

BGA 솔더 접합부의 기계적 · 전기적 특성에 미치는 리플로우 횟수의 효과

구자명 · 이창용 · 정승부*

성균관대학교 신소재공학부

Effect of Reflow Number on Mechanical and Electrical Properties of Ball Grid Array (BGA) Solder Joints

Ja-Myeong Koo, Chang-Yong Lee and Seung-Boo Jung*

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

초 록: 본 연구에서는 리플로우 횟수를 달리하여 Sn-37Pb, Sn-3.5Ag와 Sn-3.5Ag-0.75Cu (all wt.%) BGA 솔더 접합부들을 OSP가 코팅된 Cu 패드 상에 형성시킨 후, 기계적·전기적 특성을 연구하였다. 주사전자현미경 분석 결과, 접합 계면에 생성된 Cu_6Sn_5 금속간화합물 층의 두께는 리플로우 횟수가 증가함에 따라 증가하였다. Sn-Pb와 Sn-Ag-Cu 솔더 접합부의 경우, 3회 리플로우 후 최대 전단 강도를 나타내었으며, Sn-Ag 솔더 접합부의 경우 4회 리플로우 후 최대 전단 강도를 나타내었다. 이후 리플로우 횟수가 10회까지 증가함에 따라 전단 강도는 점차 감소하였다. 리플로우 횟수가 증가함에 따라 전기적 특성은 점차 감소하였다.

Abstract: In this study, the mechanical and electrical properties of three different ball grid array (BGA) solder joints, consisting of Sn-37Pb, Sn-3.5Ag and Sn-3.5Ag-0.75Cu (all wt.%), with organic solderability preservative (OSP)-finished Cu pads were investigated as a function of reflow number. Based on scanning electron microscopy (SEM) analysis results, a continuous Cu_6Sn_5 intermetallic compound (IMC) layer was formed at the solder/substrate interface, which grew with increasing reflow number. The ball shear testing results showed that the shear force peaked after 3 reflows (in case of Sn-Ag solder, 4 reflows), and then decreased with increasing reflow number. The electrical property of the joint gradually decreased with increasing reflow number.

Keywords: Ball grid array (BGA), ball shear test, interfacial reaction, intermetallic compound (IMC), Sn-37Pb, Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.75Cu, Pb-free (lead-free) solder, organic solderability preservative (OSP)

1. 서 론

가전제품의 고급화, 복합화, 고성능화 및 소형화 추세에 따라 고성능 마이크로프로세서와 대용량 저장 매체의 설계 및 제조 기술뿐만 아니라 전기적 · 기계적 · 열적 성능이 우수한 전자 패키징 기

술 개발의 필요성이 새롭게 대두되고 있다. BGA (ball grid array), CSP (chip scale package) 및 플립 칩과 같은 면실장 방식의 전자 패키징 기술은 기존의 wire bonding 및 QFP (quad flat package)와 같은 주변실장 방식 대비 전기적 특성 및 방열 특성이 우수하고, 다핀화 및 경박단소화가 유리한 장

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

접을 가지고 있어, 그 수요가 최근 증가하고 있는 추세이다.¹⁾ 일반적인 면실장 기술의 경우, 기계적으로 IC 칩을 지지하는 동시에 전기적 신호 및 열 방출 통로의 역할을 담당하는 솔더 접합부의 기계적·전기적 특성은 제품의 성능과 수명을 결정하는 매우 중요한 요소이다.²⁾

BGA 패키지를 실장하기 위한 리플로우 공정 중에, 솔더와 기판 사이의 접합 계면에는 금속간 화합물이 생성 및 성장하게 된다. 일반적으로, 리플로우 공정은 다중 실장 (multi-assembly), 수리 (rework)와 재정렬 (re-alignment) 공정 등으로 인하여 2회 이상의 리플로우 공정이 요구된다.^{2,3)} 얇게 생성된 금속간화합물 층은 건전한 접합부 형성에 필수적이지만, 임계 두께 이상으로 과잉 생성된 금속간화합물 층은 취약해서 접합 강도 저하의 주요 원인으로 작용한다.^{2,4)} 또한 금속간화합물은 저항이 일반적으로 높기 때문에, 접합 계면의 전기적 특성을 감소시키는 원인으로 작용할 수 있다. OSP (organic solderability preservative) 처리는 공정이 간단하고 제조단가가 저렴하기 때문에 최근 각광을 받고 있는 표면처리 기술이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 조성의 솔더볼을 OSP 처리한 BGA (ball grid array) 기판 상에 실장한 후, 멀티 리플로우 공정에 따른 접합부의 기계적·전기적 특성의 변화를 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비 및 리플로우 공정

