다중 리플로우에 따른 Sn-Cu-(X)Al-(Y)Si/Cu 접합부 특성 연구

유동열^{*,**} · 손준혁^{*,**} · 고용호^{*} · 이창우^{*} · 변동진^{**} · 방정환^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 마이크로조이닝센터

^{**}고려대학교 신소재공학과

A Study on Joint Properties of Sn-Cu-(X)Al-(Y)Si/Cu Solder by Multiple Reflow

Dong-Yurl Yu^{*,**}, Jun-Hyuk Son^{*,**}, Yong-Ho Ko^{*}, Chang-Woo Lee^{*}, Dongjin Byun^{**}
and Junghwan Bang^{*,†}

^{*}Micro-Joining Center in Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 406-130, Korea

^{**}Department of Material Science and Engineering in Korea University, Seoul, 136-713, Korea

[†]Corresponding author : nova75@kitech.re.kr

(Received April 5, 2020 ; Revised April 9, 2020 ; Accepted April 20, 2020)

Abstract

Joint properties of Sn-Cu-(X)Al-(Y)Si lead-free solder alloy were investigated for automotive electronics module. In this study, Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03)Al-0.005Si(wt.%) alloys were then fabricated in the form of solder balls for reflow samples. To evaluation of solder joint properties, solder ball was attached to PCB finished with OSP Cu pad. The reflow process was performed for 40 s above 260.5 °C. And solder joint was evaluated by repeating the reflow process up to 10 times. The melting temperatures of Sn-0.7Cu, 0.01 Al-0.005Si and 0.03Al-0.005Si were 227.5, 230.2 and 231.4 °C, respectively. Initial microstructures are composed of β-Sn regions surrounded by eutectic networks with spherical Cu₆Sn₅ IMC particles. However, with the increasing Al content, refined eutectic β-Sn + Cu-Sn IMC networks were observed. The shear strength of Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si solder joints was higher than Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si and Sn-0.7Cu solder after 10 reflow test.

Key Words : Multiple reflow, Aluminum, Intermetallic compound (IMC), Microstructure, Shear strength test

1. 서 론

End of Life Vehicle (ELV)와 Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE)와 같은 국제적 환경 규제에 의해 그 동안 사용되어 왔던 Pb-bearing 솔더의 사용이 제한되고 있다¹⁾. 상대적으로 사용 환경이 가혹하지 않은 전자제품에서는 Sn-Ag-Cu 솔더를 사용하여 Pb-bearing 솔더를 대체하고 있다. 하지만 구동온도가 최대 150 °C까지 상승하고, 주행 시 3G, 최대 20G의 진동을 수반하는 자동차 엔진 룸이나 트랜스미션에서는 보다 고 신뢰성을 요하는 접합소재의 개발을 요구하고 있다²⁾. 따라서, 고온 신뢰성 및 고진동 특성을 동시에 개

선함으로써 자동차 전장 솔더 접합부에 적용할 수 있는 합금 개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 현재 자동차에 적용할 수 있는 솔더 후보 군으로 Sn-Ag-Cu, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Sb, Sn-Au 솔더가 고려되고 있³⁾. 하지만 Sn-Ag-Cu, Sn-Ag 솔더는 열 충격과 진동 수명에 영향을 미치는 Ag₃Sn IMC로 인해 신뢰성이 저하되는 문제점을 가지고 있다⁴⁾. 또한 Sn-Zn 솔더는 산화 문제로 인해 보이드와 젖음성이 저하되어 사용이 제한되고 있다^{5,6)}. Sn-Sb 솔더는 상대적으로 높은 용점을 가지고 있어 고온 영역에서 사용에 장점이 있으나, Sb의 유해성 검증으로 지속적 사용이 불투명하며, Sn-Au는 Au의 원자재 가격으로 인해 사용이 제한되고 있다⁷⁾. Sn-Cu 솔더는 가격이 싸고 높은 용점과 적당한 기계적 강도를 가

