최근 SnBi계 저온 솔더 합금 및 접합 특성

강 혜 준* · 백 범 규** · 정 재 필*,†

*서울시립대학교 신소재공학과

**경동엔텍

Recent Low Temperature Solder of SnBi and Its Bonding Characteristics

Hyejun Kang*, Bumgyu Baek** and Jae Pil Jung*,†

*Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

**KD MTEC Co. Ltd., Asan, 31402, Korea

†Corresponding author : jpjung@uos.ac.kr

(Received July 31, 2020 ; Revised September 2, 2020 ; Accepted October 5, 2020)

Abstract

A solder has been extensively used for long time in electronics packaging field, and there are various Sn-based lead-free solders such as Sn-Ag-Cu, Sn-Cu, Sn-Bi and etc. Recently, the low temperature solder, typically Sn-58wt%Bi-X alloys, attract attention from industry because of flexible printed circuit board (FPCB) application and to avoid bending or warpage of big size electronic devices after high temperature soldering. In the Sn-58wt%Bi-X solder, basic important issues are melting temperature, wettability, microstructure, mechanical properties and etc. Specifically, the Sn-58wt%Bi-X solder receives much attention to improve the brittleness by grain refinement of Bi-phase. In this paper, recent studies about Sn-58wt%Bi-X solders were reviewed including melting temperature, microstructure and mechanical properties.

Key Words : Solder, Sn-58wt%Bi, Melting temperature, Microstructure, Mechanical property

1. 서 론

전자 산업이 시작된 이래로 솔더링 공정은 모든 전자 제품 조립에 있어 가장 기본적인 접합 기술로 자리 잡고 있으며, 패키징 기술의 출현과 함께 솔더링의 적용이 더욱 증가하고 있다. 솔더링이란 용점 450℃ 미만의 용융된 솔더 (solder)를 모재 (피접합재)의 틈새에 침투 및 퍼지게 하여 접합하는 방법이다¹⁾. 솔더링은 접합기술의 일종이지만 비슷한 용융용접과 구별되는 점은 공정 중 모재는 용융되지 않고 솔더만 용융되어 접합이 이루어지며 솔더링된 모재와 솔더 사이에 금속화학적 결합이 발생한다는 점이다. 이러한 솔더링 기술은 미래에도 전자 부품 연결 분야에 있어서 필수적인 공정으로 남을 것이다.

솔더의 내구성과 신뢰성은 전자 제품의 기능 및 수명

에 절대적으로 중요한 사항이므로, 견고한 접합부를 얻기 위해서는 사용되는 솔더가 물리·화학적 특성에서 최적화되어야 한다. 가정 및 산업용 전자제품 분야와 마찬가지로, 최근에는 자동차용 전자제품 분야에서도 무연 솔더 (Pb-free solder)의 적용이 요구되고 있다^{2,3)}. 전자산업에서 Pb 함유 솔더의 사용 규제 이후, Pb가 함유되지 않은 다양한 Sn계 무연 솔더가 개발되었는데, 예를 들면 Sn-Ag계 (대표 솔더 Sn-3.5%Ag, 용점 221℃), Sn-Cu계 (Sn-0.7%Cu, 용점 227℃), Sn-Ni계 (Sn-0.1%Ni, 용점 231℃), Sn-Zn계 (Sn-9%Zn, 용점 198℃), Sn-Bi계 (Sn-58%Bi, 용점 139℃), Sn-Ag-Cu계 (Sn-3%Ag-0.5Cu, 용점 217℃), Sn-In계 (Sn-52%In, 용점 118℃) 등의 솔더들이 있다⁴⁻¹³⁾. 또한, 솔더의 성능을 향상시키기 위해 최근에는 강화재료, 미량의 첨가원소, 고분자 등을 첨가하여 신뢰성을 향상시키는 연구들도 진행되고 있다.

전자부품의 플렉서블(flexible), 웨어러블(wearable)화로 인하여 전자 제품에 사용되는 연성 기관의 내열성 저하로 솔더링 후 열변형 및 열손상이 발생되기 쉬워지고 있다. 또한 전자부품의 모듈화, 대형화로 Si칩과 기관과의 열팽창 계수 차이로 인해 높은 온도로 가열될수록 이로 인한 전자부품의 열변형이 증가되고 접합불량이 빈발한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, Sn-58%Bi계나 Sn-52%In계와 같은 접합온도가 낮은 저융점 솔더에 대한 연구의 필요성이 증가되고 있다¹¹⁾. 따라서 본 글에서는, 저온 솔더 특히 Sn-58%Bi계 솔더를 중심으로 최근의 연구 결과들을 정리하여 소개하고자 한다.

