SAC305 솔더, Sn58%Bi 솔더 및 에폭시 Sn58%Bi 솔더와 OSP표면처리된 PCB기판 접합부의 미세조직 및 낙하충격시험 평가

김경열* · 정학산* · 명우람** · 정승부*,†

*성균관대학교 신소재공학부

**성균관대학교 나노과학기술학과

Microstructures and Drop Impact Test of SAC305, Sn58%Bi and Epoxy Sn58%Bi Solder Joint on the OSP Surface Finished PCB Substrate

Kyung-Yeol Kim*, Haksan Jeong*, Woo-Ram Myung**, and Seung-Boo Jung*,†

*School of Advanced Materials Science & Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

**SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

†Corresponding author : sbjung@skku.edu

(Received February 26, 2018 ; Revised March 29, 2018 ; Accepted April 23, 2018)

Abstract

Lead free Sn3.0%Ag0.5%Cu (SAC305) solder and low temperature Sn58%Bi solder have been widely used to replace lead based solder alloys. Because Sn58%Bi solder has poor ductility and shock absorbance ability, previous researches have tried to improve its mechanical properties by adding additional elements, reinforcements, carbon nano tube (CNT) and polymer. The bonding strength and drop impact reliability of SAC305 solder, Sn58%Bi and epoxy contained Sn58%Bi solder (epoxy Sn58%Bi solder) assembled on the OSP surface finished PCB substrate were investigated using low speed shear and board drop impact tests. After soldering, Cu6Sn5 intermetallic compound (IMC) was formed in the solders and OSP surface finished PCB substrate joints. Bonding strength and drop reliability of epoxy Sn58%Bi solder had superior mechanical properties than those of SAC305 solder and Sn58%Bi solder. The crack in the solder joint of SAC305 after board drop impact testing takes place within the IMC layer. However, the crack at the solder joint of the Sn58%Bi after board drop impact testing occurred on the interface between IMC layer and Sn58%Bi solder and the crack in the solder joint of the epoxy Sn58%Bi presented within the solder, respectively.

Key Words : Sn3.0%Ag0.5%Cu, Epoxy Sn58%Bi, Drop impact, Bonding strength, Microstructure

1. 서 론

전자 패키징 분야에서 주로 사용되었던 유연솔더 (SnPb)계 솔더는 낮은 가격, 우수한 기계적 특성, 전기적 특성 및 접합부의 신뢰성 등으로 인하여 오랫동안 사용되어 왔다¹⁾. 그러나 Pb의 인체 유해성과 환경오염적인 문제로 Pb의 사용을 규제하는 regulation of certain hazardous substances (RoHS), waste elec-

trical and electronic equipment (WEEE) 등의 환경 규제에 인하여 무연솔더 재료의 필요성이 제기되었다²⁻⁶⁾. SnPb계 유연솔더를 대체할 솔더로 SnAgCu계, SnAg계, SnCu계 그리고 저융점을 갖는 Sn58%Bi계 솔더 등 다양한 조성의 무연솔더들이 연구되어왔다⁷⁻⁹⁾. 많은 무연솔더 합금중에서 가장 널리 상용적으로 사용되는 Sn3.0%Ag0.5%Cu 솔더(SAC305)는 상대적으로 우수한 솔더링성과 높은 내열피로 특성을 갖고 있다. 그러나, SAC305 솔더는 Ag가 함유되어 있어 고

