolver”를 사용하였다. 표 3은 실제 BGA 패키지를 리플로우 한 후의 스펙과 모델링한 형상의 스펙을 나타내었다. 모델링을 통해서 예측한 형상은 실제 리플로우 후 얻어진 형상과 거의 일치하였다. 이는 “Surface Evolver”가 솔더볼 형상 예측에 대단히 유용함을 나타내며, reflow 후 솔더볼의 응고과정에서 발생할 수 있는 잔류 응력 문제를 컴퓨터 시뮬레이션

에서 배제할 수 있는 하나의 방안이 될 수 있음을 확인할 수 있었다. “Surface Evolver”에서 예측된 형상은 “Curve Fitting” 프로그램을 이용하여 key point를 얻어내는데 사용되었고, 이 key point들을 이용하여 본 연구에서 사용한 유한요소 모델을 구현하였다.

솔더볼 접합부의 진단시험 시 패키지에 가해지는 응력은 인장, 전단 및 압축 응력이 혼재하는 양

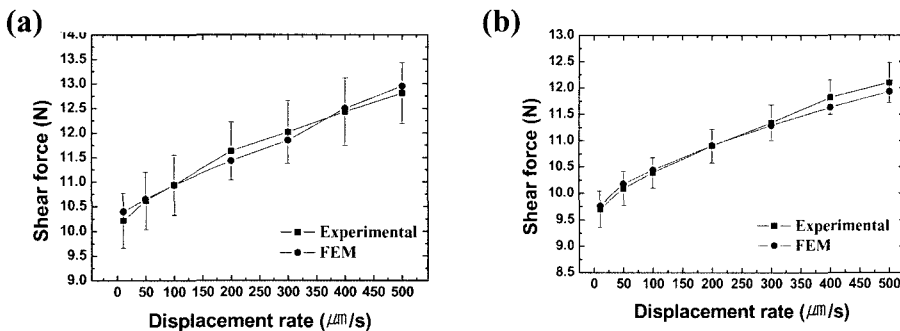
Table 3. Comparison of solder ball shape between actual and predicted models

	Sn-37Pb		Sn-3.5Ag	
	Actual	Predicted	Actual	Predicted
Solder ball diameter (μm)	53 7.4	536.7	553.9	554.7
Solder ball height (μm)	353.6	354.4	394.3	392.1
Contact angle (degree)	60. 19	61. 03	58.7	57.2

상을 보이기 때문에, BGA 솔더볼 접합부의 전단 시험 후 파괴모드를 예측하기 위해서 유한요소 해석으로부터 등가 소성 변형 분포 (equivalent plastic strain distribution)를 구하였다. 본 연구에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 가장 보편적인 전단 속도 (Displacement rate)와 전단 높이 (Probe height) 조건인 $200 \mu\text{m/s}$ 와 $50 \mu\text{m}$ 을 기준 조건으로 선택하였다. 그림 3은 기준 조건 하에서 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 전단 시험 후 등가 소성 변형 분포도와 단면사진을 보여준다. 모든 조건에서 파괴는 솔더 내에서 발생했기 때문에, 솔더 조직의 기계적 특성이 솔더 접합부의 전단강도에 절대적으로 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 또한, 등가 소성 변형은 전단 지그 (shear probe)와 솔더볼과의 접촉 부분에서 최대가 되었고, 이 후 기판부와 평행하게 퍼져 나갔다. 이는 그림 3(b)와 (d)의 실제 파면사진을 매우 잘 설명할 수 있었으며, 이로부터 본 연구에서 수행한 컴퓨터 시뮬레이션은 신뢰할 수 있는 수준임을 확인할 수 있었다.