2. Sn-Bi계 솔더의 융점과 젖음성

저융점 솔더인 Sn-Bi계는 그 용도에 맞게 낮은 융점을 가져야 한다. 합금원소에 따라 다양한 융점과 솔더링 특성을 갖기 때문에, 첨가 원소에 대한 연구가 필요하다. 또, 양호한 솔더링을 위해서 솔더는 피접합재 금속 표면에 최적의 퍼짐성과 젖음특성을 보여야 한다. 즉, 퍼짐성과 젖음성은 솔더링 시 작업성 확보를 위한 기본적인 요구 조건이다.

Sn58Bi 공정 솔더의 융점에 미치는 Ag, RE 첨가 원소의 영향은 Table 1에 보인 바와 같다. 공정 조성인 Sn58Bi의 융점은 평형상태도 등에서 통상 138.

5°C로 알려져 있다. 그러나 이 융점은 Sn58Bi 합금의 가열 속도에 따라 약간의 편차가 있을 수 있다. Table 1에서 보듯이, Sn58Bi는 136.1°C (고상온도) ~ 139.1°C (액상온도)의 용융 범위를 갖는 것으로 보고되기도 한다. Sn58Bi 합금에 1% 이내의 Ag를 가하여 솔더의 취성을 개선시키고, 융점을 저하시키기도 한다. 0.5wt% Ag의 첨가로 융점이 1°C 이하로 감소되어, 135.7°C (고상온도) ~ 138.2°C (액상온도)의 용융 범위를 갖는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾.

이렇게 공정온도가 범위로서 표기되는 이유는 순수 공정 조성이 아니기 때문이다. Sn58Bi는 순수 공정 조성이면 하나의 융점 온도로 나타나야 하지만 현실적으로 산업계에서 사용하는 Sn58Bi는 순수 공정 조성이 아니고 불순물 등이 포함되어 있어 고상온도 및 액상온도로 나누어진다. 또한 Sn-Bi 공정 조성은 연구자에 따라 다른 조성도 보고되어진다. 예를 들어, 미국의 NIST (National Institute of Standard and Technology)에서는 Sn-56.97wt%Bi 조성을 공정 조성으로 보고했고³³⁾, 어떤 연구자들은 Sn-57wt%Bi를 공정 조성으로 사용하기도 한다³⁴⁾.

Sn58Bi 공정 솔더의 융점에 미치는 Ag, In, Ag-In 복합 첨가의 영향도 Table 1에 나타내었다. In은 통상 Sn58Bi 공정 솔더의 연성 개선 및 융점 저하제로 첨가된다. 3% In의 첨가로 119.9°C (고상온도) ~ 140.5°C

Table 1 Melting temperatures of Sn-Bi-X solders (all wt%)

Solder	Solidus(°C)	Liquidus (°C)	Mushy zone	Ref.
Sn-58%Bi	136.1	139.1	3	14
Sn-58%Bi	139.3	147.6	8.3	15
Sn-58%Bi	139.4	148.0	8.6	16
Sn-58%Bi-0.5Ag	135.7	138.2	2.5	14
Sn-58%Bi-0.1Ag	136.2	139.7	3.5	14
Sn-58%Bi-0.5Ag-0.1RE	136.6	139.1	2.5	14
Sn-58%Bi-3.0wt%In	119.9	140.5	20.6	15
Sn-58%Bi-4.0wt%Ag	138.1	145.5	7.4	15
Sn-58%Bi-3In4Ag	116.9	138.1	21.2	15
Sn-52Bi-1.8Sb	140.6	152.0	11.4	16
Sn-44Bi-1.8Sb	141.9	180.5	38.6	16
Sn-48Bi-1.0Sb	140.6	168.7	28.1	16
Sn-48Bi-1.4Sb	141.2	170.4	29.2	16
Sn-48Bi-1.8Sb	140.9	172.7	31.8	16
Sn-48Bi-2.0Sb	142.3	169.7	27.4	16
Sn-48Bi-2.4Sb	142.8	169.3	26.5	16
Sn-48Bi-2.8Sb	143.6	168.4	24.8	16

(액상온도)의 용융 범위 (용점 피크온도, 133.7°C)를 갖는 것으로 보고되었으며 Sn-58Bi+4%Ag의 용점은 1°C 이내로 강하됨을 알 수 있다. Sn58Bi+3%In-4%Ag 복합 첨가는 116.9°C (고상온도) ~ 134.1°C (액상온도)의 용융 범위 (용점 피크온도, 138.1°C)로 보고되었다¹⁵⁾.

