

고온 시효 시험에 따른 Epoxy 솔더 접합부의 접합 특성 평가

강민수, 김도석, 신영의 

중앙대학교 기계공학부

Evaluation of Bonding Properties of Epoxy Solder Joints by High Temperature Aging Test

Min-Soo Kang, Do-Seok Kim, and Young-Eui Shin

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

(Received August 8, 2018; Revised September 12, 2018; Accepted October 1, 2018)

Abstract: Bonding properties of epoxy-containing solder joints were investigated by a high temperature aging test. Specimens were prepared by bonding an R3216 standard chip resistor to an OSP-finished PCB by a reflow process with two basic types of solder (SAC305 & Sn58Bi) pastes and two epoxy-solder (SAC305+epoxy & Sn58Bi+epoxy) pastes. In all epoxy solder joints, an epoxy fillet was formed in the hardened epoxy, lying around the outer edge of the solder joint, between the chip and the Cu pad. In order to analyze the bonding characteristics of solder joints at high temperatures, a high-temperature aging test at 150°C was carried out for 14 days (336 h). After aging, the intermetallic compound Cu_6Sn_5 was found to have formed in the solder joint on the Cu pad, and the shear stress on the conventional solder joint was reduced by a significant amount. The reason that the shear force did not decrease much, even though in epoxy solder, was that because epoxy hardened at the outer edge of the supported solder joints. Using epoxy solder, strong bonding behavior can be ensured due to this resistance to shear force, even in metallurgical changes such as those where intermetallic compounds form at solder joints.

Keywords: Epoxy solder, Lead-free solder, Thermal aging, Intermetallic compound layer

1. 서론

전자제품 산업에서 전기적·기계적 접합을 위해 유연솔더(Sn-Pb계)를 사용해 왔다. 유연솔더는 다른 합금에 비해 가격이 저렴하며, 높은 기계적 특성으로 비교적 쉽게 접합이 가능했으며, 접합부의 신뢰성 또한 우수한 장점이 있어 가장 많이 사용되어 왔다. 그러나 유연솔더에 함유된 납(Pb)은 체내에 축적될 경우 뇌와

신경계통에 장애를 초래할 수 있다는 연구 결과에 따라, RoHS (restriction of the use of hazardous substances in EEE) 규제가 발효되었고, 납의 사용을 제한하고 있다 [1,2]. 따라서 이를 대체하기 위한 납이 함유되지 않은 무연솔더에 대한 연구가 진행 중이며, Sn-Ag-Cu계, Sn-Cu계, Sn-Ag계, Sn-Bi계 솔더 등이 개발되어 사용되고 있다. 무연솔더는 납의 비중을 줄이기 위해 기존의 유연솔더보다 높은 주석(Sn)의 비중을 가지고 있으며 높은 주석의 비중으로 인해 구리(Cu) 전극과 무연솔더 사이에서 Sn-Cu계 금속간화합물(intermetallic compound) 성장이 더 크게 나타난다 [3,4]. 솔더 내부에서 형성되는 금속간화합물은 일반적으로 취성의 성질을 [5] 가지고 있기 때문에, 솔더 접합부의 인성을 저하

✉ Young-Eui Shin; shinyoun@cau.ac.kr

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
 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.

시키며 외력에 의한 저항성을 감소시켜 솔더 접합부가 쉽게 파손이 되는 원인이 되고 있다. 금속간화합물의 성장은 일반적으로 온도, 시간과 관련이 있으며 [6], 고온에서 장시간 노출될 경우 주석과 구리의 고체 확산 현상에 의해 성장한다. 따라서 고온에서 장시간 사용하는 전자제품은 솔더 접합부에서 쉽게 금속간화합물이 성장하며 외부충격에 의해 솔더 접합부가 손상되어 전체 전자패키지의 불량률이 발생할 수 있다 [7-9]. 따라서 이러한 금속간화합물을 억제하거나, 금속간화합물이 확산으로 형성되어도 접합 특성을 유지하는 접합 공정에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 고온에 노출된 무연솔더 접합부 내에서 성장한 금속간화합물의 영향으로 솔더 접합부의 접합 특성이 저하되는 현상을 epoxy 기반의 솔더 접합 방법을 통해 보완하고자 하였으며, epoxy 솔더 접합부의 전단력을 측정하여 접합 특성을 비교하였다.

