



## 무연 도금 솔더의 특성 연구: Sn-Cu 및 Sn-Pb 범프의 비교

정석원, 정재필\*

서울시립대학교 신소재공학과

### Study on the Characteristics of Electroplated Solder: Comparison of Sn-Cu and Sn-Pb Bumps

Seok Won Jung, Jae Pil Jung\*

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

(Received 27 August 2003 ; accepted 4 October 2003)

#### Abstract

The electroplating process for a solder bump which can be applied for a flip chip was studied. Si-wafer was used for an experimental substrate, and the substrate were coated with UBM (Under Bump Metallization) of Al(400 nm)/Cu(300 nm)/Ni(400 nm)/Au(20 nm) subsequently. The compositions of the bump were Sn-Cu and eutectic Sn-Pb, and characteristics of two bumps were compared. Experimental results showed that the electroplated thickness of the solders were increased with time, and the increasing rates were 0.45  $\mu\text{m}/\text{min}$  for the Sn-Cu and 0.35  $\mu\text{m}/\text{min}$  for the Sn-Pb. In the case of Sn-Cu, electroplating rate increased from 0.25 to 2.7  $\mu\text{m}/\text{min}$  with increasing current density from 1 to 8.5  $\text{A}/\text{dm}^2$ . In the case of Sn-Pb the rate increased until the current density became 4  $\text{A}/\text{dm}^2$ , and after that current density the rate maintains constant value of 0.62  $\mu\text{m}/\text{min}$ . The electro plated bumps were air reflowed to form spherical bumps, and their bonded shear strengths were evaluated. The shear strength reached at the reflow time of 10 sec, and the strength was of 113 gf for Sn-Cu and 120 gf for Sn-Pb.

*Keywords* : lead-free solder, Sn-Cu, electroplating, microstructure, joint strength

## 1. 서 론

패키징 기술은 전자제품 조립 산업의 근간이 되는 중요한 분야라고 할 수 있다. 최근의 전자 기술의 발전 방향은 전자제품의 고성능화, 경박단소화로 집약될 수 있으며, 급속히 발전하는 전자제품의 변화 경향에 부응하기 위해서는 패키징 기술도 미세화, 친환경화로 이행하고 있다. 즉, 전자제품의 소형화, 고집적화는 부품 단자의 미세화로 이어지며, 따라서 부품의 리드나 솔더 볼도 점차 그 형태가 작아지게 된다. 부품의 미세, 다단자화의 예로 플립 칩(flip chip)<sup>1)</sup>을 들 수 있으며, 플립 칩 기술에서 중요한 실장기술이 범프 제조 기술이다. 범프 제조 기

술에는 스크린 프린팅법이나, 증착법, 미세 솔더 볼을 사용하는 방법 등<sup>2-4)</sup>이 있기도 하지만, 전해도금법도 유력한 방법 중의 하나이다. 전해도금에 의한 범핑 기술은 미세한 범프를 제조할 수 있으며, 가격이 싸고, 대량생산에 적용될 수 있는 장점이 있다. 그러나, 전해도금법은 도금시간이 길고, 무연 솔더의 도금시 도금 위치에 따라 조성의 불균일성이 존재할 수 있는 점이 해결되어야 할 과제인 것도 사실이다. 플립 칩 등에 적용 가능한 솔더 범프 제조 기술을 개발함에 있어서, 전해도금법을 이용한 연구는 그 중요성에 비추어 국내에서의 연구가 매우 부족한 실정이다.

한편, 전자산업의 친환경화는 금세기 전자분야에서 가장 중요한 점 중의 하나로, 최근 환경오염 물질에 대한 규제가 강화되고 있는 추세와 더불어 관

\*Corresponding author. E-mail : jujung@uoscc.uos.ac.kr

십의 대상이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 패키징 분야에서는 납을 함유한 솔더를 무연 솔더(lead-free solder)로 대체하기 위한 노력이 진행 중이다<sup>5)</sup>. 최근 전자제품에서 무연 솔더의 채용 경향에 맞추어 플립 칩에 대해서도 무연 솔더를 사용한 범핑 기술을 고려하지 않을 수 없을 것이다. 무연 솔더의 일례로 본 연구에서 검토한 Sn-Cu계 솔더는 Sn-Ag계 솔더나 Sn-Ag-Cu계 솔더에 비해 용점은 약간 높으나 사용가능한 범위이며, 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 플립칩에 적용 가능한 무연 솔더 범핑 연구와 관련하여, Sn-Ag계 솔더를 이용한 범핑에 관한 연구는 보고된 바 있지만<sup>6)</sup>, Sn-Cu계 솔더를 이용한 범프 제작에 관한 보고는 국내에서 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전해도금법에 의한 Sn-Cu 솔더 범프의 제조 과정과 그 특성을 조사하기 위해, 전해도금에 의한 Sn-Cu 솔더 범프의 형성 조건을 조사하고 범프의 특성과 전단강도(shear strength)를 Sn-Pb 공정(eutectic)솔더와 비교하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 전해도금 특성 조사

