

# ENEPIG/Sn-Ag-Cu 솔더 접합부의 취성 파괴에 미치는 무전해 니켈 도금액의 영향

김경호\* · 서원일\*\*\* · 권상현\* · 김준기\* · 윤정원\* · 유세훈\*†

\*한국생산기술연구원 용접접합그룹

\*\*한양대학교 신소재공학과

## Effects of Ni-P Bath on the Brittle Fracture of Sn-Ag-Cu Solder/ENEPIG Solder Joint

Kyoung-Ho Kim\*, Wonil Seo\*\*\*, Sang-Hyun Kwon\*, Jun-Ki Kim\*, Jeong-Won Yoon\*, and Sehoon Yoo\*†

\*Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea

\*\*Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

†Corresponding author : yoos@kitech.re.kr

(Received May 15, 2017 ; Revised May 30, 2017 ; Accepted June 8, 2017)

### Abstract

The effect of metal turnover (MTO) of electroless Ni plating bath on the brittle fracture behavior of electroless nickel electroless palladium immersion gold (ENEPIG)/Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu(SAC305) solder joint was evaluated in this study. The MTOs of the electroless Ni for the ENEPIG surface finish were 0 and 3. As the MTO increased, the interfacial IMC thickness increased. The brittle fracture behavior of the ENEPIG/SAC305 solder joint was evaluated with high speed shear (HSS) test. The HSS strength decreased with increasing the MTO of the electroless Ni bath. The brittle fracture increased with increasing the shear speed of the HSS test. The percentage of the brittle fracture for the 3 MTO sample was much higher than that for the 0 MTO sample.

Key Words : ENEPIG, Metal turnover, Sn-Ag-Cu, Ni-P, Interfacial intermetallic compound, Brittle fracture

## 1. 서 론

최근 모바일 기기들의 고사양화에 따라 I/O수가 증가하면서, 부품의 접합을 위한 솔더의 크기 및 피치가 점점 미세화되고 있다. 모바일 기기들은 사용 중 낙하 충격으로 기기의 고장이 발생되지 않게 하기 위해 높은 신뢰성을 가져야 한다. 하지만, 미세피치 솔더접합부에서는 접합부의 감소된 크기와 면적으로 인해 낙하충격 특성에 취약하므로, 낙하충격에 대한 신뢰성 확보가 중요한 문제로 대두된다<sup>1)</sup>. 낙하충격처럼 빠른 변형률에 의한 솔더 접합부 신뢰성 저하를 억제하기 위해 Ni, In, Pd 같은 미량 원소를 솔더에 첨가하는 방법<sup>2)</sup>, Sn-Ag-Cu (SAC) 솔더에서 Ag함량을 줄이는 방법<sup>3)</sup>, PCB 표면처리를 변경하거나 특성을 향상시키는 방법<sup>4)</sup> 등의

많은 연구들이 진행되어 왔다. 특히, PCB 표면처리하는 솔더 접합부의 신뢰성에 크게 영향을 주기 때문에 표면 처리와 솔더접합부 간 상관관계를 규명하는 연구들이 많이 진행되어 왔다<sup>5,6)</sup>.

본 연구에서 적용된 표면처리는 Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold (ENEPIG)이다. ENEPIG는 Electroless Nickel Immersion Gold (ENIG)의 문제점인 치환금 도금 시 니켈 부식을 방지하기 위해 무전해 팔라듐을 무전해 니켈과 치환금 층 사이에 위치 시킨 표면처리이다. 따라서, ENEPIG는 니켈 부식에 의한 블랙패드 불량에 비해 아주 적다. 또한, ENEPIG는 높은 부식저항특성 및 솔더링성을 가지며, Au 및 Al 와이어본딩과 솔더접합의 표면 처리로 동시에 사용 가능한 넓은 범용성을 가지고 있다<sup>7)</sup>.

