자동차 전력반도체 모듈 적용을 위한 Sb계 무연 솔더의 열화 특성

손준혁^{*,**} · 김민경^{*} · 유동열^{*} · 고용호^{*} · 윤정원^{*} · 이창우^{*} · 박영배^{**} · 방정환^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 마이크로조이닝센터

^{**}안동대학교 신소재공학부 청정에너지 소재기술연구센터

Thermal Aging Characteristics of Sn-xSb Solder for Automotive Power Module

Junhyuk Son^{*,**}, Minkyung Kim^{*}, Dong-Yurl Yu^{*}, Young-Ho Ko^{*}, Jeong-Won Yoon^{*},
Chang-Woo Lee^{*}, Young-Bae Park^{**}, and Junghwan Bang^{*,†}

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

^{**}School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea

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

(Received May 24, 2017 ; Revised June 6, 2017 ; Accepted August 8, 2017)

Abstract

In this study, we studied properties of solder joint between chips and a substrate using Pb-free solders of Sn-5Sb (in wt.%), Sn-8Sb and Sn-10Sb solder pastes with various Sb contents for automotive power module. We also compared with Sn-90Pb solder joint used in conventional industry. The conditions of aging test were at 125 °C and 175 °C until 1,000 hours, respectively. The shear strength was measured with the shear speed of 250 $\mu\text{m/s}$ and the shear height of 100 μm . After aging time to 1,000 h at 125 and 175 °C, the shear strengths of the Sn-(5, 8, 10)Sb solder were larger than that of Sn-90Pb solder. The shear strengths increased with Sb contents due to the solution strengthening of Sb and precipitation of SnSb. The total thicknesses of intermetallic compounds (IMCs) were also measured to evaluate effects of Sn contents on thermal behavior of solder joint. After aging test, IMC thicknesses of the Sn-(5, 8, 10) Sb solder was thicker than those of Sn-90Pb solder. IMC thicknesses were increased by increasing Sb contents.

Key Words : Solder joint, Pb-free solder, Automotive power module, Aging test, Shear strength, IMC

1. 서 론

자동차용 전력 반도체는 전력 변환, 변압, 분배 등을 수행하는 핵심 부품이며 일반 반도체에 비해 고내압화, 고신뢰성 등이 요구되며, 전동차, 하이브리드 자동차, 전기 자동차 등의 개발로 그 수요가 증가 추세에 있다¹⁾. Si 기반의 전력 반도체 모듈의 경우 자동차 운행 중 소자 동작온도는 평균 150 °C 정도로 융점 180~230 °C 정도의 융점을 가지는 Pb계 솔더, Sn-Cu-Ag계 솔더 등을 이용하여 제조하고 있다^{2,3)}. 현재 SiC 기반의 전력 반도체가 개발 되고 있는데, SiC 기반 반도체는 Si에 비해 넓은 밴드 갭, 높은 파괴전압, 높은 열전도도,

빠른 포화전자속도를 갖고 있어 고효율 저손실 전력소자에 적합하여 자동차용 전력 반도체로 각광 받고 있다^{4,5)}. SiC 소자 기반의 전력 반도체의 경우 소자 동작온도는 평균 200 °C 이상의 온도에서 구동되며, 순간적인 동작은 약 235 °C 이상으로 도달하기 때문에 기존 Si 기반 전력 반도체에 사용하던 솔더는 고온 안정성 때문에 사용이 제한된다^{6,7)}. 이를 대체 할 고온 솔더 후보군으로 Au-Sn계, Sn-Zn계, Sn-Al계, Sn-Sb계 등이 거론 되고 있으며, 접합 공법으로는 TLP 본딩 및 신터링 본딩에 대한 연구가 진행 되고 있다. 그러나 Zn계 합금은 강도와 creep 특성 및 내열피로성이 우수하고 경제적이지만, Cu에 대한 젖음성이 좋지 않고 공공(void) 등의 결함 문제를 가지고 있으며, Al계 합금은