솔더가 전기도금법으로 도금되는 특성을 살펴보기 위한 시편의 기판(substrate)으로는 p-type Si웨이퍼를 사용하였다. 이 기판 위에 UBM(under bump metallization)층을 형성시켰으며, UBM 층은 전자빔 증착기를 사용하여 Al(두께;400 nm)/Cu(300 nm)/Ni(400 nm)/Au(20 nm)층을 기판 측으로부터 차례대로 증착하였다(그림 1 참조).

기판 위에 Sn-Cu솔더 범프를 형성하기 위하여 MacDiarmid사의 Sn<sup>2+</sup>(30 g/l), Cu<sup>2+</sup>(0.3 g/l)를 함유하고 있는 NF-448, NF-141과 NF-451, NF-111C,

NF-111A를 사용하였다. 솔더 범프의 도금전 전처리로서 기판을 아세톤 및 탈 이온수로 세척하였다. 도금조에서 도금 시 사용한 셀(cell)의 음극과 양극 사이의 거리는 27 mm이고, 도금에 사용된 음극은 백금이 도금된 티타늄 망을 사용하였다. 도금온도는 20~21°C로 유지하였으며, 도금액은 마그네틱 교반기(stirrer)를 사용하여 교반하였다. 도금 중 전류 밀도와 도금시간을 변화시키면서 Sn-Cu 도금층의 두께와 조성변화를 관찰하였다.

Sn-Pb 범프를 형성하기 위해 Sn-Pb도금액은 Sn<sup>2+</sup>(20 g/l), Pb<sup>2+</sup>(10 g/l)를 사용하였으며, 도금 조건은 Sn-Cu의 경우와 유사하다.

### 2.2 솔더 범프의 제조

20 mm×20 mm 크기의 Si웨이퍼 상에 도금된 UBM 층 위에 솔더 댐으로 솔더와 젖음성이 없는 Ti을 50 nm 두께로 증착하였다. 이 위에 도금될 범프의 패턴을 제작하기 위해 45 μm두께의 양성감광제(positive-photoresist)를 2500 rpm으로 스핀코팅(spin coating)하였다. 스핀 코팅된 시편은 열판을 사용하여 100°C에서 베이킹(baking)하였다. 이것을 노광, 현상한 후 솔더 댐으로 사용한 Ti를 BOE(buffered oxide etcher)로 에칭 제거하여 110 μm 직경, 250 μm 피치의 범프 도금 물드를 형성하였다. 이렇게 형성된 시편을 도금조에 담귀 전술한 방법으로 Sn-Cu 솔더 범프를 전해도금하였다.

도금법으로 제조된 솔더 범프를 실제 사용 가능한 형태인 구형 범프로 변환시키기 위해, 도금 범프 위에 VOC(volatile organic compound)-free 플럭스를 도포한 후, 대기 분위기의 열판에서 리플로우 솔더링하였다. 리플로우 솔더링은 Sn-Cu 공정 솔더의 용점인 227°C보다 약 30°C 정도 높은 260°C에서 행하였다. 리플로우 시간은 5초, 10초, 30초로 하였다. 리플로우 결과 얻어진 구형 솔더 범프의 기계적 성질을 평가하기 위하여 전단강도 시험을 행하였다.

Sn-Pb 공정솔더의 도금 범프 제조 조건은 Sn-Cu계의 경우와 유사하며, 구형의 솔더 범프를 제조하기 위한 리플로우 조건은 용점인 183°C보다 약 30°C 정도 높은 210°C에서 5초, 10초, 15초 가열하는 것으로 하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 Sn-Cu 및 Sn-Pb의 전해도금 특성

전류밀도에 따른 Sn-Cu계 솔더 및 Sn-Pb 공정솔더의 도금속도를 측정된 결과를 그림 2에 나타내었

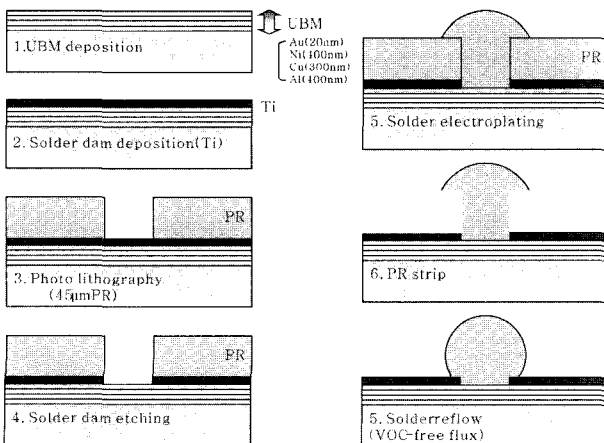


Fig. 1. Schematic illustration of experimental procedure.

