

## ENEPIG 표면처리에서의 Sn-Ag-Cu 솔더조인트 신뢰성: 2. Pd 촉매 시간의 영향

허석환<sup>†</sup> · 이지혜 · 함석진

삼성전기 ACI사업부

### Reliability of Sn-Ag-Cu Solder Joint on ENEPIG Surface Finish: 2. Effects of time of Pd activation

Seok-Hwan Huh<sup>†</sup>, Ji-Hye Lee and Suk-Jin Ham

ACI division, Samsung Electro-Mechanics, Busan 618-819, Korea

(2014년 8월 20일 접수: 2014년 9월 20일 수정: 2014년 9월 25일 게재확정)

**초 록:** 솔더조인트의 신뢰성에는 인쇄회로기판의 표면처리 특성이 많은 영향을 미치고 있다. 본 연구에서는 ENEPIG 표면처리에서 Sn-4.0wt%Ag-0.5wt%Cu (SAC405) 솔더와 Pd 촉매 처리 시간에 따른 high speed shear 에너지 및 파괴 모드를 연구하였다. 또한 Pd 촉매 처리 시간과 무전해 Ni-P 도금의 표면 거칠기 (Ra)와의 관계를 규명하였다. Pd 촉매 처리 시간이 길어질수록 Ni-P nodule의 면적은 넓어지고, Ni-P 도금의 표면 거칠기 (Ra)는 감소한다. 이러한 영향으로 질산 기상 처리한 시편의 high speed shear 평가후 quasi-brittle과 brittle 모드의 점유율은 감소한다. 이는 Pd 촉매 처리 시간의 증가가 SAC405 솔더조인트의 신뢰도를 향상시키는 역할을 한다는 것을 나타낸다.

**Abstract:** The reliability of solder joint is significantly affected by the property of surface finish. This paper reports on a study of high speed shear energy and failure mode for Sn-4.0wt%Ag-0.5wt%Cu (SAC405) solder joints with the time of Pd activation. The nodule size of electroless Ni-P deposit increased with increasing the time of Pd activation. The roughness (Ra) of electroless Ni-P deposit decreased with increasing the time of Pd activation. Then, with HNO<sub>3</sub> vapor, the quasi-brittle and brittle mode of SAC405 solder joint decreased with increasing the time of Pd activation. This results indicate that the increase in the Pd activation time for Electroless Ni/ Electroless Pd/ Immersion Au (ENEPIG) surface finish play a critical role for improving the robustness of SAC405 solder joint.

**Keywords:** Pd activation, Electroless Ni-P plating, ENEPIG, Ni-P roughness, Solder joint reliability, High speed shear, Ni-P thickness

## 1. 서 론

솔더조인트부(Solder joint)의 신뢰성에는 인쇄회로기판(Printed circuit board)의 표면처리 특성이 많은 영향을 미치고 있다.<sup>1-6)</sup> 많이 사용되는 상용화된 표면처리로는 Electroless Ni/ Immersion Au (ENIG), Immersion Sn, Direct immersion Au, Organic solderability preservative (OSP) 등이 사용되고 있으며, 그 중에서 높은 가격에도 불구하고 solderability를 가지고 있어서 많이 사용되는 ENIG 표면처리에 “Black pad”라는 Ni 부식 불량을 개선하고자 Immersion Pd이 추가된 ENEPIG 표면처리가 근래에 각광을 받고 있다.<sup>7-14)</sup> 기존 연구보고에서 Sn-Ag-Cu 솔더조인트의 신뢰성에 영향을 미치는 인자로 무전해 Ni-P 도금

두께와 표면 거칠기(Ra)의 상관 관계를 분석하였다. 무전해 Ni-P 도금 두께가 낮을수록, Ni-P 도금의 표면 거칠기 (Ra)가 높을수록, SAC 솔더조인트의 신뢰성은 악화되는 것으로 보고되었고, Ni-P 도금의 Ra에 영향을 주는 인자로 Ni-P 핵생성 사이트간의 간격이 보고되었다.<sup>14,15)</sup>

본 연구에서는 ENEPIG 표면처리에서 Ni-P 핵생성 사이트의 거리가 SAC405 솔더조인트의 신뢰성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 무전해 Ni-P 도금 전의 Pd 촉매의 처리 시간을 조절하여 실험을 디자인 하였다. 실험은 무전해 Ni-P 두께를 6 μm으로 고정하고, Pd 촉매 시간을 조절하여 무전해 Ni-P nodule 간 거리에 따른 표면 거칠기 (Ra)와 솔더조인트 신뢰성을 고찰하였다.