가이며, SnPb계 솔더에 비하여 40도 정도의 융점이 상승하여 종래의 유연솔더 합금에 비하여 높은 솔더링 공정온도로 인하여 솔더계면에서 금속간화합물 (IMC)의 빠른 성장 및 부품의 열화현상을 일으킬 가능성이 높다¹⁰⁾. 특히, 전자패키지 부품의 경,박,단,소화를 위하여 multichip packages (MCP), Package-on-Package (POP)와 같이 구조가 복잡하고 다양한 부품이 사용되면서 사용중 혹은 제조공정중에 warpage 문제가 대두되면서 낮은 융점의 솔더재료 필요성이 대두 되었다¹¹⁾. 따라서 이러한 SAC계 솔더합금의 단점인 높은 공정 온도를 해결하기 위하여 저융점 합금인 Sn58%Bi 솔더 재료가 많이 연구되어 왔다. Sn58%Bi 솔더는 종래의 유연솔더(SnPb계 솔더)에 비하여 낮은 융점(139 °C)을 갖고 있으며, 유연솔더에 비하여 더욱 우수한 탄성계수 및 인장강도 등을 갖는다. 또한, 저온 솔더링 공정이 가능하므로 전자부품의 열화현상이나 warpage문제를 줄일 수 있다¹⁰⁾. 그러나, Sn58%Bi 솔더의 취성으로 인하여 충격을 쉽게 완화하거나 흡수하지 못하여 기계적 특성은 우수하지만 신뢰성이 떨어지는 단점이 존재한다¹²⁾. 이러한 Sn58%Bi 솔더의 취성적인 성질을 향상시키기 위하여 CNT, 강화재료, 미량의 첨가원소 혹은 에폭시와 같은 고분자를 첨가하여 기계적 강도 및 신뢰성을 향상시키는 많은 연구가 진행되고 있다¹⁴⁻¹⁶⁾. 본 연구에서는 에폭시를 첨가하여 Sn58%Bi 솔더의 취성을 향상시켜 기계적 특성을 향상하고자 하였다. 따라서, 에폭시를 첨가한 Sn58%Bi 솔더의 향상된 특성 평가를 위해 SAC305 솔더와 저융점 솔더인 Sn58%Bi 솔더, 에폭시가 포함된 Sn58%Bi(에폭시 Sn58%Bi) 솔더의 기계적 특성을 저속전단시험과 낙하충격시험으로 평가하였다.

2. 실험 방법

SAC305 (TLF-204-151, TAMURA Co., Japan), Sn58%Bi (TLF-401-11, TAMURA Co., Japan), 에폭시 Sn58%Bi (SAM10-401-27, TAMURA Co., Japan) 총 3종류의 솔더페이스트(solder paste)를 스크린프린팅 공정으로 organic solderability preservative(OSP) 표면처리된 PCB기판위에 인쇄한 뒤 reflow 공정으로 솔더접합부를 형성하였다. SAC305 솔더페이스트의 융점은 약 220 °C, Sn58%Bi 솔더페이스트의 융점은 약 139 °C이었다. 저속전단시험용 시편은 Fig. 1과 같은 공정으로 제작하였다. 저속전단시험용 기판은 FR-4 기판(PCB substrate) 위에 200 μm 직경의 Cu pad를 형성하고 OSP로 표면처리하였다. 솔더링공정 이전에 에탄올을 이용하여 기판의 오염물질을 제거한 후, 스크린프린트 방법을 이용

Fig. 1 Schematic of reflow process (a) shear test sample and (b) board-level drop test sample

하여 솔더 페이스트를 OSP Cu pad 위에 도포하였다. 도포된 솔더페이스트로 솔더볼과 솔더접합부를 형성하기 위하여 IR 리플로우 머신 (RF-430-N2, Japan Pulse Laboratory Co. Ltd., Japan)을 사용하여 5분간 리플로우 하였다. 낙하충격시험 시편은 직경 380 μm 의 Cu pad에 OSP 표면처리한 FR-4 PCB 기판에 스크린프린팅 방법으로 솔더 페이스트를 도포한 후, Fig. 1(b)와 같이 component를 정렬한 후 리플로우를 실시하였다. Sn58%Bi 솔더페이스트와 에폭시 Sn58%Bi 솔더페이스트의 리플로우 최고공정온도는 Fig. 2와 같이

Fig. 2 Profile of reflow condition

Table 1 JEDEC standard conditions for drop impact test (JESD22-B104-C)

Service condition	Acceleration peak (G)	Pulse durations (m/s)
H	2900	0.3
G	2000	0.4
B	1500	0.5
F	900	0.7
A	500	1.0
E	340	1.2
D	200	1.5
C	100	2.0

190 °C, SAC305 솔더페이스트의 최고공정온도는 265 °C 조건에서 5분간 리플로우 공정으로 제조되었다. 솔더 접합부의 전단력 및 낙하신뢰성평가는 저속전단 시험과 낙하충격시험방법으로 평가하였다. 저속전단시험은 전단 시험기 (Nordson Dage Series 4000 multipurpose bond tester, Nordson Corporation, USA)를 이용하여 JESD22-B117B 규격¹³⁾에 따라 높이 30 μm , 속도 200 $\mu\text{m/s}$ 에서 진행하였다. 또한, 본 실험에서 사용한 낙하충격신뢰성은 낙하충격시험기 (SD-10, L.A.B. Equipment Inc., USA)를 이용하여 Table 1의 JESD22-B104C 규격¹⁴⁾의 F 조건으로 시행하였다. 저속전단시험 및 낙하충격시험의 모식도 및 실험조건을 Fig. 3에 나타내었다. 저속전단시험과 낙하충격시험 후 솔더의 파단면과 미세조직 및 화학조성은 주사전자현미경 (Hitachi, S-3000H, Japan)와 energy dispersive spectroscopy (EDS, Horiba EMAX-7021-H, England)를 사용하

Fig. 3 Schematic of (a) shear test and (b) board-level drop test

여 분석을 실시하였다.