그림 4는 1회 리플로우 한 후 기준 조건 하에서 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 전단 시험 후 얻어진 F-x 커브를 보여준다. 실험과 시뮬레이션에서 얻어진 커브 모두 초기에 전단 강도값이 급격히 증가했다가 기울기가 완만해지는 S자 형태를 나타내었다. 하지만 실험으로부터 얻어진 커브의 경우 전단이 시작되는 부위에서 약간 아래로 볼록한 형상으로 그려짐을 알 수 있었다. 이에 대한 원인은 두 가지 관점으로 생각해 볼 수 있다. 첫째로, 우선 유한요소 해석은 접촉면이 매우 작다가 점차 커질 때 발생할 수 있는 “Hertzian loading curve”의 특성을 정확히 반영하지 못하기 때문이다. “Hertzian loading curve”의 형상은 일반적으로 아래로 볼록한 형상을 가지기 때문에 그림 4에서 실험 결과로 도출된 양상이 하나의 예가 될 수 있다. 둘째로, 솔더볼 표면에 잔류하고 있는 플럭스 등과 같은 이물질이 실험값에 오차를 주었기 때문이다. 이러한 원인에도 불구하고 실험 및 시뮬레이션으로 얻어진 F-x 커브는 매우 유사하였고, 이로부터 본 연구에서 사용한 일련의 시뮬레이션 과정은 그 신뢰도가 충분히 높음을 재확인 할 수 있었다.

그림 5는 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 전단 속도에 따른 전단강도의 변화를 나타낸다. 전단 속도가 10에서 $500 \mu\text{m/s}$ 로 증가함에 따라, 두 솔더 모두 전단강도가 약 25% 증가하였다. 일반적으로 금속의 경우 인장이나 전단시험 시 시험 속도가 증가함에 따라 강도값이 증가하나, 주목해야 할 점은 솔더 접합부의 전단 속도 증가에 따른 전단강도의 증가율은 이보다 훨씬 크다는 것이다.

**Fig. 5.** Shear force variations of (a) Sn-37Pb and (b) Sn-3.5Ag solder joints with increasing displacement rate (shear height: $50 \mu\text{m}$).

전단 시험 결과 모두 솔더 내 파괴를 나타내었기 때문에, 그 원인은 솔더의 물성에서 찾는 것이 타당하다. 연구에서 전단시험 온도는 상온으로 응점이 낮은 솔더의 경우 homologous temperature가 0.5 이상이다. Nadai에 의하며, homologous temperature가 0.5 이상이면, 기계적 시험시 강도값이 크립 (creep) 특성에 영향을 받는다.¹⁴⁾ 즉, 솔더볼이 가지는 점소성 물성으로 인하여, 전단 속도가 느려질수록 시험 시간이 증가하고, 이에 따라 크립 특성이 미치는 효과도 증가하기 때문에 전단강도는 감소하였다고 사료된다.

전술한 바와 같이 JEDEC의 불전단 시험법은 지름 760 μm 의 솔더볼이 접합되어 있을 때를 기준으로 한 것이며, 기판 상으로부터 50 μm 이상 솔더볼 높이의 1/4 이하로 규정된 전단 높이는 더 작은 솔더볼을 사용한 BGA 패키지에 대한 적용은 한계가 있을 것으로 판단된다. 그림 6은 전단 높이에 따른 전단강도의 변화를 나타낸다. 실험과 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 모두에서, 전단 높이가 증가함에 따라 전단강도값은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 전단 높이가 증가함에 따라 전단 지그와 솔더볼의 접촉 면적이 좁아짐에 따른 것으로 사료되며, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과가 서로 일치함을 미루어 보아 솔더볼의 형상이나 물성에 의해서도 영향을 받는 것으로 사료된다. 양 솔더 모두 전단 높이가 10에서 120 μm 로 증가함에 따라 전단강도는 약 18%정도 감소하였는데, 이는 전단 높이 변수가 기계적 특성 평가에 큰 변수가 될 수 있음을 보여준다. 한 가지 주목해야 할

점은 두 솔더 모두, 전단 높이가 70 μm 이상일 때 시뮬레이션 결과와 실험 결과값 사이의 편차와 실험값의 표준편차 모두 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이는 전단 높이가 90 μm (솔더볼 높이의 약 1/5) 이상에서 전단 시험이 진행될 경우, 전단 지그가 솔더볼로부터 미끄러지거나 튕겨나가는 현상이 발생하기 때문으로 판단된다. 또한, 전단 높이를 증가시킬 경우 실험값의 표준편차가 증가하는 것은, 전단강도에 미치는 플럭스 잔사, 솔더볼의 불균일성 등과 같은 실험오차인자들의 영향이 증가하기 때문으로 사료된다. 이러한 실험 오차를 증가시키는 높은 전단 높이는 시험값을 얻기 위한 실험 표본을 증가시키기 때문에 전단 시험시 지양해야 할 것으로 판단된다.