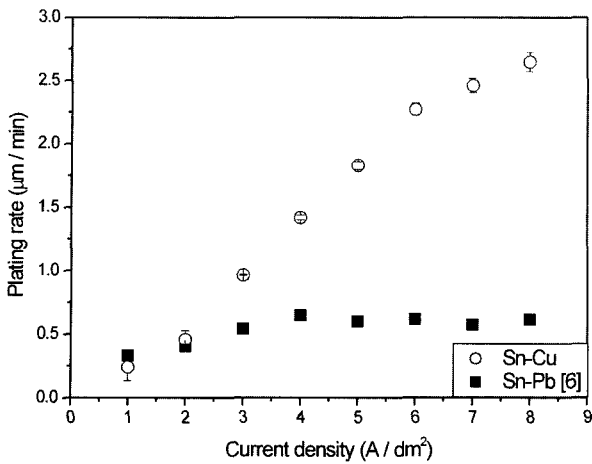


Fig. 2. Relation between electroplating rate of solder and current density.

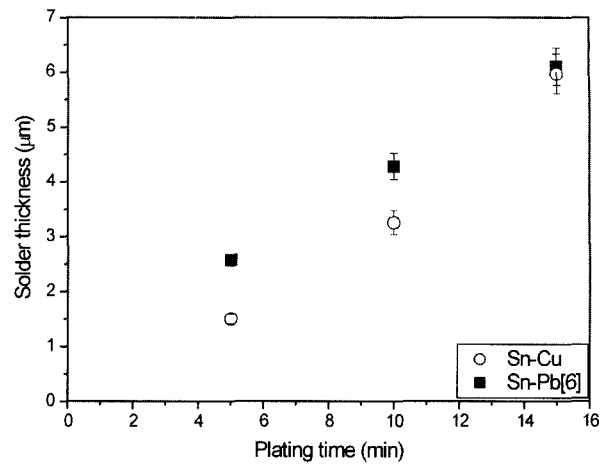


Fig. 3. Relation between electroplating thickness and plating time.

다. 그림 2에서 보듯이 Sn-Cu계 솔더의 경우, 도금 속도는 전류밀도의 증가에 따라 대체로 증가함을 알 수 있다. 즉, 전류밀도 1 A/dm<sup>2</sup>에서는 약 0.25 µm/min의 도금속도를 보였으며, 8 A/dm<sup>2</sup>에서 약 2.7 µm/min로 도금속도가 증가되었다. 그러나, 7~8 A/dm<sup>2</sup>에서는 도금속도의 증가율이 다소 둔화되는 것을 볼 수 있다. 그림 2에서 Sn-Pb 공정솔더의 도금속도는 Sn-Cu 솔더의 도금속도와 다른 양상을 보이고 있는데, 고전류 밀도에서 도금속도가 일정해지는 현상이 나타난다. 즉, 전류밀도가 증가함에 따라 도금속도가 초기에는 증가하지만, 4 A/dm<sup>2</sup>부근 이후부터는 약 0.62 µm/min로 대체로 일정하다는 것을 알 수 있다. 이러한 도금속도의 감소현상은 전극반응속도론 측면에서 보면 전류밀도를 높게 해도, 반응하고자 하는 이온이 음극면 주위에 점차 적어져서 도금속도가 떨어지는 것으로 해석될 수 있다. Sn-Pb 공정솔더의 경우 4 A/dm<sup>2</sup> 이후 전류밀도의 증가에도 불구하고 일정한 도금 두께를 보이는데, 이는 전류밀도를 높게 해도 반응하고자 하는 이온이 음극면 주위에 고갈되었기 때문에 전류효율이 저하되어 급속히 전착상태가 나빠지는 한계전류밀도(limiting current density)에 접근하여 더 이상의 전류밀도 증가에 무관하게 일정한 도금속도를 보이는 것으로 사료된다<sup>6)</sup>. Sn-Cu계 솔더는 Sn-Pb 공정 솔더에 비하여 전류 밀도 증가에 따른 도금속도의 감소가 거의 없으며, 이는 무연 솔더 범프를 도금 법으로 제조하는 측면에서 바람직한 현상으로 보인다.

