0.1 μm Ni두께를 가지는 얇은 ENEPIG 층과 Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더와의 계면반응 및 접합강도

백종훈^{*,**} · 유세훈^{*,***} · 한덕곤^{****} · 정승부^{**} · 윤정원^{*,***,†}

^{*}한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소 용접접합그룹

^{**}성균관대학교 신소재공학과

^{***}과학기술연합대학원대학교 희소소재 및 반도체패키징공학

^{****}(주)엠케이캠애펙

Interfacial Reactions and Mechanical Strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu/0.1 μm -Ni Thin ENEPIG Solder Joints

Jong-Hoon Back^{*,**}, Sehoon Yoo^{*,***}, Deok-Gon Han^{****}, Seung-Boo Jung^{**},
and Jeong-Won Yoon^{*,***,†}

^{*}Welding and Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

^{**}School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

^{***}Critical Materials and Semiconductor Packaging Engineering, University of Science and Technology(UST),
Daejeon, 34113, Korea

^{****}MK Chem & Tech, Ansan, 15599, Korea

[†]Corresponding author : jwyoony@kitech.re.kr

(Received August 9, 2017 ; Revised September 1, 2017 ; Accepted September 11, 2017)

Abstract

A new multilayer metallization, ENEPIG (electroless nickel electroless palladium immersion gold) with 0.1 μm thin Ni(P) layer (thin-ENEPIG), was plated on a Cu PCB substrate for fine-pitch package applications. We evaluated interfacial reactions and mechanical reliability of a Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) solder alloy on a thin ENEPIG coated substrate during various reflow times. In the initial soldering reaction, (Au,Cu)Sn₄ intermetallic compound (IMC) formed at the SAC305/ENEPIG interface. After prolonged reflow reactions, the Pd and Ni layers were consumed, and (Cu,Ni)₆Sn₅ IMC formed on the Cu layer. As the reflow time increased, the Cu and Ni contents in (Cu,Ni)₆Sn₅ IMC increased and decreased, respectively, due to the limited Ni layer in the ENEPIG plating layer. In the low-speed shear test, all fractures occurred in the bulk solder regardless of reflow times. In the high-speed shear test, the fracture mode was changed from ductile to brittle with increasing reflow time, due to the formation of the thick interfacial IMC.

Key Words : Electroless-Nickel Electroless-Palladium Immersion-Gold (ENEPIG), Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) solder, Reflow, Interfacial reactions, Mechanical strength

1. 서 론

전자패키징(electronic packaging)에서 표면처리(surface finish)는 인쇄회로기판(printed circuit board, PCB)

제조의 후반부 공정으로, 접속단자에 확산 방지층, 산화 방지층 및 젖음층을 형성하는 공정이며, PCB 표면 처리 층 위에 솔더링 또는 와이어 본딩 등의 접합공정이 진행되기 때문에 표면처리 층의 특성은 솔더링 특성 및 패키지 장기 신뢰성 등에 큰 영향을 미친다^{1,2)}. 대

표적인 표면처리 방법으로는 Cu OSP(organic solderability preservative), HASL(hot air solder leveling), 침지 주석(immersion tin), 침지 은(immersion silver), ENIG(electroless nickel immersion gold) 및 ENEPIG(electroless nickel electroless palladium immersion gold)가 있다³⁾. 그 중에서 Cu 기판 사용시, 일반적인 솔더합금과의 빠른 반응 특성으로 인해 계면에 Cu_6Sn_5 및 Cu_3Sn 등과 같은 Cu-Sn계 금속간 화합물(intermetallic compound, IMC)의 빠른 생성으로 인한 기계적 신뢰성 저하 문제가 많이 보고되어 왔다^{4,5)}. 이를 개선하기 위하여 확산 방지층(diffusion barrier layer)의 역할을 하는 Ni 도금 기술이 적용되었으며, 주로 무전해 도금 기술인 ENIG 및 ENEPIG 도금 층이 널리 사용되어져 왔다⁶⁻¹³⁾. 솔더링 공정 적용에 있어서 Ni(P) 도금 층은 솔더합금과 Cu 기판 사이에서 확산 방지층의 역할을 하며, Cu 층의 소모와 두꺼운 Cu-Sn 금속간화합물 층의 생성을 막아준다. 최근에는 ENIG와 ENEPIG 표면처리가 우수한 젖음 특성, 마스크가 필요없는 무전해 도금공정 특성 및 뛰어난 확산 방지 특성 등으로 인해 미세 피치 플립칩(fine pitch flip chip) 공정 등의 UBM(under bump metallization) 재료로서 널리 사용되어 왔다⁸⁻¹¹⁾. 또한, ENIG와 비교하여 ENEPIG 층은 Au와 Ni 층 사이의 중간 삽입 층인 Pd 층의 존재로 인해 Ni_3Sn_4 와 Ni_3P 등의 계면 화합물 층의 생성 및 계면 Kirkendall void의 생성을 억제하며, 우수한 야금학적 및 기계적 신뢰성을 나타낸다고 보고되었다^{8,11)}.