그림 7은 전단 높이에 따른 Sn-37Pb 솔더 접합부의 전단 시험 시, 등가 소성 변형률 분포를 나타낸 것이다. 전단 높이가 낮을수록 하단 Ni 층 직상에 변형이 집중되었고, 전단 높이가 높을수록 솔더볼 내부에 높은 변형이 분포하였다. 즉, 전단 높이가 낮을수록 접합면에 더 많은 응력이 발생하여 상대적으로 접합 계면을 따라 파괴되는 취성 파괴의 발생 빈도가 높아질 수 있다. 하지만, 1회 리플로우 했을 경우에는, IMC 두께가 상대적으로 얇기 때문에 전단 높이에 상관없이 연성 파괴를 나타내었다.

그림 8은 150°C에서 100 시간동안 시효한 후 낮은 전단 높이 (10 μm)에서 전단 시험 후 얻은 파면 사진이다. 파괴모드는 연성파괴와 취성파괴가 혼재된 혼합파괴모드를 나타내었다. 전술한 바와 같

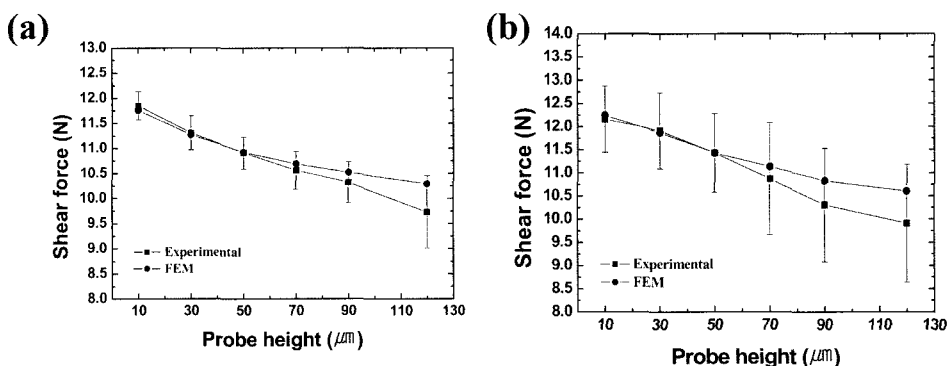


Fig. 6. Shear force variations of (a) Sn-37Pb and (b) Sn-3.5Ag solder joints with increasing shear height (displacement rate: 200 $\mu\text{m}/\text{s}$).

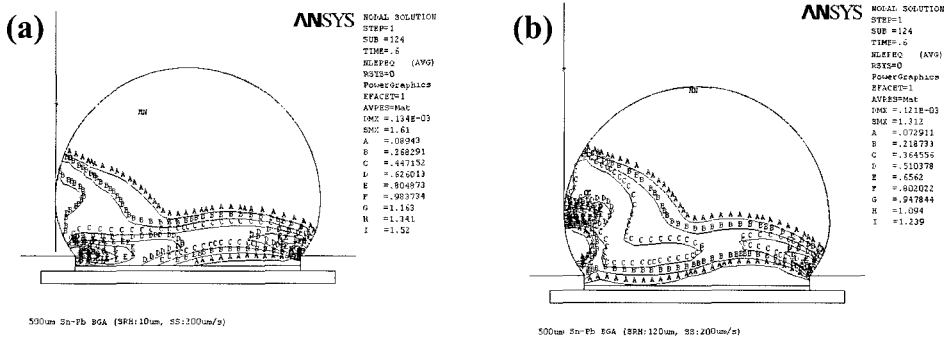


Fig. 7. Distributions of averaged equivalent plastic strain after shear test simulation of Sn-37Pb solder joints at probe heights of (a) 10 μm and 120 μm.

