

자동차 전장을 위한 플렉시블 기판 무연 솔더 접합부 특성

안성도¹ · 최경곤² · 박대영^{1,2} · 정규원^{1,3} · 백승주^{1,4} · 고용호^{1,†}

¹한국생산기술연구원 용접접합그룹/마이크로조이닝센터

²인하대학교 신소재공학과, ³성균관대학교 신소재공학과, ⁴인천대학교 신소재공학과

Properties of Lead-free Solder Joints on Flexible Substrate for Automotive Electronics

Sungdo Ahn¹, Kyeonggon Choi², Dae Young Park^{1,2}, Gyu-Won Jeong^{1,3}, Seungju Baek^{1,4}, and Yong-Ho Ko^{1,†}

¹Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, 156, Gaetbeol-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21999, Korea

²Department of Material Science and Engineering, Inha University, 40, Soseong-ro, Michuhol-gu, Incheon 22201, Korea

³School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Korea

⁴Dept. of Materials Science and Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

(Received June 13, 2018: Corrected June 18, 2018: Accepted June 25, 2018)

초 록: Sn-Pb 솔더는 그동안 자동차 전장품에서 많이 사용되어 왔다. 그러나 최근에 환경과 인체에 대한 유해성 때문에 end-of-life vehicle (ELV)과 같은 국제 환경 규제로 인하여 Pb의 사용이 금지되었다. 이러한 이유로 자동차 전장품을 위한 Pb-free 솔더링에 관한 많은 연구들이 보고 되어 왔다. 한편, 자동차의 연료 효율성과 공간 활용을 위하여 유연성과 경량의 특성을 가지는 플렉시블 기판이 자동차 전장품에 사용되고 있다. 자동차 전장품에 대한 Pb-free 솔더 접합부 특성에 관한 연구들이 많이 진행되었음에도 불구하고 자동차의 사용 환경을 고려한 플렉시블 기판 솔더 접합부에 대한 신뢰성 특성에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 organic solderability preservative (OSP) 및 electroless nickel immersion gold (ENIG) 표면처리 된 플렉시블 기판 위 Sn3.0Ag0.5Cu, Sn0.7Cu, Sn0.5Cu0.01Al(Si) 세 가지 Pb-free 솔더 접합부에 대한 특성을 보고 하였다. 솔더 조성과 기판 표면처리에 따른 접합부의 특성 및 신뢰성을 비교 평가 하기 위하여 인장 강도 시험, 열 충격 시험과 반복 굽힘 시험을 진행 하고 그 결과를 분석하였다. OSP 표면처리 된 기판 접합부에 대한 반복 굽힘 시험 결과 세 종류의 솔더 접합부 모두 파괴는 솔더 내부에서 일어 났으며 Sn3.0Ag0.5Cu 솔더의 접합부에서 반복 굽힘 수명이 가장 길게 나타났다.

Abstract: Sn-Pb solder has been used in automotive electronics for decades. However, recently, due to the environmental and health concerns, some international environmental organizations such as the end-of-life vehicle (ELV) enacted legislation banning of the Pb usage in automotive electronics. For this reason, many studies to develop and promote Pb-free soldering have been significantly reported. Meanwhile, because of flexibility and lightweight, flexible printed circuit boards (FPCBs) have been increasingly used in automotive electronics for lightweight to improve fuel efficiency and space utilization. Although the properties of lead-free solders for automotive electronics have been widely studied, there is a lack of research on the reliability performance of the lead-free solder joint on FPCB under user conditions. This study reported the properties of solder joints between Pb-free solders such as Sn3.0Ag0.5Cu, Sn0.7Cu and Sn0.5Cu0.01Al (Si), and various FPCBs finished with organic solderability preservative (OSP) and electroless nickel immersion gold (ENIG). To evaluate on joint properties and reliabilities with different solder compositions and surface-finishing materials, pull strength test, thermal shock test, and bending cycle test were performed and analyzed. After the bending cycle test of solder joint on OSP-finishing, the fractures were occurred in solder and the lifetime of Sn3.0Ag0.5Cu solder joint was the longest.

Keywords: Pb-free solder, flexible printed circuit board, OSP, ENIG, thermal shock test, bending cycle test

[†]Corresponding author

E-mail: yonghoko@kitech.re.kr

© 2018, 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.