본 연구에서는 지름이 500 μm 이고 Sn-37Pb, Sn-3.5Ag와 Sn-3.5Ag-0.75Cu (all wt.%)와 같이 세 가지 조성의 솔더볼을 사용하였으며, 상부와 하부 기판은 각각 0.8 mm와 1.6 mm 두께의 FR-4 기판을 사용하였다. 솔더 접합 패드는 SMD (solder mask defined) 타입으로 설계하였으며, 패드 개구부의 지름, 피치 크기와 솔더 마스크의 높이는 각각 460 μm , 2 mm와 20 μm 이었다. 구리 패드는 리플로우와 보관 중에 표면 산화를 방지하기 위해서, 기판 제조 시에 OSP 처리를 수행하였다.

계면 관찰과 볼 전단 시험용 시편과 전기 저항 측정용 시편으로 두 종류의 시편을 제작하였다. 리플로우 공정은 별도의 기판 표면 세정 공정없이 수행하였다. 솔더볼과 상부 기판에 RMA (rosin

mildly activated) 플럭스를 도포한 후, 리플로우 하여 솔더볼을 ball attach한 후, 플럭스 세척제를 사용하여 세정하였다. 계면 관찰과 볼 전단 시험용 시편의 경우, 이후 10회까지 멀티 리플로우를 수행하였다. 전기 저항 측정용 시편의 경우, 상부 기판과 하부 기판에 다시 플럭스를 도포한 후 정렬하여 리플로우 하여 die-attach를 수행한 후 세정하여 BGA 패키지를 완성하였다. 완성된 BGA 패키지는 멀티 리플로우를 수행하였다. 1회 리플로우까지는 플럭스를 사용하였지만, 이후에는 플럭스 도포 공정 없이 리플로우 공정만 수행하였다. 모든 리플로우 공정은 대기 중에서 수행되었다. 사용한 리플로우 머신은 적외선 방식의 4존 리플로우 머신 (RF-430-N2, Japan Pulse Laboratory Ltd. Co., Japan)이었으며, 온도 프로파일은 그림 1과 같았다. Sn-Pb 솔더와 Sn-Ag-(Cu) 솔더의 리플로우 최고 온도는 각각 225°C와 255°C이었으며, 리플로우 시간은 각각 70 초와 60초이었다.

2.2 접합부 단면 관찰

리플로우 공정을 마무리한 후, 솔더 접합부를 수직으로 고정하기 위해서, 에폭시 수지를 사용하여 마운팅 (mounting)하였다. 마운팅된 시편은 연마지와 알루미늄 파우더를 사용하여 접합부 단면이 노출되도록 폴리싱을 실시하였다. 폴리싱된 플립 칩 범프 단면은 특정한 에칭 공정 없이 백금 코팅한 후, 주사전자현미경 (SEM: scanning electron microscopy)의 후방산란전자이미지 (BSI: back-scattered electron image) 모드를 사용하여 접합부 단면을 관찰하였다.

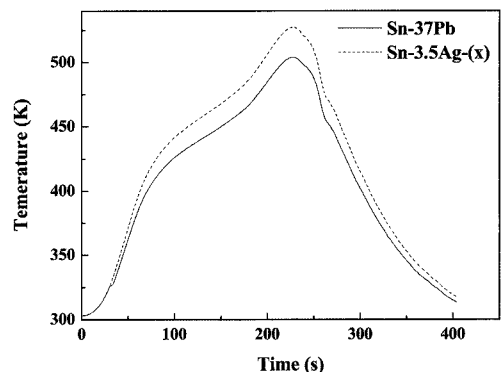


Fig. 1. Temperature profile used in this study.