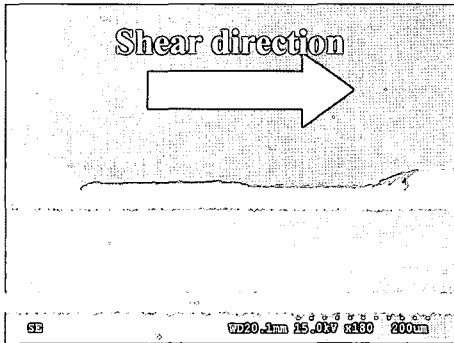


Fig. 8. Cross-sectional view of Sn-37Pb solder joint aged at 150°C for 100 h after shear test at probe height of 10 μm.

당하다면, 이러한 파괴가 빈번히 발생하는 시험 조건이 최적 조건이라고 할 수 있다. 200 μm/s의 전단 속도에서 50과 10 μm의 전단 높이에서 전단 시험한 결과, 이러한 취성 파괴는 30%에서 65%로 증가하였다. 전단시험의 경우 side wall effect로 인하여, 계면에 금속간 화합물의 생성으로 인하여 충분히 취약해졌음에도 불구하고, 연성 파괴를 나타내는 문제점을 안고 있다.¹³⁾ 따라서 500 μm 솔더볼을 사용하는 BGA의 경우, JEDEC에서 추천하는 범위보다 낮은 전단 높이 (본 연구에서는 10 μm)로 시험하는 것이 이러한 문제점을 최소화할 수 있는 방안으로 판단된다.

이, 시효 후 계면에 생성된 취약한 금속간화합물들로 인하여 취성 파괴가 일어나는 하는 것이 타

3.2 리플로우 회수에 따른 기계적 · 전기적 특성

그림 9는 리플로우 회수에 따른 Sn-37Pb와 Sn-

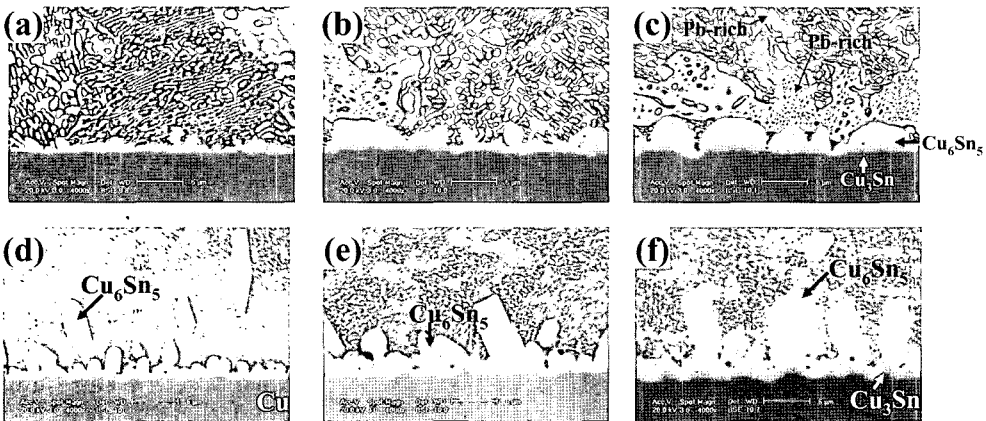


Fig. 9. SEM micrographs of the solder/substrate interface after (a,d) 1, (b, e) 3, (c, f) 10 reflows: (a-c) Sn-37Pb and (d-f) Sn-3.5Ag.

3.5Ag 솔더 접합부의 미세조직을 관찰한 SEM 사진이다. 솔더와 기판 사이에는 scallop 형태의 Cu_6Sn_5 와 매우 얇은 Cu_3Sn 층들이 형성된 것을 관찰할 수 있었다. 리플로우 회수가 증가함에 따라 이 두 금속간 화합물 층의 두께는 증가하였다.

두 이종 금속 사이에 형성된 반응층의 두께는 일반적으로 식 (2)와 같은 simple power-law 방정식을 따른다.

$$W = kt^n \tag{2}$$

W는 반응층의 두께, k는 성장속도상수, n은 time exponent, t는 반응 시간을 의미한다. 그림 10와 같이 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn 금속간 화합물 층의 총 두께는 리플로우 시간의 1/3승에 비례하여 증가하였다. Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 성장속도상수 값은 각각 $4.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 와 $5.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 이었다. Sn-3.5Ag가 Sn-37Pb보다 Sn 농도와 리플로우 온도가 높기 때문에, Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 성장속도상수가 더 높은 것으로 판단된다. 두 솔더 접합부의 상관계수 모두 0.99 이상이었으며, 이는 10회 리플로우 동안에 같은 확산 기구에 의해서 금속간화합물이 성장했음을 보여준다.