1. 서 론

최근 자동차의 개발 동향이 전기자동차, 자율주행자동차와 같이 기존의 기계장치에서 전자 시스템으로 변화함에 따라 자동차를 구성하고 있는 전자제품의 사용과 개발 요구가 증대되고 있다. 따라서 우리나라를 비롯하여 전세계적으로 자동차 전자제품 관련 전자패키징 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁾ 그동안 기존 자동차 전자제품의 경우 주로 Sn37Pb 솔더가 일반적으로 이용되었다. 전자산업의 경우에는 2000년대 초반부터 restriction of hazardous substances (RoHS), waste electrical and electronic equipment (WEEE) 등과 같은 국제 환경규제로 인하여 Pb의 사용이 금지되어 Pb-free 솔더로의 대체하고자 하는 움직임이 활발하게 진행되어 왔다.^{2,3)} 한편 자동차 전자제품 산업의 경우에는 최근에 end-of-life vehicle (ELV)이라는 국제 환경규제가 2016년 1월 1일부터 본격 시행되면서 됨에 따라 자동차 전자제품에도 이제는 Pb의 사용이 엄격 제한되고 있다. 이에 따라 자동차 전자제품에도 Pb-free 솔더 소재가 요구되고 있으며 이를 위하여 자동차 전자제품 대상 Pb-free소재와 신뢰성에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.⁴⁾ 현재까지 자동차 전자제품에서 SnAgCu 계 무연 솔더가 일반 전자 산업과 마찬가지로 광범위하게 사용되고 있으나, 자동차 전자제품의 사용환경은 일반 가전 등의 전자제품과 달리 높은 온도에 노출되며 온도 환경 외에 진동, 습도 등과 같은 다양한 환경 조건들이 복합된 환경에 노출되어 있기 때문에 이러한 복합 환경에 적용이 가능한 무연 솔더의 개발 및 특성 연구가 꼭 필요하다.^{4,6)} 전자제품 업계에서는 그 동안의 노력으로 무연 솔더화가 성공적으로 진행되어 왔지만 현재 자동차용 전자제품의 무연화 연구는 솔더의 용점, 기초 물질 등에 머물러 있어 전자보드에 적용하기에는 부족한 실정이다.

한편 기존 전자 패키징 산업에서는 주로 경성 기판을 이용하였으나, 현재는 휘어지고, 가볍고, 탈 부착이 가능한 플렉시블 기판을 이용한 패키징 기술에 대한 많은 관심이 집중되고 개발이 이루어져 왔다.⁷⁾ 자동차 전자제품의 경우에도 경성 기판이 일반적으로 사용되어 왔으나 자동차의 경량화, 공간 활용 등의 이유로 최근에 플렉시블 기판을 적용한 자동차 전자제품 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 자동차 전자제품에 적용하기 위한 플렉시블 기판 기반의 Pb-free 솔더 접합부에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 플렉시블 기판에 자동차 전자제품에서 많이 사용되고 있는 리드 타입 패키지를 실장 한 후 접합부의 특성을 연구하였다. 접합부 특성 연구를 위한 솔더는 일반적으로 많이 사용되고 있는 Sn3.0Ag0.5Cu 솔더 외에 상대적으로 높은 용점을 가지는 Sn0.7Cu, Sn0.5Cu0.01Al(Si) 솔더를 이용하였다. 또한 접합부의 특성 비교를 위하여 플렉시블 기판의 표면처리 경우에는 organic solderability preservative (OSP)와 electroless nickel immersion gold (ENIG)

두 종류의 표면처리를 이용하였다. 세 종류의 솔더와 두 종류의 표면처리간의 접합부의 특성을 비교하고자 열충격 시험 및 반복 굽힘 시험을 진행하였으며 열충격 시험 전후 접합부의 intermetallic compound (IMC) 변화와 접합 강도의 변화를 살펴보았다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 플렉시블 기판은 polyimide (PI)를 기반으로 양쪽 면에 Cu 층이 있는 구조로 표면처리는 OSP와 ENIG 두 종류로 제작 되었다. 기판의 사이즈는 26 × 26 mm 이며 PI의 두께와 Cu 패턴의 두께는 각각 25 μm와 12 μm로 제작 되었다. 한편 시험에 사용된 패키지는 현재 자동차 전자제품에 가장 일반적으로 많이 사용되고 있는 리드 타입의 패키지를 이용하였다. 패키지의 리드는 Sn 표면처리 된 Cu 16개로 구성되어 있고 내부에 데이지 체인이 구성되어 플렉시블 기판과 접합 후 신뢰성 평가 전후 접합부의 파단 유무를 확인이 가능하도록 하였다.