2.3 전단 시험 및 파면 관찰

리플로우 횟수 및 솔더의 조성을 달리하여 실장된 BGA 패키지는 상온 시효 효과를 최소화하기 위해서, 리플로우 후 3,600±600 초 후에 접합 시험기 (PTR-1000, Rhesca Co., Japan)를 사용하여 볼전단 시험을 실시하였다. 전단 시험은 JEDEC 규격 (JESD22-B117)을 따라 수행하였다. 최대 측정 하중이 5 kgf인 로드셀은 측정 전에 1 kgf 표준 분동을 사용하여 교정하였다. 전단 속도와 높이는 각각 0.2 mm/s와 50 μm로 고정하였다.

전단 강도 변화의 원인을 관찰하기 위해서 전단 시험 후 파단면을 SEM을 사용하여 관찰하였으며, 에너지 분산형 X-선 분광기(EDS: energy dispersive X-ray spectroscopy)를 사용하여 파단면을 분석하였다.

2.4 전기적 특성 평가

리플로우 횟수 및 솔더 조성에 따른 전기적 특성을 평가하기 위해서, 20개의 솔더볼을 daisy-chain으로 연결하여 그 저항을 측정하고자 하였다. 솔더볼 20개와 이를 서로 연결하는 19개의 Cu

interconnection으로 daisy-chain을 구성하였다. 전류를 0.01 A에서 0.1 A로 증가시키면서 전압을 측정하여, 그 기울기를 통하여 전기 저항을 측정하였다. 측정된 전기 저항은 식(1)을 이용하여 솔더 접합부의 전기 비저항 (ρ)을 측정하였다.

$$\rho = \frac{(R_T - R_i) \times A}{n \times l} \quad (1)$$

여기서, R_T , R_i , A , n 과 l 은 각각 측정된 전체 전기저항, Cu interconnection의 전체 저항, 접합 패드의 면적, 솔더 접합부의 수, 솔더 접합부의 높이이었다. Cu interconnection은 하나의 interconnection의 저항을 측정 후 19를 곱하여 전체 interconnection의 저항으로 환산하였으며, 패드의 면적은 0.166 mm²으로 고정하였으며, 접합부의 높이는 SEM 단면 사진을 통해서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세구조 관찰

그림 2는 리플로우 횟수와 솔더 조성에 따른 솔

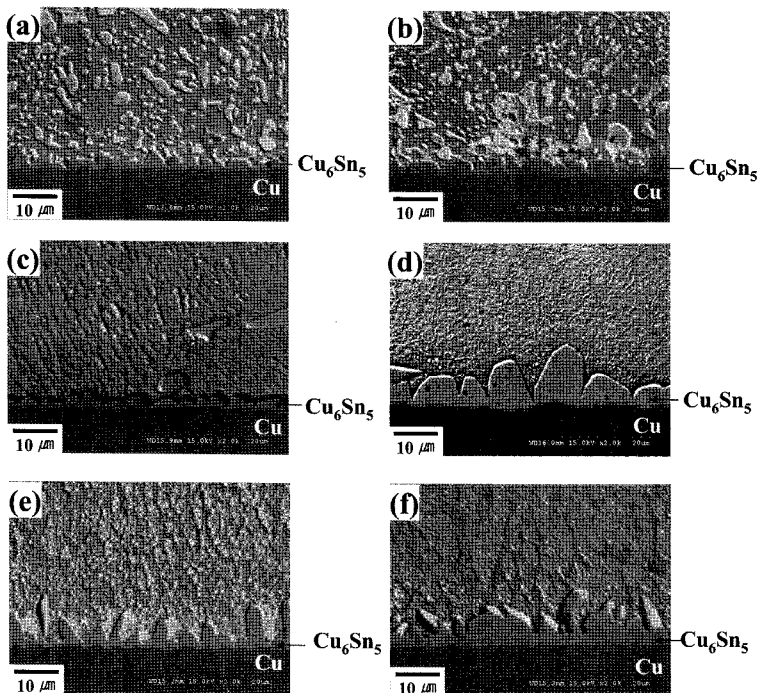


Fig. 2. Cross-sectional SEM micrographs of the solder/substrate interface after 1 reflow (a,c,e) and 10 reflows (b,d,f): Sn-37Pb (a,b), Sn-3.5Ag (c,d) and Sn-3.5Ag-0.75Cu (e,f).