한편, Sn에 Sb를 첨가하면 용점이 증가하는데 이때 포정 (peritectic, Sn-6.2wt%Sb) 온도는 243°C로서 Sn의 용점 232°C에 비해 약 11°C 높다. Sn-Bi 솔더에 Sb를 첨가하고 Bi가 감소되면 용점이 증가하는 것으로 보고되었다¹⁶⁾. 예를 들어 Sn-52wt%Bi-1.8Sb의 경우 Sn-58%Bi에 비해 고상온도가 약 4.6°C 정도 증가한다. 그러나 이는 Bi의 함량도 6%나 감소되었기에 순수한 Sb의 영향이라고 판단하기는 어렵다. 한편 Sn-48wt%Bi 솔더에 Sb를 1%에서 2.8%까지 첨가하면 Table 1로부터 용점이 증가함을 알 수 있다.

Xu 등¹⁷⁾은 Sn-50Bi-(1~5)wt%Cu solder에 대해 용점 및 퍼짐(spreading) 특성에 대하여 보고하였다. Sn-50Bi-5wt%Cu는 약 155°C의 용점을 나타내었으며, 4~1%Cu로 Cu 함량이 감소됨에 따라 용점은 약 1~2°C 정도 감소되었다. Bi 및 Cu 함량을 모두 변화시키는 경우, Sn-Bi-Cu계 솔더의 퍼진 면적 (spreading area)은 Bi 함량 증가에 따라서 증가되고 최적 Bi 함량 이후에는 감소되는데 최대 퍼진 면적을 보이는 최적 함량은 Sn-17%Bi-0.5%Cu라고 보고하였다.

Sn-38Bi-1.5Sb-0.7Ag 솔더는 Sn58Bi 솔더보다 더 우수한 젖음성과 젖음 시간을 가지고 있는 것으로 알려져 있다¹⁸⁾. 예를 들어 수계 플럭스를 사용한 경우 160°C에서 Sn58Bi 솔더의 웨팅 시 영점 시간 (to, zero cross time)은 약 1.2초 내외이지만, Sn-38Bi-1.5Sb-0.7Ag 솔더는 약 0.8초 내외로 Sn58Bi의 2/3에 불과하다. 일반적으로 무연 솔더의 경우 영점 시간은 1.2초 이내를 요구하지만 양호한 상업화 솔더는 많은 경우 1.0초 이내를 보이고 있다. 수계 플럭스를 사용한 160°C의 조건에서 최대 젖음력은 Sn58Bi와 Sn-38Bi-1.5Sb-0.7Ag 솔더 모두 약 0.6mN으로 비슷한 값을 보이는 것으로 보고되었다. 보통 원활한 솔더링을 위해서는 ① 용융 솔더가 모재 금속 표면을 적시며 퍼져나가는 젖음(wetting)성이 좋아야 하고, ② 마주보는 두 모재 금속 사이(부품과 리드의 틈새)에 용융 솔더가 빨리 들어가는 모세관 현상이 잘 일어나야 하며 ③ 솔더와 모재 금속 표면의 상호 원자간 이동인 확산이 빠르게 일어나야 하는 것 등 여러 조건이 우수해야 한다¹⁹⁾.

3. Sn-Bi 솔더의 미세 조직

Sn58Bi 공정 솔더는 Fig. 1에서 보는 것처럼 연성

Fig. 1 Microstructure of Sn58Bi solder (photo by author)

을 갖는 어두운 색의 β-Sn상과 밝은 색의 취성을 갖는 Bi상이 혼재하여 존재한다. 두 상은 전형적인 층상형(lamellar) 공정 조직을 가지며 β-Sn상과 Bi상이 교대로 나타난다. 솔더의 합금원소들이 Sn58Bi 미세조직에 많은 영향을 미치는데, 1% Cu의 첨가는 Sn58Bi 솔더의 결정립을 미세화하는 것으로 알려져 있다²⁰⁾. 또 Sakuyama 등²¹⁾에 의하면 0.5wt%의 Sb의 첨가는 Sn-58%Bi 솔더의 결정립의 크기를 50% 정도로 미세화시키며, 0.5wt% Zn의 첨가는 Sn58Bi 솔더의 결정립을 조대화하는 것으로 보고하였다. 또한 Mokhtari 등²²⁾은 0.5wt% In, 0.5wt% Ni를 Sn58Bi에 첨가하여 미세조직 및 인장 강도를 조사하였다. 이들의 연구 결과에 의하면 Sn58Bi에 0.5wt% In을 첨가한 경우, 솔더 벌크 내의 과도한 취성의 Bi상의 성장을 억제하며 0.5wt% Ni를 첨가한 Sn58Bi 솔더는 공정조직에 Ni₃Sn₄ IMC를 나타내고, 일부 물고기뼈(fishbone) 같은 형태의 규칙적 공정 영역을 보이기도 한다. Ni를 첨가한 경우도 Sn58Bi에 비해서 Bi상의 크기가 감소하는 것으로 보고되었다.