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: shhuh12@gmail.com

© 2014, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1.** The time of Pd activation and nitric acid vapor for each DOE condition

Sample condition		Sample size	Test method
Pd activation	Time of nitric acid vapor		
30 s			
60 s	Not available or 150 min	25 ball / pcs×5 pcs	High speed shear (2250 mm/sec)
90 s			

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시편 준비

Table 1은 본 연구에 사용된 시편과 시편 전처리, 샘플링 크기 및 신뢰성 평가법에 대해 나타내었다. 시편은 Pd 촉매에 따른 Ni-P 도금층의 표면 거칠기(Ra)와 high speed shear의 영향도를 평가하기 위하여 Pd 촉매 처리 시간을 5종류(15 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s)로 준비하여 Pd의 핵생성 및 성장을 관찰하고, 시편 전처리로서 질산 기상 처리에 따른 high speed shear 영향도를 평가하였다. 무전해 Ni-P 도금 조건 및 질산 기상 처리는 Lee 등의 ENEPIG 도금 방법, 시편 제작 및 구조, 시험 방법을 따랐다.<sup>15)</sup> ENEPIG 표면처리는 전해 구리 도금 패드 위에 솔더레지스트를 형성하고 불패드 영역(구리 패드)에 Pd 촉매를 시간별로 처리하였다.

Pd 촉매는 치환 타입으로, 조성은 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 40 ml/l, Pd 농도(Pd) 25 mg/l, 카르복실산 15 g/l 이며, 도금 온도는 30°C, 도금 시간은 15 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s 로 진행하였다. 이후 Ni-P도금은 상용 도금액을 사용하여 도금 온도 80°C, 도금 시간은 35 min 처리하여 6 μm 도금두께로 진행하였다. 무전해 Pd/Au 도금은 0.04 μm/0.06 μm 진행하여 Ni-P 도금의 내산화와 solderability 확보하였다. 이렇게 준비된 시편과 질산(HNO<sub>3</sub>) 기상 처리를 상온에서 150분간 처리하여 시편을 준비하였다.<sup>15,16)</sup> 시편의 high speed shear 평가를 진행하여 shear 에너지와 파괴모드를 관찰하였고, Pd 촉매에 따른 솔더조인트 신뢰성을 평가하였다.

### 2.2. High speed shear 평가

High speed shear 평가를 진행하기 위해서 시편 전처리가 끝난 시편에 메탈마스크를 이용하여 RMA 타입의 플럭스(Kester)를 도포하고 솔더볼 실장의 위치 정확도를 높이기 위하여 불실장용 메탈마스크를 제작, 사용하여 직경 500 μm의 Sn-4.0wt%Ag-0.5wt%Cu (SAC405) 솔더볼을 실장하였다. 이후 260°C 피크온도의 리플로 프로파일로 솔더링을 진행하였으며, 플럭스 제거를 위하여 isopropyl alcohol (IPA)에서 5분간 초음파 세척하여 상온에서 에어건으로 건조하였다. High speed shear 평가는 dage4000HS (Dage, England)를 이용하여 shear 스피드 2250 mm/s로 shear평가를 진행하였다. Shear 스피드는 파단모드에 따른 cliff point를 shear 스피드별로 평가하여 구하였다.<sup>19,22,23)</sup> 솔더볼 실장과 플럭스 제거가 완료된 시편

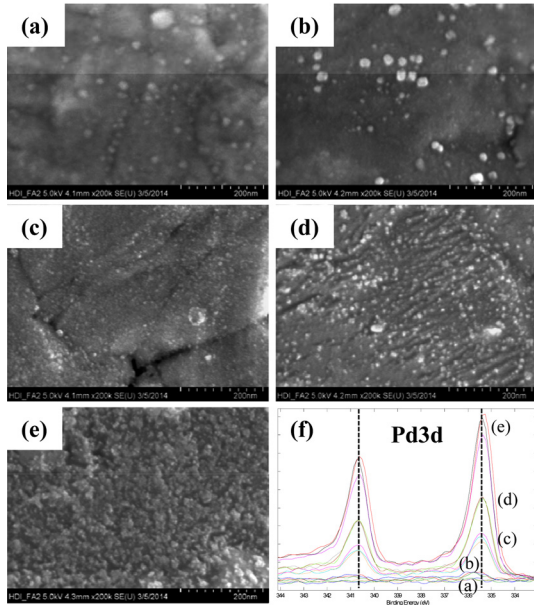
의 광학현미경 사진으로, high speed shear 평가의 용이성을 위하여 시편당 25개 솔더볼을 외각에서 3번째 열에 실장하였으며, 총 5개 시편 평가를 진행하였다. 파단 모드 분석은 솔더볼 shear 후에 광학현미경을 이용하여, Lee 등의 기존 연구자들의 파단 모드 분류 정의에 따라 분류하였다.<sup>16,19)</sup> Ductile 모드는 패드 면적의 100% 솔더가 남은 모드, quasi-ductile 모드는 금속간화합물 (IMC) 이 pad 면적의 50%이하인 모드, quasi-brittle 모드는 금속간화합물 (IMC) 가 패드 면적의 50%이상인 모드, brittle 모드는 금속간화합물이 패드면적의 100%인 모드로 정의하였다.<sup>19)</sup>