하지만, 기존에 주로 사용되던 ENEPIG 표면처리는 아래와 같은 두 가지 단점이 최근 제기되었다. 첫째, 기존 ENEPIG 표면처리는 Ni 두께가 약 3-7 μm 정도로 두껍기 때문에, 향후 더욱 가속화될 미세피치 대응에 있어서 배선간 간격이 줄어들에 따라 플립칩 접합시 인접 솔더끼리 단락되는 솔더 브리지(solder bridge) 발생이 증가하는 문제점이 있으며, 배선간 간격이 줄어들에 따라 Cu 패드 사이에 trace를 형성하기가 어려운 단점이 있다⁹⁾. 둘째, ENEPIG층 내의 두꺼운 무전해 Ni 층의 존재가 솔더 접합부의 전기저항(electrical impedance)을 크게 증가시킨다고 보고되었다^{9,11)}. Ho의 연구 결과에 따르면, 두께 4.79 μm 의 무전해 Ni층을 가지는 일반 ENEPIG 층의 솔더 접합부의 경우 전기저항은 36.19 n Ω 인 반면, 두께 0.31 μm 의 무전해 Ni층을 가지는 얇은 ENEPIG 층의 솔더 접합부의 경우 전기저항은 2.72 n Ω 으로 크게 줄어든다고 보고되었다¹¹⁾. 비정질 Ni(P) 층의 전기 비저항은 70-120 $\mu\Omega$ cm로, Cu (1.7 $\mu\Omega$ cm), Sn (11.5 $\mu\Omega$ cm), Ni (6.8 $\mu\Omega$ cm)

과 비교하여 훨씬 높다. 높은 접촉 저항은 전기적인 시그널을 퇴화시키며, 특히 RF(radio frequency) 필터와 듀플렉서(duplexer) 등과 같은 고주파 부품(high-frequency component)에서 전기적인 성능을 크게 저하시킨다. 따라서, 위와 같은 문제를 해결하기 위해 Ni 두께가 1 μm 미만으로 얇은 ENEPIG 표면처리에 대한 요구가 대두되고 있다. 전술한 바와 같이 기존의 ENEPIG는 수십 μm pitch 이하의 미세피치에는 적용하기 어려운 단점을 가지고 있는 반면, 얇은 ENEPIG는 미세피치 적용성이 우수하고, 솔더링 뿐만 아니라 wire bonding에도 적용 가능하며, 양호한 내열성 및 도금 밀착성, 그리고 낮은 공정 가격을 가지는 장점이 있다²⁾. 이에 따라 향후 30~50 μm 이하 미세패턴의 플립칩 공정 적용을 위한 PCB 및 고주파 부품이 실장되는 PCB에는 Ni 두께가 줄어든 얇은 ENEPIG 표면처리의 적용이 필요하며 점차 그 적용 범위가 확대될 것으로 예상된다.