본 연구에서는 모바일 제품에서 많이 사용되는 ENEPIG

표면처리 공정 중, 무전해 니켈 도금 공정에서 도금액의 상태에 따른 솔더 접합부의 신뢰성에 대해 살펴보고자 한다. 기존에 발표된 연구 결과에 따르면, 전해 Cu 도금의 경우 많은 연구들이 도금액에 따라 최종 솔더링에 영향을 받는다고 보고되고 있다<sup>8-11)</sup>. Yu와 Kim은 전해 Cu 도금 공정에서 첨가제의 영향에 따라 솔더접합부의 Cu/Cu<sub>3</sub>Sn 계면에 발생하는 micro-void의 수와 크기에 영향을 준다고 보고하였다<sup>11)</sup>. Yin et al.도 솔더접합부의 micro-void의 형성에 전해 Cu 도금 공정조건이 영향을 준다고 보고하고 있다<sup>9)</sup>. 위와 같이, 솔더 접합 시 솔더와 반응하는 PCB 표면처리 공정에서 사용된 도금액과 도금 공정조건이 후속 공정인 솔더링 시 접합 계면의 미세조직에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. ENEPIG의 경우 일반적으로 치환금과 무전해 팔라듐의 두께가 매우 얇아 솔더링 공정에서 이들 두 층이 용융솔더에 용해되며, 그 후 남아있는 무전해 니켈층이 용융솔더와 반응하여 계면 IMC를 형성하게 된다. 따라서, 취성파괴에 관련이 있는 계면 IMC의 형성에 무전해 니켈이 참여하므로, 무전해 니켈의 도금 조건에 따라서 솔더접합부의 취성파괴에 영향이 있을 것으로 판단된다.

Metal turnover (MTO)란 무전해 도금액의 도금 조건을 파악하는 지표 중 하나이다. 무전해 도금을 진행할수록 도금액에서 금속 이온이 소모되므로, 주기적으로 금속이온을 보충해주어야 한다. 이 때, 최초 도금액 내의 금속 이온의 양과 동일한 금속이온을 보충하게 될 때 그 도금액은 1 MTO라고 한다. 도금을 계속 진행하면서 금속이온을 계속 보충해주면 MTO가 증가하게 되며, 도금액의 종류에 따라 다르지만, 일반적으로 3.0 ~ 3.5 MTO정도가 되면 도금액은 폐액 상태가 된다. MTO 자체는 금속이온을 얼마나 보충해 주었는가에 대한 지표이지만, 여기에는 신액과 폐액의 의미도 포함되어 있다. 즉, MTO가 크면 도금이 많이 진행된 상태이므로, 도금액은 인쇄회로기판(PCB)에서 나온 유기불순물들이 많이 포함된다. 따라서, 금속이온을 추가하지 않은 상태는 0 MTO로 신액 상태를 나타내며, 도금이 많이 진행되면 폐액상태가 되는데, 무전해 니켈 도금액에서는 3 MTO 정도를 폐액상태로 판단하고 있다.

본 연구에서는 ENEPIG 표면처리 층을 형성할 때, 첫 번째 도금공정인 무전해 니켈 공정에서 도금액을 0과 3 MTO로 변화하여 니켈도금을 진행하였고, 그 후 동일한 조건으로 무전해 팔라듐, 치환금 도금을 진행하였다. 형성된 ENEPIG 표면처리에 Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu (SAC305) 솔더볼을 마운팅하고 리플로우하였다. 그 후 솔더 접합부의 계면을 관찰하고, 취성파괴를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 PCB 표면처리

본 연구에서는 Cu 패드가 형성된 FR-4 PCB를 기판으로 사용하였다. Cu 패드 직경은 400 $\mu$ m 이었고, 두께는 10 $\mu$ m로 형성되었다. PCB의 PSR (Photoimageable solder resist) 두께는 15 $\mu$ m이었다. ENEPIG 표면처리는 PCB기판의 Cu 패드 위에 실시하였다. PCB 표면처리 전처리에는 산탈지, 소프트 에칭, 촉매공정으로 구성되었다. 기판상의 오염물 탈지 및 젖음성을 부여하기 위하여 산탈지 세척을 실시하고, 산세를 실시하여 표면활성화를 진행하였다. 표면활성화 공정 후에 표면 산화층을 제거하고, 표면 조도를 높여 밀착성을 향상시키기 위해 소프트 에칭을 진행하였다. 무전해 니켈 증착을 위해서는 촉매를 소프트에칭을 실시한 Cu 패드 표면에 형성하였다. 그 후, 무전해 니켈 도금, 무전해 팔라듐 도금, 치환금 도금을 실시하여 니켈 도금층과 금 도금층을 형성 시켰다.