지고 있지만, 젖음 불량과 접합부의 열 신뢰성이 저하되는 단점으로 적용이 어렵다. 한편 Hybrid electric vehicle (HEV), Electric vehicle (EV) 등의 차세대 스마트 자동차 등의 수요가 증가하고 있어 이와 더불어 전장 모듈의 사용 증가는 필연적으로 예상되며, 이를 구현하기 위한 고 신뢰성 접합소재의 요구가 증가할 것으로 예상된다. 따라서 상대적으로 용점이 높은 Sn-Cu 솔더에 Ni, Ag, Al, Co, Cr 등 미량의 금속과 Al_2O_3 , ZrO_2 , CeO_2 , TiO_2 와 같은 미량의 세라믹을 첨가하여 미세구조, 기계적 특성 및 신뢰성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다⁸⁾. 본 연구에서는 고 신뢰성 접합소재를 위한 용점 230 °C 이상의 친환경 Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03 wt%) Al-0.005Si 솔더를 개발하여 Al 함량 및 다중 리플로우에 따른 접합부의 특성 및 신뢰성을 연구하였다. 또한 솔더 내부분석 및 접합부 계면 반응을 관찰하여 자동차 전장부품용 고온 접합 소재로서의 적용가능 여부를 평가하였다.

2. 실험 방법

다중 리플로우 및 Al 함량에 따른 접합부 신뢰성을 관찰하기 위해 gas atomizing 법을 사용하여 Fig. 1과 같이 직경 450 μm 의 솔더볼을 제조하였다.

Al 함량에 따른 솔더볼의 용점을 측정하기 위하여 differential scanning calorimetry (DSC) 분석을 진행하였다. 10 mg 솔더볼을 이용하여 각 조성의 용점을 측정하였다. 이때의 DSC는 대기 조건에서 50 °C에서 안정화 시킨 후 10 °C/min으로 250 °C까지 상승시킨 후 10 °C/min 속도로 냉각시켜 용점을 측정하였다. 다중 리플로우에 따른 신뢰성의 비교를 위해 Sn-0.7Cu, Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03)Al-0.005Si 솔더볼을 organic solderability preservative (OSP) 처리된 Cu 표면처리 PCB에 접합하였다. 그 후, 전자부품 모듈의 제조 공정 특성상 다중 리플로우에 노출되므로 총 10 회까지 reflow를 진행하여 접합부 특성을 평가하였다. Fig. 2에 Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si 솔더와 Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더의 온도 프로파일을 나타내었다.

Fig. 1 Images of solder ball for (a) Sn-Cu-0.01Al-0.005Si and (b) Sn-Cu-0.03Al-0.005Si

Fig. 2 Reflow profile for Sn-0.5Cu-0.01 Al-0.005Si and Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si solder

Fig. 3 Test conditions for the ball shear test

다중 리플로우 후 Al 함량에 따른 계면 미세조직, IMC의 성장거동, Al의 유무를 관찰하기 위해서 시편을 기계적 연마 후 field emission scanning electron microscope (FE-SEM) 및 energy dispersive spectrometer (EDS), electron-probe microanalysis (EPMA), transmission electron microscope (TEM)를 사용하여 관찰하였다.

Al과 Si가 첨가된 두 조성의 솔더와 Sn-0.7Cu 솔더에 대한 접합부 기계적 특성 비교 평가를 위하여 볼 전단시험 방법을 이용하여 강도를 측정하였다. 5kg 로드셀 (load cell)을 장착한 접합강도 시험기 (DAGE-BT4000)를 사용하여 평가하였다. Shear height는 50 μm 였고, shear speed는 0.01 m/sec였으며, 22개 솔더볼의 전단강도를 측정하였다. Fig. 3에 전단강도 측정 모식도 및 측정 조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

세 조성 솔더의 DSC 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Sn-0.7Cu 솔더의 용점은 약 227.5 °C, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si 솔더의 용점은 230.2 °C, Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더의 용점은 231.4 °C로 측정되었다. Sn-0.7Cu합금의 공정온도가 227.5 °C인 것을 감

Fig. 4 DSC results of used solder alloys

안하면 Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si의 용점은 약 3 °C, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si의 용점은 약 4 °C의 용점이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 기존의 문헌에 따르면 소량의 Al 원소가 솔더 모재에 미량 첨가되면 솔더의 용점이 소폭 증가한다는 보고와 일치하고 있다⁹⁾.

