

## 리플로우 횟수와 표면처리에 따른 Sn-Ag-Cu계 무연 솔더 범프의 고속전단 특성평가

장임남 · 박재현<sup>1</sup> · 안용식\*

부경대학교 신소재공학부, <sup>1</sup>포항산업과학연구원

### Effect of Reflow Number and Surface Finish on the High Speed Shear Properties of Sn-Ag-Cu Lead-free Solder Bump

Im-Nam Jang, Jai-Hyun Park<sup>1</sup> and Yong-Sik Ahn\*

Dept. of Materials Eng, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

<sup>1</sup>Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-600, Korea

(2009년 3월 22일 접수; 2009년 7월 16일 게재확정)

**초 록:** 휴대폰 및 휴대기기의 낙하 충격에 대한 관심이 증가되고 있는 상황에서 솔더 볼 접합부의 낙하 충격특성은 패드의 종류와 리플로우 횟수에 영향을 받게 되어 이에 따른 신뢰성 평가가 요구된다. 이와 관련한 평가법으로 일반적으로는 JEDEC에서 제정한 낙하충격 시험법을 사용하고 있으나 이 방법은 고 비용과 장시간이 소모되는 문제가 있어 본 연구에서는 낙하충격 특성을 간접적으로 평가하는 시험항목인 고속 전단시험을 실시하여 리플로우 횟수에 의해 성장하는 금속간 화합물 층과 OSP(Organic Solderability Preservative), ENIG(Electroless Nickel Immersion Gold) 및 ENEPIG(Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold) 등 표면처리에 따른 고속 전단특성을 비교, 분석하였다. 그 결과 리플로우 횟수가 증가함에 따라 IMC 층의 성장으로 고속 전단강도와 충격 에너지 값은 점차 감소하였다. 리플로우 횟수가 1회일 때는 ENEPIG, ENIG, OSP 순으로 고속 전단강도와 충격 에너지 값이 높았고 8회일 때는 ENEPIG, OSP, ENIG 순으로 충격 에너지 값이 높게 측정되었다.

**Abstract:** The drop impact reliability comes to be important for evaluation of the life time of mobile electronic products such as cellular phone. The drop impact reliability of solder joint is generally affected by the kinds of pad and reflow number, therefore, the reliability evaluation is needed. Drop impact test proposed by JEDEC has been used as a standard method, however, which requires high cost and long time. The drop impact reliability can be indirectly evaluated by using high speed shear test of solder joints. Solder joints formed on 3 kinds of surface finishes OSP (Organic Solderability Preservation), ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) and ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold) was investigated. The shear strength was analysed with the morphology change of intermetallic compound (IMC) layer according to reflow number. The layer thickness of IMC was increased with the increase of reflow number, which resulted in the decrease of the high speed shear strength and impact energy. The order of the high speed shear strength and impact energy was ENEPIG > ENIG > OSP after the 1st reflow, and ENEPIG > OSP > ENIG after 8th reflow.

**Keywords:** Lead-free solder ball, Surface finish, High speed shear test, Shear strength, Impact energy

## 1. 서 론

솔더 접합부의 충격 신뢰성은 전자 산업에서 어려운 문제 중의 하나이다. 그 이유는 휴대폰과 같은 휴대형 장치는 낙하에 의한 충격에 부서질 수 있기 때문이다. 이는 휴대형 장치의 고급화, 복잡화, 고성능화 및 소형화 추세에 따라 솔더 접합부 계면구조는 본질적으로 작고 복잡한 구조를 가지기 때문에 벌크 소재와는 전적으로 다른 기계적 거동을 일으킨다.

이에 따른 낙하충격 시험은 JEDEC (Joint Electron

Device Engineering Council)에서 제정한 낙하충격 시험법<sup>1)</sup>을 사용하고 있으나 고 비용과 장시간이 소모된다. 고속 전단 시험은 낙하충격 특성을 간접적으로 평가하는 시험 항목이다.

한편 BGA(Ball Grid Array) 패키지를 실장하기 위한 리플로우(reflow) 공정 중에, 솔더와 기판 사이의 접합 계면에는 금속간 화합물이 생성 및 성장하게 된다. 리플로우 공정은 다중 실장(multi-assembly), 수리(rework)와 재정렬(re-alignment)공정 등으로 인하여 일반적으로 2회 이상의 리플로우 공정이 요구된다. 건전한 접합부 형성에는 얇게

\*Corresponding author  
E-mail: ysahn@pknu.ac.kr

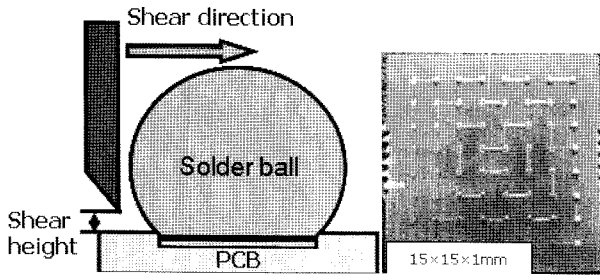


Fig. 1. A schematic view for high speed shear test and BGA ball array.