무전해 니켈 도금은 도금조 온도 83 $^{\circ}$ C에서 25분 실시하였다. 무전해 니켈 도금액은 0과 3 MTO로 변화하였다. 0 MTO는 건욕 상태의 도금액이며 3 MTO는 폐액 수준의 도금액이다. 무전해 팔라듐 도금은 72 $^{\circ}$ C에서 진행하였다. 치환 금 도금은 온도 80 $^{\circ}$ C에서 실시하였다. 도금된 무전해 니켈, 무전해 팔라듐, 치환금의 두께는 각각 5 $\mu$ m, 0.05 $\mu$ m, 0.05 $\mu$ m이었다. 각 도금층의 모식도를 Fig. 1에 나타내었고, 도금 후 ENEPIG의 표면과 단면은 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.2 솔더링 공정

솔더링 공정에 사용된 솔더볼은 450 $\mu$ m 크기의 SAC305 (ET16E02P, Ducsan Hi-Metal)이었다. 먼저, ENEPIG 표면처리된 Cu 패드 위에 SAC305 솔더페이스트(M705-SHF, Senju)를 인쇄하였다. SAC305 솔더페이스트의 인쇄조건은 인쇄속도 20mm/sec, 인쇄압력 2 kgf/cm<sup>2</sup>, 인쇄각도 45 $^{\circ}$ , 스크린 Gap -0.2mm, 기판분리 속도 0.2mm/sec 이었다. 인쇄된 솔더페이스트 위에 볼 마운팅용 메탈마스크를 사용하여 솔더볼 마운팅을 실시하였다. 볼 마운팅

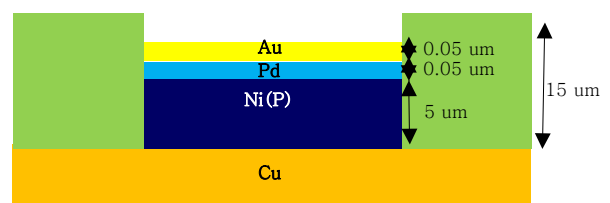


Fig. 1 Schematic illustration of ENEPIG surface finish on Cu pad of the FR-4 PCB

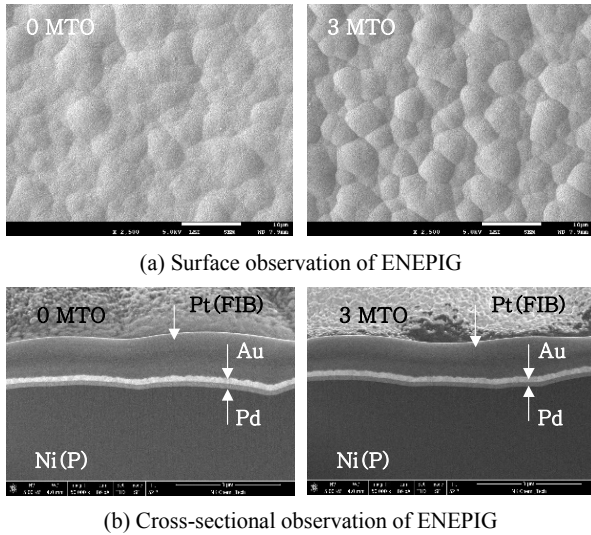


Fig. 2 Surface and cross-sectional SEM micrographs after ENEPIG surface finish

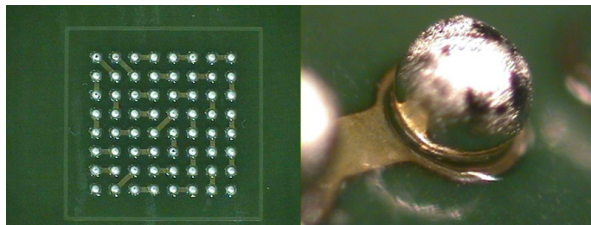


Fig. 3 SAC305 solder ball on ENEPIG surface finish

용 메탈마스크의 홀 직경은  $550\mu\text{m}$  이었다. 솔더볼 마운팅 후 솔더볼을 접합하기 위해 리플로우 오븐(1809UL, Heller)을 이용하여 피크 온도  $250^\circ\text{C}$ 에서 50초 간 솔더링을 실시하였다. 리플로우 공정 후 ENEPIG표면처리에 형성된 SAC305솔더볼 샘플의 이미지를 Fig. 3에 나타내었다.