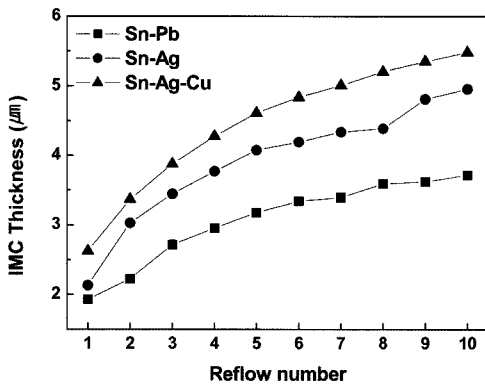


Fig. 3. IMC thickness formed at the solder/substrate interface of Sn-37Pb, Sn-3.5Ag and Sn-3.5Ag-0.75Cu solder joints on OSP-finished BGA substrate with increasing reflow number.

더 접합 계면의 변화를 관찰한 SEM 사진을 보여 준다. 리플로우 후, Sn-Pb 솔더는 Sn-rich와 Pb-rich 상들의 공정 조직을 형성하였으며, Sn-Ag-(x) 솔더는 Sn-rich와 Ag_3Sn 상들의 공정 조직으로 이루어져 있었다. 솔더 구성에 관계없이, 솔더와 Cu 기판 사이의 접합 계면에는 연속적인 Cu_6Sn_5 금속간화합물 층이 관찰되었으며, 그 층의 두께는 리플로우 횟수가 증가함에 따라 증가하였다.

그림 3은 리플로우 횟수가 증가함에 따른 솔더와 기판 사이에 생성된 금속간화합물 층의 두께를 측정된 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이, 리플로우 횟수가 증가함에 따라 금속간화합물 층의 두께는 증가함을 보였다. 1회 리플로우 후, Sn-Pb, Sn-Ag, Sn-Ag-Cu 솔더 접합부에 생성된 금속간화합물 층의 두께는 각각 $1.9\ \mu\text{m}$, $2.1\ \mu\text{m}$ 와 $2.6\ \mu\text{m}$ 이었으며, 10 회 리플로우 후 각각 $3.7\ \mu\text{m}$, $5.0\ \mu\text{m}$ 와 $5.5\ \mu\text{m}$ 두께로 성장하였다. Sn-Ag-Cu, Sn-Ag와

Sn-Pb 순으로 금속간화합물 성장속도가 빨랐다. 이는 Sn-Ag 합금계 솔더가 Sn-Pb 합금 솔더보다 공정온도와 Sn의 함량이 더 높았고, Sn-Ag 솔더보다 Sn-Ag-Cu 솔더의 용점이 더 낮기 때문으로 판단된다. Cu-Sn 이원계 상태도에 따르면, 255°C 에서 용융된 Sn 내에 약 수 wt.%의 Cu가 용해될 수 있다. 사전 연구에 따르면, 이와 같은 Sn계 솔더의 높은 Cu 용해도에 의해서, 기판 또는 금속간화합물 층의 Cu는 리플로우 중에 계속적으로 솔더 내로 용해되어, 리플로우 횟수가 증가함에 따라 솔더 내의 Cu의 농도는 증가함을 보였다.⁵⁾ Sn-Ag-Cu 솔더의 경우 솔더에 포함된 Cu로 인하여 이러한 용해량이 감소되었기 때문에, 금속간화합물 층의 성장 속도가 가장 빨랐던 것으로 사료된다.

그림 4는 각 솔더별로 10회 리플로우 후, 솔더볼의 단면을 관찰한 SEM 사진이다. 솔더 구성에 관계없이, 솔더볼 내에는 공정 조직뿐만 아니라 Cu_6Sn_5 금속간화합물도 관찰되었다. 이는 리플로우 중에 솔더볼 내로 용해된 Cu가 냉각 중에 고용도의 감소에 따라 석출되었을 것으로 사료된다. Pb-Sn 이원계 상태도에 따르면, Sn-Pb 합금의 공정 조성은 Sn-38.1 wt.% Pb이다.⁶⁾ 하지만, Cu_6Sn_5 금속간화합물 형성에 따른 Sn의 소모로 인하여, Sn-rich 아공정 솔더인 Sn-37Pb 솔더볼은 10 회 리플로우 후 Pb-rich 과공정 조직으로 변화하였다. Sn-Ag-Cu 솔더의 경우 Sn-Ag 솔더보다 더 미세한 초정 Sn-rich 상이 생성되었다. 이는 소량의 Cu 첨가로 조직 미세화 효과를 가질 수 있다는 참고문헌과 일치함을 보였다.⁷⁾