생성된 금속간화합물 층이 필수적이나, 임계 두께 이상으로 과잉 생성된 금속간화합물 층은 취약해서 접합 강도 저하의 주요 원인으로 작용하게 된다.<sup>2)</sup>

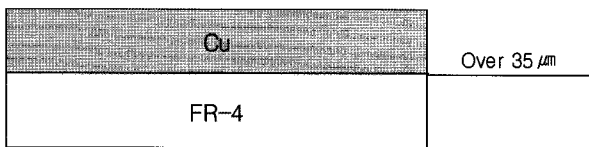
본 실험은 각각의 표면처리 즉, OSP(Organic Solderability Preservative), ENIG(Electroless Nickel Immersion Gold), ENEPIG(Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)과 리플로우 횟수가 증가함에 따라 접합면의 조직 및 IMC 층의 변화에 대하여 분석하였으며 이러한 변화가 고속 전단 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

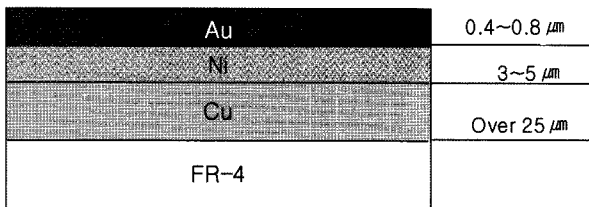
### 2.1. 고속전단 시험편 제작

#### (1) 시험편 제작

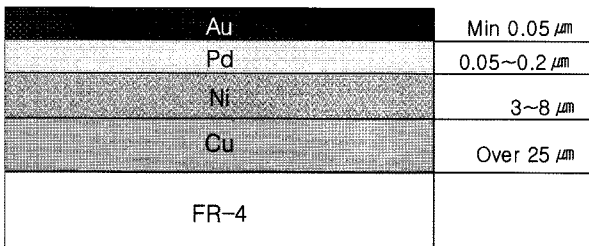
본 연구를 위해 BGA 부품을 보드에 탑재한 후 리플로우의 횟수를 증가하여 시험편을 제작하였다. 리플로우 횟



(a) OSP (Organic Solderability Preservative)



(b) ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)



(c) ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)

Fig. 2. Schematic illustrations of surface finish.

Table 1. Experiment condition of high speed shear test

Shear speed	Test load	Shear height
1000 mm/s	500 g	45 $\mu\text{m}$

수는 1회, 2회, 4회, 6회, 8회로 리플로우를 실시하였다. 시험을 위해 사용된 솔더 볼의 조성은 Sn-3.0Ag-0.5Cu이며, 지름은 450  $\mu\text{m}$ 이다. 또한 패드구조로는 SMD(Solder Mask Defined)를 사용하였다. BGA 시험편의 형상은 Fig. 1과 같으며 크기는 15x15 mm이다.

시험편 제작을 위한 솔더 볼의 리플로우 조건은 “RS D 0015 무연솔더볼”에 준하여<sup>3)</sup> 예열구간 온도는 150~180  $^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며, 최대 피크온도는 245 $^{\circ}\text{C}$ 에서 4초간 유지하여 시험을 행하였다. 리플로우를 위해 사용한 장비는 5존 열풍방식의 KOKI KTM KT 250을 사용하였다. 또한 시험에 사용된 표면처리의 종류는 OSP, ENIG, ENEPIG이며, 각 표면처리에 따른 방법을 Fig. 2에 모식 적으로 나타내었다.

고속전단을 위한 시험편은 Fig. 1과 같이 PCB위 솔더 볼의 탑재 배열을 7자 형태를 사용하였으며, 시험 조건은 JESD22B-117 및 JESD22B-117A 규격을 기초로 하여 시험 조건을 택하였다. 본 연구에서 고속전단 시험을 위한 시험 조건을 Table 1에 나타내었다.<sup>4)</sup> 고속전단 시험을 위해 사용한 장비는 DAGE-4000HS 모델을 사용하였으며, 각 시료에 대해 13회의 결과를 추출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 3 (a-c)는 표면처리와 리플로우 횟수에 따른 고속 전단강도 값을 나타낸 것이고, Fig. 3의 (d-f)는 표면처리와 리플로우 횟수에 따른 충격 에너지 값을 나타낸 것이다. 충격 에너지값(E)은 고속 충격 시 발생한 displacement(s)에 따른 강도 값( $\sigma$ )을 아래식과 같이 적분하여 계산한 것이다.<sup>5)</sup>

$$E = \int \sigma ds$$

충격 에너지 값과 전단강도 값은 대체적으로 표면처리와 관계없이 리플로우 횟수가 진행함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 OSP와 ENEPIG 표면처리 조건의 경우 리플로우 횟수에 따른 고속 전단강도의 값이 ENIG보다 감소 폭이 작은 것으로 나타났다. 충격에너지의 경우 리플로우횟수의 증가에 따른 감소폭이 고속 전단강도값보다 더 민감하게 나타났는데 이에 대해서는 뒤의 판단면관찰에서 더 자세히 설명된다.