### 2.3 물성 및 신뢰성 평가

고온 시효에 따른 계면 금속간 화합물 (IMC)의 변화를 관찰하기 위해  $150^\circ\text{C}$  에서 500시간 동안 고온 시효를 실시하였다. 그 후 단면연마를 수행하고, 주사전자현미경(SEM, Inspect F, FEI) 으로 솔더 접합부의 계면을 관찰 하였다.

높은 변형률의 고장모드에서 솔더 접합부의신뢰성을 파악하기 위해 고속전단시험을 통해 취성파괴율을 평가 하였다. 고속전단시험은 고속전단시험기(4000HS, Dage)를 이용하였고, 시험은 JEDEC JESD22-B117A 규격에 의거하여 수행하였다<sup>2)</sup>. JEDEC 규격에서는  $100\sim 800\mu\text{m/s}$ 의 속도로 전단시험을 시행하는 것을 저속전단 시험, 그 이상을 고속전단시험으로 분류하고 있다<sup>12)</sup>.

또한, 전단높이의 경우 전체 솔더볼 높이의 25%미만을 권장하고 있어, 전단 톨의 높이는 PSR 표면으로부터  $50\mu\text{m}$ 를 유지하였다. 고속전단시험은 각 조건 별로 25회씩 시험을 진행하였다. 이 때, 전단 속도는  $0.1 - 2.0\text{m/s}$ 의 조건으로 진행하여, 전단속도의 변화에 따른 전단 강도 및 취성파괴 영향을 확인하였다.

고속전단시험 후 파단면을 SEM을 이용하여 확인하였다. Fig. 4에서와 같이 딩플(dimple)이 있는 연성파괴 영역과 매끈한 취성파괴 영역을 확인 할 수 있다. 이러한 두 영역의 성분을 확인하기 위하여 EDS 분석을 하였다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 연성파괴 영역은 Sn이 주를 이루므로, 솔더 내부에서 파단이 발생하였고, 취성파괴 영역은 Ni, P, Sn이 측정 되는 것을 보아 솔더접합부 계면인 Ni-Sn-P층 또는  $\text{Ni}_3\text{P}$ 층에서 파단이 이루어짐을 확인하였다. 일반적인 접합부 파단 모드는 크게 연성파괴, 연성-취성 복합 파괴, 취성파괴의 세 가지 모드로 구분하고 있다<sup>13-15)</sup>. 본 연구에서도 총 25개의 고속전단시험을 거친 샘플의 파단면을 SEM으로 관찰하였고, 연성, 연성-취성 복합, 취성파괴모드의 세 종류로 구분하였다.

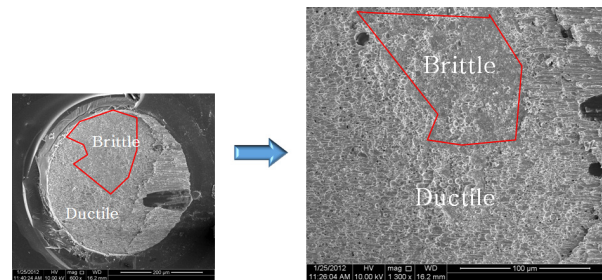
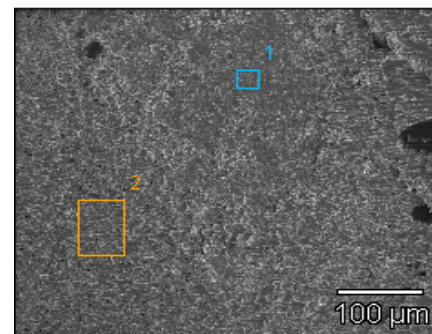


Fig. 4 Ductile and brittle region on the fracture surface after high speed shear test



|          | P-K (at%) | Ni-L (at%) | Sn-L (at%) |
|----------|-----------|------------|------------|
| Region 1 | 19.58     | 49.63      | 30.79      |
| Region 2 |           |            | 100.00     |