일정한 온도 하에서 time exponent는 식 (3)같이 나타낼 수 있다.

$$\ln W = n \ln t + \ln A \tag{3}$$

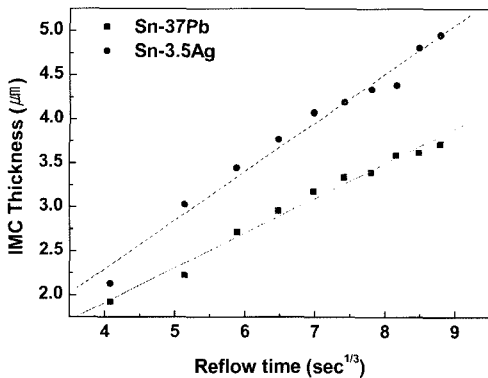


Fig. 10. The total thickness of Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn IMCs formed at the Sn-37Pb/Cu and Sn-3.5Ag/Cu interfaces.

여기서 W는 금속간 화합물의 성장 두께, n은 time exponent, t는 반응 시간, A는 상수를 나타낸다. $\ln W$ 와 $\ln t$ 사이의 기울기 값에 의해서 time exponent (n)값을 얻을 수 있다. 양 솔더 모두 식 (3)을 사용하여 얻어진 time exponent는 약 0.31이었다. 일반적으로 growth kinetics가 IMC 층을 통한 체확산 (volume diffusion)에 의해 결정될 때에는 time exponent 값이 0.5이며, 계면에서의 반응속도에 의존될 때에는 time exponent 값이 1이다. 하지만, 본 연구에서 time exponent는 이러한 이론적 값과 다른 1/3에 가까웠다. Bader는 Sn-37Pb와 Cu 사이의 액상/고상 계면반응의 time exponent는 1/3이며, 이는 반응 시간이 증가함에 따라 계면에 생성된 scallop 형태의 Cu_6Sn_5 금속간 화합물이 조대 화 됨에 따라 확산 경로인 결정립계의 부피가 작아지기 때문이라고 보고하였다.¹⁵⁾ 본 연구결과는 Bader의 연구결과와 잘 일치하였다.

그림 11은 리플로우 회수에 따른 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 전단 강도를 나타낸 결과이다. 전단 강도는 리플로우 회수가 3~4회까지 증가할 때까지 증가했다가, 그 이후로는 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 전단 강도 변화의 원인을 관찰하기 위해서, 전단 시험 후 파면을 관찰하였다. 그림 12는 1회와 10회 리플로우한 Sn-3.5Ag 솔더 접합부를 전단시험 후 관찰한 파면 사진이다. 모든 조건에서 솔더 내 파괴를 나타내었으나, 1리플로우에서 관찰할 수 없었던 Cu_6Sn_5 금속간화합물들이 10회 리플로우 후 파면에서 관찰되었다. 사전 실험에 의하면, 리플로우 회수가 증가함에

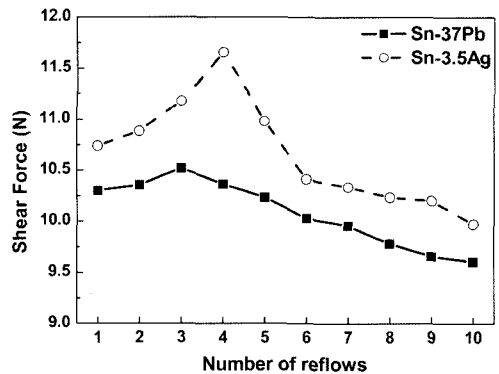


Fig. 11. Shear force variations of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag solder joints with the number of reflows.

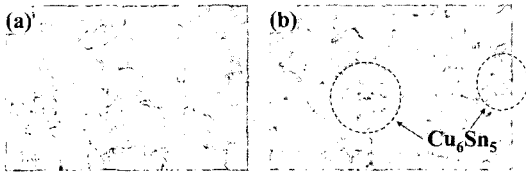


Fig. 12. Fracture surfaces of the shear-tested Sn-3.5Ag solder joints after (a) 1 and (b) 10 reflows.