Fig. 4 (a-b)는 Fig. 3의 고속 전단강도 값과 충격 에너지 값을 표면처리에 따라 비교하여 나타낸 것이다. (a)는 표면처리와 리플로우 횟수에 따른 고속 전단강도 값이며, (b)는 표면처리와 리플로우 횟수에 따른 충격 에너지 값이 나타난다. 1회의 리플로우에서 ENEPIG, ENIG, OSP순으로

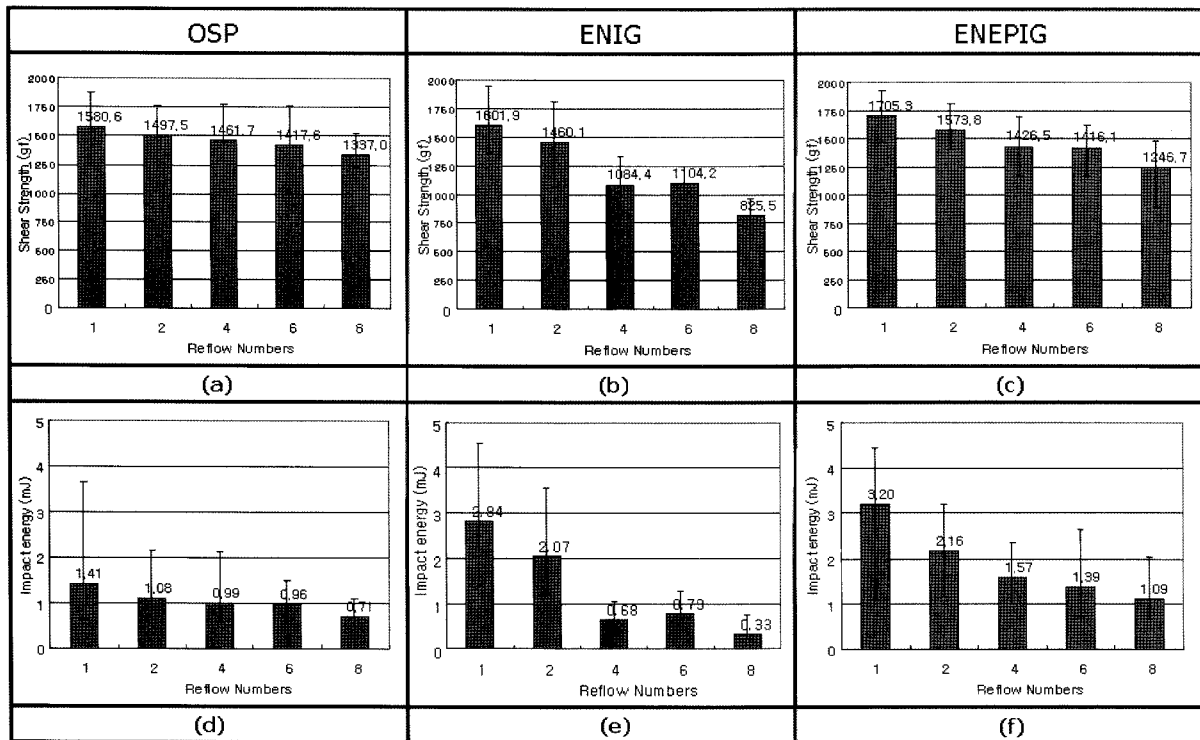


Fig. 3. The results of high speed shear test on the various surface finishes with reflow number: (a), (b), (c); shear strength and (d), (e), (f); impact energy.

높은 고속 전단강도를 나타내었으나, 리플로우 4회에서 ENIG의 고속 전단강도가 현저히 감소하여 마지막 8회에서 OSP, ENEPIG, ENIG 순으로 높은 고속 전단강도 값이 나타났다. 충격에너지의 경우 1회의 리플로우에서 ENEPIG, ENIG, OSP의 순으로 고속 전단강도 값의 순과 같으나 마지막 8회에서 ENEPIG, OSP, ENIG 순으로 ENEPIG가 OSP보다 충격에너지 값이 높았다[Fig. 4(b)]. 고속 전단강도 값의 경우 OSP와 ENEPIG와의 값 차이가 비슷하게 나타났으나 충격에너지의 경우 두 표면처리 값의 뚜렷한 차이를 나타냈다. 따라서 OSP와 ENEPIG의 경우 고속 전단강도는 비슷하나 충격에너지 값에서는 큰 차이를 보인다.