이러한 결과로부터 Sn58Bi 솔더에 Sb, In, Ni, Ag를 0.5wt% 첨가 혹은 Cu 0.5, 1.0wt%를 첨가함으로써 결정립이 미세화 되는 것을 알 수 있으며, 0.5wt% Zn의 첨가는 오히려 Sn58Bi 솔더의 결정립을 조대화하는 것을 알 수 있다. 그러나 이에 대한 원인은 아직까지 명확히 밝혀져 있지 않다.

한편, Sn58Bi 솔더에 나노 분말을 적정량 첨가한 경우에도 솔더 결정립이 미세화 된다²³⁻²⁴⁾. 미세한 나노 분말이 첨가된 솔더에서 나노 입자는 솔더 기지 내에서 핵생성 사이트의 역할을 한다. 이는 솔더 응고 시 많은 고체 핵생성이 일어나게 하여 접점제로 작용함으로써 솔더 조직의 상(phase)이 미세화가 되도록 한다.

나노입자가 솔더 기지의 상(phase) 미세화에 미치는 영향을 정량적으로 조사하기 위해 많은 연구자들이 초

정 (pro-eutectic) 조직의 상(phase)의 크기를 측정하는 방법을 사용하고 있다. A. Gain 등²³⁾은 Sn-Bi-Ag 솔더에 Ni 나노 입자를 첨가한 결과 나노입자로 강화된 솔더에서 β -Sn 영역 및 Ag_3Sn 이 미세화된 것을 확인하였다. 미세화 된 이유로 유력한 것은 나노 Ni 입자가 Sn과 반응하여 Sn-Ni IMC를 형성하고, 이러한 IMC 입자가 응고 시 고체 핵생성 사이트로 작용하여 결정립 성장을 억제하기 때문인 것으로 보고되었다. 더불어 금속입자의 첨가가 과냉도를 줄여서 IMC 성장 억제 및 조직을 미세화하는 것으로 분석하고 있다. L. Shen 등²⁴⁾도 Sn-Bi에 Cu 나노 입자를 첨가하는 연구를 진행하여 나노 입자들은 입계를 고정하거나 구속하는 작용을 하며, 나노입자 첨가율이 증가함에 따라 솔더의 상(phase)의 크기가 감소함을 확인하였다.

이렇게 상(phase)가 미세화되면 아래 (eq.1)의 Hall-Petch 식에 따라 솔더 기지의 강도가 증가한다²⁵⁾.

$$\Delta\sigma_{Hall-Petch} = k_y(d_m)^{-1/2} \quad (1)$$

k_y : constant according to the material

d_m : phase size of the solder matrix

4. 접합계면의 금속간 화합물

솔더링 중 용융된 솔더는 기판의 금속 패드나 비아홀과 전자부품의 리드, 금속 전극부 사이의 틈새에 침투하여 접합부의 계면에 금속간 화합물을 형성하면서 접합을 이룬다. 모재 금속의 표면에 솔더가 퍼지면서(wetting) 모재와 솔더 사이 원자간 이동이 발생하고, 이동한 원자간 결합으로 금속간 화합물이 생성되며, 용융 솔더의 응고가 진행되면서 접합이 완료된다²⁶⁾. 이러한 계면의 IMC는 솔더링부의 기계적 강도와 수명에 지대한 영향을 미친다.

한 예로, Sn-58%Bi 솔더에 0.5wt% In을 첨가하면 솔더와 기판의 Cu 계면에 과도한 Cu_6Sn_5 IMC의 생성을 억제할 수 있다²²⁾. 0.5wt% Ni를 첨가하는 경우에도 유사한 효과를 낼 수 있다²³⁾. A. Gain 등²³⁾은 Cu 기판에 Sn-35%Bi-1%Ag-0.5%Ni를 솔더링한 후 200°C에서 30min 유지시켰다. 그 결과 Sn-35%Bi-1%Ag-0.5%Ni와 Cu와의 계면에서 ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$) IMC 층의 두께는 약 3 μm , Sn-35%Bi-1%Ag는 약 4.8 μm 로 Sn-35%Bi-1%Ag-0.5%Ni 솔더가 Sn-35%Bi-1%Ag 솔더보다 IMC 층 두께가 감소했다. 또한, 동일조건에서 IMC의 성장 속도는 Sn-35%Bi-1%Ag-0.5%Ni가 Sn-35%Bi-1%Ag에 비해 약 36.4 % 감소했으며, 200°C에서 5분 유지한 경우에는 약 17.9 % 감소했음을 보고하였다. 아울러, 접합 온도 및 접합 온도에서의

Fig. 2 IMC thickness in the solder joints as a aging time²⁷⁾

유지 시간 증가에 따라 Cu와의 계면에서 IMC의 두께가 증가함을 보고하였다.