2. 실험 방법

본 실험을 수행하기 위해 그림 1과 같이 R3216 규격 resistor chip을 사용하여 시편을 제작하였다. R3216은 일반적인 저항기능을 갖는 chip으로 내부에 저항구조를 가지고 있으며, 외부는 covering layer와 outside termination (Ag layer & Ni-barrier)이 도금된 형상을 하고 있다. R3216을 OSP (organic solderability preservative) 마감 처리된 PCB 위에 접합하기 위해 표 1과 같이, 기존 상용화된 SAC305 (wt% 96.5Sn3.0Ag0.5Cu)

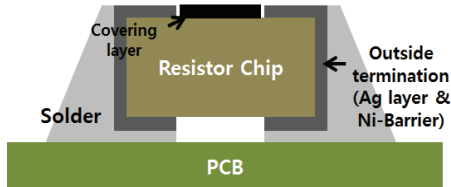


Fig. 1. Shape of R3216 chip.

Table 1. Solder specification.

Solder composition	Melting point	Reference
SAC305	220°C	TLF-401-11 TAMURA
Sn58Bi	139°C	TLF-204-141 TAMURA
SAC305+epoxy	240°C	
Sn58Bi+epoxy	180°C	

솔더와 저온계 무연솔더 wt% 42Sn58Bi 솔더를 사용하여 스크린프린팅 공정 및 리플로우(reflow) 공정을 통해 접합하였다. 기존 SAC305 솔더 페이스트의 용점은 220°C였으며, Sn58Bi 솔더 페이스트의 용점은 139°C로 일반적인 리플로우 온도 프로파일을 사용하여 접합하였다.

또한 SAC305와 Sn58Bi 솔더 조성에 epoxy를 교반하여 제작된 두 종류의 epoxy 솔더((주) H사)를 사용하여 실험 시편을 제작하였다. 상용 SAC305 솔더에 epoxy를 교반하여, 점성 175,000±25,000cP, 에폭시 경화 천이온도(Tg) 75°C의 특성을 갖으며, Sn58Bi 솔더에 점성 200,000±5,000cP, 천이온도(Tg) 72°C의 특성을 갖는 epoxy 솔더를 사용하였다. SAC305 epoxy 솔더의 용점은 epoxy의 경화를 고려하여, 240°C의 온도에서 100s 간 유지하는 온도프로파일에 따라 리플로우 공정을 수행하였으며, Sn58Bi epoxy 솔더는 180°C의 온도에서 140s 동안 유지시키는 온도프로파일에 따라 접합 공정을 수행하였다. 그림 2에 Sn58Bi 솔더와 Sn58Bi epoxy 솔더를 사용하여 접합한 실험 시편을 나타내었다. Epoxy 솔더는 기존의 솔더보다 고온에서 리플로우 공정을 수행해야 하며, 솔더 접합부 외곽에 epoxy가 경화되어 그림 2와 같은 epoxy 필렛을 형성하는 것을 확인할 수 있다.

제작된 실험 시편은 JESD22-A103D 고온시효시험

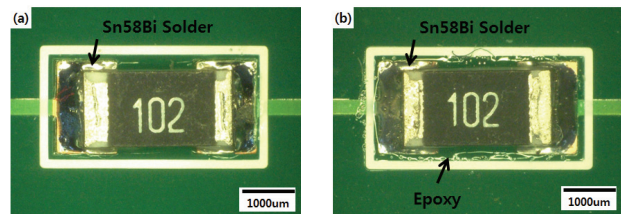


Fig. 2. Shape of specimens (a) pure Sn58Bi solder specimens and (b) epoxy solder specimens.

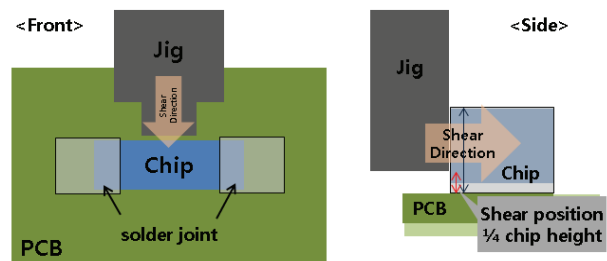


Fig. 3. Schematic diagram of shear test.