이 원인은 파괴모드의 차이에 의한 것으로 파악된다. 또한 Fig. 4 (a)와 (b)를 비교하였을 때 고속 전단강도의 값 차이는 리플로우 횟수에 따라 매우 뚜렷이 구분되지 않으나, 고속 충격 에너지 값은 보다 뚜렷하게 전체적으로 감소하는 현상을 보인다. 이것은 Sn solder를 가지고 유사한 연구를 수행한 Park<sup>6)</sup> 등의 연구결과와 일치한다.

고속전단시험의 시험 후 파단은 연성 파괴, 연성/취성 파괴, 취성 파괴로 분류할 수 있다. 연성파괴는 솔더부에서 파단이 발생하였을 경우이고, 연성/취성 파괴는 일부는 솔더부에서 일부는 금속간화합물층에서 파단이 일어나는 것을 말한다. 그리고 취성파괴는 솔더볼과 금속간화합물층의 파단에서 발생하는 파단 모드이다.<sup>7)</sup>

본 연구의 표면처리 OSP 경우 고속 전단시험 후 파단면을 SEM으로 관찰한 결과, 리플로우 1회에서부터 금속간 화합물 층에서 취성파괴 형태로 파단이 일어난 것을

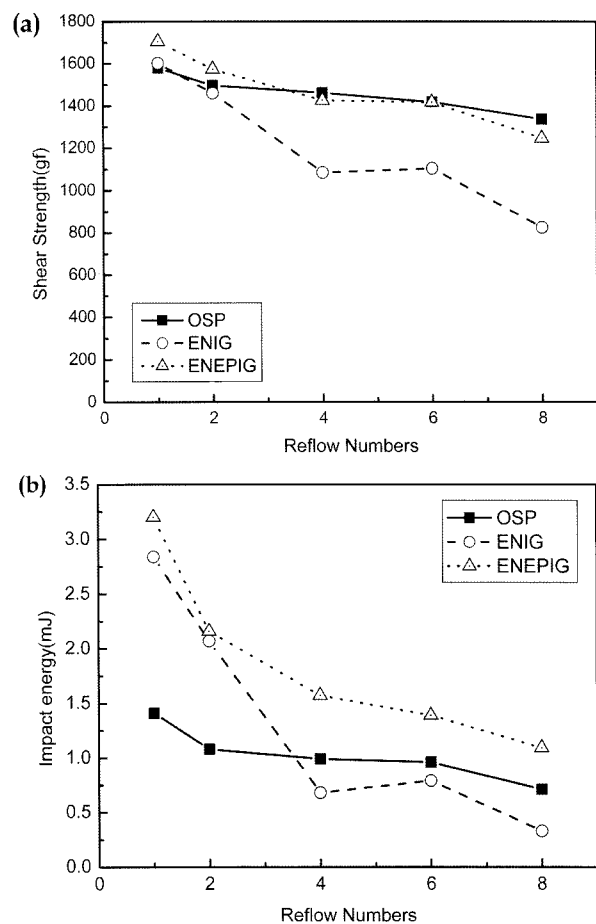


Fig. 4. The summary of high speed shear test on the various surface finishes with reflow number: (a); Shear strength and (b); Impact energy.

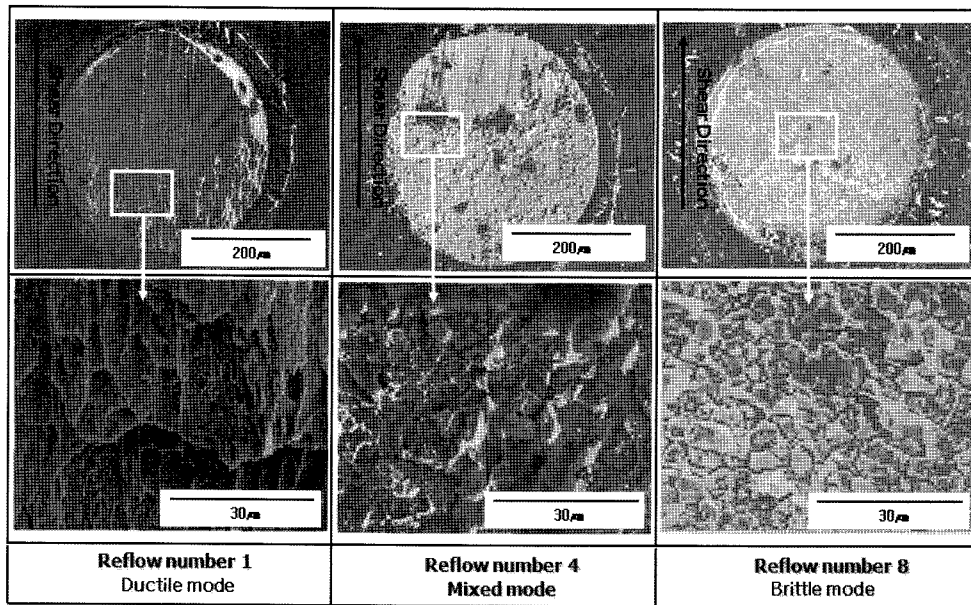


Fig. 5. Fracture surfaces of solder joints on the ENIG surface finish fractured by high speed shear test.