하지만, 이러한 얇은 ENEPIG 표면처리는 최근에 새롭게 제안된 기술로 몇몇 선진 패키지 제조업체에서 기술개발 및 양산 적용 가능성을 테스트 중인 상황으로, 아직까지 다양한 신뢰성 측정 결과가 축적되지 못한 실정이며, 필드 경험이 부족한 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 얇은 ENEPIG 특성에 대한 기초 연구로서 미세피치 패키지 적용을 위한 얇은 ENEPIG 도금층의 계면반응 및 접합부 기계적 신뢰성 평가를 수행하였다. 먼저, 가장 대표적인 무연솔더 합금인 Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) 솔더합금에 대한 얇은 ENEPIG 도금층의 솔더링 특성이 평가되었으며, 순차적인 솔더와의 반응에 대한 계면반응 및 접합부 계면에 형성된 금속간화합물 상의 분석이 수행되었다. 또한, 솔더볼 접합 후 저속 전단 시험 및 고속 전단 시험의 수행을 통하여 얇은 ENEPIG가 적용된 솔더 접합부의 기계적 신뢰성이 평가되었으며, 연성/취성 파괴 분석을 통해 얇은 ENEPIG 기판의 적용가능성이 검토되었다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 얇은 ENEPIG 표면처리는 상용의 표면처리 약품을 사용하여 도금 공정이 수행되었다. 무전해 Ni의 경우, 82 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 1분, 무전해 Pd의 경우, 50 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 10분, 그리고 침지 Au의 경우, 78 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 15분 동안 도금 공정이 수행되었으며, 그 두께는 Ni, Pd 및 Au가 각각 약 0.1, 0.05, 그리고 0.05 μm 였다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 얇은 ENEPIG 도금 패드의 모식도를 나타내었다. 도금 공정 수행 후 도금 층의 단면 및 두께를 측정

Fig. 1 Schematics of (a) normal ENEPIG and (b) thin ENEPIG surface finishes

하기 위하여 focused ion beam(FIB) 밀링 공정이 수행되었다. 리플로우(reflow) 반응 동안에 SAC305 솔더와 얇은 ENEPIG 도금 처리된 Cu 기판과의 계면 반응을 관찰하기 위해서, 리플로우 시간 변화에 따른 접합공정이 수행되었다. 본 실험에 사용된 PCB 기판은 solder mask defined(SMD) 타입의 flame retardant 4(FR-4) PCB였다. PCB의 Cu 패드 직경은 300 μm 였으며, 이 Cu 패드 상에 상기에서 언급한 두께의 얇은 ENEPIG 도금 공정이 수행되었다. 먼저, 스텐실 마스크를 사용하여 SAC305 솔더 페이스트(Senju, M705-SHF type 5)가 PCB 패드 상에 프린팅되었으며, 그 위에 450 μm 직경의 SAC305 BGA(ball grid array) 솔더볼(Duksan Hi-Metal, Korea)이 올려졌다. 그 다음 핫플레이트(hot plate)를 이용하여 리플로우 공정이 수행되었다. 리플로우 공정에 사용된 피크 온도는 260 $^{\circ}\text{C}$ 였으며, 각각 30, 60, 180, 300초 시간 동안 리플로우 공정이 수행되었다. (본 연구에서 언급한 리플로우 시간은 핫플레이트 상에 시험편을 올려 놓은 후 유지시킨 시간을 의미하며, 용융솔더의 융점 (SAC305 솔더의 경우 217 $^{\circ}\text{C}$) 이상에서의 유지시간을 의미하지는 않음.) 얇은 ENEPIG 층 내의 Ni, Pd, Au 각각의 층의 두께가 얇기 때문에 짧은 리플로우 시간 별로 구분하여 리플로우 공정을 수행하였다. 리플로우 공정 후에는 샘플이 실온까지 냉각되었으며, 접합시편의 단면 분석이 수행되었다. 먼저, 일반적으로 수행되는 야금학적인 시편 준비 과정인 연마 및 에칭 공정이 수행되었으며, 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM, FEI Inspect F)을 통해 접합부의 단면을 관찰하였다. 또한 EDX(energy-dispersive X-ray spectroscopy) 분석을 통해 접합부 계면에 형성된 금속간 화합물(intermetallic compound, IMC)의 성분을 분석하였다. 또한 접합부 계면 부근에서의 원소별 분포 및 화합물 형성을 분석하기 위해 EDX 맵핑(mapping) 분석이 수행되었다.

상기에서 기술된 방법과 동일한 방법으로 제조된 BGA 솔더 접합부의 기계적 신뢰성을 평가하기 위해, 저속 전단 시험(low speed shear test) 및 고속 전단 시험(high speed shear test)이 수행되었다. 사용된 저속 전단 시험 장비 및 고속 전단 시험 장비는 각각 Dage사 4000 및 4000HS 장비였으며, 전단높이는 50 μm 로 고정되었다. 실험에 사용된 저속 및 고속 전단 속도는 각각 300 $\mu\text{m/s}$ 와 1 m/s였다. 총 20개 솔더볼에 대한 전단 강도 시험이 각 조건 별로 수행되었으며 그 평균 값이 본 논문에 보고되었다. 솔더 접합부 전단 시험 수행 후 파면이 SEM과 EDX를 이용하여 세부적으로 분석되었다.