3.2. 파면 관찰

전단 시험 시 파괴는 가장 약한 층이나 계면에서 발생하며, 이는 솔더 접합부의 기계적 특성에

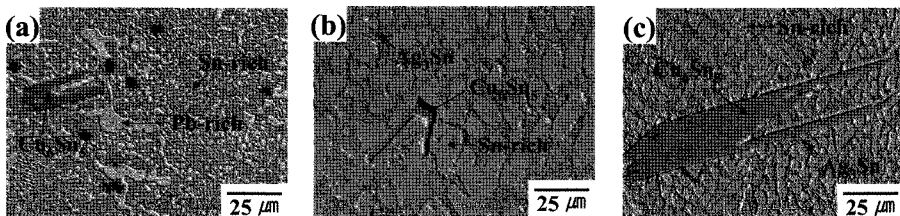


Fig. 4. Cross-sectional SEM micrographs of Sn-37Pb (a), Sn-3.5Ag (b) and Sn-3.5Ag-0.75Cu (c) solder balls after 10 reflows on the OSP-finished Cu BGA substrate.

영향을 끼치게 된다. 따라서 파괴 모드 분석은 볼전단 시험 시 중요한 평가 기준으로서 활용될 수 있다. 그림 5는 리플로우 횟수 증가에 따른 Sn-Ag BGA 솔더 접합부의 전단 시험 후의 파면을 관찰한 SEM 사진을 보여준다. 리플로우 횟수가 4회 이하일 경우에는 솔더 내에서 파괴가 발생하는 연성 파괴가 관찰되었으나, 이후 리플로우 횟수가 증가함에 따라 점차 금속간화합물 층에서 파괴가 발생하는 취성 파괴의 면적이 점차 증가하였다.

3.3. 접합 강도

그림 6은 솔더의 조성과 리플로우 회수에 따른 전단 강도의 변화를 보여준다. Sn-Pb와 Sn-Ag-Cu 솔더의 경우 3회 리플로우 후 가장 높은 강도 값을 나타내었고, 이후 리플로우 횟수가 증가함에 따라 점차 감소하였으며, Sn-Ag 솔더의 전단 강도의 경우 4회 리플로우 후 가장 높았다. 초기 리플로우 횟수가 증가함에 따라 솔더볼의 기계적 특성이 향상된 이유는, 리플로우 횟수가 증가함에 따라 솔더 내로 유입되는 Cu의 양이 증가하였기 때문에, Cu₆Sn₅의 양의 증가에 따른 석출 경화 효과에 의한 것으로 판단된다.⁵⁾ Sn-Pb, Sn-Ag, Sn-Ag-Cu 솔더의 최고 강도 값은 각각 10.5 N, 11.7 N, 12.3 N이었다. Sn-Ag-(Cu) 솔더의 경우 Ag₃Sn의 석출 경화 효과에 의해서 Sn-Pb 솔더 대비 높은 강

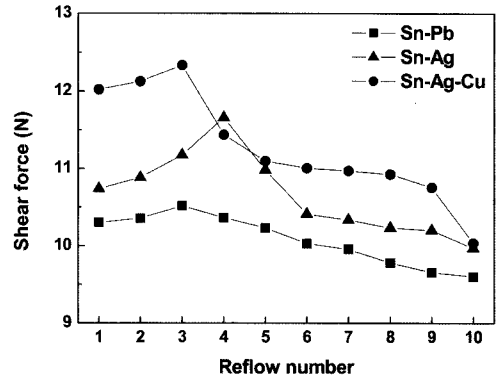


Fig. 6. Shear force variations of the Sn-37Pb, Sn-3.5Ag and Sn-3.5Ag-0.75Cu solder joints on the OSP-finished Cu BGA substrate with increasing reflow number.

