

## Ru Nanoparticle이 첨가된 Sn-58Bi 솔더의 기계적 신뢰성 및 계면반응에 관한 연구

김병우 · 최혁기 · 전해원 · 이도영 · 손윤철<sup>†</sup>

조선대학교 용접·접합과학공학과

### Mechanical Properties and Interfacial Reactions of Ru Nanoparticles Added Sn-58Bi Solder Joints

Byungwoo Kim, Hyeokgi Choi, Hyewon Jeon, Doyeong Lee, and Yoonchul Sohn<sup>†</sup>

Dept. of Welding & Joining Science Engineering, Chosun University, 309 Pilmoon-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

(Received June 10, 2021; Corrected June 23, 2021; Accepted June 29, 2021)

**초 록:** 대표적인 저온솔더인 Sn-58Bi에 Ru nanoparticles을 첨가하여 Sn-58Bi-xRu 복합솔더를 제작하고 Cu/OSP 및 ENIG 표면처리된 PCB 기판과 반응시켜 계면반응 및 솔더조인트 신뢰성을 분석하였다. Cu/OSP와의 반응에서 형성된  $Cu_6Sn_5$  IMC는 Ru 함량에 따른 두께 변화가 거의 없고 100hr aging 후에도 큰 변화없이 고속 전단시험시 솔더 내부로 연성파괴가 발생하였다. ENIG와의 반응시에는 Ru 함량이 증가함에 따라서  $Ni_3Sn_4$  IMC 두께가 감소하는 경향을 보였으며 일부 시편에서 ENIG 특유의 취성파괴 현상이 발견되었다. Ru 원소는 계면 부근에서 발견되지 않아서 계면반응에 크게 관여하지 않는 것으로 판단되며 주로 Bi phase와 함께 존재하는 것으로 분석되고 있는데 어떠한 형태로 두 원소가 공존하고 있는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

**Abstract:** Sn-58Bi-xRu composite solders were prepared by adding Ru nanoparticles to Sn-58Bi, a typical low-temperature solder, and the interfacial reaction and solder joint reliability were analyzed by reacting with Cu/OSP and ENIG surface treated PCB boards. The  $Cu_6Sn_5$  IMC formed by the reaction with Cu/OSP had little change in thickness depending on the Ru content, and ductile fracture occurred inside the solder during the high-speed shear test without any significant change even after 100 hr aging. In reaction with ENIG, the  $Ni_3Sn_4$  IMC thickness tended to decrease as the Ru content increased, and ENIG-specific brittle fracture was found in some specimens. Since Ru element is not found near the interface, it is judged not to be significantly involved in the interfacial reaction, and it is analyzed that it mainly exists together with the Bi phase.

**Keywords:** Sn-58Bi, Ru nanoparticle, composite solder, OSP, ENIG

## 1. 서 론

전자제품 시장에서 접합재료로 주로 사용되었던 Sn-Pb계 유연솔더는 녹는점이 낮아 공정 온도를 낮추고 모재에 대한 젖음성이 좋아 솔더링 공정에 매우 유리하다.<sup>1)</sup> 그러나 Pb의 유해성으로 인하여 더 이상 사용할 수 없게 되어 Sn기반으로 여러 종류의 무연솔더들이 개발되어 연구되고 사용되어 왔다.<sup>2-4)</sup> Sn-Bi계 솔더의 경우 낮은 용해 온도, 우수한 솔더링 특성 및 높은 인장 강도로 인하여 무연솔더로서 그 사용범위가 확대되고 있다.<sup>5-7)</sup> 그러나 Sn-

58Bi 솔더 사용시 Bi segregation 영역에서 균열이 빠르게 확산되어 물리적인 충격에 쉽게 파단이 일어나기 때문에 Cu, Ni, Ga, 그래핀 및 탄소나노튜브 등과 같은 광범위한 첨가물이 현재 Sn-Bi 솔더에 첨가되어 솔더 접합부의 신뢰성을 개선시키고 있다.<sup>8-10)</sup>

솔더 접합부에서 intermetallic compound (IMC)의 과도한 성장은 균열의 전파경로로 이용되며 솔더 접합부의 기계적 성질을 저하시키는 요인이 되고 있다.<sup>11-12)</sup> 따라서 열처리 중 솔더 접합부의 미세구조와 IMC층의 성장을 제어하는 것이 필수적이며 솔더 접합부의 신뢰성을

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: yoonchul.son@chosun.ac.kr

© 2021, 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.

향상시키는 것은 안전한 전자패키지를 구현하기 위하여 중요한 요소이다.<sup>13-15)</sup> 본 연구에서는 Sn-58Bi 솔더에 Ru nanoparticle을 첨가한 무연복합솔더를 제조하여 솔더접합부 신뢰성 및 기계적인 특성을 관찰하였다. Ru은 백금족에 속하는 희귀한 전이금속 원소로서 대부분의 화학물질들과 반응하지 않아서 화학적 안정성이 뛰어나므로 후막 저항기와 내부식성을 가지는 전기 접점으로 사용되고 백금 합금과 촉매로도 쓰인다. 또한 녹는점, 끓는점이 매우 높으며 밀도는 12.45 g/cm<sup>3</sup>이고, 같은 족 원소인 철보다 열과 전기를 더 잘 전달한다. 우수한 물성을 가진 Ru이 현재까지 복합솔더의 첨가물로 사용된 보고가 없으므로 본 연구를 통하여 Ru 첨가시 Sn-58Bi 솔더의 물성변화를 관찰하고자 하였다. 현재 상용으로 가장 많이 사용되고 있는 Cu/OSP (organic solderability preservative) 및 ENIG (electroless Ni/immersion Au) 표면처리된 PCB 기판에 솔더링 및 100°C에서 aging을 실시하여 접합부의 계면반응을 분석하고 고속전단시험을 실시하여 접합부 신뢰성을 평가하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 Sn-58Bi 솔더 페이스트(BBI-LFSP04 from BBIEN, powder size : 25~45 μm) 와 순도 99.9% Ru nanopowder(particle size : 20~30 nm)을 혼합하여 Sn-58Bi-xRu 조성의 솔더 페이스트를 제조하였다. Ru 함량은 Sn-58Bi의 무게를 100으로 하였을 때를 기준으로 각각 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 wt%를 첨가하여 4종류의 솔더 페이스트를 제조하고 균일한 혼합을 위해 공자전 paste mixer를 이용하여 공전속도 800 rpm 및 자전속도 500 rpm으로 설정한 후 1분간 혼합을 2회 실시하였다. Ru nanoparticles 혼합이 균일하게 이루어졌는지 확인하기 위하여 조성별 솔더 페이스트의 각각 다른 부분에서 샘플을 수집하여 DSC분석을 실시하였다. 각 조성별 ~4 mg의 샘플을 사용하여 10°C/min의 승온속도로 발생하는 열량을 측정하였다. Fig. 1에 제시된 Sn-58Bi-0.05Ru 솔더 페이스트의 DSC 분석 결과로부터 각각 다른 부분에서 수집한 솔더의 용융과 응