3. 실험 결과

도금 공정 수행 후 본 연구에 사용된 얇은 ENEPIG 도금 층의 단면을 관찰하기 위하여 FIB 밀링 공정이 수행되었으며, 그 결과가 Fig. 2에 보여졌다. 그림에서 보는 바와 같이, Cu 기판상에 Ni, Pd 및 Au가 균일하게 도금층을 형성하였음을 확인할 수 있었다. 그 두께는 Ni, Pd 및 Au가 각각 약 100, 50, 그리고 50 nm였다.

서로 다른 리플로우 반응 시간 동안 발생한 얇은 ENEPIG 도금 층과 SAC305 솔더와의 순차적인 계면반응을 분석하기 위하여, 리플로우 접합 시험이 수행되었다. Fig. 3은 260 $^{\circ}\text{C}$ 에서 서로 다른 시간 동안 SAC305 솔더

Fig. 2 FIB images of the thin ENEPIG plated Cu PCB pad

와 얇은 ENEPIG 표면 처리된 Cu BGA 기판 사이의 리플로우 반응 후의 단면 SEM 사진을 보여준다. 30초의 리플로우 반응 후에는 SAC305 솔더와 ENEPIG 층과의 반응으로 인해 계면에 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 상이 형성되었다 (Fig. 3(e)). 초기 솔더링 반응 동안에, 얇은 Au와 Pd 층은 액상의 솔더와 반응하여 솔더 내부로 용해되었으며, 무전해 Ni 층 및 하지 Cu층과의 반응으로 인해 계면에는 얇은 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 생성되었다. 선행 문헌의 TEM (transmission electron microscopy) 연구 결과에 의하면, 리플로우 반응 후에도 이들 계면 금속간화합물과 Cu 기판 사이에는 얇은 Cu_3Sn 금속간화합물이 형성되는 것으로 알려져 있다³⁾. 하지만 생성된 Cu_3Sn 층의 두께가 매우 얇고 또한 SEM의 분해능의 제한으로 인해 본 연구에서는 더 이상의 분석이 어려웠다. 이 층의 존재를 확인하기 위해서는 추후 TEM 분석을 통한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 층과 Cu 층 사이의 계면 형상이 울퉁불퉁한 요철 형상을 나타내었다. 만일, 기존에 사용되던 normal ENEPIG 도금 층상에 SAC305 솔더가 접합되었다면, 계면 금속간화합물 층 아래에 P-rich Ni 층의 생성 및 무전해 Ni 층이 남아 있었을 것이다⁷⁾. 하지만, 본 연구에서는 얇은 ENEPIG 층이 사용되었기 때문에, 30초의 비교적 짧은 리플로우 반응 시간에서도 솔더와 하지 Cu 층과의 반응으로 인해 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 생성되었다. 이 금속간화합물 층 내의 Cu 함량은 약 41.5 at.%,

Ni 함량은 약 13.6 at.%, 그리고 Sn 함량은 약 44.9 at.%였다. 유사한 연구 결과가 이전 논문에서 보고되었다. Ho 등은 서로 다른 두께의 ENEPIG 층과 SAC305 솔더를 이용하여 235-245 °C의 온도에서 20-40초 동안의 계면 반응에 대해 연구하였으며, 리플로우 반응 동안 얇은 ENEPIG 층이 모두 소모된 후 용융 SAC305 솔더와 Cu와의 반응으로 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 계면에 생성됨을 보고하였다¹¹⁾.