도 값을 나타내었다. Sn-Ag-Cu 솔더의 경우, 솔더 내에 기 존재하는 Cu의 고용 강화 효과와 Cu₆Sn₅에 의한 석출 경화 효과로 인해, Sn-Ag 솔더보다 기계적 특성이 더 우수했던 것으로 판단된다. 또한 그림 4에서 관찰된 바와 같이, Sn-Ag-Cu 솔더의 결정립 크기가 Sn-Ag 솔더의 것보다 작았기 때문에 Hall-Petch 효과에 의해 기계적 특성이 향상된 것으로 사료된다.⁷⁾

금속간화합물 층의 성장에 따른 솔더 접합부의

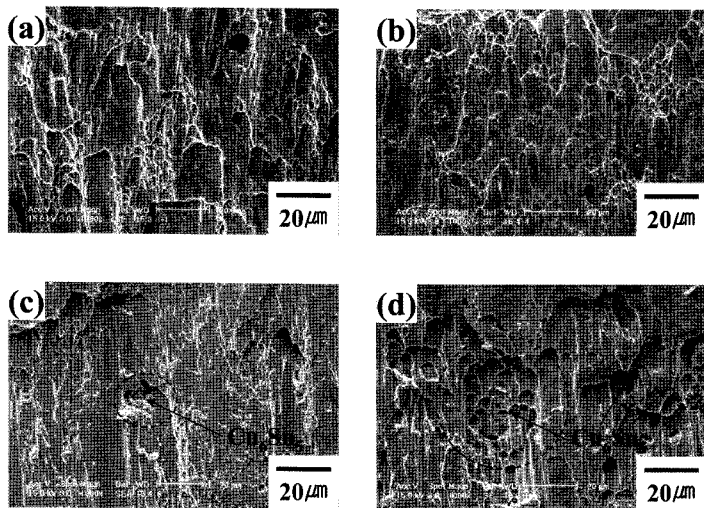


Fig. 5. Fracture surfaces of the Sn-3.5Ag solder joints on OSP-finished Cu BGA substrate after 1 (a), 4 (b), 5 (c) and 10 (d) reflows.⁹⁾

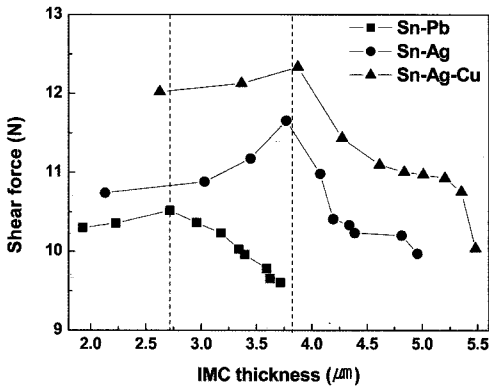


Fig. 7. Relationship between the shear force and IMC thickness.

기계적 특성의 변화를 관찰하기 위해서, 그림 7과 같이 금속간화합물 층의 두께에 따른 전단 강도의 변화를 도시하였다. Sn-Pb 솔더의 경우 금속간화합물 층의 두께가 약 2.7 μm 이상 성장하였을 때 기계적 특성이 저하되었으며, Sn-Ag와 Sn-Ag-Cu 솔더의 경우 약 3.8 μm 이상 성장하였을 때 기계적 특성이 감소하였다. Sn-Ag-(Cu) 솔더의 경우 Sn-Pb 솔더보다 비록 금속간화합물의 성장속도는 빨랐지만, 취성 임계 두께가 높았다. 이는 솔더 기본 조성에 따라 솔더 접합부의 강도 값을 저하시키기 시작하는 임계 금속간화합물 층의 두께가 존재함을 의미한다. 일반적으로, 응력에 의한 변형이 발생할 때, 가공 경화 효과에 의해서 솔더 접합부는 강화된다.⁸⁾ 하지만 취성 파괴는 균열이 쉽게 생성 및 전파되기 때문에 솔더의 가공 경화 효과를 감소시키게 되고, 이에 따라 연성은 물론 전단 강도를 감소시키는 원인으로 작용했음은 자명하다.