Pd 촉매 분석을 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy (ULVAC-PHI, Japan)을 이용하여 전기화학 분석을 행하였다. XPS는 Al Kα (1486.6 eV) 소스를 이용하여 작동전압 15kV로 분석하였다. 시편 표면에서 깊이 방향 분석을 위하여 500 eV Ar 이온건을 이용하여 1분 단위 에칭 후에 XPS 분석을 진행하였으며, 총 60 사이클 진행하여 깊이 방향 XPS 분석을 진행하였다. 모든 스펙트럼은 C1s 스펙트럼을 284.8 eV 기준으로 보정하였다.

Ni-P 도금두께는 X-Ray Fluorescence (GX-RC, USA)를 사용하여 측정하였으며, Ni-P 도금 표면 거칠기는 atomic force microscope (NS10, Park-systems)를 사용하여 Ra 값을 측정하였다. 솔더 접합 계면과 파단면은 Ar ion milling system (TIC 3x, Germany), field emission scanning electron microscopy와 energy dispersive x-ray spectrometry (Supra 40VP, Germany)를 이용하여 분석하였다.

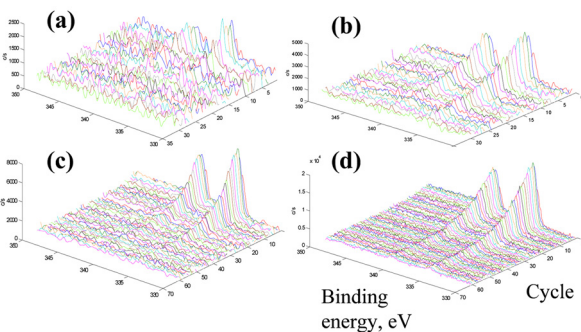
## 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 Pd 촉매 처리 시간별 Cu/Pd 표면 SEM 이미지와 XPS Pd3d 스펙트럼을 나타내었다. Fig. 1(a,b)의 15초와 30초 Pd의 SEM이미지 중에서 흰 파티클은 XPS 분석 결과로 구리산화물이었고, 이 산화물은 Pd 촉매 처리 시간이 길어질수록 관찰되지 않았다. Fig. 1 (c)의 60초 Pd은 작고 미세한 Pd 파티클이 구리 표면에 나타나고 있으며, 이는 Pd 촉매 처리 시간이 길어질수록 더 커지고, 높은 밀도로 존재함을 알 수 있다. Pd 파티클은 치환 타입으로 Cu<sup>2+</sup> 이온과 치환되어 Cu 표면에 Pd 금속화 되며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 아일랜드 타입으로 핵생성 및 성장이 이루어 지고, 핵 생성 및 성장 모델은 Volmer-Weber 모델을 따른다.<sup>20,21)</sup> Fig. 1(f)는 Pd 촉매 처리 시간별 시편의 표면 XPS 분석 결과를 나타낸 것으로, Pd 촉매 처리 시간별 3회 XPS 분석하여 신뢰도를 높였다. 15

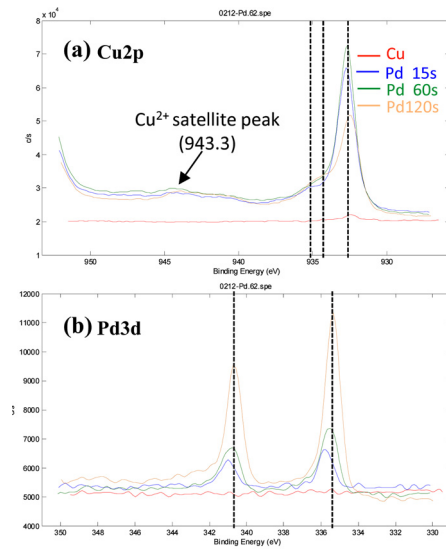


**Fig. 1.** FE-SEM surface topography images (a-e) and XPS narrow spectrum (f) of the Pd deposition for various times of Pd activation at 30°C: (a) 15 s; (b) 30 s, (c) 60 s, (d) 90 s, (e) 120 s, and (f) XPS spectrum for Pd3d.