따라 솔더 내로 유입되는 Cu와 spalling 되는 Cu_6Sn_5 금속간 화합물 양의 증가와 Cu_6Sn_5 금속간 화합물 상의 조대화를 관찰할 수 있었다.⁹⁾ 일반적으로, 솔더 내로 유입된 금속간 화합물의 결정립 크기와 양은 복합 재료의 기계적 특성에 충분히 영향을 끼친다.¹⁶⁾ 따라서, 3~4회 리플로우 이후의 전단강도의 감소는 솔더 내로 유입된 Cu_6Sn_5 금속간 화합물의 양과 크기의 증가로 인한 것으로 판단된다. 또한, Sn-Ag 솔더 접합부의 경우 Sn-Pb보다 리플로우 온도가 더 높기 때문에 이러한 현상이 더욱 커진 것으로 판단된다.

그림 13은 리플로우 회수 증가에 따른 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 전기 비저항을 측정된 결과이다. 솔더 자체의 전기적 물성으로 인하여, Sn-37Pb 솔더 접합부의 전기 비저항이 높았다. 리플로우 회수가 증가함에 따라 두 솔더 접합부 모두 전기 비저항이 증가하는 것을 관찰할 수 있었는데, 이에 대한 원인은 다음과 같다. 일반적으로 금속간 화합물의 전기적 특성은 솔더 보다 떨어지기 때문에, 리플로우 회수의 증가에 따른 계면에 형성된 금속간 화합물 층 두께 증가는 솔더 접합

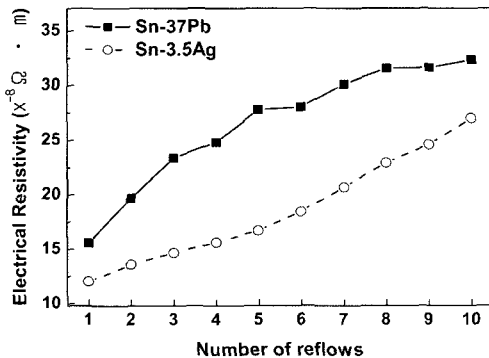


Fig. 13. Electric resistivity of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag solder joints with the number of reflows.

부의 전기적 특성을 저하시키는 것으로 사료된다. 리플로우 회수 증가에 따라 솔더 내로 유입된 Cu와 Cu_6Sn_5 금속간 화합물의 양의 증가는 전자의 이동을 방해하여 전기 비저항 값을 증가시켰을 것으로 판단된다. 본 실험에서 2회 이후의 리플로우는 무플럭스 공정으로 행해졌기 때문에 리플로우 회수 증가에 따라 솔더 접합부의 표면이 불균일해졌다. 또한, 이러한 표면의 불균일성의 증가는 전자의 흐름을 방해시켰을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전단 속도와 높이를 달리하여 Sn-37Pb 솔더와 Sn-3.5Ag 솔더 접합부의 전단 시험을 실시하여, 전단강도와 파면의 변화를 관찰한 동시에 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 검증을 통하여, 전단 특성의 변화를 연구하여 최적의 시험 조건을 얻고자 하였다. 또한, 리플로우 회수를 달리하여 두 솔더 접합부의 기계적·전기적 특성의 변화를 연구하였다.

Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더와 전해 Ni/Au 도금된 BGA 기판을 리플로우한 후, 두 솔더 접합 계면에는 Ni_3Sn_4 금속간화합물이 생성된 것을 관찰할 수 있었다. 또한, Sn-37Pb 솔더 접합부를 고온시효한 결과 솔더와 Ni_3Sn_4 금속간 화합물 층 사이에 취약한 $(\text{Au},\text{Ni})\text{Sn}_4$ 금속간화합물 층이 생성되었다. 전단 속도를 증가시키에 따라 가공경화 효과와 솔더의 크립 특성 저하로 인하여 전단 강도는 증가하였다. 전단 높이를 감소시키에 따라서 전단 강도값은 증가하였고 표준 편차는 감소하였다. 특히 취약한 솔더 접합부의 경우, 취성 파괴모드 비율이 증가하였다. 이러한 취성 파괴 모드 구별의 명확성으로 인하여 낮은 전단 높이 조건 하에서의 시험이 이상적인 시험 조건으로 판단된다.