규격을 인용하여 150°C의 온도에서 14 day (336 h)를 방치하였으며, 고온에서 솔더 접합부에 형성되는 금속간화합물이 접합 특성 저하에 주는 영향을 분석하였다. 솔더 접합부의 접합 특성은 전단시험을 통해 전단력을 측정하여 시험 전후를 비교 분석하였다. 전단력 측정은 PTR-1000 (RHESCA사) 전단시험기를 사용하여 JIS Z 3198-7의 시험규격에 따라 실험 시편의 1/4 높이 이하(150 μm)에서 10 mm/s의 속도에서 수행되었다. 전단시험 모식도는 그림 3에 나타내었다. 전단력 측정 후 발생한 솔더 접합부의 파면 및 단면 관찰을 수행하여 기존의 솔더 접합부와 epoxy 솔더 접합부를 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 전자주사현미경(SEM)을 통해 실험 시편의 단면을 관찰한 형상이다. 그림 4(a), (c)는 epoxy가 없는 기존의 솔더를 사용한 접합부로 솔더 필렛만 형성된 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b), (d)는 epoxy 솔더를 사용한 솔더 접합부로 솔더 필렛 외곽 및 R3216 chip 하단부와 PCB 사이에 epoxy 필렛이 추가로 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 솔더 접합부 외곽에 경화된 epoxy가 솔더 접합부를 보호하며, 고온에서 조직학적 변화에 따른 솔더 특성 저하에도, 접합 특성을 보완 및 지지해주는 역할로 작용할 수 있다 [10-12].

고온 시효 시험 후 실험 시편을 전자주사현미경을

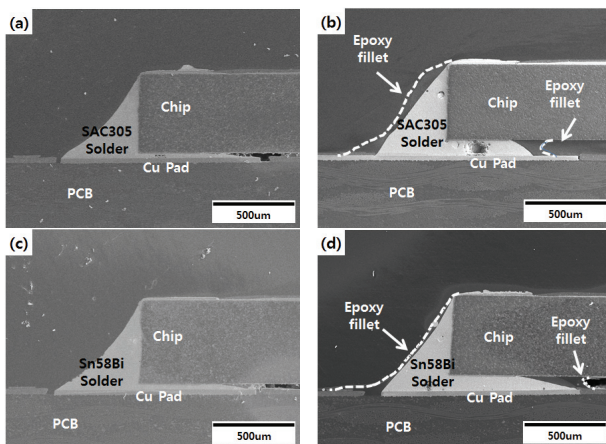


Fig. 4. Cross-section images of primary specimens (a) SAC305 solder joint, (b) epoxy SAC305 solder joint, (c) Sn58Bi solder joint, and (d) epoxy Sn58Bi solder joint.

통해 관찰한 결과 그림 5, 6과 같이 솔더와 Cu pad 사이에서 Cu_6Sn_5 의 금속간화합물이 형성된 것을 확인하였다. 고온시효시험 진행에 따라 Cu_6Sn_5 의 금속간화합물의 성장을 측정된 결과 그림 7과 같은 그래프로 나타낼 수 있다. 기존의 SAC305 솔더를 사용한 시편의 초기 금속간화합물층의 두께는 2.0 μm 로 측정되었으며, 고온시효시험 14 day 후 8.0 μm 로 성장하였다. Sn58Bi 솔더 접합부는 2.3 μm 에서 8.1 μm 로 성장하였