초 Pd 처리에서 Pd3d 스펙트럼은 검출되지 않았으며 30 초 Pd 이후부터 Pd3d 스펙트럼의 강도는 점점 강해지는 것을 알 수 있고, Fig. 1(a-e)의 SEM 이미지와 비교하면 60 초 Pd 이후의 표면 파티클은 Pd 금속으로 확인 되었다. Fig. 2는 Pd 촉매 처리 시간에 따른 표면 깊이 방향의 Pd3d 스펙트럼을 나타내었다. 시편은 XPS 표면 분석에서 Pd이 검출되지 않은 15초 Pd 시편을 제외하고 진행하였다. 30초 Pd 시편에서는 표면 깊이 방향으로 10 사이클까지 Pd3d 스펙트럼이 검출되었으며, 60초 Pd 시편에서는 20 사이클까지, 90초 Pd 시편에서는 30 사이클까지, 120초 Pd 시편에서는 50 사이클까지 검출되었다. 이는 Pd 촉매 처리 시간에 따라 Pd 파티클의 크기와 양이 증가 하는 것을 알 수 있다. Fig. 3는 15초, 60초, 120초 Pd 도금 시편과 Pd 처리하지 않은 시편을 참고 시편으로 XPS의 Cu2p와 Pd3d 스펙트럼이다. Fig. 3(a)의 Cu2p 스펙트럼에



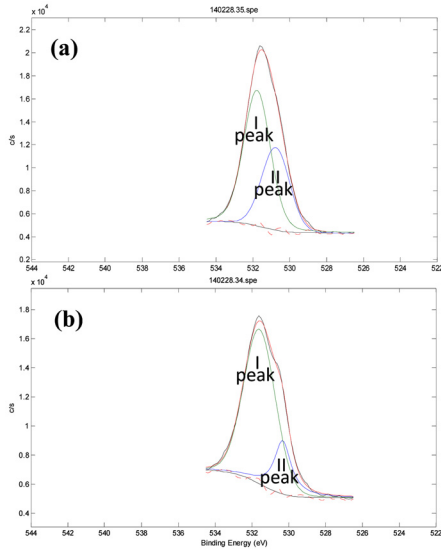
**Fig. 2.** 3D depth profiles of the Pd3d spectrum obtained from the Pd deposited on Cu thin film at various durations of Pd activation: (a) 30 s Pd, (b) 60 s Pd, (c) 90 s Pd, and (d) 120 s Pd.



**Fig. 3.** XPS for (a) Cu2p and (b) Pd3d spectra obtained from the surface of Pd deposited on Cu at various durations of Pd activation: Red line, blue line, green line, and skin color line are spectrums of polycrystalline Cu, 15s Pd, 60s Pd, and 120s Pd, respectively.

서 주 binding energy 피크는 932.6 eV에서 Cu + Cu<sub>2</sub>O로 분석되었으며, 933.7 eV에서 검출된 피크는 CuO로 분석 되었다. Cu<sup>2+</sup> satellite 피크가 943.3 eV에서 검출되고 있으며, 이는 기존 연구자들의 의하면 Cu(OH)<sub>2</sub>로 판단하였다.<sup>24)</sup> 특히 15초 Pd 시편의 Cu2p 스펙트럼에서 935.1 eV의 피크가 검출되는데, 이 또한 Cu(OH)<sub>2</sub>로 분석되었다.<sup>24)</sup> 구리 표면 산화에 관한 기존 XPS 연구를 보면, Cu<sub>2</sub>O의 우선 생성 가설과 CuO + Cu<sub>2</sub>O 동시 생성 가설이 보고 되고 있으나, 구리 표면의 Cu(OH)<sub>2</sub> 층의 생성과 Cu(OH)<sub>2</sub>가 구리 산화로 이어진다는 것에는 이견이 없다. 본 연구에서도 15초 Pd 시편의 XPS 분석결과에서 Cu(OH)<sub>2</sub>가 검출 되었다. Fig. 3(b)의 Pd3d 스펙트럼에서 주 binding energy 피크는 334.5 eV와 340.6 eV로, 이는 Pd 금속으로 분석되었다.<sup>25,26)</sup> Pd<sup>2+</sup> 이온은 Cu<sup>2+</sup>이온과의 치환반응을 통하여 Pd 금속으로 구리 표면에 치환됨으로 XPS 분석 결과에서도 Pd 금속으로 검출되었다. Fig. 4는 15초 Pd과 120초 Pd 시편에서 O1s 스펙트럼의 가우시안 피크 피팅 (Gaussian peak fitting) 을 나타내었다. 피크 피팅을 통하여 Peak I과 Peak II로 피팅 되었다. Peak I은 531.8 eV의 Cu(OH)<sub>2</sub> + OH<sup>-</sup>로, Peak II는 530.6 eV의 CuO + Cu<sub>2</sub>O로 기존 연구자들에 의해 보고 되었다.<sup>24)</sup> 15초 Pd과 120초 Pd 시편의 O1s 스펙트럼을 비교하면, Pd 촉매 처리 시간이 길어질수록 Peak I 피크가 커지고, Peak II 피크는 작아지는 경향을 보였다. 이는 Pd 촉매 처리시간이 늘어나면 Cu(OH)<sub>2</sub> + OH<sup>-</sup>는 증가하고, 구리 표면에 Pd 금속화가 진행되면서 CuO + Cu<sub>2</sub>O가 감소된 것으로 판단된다.