고와 같은 온도에서 일어남을 알 수 있고 이로부터 솔더 내부에 Ru nanoparticle들이 균일하게 잘 혼합되었음을 확인할 수 있다. 조성별로 제조된 솔더 페이스트는 스텐실 프린팅 설비를 이용하여 OSP 및 ENIG 표면처리된 PCB 기판 표면에 100 μm 두께로 프린팅한 후 리플로우 공정을 통하여 솔더링을 실시하였다. Fig. 2에 리플로우 공정도와 제작시편의 모식도를 나타내었다. ENIG 표면처리에 적용된 Ni-P층 두께는 ~5 μm, P 함량은 6~8 wt%이고, Au두께는 ~0.05 μm이다. 솔더링된 시편은 에폭시 소재로 마운팅(mounting) 하였으며, 단면 관찰을 위해 폴리싱 작업을 수행하였다. 각 시편의 미세구조 및 접합계면은 95.0ethanol-4.0HNO<sub>3</sub>-1.0HCl (in vol.%) 에칭용액을 사용하여 약 10초간 에칭 후 FE-SEM (field emission scanning electron microscope, JEOL JSM-7900, HITACHI S-4800)과 electron probe microanalyzer (EPMA; JXA-8500F, JEOL)를 이용하여 분석하였다. 어닐링 공정은 air 분위기 100°C에서 100시간 실시하였고 리플로우 시편과 동일한 준비를 통하여 미세구조 및 접합계면을 관찰하였다. 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해 고속 전단시험(dage,series 4000HS)을 수행하였으며, 전단시험시 스타일러스 높이는

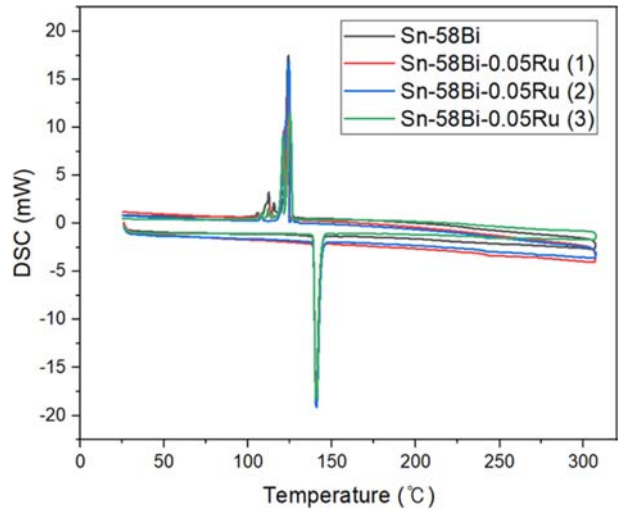


Fig. 1. DSC analysis result of Sn-58Bi-0.05Ru composite solders.

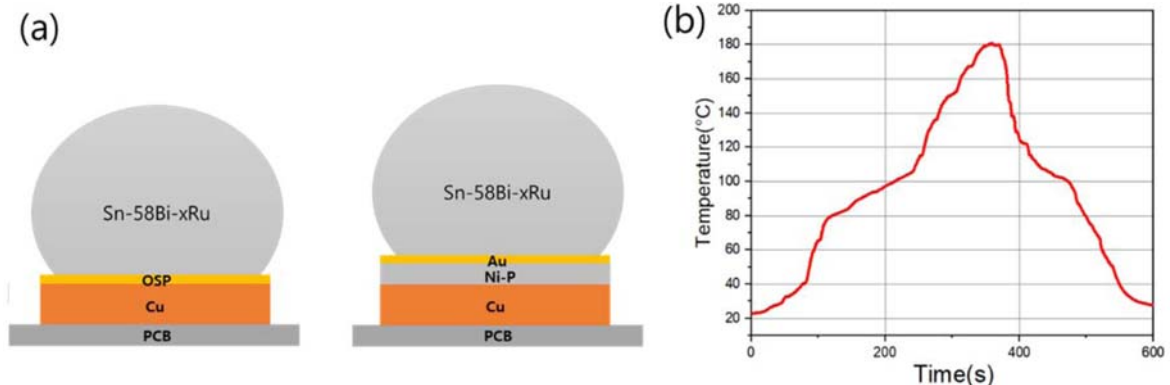


Fig. 2. (a) Schematic diagram for experimental setup, (b) reflow profile used for the reactions of Sn-58Bi-xRu solders.

50  $\mu\text{m}$ , 전단시험 속도는 1000 mm/s를 사용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

Sn-58Bi-xRu 복합솔더와 Cu/OSP 및 ENIG 표면처리 PCB들과의 솔더링 공정 후 솔더접합부에서의 계면반응을 분석하였다. Fig. 3은 Cu/OSP 표면처리된 PCB 기판에 리플로우 공정 후 솔더접합부의 단면 SEM 사진이다. 반응 후 솔더 내부에서는 전형적인 Sn-Bi eutectic 구조를 가

짐을 확인할 수 있다. 반응계면에서 scollop-type의  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC가 형성됨이 관찰되었다. Ru 함량에 따른 IMC 두께는 크게 차이가 없음을 볼 수 있다. Sn-58Bi-0.5Ru 복합솔더 시편에서 솔더접합부 미세구조에 대한 line-scan과 area mapping 분석을 실시하여 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 솔더내부의 eutectic 조직에서 밝은 부분은 Bi이고 어두운 부분은 Sn으로 이루어져 있고 계면에  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC가 형성되어 있음을 알 수 있다. 특이한 점은 Ru은 반응계면 부분에서는 발견되지 않았고 Bi phase 부분에

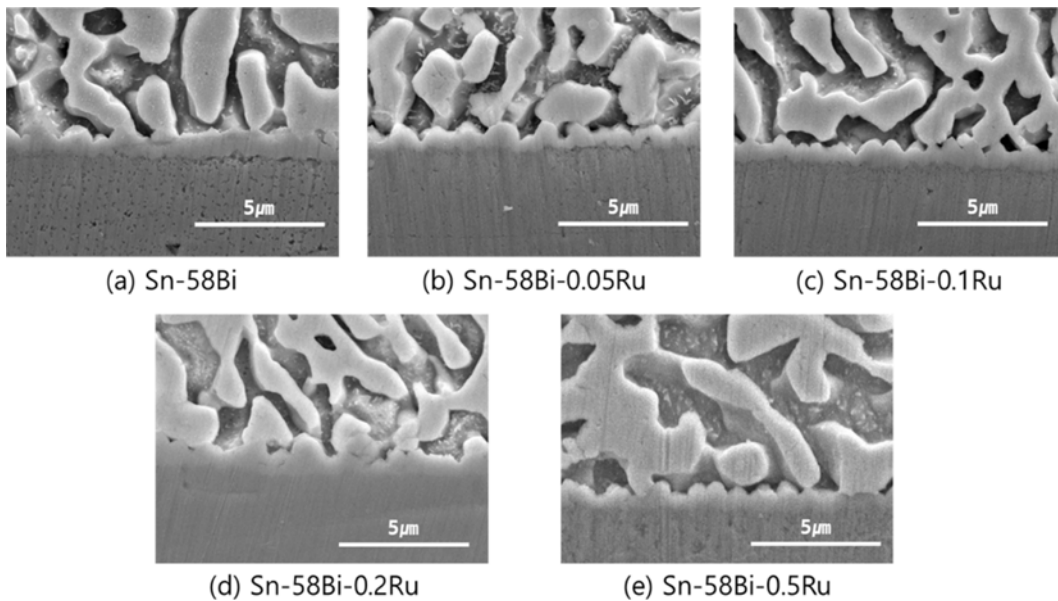


Fig. 3. Cross-sectional SEM micrographs for interfacial reactions of Sn-58Bi-xRu/Cu OSP specimens after reflow process.