솔더링 반응 시간이 증가함에 따라 전반적으로 계면에 형성된 금속간화합물 층의 두께는 증가하였다. 60초 동안의 리플로우 반응 후에는 침상 형태의 다소 많은 수의 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물들이 계면에 생성되었다 (Fig. 3(f)). 이 금속간화합물 층 내의 Cu 함량은 약 48.3 at.%, Ni 함량은 약 6 at.%, 그리고 Sn 함량은 약 45.7 at.%였다. 180초 동안의 리플로우 반응 후에는 보다 두껍고 굵은 형태의 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물들이 계면에 생성되었으며, 이 금속간화합물 층에서 분석된 Cu 함량은 약 48 at.%, Ni 함량은 약 7.3 at.%, 그리고 Sn 함량은 약 44.7 at.%였다 (Fig. 3(g)). 또한 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 층과 Cu 기판 사이에 Cu_3Sn 층의 존재가 확인되었다. 300초 동안의 리플로우 반응 후에는 약 5 μm 두께의 층(layer) 형태의 두꺼운 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 층이 계면에 생성되었다. 이 금속간화합물 층에서 분석된 Cu 함량은 약 51.1 at.%, Ni 함량은 약 3.9 at.%, 그리고 Sn 함량은 약 45 at.%였다 (Fig. 3(h)). 본 연구에서 리플

Fig. 3 Cross-sectional SEM micrographs of SAC305/thin ENEPIG plated Cu interfaces subjected to reflowing at 260 °C for various times, and EDX analysis results of the interfacial $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ IMCs

로우 시간이 증가함에 따라 계면에 형성된 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물들이 계면에서 spalling되어 많은 수의 금속간화합물들이 솔더 내부로 퍼져서 분포함을 확인하였다. 특히, Fig. 3의 (c)와 (d)에서 보는 바와 같이, 리플로우 시간이 180초와 300초로 증가하였을 때 상당수의 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물들이 솔더볼 내부에서 확인되었다.

리플로우 시간 증가에 따른 계면반응 결과에서 한가지 흥미로운 결과는 계면에 형성된 금속간화합물 층의 조성이 리플로우 시간에 따라 변화한다는 것이다. 우리는 계면에 형성된 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 조성의 EDX 분석결과를 Fig. 3의 계면 SEM 사진 아래에 표시하였으며, 또한 이들 조성변화를 한눈에 알아보기 쉽게 표현하기 위해 Fig. 4에 막대 그래프로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 리플로우 시간 변

Fig. 4 Chemical compositions of the interfacial $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ IMCs at different reflow times

화에도 불구하고 Sn의 함량은 큰 변화 없이 약 44~45 at.%를 유지하였다. 반면, 리플로우 시간이 증가함에 따라 Cu 함량은 약 41 at.%에서 51 at.%로 증가하였으며, 반대로 Ni 함량은 약 14 at.%에서 4 at.%로 감소하였다. 이는 원래 ENEPIG 층 내에 도금된 0.1 μm 의 얇은 Ni 층의 존재 때문이다. 얇은 Ni 층은 초기 리플로우 반응 동안 Sn과 Cu와 반응하여 계면 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물을 형성한다. 하지만, 제한된 Ni 두께로 인해 빠른 시간 내에 모두 소모되어 버리고 리플로우 반응이 진행될수록 계면 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 내에서 Cu의 비율이 증가하게 된다. 하지만, Cu와 Ni의 총량은 55~56 at.%로 일정한 값을 유지하였다. Cu와 Ni은 전용고용체(complete solid solution)를 형성하며, 유사한 원자 사이즈 및 FCC(face centered cubic)의 같은 결정구조(crystal structure)를 가지는 것으로 알려져 있다^{14,15)}. 따라서, 두 금속 사이에는 어떠한 화합물도 형성하지 않으며 마치 서로가 같은 원소처럼 거동하는 경향이 있다.

전술한 바와 같이, 본 연구에서는 30초의 리플로우 반응 후에 SAC305 솔더와 ENEPIG 층과의 반응으로 인해 계면에 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 상이 형성되었으며, ENEPIG 도금 층이 모두 계면에서 사라진 결과를 얻었다. 따라서, 보다 짧은 리플로우 반응시간에서 ENEPIG 층의 거동을 조사하기 위해 20초 동안 리플로우 공정을 수행하였으며, 그 단면 SEM 사진 및 EDX mapping 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 20초 동안의 리플로우 공정 수행 결과, 전체 계면에서 균일하게 리플로우 접합공정이 수행되지 않는 않으며, 일부 계면

Fig. 5 Cross-sectional SEM micrograph and EDX element mapping results of SAC305/thin ENEPIG plated Cu interface reflowed at 260 °C for 20 s