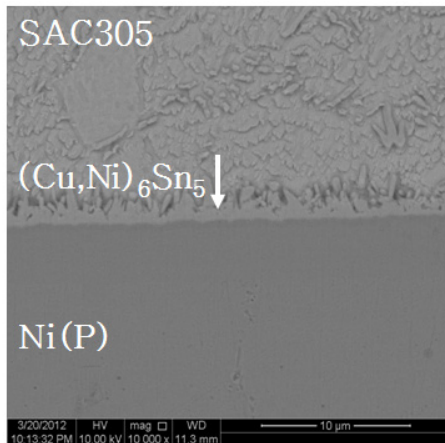
Fig. 5 EDS result of the fracture surface after high speed shear test



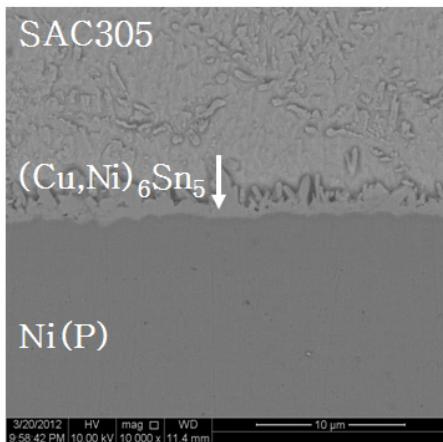
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 MTO에 따른 솔더접합부 미세조직 변화

무전해니켈 도금 시 도금액을 0과 3 MTO로 변화하여 ENEPIG 표면처리를 실시한 후, 표면처리 위에 SAC305 솔더볼을 마운팅 및 리플로우 한 후, 접합부를 SEM으로 관찰하였고, 그 이미지를 Fig. 6에 나타내었다. 리플로우 후 ENEPIG와 SAC305솔더 계면에서는  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC가 형성되는 것을 관찰하였다. SAC솔더에서는 솔더 내 Cu의 농도가 낮을 경우에는  $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ , 높을 경우에는  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC가 형성되며, Cu 농도가 0.5wt%인 SAC305솔더의 경우  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$  IMC가 형성된다고 보고되고 있다<sup>16)</sup>. ENEPIG/SAC305 솔더 접합부의 계면 IMC 두께는 MTO가 증가함에 따라 약간 증가하였다. IMC 두께는 0 MTO 샘플에서는  $1.07\mu\text{m}$ 이었고, 3 MTO 샘플에서는  $1.22\mu\text{m}$ 이었다. Seo et al.은 ENIG/SAC305 솔더 접합부에서 Ni도금액의 MTO

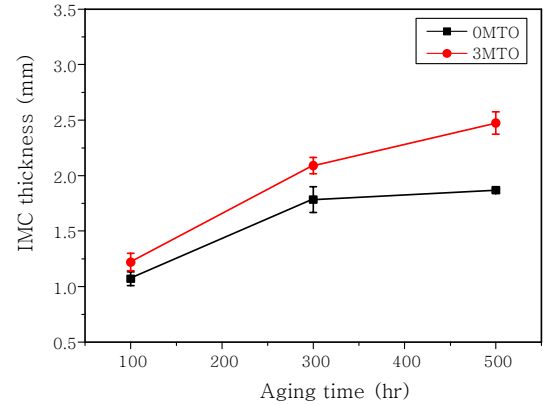


(a)



(b)

**Fig. 6** Cross-sectional SEM micrographs of the SAC305 solder joint on ENEPIG surface finish. The Ni bath was (a) 0 MTO and (b) 3 MTO



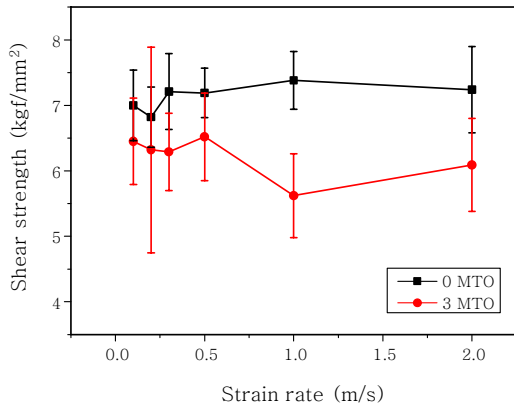
**Fig. 7** Interfacial IMC thickness of ENEPIG/SAC305 solder joint vs. thermal aging time with varying MTO of Ni-P plating solution.