산화 특성이 강해 젖음성이 확보되지 않는 문제를 가지고 있다^{8,9)}. 또한 Bi 계 합금은 취성 및 기계적 특성 문제로 인해 사용이 제한되고 있다¹⁰⁾. Au계 합금은 열적으로나 기계적 특성이 우수하고, 우수한 피로 및 크립 특성을 가지지만, 원재료 가격으로 인해 산업적인 실용성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 또한 TLP (Transient Liquid Phase) 본딩은 솔더링보다 고온에서 사용 가능한 장점이 있지만, 취성 및 접합 시간 및 압력 조건으로 인한 문제로 사용에 제약을 가지고 있다. 신터링 본딩은 Ag 페이스트의 높은 가격 및 고온 본딩 및 시간의 제약을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는, 우수한 크립 특성과 높은 기계적 특성, 젖음성이 양호한 Sn-Sb계 솔더를 자동차용 전력모듈 접합소재에 적용 후 그 특성을 평가하였다¹¹⁾. 기계적 특성 평가로는 표면실장용 부품과 PCB 표면처리에 따른 접합강도, 환경내구시험으로는 고온시효 시험을 수행하였다. 각각의 시험 후 금속간화합물 거동 및 파면을 분석 평가하여 자동차용 전력 모듈 접합소재로서의 적합여부를 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 시험쿠폰 제작

본 연구에서는 Sb 함량에 따른 접합부의 열적 특성을 분석하고자 우선 Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더 페이스트와 Ni(P) 및 OSP (Organic Solderability Preservative) 두 종류의 표면처리가 되어 있는 DBC (Direct Bonded Copper) 기판을 이용하여 시험 쿠폰을 제작 하였다. 위에 언급된 조성의 솔더 페이스트를 사용하여 인쇄 후, 진공 리플로우를 사용하여 2.0×1.2 mm size의 칩을 접합하였다. Fig. 1 은 DBC와 chip의 접합 모식도와 접합된 시편을 나타내었다. 또한 기존에 산업계에서 많이 사용되고 있는 접합 소재와 비교하기 위하여 Sn-90Pb 솔더 페이스트를 이용하여 동일하게 쿠폰을 제작하였다.

쿠폰 제작시 접합 공정 중에 발생하는 보이드를 최소화 하기 위하여 각 프로파일의 용융온도에서 30초 진

Fig. 1 Schematic illustration of test coupon fabrication

Table 1 Reflow conditions of each solder paste

	Preheating time (s)	Heating Time (s)	Peak Temp. (°C)	Vacuum time (s)
Sn-90Pb	100	60	310	30
Sn-5Sb	100	60	270	30
Sn-8Sb	100	60	275	30
Sn-10Sb	100	60	280	30

Fig. 2 Schematic of vacuum reflow profile

공 구간을 설정하였다. 이 때의 진공도는 2 mbar로 설정하였으며, 최고 온도는 솔더 조성의 용점에 따라 설정하였다. Table 1 및 Fig. 2 는 각 조성의 진공 리플로우 프로파일을 나타내었다.

2.2 접합부의 특성 분석

2.2.1 고온시효 시험

솔더 내부와 접합부의 열화 특성 및 화합물 성장거동에 따른 접합부의 기계적 특성 평가를 위해 고온시효 시험을 진행하였다. 접합된 시험쿠폰은 125, 175 °C 에이징 챔버에서 0, 100, 300, 500, 700, 1,000 시간 동안 시효처리 하였다.

2.2.2 접합강도 시험

고온시효 시간에 따른 전단강도 변화를 측정하기 위해 100 Kg load cell을 장착한 접합강도 시험기(DAGE-BT4000)를 사용하였다. 높이는 100 μ m에서 250 μ m/s 속도로 전단시험을 진행하였으며, 20 회 반복시험 후 평균을 도출하였다.