Fig. 5는 다중 리플로우 후 각 솔더의 접합부를 관찰한 결과 이미지이다. 1회 리플로우에서 Sn-0.7Cu 솔더의 IMC는 Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03)Al-0.005Si 솔더에 비해 많이 성장하였고, Cu₃Sn IMC는 세 솔더 모두에서 성장하지 않았다. Sn-0.7Cu 조성에서는 elongated scallop이 두드러지게 나타났으며, Al 첨가량이 증가할수록 계면 IMC의 facet이 발달하였다. 10 reflow 후에 단면 결과에서도 Sn-0.7Cu 솔더의 IMC가 가장 많이 성장하였다. Cu₃Sn IMC는 세 솔더 모두에서 관찰되었고 두께 편차는 미미한 것으로 사료된

다. IMC의 성장은 솔더링 과정에서 Sn과 Cu pad는 완전히 접합하게 되고, Sn과 Cu가 열확산되어 일정한 몰비율로 결합하여 IMC를 형성하게 된다. 이때 결정립계 혹은 계면 근처에 존재하는 Al₂Cu, Cu₃(Al_{0.75}Sn_{0.25}) 화합물이 Sn, Cu 원자의 확산을 막아 계면 IMC의 형성 및 성장을 억제하는 것으로 추측된다^{9,10)}.

Fig. 6은 다중 리플로우에 따른 세 솔더의 IMC 두께 변화를 나타낸 그래프이다. Sn-0.7Cu의 총 IMC 초기두께는 2.8 μm 이고, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si는 약 1.79 μm, Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si는 약 1.52 μm로 측정되었다. Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si의 총 IMC 두께는 Sn-0.7Cu 합금에서 성장한 IMC의 약 63 %에 해당하는 두께로, Al 함량이 증가할수록 IMC의 두께가 작게 성장하는 것을 알 수 있었다. 10 reflow 후 Sn-0.7Cu 솔더의 총 IMC는 4.7 μm, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si는 약 4.02 μm, Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si는 약 3.25 μm로 측정되었다. 또한 Cu₃Sn IMC는 reflow 횟수가 증가할수록 증가하였지만 Al 첨가에 따른 차이는 미미한 것으로 관찰되었다.

Fig. 7은 다중 리플로우에 따른 Sn-0.7Cu, Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03)Al-0.005Si 솔더 조인트 내부 미세조직을 관찰한 이미지이다. 세 솔더 모두에서 내부의 β-Sn에는 Cu₆Sn₅ IMC가 고르게 분산되어 있었다. Al과 Si가 첨가된 두 솔더의 미세조직은 Sn-0.7Cu 솔더의 미세조직과 유사한 결과를 나타내나 Al 함량이 증가함에 따라 솔더 내 IMC가 미세하게 분포

Fig. 5 Cross-sectional images of interface during multiple reflow

Fig. 6 Interfacial IMC morphologies after multiple reflow cycles: (a) total IMC (b) Cu₆Sn₅ and (c) Cu₃Sn

하는 경향을 보인다. 또한 10 reflow 후에 솔더 내부 미세조직은 초기 시편과 유사하게 관찰되었다. 하지만 Al의 함량이 증가할수록 솔더 내부의 Cu₆Sn₅ IMC가 미세하게 분포되었으며, 솔더 내부 조직의 조대화를 막는 것으로 관찰된다. 기존의 문헌에 따르면 소량의 Al 원소가 솔더에 첨가되면 솔더 모재의 IMC가 미세하게 분포된다는 보고와 일치 하고 있다¹¹⁾.