를 0에서 3으로 변화하면서 IMC 두께를 관찰하였는데, IMC두께는  $1.43\mu\text{m}$ 에서  $2.71\mu\text{m}$ 로  $1.3\mu\text{m}$ 이상 증가하였다고 보고하고 있다<sup>4)</sup>. 본 연구의 ENEPIG 표면처리는 ENIG만큼 IMC두께 증가가 크지 않았다. ENEPIG 표면처리의 경우 무전해 팔라듐 층이 Ni과 Sn 그리고 Cu의 확산을 억제하여 ENIG 표면처리에 비해 얇은 IMC층을 형성하게 된다<sup>17)</sup>. 따라서, MTO에 의한 IMC 두께 증가의 효과가 ENEPIG에서는 미미하게 작용하는 것으로 판단된다.

150°C에서 500시간 동안 고온시효 처리 중 계면 IMC의 두께를 관찰하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 계면 IMC 두께는 시효 시간이 증가함에 따라 증가하였다. 500시간 시효처리 후 0 MTO 샘플은 3 MTO 샘플보다 낮은 IMC 두께를 보였다. 따라서, 계면 IMC 두께는 무전해 Ni 도금액의 상태에 영향을 받을 수 있다. MTO의 증가는 Ni 도금액의 유기불순물의 농도를 증가시킨다. 전해 Cu 도금의 경우, 불순물의 첨가가 microvoid의 불균일 핵생성을 증가시킨다고 보고하고 있다<sup>9)</sup>. 본 연구의 무전해 Ni층에서도 불순물이 원자의 빈자리(vacancy)의 발생을 증가시키고, 이를 통해 치환형 확산을 증가시키므로, 불순물이 많은 3 MTO 샘플이 0 MTO 샘플보다 IMC의 두께가 두꺼운 것으로 판단된다.

#### 3.2 솔더 접합부의 취성파괴율

MTO 변화에 따른 ENEPIG/SAC305 솔더 접합부의 취성파괴거동을 파악하기 위해 고속전단강도를 측정하였고, Fig. 8에 나타내었다. 고속 전단강도는 전단속도가 증가함에 따라 0 MTO와 3 MTO 샘플 모두 감소하였다. 일반적으로 전단 속도가 증가함에 따라 솔더의 전단강도가 증가하다가 일정 전단 속도 이상에서 감

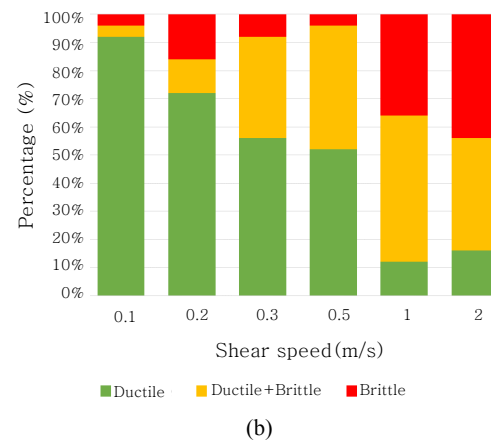
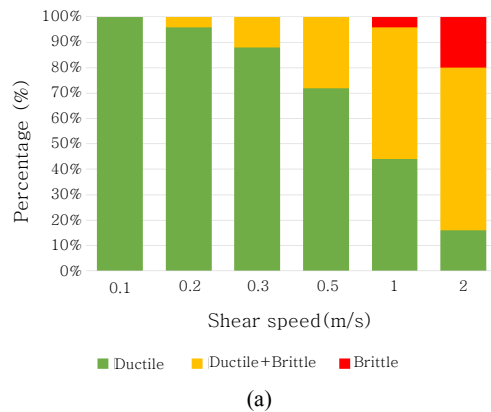


**Fig. 8** High speed shear strength of the SAC305 solder on ENEPIG with MTO of Ni-P plating solution

자기 감소하는 모습을 보여주는데, 이것은 전단강도가 증가함에 따라 솔더에서 파괴가 일어나는 연성파괴에서 IMC에서 파괴가 일어나는 취성파괴로 모드가 변화하기 때문이다<sup>18)</sup>. 특히, 취성파괴율이 높은 ENIG 표면처리에서는 이러한 경향이 두드러지게 된다<sup>4)</sup>. 본 연구에서 ENEPIG 0 MTO 샘플의 경우에는 전단속도가 증가함에 따라 전단강도의 급격한 감소가 보이지 않았다. 반면 3 MTO 샘플에서는 전단속도가 1.0m/s 이상에서 강도 값의 하락을 보였다. 이러한 전단강도의 하락은 계면 IMC에서의 취성파괴가 솔더내부에서의 연성파괴보다 더 많이 발생하는 것이다.