그림 3은 전류밀도 2 A/dm<sup>2</sup> 조건하에서 각각 Sn-Cu계 솔더 및 Sn-Pb 공정솔더의 도금시간에 따른 도금두께를 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이, Sn-Cu계 및 Sn-Pb 공정솔더 모두에서 도금두께는 도금시간 증가에 따라 증가함을 알 수 있으며, 이러

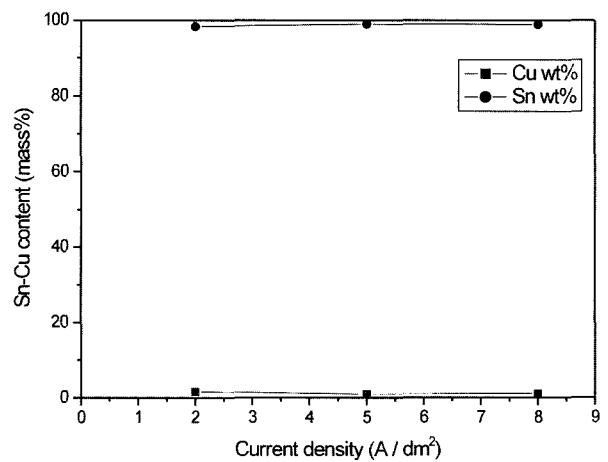


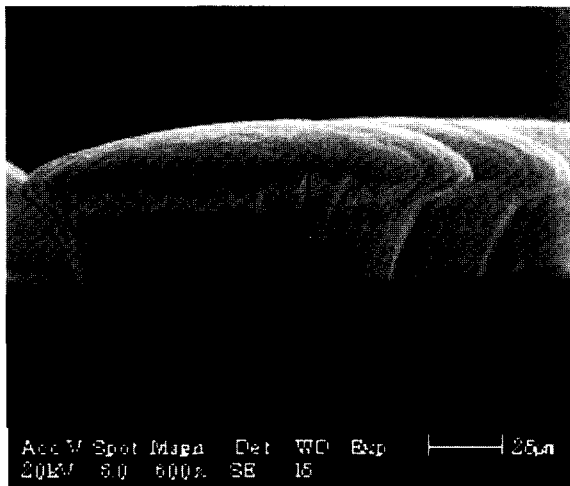
Fig. 4. Composition of Sn-Cu solder with respect to current density.

한 현상은 다른 연구에서도 관찰되는 것이다<sup>6-8)</sup>. 도금속도는 Sn-Cu계 솔더가 0.45 µm/min, Sn-Pb 공정솔더가 0.35 µm/min로 나타났다.

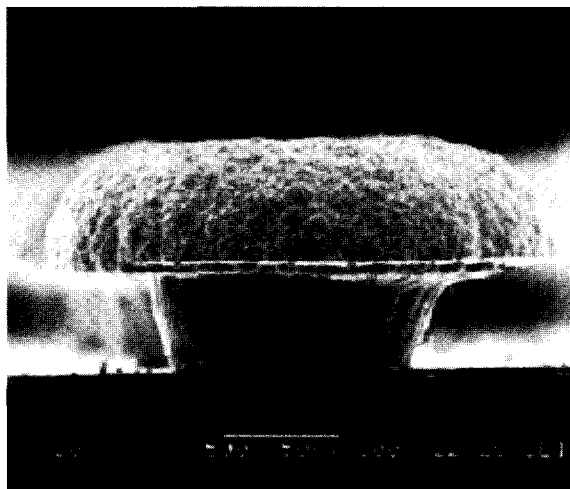
전류 밀도에 따른 Sn-Cu 솔더의 조성변화를 전자미소분석기(Electron Probe Micro Analyser : EPMA)로 분석한 결과를 그림 4에 나타내었다. 정상형 합금전해도금에서는 전류밀도의 증가에 따라 보다 비한 금속의 무게 분율이 증가하며 한계전류 밀도 이상이 되면 합금층의 조성비는 거의 일정하다. 대체로 모든 전류밀도 범위에서 0.9~1.4 wt%의 Cu를 함유하는 균일한 도금층을 얻을 수 있었다.

### 3.2 솔더 범프의 특성

그림 5는 전해 도금법으로 제조된 Sn-Cu 솔더 및 Sn-Pb 공정솔더의 버섯 형태 범프를 보인 것이다. 그림 4(a)는 도금 전류밀도 5 A/dm<sup>2</sup>, 도금시간 2시간에서 제조된 것으로, 기둥 직경 120 µm, 높이 75



(a) Sn-Cu



(b) Sn-Pb

Fig. 5. Morphology of solder bump after PR strip.