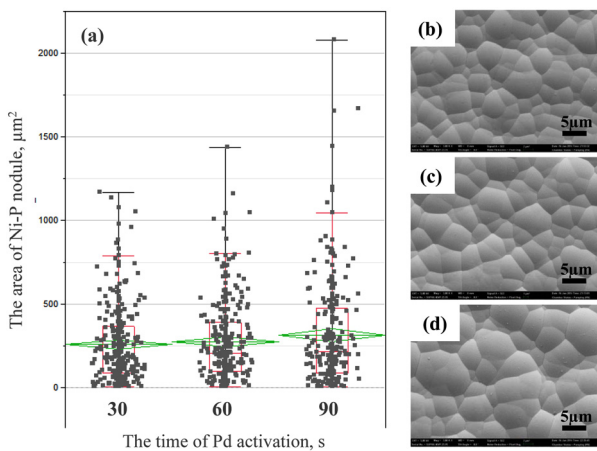
Fig. 5는 30초, 60초, 90초 Pd 촉매 처리한 시편을 35분 무전해 Ni-P 도금한 시료의 SEM 사진과 Ni-P nodule의



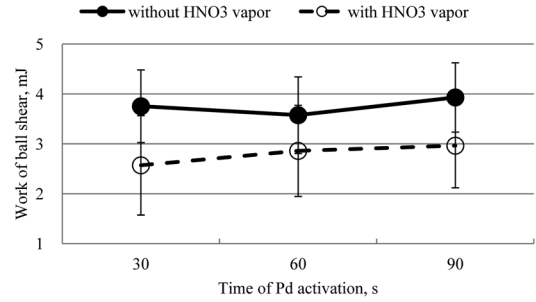
**Fig. 4.** Peak fitting of the O1s spectrum for the surface of Pd deposited on Cu at various durations of Pd activation: (a) 15 s Pd and (b) 120 s Pd.

면적을 이미징 프로그램(Image J)으로 계산한 결과를 나타내었다. Fig. 5(a)에서 한 개의 점은 한 개의 Ni-P nodule의 면적을 나타내며, 30초 Pd 시편의 Ni-P nodule 면적은 평균 259  $\mu\text{m}^2$ 이고, 60초 Pd 시편의 Ni-P nodule 면적은 평균 274  $\mu\text{m}^2$ 이고, 90초 Pd 시편의 Ni-P nodule 면적은 평균 312  $\mu\text{m}^2$ 였다. Pd 촉매 처리시간이 길어질수록 무전해 Ni-P nodule의 면적도 증가함을 알 수 있다. 이는 무전해 Ni-P nodule은 핵생성과 성장이 Volmer-Weber 모델을 따르며, 조직은 columnar 구조를 가지고, 핵생성 사이트가 조밀할수록 nodule의 합체 성장한다는 합체 성장 이론과 일치하고, nodule의 표면 거칠기(Ra)는 감소한다.<sup>20,21)</sup>

다음은 Pd 촉매 처리시간에 따른 high speed shear 에너지

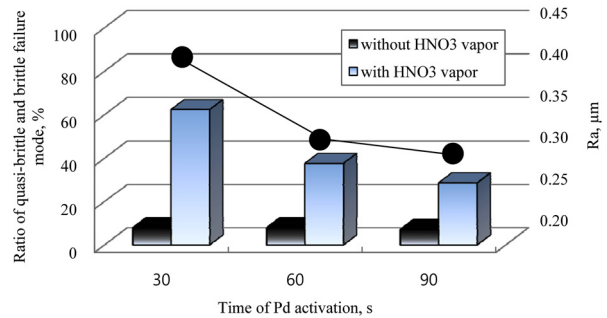


**Fig. 5.** The area distribution (a) and plan-view FESEM images (b-d) of Ni-P nodules as a function of the time of Pd activation: (a) The area distribution of Ni-P nodules, (b) 30s Pd, (c) 60s Pd, and (d) 90s Pd.