을 따라서는 접합이 이루어지지 않은 미접합 구간이 존재함을 확인하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 20초의 리플로우 반응 동안 계면에 얇은 화합물 층이 형성되었음을 확인할 수 있었다. EDX mapping 분석 결과, Ni과 Pd층은 아직까지 반응하지 않은 채로 남아 있었으며, Au, Cu 그리고 Sn으로 구성된 화합물이 계면에 형성되었음을 확인할 수 있었다. EDX 조성 분석 결과, 이 금속간화합물 층에서 분석된 Au 함량은 약 12.8 at.%, Cu 함량은 약 12.2 at.%, 그리고 Sn 함량은 약 75 at.%로 분석되었으며, 조성으로 미루어 보아 이는 화학양론적 화합물인 (Au,Cu)Sn₄ 금속간화합물임을 알 수 있었다. Ni과 Pd 층이 계면에 그대로 존재하기 때문에 이 (Au,Cu)Sn₄ 화합물 내에 포함된 Cu는 SAC305 솔더에서 계면반응 동안에 계면화합물로 유입된 Cu로 생각된다. 보다 이해를 돕기 위해, 접합부 계면에 포함된 전체 원소에 대한 EDX mapping 결과를 SEM 사진과 함께 배치하였다.

얇은 ENEPIG 도금 처리된 패드상에서의 접합강도를 평가하기 위해, 리플로우 공정을 통해 BGA 패키지 상에 솔더볼을 형성한 후 전단시험을 수행하였다. Fig. 6은 50 μ m의 전단높이와 300 μ m/s의 전단 속도 하에

서 수행된 저속전단시험 후의 접합 강도 측정 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 리플로우 시간이 증가함에 따라 접합강도는 조금 증가하는 경향을 보이지만, 큰 변화는 관찰되지 않았다. 전단시험 후 파면 관찰 결과, 리플로우 시간 변화에 관계없이 파괴는 모두 솔더에서 발생한 연성 파괴(ductile fracture) 거동을 보였다 (Fig. 7).

제작된 BGA 패키지 상의 솔더볼에 대한 고속 전단 신뢰성 평가를 위해 50 μ m의 전단높이에서 1 m/s의 전단 속도 하에서 고속 전단 시험이 수행되었으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 리플로우 시간이 증가함에 따라 180초 리플로우 시간까지는 전단강도 값이 조금 증가한 후, 300초 리플로우 시간 후에는 급격하게 전단강도 값이 감소하는 결과를 보였다. 일반적으로 전단 시험에 있어서 고속 전단시험은 빠른 전단 속도에 기인한 보다 많은 충격량으로 인해 솔더조인트의 반발력이 높아 높은 전단강도가 측정되는 동시에 계면 취성파괴를 또한 높게 측정된다고 알려져 있다¹⁶⁾. 따라서 접합부 취성파괴율을 보다 용이하게 측정하고 선별하고자 할 경우 고속 전단 시험이 일반적으로 사용된다. 본 실험에서도 전단 속도가 증가함에 따라 계면 금속간화합

Fig. 6 Shear strength values measured with low-speed shearing after different reflow times

Fig. 8 Shear strength values measured with high-speed shearing after different reflow times

Fig. 7 Fracture surfaces of the SAC305 solder joints after low-speed shear testing

Fig. 9 Fracture surfaces of the SAC305 solder joints after high-speed shear testing

Fig. 10 Fracture surfaces of the SAC305/thin ENEPIG plated Cu solder joint after high-speed shear testing (reflow time: 300 s)

물 층에서의 취성파괴율이 증가함을 확인할 수 있었다. 고속 전단시험 후 파면 관찰 결과, 180초 리플로우 시간까지는 솔더에서 연성 파괴가 발생하였으나, 300초 리플로우 시간 후에는 계면 금속간화합물 층 위에서 취성 파괴(brittle fracture)가 발생함을 확인하였다 (Fig. 9). Fig. 10은 300초 동안 리플로우된 접합 시편의 고속 전단 시험 후 관찰된 파면 SEM 사진이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 취성파괴 부분에서 계면 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 및 Cu_3Sn 금속간화합물의 존재를 확인하였다. 이로 미루어 보아, 두껍게 형성된 계면 금속간화합물의 존재로 인해 고속 전단시험에서 취성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 얇은 ENEPIG 도금층의 패키지 적용을 위해서 SAC305 솔더합금과의 리플로우 반응 동안에 순차적인 계면반응 및 BGA 솔더 접합부 기계적 신뢰성 평가를 수행하였다. 보다 폭넓은 얇은 ENEPIG 표면처리 현장 적용을 위해서는 기존 ENEPIG 도금 기판과의 신뢰성 비교, 장기간의 전기적, 열적, 기계적