플렉시블 기판과 패키지의 접합을 위하여 사용된 솔더 소재는 페이스트 타입으로 솔더페이스트의 도포, 패키지의 실장, 리플로우 공정 세 단계로 진행하여 접합하였다. 리플로우 공정은 Sn3.0Ag0.5Cu (SAC305) 솔더의 경우 최고 온도 245°C에서 용융 구간 지속 시간 50초, Sn0.7Cu의 경우 최고온도 255°C에서 용융 구간 지속 시간 50초, Sn0.5Cu0.01Al(Si)의 경우 260°C에서 용융 구간 지속 시간 50초로 진행하였다.

열 충격시험은 온도 변화에 따른 접합부의 내구성을 평가하는 시험으로 본 연구에서는 플렉시블 기판 위 접합부의 열 충격 평가를 위해서 온도 조건 -40~125°C 온도 조건에서 유지시간 15분씩 1,000 cycle까지 진행하였다. 한편 열 충격 시험 전후 Dage4000 장비를 이용하여 솔더 접합부의 기계적 접합 강도를 평가 비교 하였다. 접합 강도는 플렉시블 기판을 고정시킨 후 패키지의 리드를 당기어 인장 환경에 대한 접합 강도를 평가 하였다. 인장 속도는 200 μm/s이었으며 인장 각도는 45°에서 진행하여 솔더 조성에 따른 열 충격 시험 전 후 접합 강도의 저하율을 비교 평가 하였다. 또한 열 충격 시험 전후 접합부의 IMC의 변화를 scanning electron microscopy (SEM)를 이용하여 관찰하여 비교 하였다.

한편 자동차 전자제품의 경우 자동차 주행 중 발생하는 진동으로 인한 굽힘 현상이 발생할 수 있고 플렉시블 기반 전자제품의 경우에는 곡면에 장착되는 경우가 많아 굽힘에 의한 접합부에서 불량 발생이 유발 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 접합부에 대한 굽힘 피로 신뢰성을 x-축 굽힘 시험 방법을 이용하여 반복 굽힘 시험을 진행하였다. 경성 기판 기반의 솔더 접합부의 굽힘 시험에 대하여 IPC, JEDEC 등에서 3점 혹은 4점 시험 방법 등이 제안된 바 있으나 플렉시블 기판 기반의 솔더 접합부에

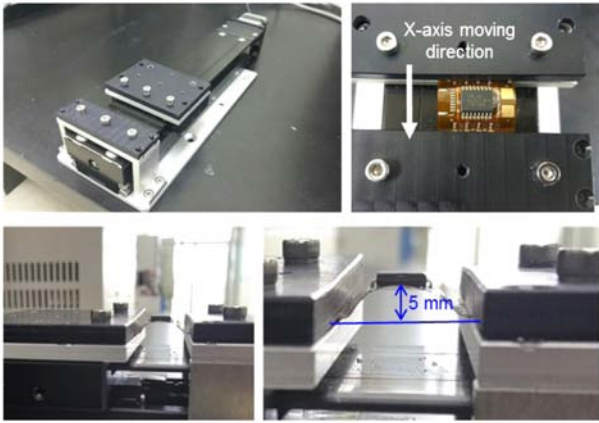


Fig. 1. 반복굽힘 시험 장비와 시험 모습

대한 굽힘 시험에 대해서는 아직까지 범용적인 표준화 시험법의 제정은 미흡한 상황이다. 한편 플렉시블 기판 기반의 굽힘 신뢰성을 평가를 위하여 3점 굽힘 시험을 응용한 연구가 보고 된바 있다.⁸⁾ 보고 된 이 연구에서는 패키지가 실장 된 플렉시블 기판 양쪽을 고정 시키고 패키지가 실장 된 기판의 중앙을 팁을 이용하여 굽힘 변위를 일으켜 굽힘 신뢰성을 평가 하였다. 본 연구에서는 기존 연구와 유사하게 플렉시블 기판 양쪽을 고정시키고 고정된 한쪽을 이동시켜 플렉시블 기판 중앙에 굽힘이 유도 되도록 하여 실험을 진행 하였다. 반복 굽힘 시험 조건은 굽힘 변위 5 mm가 되도록 진행하였으며 시험 전후 저항 측정기로 검사 진행하여 저항 값이 3 Ω 이상 일 때 파단이 난 것으로 판단 하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 반복 굽힘 시험 장비와 시험 모습을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