Shin 등²⁷⁾은 Sn58Bi 솔더 페이스트와 ENIG 표면 처리된 기판 접합부의 시효시간에 따른 계면의 IMC 성장 및 접합 강도에 관하여 보고하였다. 이들은 Cu 층 위에 ENIG로 Ni-P 층을 5 μm , Au 층을 0.15 μm 무전해 도금하여, 금속간 화합물 층 두께를 125°C의 온도에서 등온 시효 열처리 시간에 따라 측정하였다 (Fig. 2 참조). 금속간 화합물 (IMC) 층의 두께는 열처리 전에는 약 1.8 μm 를 나타내었으며 열처리 시간이 증가함에 따라 점차 증가하여, 1000 시간 등온 시효 처리 이후에는 약 4 μm 두께까지 성장하였다.

계면에서의 IMC 두께 성장은 아래 그림과 같은 실험식(eq. 2)으로 주어진다.

$$X = \sqrt{Dt} + X_0 \quad (2)$$

단, X는 전체 IMC 두께, X_0 는 초기 IMC 두께, t는 시간, D는 IMC 층의 확산 계수이다.

Y.Kim 등²⁸⁾은 Sn58Bi 솔더의 기판측 Cu 패드의 표면처리에 따른 IMC 형상 변화에 대해 보고하였다. Fig. 3은 85°C/85RH% 조건에서 1000시간까지 시효처리 (aging)한 후, 솔더를 모두 에칭해 제거하고 Cu 패드부측 접합 계면을 위에서 내려다본 형상이다. OSP (organic solder preservative) 표면처리의 경우 구상의 미립자상의 Cu-Sn IMC (Cu_6Sn_5)가 형성되었으며, 1000시간 시효 후에도 구상의 Cu_6Sn_5 미립자의 크기는 큰 변화가 관찰되지 않았다. 반면 ENEPIG 처리의 경우 접합 초기에 조대한 막대상의 Ni_3Sn_4 IMC가 형성되었으며, 1000시간 시효 후에는 (Ni, Pd)₃(Sn, Bi)₄ IMC로 막대상이 약간 더 성장되고, 표면에 미세한 요철이 관찰되었다. ENIG 처리의 경우 다각형상의 Ni_3Sn_4 IMC가 형성되었으며, 85°C에서 1000시간 시효 후에

Fig. 3 Morphologies of etched IMC's with aging under 85°C/85RH% and various surface finishes²⁸⁾

는 (Au,Ni)(Sn,Bi)₄ IMC가 약간 성장되었음을 보고하였다.

5. 기계적 강도

Mokhtari 등²²⁾은 0.5wt% Ni 및 0.5wt% In 첨가로 Sn-58%Bi 솔더 접합부의 전단 강도를 증가시킬 수 있음을 보고하였다. 또한 이들의 연구결과에 따르면 0.5wt% Ni를 첨가한 경우, Ni₃Sn₄ IMC의 솔더 내 형성으로 인해 Sn-58%Bi 연신율이 감소하였다. 반면 0.5wt% In을 첨가한 경우, 덩플이 관찰되는 연성 파면을 나타냄을 보고하였다. 특히 In을 첨가한 경우 가장 큰 연신율을 나타내었다.

이들은 시효된 Sn58Bi 솔더 접합부의 파괴는 IMC를 따라 일어나는 것을 관찰하였으며 0.5In 및 0.5Ni를 첨가한 Sn58Bi 솔더 접합부의 파괴는 솔더/Cu 계면 IMC의 성장 억제로 솔더 내부 파괴를 일으킴을 확인하였다. 또한 Zn을 첨가하면 새로운 CuZn₂상을 형성하고 Ni 코팅 탄소 나노 튜브로 보강하면 인장강도와 연성이 향상되는 등 미세한 나노입자가 상(phase) 및 금속화합물 미세화에 영향을 주며, 이로 인해 솔더의 열적·기계적 특성, 미세경도, 크리프 저항성 등이 향상됨이 보고되었다^{30,31)}.