신뢰성 평가 및 최적의 얇은 ENEPIG 도금 층 두께 등에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 얇은 ENEPIG 도금 층과 SAC305 솔더합금과의 솔더링 특성, 계면반응 및 BGA 솔더 접합부 기계적 신뢰성 평가를 통한 얇은 ENEPIG 도금 층의 패키지 적용 가능성이 평가되었다. 먼저, 450 μm 직경의 SAC305 BGA 솔더볼과 얇은 ENEPIG 도금 층 사이의 순차적인 계면반응 및 접합부 계면에 형성된 금속간화합물 상 분석이 수행되었으며, BGA 패키지에 솔더볼을 접합한 후 저속 및 고속 전단 시험을 통한 접합부 기계적 신뢰성이 평가되었다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

1) 20초 동안의 리플로우 공정 수행 결과, ENEPIG 층 중에서 Ni와 Pd층은 반응하지 않은 채로 남아 있었으며, Au, Cu, Sn으로 구성된 $(\text{Au,Cu})\text{Sn}_4$ 화합물이 계면에 형성되었다.

2) 30~300초의 리플로우 반응 후에는 SAC305 솔더와 ENEPIG 층과의 반응으로 인해 계면에 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 상이 형성되었다. 이 반응 동안, ENEPIG 층의 얇은 Au와 Pd 층은 액상의 솔더와 반응하여 솔더 내부로 용해되었으며, 무전해 Ni 층 및 하지 Cu층과의 반응으로 인해 계면에는 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 생성되었으며, 리플로우 시간이 증가함에 따라 계면 화합물 층의 두께는 증가하였다.

3) 리플로우 시간이 증가함에 따라 계면에 형성된 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 층의 조성이 변화하였다. 리플로우 시간이 증가함에 따라 Sn의 함량은 큰 변화 없이 약 44~45 at.%를 유지하였으나, ENEPIG 층 내의 제한된 Ni의 양 때문에 Cu 함량은 약 41 at.%에서 51 at.%로 증가하였으며, 반대로 Ni 함량은 약 14 at.%에서 4 at.%로 감소하였다.

4) SAC305 솔더볼 접합부의 저속 전단시험의 경우,

리플로우 시간이 증가함에 따라 접합강도의 큰 변화는 관찰되지 않았으며, 리플로우 시간 변화에 관계없이 파괴는 모두 솔더에서 연성 파괴가 발생하였다.

5) SAC305 솔더볼 접합부의 고속 전단시험의 경우, 180초 리플로우 시간까지는 솔더에서 연성 파괴가 발생하였으나, 300초 리플로우 시간 후에는 계면에 형성된 두꺼운 금속간화합물 층으로 인한 취성 파괴가 발생하였다.

ORCID: Jong-Hoon Back : <http://orcid.org/0000-0002-1170-3428>

ORCID: Sehoon Yoo : <http://orcid.org/0000-0001-7036-6188>

ORCID: Deok-Gon Han : <http://orcid.org/0000-0002-3601-5381>

ORCID: Seung-Boo Jung : <http://orcid.org/0000-0002-7360-9859>

ORCID: Jeong-Won Yoon : <http://orcid.org/0000-0001-8708-542X>

후 기

본 논문은 산업통상자원부 우수기술연구센터(ATC) 사업 (과제번호: 10062737)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