솔더 조성과 표면처리에 따른 열 충격 시험 전후 단면 분석 결과를 Fig. 2-7에 나타내었다. OSP 표면처리에서는 리플로우 후 초기에는 패키지(top) 및 플렉시블 기판 계

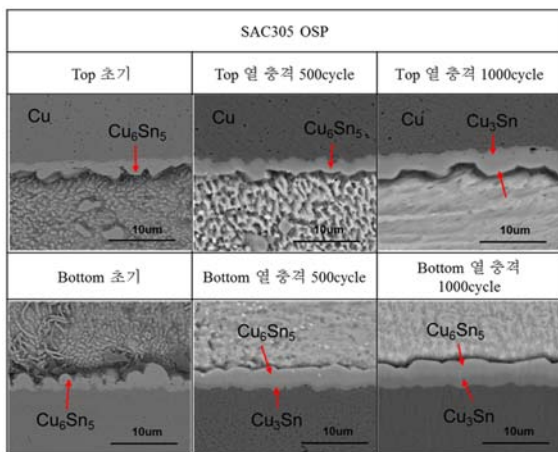


Fig. 2. SAC305/OSP 접합부

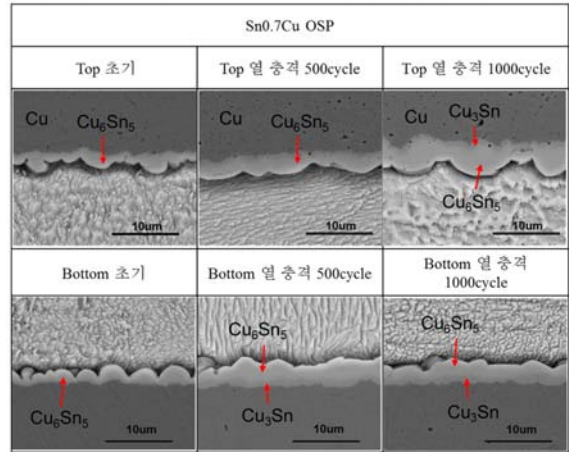


Fig. 3. Sn0.7Cu/OSP접합부

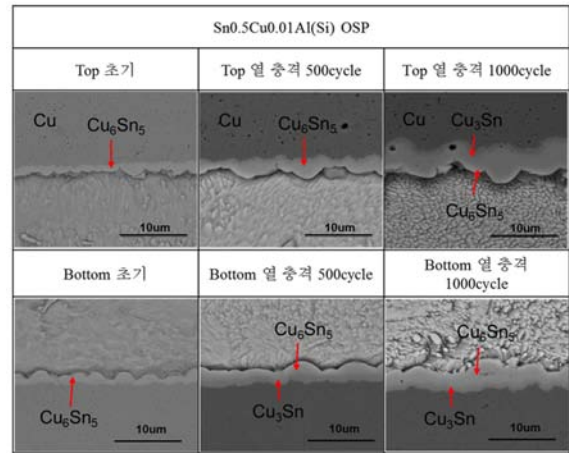


Fig. 4. Sn0.5Cu0.01Al(Si)/OSP 접합부

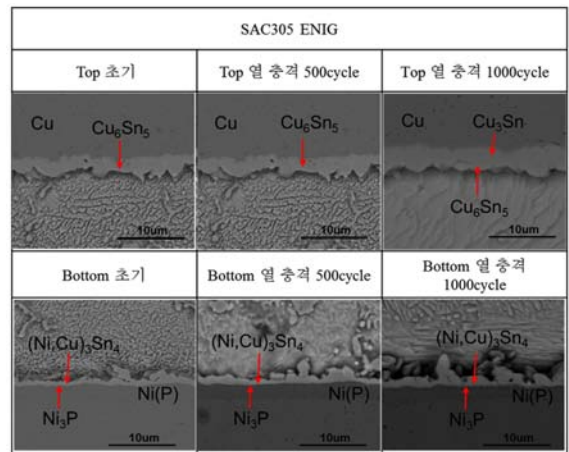


Fig. 5. SAC305/ENIG 접합부

면(bottom) 모두에서 Cu_6Sn_5 IMC가 생성되었다. 한편 열 충격 500 cycle 후에 플렉시블 기판 계면에서 Cu_6Sn_5 위에 Cu_3Sn IMC가 생성되었으나 패키지 계면에서는 1,000 cycle 후에 Cu_3Sn IMC가 형성된 것을 확인 할 수 있었다. 반면 패키지 계면에서는 ENIG 표면처리 된 접합부의 경