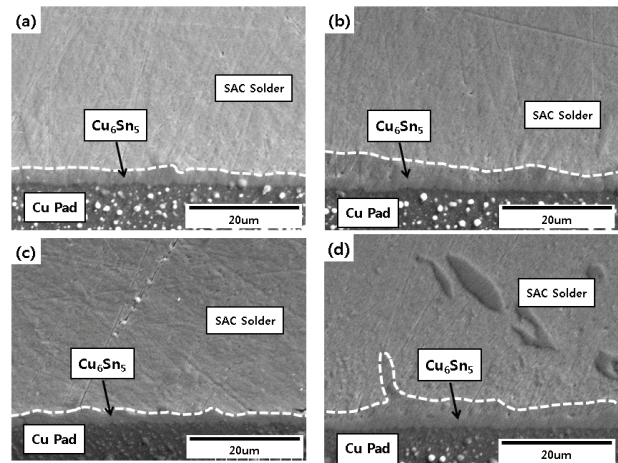


Fig. 5. Intermetallic compound (IMC) layer in SAC305 and SAC305 epoxy solder joint (a) before the test in plain solder joint, (b) after thermal aging test in plain solder joint, (c) before the test in epoxy solder joint, and (d) after thermal aging test in epoxy solder joint.

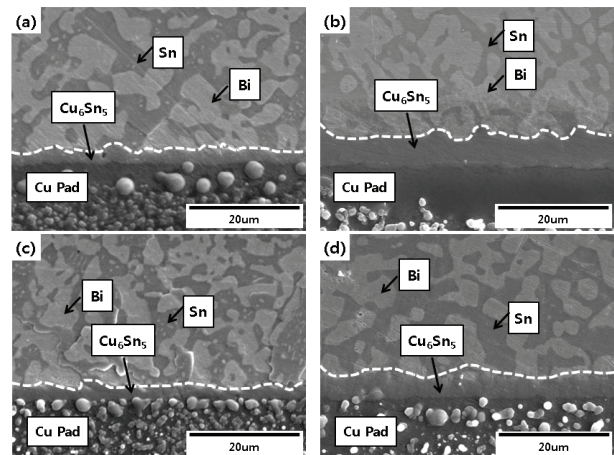


Fig. 6. Intermetallic compound (IMC) layer in Sn58Bi and Sn58Bi epoxy solder joint (a) before the test in plain solder joint, (b) after thermal aging test in plain solder joint, (c) before the test in epoxy solder joint, and (d) after thermal aging test in epoxy solder joint.

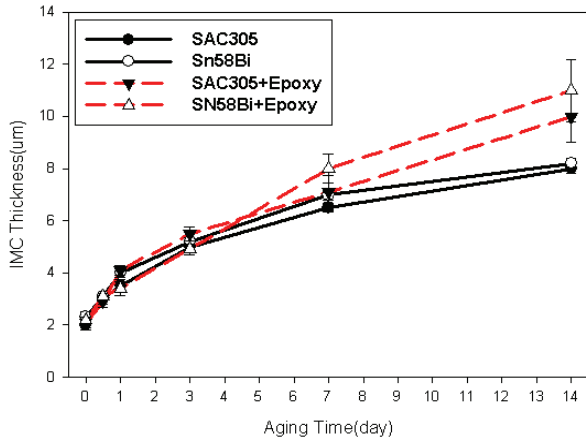


Fig. 7. Schematic diagram of shear test.

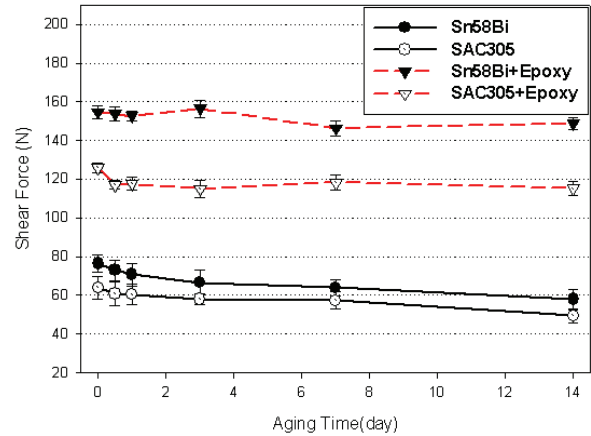


Fig. 8. Graph of shear force drop.