취성파괴 모드를 관찰하기 위해 고속전단시험 후 파 단면을 관찰하였고 Fig. 9에 파괴모드를 나타내었다. 총 샘플 수는 25개였고, 25개 샘플 중 연성, 연성+취성, 취성파괴의 세 가지 모드로 나누어 그래프에 표시하였다. 전단속도가 낮을 경우에는 연성파괴가 대부분을 차지하지만, 전단속도가 증가함에 따라 취성파괴가 증가하였다. 0 MTO 샘플의 경우, 전단 속도가 1 m/s 이상에서 IMC에서 100% 파괴되는 취성파괴가 관찰되었다. 3 MTO 샘플의 경우, 가장 낮은 전단속도인 0.1 m/s 에서부터 취성파괴가 관찰되었다. 또한, 1 m/s 이상에서는 취성파괴가 30%이상으로 크게 증가되었다. 따라서, 3 MTO 샘플이 0 MTO 샘플보다 취성파괴율이 높고, 전단 강도 값은 낮은 것으로 나타났다.

무전해 Ni 도금액의 MTO가 증가하면서 솔더접합부의 취성파괴가 증가하는 이유는 MTO 증가에 따른 Ni-Sn-P층에서 형성되는 nano-void의 증가로 판단된다. 계면 IMC도 취성파괴에 영향을 주지만, 리플로우 후 0 MTO와 3 MTO 샘플간 IMC 두께 차이는 크지 않았으므로, MTO 변화에 따른 취성파괴율 증가에서는 IMC 두께 영향은 없는 것으로 판단된다. ENIG 표면처리의 경우 MTO의 증가에 따라 Ni-Sn-P층에서 형성되는 nano-



**Fig. 9** Percentage of brittle fracture modes in the SAC305/ENEPIG solder joint with the MTO of Ni-P plating solution. (a) 0 MTO and (b) 3 MTO

void의 크기와 수가 증가되었다<sup>4)</sup>. 이러한 접합 계면에서의 nano-void의 증가는 취성파괴율을 증가시키고, 따라서 전단강도 값이 낮아지게 된다. 본 연구의 ENEPIG 표면처리의 경우에도 무전해 Ni 층이 용융 솔더와 접촉하여 반응하기 때문에 ENIG의 경우와 같이 nano-void가 형성되고, 이러한 nano-void가 취성파괴에 영향을 주는 것으로 판단된다. 향후에 ENEPIG의 무전해 Ni 층과 SAC305솔더 접합부 계면에서 형성되는 nano-void에 대한 관찰이 진행될 예정이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ENEPIG 표면처리에서 무전해Ni 도금액의 MTO를 변화했을 때, 솔더 접합부의 취성파괴를 고속전단강도 시험을 통해 관찰하였다.

1) ENEPIG의 무전해 Ni 도금액의 MTO가 증가될 경우, 솔더 리플로우 후의 계면 IMC의 두께 차이가 크지 않았으나, 500시간 시효 처리 후에는 3 MTO 샘플이 0 MTO 샘플보다 높은 계면 IMC 두께를 보였다.

2) 무전해 Ni 도금액 MTO가 0 MTO에서 3 MTO

로 증가되면 전단강도가 낮아지는데, 그 이유는 3 MTO 샘플의 0 MTO 샘플보다 취성파괴 모드가 증가했기 때문이다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 연구사업으로 수행되었습니다. 본 연구와 관련하여 도움을 주신 (주)엠케이켐 엔텍社에 감사의 말씀을 전합니다.