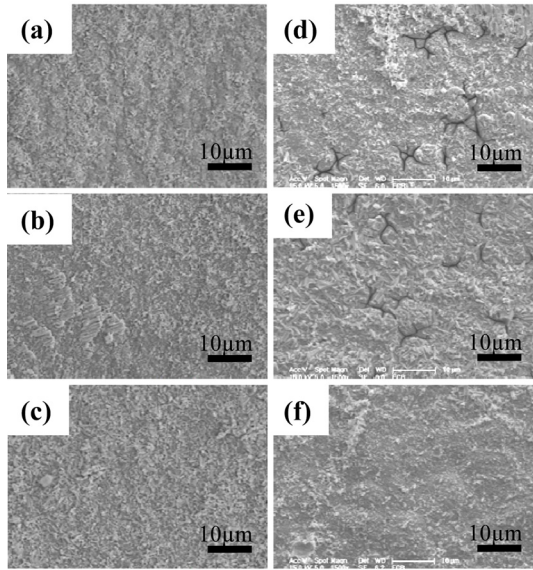


**Fig. 6.** Work of ball shear for samples with and without nitric acid vapor using high speed shear test as a function of the time of Pd activation.

지를 Fig. 6에 나타내었다. 질산 기상 처리하지 않은 시편의 Pd 촉매 처리 시간별 shear 에너지는 평균 3.58~3.93 mJ로 통계적 유의차는 없었다. 하지만 질산 기상 처리한 시편의 Pd 촉매 처리 시간별 shear 에너지는 30초 Pd 시편에서 60초 Pd 시편(평균 2.86 mJ) 대비 평균 2.57 mJ로 낮아지는 경향을 나타낸다. 다음의 high speed shear 파단 모드 분석에서 Pd 촉매 처리 시간에 따른 변화를 확인시킬 수 있다. Fig. 7은 high speed shear 평가 후에 파단 모드를 분석한 것으로, 질산 기상 처리하지 않은 시편은 quasi-와 brittle 모드의 점유율이 7.2~8.0%를 차지하지만, 질산 기상 처리한 시편은 quasi-와 brittle 모드의 점유율이 Pd 촉매 처리 시간의 증가(30초 → 90초)에 따라 62.4%에서 28.8%로 감소함을 알 수 있다. Pd 촉매 처리 시간에 따른 무전해 Ni-P 도금의 표면 거칠기(Ra)를 측정하여 Fig. 6에 파단 모드와 같이 나타내 보았다. 이를 통해 Pd 촉매 처리 시간이 30초에서 90초로 증가할수록 무전해 Ni-P 도금의 표면 거칠기(Ra)는 0.39  $\mu\text{m}$ 에서 0.28  $\mu\text{m}$ 로 낮아지고, quasi-와 brittle 모드의 점유율 또한 62.4%에서 28.8%로 감소함을 알 수 있다. Fig. 8은 Pd 촉매 처리 시간에 따른 high speed shear 평가 후의 SEM 파단이미지를 나타내었다. 질산 기상 처리하지 않은 시편의 파단 이미지(Fig. 8 (a-c))는 SAC405 솔더나 금속간화합물(IMC)에서



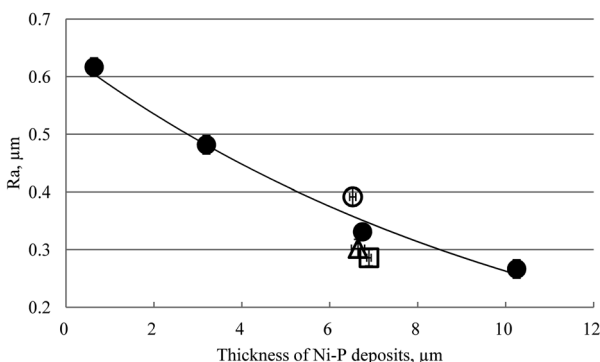
**Fig. 7.** Quasi-brittle and brittle failure mode proportion for samples with and without nitric acid vapor using high speed shear test as a function of the time of Pd activation. Solid circle is the surface roughness of Ni-P deposition at various times of Pd activation.



**Fig. 8.** SEM fracture images after high speed shear test as a function of with (d-f) or without (a-c) nitric acid vapor: (a,d) 30 s Pd, (b,e) 60 s Pd, and (c,f) 90 s Pd.

파단이 일어 났음을 알 수 있다. 이에 비하여 질산 기상 처리한 시편의 파단 이미지(Fig. 8 (d-f))는 금속간화합물(IMC)과 Ni 부식에 의한 파단임을 알 수 있다. 30초 Pd과 60초 Pd의 Ni 부식은 Ni-P nodule 경계를 따라 부식이 일어 났고, 이는 Ni-P nodule 경계에서 에너지가 높아 부식에 취약함을 알 수 있다. 또한 이는 Ni-P 도금의 Ra와 연관되어, Pd 촉매 처리 시간이 길수록 Ni-P 도금의 Ra가 낮아지고, Ni-P nodule 경계에서의 에너지가 낮아져 Ni 부식에 강해지는 것을 알 수 있다.