Wang 등¹⁸⁾은 Sn-38%Bi-1.5Sb-0.7Ag 벌크 솔더가 Sn58Bi 솔더에 비해 더 높은 강도를 가지며, 연신율은 유사함을 보고하였다 또한, 솔더 볼 전단 시험을 통해 Sn-38Bi-1.5Sb-0.7Ag 솔더가 Sn58Bi 솔더에 비해 125°C에서 40일까지 등온 시효 후 더 높은 전단

강도를 가짐을 확인하였다.

Shimokawa 등²⁹⁾은 Sn-57wt%Bi-1wt%Ag 솔더의 고온 강도를 평가하였는데, 100°C 이하의 온도에서 Sn57BiAg는 Sn37Pb에 비해 매우 우수한 크립 강도를 나타내었다. 또한 0~90°C 범위에서 1000 열사이클 특성 시험 결과, Sn37Pb에 비하여 발생한 균열 길이가 더 짧았다.

L. Shen 등²⁴⁾은 Cu 및 Ni 나노 입자를 첨가하여 나노 입자 증가에 따라 Sn58Bi의 크립 저항성이 증가함을 확인하였으며, 실험 결과 3wt% Cu와 1wt% Ni이 Sn58Bi 솔더의 크립 저항성을 가장 크게 증가시키는 것으로 보고하였다.

한편, K.Kim 등³²⁾은 SAC305, Sn58Bi, Sn58Bi epoxy solder 3종류의 솔더에 따른 전단력을 보고하였다 (Fig. 4 참조). Fig. 4에서 알 수 있듯이 SAC305, Sn58%Bi 그리고 에폭시 Sn58Bi솔더의 전단력은 각각 2.15N, 2.73N 및 4.88N의 값을 가졌다. 이때 에폭시 Sn58Bi 솔더의 전단력이 매우 높은 것은 솔더 주위에 형성된 에폭시 필렛이 솔더 볼을 지지해주기 때문이라고 보고하였다. 이들은 SAC305, Sn58Bi, 에폭시 Sn58Bi 솔더에 대해 낙하 시험을 실시하였는데 그 결과 SAC305, Sn58Bi, 에폭시 Sn58Bi의 낙하충격횟수는 각각 95회, 3회, 185회의 값을 가졌다. 따라서 낙하충격횟수는 전단 파괴에너지 경향과 일치함을 밝혔다. 에폭시 강화 솔더를 사용한 OSP 처리 기판이 ENIG와 ENEPIG 처리 기판에 비해 파괴 시까지 가장 많은 낙하 횟수를 기록하였다. 또한, Y.Kim 등²⁸⁾은 SAC305, Sn58Bi, 에폭시 Sn58Bi 솔더에 대해 기판의 Cu 패드 표면처리 및 85°C에서 시효시간에 따른 전단 시험을 실시하였다 (Fig. 5 참조). 이들에 의하면 Sn58Bi, 에폭시 Sn58Bi 솔더 모두 전단강도는 OSP > ENIG > ENEPIG 순서로 감소되었다.

Fig. 4 Shear force of the Sn58%Bi solder joints compared with that of SAC305³²⁾

Fig. 5 Shear strength of Sn58%Bi and Sn-58%Bi epoxy solder with various surface finishes and aging time²⁸⁾

6. 결 론

최근 전자부품의 플렉서블 기관의 증가 및 대형화로 인한 열변형 방지를 위하여 저온 솔더에 대한 요구가 높아지면서 저온 솔더의 대표적인 Sn58Bi계의 강도, 용점, 연성 개선 등에 대한 연구가 활발하다. 최근의 연구 결과를 정리해보면 현재는 Sn58Bi에 In 및 Ag 첨가를 통하여 Sn58Bi의 용점 강하 효과를 거두고 있다. 기존 Sn58Bi 무연 솔더에서 조대한 Bi로 인해 발생하는 단점인 취성을 개선하고 연성 및 인성을 향상시켜 취성 파괴 발생을 억제하고 있으며, 이외에도 Cu, Ni 등 다양한 원소를 소량 첨가하여 Bi 및 β -Sn 상을 미세화하는 연구들이 계속해서 발표되고 있다. 또한 이들 첨가 원소들은 접합 계면의 금속간 화합물 (IMC) 성장을 억제하여 취성인 IMC를 따라 파괴되는 정도를 줄이고, 연성인 솔더를 통해 파괴되는 경향을 증가시키는 바람직한 현상을 유도한다. 아울러, 기관 표면의 표면 처리에 따른 IMC 형상 변화도 연구되고 있는데 OSP 및 ENIG가 ENEPIG보다 우수한 결과를 보이고 있