2.2.3 미세조직 관찰

고온시효 시간에 따른 금속간 화합물과 미세구조의 변화를 관찰하기 위해서 시편을 에폭시 수지로 마운팅 하였다. 그 후, 단면을 절단하여 연마지와 알루미나 파우더를 사용하여 기계적 연마를 실시하였다. 연마된 시편은 주사전자현미경(FE-SEM)을 사용하여 시효처리 시

간에 따른 미세조직과 금속간 화합물의 성장거동을 비교 관찰하였다.

2.2.4 시효처리에 따른 IMC 크기 비교

시효처리 시간 변화에 따른 금속간 화합물 크기를 비교하기 위하여 솔더를 예칭하였다. Cu_6Sn_5 IMC는 주사전자현미경을 사용하여 시효처리 시간에 따른 금속간 화합물의 크기를 비교 관찰하였다. 금속간 화합물의 크기는 ASTM standard E112 방법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 접합강도 시험 결과

3.1.1 고온시효 시험 후 접합강도 시험 결과

Fig. 3 은 125 °C 고온시효 시험 후 시간에 따른 접합강도를 나타낸 그래프이다. 초기 및 고온시효 시험 후 접합강도는 Sb가 첨가된 솔더가 기존에 많이 사용되고 있는 Sn-90Pb 솔더 접합부에 비하여 높은 값을 나타내었다. 한편 Sb가 첨가되는 경우 Sb의 첨가량이 증가할수록 높은 강도 값을 나타내었다. Fig. 4 는 175 °C 고온시효 시험 후 시간에 따른 접합강도를 나타낸 그래프

Fig. 3 Shear strength after 125 °C aging test

(a) Ni(P)

(b) OSP Cu

Fig. 4 Shear strength after 175 °C aging test

이다. 175 °C에서도 마찬가지로 시효처리에 관계 없이 Sb가 첨가되는 경우에 높은 강도 값을 나타내었다. 접합강도의 경우 표면처리의 방법 및 시효처리 온도, 시효처리 시간에 관계 없이 Sb가 첨가되는 경우에 높은 강도 값을 나타내었다.

3.1.2 접합강도 시험 후 파단면 관찰 결과

전단강도 시험 후 파괴 모드를 관찰하기 위해 SEM을 이용하여 파단면을 관찰하였다. Fig. 5 는 서로 다른 시효 온도와 시간에서 파단면을 관찰한 SEM 이미지이다. 모든 조건에서 솔더 내부로 파단이 발생하였으며, 파단면은 모두 연성 파괴를 보였다^{12,13)}.

3.2 미세조직 관찰

3.2.1 고온시효 시험 후 계면 미세구조 관찰 결과

Fig. 6 는 125 °C 에서 시효 처리 시간 변화에 따른 Sn-(5, 8, 10)Sb, Sn-90Pb 솔더와 Ni(P), OSP Cu DBC 시험 쿠폰 사이의 IMC 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 6 (a) 에서 솔더 모두 Ni_3Sn_4 IMC 및 Ni_3P IMC 층이 관찰 되었으며 Sn-90Pb 솔더는 고온시효 후 Ni_3Sn_4