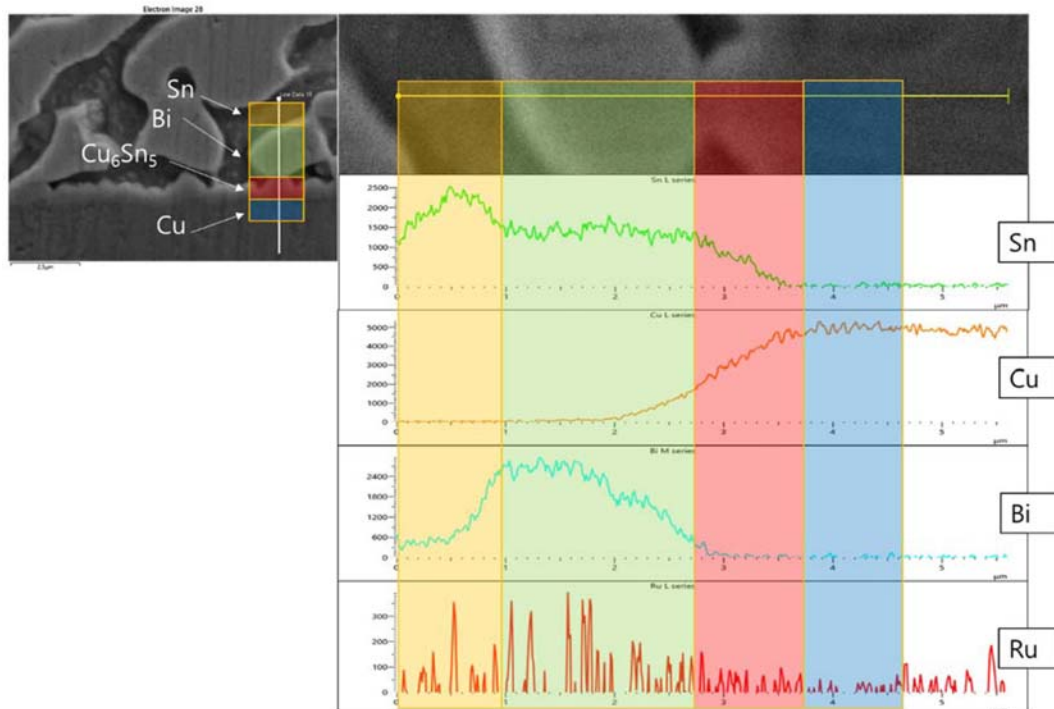


Fig. 4. EPMA image and line-scan results of the cross-section of Sn-58Bi-0.5Ru/Cu OSP specimen after reflow.

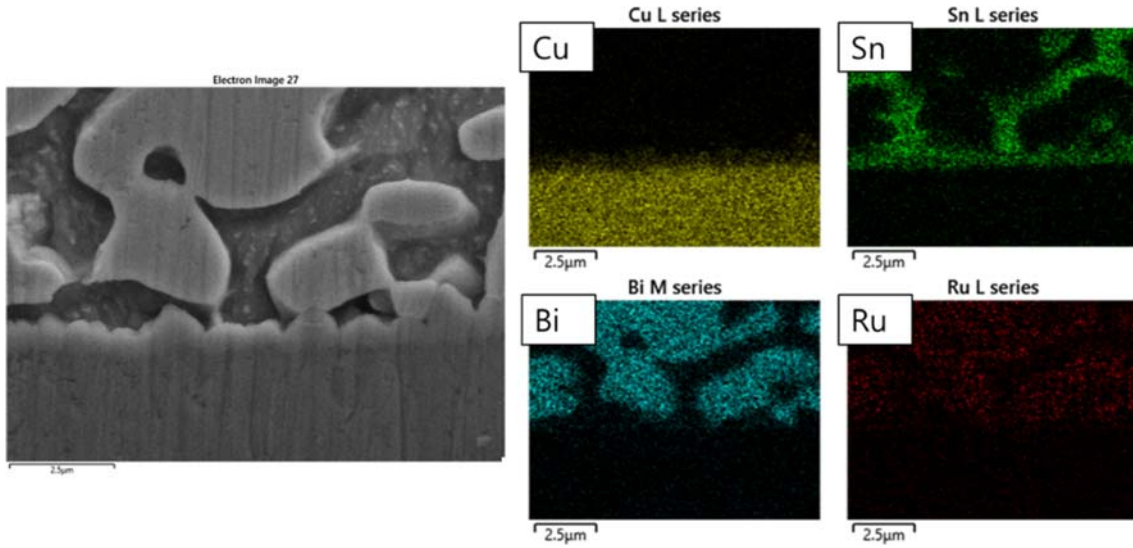


Fig. 5. EPMA image and area-mapping results of the cross-section of Sn-58Bi-0.5Ru/Cu OSP specimen after reflow.

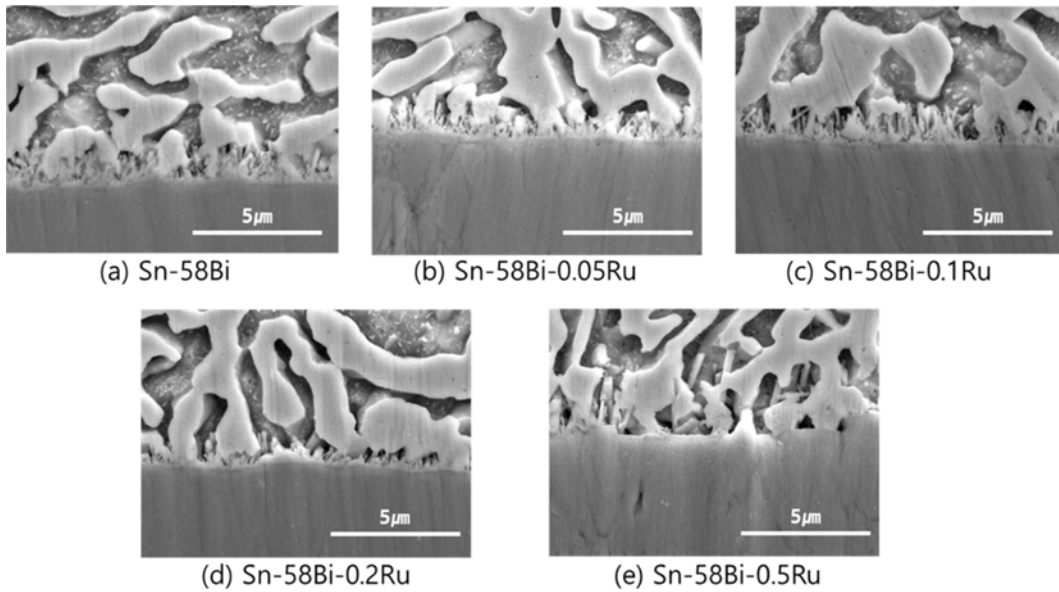


Fig. 6. Cross-sectional SEM micrographs for interfacial reactions of Sn-58Bi-xRu/ENIG specimens after reflow process.