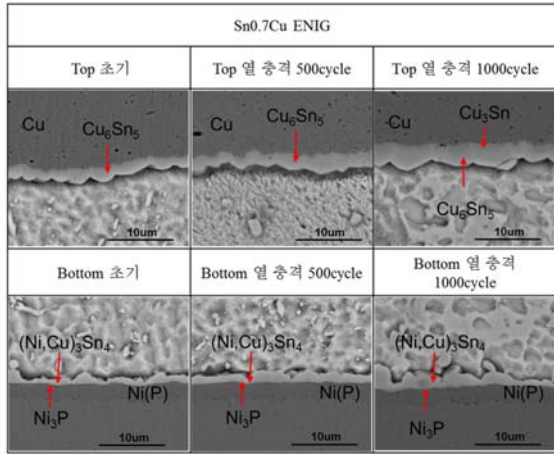


Fig. 6. Sn0.7Cu/ENIG 접합부

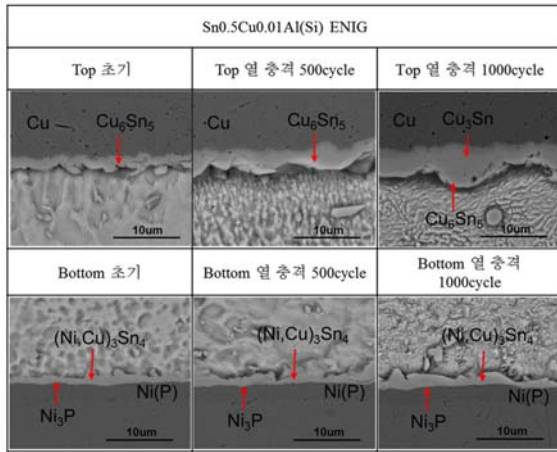


Fig. 7. Sn0.5Cu0.01Al(Si)/ENIG 접합부

우에 OSP 표면처리와 동일하게 리플로우 후 초기 및 열 충격 시험 500 cycle까지는 Cu_6Sn_5 IMC가 생성되었으며 1,000 cycle 이후 Cu_3Sn IMC가 형성된 것을 확인 할 수 있었다. 반면 플렉시블 기판 계면의 경우에는 리플로우 직후 초기부터 열 충격 1000 cycle까지 조성에 상관 없이 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 가 형성됨을 확인 할 수 있었다. ENIG와 SnAgCu계의 계면 반응 관련하여 Cu의 함량 등에 따라 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 혹은 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 가 우선하여 형성되거나 두 층으로 같이 존재하는 경우들이 보고 된 바 있으나⁹⁻¹¹⁾ 본 연구에서는 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 만 관찰 되었다.

한편 Fig. 8과 9는 OSP 및 ENIG 기판 표면처리에 따른 각 솔더 접합부에 대한 열 충격 시험 전후 IMC 두께 변화를 나타내었다. OSP 표면처리 기판 계면의 경우 리플로우 직후 초기에는 Sn3.0Ag0.5Cu 솔더 접합부에서 패키지 및 기판 계면에서 모두 가장 IMC 두께가 나타났으나 열 충격 시험 후에는 기판 계면의 경우 Sn0.7Cu의 IMC 두께가 가장 크게 나타났으며 패키지 계면에서는 Sn0.5Cu0.01Al(Si) 접합부의 IMC 두께가 가장 큰 것으로 나타났다. 열 충격 시험 동안 IMC 두께의 증가의 관점에서 패키지 계면에서