다. 또한 에폭시 강화 Sn58Bi 솔더를 사용함으로써 전단강도 및 낙하강도를 증가시킬 수 있다는 연구 결과도 있다. 이처럼 Sn58Bi 솔더에 대한 다양한 개선 노력에도 불구하고 아직도 더 큰 연성과 인성, 낙하, 휨 특성 등이 요구되고 있어, 앞으로도 Sn-Bi 저온 솔더에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 과학기술정보통신부와 산업통상자원부가 공동 지원한 '나노융합2020사업(www.nanotech2020.org)'으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. [과제명: 자동차 전장 및 플렉서블 부품 접합용 고연성 저온 나노분산 솔더페이스트 기술개발 / 과제고유번호: R201901710]

ORCID: Hyejun Kang: <https://orcid.org/0000-0002-8903-6258>

ORCID: Jae Pil Jung: <https://orcid.org/0000-0002-4526-0442>

References

1. C. S. Kang and J. P. Jung, Micro-Joining, *Samsung books*, Seoul, Korea, ISBN 89-88197-51-8, (2004) 4.
2. M. Abtew and G. Selvaduray, Lead-free solders in microelectronics, *Mater. Sci. Eng. R*, 27 (5-6) (2000) 95-141. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00010-3)
3. R. W. Johnson, J. L. Evans, P. Jacobsen, J. R. Thompson and M. Christopher, The Changing Automotive Environment, High-Temperature Electronics, *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.* 27(3) (2004) 164-176. <https://doi.org/10.1109/TEPM.2004.843109>
4. A. K. Gain, Y. C. Chan, K. C. Yung, A. Sharif and L. Ali, Effect of Nano Ni Additions on the Structure and Properties of Sn-9Zn and Sn-8Sn-3Bi Solder in Ball Grid Array Packages, 2nd Electronics System integration Technology Conference, Greenwich, UK, (2008) *IEEE*, ISBN 9781424428137, 1291-1294. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2008.4684540>
5. K. Suganuma, S. J. Kim and K. S. Kim, High-Temperature Lead-Free Solders, Properties and Possibilities, *The Minerals, Met. Mater. Soc.* 61(1) (2009) 64-71. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0097-5>
6. Y. Plevachuk, W. Hoyer, I. Kaban, M. Köhler and R. Novakovic, Experimental study of density, surface tension, and contact angle of Sn-Sb-based alloys for high temperature soldering, *J. Mater. Sci.* 45 (2010) 2051-2056. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-4120-5>
7. M. Kamal and El. S. Gouda, Effect of zinc additions on structure and properties of Sn-Ag eutectic lead-free solder alloy, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 19 (2008) 81-84. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9289-2>
8. A. K. Gain, T. Fouzder, Y. C. Chan and W. K. C. Yung, Microstructure, kinetic analysis and hardness of Sn-Ag-