서 함께 관찰되었다.

Fig. 6은 ENIG 표면처리한 PCB 기판과 Sn-58Bi-xRu 복합솔더와의 반응 후 솔더접합부의 단면 SEM 사진이다. 솔더 내부에서는 동일하게 Sn-Bi eutectic 구조가 관찰되고 있으며, 솔더접합부에서는 잘 알려진 바와 같이 needle-type의 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> IMC가 관찰되고 있다.<sup>16,17)</sup> Ru 함량이 증가함에 따라서 IMC 두께가 감소하는 것으로 파악되는데 이러한 두께 감소가 IMC spalling 현상에 의한 것인지는 좀 더 면밀한 분석이 필요하다. Sn-58Bi-0.5Ru 복합솔더 시편에서 솔더접합부 미세구조에 대한 line-scan과 area mapping 분석을 실시하여 Fig. 7와 Fig. 8에 각각 나타내었다. ENIG 표면의 Au는 반응초기 솔더 내부로 확산되었고 반응계면에서 Ni-Sn IMC가 존재함을 확인할 수 있다. Ru의 경우 Cu와 반응시와 마찬가지로 반응계면에서

는 거의 관찰되지 않고 Bi phase와 함께 존재하는 것으로 분석되었다.

리플로우 공정 및 100시간 어닐링 후 계면반응시 Ru 원소가 반응계면에서 관찰되지 않고 있으므로 솔더 조성을 구성하는 Sn과 Bi를 중심으로 Ru 원소의 이동을 추적하는 것이 합리적으로 판단된다. 우선 Sn-Ru 상평형도는 1999년 J. Charles 등에 의하여 기존의 실험데이터를 바탕으로 열역학적으로 최종 계산되었다.<sup>18)</sup> Fig. 9(a)에 Sn-Ru 상평형도를 나타내었으며 Ru<sub>4</sub>Sn<sub>6</sub> 및 Ru<sub>3</sub>Sn<sub>7</sub>의 두가지 금속간화합물을 형성하는데 본 연구에서는 적어도 거시적인 관점에서는 솔더접합 계면이나 솔더 내부에서 관찰되지 않았으나 아주 미세한 크기의 금속간화합물이 솔더 내부에 존재할 가능성은 배제할 수 없다. 금속간화합물을 형성하지 않는 한 본 실험에서와 같은 저온에서는 Sn 내

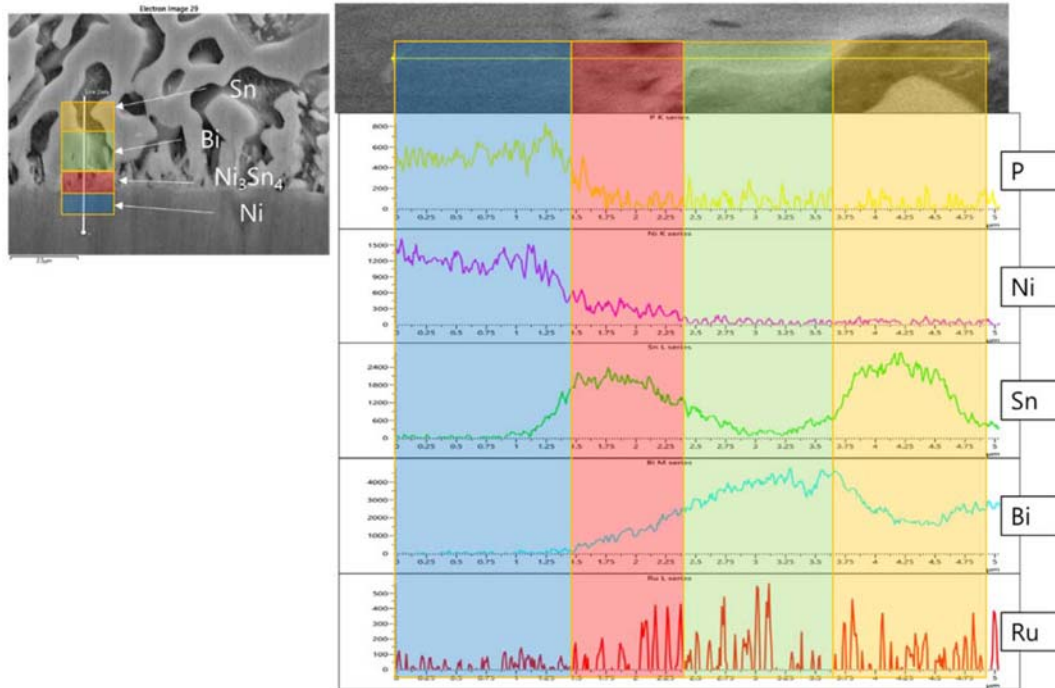


Fig. 7. EPMA image and line-scan results of the cross-section of Sn-58Bi-0.5Ru/ENIG specimen after reflow.

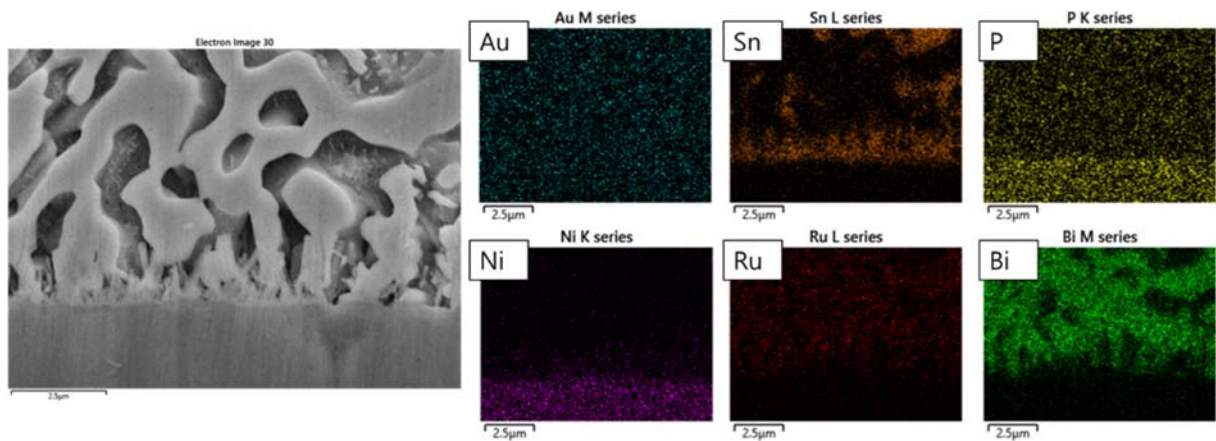


Fig. 8. EPMA image and area-mapping results of the cross-section of Sn-58Bi-0.5Ru/ENIG specimen after reflow.