Fig. 5 Fracture surfaces of solder joints aged under different conditions

IMC의 두께가 소폭 증가하였다. Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더의 경우 고온시효 시간에 따라 Ni_3Sn_4 IMC의 두께가 증가하였다. Fig. 6 (b)에서는 초기에는 Cu_6Sn_5 IMC가 생성되었다. Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더의 경우 100 시간 후 Cu_6Sn_5 와 OSP Cu DBC 사이에서 얇은 Cu_3Sn IMC가 관찰되었다. Cu_3Sn IMC는 Sn-90Pb에서 가장 두껍게 성장하였으며, Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더에서는 Sb의 함량이 증가함에 따라 소폭 높게 측정되었다. Fig. 7은 고온시효 시간에 따른 IMC의 변화를 나타낸 그래프이다. 두 표면 처리된 DBC 모두에서 총 IMC 두께는 Sb의 함량이 증가함에 따라 총 IMC 두께가 증가되었으며 Sn-90Pb 솔더에서 가장 적은 IMC가 관찰되었다. Ni(P) DBC와 Sn-90Pb 솔더 사이의 IMC 성장이 적은 이유는 반응할 Sn의 함량이 적고, 또한 Ni_3Sn_4 IMC의 성장 에너지가 적어 성장이 거의 일어나지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 8은 175 °C에서 시효 처리 시간 변화에 따른 Sn-(5, 8, 10)Sb, Sn-90Pb 솔더와 Ni(P), OSP Cu DBC 시험 쿠폰 사이의 IMC 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 8 (a)에서 솔더 모두 Ni_3Sn_4 IMC 및 Ni_3P IMC 층이 관찰되었으며 Sn-90Pb 솔더는 고온시효 후 Ni_3Sn_4 IMC의 두께가 소폭 증가하였다. Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더의 경우 고온시효 시간에 따라 Ni_3Sn_4 IMC의 두께가 증가하였다. Fig. 8 (b)에서 초기에는 Cu_6Sn_5 IMC가 생성되었다. Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더의 경우 100 시간 후 Cu_6Sn_5 와 OSP Cu DBC 사이에서 얇은 Cu_3Sn IMC가 관찰되었다. Cu_3Sn IMC는 Sn-90Pb에서 가장 두껍게 성장하였으며, Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더에서는 큰 유의차를 보이지 않았다. OSP Cu와 Sn-90Pb에서 Cu_3Sn IMC가 가장 많이 성장한 이유는 솔더 내부의 Sn 함량이 적고, Sn의 확산속도가 낮아 Cu_6Sn_5 IMC의 성장이 어려워 Cu_3Sn

Fig. 6 IMCs layer image of 125 °C aging after 0, 500, 1,000 hours

Fig. 7 Plot of the thickness of IMCs after 125 °C aging test

IMC가 많이 성장 한 것으로 사료된다. Fig. 8 는 고온시효 시간에 따른 IMC의 변화를 나타낸 그래프이다. 두 표면 처리 된 DBC 모두에서 총 IMC 두께는 Sb의

함량이 증가함에 따라 총 IMC 두께가 증가 되었으며 Sn-90Pb 솔더에서 가장 적은 IMC가 관찰되었다. 시효처리 온도, 솔더 조성에 상관없이 OSP Cu 에 비해

(a) Ni(P)

(b) OSP Cu

Fig. 8 IMCs layer image of 175 °C aging after 0, 500, 1,000 hours

Fig. 9 Plot of the thickness of IMCs after 175 °C aging test

Ni(P) 샘플의 IMC 성장이 적은 이유는 Cu_6Sn_5 IMC에 비해 Ni_3Sn_4 IMC의 확산속도가 상대적으로 느리기 때문으로 사료된다¹⁴⁾.

3.2.2 고온시효 시험 후 IMC 크기 관찰 결과
Fig. 10와 11에 고온시효 온도 및 시간 조건에 따른 금속간 화합물의 결정립 크기 변화를 나타내었다. 금속

Fig. 10 IMC top-view image of interface x Sb solder and Ni(P), OSP pad after 125 °C aging test

Fig. 11 IMC top-view image of interface x Sb solder and Ni(P), OSP pad after 175 °C aging test

간 화합물의 결정립 크기는 시간이 경과함에 따라 성장함을 확인 할 수 있었다. 고온시효 조건에 따른 결정립의 크기는 Sn-5Sb 솔더가 가장 컸으며, Sb의 함량이 증가할수록 결정립 크기는 작게 나타났다. 기존의 연구에 따르면 Sn-xAg-0.5Cu 합금계의 실험에서 Ag의 첨가가 Cu_6Sn_5 의 결정립 성장을 억제하며, 결정립이 작아지면 Cu_6Sn_5 의 성장이 빨라지고, Cu_3Sn IMC의 성장을 억제 하며, 이는 고체 상태 반응 하에 금속원자의 확산은 입자 경계와 결함에 의해 가속되며, 결과적으로 빠른 확산 경로 또는 채널 역할을 한다고 보고되고 있다¹⁵⁾.