확인할 수 있는데 이러한 파면의 특징은 다른 표면처리 조건과는 다른 양상을 나타내는 것이며, 표면처리 OSP의 이러한 파괴양상이 리플로우 1회 하였을 때의 고속 전단 강도 값과 충격 에너지 값이 다른 표면처리에 비해 낮은 값을 가지는 원인이라 분석된다. 또한 1회, 4회, 8회로 리플로우 횟수가 증가할수록 금속간 화합물 결정립의 크기가 증가하는데, 이는 리플로우 횟수가 증가함에 따라 고속 전단강도 값과 충격 에너지 값이 다소간 감소한 원인이라 생각된다.

Fig. 5는 ENIG 일때 고속 전단시험 후 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다. 1회 때에는 100% ductile mode로 솔더 볼에서 파단이 일어나지만 리플로우 횟수가 증가할수록 brittle mode로 변화하며 4회 때에는 솔더 볼 파단과 금속간화합물 층의 파단이 함께 발생하였다. 마지막 8회 때에는 전부 brittle mode로 변화하여 금속간 화합물 층에서 파단이 일어난 것을 볼 수 있다. 이러한 파괴 모드는 리플로우 1회 때의 표면처리 OSP와 비교할 때 고속 전단강도 및 충격 에너지 값이 낮아진 원인으로 볼 수 있다.

1회 일때 연성 파괴 즉 솔더 볼에서 파단이 일어났으나 4회 때는 금속간 화합물 층에서 파단이 일어나게 되므로 전단 강도 및 충격 에너지가 다른 표면처리에 비하여 현저히 감소한 원인이라 판단된다. 또한 8회 때의 파단면을 보면 100% brittle mode 형상으로 8회 리플로우 때 다른 표면처리에 비하여 가장 낮은 전단강도 및 충격 에너지 값을 나타내는 원인이라 볼 수 있다. ENEPIG일때 고속 전단시험 후 파단면을 SEM으로 관찰하였을 때는 다른 표면처리와 다르게 4회까지는 100% ductile mode로 솔더 볼에서 파단이 일어나고 8회에서도 일부 ductile mode 파괴를 보인다. 이렇게 파면이 연성파괴 모드가 많을수록 전단강도 값이 높게 나타났다.

Fig. 6은 고속 전단시험 후 리플로우 횟수와 표면처리

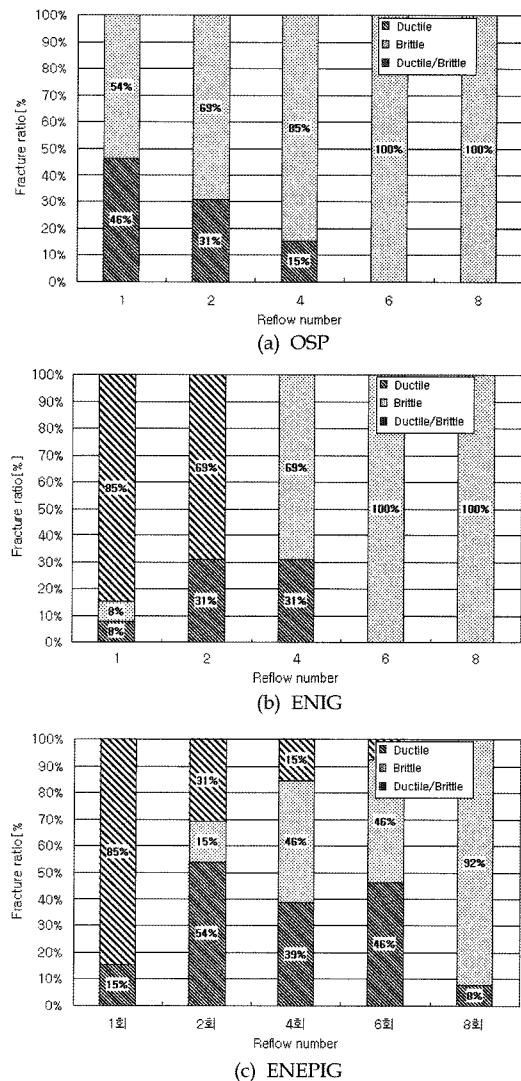


Fig. 6. Fracture mode ratio formed on the various surface finishes as a function of reflow number by high speed shear test: (a) OSP, (b) ENIG and (c) ENEPIG.