$\mu\text{m}$ 의 전형적인 버섯(mushroom) 형태를 보이며, 형성된 범프의 크기는 대체로 균일하였다. Sn-Cu계 솔더의 경우, 최적 도금 전류밀도는  $5 \text{ A/dm}^2$ 로 나타났다는데, 이 조건에서 도금층의 조성이 공정(共晶) 조성에 가장 가까우면서도 범프의 제조가 용이하였다. 전류밀도가 이보다 낮아지면 PR 몰드의 높이보다 낮게 솔더가 도금되고, 전류밀도가 이보다 더욱 높아지면 범프가 몰드보다 높게 도금되면서 인접 범프와 이어지기도 하였다.

그림 5(b)는 Sn-Pb 공정솔더 범프를,  $7 \text{ A/dm}^2$ 의 전류밀도를 최적의 조건으로 선택하여 도금한 결과로서 도금시간은 4시간이다. PR 몰드를 제거한 후 관찰된 범프는 기둥 직경 약  $130 \mu\text{m}$ , 높이 약  $80 \mu\text{m}$ 의 전형적인 버섯 모양을 나타내었다. 그림 5(a), (b)의 비교에서 보듯이, 거의 동일한 크기의 도금 범프를 얻는데, Sn-Cu계 솔더의 경우 전류밀도  $5 \text{ A/dm}^2$ 에서 2시간 실시하였고, Sn-Pb 공정솔더는 전류밀도  $7 \text{ A/dm}^2$ 에서 4시간 실시하였다. 따라서, 최적 도금시간 측면에서 보면 Sn-Cu계 솔더가 Sn-Pb 공정솔더에 비해 시간이 1/2로 단축되는 결과가 나타났다. 이것은 그림 2에서 보인 전류밀도에 따른 도금속도가 Sn-Cu계 솔더가  $5 \text{ A/dm}^2$ 에서  $1.7 \mu\text{m/min}$ , Sn-Pb 공정솔더가  $7 \text{ A/dm}^2$ 에서  $0.6 \mu\text{m/min}$ 으로 나타난 결과와 그림 3에서 보인 도금시간에 따른 도금 두께의 증가정도(Sn-Cu;  $0.45 \mu\text{m/min}$ , Sn-Pb;  $0.35 \mu\text{m/min}$ )가 복합적으로 작용한 것이 원인으로 보인다.

도금시간 증가에 따른 Sn-Pb 공정솔더 범프의 크기와 형상 변화 예를 그림 6에 보였다. 그림에서

	Plating time		
	2 hr	3 hr	4 hr
Plated Bump			
Reflowed Bump			

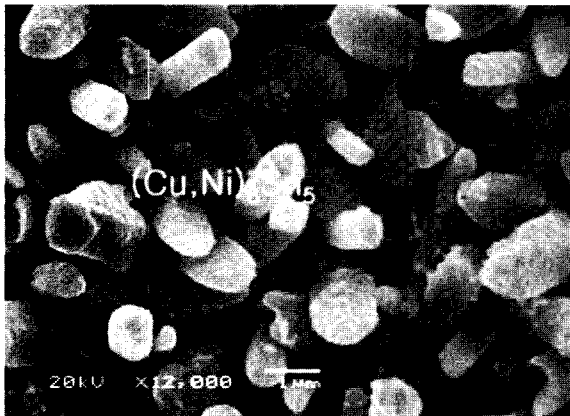
Fig. 6. Comparison of Sn-Pb eutectic solder bumps with electroplated time.

보듯이 도금시간이 증가함에 따라 버섯형 범프의 형상이 커지며, 리플로우 후의 범프의 형상도 커진다. 리플로우 후의 일반적인 범프의 형상은 4시간 도금한 경우와 가장 가까운 모습을 확인할 수 있었다.