References

1. K. H. Kim, W. Seo, S. H. Kwon, J. K. Kim, J. W. Yoon and S. Yoo, Effects of Ni-P Bath on the Brittle Fracture of Sn-Ag-Cu Solder/ENEPIG Solder Joint, *Journal of Welding and Joining*, 35 (3) (2017), 1-6
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.3.1>
2. J. H. Back, B. S. Lee, S. Yoo, D. G. Han, S. B. Jung and J. W. Yoon, Solderability of thin ENEPIG plating Layer for Fine Pitch Package application, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 24 (1) (2017), 83-90
<https://doi.org/10.6117/kmeps.2017.24.1.083>
3. K. H. Kim, J. Koike, J. W. Yoon and S. Yoo, Effect of Plasma Surface Finish on Wettability and Mechanical Properties of SAC305 Solder Joints, *J. Electron. Mater.* 45 (2016), 6184-6191
<https://doi.org/10.1007/s11664-016-4908-4>
4. D. H. Park and T. S. Oh, Reliability Characteristics of a Package-on-Package with Temperature/Humidity Test, Temperature Cycling Test, and High Temperature Storage Test, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 23 (3) (2016), 43-49
<https://doi.org/10.6117/kmeps.2016.23.3.043>
5. T. Laurila, V. Vuorinen and J. K. Kivilahti, Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials, *Mater. Sci. Eng. R*, 49 (2005), 1-60
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.03.001>
6. J. W. Yoon, B. I. Noh, J. H. Yoon, H. B. Kang and S. B. Jung, Sequential interfacial intermetallic compound formation of Cu_6Sn_5 and Ni_3Sn_4 between Sn-Ag-Cu solder and ENEPIG substrate during a reflow process, *J. Alloy. Compd.* 509 (2011), L153-L156
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.01.015>
7. J. W. Yoon, J. H. Bang, C. W. Lee and S. B. Jung, Interfacial reaction and intermetallic compound formation of Sn-1Ag/ENIG and Sn-1Ag/ENEPIG solder joints, *J. Alloy. Compd.* 627 (2015), 276-280
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.208>
8. J. W. Yoon, B. I. Noh and S. B. Jung, Comparative Study of ENIG and ENEPIG as Surface Finishes for a Sn-Ag-Cu Solder Joint, *J. Electron. Mater.* 40 (2011), 1950-1955, <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1686-x>
9. C. E. Ho, C. W. Fan and W. Z. Hsieh, Pronounced effects of Ni(P) thickness on the interfacial reaction and high impact resistance of the solder/Au/Pd(P)/Ni(P)/Cu reactive system, *Surf. Coat. Technol.* 259 (2014), 244-251
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.027>
10. C. Y. Ho and J. G. Duh, Optimal Ni(P) thickness design in ultrathin-ENEPIG metallization for soldering application concerning electrical impedance and mechanical bonding strength, *Mater. Sci. Eng. A*, 611 (2014), 162-169, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.049>
11. C. Y. Ho and J. G. Duh, Quantifying the dependence of Ni(P) thickness in ultrathin-ENEPIG metallization on the growth of Cu-Sn intermetallic compounds in soldering reaction, *Mater. Chem. Phys.* 148 (2014), 21-27
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.072>
12. H. B. Kang, J. H. Bae, J. W. Lee, M. H. Park, Y. C. Lee, J. W. Yoon, S. B. Jung and C. W. Yang, Control of interfacial reaction layers formed in Sn-3.5Ag-0.7Cu/ electroless Ni-P solder joints, *Scr. Mater.* 60 (2009), 257-260, <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.10.017>
13. J. W. Yoon, H. S. Chun and S. B. Jung, Investigation of interfacial reaction and joint reliability between eutectic Sn-3.5Ag solder and ENIG-plated Cu substrate during high temperature storage test, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 18 (2007), 559-567
<https://doi.org/10.1007/s10854-006-9085-4>
14. T. B. Massalski, H. Okamoto, P. R. Subramanian and L. Kacprzak, Binary Alloy Phase Diagram, second ed., ASM International, *Materials Park, OH*, (1990), 1442-1446
15. J. W. Yoon, S. W. Kim and S. B. Jung, Interfacial reaction and mechanical properties of eutectic Sn-0.7Cu/Ni BGA solder joints during isothermal long-term aging, *J. Alloy. Compd.* 391 (2005), 82-89
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.09.001>
16. S. S. Ha, J. K. Jang, S. O. Ha, J. W. Kim, J. W. Yoon, B. W. Kim, S. K. Park and S. B. Jung, Mechanical Property Evaluation of Sn-3.0Ag-0.5Cu BGA Solder Joints Using High-Speed Ball Shear Test, *J. Electron. Mater.* 38 (2009), 2489-2495
<https://doi.org/10.1007/s11664-009-0916-y>