에 따른 파단모드의 상대 비율을 그래프로 나타낸 것이다. 동일 조건에서 평가된 13개의 시편의 파면을 모두 관찰하여 F. Song 등<sup>6)</sup>이 시도한 방법을 적용하여 파괴모드를 구분하였다. 즉 전단시험 후 전형적인 연성의 성질을 가진 솔더 부분에서 파단을 일어나는 것을 기준으로 솔더 불 면적을 percentage로 구하여 100% 솔더 불 파단이 일어난 경우 ductile mode 이고 100% IMC파단 경우 brittle mode, 이외 모두 mixed mode의 3가지 mode로 구분하였다. Fig. 6(a)의 OSP의 경우 1회에서부터 brittle mode가 형성되었고 (b)의 ENIG의 경우 4회 정도에서 brittle mode가 형성되었다. (c) ENEPIG의 경우 8회 정도에서 brittle mode가 형성되는 것을 볼 수 있다.

솔더링에서 발생하는 확산은 금속 솔더 원자와 PCB와 BGA부품의 전극부에 사용된 금속원자간의 상호이동을 말한다. 이러한 확산은 솔더와 모재금속의 계면에 금속간화합물을 발생시키는 원인이 되며, 접합면의 접합강도에도 큰 영향을 준다. 일반적으로 금속간 화합물  $Cu_3Sn$ 과  $Cu_6Sn_5$ 는 약 250~300°C의 온도에서 생성되며 Cu의 Sn으로의 확산에 의해  $Cu_6Sn_5$ 가 생성된 후 Sn의 Cu로의 확산이 감소하여  $Cu_3Sn$ 상이  $Cu_6Sn_5$ 상을 소모하며 성장하게 된다. 이러한 접합계면에서 발생하는 확산현상은 솔더와 모재금속간의 상호이동으로 원자간의 결합이 발생하여 접합면의 강도 증가에 기여하나 접합면의 금속간화합물 층 두께가 상대적으로 커지면 기계적 강도는 감소하게 되므로 계면에서의 적절한 확산이 중요하다.<sup>8)</sup> Fig. 7은 각각의 표면처리에 따른 솔더 접합부를 SEM으로 관

찰 한 것이며 Fig. 8은 IMC층을 EDS 분석한 결과이다. OSP의 경우 솔더 접합부에  $Cu_6Sn_5$ 의 금속간 화합물(IMC) 층이 형성된 것을 알 수 있다.

또한 리플로우 횟수가 1회에서 8회로 증가 할수록 IMC 층이 점차 성장하는 것을 볼 수 있으며 이는 고속 전단강도 저하에 직접적인 원인이 된 것으로 판단된다. ENIG의 경우 솔더 접합부에  $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 의 IMC 층이 형성된 것을 볼 수 있다. 리플로우 횟수의 증가에 따라 IMC 층이 성장하며 4회에서부터 IMC 층 내부에 void가 형성되는 것을 관찰 할 수 있다. 그리고 8회 때는 이 void들이 점차 증가하며 확대된다. 이 void들은 금속간화합물의 형성 시 동반하는 volume shrinkage에 의해 발생한 것으로 판단되며, 이것을 원인으로 고속 전단강도의 현저한 감소를 가져 온 것으로 생각된다.<sup>9)</sup>

ENEPIG의 경우에도 Table 2와같이  $(Ni, Cu)_6Sn_5$ 의 IMC 층이 형성되었으나 리플로우 횟수에 따른 IMC 층의 두께의 증가가 상대적으로 작았고 다른 표면처리에 비해 8회가 되어야 void가 생성되었다. 이러한 이유로 ENEPIG의 경우 ENIG 표면처리 보다 강도가 높은 결과로 나타났다고 판단된다. 또한 리플로우 횟수가 증가함에 따라 IMC층의 두께가 증가한다.<sup>9-11)</sup> 그러나 같은 금속간화합물이 형성되는 ENIG와 비교해 볼 때, ENEPIG의 경우 IMC층의 두께 증가가 많이 발생하지 않았다. Fig. 8에서 보면 ENEPIG 금속간 화합물에서는 Pd가 분석되었다. Pd의 침가는 금속간 화합물층의 두께를 억제시킨다는 연구 결과가 보고<sup>12,13)</sup>된 바 있으며, Milad 등<sup>13)</sup>에 의하