3. 실험 고찰

Fig. 4는 저속전단시험용 3종류의 솔더볼 시편을 리

Fig. 4 SEM micrographs of the SAC305 and Sn58%Bi solder joint after reflow process; 60° tilt view of (a) SAC305 solder, (b) Sn58%Bi solder and (c) Epoxy Sn58%Bi solder, cross-sectional view of (d) SAC305 solder, (e) Sn58%Bi solder and (f) Epoxy Sn58%Bi solder

플로우 후 60°의 각도에서 주사전자현미경으로 관찰한 형상이다. 솔더종류와 상관없이 솔더볼들은 평균적으로 180 μm 의 직경을 갖는 것을 확인하였다. 에폭시 Sn58%Bi 솔더의 솔더볼 형상은 Fig. 4-(c)와 (f)에서 알 수 있듯이 솔더볼 주변에 에폭시 필렛이 형성되었다. 이때, 에폭시 필렛의 높이는 80~100 μm 이다. Fig. 5는 리플로우 후 솔더 접합부의 단면을 관찰한 결과이다. EDS 분석 결과 3종류의 솔더계면에서 형성된 금속간화합물은 Cu_6Sn_5 로 확인되었으며 Cu_6Sn_5 금속간화합물 평균두께는 SAC305 솔더에서 2.81 μm , Sn58%Bi 솔더에서 0.50 μm 그리고 에폭시 Sn58%Bi 솔더에서는 0.61 μm 로, SAC305 솔더계면에 형성된 IMC 층이 Sn58%Bi 솔더의 계면에 형성된 것에 비하여 약 5배정도 두꺼운 것을 알 수 있다. SAC305 솔더는 Sn58%Bi 솔더에 비하여 Sn rich 솔더이기 때문에 솔더계면에서 Cu pad와 반응할 수 있는 Sn의 양이 Sn58%Bi 솔더에 비하여 많지만, Sn58%Bi 솔더의 Sn과 Bi는 유사한 비율의 공정조직으로 존재하므로 상대적으로 Cu와 반응할 수 있는 Sn의 양이 적기때문에 SAC305 솔더계면에 형성된 Cu_6Sn_5 금속간화합물의 두께는 Sn58%Bi 솔더계에 생성된 IMC 층 두께보다 더욱 두꺼웠다. Fig. 6에 3종류의 솔더에 따른 전단력 및 파괴에너지(fracture energy)를 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 SAC305, Sn58%Bi 그리고 에폭시 Sn58%Bi 솔더의 전단력은 각각 2.15 N, 2.73 N 및 4.88 N의 값을 가졌다. 이때, 에폭시 Sn58%Bi 솔더의 전단력이 매우 높은 것은 솔더 주위에 형성된 에폭시 필렛이 솔더볼을 지지해주기 때문이다. 또한, 파괴에너지는 전단시험 후 F-x 그래프를 적분을 하여 구하였다. Fig. 6-(b)에서 알 수 있듯이 SAC305 솔더, Sn58%Bi 솔더 그리고 에폭시 Sn58%Bi 솔더의 파괴에너지는 각각 0.30 mJ, 0.14mJ, 0.61 mJ 로 평가되었다. Sn58%Bi 솔더의 우수한 기계적특성으로 인하여 SAC305 솔더보다 전단력은 높지만, 취성으로 인하여 파괴에너지는 감소했다. 그러나 에폭시가 함유된 Sn58%Bi 솔더의 파괴에너지는 Fig. 4-(c)와 (f)에서 보여주듯이 솔더주위

Fig. 6 (a) Shear force of solder joints and (b) Fracture energy of solder joints

에 잔존하는 에폭시 필렛이 솔더볼을 지지하기 때문에 Sn58%Bi 솔더의 취성은 개선되고 접합강도 및 파괴에너지는 증가하였다. Fig. 7은 저속전단시험 후 솔더의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 파단면이다. Fig. 7-(a)에서 알 수 있듯이 SAC305 솔더에서는 주로 솔더 내부에서 파단이 발생하며 확대를 하여 분석한 붉은 사각형과 같은 연성 파단면이 관찰되었다. 반면, Fig. 7-(b)의 Sn58%Bi 솔더의 파단면은 붉은 사각형과 같이 연성과 취성조직이 혼합된 파단면이 존재하지만 SAC305에 비하여 상대적으로 더욱 넓은 영역의 취성 파단면이 관찰되었다. Fig. 7-(c)에서 볼 수 있듯이, 에폭시 Sn58%Bi 솔더의 파단면에서도 붉은 사각형과 같이 연성조직과 취성조직이 혼합되어 관찰되지만