따라서 Sn-Sb계 솔더는 Sb함량 증가에 따른 SnSb 화합물의 핵 생성이 증가하여, Cu_6Sn_5 의 결정립 성장이 억제 되는 것으로 사료된다.

3.2.3 고온시효 시험 후 내부 미세구조 관찰 결과
앞서 Fig. 3 과 Fig. 4 의 전단 강도의 결과 기관의 표면처리 및 시효처리 온도에 상관 없이 Sb의 함량이 증가 할수록 높은 강도 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 전단 시험 후 Fig. 5의 파단면의 분석 결과를 보면 솔더 내부의 연성 파괴가 우세함을 확인 할 수 있었다. 이는 본 연구의 전단 시험 조건에서는 IMC의 영향 보다는 솔더 내부의 특성에 기인 한 것으로 사료되었다. 따라서 Fig. 12에서와 같이 기관 표면처리 및 고온시효 온도 및 조건에 따른 솔더 내부의 SEM mapping 기법을 이용하여 솔더 내부의 성분 분포를 살펴 보았다. SEM mapping 분석 결과 Fig. 12에서와 같이 Ni(P)와 OSP Cu 표면처리 된 DBC 모두 Sb의 함량이 증

Fig. 12 Microstructures of the solder joints under after aging test

가할수록 SnSb 화합물의 생성이 많은 것으로 나타났다. 또한, 고온시효시간이 경과함에 따라 SnSb 화합물이 성장함을 확인할 수 있었다. 이는 솔더 내부에 형성된 SnSb 화합물이 전단 강도에 영향을 미친다고 사료된다. 결국 Sb 함량이 증가할수록 전단강도가 높게 나타났다는데, 이는 SnSb 화합물의 생성 및 성장으로 인한 석출 강화 효과로 사료된다¹⁶⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 전력 반도체 모듈에 적용 가능한 Sn-(5, 8, 10)Sb 솔더와 Sn-90Pb 솔더를 고온시효시간에 따른 접합강도 및 IMC 층의 두께 변화를 관찰하였다. 각 실험의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 125 °C, 175 °C 고온시효 시험 후 Ni-P, OSP Cu 표면처리 된 DBC의 접합강도 측정 결과, Sb가 첨가된 경우 Sn-90Pb에 비하여 높은 강도 값을 나타내었으며 Sb의 첨가량이 증가할수록 높은 강도 값을 나타내었다. Sb 함량이 증가 할수록 접합강도가 증가하는 이유는 Sb의 고용으로 인한 고용강화의 효과 및 SnSb 화합물의 석출로 인한 석출 강화 효과로 사료된다.

2) 125 °C, 175 °C 고온시효 시험 후 IMC 두께 측정 결과, Sn-90Pb의 총 IMC의 두께는 가장 작게 측정되었으며, Sb의 함량이 증가함에 따라 총 IMC의 두께가 증가되었다. Sb함량의 증가에 따른 확산속도가 증가되어, 총 IMC 두께의 성장이 많은 것으로 사료된다. 또한, OSP Cu 에 비해 Ni-P 샘플의 IMC 두께의 성장이 적은 이유는 Cu₆Sn₅ IMC에 비해 Ni₃Sn₄ IMC의 thermal diffusivity가 적어 성장속도가 낮은 것으로 사료된다.

3) OSP Cu DBC에서 125 °C, 175 °C 고온시효 시험 후 Cu₃Sn IMC 관찰 결과, 네 조성의 솔더 모두 100 시간 이후 Cu₃Sn IMC가 관찰되었다. Cu₃Sn IMC 두께는 Sn-90Pb 솔더에서 가장 많이 성장하였다. OSP Cu 와 Sn-90 Pb에서 Cu₃Sn IMC가 가장 많이 성장한 이유는 솔더 내부의 Sn 함량이 적고, Sn의 확산속도가 낮아 Cu₆Sn₅ IMC의 성장이 어려워 Cu₃Sn IMC가 많이 성장 한 것으로 사료된다.