다음은 기존 연구자들의 Ni-P 도금 두께와 표면 거칠기(Ra)의 상관 관계를 나타낸 그래프에 본 연구에서 얻어진 Ra를 외삽하여 Fig. 9에 나타내었다.<sup>14)</sup> 추세선은 지수함수로 표현하였다. 본 연구의 Pd 촉매 시간 변화에 따른 Ni-P 도금의 Ra는 0.28 µm에서 0.39 µm까지 변화하여 Ni-P



**Fig. 9.** The roughness of Ni-P deposits as a function of the time of Pd activation and the thickness of Ni-P deposits: Open circle, open triangle, open square, and solid circle are 30 s Pd, 60 s Pd, 90 s Pd, and Huh *et al.*'s data<sup>14)</sup>, respectively.

도금 두께로 환산할 경우, 9.0 µm에서 5.5 µm의 Ni-P 도금 두께와 동일한 Ra를 갖는다. 다시 말해서 Pd 촉매 시간을 증가시키므로써, 무전해 Ni-P 도금의 Ra를 낮추고, high speed shear 평가의 quasi-와 brittle 모드의 점유율을 낮추어서 솔더조인트 신뢰성을 강화시킬 수 있다. 이는 솔더조인트 신뢰성의 영향 인자를 파악하고 관계식을 도출함으로써, 강건한 신뢰성을 확보함과 동시에 Ni-P 도금두께를 낮추어서 생산 원가를 절감할 수 있는 이점이 있다.

#### 4. 결 론

Pd 촉매 처리 시간과 무전해 Ni-P 도금의 표면 거칠기(Ra)가 질산 기상 처리에 의해 제작된 시편들의 high speed shear 에너지에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Pd 촉매 처리 시간이 증가할수록 Pd 파티클은 커지고 조밀한 구조를 갖는다. Pd 파티클은 아일랜드 형태로 핵생성과 성장을 진행한다. 또 Pd 파티클은 30초 Pd 촉매 보다 120초 Pd 촉매에서 약 5배 성장하였다.

(2) 30초에서 90초로 Pd 촉매 처리 시간이 길어질수록 무전해 Ni-P nodule의 면적은 259 µm<sup>2</sup>에서 312 µm<sup>2</sup>로 커지고, Ni-P 도금의 표면 거칠기(Ra)는 0.28 µm에서 0.39 µm으로 낮아진다. Ni-P 도금의 Ra 측면에서 보면, 30초에서 90초 Pd 촉매 처리 시간이 늘어나는 것은 Ni-P 도금 두께가 5.5 µm에서 9.0 µm으로 증가했을 때의 Ni-P 도금의 Ra 값과 같다.

(3) 30초에서 90초로 Pd 촉매 처리 시간이 길어질수록 질산 기상 처리한 시편의 high speed shear 평가후 quasi-와 brittle 모드의 점유율은 62.4%에서 28.8%로 낮아진다. 이는 무전해 Ni-P 도금의 표면 거칠기(Ra)가 낮아짐으로써 Ni-P nodule간 경계에서의 에너지를 낮추어서 Ni 부식에 대한 내부식성이 커진 것이다.

#### References

1. D. Cullen, E. Huenger, M. Toben, B. Houghton and K. Johal, "A study on interfacial fracture phenomenon of solder joints formed using the electroless nickel/immersion gold surfaces finish", Proc. IPC works 2000, s03, (2000).
2. Y. C. Sohn and J. Yu, "Correlation between interfacial reaction and brittle fracture found in electroless Ni(P) metallization", J. Microelectron. Packag. Soc., 12(1), 41 (2005).
3. Z. Mei, M. Kauffmann, A. Eslambolchi and P. Jonson, "Brittle interfacial fracture of PBGA packages on electroless Ni/immersion Au", Proc. 48<sup>th</sup> Electronics Component and Technology Conference, 952 (1998).
4. G.M. Wenger, R. J. Coyle, P. P. Solan, J. K. Dorey, C. V. Dodde, R. Erich and A. Primavera, "Case studies of brittle interfacial fractures in area array solder interconnects", Proc. 26<sup>th</sup> International Symposium for testing and failure analysis, 355 (2000).
5. T. I. Eijim, D. B. Hollesen, A. Holliday, S. A. Gahr and R.