Fig. 5 Cross-sectional SEM micrographs of the solder joints; (a) SAC305, (b) Sn58%Bi and (c) Epoxy Sn58%Bi solder

Fig. 7 Fracture surfaces after shear test (a) SAC305 solder, (b) Sn58%Bi solder and (c) Epoxy Sn58%Bi solder

주변에 잔존하는 에폭시 필렛들이 솔더볼과 함께 lift될 때 노란색 사각형과 같이 취성 파단면이 관찰되었다. 이러한 에폭시 필렛의 lift때문에 에폭시 Sn58%Bi 솔더는 상대적으로 높은 전단력과 높은 파괴에너지를 가지는 것으로 사료된다. 따라서, SAC305 솔더는 전반적인 연성 파단때문에 Sn58%Bi 솔더보다 높은 파괴에너지를 나타내었으며, 에폭시가 함유된 Sn58%Bi 솔더가 상대적으로 높은 접합강도와 파괴에너지를 갖는 것은 전단시험시 응력이 에폭시로 분산되기 때문으로 사료된다¹⁵⁻¹⁷. 또한, Sn58%Bi 솔더에 취성 파단면이 발생하고, SAC305 솔더에 비하여 낮은 파괴에너지를 갖는 것은 Sn58%Bi 솔더계면에 형성된 Bi rich 조직이 상대적으로 SAC305의 Sn rich상에 비해 더욱 취성적인 특성을 갖기 때문이다¹⁸. Fig. 8은 SAC305 솔더, Sn58%Bi 솔더, 에폭시 Sn58%Bi 솔더와 OSP 표면처리된 PCB기판을 솔더링한 시편의 board level drop impact test를 각 시편당 3회씩 실시한 뒤 평균 값을 나타낸 그래프다. SAC305 솔더, Sn58%Bi 솔더, 에폭시 Sn58%Bi 솔더의 낙하충격횟수는 각각 95회, 3회, 185회의 값을 가졌다. 낙하충격신뢰성은 Fig. 6-(a)에서 알 수 있듯이 전단력이 높은 Sn58%Bi 솔더가 SAC305 솔더에 비하여 높은 낙하충격횟수를 나타낼 것을 예상했으나, Fig. 6-(b)의 파괴에너지 경향과 일치하였다. 즉, 파괴에너지는 재료의 파괴에 필요한 전체 에너지를 의미하고 낙하충격시 재료가 파단되기까지

Fig. 8 Average number of drops to failure

내부에 축적할 수 있는 에너지량으로 솔더의 신뢰성 평가가 가능하다. 본 연구에서는 Sn58%Bi 솔더, SAC305 솔더 그리고 에폭시 Sn58%Bi 솔더 순서로 증가하며 솔더의 파괴에너지 값과 낙하충격 시험의 경향성은 일치하였다. Fig. 9는 낙하충격시험 후 솔더접합부의 파단면을 관찰한 결과이다. Fig. 9-(a)는 SAC305 솔더의 파단면으로, 파단은 주로 Cu_6Sn_5 로 이루어진 금속간화합물 층과 Cu pad의 계면에서 발생하는 것을 확인하였다. 한편 Sn58%Bi 솔더와 에폭시 Sn58%Bi 솔더는 Fig. 9-(b)와 (c)에서와 같이 Sn58%Bi 솔더에서는 금속간화합물과 솔더사이의 계면에서 파단이 발생하고, 에폭시 Sn58%Bi 솔더에서는 솔더내부에서 크랙이 발생하였다. Ha 등¹⁹⁻²¹의 연구보고 등에 의하면

Fig. 9 Cross-sectional SEM micrographs after drop test (a) SAC305 solder, (b) Sn58%Bi solder and (c) epoxy Sn58%Bi solder