4) 125 °C, 175 °C 고온시효 시험 후 Ni-P, OSP Cu 표면처리 된 DBC의 Cu₆Sn₅ IMC의 크기 관찰 결과, 고온시효 조건에 따른 결정립의 크기는 Sn-5Sb 솔더가 가장 컸으며, Sb의 함량이 증가할수록 결정립 크기는 작게 나타났다.

References

1. J.W. Yoon, J.H. Bang, Y.H. Ko, S.H. Yoo, J.K. Kim,

C.W. Lee, Power Module Packaging Technology with Extended Reliability for Electric Vehicle Applications, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 21(4) (2014), 1-13 (in Korean)

2. J.H. Bang, D.Y. Yu, Y.H. Ko, J.W. Yoon, C.W. Lee, Lead-free Solder for Automotive Electronics and Reliability Evaluation of Solder Joint, *J. of Welding and Joining*, 34(1) (2016), 26-34 (in Korean)
3. W.S. Hong, C.M. Oh, Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead-free Automotive Electronics, *Journal of KWJS*, 31(3) (2013), 22-30 (in Korean)
4. T. Hayashi, H. Tanaka, Y. Shimoida, S. Tanimoto, and M.Hoshi, New High-voltage Unipolar Mode p+ Si/n-4H-SiC Heterojunction Diode, *Proceedings of the 5th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Italy*, May 483(485) (2005), 953-956
5. R. Fu, E. Santi, and Y. Zhang, Power SiC MOSFET Model with Simplified Description of Linear and Saturation Operating Regions, *International Conference on Power Electronics (ICPE)*, (2015) 190-195
6. J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler, Johann W. Kolar, SiC versus Si-Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC-DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(7) (2011), 2872-2882
7. W. M. Choi, H. G. Ahn, The Switching Characteristic and Efficiency of New Generation SiC MOSFET, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 21(2) (2017), 353-360
8. X. Chen, M. Li, X. Ren, D. Mao, Effects of alloying elements on the characteristics of Sn-Zn lead-free solder, *6th International Conference on Electronics Packaging Technology*, (2005)
9. K.L. Lin, P.C. Liu, J.M. Song, Wetting interaction between Pb-free Sn-Zn series solders and Cu, *Ag substrates, Electronic Compound and Technology Conference*, (2003)
10. J. Wang, L. Wen, J. Zhou, M. Chung, Mechanical properties and joint reliability improvement of Sn-Bi alloy, *13th Electronics Packaging Technology Conference*, (2011)
11. RODNEY J. MCCABE, MORRIS E. FINE, Creep of Tin, Sb-Solution-Strengthened Tin, and SbSn Precipitate-Strengthened Tin, *Metallurgical and Materials Transactions*, 33A, 2002-1531
12. D.G. Kin, S.B. Jung, Microstructure and Mechanical Properties of Sn-0.7Cu Flip Chip Solder Bumps Using Stencil Printing Method, *Materials Transactions*, 46(11) (2005), 2366-2371
13. C.B. Lee, S.B. Jung, Y.E. Shin, C.C. Shur, Effect of Isothermal Aging on Ball Shear Strength in BGA Joints with Sn-3.5Ag-0.75Cu Solder, *Materials Transactions*, 43(8) (2002), 1858-1863
14. R.J. Fields, S.R. Low, G.K. Lucey, Physical and Mechanical Properties Of Intermetallic Compounds Commonly Found In Solder Joints, *Published in Metal Science of Joining, Proceedings of TMS Symposium*,

- Cincinnati*, (1991), 20-24
15. M.G. Cho, Y.S. Park, S.K. Seo, K.W. Paik, H.M. Lee, Effect of Ag on ripening growth of Cu_6Sn_5 grains formed between molten Sn-xAg-0.5Cu solders and Cu, *EPTC Proceeding*, (2010), 170
16. Morozumi, A Hokazono, H Nishimura, Y. Ikeda, Y. Nabetani, Y. Takahashi, Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications, *25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*, (2013), 109-112