## References

1. N. Biunno, A root cause failure mechanism for solder joint integrity of electroless nickel/immersion gold surface finishes, *Proc. IPC Printed Circuits Expo1999, Paper* (1999)
2. M. Amagai, Y. Toyoda, T. Ohnishi and S. Akita, High drop test reliability, lead-free solders, *Proceedings of 54th Electronic Components and Technology Conference* 2 (2004), 1304-1309 Vol.1302
3. H. Kim, M. Zhang, C. M. Kumar, D. Suh, P. Liu, D. Kim, M. Xie and Z. Wang, Improved Drop Reliability Performance with Lead Free Solders of Low Ag Content and Their Failure Modes, *Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference* (2007), 962-967
4. W. Seo, K.-H. Kim, J.-H. Bang, M.-S. Kim and S. Yoo, Effect of Bath Life of Ni (P) on the Brittle-Fracture Behavior of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/ENIG, *J. Electron. Mater.* 43 (2014), 4457-4463
5. B.-S. Lee, Y.-H. Ko, J.-H. Bang, C.-W. Lee, S. Yoo, J.-K. Kim and J.-W. Yoon, Interfacial reactions and mechanical strength of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/Ni/Cu and Au-20Sn/Ni/Cu solder joints for power electronics applications, *Microelectron, Reliab.* 71 (2017), 119-125
6. Y.-C. Sohn and J. Yu, Correlation between chemical reaction and brittle fracture found in electroless Ni (P)/immersion gold-solder interconnection, *J. Mater. Res.* 20 (2005), 1931-1934
7. M. Ratzker, A. Pearl, M. Osterman, M. Pecht and G. Milad, Review of Capabilities of the ENIG Surface Finish, *J. Electron. Mater.* 43 (2014), 3885-3897
8. J. Y. Kim, J. Yu and S. H. Kim, Effects of sulfide-forming element additions on the Kirkendall void formation and drop impact reliability of Cu/Sn-3.5 Ag solder joints, *Acta Mater.* 57 (2009), 5001-5012
9. L. Yin, F. Wafula, N. Dimitrov and P. Borgesen, Toward a better understanding of the effect of Cu electroplating process parameters on Cu3Sn voiding, *J. Electron. Mater.* 41 (2012), 302-312
10. C. Yu, Y. Yang, K. Wang, J. Xu, J. Chen and H. Lu, Relation between Kirkendall voids and intermetallic compound layers in the SnAg/Cu solder joints, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 23 (2012), 124-129
11. J. Yu and J. Kim, Effects of residual S on Kirkendall void formation at Cu/Sn-3.5 Ag solder joints, *Acta Mater.* 56 (2008), 5514-5523
12. J. Standard and S. S. T. Association, Solder Ball Shear, *JESD22-B117A, Oct* (2006)
13. D. Goyal, T. Lane, P. Kinzie, C. Panichas, K. M. Chong and O. Villalobos, Failure mechanism of brittle solder joint fracture in the presence of electroless nickel immersion gold (ENIG) interface, *Electronic Components and Technology Conference, 2002. Proceedings. 52nd* (2002), 732-739
14. K. Harada, S. Baba, Q. Wu, H. Matsushima, T. Matsunaga, Y. Uegai and M. Kimura, Analysis of solder joint fracture under mechanical bending test, *Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings. 53rd* (2003), 1731-1737
15. F. Song, S. R. Lee, K. Newman, B. Sykes and S. Clark, High-speed solder ball shear and pull tests vs. board level mechanical drop tests, correlation of failure mode and loading speed, *Electronic Components and Technology Conference, 2007. ECTC'07. Proceedings. 57th* (2007), 1504-1513
16. C. E. Ho, R. Y. Tsai, Y. L. Lin and C. R. Kao, Effect of Cu concentration on the reactions between Sn-Ag-Cu solders and Ni, *J. Electron. Mater.* 31 (2002), 584-590
17. C.-F. Tseng, T.-K. Lee, G. Ramakrishna, K.-C. Liu and J.-G. Duh, Suppressing Ni3Sn4 formation in the Sn-Ag-Cu solder joints with Ni-P/Pd/Au surface finish, *Mater. Lett.* 65 (2011), 3216-3218
18. K. Newman, BGA brittle fracture-alternative solder joint integrity test methods, *Electronic Components and Technology Conference, 2005. Proceedings. 55th* (2005), 1194-1201