일반적으로 금속간화합물이 임계두께 이상으로 성장할 때 IMC 층에서 입계파단이 주로 발생하여 접합강도는 감소한다. 따라서, 본 연구의 SAC305와 OSP PCB기판의 계면에 생성된 IMC층은 Sn58%Bi와 OSP PCB기판의 계면에 생성된 IMC 층의 두께보다 5배정도 두꺼웠기 때문에 IMC 층에서 파단이 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 SAC305 솔더, Sn58%Bi 솔더 그리고 에폭시가 함유된 Sn58%Bi 솔더를 OSP 표면처리된 Cu pad 위에 screen printing으로 인쇄하고 리플로우 공정으로 솔더볼 및 솔더접합부를 형성하였다. 3가지 종류의 솔더시편은 저속전단시험방법으로 전단력을 평가하였고, PCB component 부품을 실장하여 낙하충격시험법으로 솔더접합부의 충격신뢰성을 평가하였다. 리플로우 후, 에폭시 유무와 관계없이 3종류의 솔더볼 직경은 약 180 μm 이며, 3종류의 솔더와 OSP 표면처리된 Cu pad의 계면에는 Cu_6Sn_5 금속간화합물이 형성되었다. 저속전단시험에서 SAC305 솔더, Sn58%Bi 솔더 그리고 에폭시가 함유된 Sn58%Bi 솔더 순서로 전단력이 증가하였다. 파괴에너지는 Sn58%Bi 솔더, SAC305 솔더 그리고 에폭시가 함유된 Sn58%Bi 솔더 순서로 증가하였다. 저속전단시험 후 관찰한 SAC305 솔더의 파단면은 연성파괴 파면이 주로 관찰되지만, Sn58%Bi 솔더의 파단면은 취성파괴와 연성파괴가 혼합된 파단면이 관찰되었다. 또한, 에폭시가 함유된 Sn58%Bi 파단면도 취성파괴와 연성파괴가 혼합된 조직으로 관찰되지만 솔더볼 주위에 형성된 에폭시 필렛이 전단응력을 분산시키고 기계적 특성을 향상시켜 높은 전단력과 파괴에너지가 나타나는 것으로 사료된다. 낙하충격시험 결과, Sn58%Bi 솔더, SAC305 솔더 그리고 에폭시가 첨가된 Sn58%Bi 솔더 순으로 낙하충격 신뢰성이 증가하는 것은 솔더 주위에 형성된 에폭시의 필렛이 응력을 분산하여 충격을 흡수하기 때문이며, 파괴에너지의 경향과 일치하였다. 낙하충격시험 후 단면분석에서 알 수 있듯이 SAC305 솔더접합부의 파단면은 Cu_6Sn_5 금속간화합물 층에서 주로 파단이 발생하였고, Sn58%Bi 솔더접합부는 Cu_6Sn_5 금속간화합물과 솔더사이의 계면에서 발생하며 에폭시 Sn58%Bi솔더에서는 솔더내부에서 주로 크랙이 발생하였다.

ORCID: Kyung-Yeol Kim: <https://orcid.org/0000-0001-9768-2949>
 ORCID: Haksan Jeong: <https://orcid.org/0000-0003-4823-284X>
 ORCID: Seung-Boo Jung: <https://orcid.org/0000-0002-7360-9859>