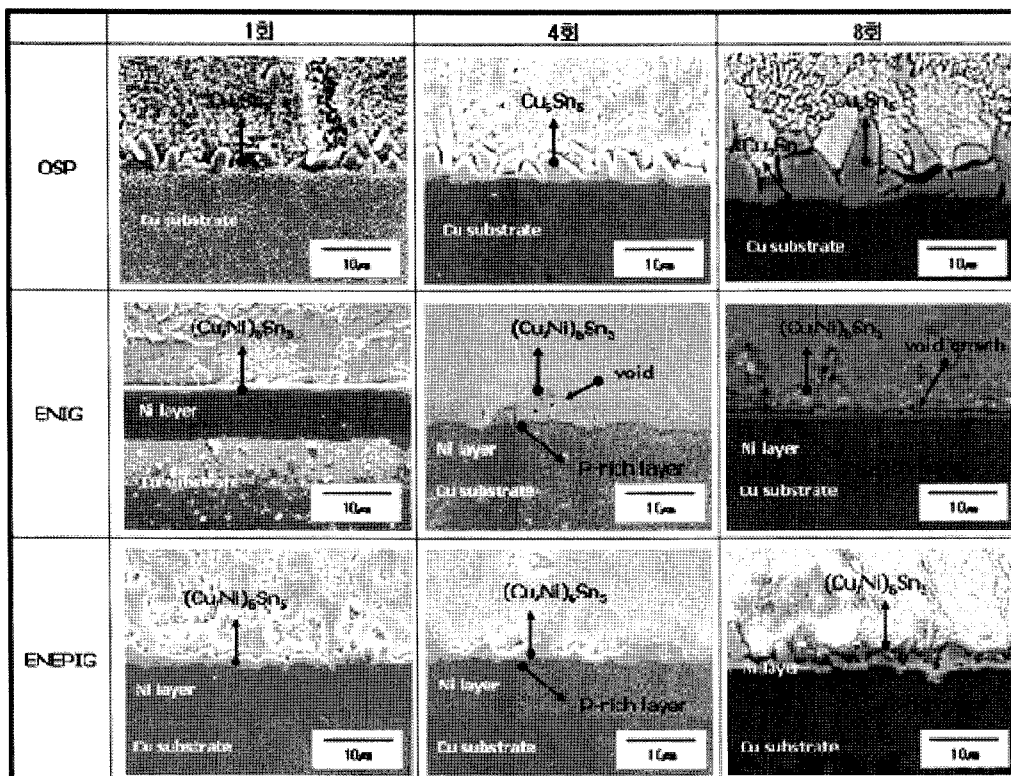


Fig. 7. SEM cross-section images of solder joints formed as a function of reflow number with solder ball composition and (OSP/ENIG/ENEPIG) surface finishes.

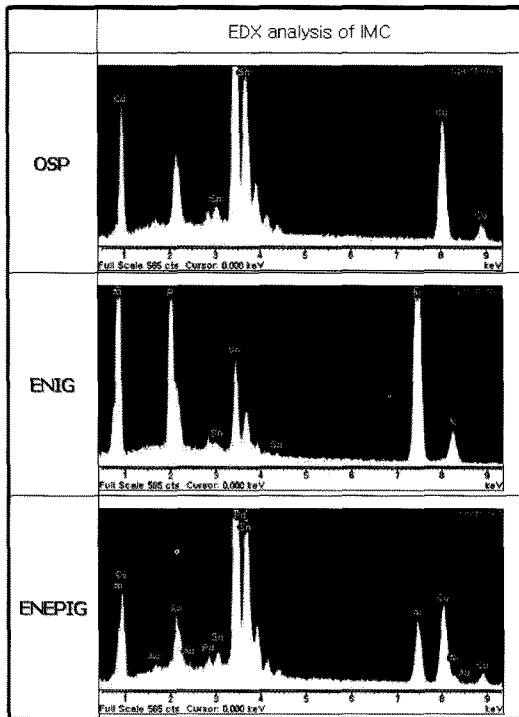


Fig. 8. EDS analysis results of solder joints as functions of (OSP/ENIG/ENEPIG) surface finishes.

Table 2. Chemical Composition of IMC layers analysed by EDS

Surface finishes	IMC	Composition (at.%)		
		Cu	Ni	Sn
OSP	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	53.5	-	46.5
	Cu <sub>3</sub> Sn	73.0	-	26.9
ENIG	(Cu,Ni) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	37.8	22.2	39.9
ENEPIG	(Cu,Ni) <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>	31.6	25.8	42.6

면 Ni층과 Au층의 사이에 Pd층을 끼워넣음으로써 Ni의 열확산을 억제할 수 있기 때문에 ENIG에 비하여 접합강도가 높아지게 된다고 하였다. 본 연구에서도 Pd가 첨가

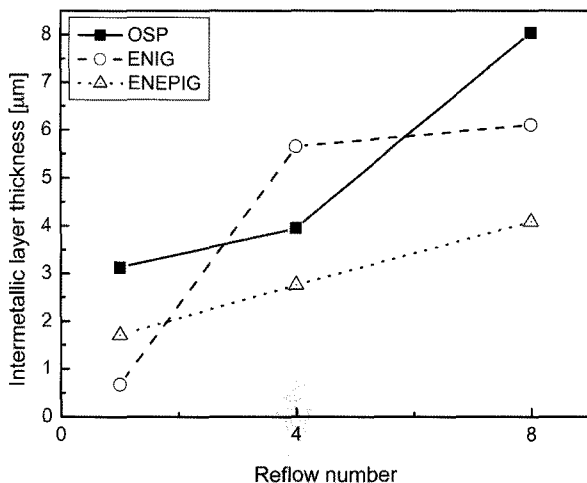


Fig. 9. IMC thickness measured as a function of reflow number with the various surface finishes.