Cu 기판을 이용한 기계적·전기적 특성 평가 시험에서, 리플로우 회수 증가에 따라 계면에 생성된 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn 금속간 화합물 층의 두께가 리플로우 시간의 1/3 승에 비례하여 증가하였다. 전단 시험 결과, 3~4회 리플로우까지 전단강도는 증가하였고, 그 이후 감소하는 경향을 나타내었다. 리플로우 회수가 증가함에 따라 솔더 접합부의 전기적 특성은 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI 04-03-04) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. J. Baffett, "Electronic systems packaging: future reliability challenges", *Microelectron. Reliab.* 38, 1277 (1998).
2. J. M. Koo, Y. H. Lee, S. K. Kim, M. Y. Jeong, and S. B. Jung, "Mechanical and Electrical Properties of Sn-3.5Ag Solder/Cu BGA Packages during Multiple Reflows", *Key. Eng. Mat.* 297, 801 (2005).
3. L. Zhang, G. Subbarayan, B. C. Hunter, and D. Rose, "Response surface models for efficient, modular estimation of solder joint reliability in area array packages" *Microelectron. Reliab.* 45, 623 (2005).
4. S.Y. Jang, J. Wolf, O. Ehrmann, H. Gloor, T. Schreiber, H. Reichl, and K. W. Paik, "Pb-free Sn/3.5Ag electroplating bumping process and under bump metallization (UBM)", *IEEE T. Compon. Pack. T.* 26, 245 (2003).
5. N. Duan, J. Scheer, J. Bielen, and M. van Kleef, "The influence of Sn-Cu-Ni(Au) and Sn-Au intermetallic compounds on the solder joint reliability of flip chips on low temperature co-fired ceramic substrates", *Microelectron. Reliab.* 43, 1317 (2003).
6. Paul S. Ho, Guotao Wang, Min Ding, Jie-Hua Zhao, and Xiang Dai, "Reliability issues for flip-chip packages" *Microelectron. Reliab.* 44, 719 (2004).
7. J. W. Kim, J. M. Koo, W. B. Lee, W. C. Moon, Y. M. Yeon, C. C. Shur, and Seung-Boo Jung, "Standardization of the Important Test Parameters in the Solder Ball Shear Test for Evaluation of the Mechanical Joint Strength" *Int. J. of Korean Welding Society* 5, 15 (2005).
8. K. N. Tu, A. M. Gusak, and M. Li, "Physics and materials challenges for lead-free solders", *J. Appl. Phys.* 93, 1335 (2003).
9. J. M. Koo, and S. B. Jung, "Effect of substrate metallization on mechanical properties of Sn-3.5Ag BGA solder joints with multiple reflows", *Microelectron. Eng.* In Press.
10. J. W. Kim, and S. B. Jung, "Experimental and finite element analysis of the shear speed effects on the Sn-Ag and Sn-Ag-Cu BGA solder joints", *Mat. Sci. Eng. A.* 371, 267 (2004).
11. J. W. Kim, and S. B. Jung, "Characterization of the shear test method with low melting point In-48Sn solder joints", *Mat. Sci. Eng. A.* 397, 145 (2005).
12. C. E. Ho, Y. M. Chen, and C. R. Kao, "Reaction kinetics of solder-balls with pads in BGA packages during reflow soldering", *J. Electron. Mater.* 28, 1231 (1999).
13. R. J. Coyle, A. J. Serafino, and P. P. Solan, "Ball shear versus ball pull test methods for evaluating interfacial failures in area array packages Electronics", *Manufacturing Technology Symposium*, 200 (2002).
14. A. Nadai, "Theory of Flow and Fracture of Solids", McGraw-Hill, New York (1950).
15. S. Bader, W. Gust, and H. Hieber, "Rapid formation of intermetallic compounds by interdiffusion in the Cu-Sn and Ni-Sn systems", *Acta Metall. Mater.* 43, 329 (1995).
16. C. R. Barrett, W. D. Nix, and A. S. Teelman, "The Principles of Engineering Materis", Prentice-Hall, New Jersey (1973).