다. SAC305 epoxy 솔더 접합부의 금속간화합물층은 2.1 μm 에서 고온시효시험 후 10 μm 로 성장하였으며, Sn58Bi epoxy 솔더 접합부의 금속간화합물 두께는 2.2 μm 에서 고온시효시험 후 11 μm 으로 측정되었다. SAC305, Sn58Bi 솔더 접합부에서 측정된 금속간화합물의 두께 차이는 크지 않았으며, epoxy 솔더 접합부 또한 솔더 조성에 따라 금속간화합물의 두께 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

솔더 접합부에서 형성된 Cu_6Sn_5 금속간화합물이 솔더 접합 특성에 주는 영향을 분석하기 위해 솔더 접합부에 전단력을 가해 접합 특성을 측정하였으며, 측정값은 그림 8에 나타내었다. SAC305 솔더를 사용한 시편의 초기 전단력이 64.0 N이었으며, 고온시효시험 후 49.5 N로 초기 대비 22.65% 낮아졌다. Sn58Bi 솔더를 사용한 시편의 초기 전단력은 76.5 N으로 측정되었으며 고온시효시험이 진행됨에 따라 58.0 N으로 24.18% 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 솔더 내부에 성장하는 Cu_6Sn_5 금속간화합물은 취성을 갖기 때문에 외력이 작용할 경우 균열 및 파손의 원인이 된다 [13-15]. 따라서 기존의 SAC305, Sn58Bi 솔더를 사용한 솔더 접합부에서 금속간화합물의 성장으로 전단력이 크게 저하된 것을 확인할 수 있다.

SAC305 epoxy 솔더를 사용한 시편은 125.9 N에서 115.2 N으로 8.49%의 전단력 저하가 발생하였으며, Sn58Bi 솔더와 epoxy를 사용한 시편은 154.7 N에서 고온시효시험 후 148.8 N으로 3.81%의 전단력 저하가 발생하였다.

Epoxy를 첨가하여 접합 성능을 보강한 솔더 접합부의 초기 전단강도가 약 2배 정도 높은 것을 확인할 수

있었다. 이러한 이유는 솔더 필렛 외곽에 epoxy가 경화되면서 PCB와 강한 접착을 통해 외력에 대한 저항성을 확보한 것이며 [16,17], 경화된 epoxy가 솔더의 접합 특성을 매우 안정되게 하여 고온시효시험이 진행되어도, 전단력의 저하를 완화시켜 주는 것을 확인할 수 있다.

전단력의 저하를 분석하기 위해 전단시험 후 형성된 파면을 SEM을 통해 관찰하였으며 그 결과를 그림 9, 10에 나타내었다. 그림 9의 SAC305, SAC305 epoxy 솔더 접합부의 파면 형상을 보면, 고온시효시험 전 시편인 그림 9(a), (c)는 전단시험으로 발생한 파면이 Ni_3Sn_4 계면에서 발생한 것을 확인할 수 있다. 그러나 고온시효시험 14 day를 수행한 결과, 그림 9(b), (d)와 같이 전단시험에 따른 파면이 Cu_6Sn_5 계면에서 시작되어 Ni_3Sn_4 계면으로 진행된 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 그림 10의 Sn58Bi, Sn58Bi epoxy 솔더 실험 시편에서도 같게 나타나고 있다. 그림 10(a), (c)의 초기 시편의 전단력에 의한 파면에서 Ni_3Sn_4 계면이 확인되었고, 고온시효시험 후 그림 10(b), (d)와 같이 Cu_6Sn_5 계면에서 파면이 시작되어 Ni_3Sn_4 계면으로 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

고온 시효 시험 전 전단력에 의한 파면에서 Ni_3Sn_4 계면이 형성되었으며 솔더의 파면은 관찰되지 않았다. 이는 초기 상태 솔더 접합부에서 Ni_3Sn_4 계면이 전단력에 가장 취약한 것으로 전단력이 가해질 경우 계면에서 파면이 시작되어 솔더 접합부가 파손되는 것을 확인할 수 있다. Ni_3Sn_4 금속간화합물은 일반적으로 R3216 chip의 외부전극(outside termination)의 Ni-barrier와 솔더의 Sn이 접합 공정을 수행할 때 발생하는 고온