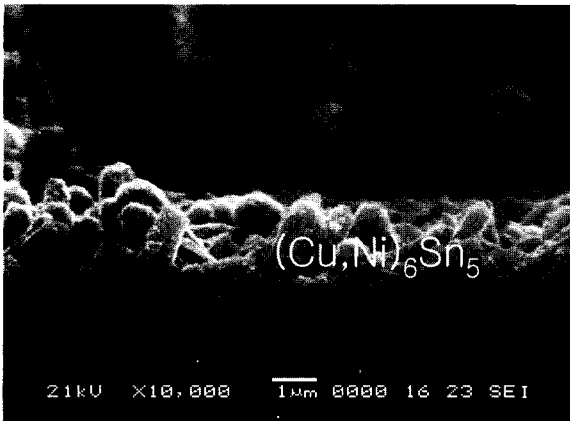
일반적으로 접합계면의 금속간화합물은 솔더링부의 접합 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>. 따라서, 전해도금법으로 제조된 범프의 리플로우 후 금속간화합물을 조사해 볼 필요가 있는데, 그림 7에 Sn-Pb 공정솔더에 대하여 대기 중에서 리플로우 한 솔더 볼의 경우와 금속간화합물을 비교해 보았다. 그림 7(a)는 전해도금법에 의해 제조한 Sn-Pb 공정솔더 범프를 대기 중에서 리플로우 한 후, UBM층과의 계면에 존재하는 금속간화합물을 관찰한 결과이다. 관찰된 금속간화합물은 기둥형의 모양으로, 그 조성은 44.24at%Cu -15.47%Ni-40.28%Sn으로 나타났다. 그림 7(b)는 대기 중에서 리플로우 한 솔더 볼(Sn-Pb 공정솔더)의 금속간화합물을 보인 것이다. 이 금속간화합물의 조성은

42.01at%Cu -10.87%Ni-47.11%Sn로 나타났다. 두 그림에서 보듯이 전해도금에 의한 경우의 금속간화합물은 솔더 볼을 이용한 것과 유사한 형태를 갖는 것으로 관찰되었다. 그림 7(a), (b)의 두 금속간화합물의 조성도 유사한 것을 알 수 있으며, 이들은 Cu/Ni/(Au) UBM층과 Sn-Pb 공정솔더링부의 계면에 나타나는 일반적인 금속간화합물인 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>인 것으로 판단된다. 일반적으로 Sn-Pb계나 Sn-Ag-(Cu)계, Sn-Cu계, Sn-Ag-Bi-In계 등과 Cu 패드 사이의 계면에는 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>가 형성되며<sup>10,11)</sup>, UBM층을 사용하는 BGA 등의 경우 UBM에 Ni층이 존재하면 솔더와의 반응정도에 따라 Ni이 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>에 함유되어 (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>를 형성하기도 한다<sup>11,12)</sup>.

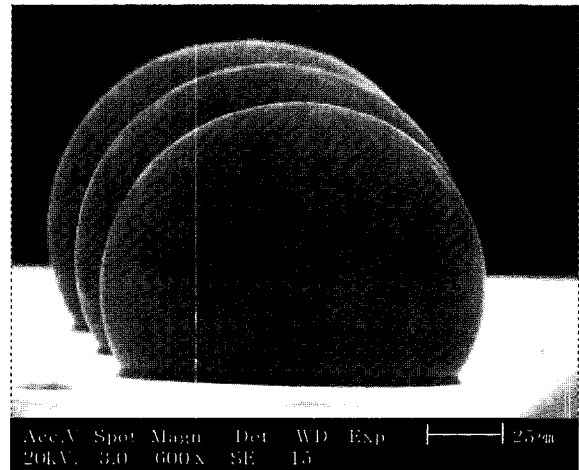
도금에 의해 제조된 버섯형 범프를 리플로우 한 후의 접합 전단강도를 조사하기 위하여, 도금 솔더의 범프를 리플로우 하여 구형으로 변화시켰다(그림 8 참조). Sn-Cu, Sn-Pb 공정 두 솔더 모두 양호한 형태의 반구형 범프가 형성되므로써, 전기도금



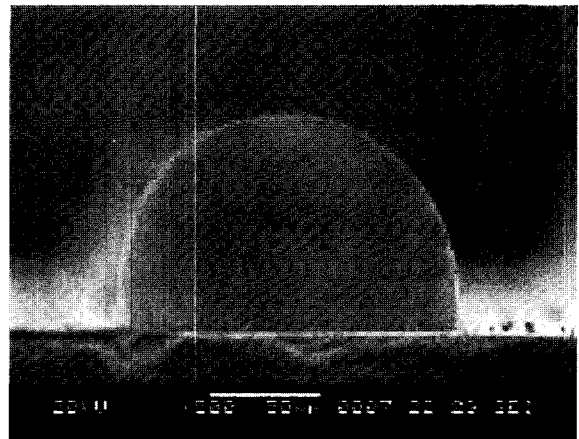
(a) Bumped by electroplating (top view)



(b) Bumped by solder ball (cross sectional view)



(a) Sn-Cu



(b) Sn-Pb

Fig. 7. Comparison of intermetallic compounds at Sn-Pb/UBM interface with different bumping methods.

Fig. 8. Morphologies of Sn-Cu and Sn-Pb solder bumps after reflow.