부에 Ru이 고용될 가능성은 없는 것으로 상평형도를 근거로 판단할 수 있다. Bi-Ru의 경우에는 전 조성영역을 포함하는 온전한 상평형도가 존재하지 않으며 1978년도 발행된 Binary Phase Diagrams Handbook에 Bi-rich 영역만이 존재하는데 Ru의 조성범위가 0.04 at%로 매우 작다.<sup>19)</sup> 핸드북에 제시된 상평형도를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 본 상평형도에서 Bi의 용점인 271.7°C 이하에서는 Bi와 Ru이 단순혼합된 상태로 존재하는데 Ru의 조성이 더 커질 경우 두 원소가 어떠한 상태에 존재하는지 명확히 알 수 없다. 본 연구에서는 Bi와 함께 Ru이 존재하는 것으로 관찰되는데 Sn 내부에 Ru의 고용도가 없으므로 Bi와 함께 존재할 가능성이 많은데 두 원소가 어떠한 형태로 존재하고 있는지에 대해서는 향후 연구가 필요한 부분이다. 또한 Sn-Bi 솔더의 경우 장시간 열처리시 Bi 원소가 반응

계면 부근으로 확산하여 segregation되면서 신뢰성에 나쁜 영향을 준다고 알려져 있다. Sn-Bi 솔더가 Cu기판과 반응하여 장시간 어닐링 공정을 거치는 경우에는 확산된 Bi 원자들이 Cu<sub>3</sub>Sn/Cu 계면에 segregation되는 동시에 이 부분에 다량의 void가 형성되어 기계적 신뢰성에 심각한 영향을 끼친다고 보고된 바 있다.<sup>20,21)</sup> 본 연구에서 Ru은 Bi와 함께 공존하고 있으며 Bi가 장거리 확산하는 경우 함께 움직이면서 확산될 가능성이 있으므로 장시간 어닐링하면서 Bi와 Ru 원자의 이동경로를 함께 추적하는 것이 필요하다. 장시간 어닐링한 시편들의 솔더접합부를 면밀히 관찰하기 위하여 리플로우한 시편들을 1000시간까지 aging하는 공정을 수행 중에 있다.

Cu OSP 및 ENIG 표면처리된 기판과 반응한 Sn-58Bi-xRu 복합솔더 조인트의 기계적 신뢰성을 평가하기 위하

여 고속 전단시험을 실시한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Cu OSP 표면처리의 경우는 대부분의 파괴가 솔더 내에서 연성파괴의 형태로 나타났으며 파괴표면에서 다량의 솔더 소성변형 및 덩플이 발견되었다. 결과적으로 Ru 함량 변화에 따른 큰 차이없이 시편마다 비슷한 전단응력 값을 나타내었다. ENIG 표면처리의 경우에도 대부분 솔더 내부로 균열이 진전하는 소성변형이 주로 이루어졌지만 시편마다 조금씩 솔더와 무전해 Ni-P이 분리되는 취성파괴의 흔적이 군데군데 발견되었다. 그러나 Sn-58Bi-0.2Ru 시편에서는 다량의 취성파괴 흔적이 관찰되었으며 이것을 Fig. 10(c)에 나타내었다. ENIG 솔더링시 발생하는 취성파괴는 Ni-Sn-P 층에 형성되는 nano-voids를 따라서 균열이 진전하여 발생하는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서도 동일한 형태의 파괴면을 관찰할 수 있었다.<sup>22-24)</sup> 이러한 파괴면에서는 소성변형의 흔적을 발견할 수 없으며 소량의 IMC만이 취성파괴면의 표면에 남아있음을 볼 수 있다.

고상 열처리시 Sn-58Bi-xRu 솔더조인트의 변화를 관찰

하기 위하여 100°C에서 100 hr동안 열처리를 수행하였다. Cu OSP 표면처리의 경우 어닐링 후 Ru 함량에 따른 미세구조의 변화와 EPMA line-scan 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다. 100시간 aging 후 소량의 Cu<sub>3</sub>Sn IMC가 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 하부에 형성되고 있으나 IMC층의 대부분은 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>가 차지하고 있으며 Ru 함량에 따른 두께 변화는 크지 않아 보인다. ENIG 표면처리의 경우 aging 후 Ru 함량에 따른 미세구조의 변화와 EPMA line-scan 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 각각 나타내었다. 100시간 열처리 후에도 아직 needle-type Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> IMC가 계면에 주류를 형성하고 있으며 Ru 함량에 따라서 두께가 다소 감소하는 것으로 관찰되어진다. EPMA 결과에서 이전 결과와 마찬가지로 Ru는 계면부근에서 전혀 발견되지 않았고 Bi와 함께 존재하는 것을 확인할 수 있다. 리플로우 및 열처리한 시편들에서 측정된 IMC 두께를 Fig. 15에 나타내었다. Cu OSP 경우에는 열처리 전후 전체 IMC 두께 변화가 거의 없는데 이것은 Cu<sub>3</sub>Sn IMC를 형성하기 위한 반응으로 인하여 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>의 성장이 크게 일어나지 않았고 그 결과 전

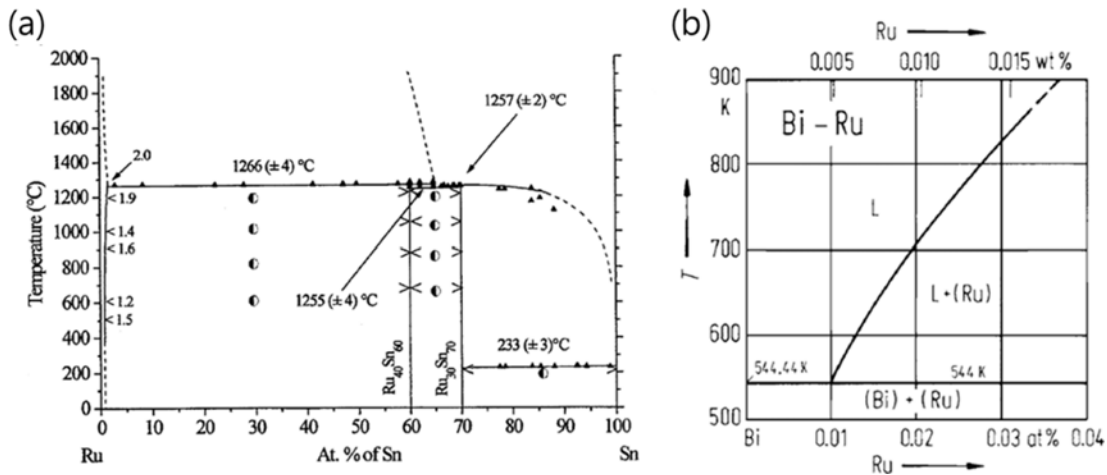


Fig. 9. (a) Phase diagram of Sn-Ru system [18], (b) phase diagram of Bi-Ru system [19].