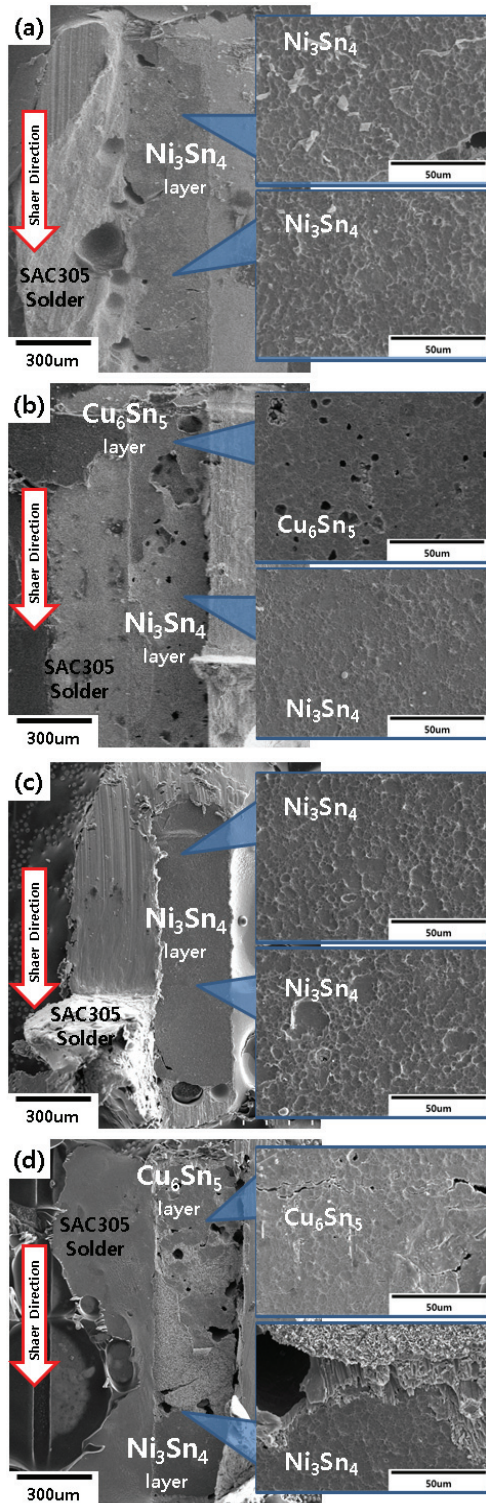


Fig. 9. Fracture surface of SAC305 and SAC305 epoxy solder joint (a) before the ageing test in plain solder joint, (b) after the ageing test in plain solder joint, (c) before the ageing test in epoxy solder joint, and (d) after the ageing test in epoxy solder joint.