Fig. 8은 EPMA를 사용하여 솔더 내부를 관찰한 이미지이다. Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03)Al-0.005Si Cu₆Sn₅ IMC가 상대적으로 Sn-0.7Cu 솔더에 비해 미세하게 분포된 것이 관찰되었다. 또한 첨가된 Al의 함량이 증가할수록 Al이 다량 발견되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 솔더 내부의 Al가 솔더 내부에 미세하게 분산되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 10 리플로우 후에 Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더의 내부를 TEM을 사용하여 분석한 SAED 패턴 이미지이다. TEM 분석 결과 Al-Cu 화합물과 Cu-Al-Sn 화합물이 관찰되었는데, 이들은 각각 Al₂Cu 및 Cu₃(Al_{0.75}Sn_{0.25}) IMC로 분석되었다¹²⁾.

Fig. 10는 리플로우 횟수에 따른 전단강도 데이터를 나타낸 그래프이다. 1 reflow에서 Sn-0.5Cu-0.01Al-

0.005Si, Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더는 유사한 전단강도가 측정되었고, Sn-0.7Cu 솔더가 상대적으로 낮게 측정되었다. 하지만 reflow 횟수가 증가됨에 따라 Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더의 강도 값이 가장 높게 측정되며, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si 솔더의 접합강도가 소폭 낮게 측정되었다. Sn-0.7Cu 솔더의 접합강도는 가장 낮게 측정되었으며 리플로우 횟수가 증가됨에 따라 접합강도 감소폭이 증가되었다.

Fig. 11은 전단강도 후 파단면을 분석한 이미지이다. 파단면 분석 결과 세 솔더 모두에서 솔더 내부 파단이 발생한 연성파괴가 발견되었다. Fig. 6과 Fig. 7의 결과와 파단면 분석 결과를 통해 Al의 첨가가 내부를 미세화하여 솔더 강도가 증가했다고 사료된다. 기존의 문헌에 따르면 소량의 원자가 솔더에 미량 첨가되면 솔더 내부 미세화로 인하여 접합강도가 증가한다는 보고와 잘 일치 하고 있다^{13,14)}.

4. 결 론

본 연구에서는, 다중 리플로우 조건에 따른 Sn-0.7Cu, Sn-0.5Cu-(0.01, 0.03)Al-0.005Si 솔더의 IMC 성장과 기계적 성질에 대해서 연구하였다. 그 결과들은

Fig. 7 Microstructures of Sn-0.7Cu, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si, and Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si solder joints

Fig. 8 EPMA mapping images of Sn-0.7Cu, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si and Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si solder joints

Fig. 9 SAED patterns of the Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si joint after reflow

Fig. 10 Shear strength of solder joints after multiple reflow cycles

다음과 같이 요약된다.

1) DSC 분석결과, Sn-0.7Cu솔더의 용점이 약 227.5 °C, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si의 용점은 약 3 °C 증가한 약 230.2 °C, Sn-0.5Cu-0.01Al-0.005Si의 용점은 약 4 °C 증가한 231.4 °C로 측정되었다.

2) 단면분석결과, 모든 리플로우 조건에서 Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더의 접합부가 적게 성장하였다. Cu₃Sn IMC는 초기에는 관찰되지 않지만, 10 reflow 후에는 모두 성장하였으며 세 솔더 모두에서 유사하게 관찰되었다. 이는 Al이 솔더 내부에 분포되어 Sn과 Cu의 확산을 막아 IMC의 성장을 억제하는 것으로 사료된다.

3) 솔더 내부분석 결과, Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si 솔더 내부가 가장 미세하게 분산된 것으로 관찰되었으며, 10 reflow 후에도 Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si의 솔더 내부가 가장 미세하게 관찰되었다.

4) EPMA, TEM 분석결과, Al, Si가 첨가된 솔더 내부에서 Cu-Al 화합물이 성장하였으며 Al 함량이 증가됨에 따라 다량 관찰되었다.