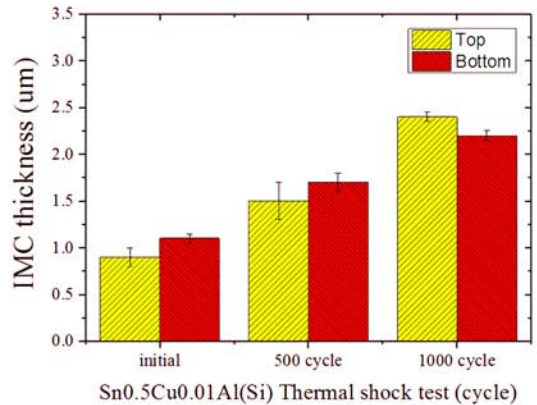
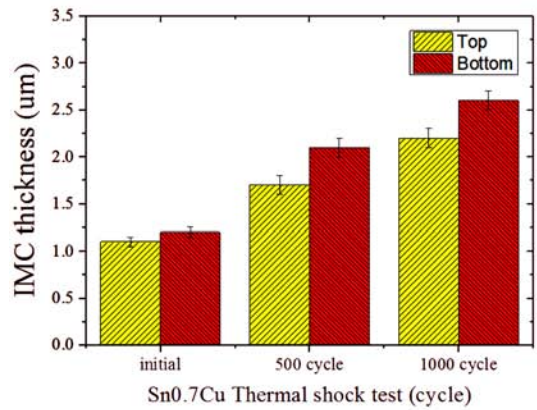
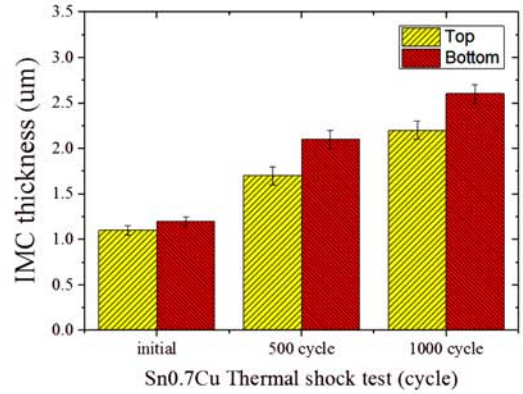


Fig. 8. OSP 접합부의 IMC 두께

는 Sn0.5Cu0.01Al(Si) 솔더 접합부, 기판 계면에서는 Sn0.7Cu 솔더 접합부가 초기 두께 대비 더 많은 양이 증가하는 것으로 확인 되었다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. ENIG 표면처리에서는 패키지 및 기판 계면 모두 에서 세 솔더 조성의 IMC의 성장이 OSP 처리에 비해 억제된 것을 확인 할 수 있었으며 Sn0.5Cu0.01Al(Si) 솔더의 경우 다른 두 솔더에 비하여 상대적으로 IMC 두께 증가가 억제 된 것으로 확인 되었다.

Fig. 10은 OSP 표면처리 된 기판 접합부에 대한 리플로우 직후 반복 굽힘 시험 결과에 대한 와이블 분포를 나타낸다. 반복 굽힘 시험 결과 63.2%의 수명은 Sn3.0Ag0.5Cu의 경우 882 cycle로 가장 수명이 길게 나타났으며 Sn0.7Cu 조성이 734 cycle로 반복 굽힘 수명이 가장 낮게 나타내었다. Fig. 11에 반복 굽힘 시험 후 파단부의 단면을 나타내

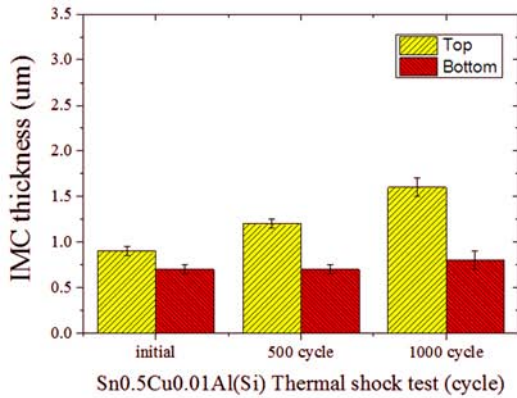
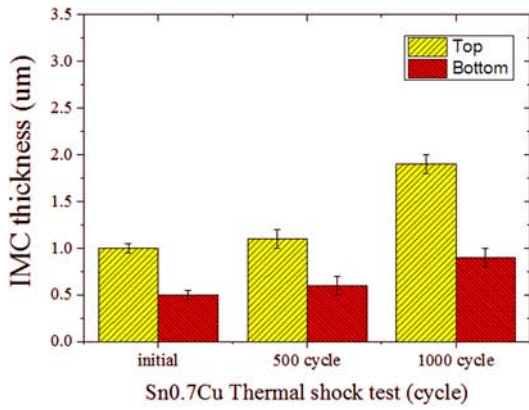
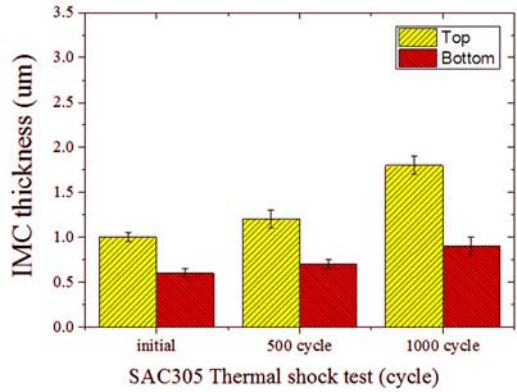