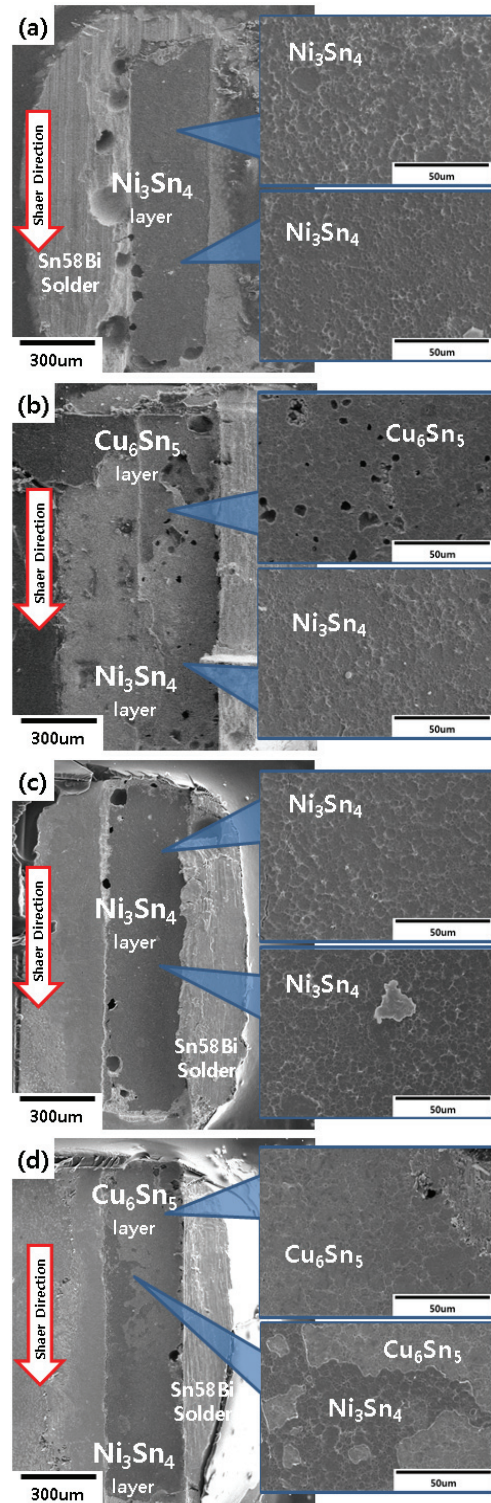


Fig. 10. Fracture surface of Sn58Bi and Sn58Bi epoxy solder joint (a) before the ageing test in plain solder joint, (b) after the ageing test in plain solder joint, (c) before the ageing test in epoxy solder joint, and (d) after the ageing test in epoxy solder joint.

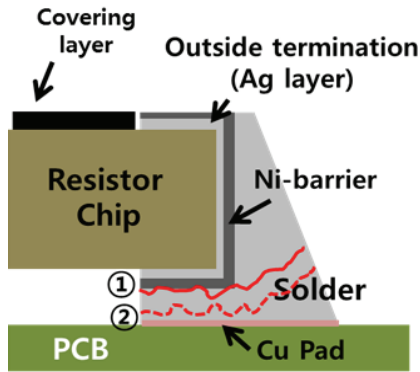


Fig. 11. Graph of shear force drop.

에 의해 서로 확산하여 형성된 것이다. 따라서 chip의 외부전극 주변에 형성하게 되며 본 실험에서 발생한 Ni_3Sn_4 파면은 그림 11의 ①과 같이 chip 하단부와 솔더가 접합한 부분에서 발생한 것으로 확인된다.

고온시효시험 후 전단시험에 의한 파면은 Cu_6Sn_5 계면이 먼저 형성되었으며, 고온시효시험 후 Cu, Sn의 확산에 의해 형성된 Cu_6Sn_5 금속간화합물층이 솔더 접합부에 가해지는 전단력에 가장 취약한 것을 확인할 수 있다. Cu_6Sn_5 계면은 앞서 그림 5, 6과 같이 Cu pad와 솔더 접합부 사이의 확산에 의해 형성되며, 그림 11의 ②와 같이 전단시험의 파면 시작점이 이동한 것을 확인할 수 있다.

따라서 솔더 조성 및 epoxy의 함유와 관계없이 솔더 내부에서는 고온에 의해 Cu pad의 Cu와 솔더 내부의 Sn이 확산되어 Cu_6Sn_5 금속간화합물을 형성하며 전단력에 대한 저항성이 낮아지며, 가장 취약한 부분이 되는 것을 확인할 수 있다. Epoxy를 이용하여 접합 특성을 보강한 솔더 접합부의 경우 Cu_6Sn_5 금속간화합물에 의해 접합 특성이 저하되지만 외부에 경화된 epoxy에 의해 솔더 접합부가 지지되며 전단력에 대한 저항성이 높아지는 결과를 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고온에 노출된 SAC305, Sn58Bi 솔더 접합부에서 발생하는 금속간화합물에 의한 접합 특성 저하를 보완하기 위해 epoxy가 함유된 솔더를 이용하여 실험 시편을 제작하였으며, 150°C의 고온시효 시험과 전단력 측정을 통해 접합 특성 저하를 비교 분석하였다.