- Cu-1 wt% nano-ZrO₂ composite solder on OSP-Cu pads, *J. Alloys Compd.* 509(7) (2011) 3319-3325.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.12.048>
9. I. E. Anderson, Development of Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-Cu-X alloys for Pb-free electronic solder applications, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 18 (2007) 55-76.
<https://doi.org/10.1007/s10854-006-9011-9>
 10. L. Liu, P. Wu and W. Zhou, Effects of Cu on the interfacial reactions between Sn-8Zn-3Bi-xCu solders and Cu substrate, *Microelectronics Reliability*, 54(1) (2014) 259-264.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.003>
 11. H. R. Kotadia, P. D. Howes, S. H. Mannan, On the development of low melting temperature Pb-free solders, *Microelectron. Reliab.* 54(6-7) (2014) 1253-1273.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.02.025>
 12. J. P. Jung, Y. E. Shin and S. S. Lim, Pb-free Micro Soldering, *Samsung books*, Seoul, Korea, ISBN 89-88197-43-7, (2005) 8.
 13. J. P. Jung, Y. E. Shin, S. S. Lim, Pb-free Micro Soldering, *Samsung books*, Seoul, Korea, ISBN 89-88197-43-7, (2005) 11.
 14. W. Dong, Y. Shi, Z. Xia and Y. Lei, F. Guo, Effects of trace amounts of rare earth additions on microstructure and properties of Sn-Bi-based solder alloy, *J. Electron. Mater.* 37 (2008) 982-991.
<https://doi.org/10.1007/s11664-008-0458-8>
 15. Z. Wang, Q. K. Zhang, Y. X. Chen and Z. L. Song, Influences of Ag and In alloying on Sn-Bi eutectic solder and SnBi/Cu solder joints, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30 (2019) 18524-18538.
<https://doi.org/10.1007/s10854-019-02206-y>
 16. C. Zhang, S. D. Liu, G. T. Qian, J. Zhou, F. Xue, Effect of Sb content on properties of Sn-Bi solders, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24 (2014) 184-191
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63046-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63046-6)
 17. J. Xu, H. He, F. Zhang, Z. Zhao and Hu, Study of Sn-Bi-Cu Lead-free Solder, 10th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), *IEEE*, 9-12 December 2008, Singapore, (2008) 1375-1380.
<https://doi.org/10.1109/EPTC.2008.4763623>
 18. K. Wang, F. Wang, Y. Huang, K. Qi, Comprehensive Properties of a Novel Quaternary Sn-Bi-Sb-Ag Solder, Wettability, Interfacial Structure and Mechanical Properties, *Met.* 9(7) (2019) 791.
<https://doi.org/10.3390/met9070791>
 19. Y. E. Shin, S. S. Lim and J. P. Jung, Soldering, *Samsung books*, Seoul, Korea, ISBN 89-88197-16-X, (2002) 13.
 20. H. W. Miao and J. G. Duh, Microstructure evolution in Sn-Bi and Sn-Bi-Cu solder joints under thermal aging, *Mater. Chem. Phys.* 71(3) (2001) 255-271.
[https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00298-X](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00298-X)
 21. S. Sakuyama, T. Akamatsu, K. Uenishi and T. Sato, Effects of a third element on microstructure and mechanical properties of eutectic Sn-Bi solder, *Trans. Japan Inst. Electron. Packag.* 2(1) (2009) 98-103.
<https://doi.org/10.5104/jiepeng.2.98>
 22. O. Mokhtari and H. Nishikawa, Correlation between microstructure and mechanical properties of Sn-Bi-X solders, *Mater. Sci. Eng. A*, 651 (2016) 831-839.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.038>
 23. A. K. Gain and L. Zhang, Interfacial microstructure, wettability and material properties of nickel (Ni) nanoparticle doped tin-bismuth-silver (Sn-Bi-Ag) solder on copper (Cu) substrate, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 27 (2016) 3982-3994.
<https://doi.org/10.1007/s10854-015-4252-0>
 24. L. Shen, Z. Y. Tan and Z. Chen, Nanoindentation study on the creep resistance of SnBi solder alloy with reactive nano-metallic fillers, *Mater. Sci. Eng. A*, 561 (2013) 232-238.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.076>
 25. W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Fundamentals of Materials Science and Engineering (2nd edition) *Wiley and Sons*, Singapore, (2000) 252.
 26. Micro-soldering and Joining Technology, MPC, Korea Welding & Joining Society, *Ace Inc.*, (2018) 5-10, ISBN 979-11-89547-00-4.
 27. H. P. Shin, B. W. Ahn, J. H. Ahn, J. G. Lee, K. S. Kim, D. H. Kim and S. B. Jung, Interfacial Reaction and Joint Strength of the Sn-58%Bi Solder Paste with ENIG Surface Finished Substrate, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 30(5) (2012) 458-463.
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.5.458>
 28. Y. Kim, The improvement of bonding strength with an addition of epoxy and the effects of various surface finishes on Sn-58%Bi epoxy solder, 13th International Symposium on Microelectronics and Packaging (ISMP), Seoul, Korea, *KMEPS* (2014).
 29. H. Shimokawa, T. Soga, K. Serizawa, K. Katayama and I. Shohji, Evaluation on mechanical properties of Sn-Bi-Ag solder and reliability of the solder joint, *Trans of JIEP*, 8(1) (2015) 46-54.
<https://doi.org/10.5104/jiepeng.8.46>
 30. 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 (2014) 63-70.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.015>
 31. L. Z. Yang, W. Zhou, Y. H. Liang, W. Q. Cui and P. Wu, Improved microstructure and mechanical properties for Sn58Bi solder alloy by addition of Ni-coated carbon nanotubes, *Mater. Sci. Eng. A*, 642 (2015) 7-15.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.080>
 32. K. Y. Kim, H. S. Jeong, W. R. Myung and S. B. Jung, Microstructures and Drop Impact Test of SAC305, Sn58%Bi and Epoxy Sn58%Bi Solder Joint on the OSP Surface Finished PCB Substrate, *JWJ*. 36(2) (2018) 14-200.

- <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.2.3>
33. B. J. Lee, C. S. Oh and J. H. Shim, Thermodynamic assessments of the Sn-In and Sn-Bi binary systems, *J. Electron. Mater.* 25 (1996) 983-991.
<https://doi.org/10.1007/BF02666734>
34. S. N. ALAM, N. JINDAL and N. NAITHANI, Effect of addition of Cu on the properties of eutectic Sn-Bi solder alloy, *Mater. Sci. Poland*, 37(2) (2019) 212-224.
<https://doi.org/10.2478/msp-2019-0032>