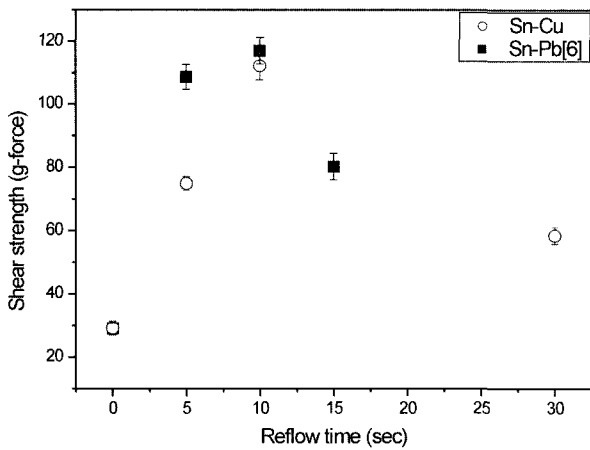


Fig. 9. Shear strength of Sn-Cu and Sn-Pb bumps with reflow time.

법에 의한 범프 형성이 Sn-Cu계 무연 솔더에서도 무난히 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그림 9은 리플로우 후 형성된 구형 범프에 대하여 Sn-Cu계 및 Sn-Pb 공정솔더 범프의 전단시험 결과를 보인 것이다. Sn-Cu계의 경우, 리플로우 시간을 5 초에서 10초로 증가시키기에 따라 전단강도가 증가하여 최고값 113 gf를 나타내었으며, 리플로우 시간을 30초까지 더 증가시켰을 때는 전단강도가 감소하였다. Sn-Pb계의 경우, 리플로우 시간의 증가에 따라 전단강도가 증가하여 10초에서 최대 전단강도 약 120 gf를 얻었다. 그러나, 이후 리플로우 시간을 15초까지 더 증가시켰을 때에는 80 gf 정도로 전단강도가 감소하였다

일반적으로, 리플로우 시간이 증가되면 솔더링 접

합 계면에 형성되는 금속간 화합물의 두께가 성장하는 것으로 알려져 있다<sup>13)</sup>. 이러한 금속간화합물은 접합강도에 영향을 미치는데, 솔더와 UBM층간의 금속간화합물층의 두께가 임계두께 이하에서 증가하면 두께가 증가함에 따라 접합강도가 증가하지만 임계두께를 초과하면 접합강도는 감소되는 것으로 보고되어 왔다<sup>14)</sup>. 그림 9의 과도한 리플로우 시간에 따른 전단강도 저하도 접합 계면의 금속간화합물층이 과도하게 성장한 것이 한 원인인 것으로 사료된다. 그림 10은 솔더링부의 전단시험 후 파면을 보인 것이다. 파괴는 솔더에서 일어났음을 알 수 있었는데, 전단강도가 가장 높은 10초 리플로우 한 경우에는 연성파괴가 뚜렷하거나(Sn-Pb의 경우) 일부 모재에서 파괴가 일어나기도 하였다(Sn-Cu의 경우). 그러나, 리플로우 시간이 30초로 지나치게 긴 경우에는 Sn-Pb 공정솔더의 경우에서 보듯이 취성 파면이 나타나기도 하였다. 즉, 리플로우 시간이 30초로 길어지면서 연성파면이 취성파면으로 바뀌며, 이것이 전단강도 저하에 영향을 미친 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

전해 도금법으로 Sn-Cu계 및 Sn-Pb계 공정 솔더 범프를 Si웨이퍼 상에 제조하여 비교 평가하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 도금시간이 증가함에 따라 도금층의 두께가 증가하였으며, 도금속도는 Sn-Cu계가 0.45  $\mu\text{m}/\text{min}$ , Sn-Pb 공정솔더가 0.35  $\mu\text{m}/\text{min}$ 로 나타났다.