3.4 솔더 접합부의 비저항 특성

솔더 접합부만의 전기적 특성을 평가하기 위해서, 먼저 Cu interconnection의 전기 저항을 측정하였다. 그림 8은 리플로우 횟수가 증가함에 따라 Cu interconnection의 전기 저항의 변화를 측정할 결과이다. 리플로우 횟수가 증가함에 따라 Cu interconnection의 저항은 점차 감소하여, 1회에서 10 회로 리플로우 횟수를 증가시켰을 때 약 3% 감소함을 보였다. 99.999 wt.% Cu의 재결정 온도는 120°C이다.⁹⁾ 본 연구에서는 255°C에서 리플로우를 수행하였기 때문에, 리플로우 중에 Cu inter-

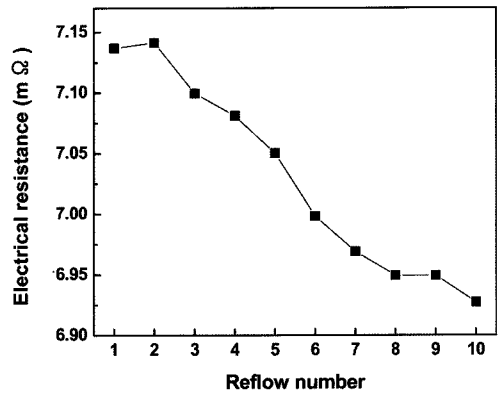


Fig. 8. Electrical resistance of the Cu interconnection with increasing reflow number.

connection 조직의 회복, 재결정 및 결정립 성장에 의해서 전기적 특성이 증가하였을 것으로 사료된다.

그림 9는 리플로우 횟수와 솔더 조성에 따른 솔더 접합부의 전기 비저항의 변화를 보여준다. 순수한 Sn-37Pb와 Sn-3.5Ag 솔더의 전기 비저항은 각각 $1.45 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 와 $1.23 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 이다.¹⁰⁾ 리플로우 후 솔더 내로의 Cu의 혼입과 패드 저항의 반영 등의 요인으로 인하여 약간의 오차가 발생하였다. 일반적으로 금속간 화합물의 전기적 특성은 금속에 비해서 낮다. 문헌에 의하면, Cu_6Sn_5 의 전기 비저항은 $1.75 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 이다.¹¹⁾ 이에 따라, 리플로우 횟수 증가에 따른 금속간화합물 층의 성장은 솔더 접합부의 전기적 특성을 저하시켰을 것으로 판단된다. 솔더 내 용질 원자 고용에 따른 전기비저항

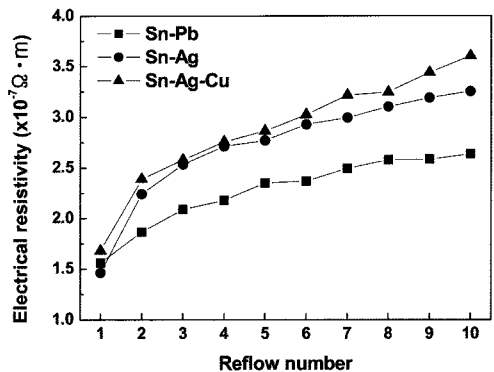


Fig. 9. Electrical resistivity of the Sn-37Pb, Sn-3.5Ag and Sn-3.5Ag-0.75Cu solder joints on the OSP-finished Cu BGA substrate with increasing reflow number.

의 변화를 연구한 논문은 아직까지 보고된 바 없지만, 일반적으로 기지 내에 불순물 원자가 고용될 경우 전기 비저항은 증가함을 보인다.¹²⁾ 또한 사전 연구에 따르면, 리플로우 횟수가 증가함에 따라, 솔더 표면 산화량이 증가하고, 솔더 내 Cu의 양이 증가하며, 솔더볼의 형상이 불균일해지게 된다.^{5,12)} 따라서, 솔더 조성에 관계없이, 리플로우 횟수가 증가함에 따라 솔더 접합부의 전기 비저항은 점차 증가하였다. 또한 금속간화합물 층의 빠른 성장 속도, Pb 대비 Sn의 더 높은 Cu의 고용도 및 산화성 등의 요인으로 인하여 Sn-Ag-Cu, Sn-Ag와 Sn-Pb 순으로 전기 비저항이 높았다.