5) 전단강도 평가 결과, Sn-0.5Cu-0.03Al-0.005Si

Fig. 11 Fracture surfaces of solder joints after shear test

솔더의 전단강도가 가장 높게 나타났다. 파단면 분석결과, 세 솔더 모두에서 연성파괴가 관찰하였다. 이는 Al 첨가에 따라 솔더 내부가 미세하게 분포되어 솔더의 강도가 증가된 것으로 사료된다.

ORCID: Dong-Yurl Yu: <https://orcid.org/0000-0003-2111-5555>

ORCID: Junghwan Bang: <https://orcid.org/0000-0002-0226-9076>

References

1. Y. H. Ko, S.H. Yoo and C. W. Lee, Evaluation on Reliability of High Temperature Lead-free Solder for Automotive Electronics, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 17(4) (2010) 35-40.
2. S. I. Son, Y. E. Shin and Y. J. Jeon, A Study on Tensile Characteristic of QFP Lead-free Joint for Automotive Electrical Parts, *Korean Soc. Precis. Eng.* (2010) 1103-1104.
3. M. Zhao, L. Zang, Z. Q. Liu, M. Y. Xiong and L. Sun, Structure and properties of Sn-Cu lead free solders in electronics packaging, *Sci Technol Adv Mater.* (2019) 20(1) 421-444.
4. P. Limaye, R. Labie, B. Vandevelde, D. Vandepitte and B. Verlinden, Creep Behavior of Mixed SAC 405/SnPb Soldered Assemblies in Shear Loading, *9th Electronics Packaging Technology Conference*, singapore (2007) 703-712.
5. X. Chen, M. Li, X. Ren and D. Mao, Effects of Alloying Elements on the Characteristics of Sn-Zn Lead-free Solder, *6th International Conference Electronics Packaging Technology Conference*, Shenzhen (2005) 211-217.
6. K. I. Lin, P. C. Liu and J. M. Song, Wetting Interaction between Pb-free Sn-Zn series Solders and Cu, Ag Substrates, Electronic Compound and Technology Conference, Las Vegas (2003) 1310-1313.
7. J. Wang, L. Wen, J. Zhou and M. Chung, Mechanical Properties and Joint Reliability Improvement of Sn-Bi Alloy, *13th Electronics Packaging Technology conference*, singapore (2011) 492-496.
8. Noor, E. E. M. and Singh, A., Review on the effect of alloying element and nanoparticle additions on the properties of Sn-Ag-Cu solder alloys, *Solder. Surf. Mount Technol.* 26 (2014) 147-161.
9. H.Y. Lee, A. Sharma, S. H. Kee, Y. W. Lee, J. T. Moon and J. P. Jung, Effect of Aluminium Additions on Wettability and Intermetallic Compound (IMC) Growth of Lead Free Sn(2 wt. % Ag, 5 wt. % Bi) Soldered Joints, *Electron. Mater. Lett.* 10 (2014) 997-1004.
10. Y. Wang, L. T. Biegler, M. Patel, W. John, "Parameters estimation and model discrimination for solid-liquid reactions in batch processes, *Chem. Eng. Sci.* 187 (2018) 455-469.
11. O.Y. Liashenko and F. Hodaj, Differences in the interfacial reaction between Cu substrate and metastable supercooled liquid Sn-Cu solder or solid Sn-Cu solder at 220°C, Experimental results versus theoretical model calculations, *Acta Mater.* 99 (2015) 160-118.
12. H. Dan, Z. Jian and L. P. Pe, Corrosion Performance of Pb-free Sn-Zn Solders in Salt Spray, *ICEPT-HDP*, (2008).
13. J. H. Koo, C. S. Lee, S. J. Hong, K. S. Kim and H. M. Lee, Microstructural discovery of Al addition on Sn-0.5Cu-based Pb-free solder design, *Jalcom*, 650 (2015) 106-115.
14. G. Zeng, S. Xue, L. Zhang, L. Gao, Z. Lai and J. Luo, Properties and microstructure of Sn-0.7Cu-0.05Ni solder bearing rare earth element Pr, *J. Mater. Sci., Mater. Electron.* 22 (2011) 1101-1108.