- 1) Epoxy를 함유한 솔더를 사용하여 접합 공정을 수행한 결과, 솔더 접합부 외곽 및 chip과 Cu pad 사이에 epoxy 경화가 발생하여 솔더 필렛과 함께 epoxy 필렛이 추가적으로 형성되었다.
- 2) SAC305, Sn58Bi 솔더와 Cu pad 사이에서 Cu_6Sn_5 의 금속간화합물이 형성되었으며, SAC305 솔더 접합부의 초기 금속간화합물의 두께는 2.0 μm 이었고 고온시효시험 14 day (336 h) 후 8.0 μm 으로 성장하였으며, Sn58Bi 솔더 접합부는 2.3 μm 에서 8.1 μm 으로 성장하였다. 또한 SAC305 epoxy 솔더 접합부는 2.1 μm 에서 10 μm 으로, Sn58Bi epoxy 솔더 접합부는 2.2 μm 에서 11 μm 로 성장하였다.
- 3) SAC305 솔더 접합부의 초기 전단력이 64.0 N, 고온시효시험 후 49.5 N로 초기 대비 22.65% 낮아졌으며, Sn58Bi 솔더 접합부의 전단력은 76.5 N에서 58.0 N으로 24.18% 낮아졌다. SAC305 epoxy 솔더 접합부의 전단력은 125.9 N에서 115.2 N으로 8.49%의 저하가, Sn58Bi epoxy 솔더 접합부는 154.7 N에서 148.8 N으로 3.81%의 전단력 저하가 발생하였다.
- 4) 전단시험에 의해 형성된 파면은 솔더 조성 및 epoxy의 함유에 상관없이, 고온시효시험 전 Ni_3Sn_4 계면에서 형성되었으나, 고온시효시험 후 Cu_6Sn_5 계면에서 파면이 형성되었다.
- 5) 기존의 SAC305, Sn58Bi 솔더 접합부는 고온에서 Sn-Cu 확산에 의해 Cu_6Sn_5 금속간화합물이 성장하며 접합 특성이 저하되지만, epoxy를 함유한 솔더 접합부는 외곽에 epoxy 필렛을 형성하며 솔더 접합부의 접합 특성을 보완하였다.

향후, epoxy를 적용한 무연솔더 접합부에 대한 다양한 환경에서의 복합적 신뢰성 평가에 관한 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

ORCID

Young-Eui Shin

<https://orcid.org/0000-0003-0558-0449>

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1D1A1B03034423).

REFERENCES

- [1] S. W. Jung, M. S. Kang, Y. J. Jeon, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 152 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.3.152>]
- [2] Y. J. Jeon, S. I. Son, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 611 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.8.611>]
- [3] A. S. Shin, D. Y. Ok, G. H. Jeong, M. J. Kim, C. S. Park, J. H. Kong, and C. H. Heo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 481 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.6.481>]
- [4] E. G. Chang, N. H. Kim, N. K. Kim, and J. C. Eom, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **17**, 267 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2004.17.3.267>]
- [5] M. N. Ervina Efzan and I. Siti Norfarhani, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **16**, 112 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2015.16.3.112>]
- [6] P. L. Tu, Y. C. Chan, and J.K.L. Lai, *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol., Part B*, **20**, 87 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1109/96.554534>]
- [7] X. Ma, Y. Qian, and F. Yoshida, *J. Alloys Compd.*, **334**, 224 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01747-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01747-9)]
- [8] M. S. Kang, Y. J. Jeon, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **17**, 445 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0055-3>]
- [9] M. S. Kang, Y. J. Jeon, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **16**, 2483 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0319-3>]
- [10] K. Y. Kim, H. Jeong, W. R. Myung, and S. B. Jung, *J. Weld. Joining*, **36**, 14 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.2.3>]
- [11] B. S. Yim, Y. Kwon, S. H. Oh, J. Kim, Y. E. Shin, S. H. Lee, and J. M. Kim, *Microelectron. Reliab.*, **52**, 1165 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.12.004>]
- [12] Y. G. Sung, W. R. Myung, H. Jeong, M. K. Ko, J. Moon, and S. B. Jung, *J. Electron. Mater.*, **47**, 4165 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6224-7>]
- [13] X. Deng, R. S. Sidhu, P. Johnson, and N. Chawla, *Metall. Mater. Trans. A*, **36**, 55 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0138-8>]
- [14] I. E. Anderson and J. L. Harringa, *J. Electron. Mater.*, **33**, 1485 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-004-0090-1>]
- [15] M. Yang, M. Li, L. Wang, Y. Fu, J. Kim, and L. Weng, *J. Electron. Mater.*, **40**, 176 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1430-y>]
- [16] A. Sharma, Y. J. Jang, J. B. Kim, and J. P. Jung, *J. Alloys Compd.*, **704**, 795 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.036>]
- [17] I. Cho, J. H. Ahn, J. W. Yoon, Y. E. Shin, and S. B. Jung, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **23**, 1515 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-012-0621-0>]