4. 결 론

리플로우 횟수 증가에 따른 OSP 처리된 BGA 기판에 실장된 Sn-37Pb, Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.75Cu BGA 솔더 접합부들의 미세 조직의 변화를 관찰하고, 기계적전기적 특성을 비교연구하여, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

리플로우 후, Sn-Pb와 Sn-Ag-(Cu) 솔더는 Cu_6Sn_5 금속간화합물과 함께 각각 Sn-rich와 Pb-rich 상들로 이루어진 공정 조직과 Sn-rich와 Ag_3Sn 상들로 이루어진 공정 조직으로 이루어졌다. SEM 관찰 결과, 리플로우 횟수와 솔더의 조성에 상관없이, 솔더와 기판 사이의 접합 계면에는 연속적인 Cu_6Sn_5 금속간화합물 층이 생성되었으며, 그 층의 두께는 리플로우 횟수가 증가함에 따라 점차 증가하였다.

Sn-Ag-Cu, Sn-Ag, Sn-Pb 솔더 순으로 높은 전단 강도를 나타내었으며, 3회 또는 4회 리플로우 후 가장 높은 접합 강도를 나타낸 후, 리플로우 횟수가 증가함에 따라 점차 감소함을 보였다. Sn-Pb 및 Sn-Ag-(Cu) 솔더 모두 임계 금속간화합물 층의 두께를 가지고 있었으며, 그 두께 이상으로 금속간화합물 층이 성장할 경우 취성 파괴 영역의 확대에 따른 접합 강도가 감소하였다.

솔더 조성에 관계없이, 솔더 접합부의 전기적 특성은 리플로우 횟수가 증가함에 따라 점차 감소하였다. Sn-Pb 솔더 접합부보다 Sn-Ag-(Cu) 솔더 접합부가 더 높은 전기 비저항을 나타내었으며, Sn-Ag 솔더보다 Sn-Ag-Cu 솔더의 전기 비저항이 약간 더 높았다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-20811-0).

참고문헌

1. 류연수, "플립칩 관련 기술 및 시장동향", 전자정보센터 (<http://www.eic.re.kr>).
2. 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.* 82, 569 (2005).
3. J.M. Koo and S.B. Jung: "Interfacial reaction and bump shear property of wlectroplated Sn-37Pb aolder bump with Ni under bump metallization during multiple reflows", *Adv. Mater. Research* 15-17, 181 (2006).
4. J. Baffett, "Electron systems packaging: futyre reliability challenges", *Microelectron. Relia.* 38, 1277 (1998).
5. J.M. Koo, B.Q. Vu, Y.N. Kim, J.B. Lee, J.W. Kim, D.U. Kim, J.H. Moon and S.B. Jung, "Mechanical and electrical properties of Cu/Sn-3.5Ag/Cu ball grid array (BGA) solder joints after multiple reflows, *J. Electron. Mater.* 37, 118 (2008).
6. T.B. Massalski: "Binary Alloy Phase Diagram", American Society for Metals, OH (1986) p. 3014-3017.
7. 강춘식, 정재필, "마이크로 접합", 삼성복스 (2002) p. 77-82.
8. R.E. Reed-Hill and R. Abbasian, "Physical Metallurgy Principles, 3rd ed.", PWS Publishing Company, Boston (1992) p. 156-158.
9. W.D. Jr. Callister: *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons (2005) p. 258-487.
10. J.M. Koo, Y.H. Lee, S.K. Kim, M.Y. Jeong and S.B. Jung, "Mechanical and electrical properties of Sn-3.5 Ag solder/Cu BGA packages during multiple reflows", *Key Eng. Mat.* 297-300, 801 (2005).
11. D.R. Frear, S.N. Burchett, H.S. Morgan, and J.H. Lau, *The Mechanics of Solder Alloy Interconnects*, Van Nostrand Reinhold, NewYork (1994) p. 60.
12. J.M. Koo and S.B. Jung, "Mechanical and Electrical Properties of Sn-3.5Ag Ball Grid Array (BGA) Solder Joints with Multiple Reflows", 12th TMS2007 Annual Meeting and Exhibition, U.S.A., p. 318.