Fig. 9. ENIG 접합부의 IMC 두께

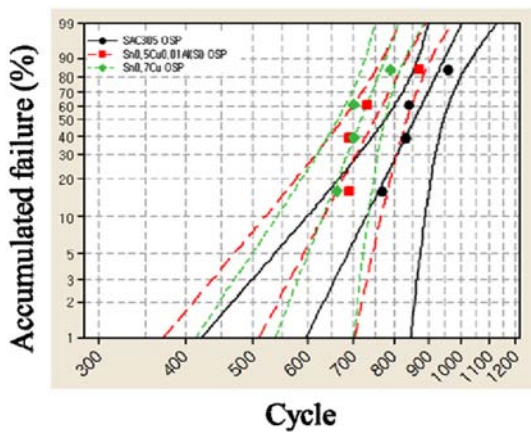


Fig. 10. 반복 시험 와이블 분포

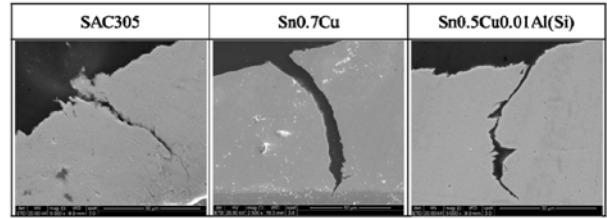


Fig. 11. 반복 시험 후 파단 단면

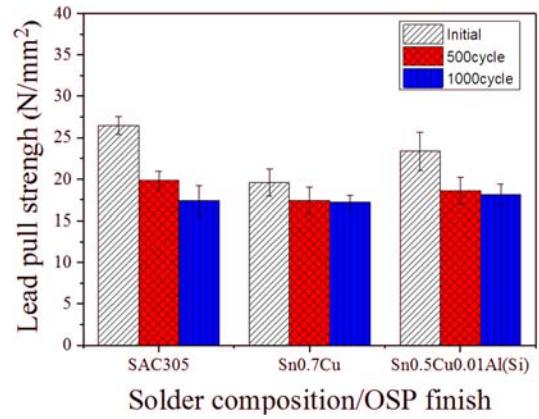


Fig. 12. 리플로우 직후 및 열 충격 시험 후 인장 접합 강도

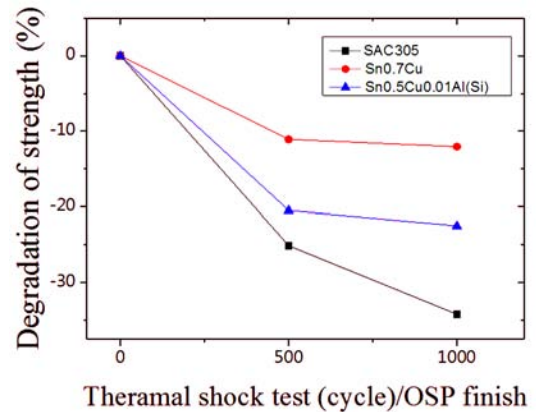


Fig. 13. 열 충격 시험 후 인장 접합 강도 저하

었다. 세 솔더 조성 모두 반복 굽힘 후 파단은 솔더 내부를 통하여 진행됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 반복 굽힘의 수명은 솔더 조성 별 솔더 강도 등의 특성에 기인할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

세 조성의 솔더와 OSP 표면처리 기판 접합부에 대한 열 충격 시험 전 후 인장 접합 강도 시험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그리고 Fig. 13에 초기 대비 접합 강도 저하율을 나타내었다. 초기 접합 강도의 경우 Sn3.0Ag0.5Cu가 가장 높게 나타났는데 이는 반복 굽힘 시험의 파단 단면을 고려할 때 높은 수명을 나타내게 한 것으로 추측된다. 그리고 Sn0.7Cu 강도가 가장 낮게 나타났는데 이는 반복 굽힘 수명이 가장 낮게 나타나게 한 원인으로 추측된다. 한편 열 충격 시험 후 저하율은 Sn3.0Ag0.5Cu가 가