References

1. J.W. Yoon and S.B. Jung, Investigation of interfacial reactions between Sn-5Bi solder and Cu substrate, *J. Electron. Mater.*, 359 (1-2) (2003), 202-208
[https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00291-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00291-3)
2. J.W. Yoon, C.B. Lee and S.B. Jung, Growth an Intermetallic Compound Layer with Sn-3.5Ag-5Bi on Cu and Ni-P/Cu during Aging Treatment, *J. Electron. Mater.*, 32 (11) (2003), 1195-1202
<https://doi.org/10.1007/s11664-003-0011-8>
3. J.W. Yoon, W.C. Moon and S.B. Jung, Interfacial reaction of ENIG/Sn-Ag-Cu/ENIG sandwich solder joint during isothermal aging, *Microelectron. Eng.*, 83 (11-12) (2006), 2329-2334
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.10.027>
4. J.J. Soh, D.S. Shim and W.B. Byung, Technical trend of Restriction of Hazardous Substances Directive(RoHS), *Conference of The Korean Institute of Electrical Engineering*, (2009), 1289-1290
5. J. Glazer, Microstructure and Mechanical Properties of Pb-Free Solder Alloys for Low-Cost Electronic Assembly, A Review, *J. Electron. Mater.*, 23 (8) (1994), 693-700
<https://doi.org/10.1007/BF02651361>
6. S.W. Kim, J.W. Yoon and S.B. Jung, Interfacial Reactions and Shear Strengths between Sn-Ag-based Pb-Free Solder Balls and Au/EN/Cu metallization, *J. Electron. Mater.*, 33 (10) (2004), 1182-1189
<https://doi.org/10.1007/s11664-004-0121-y>
7. T.Y. Lee, W.J. Choi, K.N. Tu and J.W. Jang, Morphology, kinetics, and thermodynamics of solid-state aging of eutectic SnPb and Pb-free solders (Sn-3.5Ag, Sn-3.8Ag-0.7Cu and Sn-0.7Cu) on Cu, *J. Mater. Res.*, 17 (2) (2002), 291-301
<https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0042>
8. S.O. Ha, S.S. Ha, J.B. Lee, J.W. Yoon, J.H. Park, Y.C. Chu, J.H. Lee, S.J. Kim and S.B. Jung, Drop reliability evaluation of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder joint with OSP and ENIG surface finishes, *J. Microelectron. Package Soc.*, 16 (1) (2009), 33-38
9. J.W. Yoon, C.B. Lee and S.B. Jung, Interfacial Reactions Between Sn-58 mass%Bi Eutectic Solder and (Cu, Electroless Ni-P/Cu) Substrate, *Mater. Trans.*, 43 (8) (2002), 1821-1826
10. C. Wu, J. Shen, C. Peng, Effects of trace amounts of rare earth additions on the microstructures and interfacial reactions of Sn57Bi1Ag/Cu solder joints, *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, 23 (1) (2012), 14-21
<https://doi.org/10.1007/s10854-011-0383-0>
11. J. Wang, L. Wen, J. Zhou, M. Chung, Mechanical properties and joint reliability improvement of Sn-Bi alloy, *13th Electronics Packaging Technology Conference*, (2011), 492-496

- <https://doi.org/10.1109/EPTC.2011.6184470>
12. C. Fuchs, T. Schreck, M. Kaloudis, Interfacial reactions between Sn-57Bi-1Ag solder and electroless Ni-P/immersion Au under solid-state aging, *J. Mater. Sci.*, 47 (9) (2012), 4036-4041
<https://doi.org/10.1007/s10853-012-6257-x>
 13. JEDEC Solid State Technology Association, JESD22-B117B "Solder Ball Shear" (2014)
 14. JEDEC Solid State Technology Association, JESD22-B104C "Mechanical Shock" (2004)
 15. J. Kim, W.R. Myung and S.B. Jung, Effect of Aging treatment and Epoxy on Bonding Strength of Sn-58Bi solder and OSP-finished PCB, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21 (4) (2014), 97-103
<https://doi.org/10.6117/kmepps.2014.21.4.097>
 16. W.R. Myung, Y. Kim, K.Y. Kim and S.B. Jung, Drop Reliability of Epoxy-contained Sn-58 wt.%Bi Solder Joint with ENIG and ENEPIG Surface Finish Under Temperature and Humidity Test, *J. Electron. Mater.*, 45 (7) (2016), 3651-3658
<https://doi.org/10.1007/s11664-016-4517-2>
 17. W.R. Myung, Y. Kim and S.B. Jung, Mechanical property of the epoxy-contained Sn-58Bi solder with OSP surface finish, *J. Alloys Compd.*, 615 (1) (2014), S411-417
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.078>
 18. J.S. Hwang, Environment-friendly electronics, lead-free technology. *Electrochemical Publications Limited*, (2001)
 19. S.S. Ha, J.W. Kim, J.H. C, W.C. Moon, T.H. Hong, C.S. Yoo, J.H. Moon and S.B. Jung, Thermo-Mechanical Reliability of Lead-Free Surface Mount Assemblies for Auto-Mobile Application, *Journal of KWJS*, 24 (6) (2006), 21-27
 20. Y. Y. Wei and J. G. Duh, Effect of thermal ageing on (Sn-Ag, Sn-Ag- Zn)/PtAg, Cu/Al₂O₃ solder joints, *J. Mater. Sci. Mater. El.*, 9 (5) (1998), 373-381
<https://doi.org/10.1023/A:1008940311075>
 21. S. Choi, T. R. Bieler, J. P. Lucas and K. N. Subramanian, Characterization of the growth of intermetallic interfacial layers of Sn-Ag and Sn-Pb eutectic solders and their composite solders on Cu substrate during isothermal long-term aging, *J. Electron. Mater.*, 28 (11) (1999), 1209-1215
<https://doi.org/10.1007/s11664-999-0159-y>