- J. Coyle, "Assembly and reliability of thermally enhanced high I/O BGA packages", Proc. 21<sup>th</sup> IEEE International Electronics Manufacturing Symposium, 25 (1997).
6. J. W. Jang, D. R. Frear, T. Y. Lee and K. N. Tu, "Morphology of interfacial reaction between lead-free solders and electroless Ni-P under bump metallization", J. Appl. Phys., 88(11), 6359 (2000).
  7. 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 Ni immersion gold (ENIG) interface", Proc. 52<sup>nd</sup> Electronic Component and Technology Conference, 732 (2002).
  8. K. Zeng, R. Stierman, D. Abbott and M. Murtuza "The root cause of black pad failure of solder joints with electroless Ni/immersion gold plating", JOM, 75 (2006).
  9. D. G. Lee, T. J. Chung, J. W. Choi, S. H. Huh, S. J. Cho, Y. J. Yoon and B. Y. Min, "New surface finish of the substrate for the flip chip packaging", SEMICON Korea 2007, 255 (2007).
  10. Y. D. Jeon, Y. B. Lee, and Y. S. Choi, "Thin electroless Cu/OSP on electroless Ni as a novel surface finish", 2006 Electronic Components and Technology Conference IEEE, 116 (2006).
  11. D. G. Lee, T. J. Chung, J. W. Choi, S. H. Huh, S. J. Cho, Y. J. Yoon and B. Y. Min, "New surface finish of the substrate for the flip chip packaging" SEMICON Korea 2007, 255 (2007).
  12. R. Ramanauskas, A. Selskis, F. Fuodkazyte and V. Fasulaitiene, "PCB failure analysis related to the ENIG black pad problem", Circuit World, 39(3), 124 (2013).
  13. K. Saganuma and K. S. Kim, "The root causes of the black pad phenomenon and avoidance tactics", JOM, 60(6), 61 (2008).
  14. M. O. Alam, "Reliability of BGA solder joints on the Au/Ni/Cu bond pad-Effect of thickness of Au and Ni layer" IEEE Transaction on Device and Materials Reliability, 6(3), 421 (2006).
  15. J. H. Lee, S. H. Huh, G. H. Jung and S. J. Ham, "Effects of the electroless Ni-P thickness and assembly process on solder ball joint reliability", J. KWS., 34(3), 60 (2014).
  16. A. Kumar and Z. Chen, "Effect of Ni-P thickness on the tensile strength of Cu/Electroless Ni-P/Sn-3.5Ag solder joint", 7<sup>th</sup> Electronics Packaging Technology Conference, IEEE, 873 (2005).
  17. K. Pun, P. L. Eu, M. N. Islam and C. Q. Cui, "Effect of Ni layer thickness on intermetallic formation and mechanical strength of Sn-Ag-Cu solder joint", 10<sup>th</sup> Electronics Packaging Technology Conference, IEEE, 487 (2008).
  18. S. H. Huh, K. D. Kim and K. S. Kim, "A novel high speed shear test for lead free flip chip package, Electron". Mater. Lett., 8(1), 53 (2012).
  19. W. L. Liu, S. H. Hsieh and W. J. Chen, "Growth behavior of Ni-P film on Fe/Si substrate in an acid electroless plating bath", Electrochem. Soc., 155(3), D192 (2008).
  20. D. K. Lee, D. G. Kim and B. Y. Yoo, "Influence of doping on Ni electroless deposition at single crystalline Si", Electrochem. Soc., 158(8), D490 (2011).
  21. J. W. Yoon, J. W. Kim, J. M. Koo, S. S. Ha, B. I. Noh, W. C. Moon, J. H. Moon and S. B. Jung, "Flip-chip bonding technology and reliability of electronic packaging", J. KWS, 25, 6 (2007).
  22. S. S. Ha, J. W. Kim, J. H. Chae, W. C. Moon, T. H. Hong, C. S. Yoo, J. H. Moon and S. B. Jung, "Thermo-mechanical reliability of lead-free surface mount assemblies for automobile application", J. KWS., 24, 21 (2006).
  23. I. Platzman, R. Brener, H. Haick and R. Tannenbaum, "Oxidation of Polycrystalline copper thin films at ambient conditions", J. Phys. Chem. C., 112, 1101 (2008).
  24. D. Tian, D. Y. Li, F. F. Wang, N. Xiao, R. Q. Lia, N. Li, Q. Li, W. Gao and G. Wu, "A Pd-free activation method for electroless nickel deposition on copper", Surf. Coat. Technol., 228, 27 (2013).
  25. P. H. Lo, W. T. Tsai, J. T. Lee and M. P. Hung, "The electrochemical behavior of electroless plated Ni-P alloy in concentrated NaOH solution", Electrochem. Soc., 142(1), 91 (1995).