장 높게 나타난 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 경량화된 자동차 전장품에 적용하기 위하여 Pb-free 솔더 소재와 플렉시블 기판과의 접합부에 대한 접합부 특성에 대한 연구 결과를 다루었다. Pb-free 솔더의 조성 및 기판 표면 조건에 따라 접합 계면, 열충격 및 반복 굽힘 등의 신뢰성 평가 등을 통하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

세 솔더의 조성은 IMC 조성에 영향을 미치지 않았으나 IMC 두께 성장에는 영향을 미치는 것으로 생각 된다. 초기 IMC 두께는 Sn3.0Ag0.5Cu가 두꺼웠으나 열 충격 시험 후 두께의 증가는 기판의 표면처리와 패키지 및 기판의 계면에 따라 Sn0.7Cu 혹은 Sn0.5Cu0.01Al(Si) 솔더가 더 크게 나타났었다.

OSP 표면처리되어 있는 플렉시블 기판 접합부에 대한 반복 굽힘 시험 결과 Sn3.0Ag0.5Cu 솔더 접합부가 가장 높은 수명 값을 나타내었으며 Sn0.7Cu 솔더 접합부가 가장 낮은 수명 값을 나타내었다. 솔더 조성에 상관 없이 반복 굽힘 시험의 파단은 솔더 내부에서 나타났으며 이는 솔더 특성에 기인한 것으로 생각된다.

인장 접합 강도의 경우 Sn3.0Ag0.5Cu 솔더 접합부가 가장 높은 값을 나타냈으며 이는 반복 굽힘 시험에 영향을 미친 것으로 생각 된다.

한편 열 충격 시험 후 인장 접합 시험 결과 강도 저하율은 Sn3.0Ag0.5Cu가 가장 높게 나타난 바 열 충격 시험 후 반복 굽힘 시험을 통한 접합부의 신뢰성의 비교 평가가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다..

References

1. W. S. Hong, C. Oh, M.-S. Kim, Y. W. Lee, H. J. Kim, S. J. Hong, and J. T. Moon, "Al and Si Alloying Effect on Solder Joint Reliability in Sn-0.5Cu for Automotive Electronics", *J. Electron. Mater.*, 45(12), 6150 (2016).
2. S. K. Kang, and A. K. Sarkhel, "Lead (Pb)-free Solders for Electronic Packaging", *J. Electron. Mater.*, 23(8), 701 (1994).
3. A. A. El-Daly, and A. E. Hammad, "Enhancement of Creep Resistance and Thermal Behavior of Eutectic Sn-Cu Lead-free Solder Alloy by Ag and In-additions", *Mater. Des.*, 40, 292 (2012).
4. Y. H. Ko, S. Yoo, and C. W. Lee, "Evaluation on Reliability of High Temperature Lead-free Solder for Automotive Electronics"(in Korean), *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(4), 35 (2010).
5. S. Jin, N. Kang, K. M. Cho, C. W. Lee, and W. Hong, "Behavior of Vibration Fracture for Sn-Ag-Cu-X Solders by Soldering", *J. Weld. Join.*, 30(2), 65 (2012).
6. R. W. Johnson, J. L. Evans, P. Jacobsen, J. R. Thompson, and M. Christopher, "The Changing Automotive Environment:High-Temperature Electronics", *IEEE Trans. Electron. Pack. Manu.*, 27(3), 164 (2004).
7. M. S. Kim, Y. H. Ko, J. H. Bnag, and C. W. Lee, "The Chip Bonding Technology on Flexible Substrate by Using Micro Lead-free Solder Bump"(in Korean), *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(3), 15 (2012).
8. J. Kim, C. Park, K. M. Cho, W. Hong, J. H. Bang, Y. H. Ko, and N. Kang, "Oxidation and Repeated-Bending Properties of Sn-Based Solder Joints After Highly Accelerated Stress Testing (HAST)", *Electron. Mater. Lett.*, 1 (2018).
9. 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(6), 584 (2002).
10. R. Darveaux, C. Reichman, and N. Islam, "Interface failure in lead free solder joints", *Proc. 56th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, 906 (2006).
11. L. Chen, Y. Feng, X. Liu, and M. Huang, "Effects of temperature and current density on (Au, Pd, Ni) Sn₄ redistribution and Ni-P consumption in Ni/Sn3.0Ag0.5Cu/ENEPIG flip chip solder joints", *Proc. 14th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Dalian, 1064 (2013).

1. W. S. Hong, C. Oh, M.-S. Kim, Y. W. Lee, H. J. Kim, S. J.