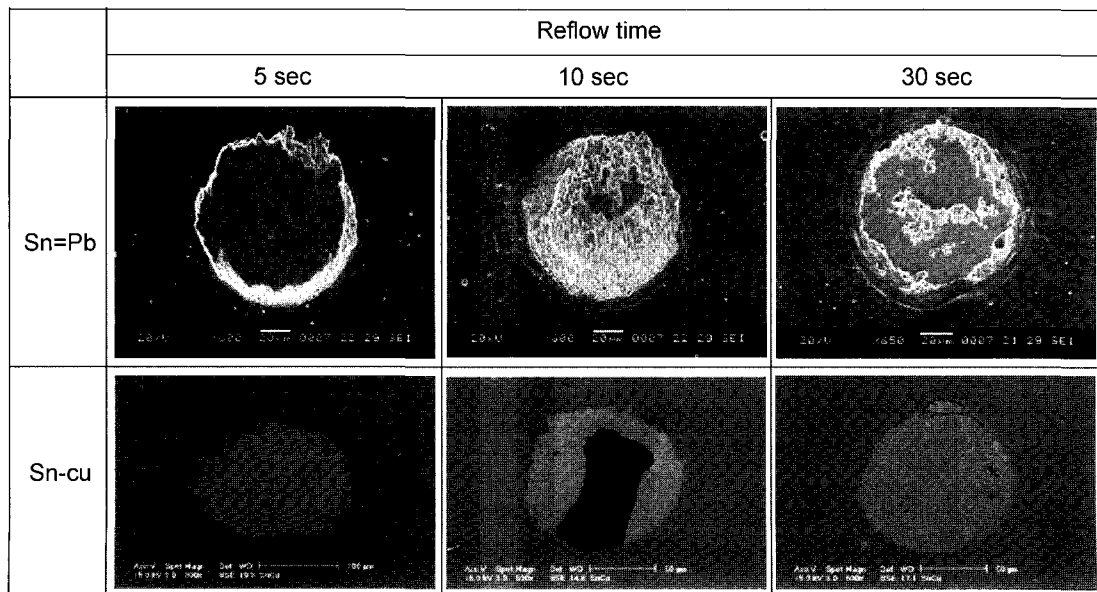


Fig. 10. Fracture modes of Sn-Pb and Sn-Cu solder bumps after shear test.

(2) Sn-Cu계 솔더의 경우, 도금속도는 전류밀도 증가에 따라 대체로 증가하며, Sn-Pb계 솔더의 경우, 전류밀도 4 A/dm<sup>2</sup>까지는 도금속도가 증가하지만, 4 A/dm<sup>2</sup> 이후에는 약 0.62 μm/min로 일정하게 유지되는 경향을 보였다.

(3) 도금에 의해 형성된 범프를 리플로우 솔더링하여 반구형의 솔더 범프를 Si웨이퍼 상에 제조하였는데, Sn-Cu계 솔더의 경우 리플로우 시간 10초에서 최고 전단강도 값 113 gf를 얻었으며, Sn-Pb계의 경우 리플로우 시간 10초에서 최대 전단강도 약 120 gf를 얻었다.

## 후 기

본 연구는 서울시립대학교의 연구교수 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Lau, H.(Ed.), Flip Chip Technologies, McGraw-Hill, New York (1995) 123.
2. Mori, M., Kizaki, Y., Saito, M. and Hongu, A., "A Fine Pitch COG Technique for a TFT-LCD Panel Using and Indium Alloy", IEEE Trans. Components Hybrid Manufact. Tech., 16(8) (1993) 852-857.
3. 정재필, 전주선, 초음파를 이용한 고품질 무연솔더 분말 및 무연 크립솔더 개발, 산업자원부 연구보고서 (2003).
4. S.M. Hong, C.S. Kang and J.P. Jung, Flux-free direct chip attachment of solder-bump flip chip by Ar+H<sub>2</sub> plasma treatment, J. Electronic Materials, 31(10) (2002) 1104-1111.
5. 정재필, 신영의, 임승수, 무연마이크로 솔더링, 삼성 북스 (2001) 45.
6. H. Hwang, S.M. Hong, J.P. Jung and C.S. Kang, Pb-free Solder Bumping for Flip Chip Package by Electroplating, Soldering and Surf. Mount Tech., 15(2) (2003) 10-16.
7. A.C. Tan, Tin and Solder Plating in the Semiconductor Industry, Chapman & Hall, London (1993) 241.
8. 황 현, 홍순민, 강춘식, 정재필, 전해도금에 의한 플립칩 무연 솔더 범프 제조에 관한 연구, 대한금속학회지, 40(1) (2002) 105-110.
9. L.C. Shiau, C.E. Ho and C.R. Kao, Reaction between Sn-Ag-Cu lead-free solders and the Au/Ni surface finish in advanced electronic package, Soldering and Surf. Mount Tech., 14(3) (2002) 25-29.
10. R.J.K. Wasink, Soldering in Electronics, Electrochemical Pub. (1984) 96.
11. 문준권 : 서울시립대석사학위논문 (2003).
12. C.E. Ho and C.R. Kao, "Strong effect of Cu concentration on the reactions between SnAgCu solders and Ni", TMS Annual Meeting, Tennessee (2001).
13. 日本溶接協會 : 標準マイクロソルダリング技術, 日刊工業新聞社, 20.
14. 허정나, 이종현, 박대진, 김석윤, 신동혁, 김용석, in-situ 법으로 제조된 BGA 전자 패키징용 복합 솔더의 특성, 대한금속학회지, 37(9) (1999) 1117-1123.
15. A. Brenner, Electrodeposition of Alloy, Academic press, New York (1963).