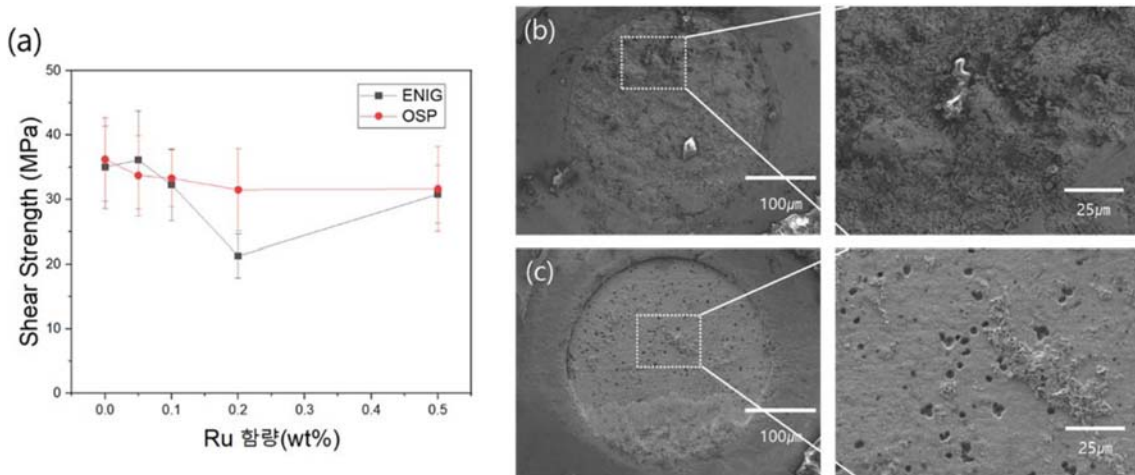


Fig. 10. (a) Measured shear stresses of Sn-58Bi-xRu solder joints, (b) fractured surface of Sn-58Bi-0.2Ru/Cu OSP solder joint, (c) fractured surface of Sn-58Bi-0.2Ru/ENIG solder joint.

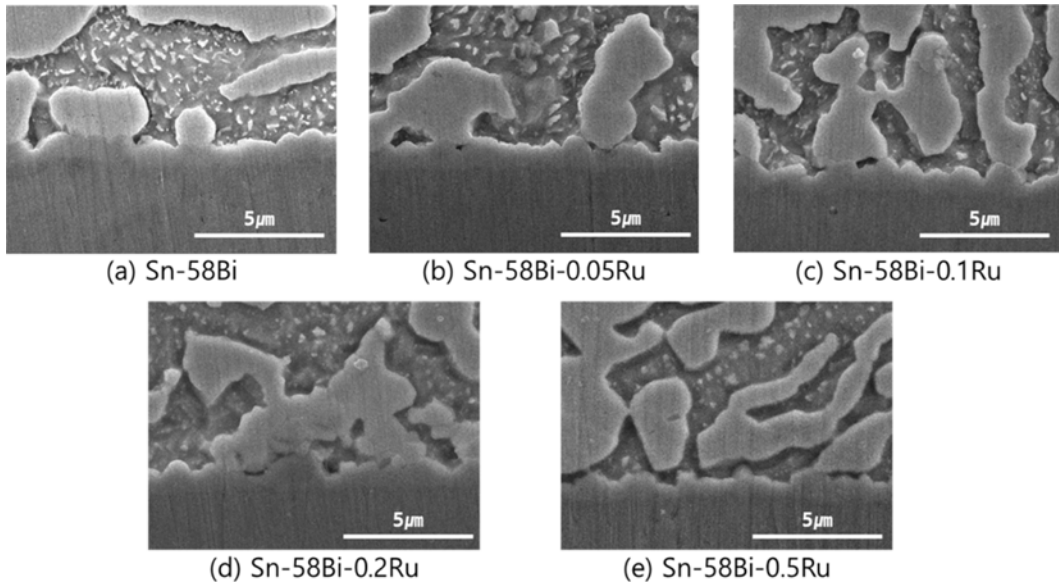


Fig. 11. Cross-sectional SEM micrographs for interfacial reactions of Sn-58Bi-xRu/Cu OSP specimens after 100hr aging.

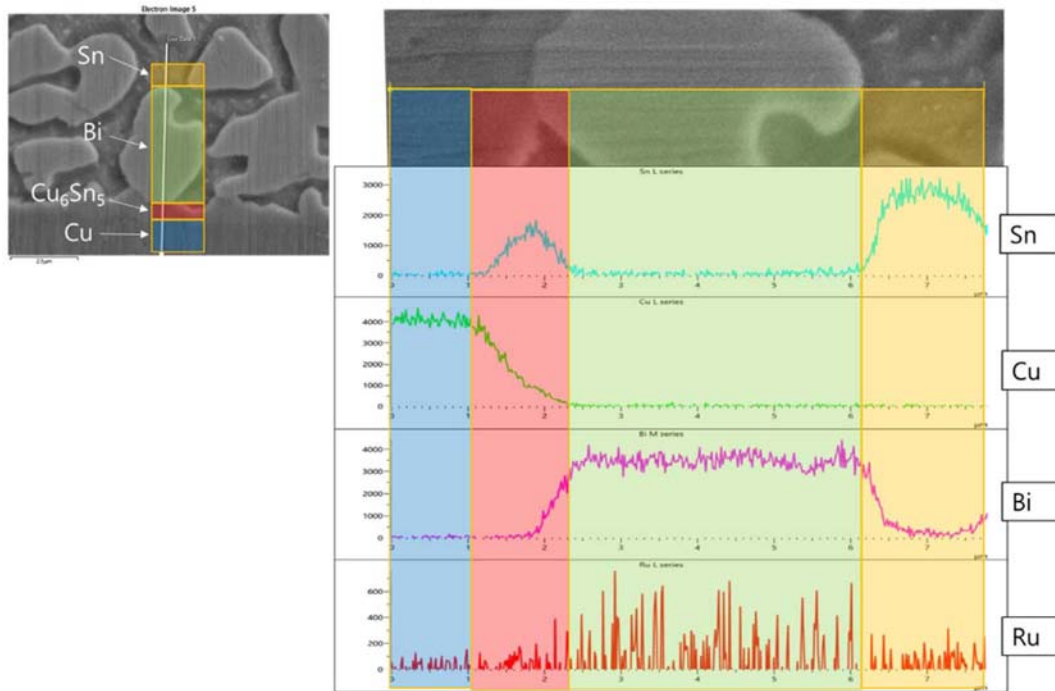


Fig. 12. EPMA image and line-scan results of the cross-section of Sn-58Bi-0.5Ru/Cu OSP specimen after 100hr aging.