된 ENEPIG의 경우에서 IMC 층의 두께가 가장 작았으며 그 이유는 역시 Pd의 존재에 기인하고 있다고 생각된다.

Fig. 9에서는 1회, 4회, 8회의 금속간 화합물 층 두께를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 두께값은 각 표면처리와 리플로우 횟수에 따른 각각의 IMC층의 면적을 측정하여 접촉길이를 나누어 줌으로서 평균 두께를 계산하였다. 표면처리에 관계없이 리플로우 횟수가 증가함에 따라 금속간 화합물 층의 두께는 증가하는 것을 볼 수 있다. 1회일 때에는 ENIG가 가장 얇았으나 마지막 8회일 때는 ENEPIG가 가장 얇은 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

리플로우 횟수와 표면처리에 따른 Sn-3.0Ag-0.5Cu 무연솔더 볼의 고속전단 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 리플로우 횟수가 증가 할수록 표면처리와 관계없이 고속 전단강도와 충격에너지 값이 감소한다. SEM 분석결과 리플로우 횟수가 증가함에 따라 금속간화합물 층의 두께가 증가하게 되고 brittle fracture의 비율이 점차 증가하면서 고속 전단강도와 충격에너지 값이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

2) 표면처리는 리플로우 1회일때 ENEPIG, ENIG, OSP 순으로 고속 전단강도와 충격에너지 값이 높고 8회일때 ENEPIG, OSP, ENIG 순으로 충격에너지 값이 높았다. ENEPIG의 경우 Pd의 첨가가(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>의 계면 금속간 화합물의 성장을 억제시켜 고속 전단강도 및 충격에너지 값이 높게 나타나는 원인이 된 것으로 판단된다.

3) ENIG의 경우 리플로우 횟수가 증가함에 따라 금속간화합물 층에서 volume shrinkage에 의해 void가 생성되고 성장함에 따라서 고속 전단강도의 감소폭이 크게 나타나는 것으로 관찰되었다.

#### 참고문헌

1. JEDEC Standard JESD22-B111, Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products
2. T. T. Yan, M. Lim, N. H. Shen, X. Baraton, D. Kaire, Z. Zhawei, "Design Analysis of Solder Joint Reliability for stacked Die mixed Flip-Chip and Wirebond BGA", Electronic Packaging Technology Conf., 391-397, (2002).
3. RS D 0015, 무연 솔더볼, 산업자원부 기술표준원, (2003).
4. JEDEC Solid State Technology Association, JESD22B-117A Solder ball shear (2000).
5. Bin Zhao, Bing An, F. S. Wu, Y. P. Wu, "Effect of Heating Factors on Brittle Fractures of Solder Joints By High Speed Shear Test", Electronic Packaging Technology, 7th ICEPT Int. Conf. 1-5, (2006).
6. S. H. Park, T. S. Oh, G. Englemann, "Interfacial Reactions of Sn Solder With Variations of Under-Bump-Metallurgy and Reflow Time", J. Microelectronics & Packaging Society, 14, 44, (2007).

7. Fubin Song and S. W. Ricky Lee, "Investigation of IMC Thickness Effect on the Lead-free Solder Ball Attachment Strength: Comparison between Ball Shear Test and Cold Bump Pull Test Results", proc. 56th Electron, Comp. Technol. Conf., HongKong, (2006).
8. 홍원식, "솔더링 접합계면의 금속간화합물", 28-35, 월간 표면실장기술, 6월호, (2002).
9. T. C. Chiu, K. Z. Roger Stierman, Darvin Edwards, Kazuaki Ano, "Effect of Thermal Aging on Board level Drop Reliability for Pb-free BGA packages", proc. 54th Electron, Comp. Technol. Conf., Japan, 1256-1262, (2004).
10. J. M. Koo, C. Y. Lee, S. B. Jung, "Effect of Reflow Number on Mechanical and Electrical Properties of Ball Grid Array (BGA) Solder Joints", J. Microelectronics & Packaging Society, 14, 45, (2007).
11. Y. S. Park, Y. M. Kwon, H. Y. Son, J. T. Moon, B. W. Jeong, K. I. Kang, K. W. Paik, "A Study of the Interfacial Reaction between Various Sn-Ag-Cu Solder Balls and ENIG (Electroless Ni Immersion Gold) and Cu-OSP (Organic Solderability Preservative) Metal Pad Finish", J. Microelectronics & Packaging Society, 14, 45, (2007).
12. 시미즈 시게키, "반도체 부재기술 총람8. 패키지재료", Japan micro device, (2008).
13. B. G. Milad and M. Orduz, "Surface Finishes in a Lead-Free World", circuit world, 34. 4. 4-7, (2008).