체 IMC 두께도 열처리 전과 비교하여 크게 변화하지 않은 것으로 관찰되었다. ENIG의 경우 열처리 후  $Ni_3Sn_4$  IMC 두께 증가가 분명히 일어나고 있으며 Ru 함량이 증가함에 따라서 IMC 두께가 감소하는 현상을 보여주고 있다. 이러한 두께 감소가 왜 일어나는지에 대한 이유는 현재 분명치 않으며 향후 추가연구가 필요한 부분이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대표적인 저온솔더인 Sn-58Bi에 Ru nanoparticles을 첨가하여 Sn-58Bi-xRu 복합솔더를 제작하

고 Cu/OSP 및 ENIG 표면처리된 PCB 기판과 반응시켜 계면반응 및 솔더조인트 신뢰성을 분석하였다. Cu/OSP와의 반응에서 형성된  $Cu_6Sn_5$  IMC는 Ru 함량에 따른 두께 변화가 거의 없고 100hr aging 후에도 큰 변화없이 고속 진단시험시 솔더 내부로 연성파괴가 발생하였다. ENIG와의 반응시에는 Ru 함량이 증가함에 따라서  $Ni_3Sn_4$  IMC 두께가 감소하는 경향을 보였으며 일부 시편에서 ENIG 특유의 취성파괴 현상이 발견되었다. Ru 원소는 계면 부근에서 발견되지 않아서 계면반응에 크게 관여하지 않는 것으로 판단되며 주로 Bi phase와 함께 공존하는 것으로 분석되었다.

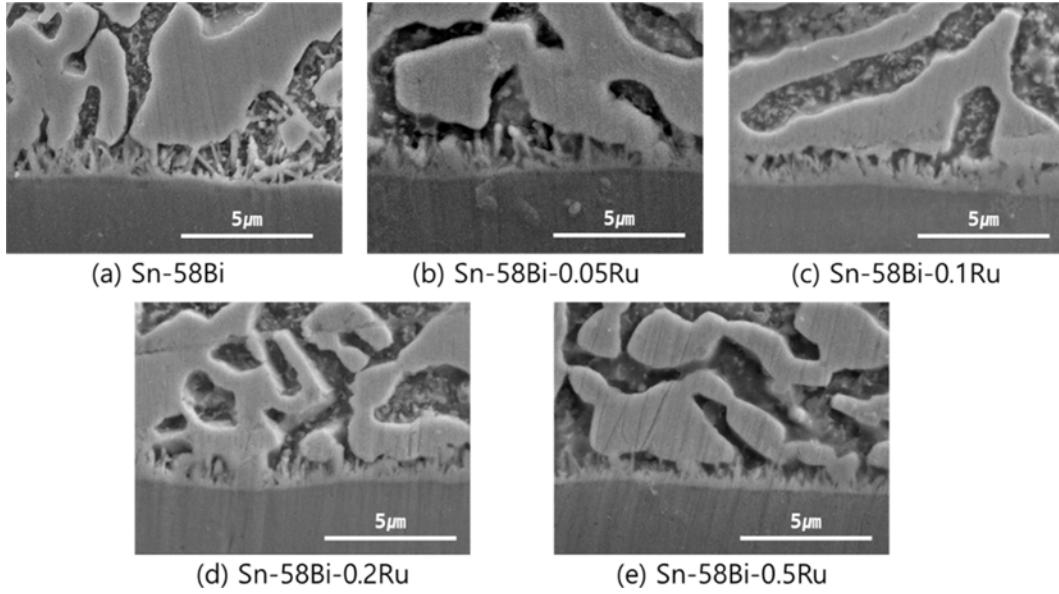


Fig. 13. Cross-sectional SEM micrographs for interfacial reactions of Sn-58Bi-xRu/ENIG specimens after 100hr aging.

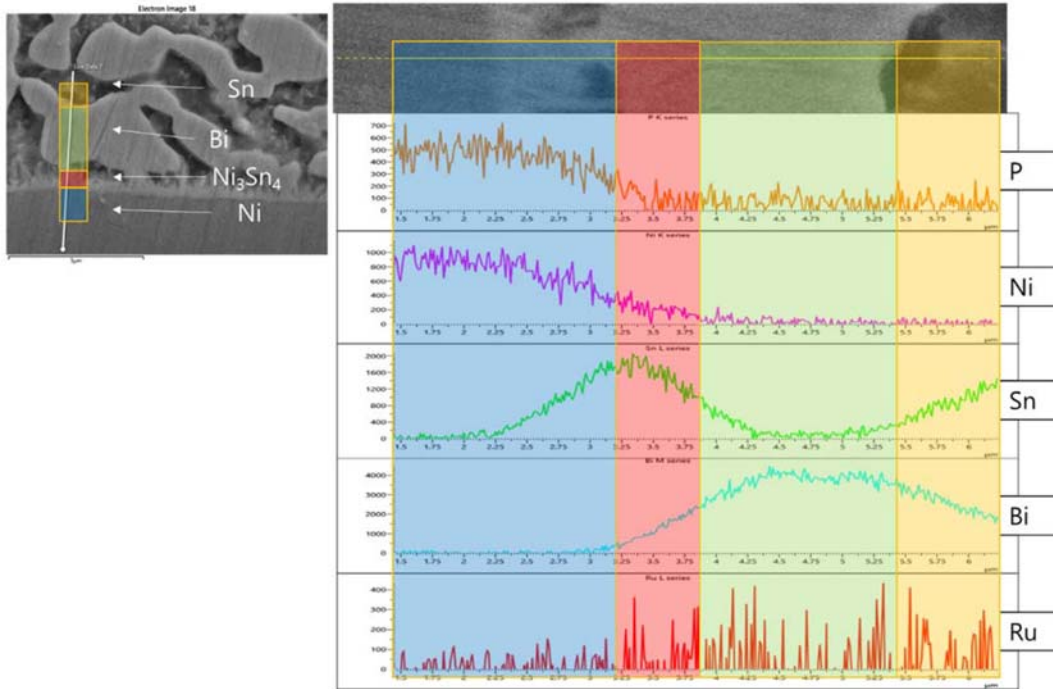


Fig. 14. EPMA image and line-scan results of the cross-section of Sn-58Bi-0.5Ru/ENIG specimen after 100hr aging.

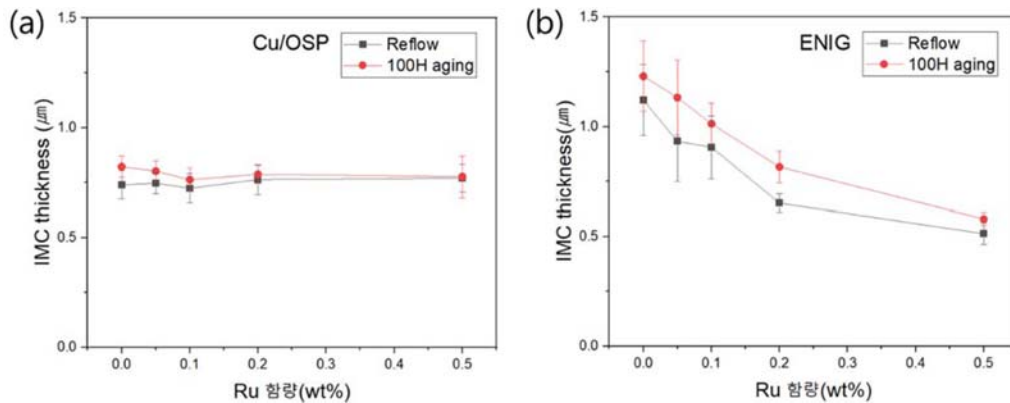


Fig. 15. Measured IMC thicknesses at Sn-58Bi-xRu solder joints reacted with (a) Cu/OSP and (b) ENIG.



## Acknowledgments

본 결과물은 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.

## 참고문헌

1. K. Tu, and K. Zeng. "Tin-lead (SnPb) solder reaction in flip chip technology", *Mater. Sci. Eng. C.*, 34(1), 1 (2001).
2. J. W. Yoon, W. C. Moon, and S. B. Jung, "Interfacial reaction of ENIG/Sn-Ag-Cu/ENIG sandwich solder joint during isothermal aging", *Microelectron. Eng.*, 83(11-12), 2329 (2006).
3. H. ma and, J. C. Suhling, "A review of mechanical properties of lead-free solders for electronic packaging", *J. Mater. Sci.*, 44(5), 1141 (2009).
4. I. E. Anderson, "Development of Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-Cu-X alloys for Pb-free electronic solder applications", *Lead-Free Electron. Solders.*, 55 (2006).
5. W. R. Osório, L. C. Peixoto, L. R. Garcia, N. Mangelinck-Noël, and A. Garcia, "Microstructure and mechanical properties of Sn-Bi, Sn-Ag and Sn-Zn lead-free solder alloys", *J. Alloys Compd.*, 572, 97 (2013).
6. T. Laurila, V. Vuorinen, and M. Paulasto-Kröckel. "Impurity and alloying effects on interfacial reaction layers in Pb-free soldering", *Mater. Sci. Eng. C.*, 68(1-2), 1 (2010).
7. Y. Goh, A. S. M. A. Haseeb, and M. F. M Sabri. "Effects of hydroquinone and gelatin on the electrodeposition of Sn-Bi low temperature Pb-free solder", *Electrochim. Acta.*, 90(15), 265 (2013).
8. Y. Xu, H. Xu, H. Li, J. Xia, C. Liu, and L. Liu. "Retarding the electromigration effects to the eutectic SnBi solder joints by micro-sized Ni-particles reinforcement approach", *J. Alloys Compd.*, 509(7), 3286 (2011).
9. S. K. Lin, T. L. Nguyen, S. C. Wu, and Y. H. Wang. "Effective suppression of interfacial intermetallic compound growth between Sn-58 wt.% Bi solders and Cu substrates by minor Ga addition", *J. Alloys Compd.*, 586, 319 (2014).
10. J. Shen, Y. Pu, H. Yin, D. Luo, and J. Chen. "Effects of minor Cu and Zn additions on the thermal, microstructure and tensile properties of Sn-Bi-based solder alloys", *J. Alloys Compd.*, 614, 63 (2014).
11. M. Usui, T. Satoh, H. Kimura, S. Tajima, Y. Hayashi, D. Setoyama, and M. Kato. "Effects of thermal aging on Cu nanoparticle/Bi-Sn solder hybrid bonding", *Microelectron. Reliab.*, 78, 93 (2017).
12. L. Yang, L. Zhu, L. Zhang, S. Zhou, Y. Xiong, and P. Wu. "Microstructural evolution and IMCs growth behavior of Sn-58Bi-0.25 Mo solder joint during aging treatment", *Mater. Res. Express.*, 5(2), 026304 (2018).
13. W. Dong, Y. Shi, Z. Xia, Y. Lei, and F. Guo. "Effects of trace amounts of rare earth additions on microstructure and properties of Sn-Bi-based solder alloy", *J. Electron. Mater.*, 37(7), 982 (2008).
14. C. Andersson, P.E. Tegehall, D. R. Andersson, G. Wetter, and J. Liu. "Thermal cycling aging effect on the shear strength, microstructure, intermetallic compounds (IMC) and crack initiation and propagation of reflow soldered Sn-3.8 Ag-0.7 Cu and wave soldered Sn-3.5 Ag ceramic chip components", *IEEE, Trans. Comp. Packag. Manuf. Tech.*, 31(2), 331 (2008).
15. J. W. Yoon, and S. B. Jung. "Effect of isothermal aging on intermetallic compound layer growth at the interface between Sn-3.5 Ag-0.75 Cu solder and Cu substrate", *J. Mater. Sci.*, 39(13), 4211 (2004).
16. Y. C. Sohn, Jin Yu, S. K. Kang, D. Y. Shih and T. Y. Lee, "Spalling of intermetallic compounds during the reaction between lead-free solders and electroless Ni-P metallization", *J. Mater. Res.*, 19(8), 2428-2436 (2004).
17. Y. C. Sohn "Effect of Morphological Change of Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> Intermetallic Compounds on the Growth Kinetics in Electroless Ni-P/Sn-3.5Ag Solder Joint", *Metall and Mat Trans A* 51, 2905-2914 (2020).
18. J. Charles, J. J. Kuntz, J. C. Gachon et al. "A thermodynamic assessment of the ruthenium-tin (Ru-Sn) system", *J. Phase Equil.* 20, 573 (1999).
19. Moffatt, W.G., "Binary Phase Diagrams Handbook", General Electric Comp., Schenectady, N.Y., (1978).
20. T.Y. Kang, Y.Y. Xiu, C.Z. Liu, L. Hui, J.J. Wang, and W.P. Tong, "Bismuth segregation enhances intermetallic compound growth in SnBi/Cu microelectronic interconnect", *J. Alloy Compd* 509, 1785-1789 (2011).
21. P.J. Shang, Z.Q. Liu, D.X. Li, and J.K. Shang, "Bi-induced voids at the Cu<sub>3</sub>Sn/Cu interface in eutectic SnBi/Cu solder joints", *Scr. Mater.* 58, 409-412 (2008).
22. Y. C. Sohn and Jin Yu, "Correlation between chemical reaction and brittle fracture found in electroless Ni(P)/immersion gold-solder interconnection", *J. Mater. Res.* 20, 1931-1934 (2005).
23. C. Key Chung, Y.J. Chen, W.M. Chen, and C.R. Kao, "Origin and evolution of voids in electroless Ni during soldering reaction", *Acta Mater.* 60(11), 4586-4593 (2012).
24. W. I. Seo, M. S. Kim, Y. H. Ko et al. "Growth of intermetallic compounds and brittle fracture behavior of Sn-Ag-Cu/ENIG joint with columnar Ni-P layer", *J Mater Sci: Mater Electron* 32, 1042-1051 (2021).