

# 태양광 리본용 $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$ 무연 솔더의 특성에 미치는 Ag의 영향

정주현, 조태식<sup>a</sup>

경북대학교 과학기술대학 나노소재공학부 신소재공학전공

## Effects of Ag on the Characteristics of $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$ Lead-free Solder for Photovoltaic Ribbon

Joo-Hyeon Jeong and Tae-Sik Cho<sup>a</sup>

Department of Nano Materials Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received September 27, 2016; Revised January 2, 2017; Accepted January 9, 2017)

**Abstract:** We have studied the effects of Ag on the characteristics of  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  lead-free solders for photovoltaic ribbon. Ag atoms in the solder formed an alloy phase of  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  after reacting with some part of Sn atoms, while they did not react with Bi atoms, but decreased the mean size of Bi solid phase and the thickness of solder. When Ag atoms of 3.0 wt% was added to eutectic  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  solder, it showed the optimally useful results that the peel strength of photovoltaic ribbon greatly increased and the sheet resistance of the solder decreased. In the meanwhile, the eutectic  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  solder showed a low melting temperature of 138.9°C, and showed a very similar result regardless of the added amount of Ag atoms.

**Keywords:** Photovoltaic ribbon, Eutectic  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  lead-free solder, Ag addition, Enhancement of peel strength

### 1. 서론

최근 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 태양광 에너지는 친환경적이고 거의 무한정이라는 장점 때문에 중요성이 증가되고 있다 [1,2]. 그림 1(a)에는 한 개의 태양전지 모듈(solar module) 안에서 셀(cell)과 리본(ribbon)의 모식도를 나타내었다. 태양광 리본은 셀과 셀을 연결하는 전선으로서, 일반적으로 인터커넥터(interconnector)와 버스바(bus bar)로 구분되어 사용된다 [3-5]. 외부환경에 약 20년 이상 노

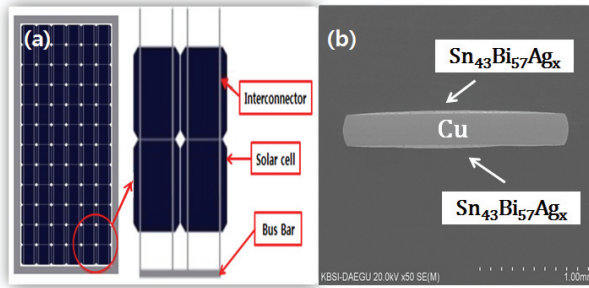
출되어 사용되는 태양전지 모듈에서, 셀과 리본과의 접착 강도(peel strength)는 태양전지의 장수명과 작업 안정성에 중요한 영향을 줄 수 있다 [6,7]. 하지만 태양광 실리콘(Si) 셀과 리본과의 접착성이 좋지 않아서, 테빙(tabbing) 공정 시 은(Ag) 페이스트를 셀 위에 도포하여 리본과 접착하여 사용되고 있다 [8-10].

현재 국내에서 태양광 리본은 내부 Cu리본 위에 Sn-Pb계 솔더를 용융 도금하여 주로 제조되고 있다 [11,12]. Sn-Pb계 솔더는 녹는점이 낮고 가격이 저렴한 장점을 갖지만 [13,14], 솔더에 함유된 납(Pb) 성분이 산성비와 반응하여 인체에 나쁜 해를 끼친다 [15,16].

2006년 7월부터 시행된 유해물질규제지침(RoHS) 법령은 유럽에 수출되는 전기전자제품 내에 존재하는 Pb, Hg, Cd,  $\text{Cr}^{6+}$  등 유해물질 사용을 규제하고 있

a. Corresponding author; [cts@knu.ac.kr](mailto:cts@knu.ac.kr)

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.  
 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.



**Fig. 1.** (a) Schematic diagram of a solar module and (b) cross-section photograph of a ribbon.

다 [17]. 이러한 이유로 현재 납을 첨가하지 않은 태양광 리본용 무연(Pb-free) Sn-Bi계 [18,19], Sn-Ag계 [20-22], Sn-Zn계 [23,24] 솔더들에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 공정(eutectic) 솔더에 Ag를 소량 첨가하는 연구들도 제안되고 있다 [25,26]. 그러나 태양광 리본용  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더의 특성에 미치는 소량 첨가되는 Ag의 영향에 관한 구체적이고 정량적인 연구결과는 발표되어 있지 않다. 그림 1(b)에는 Cu리본 위에  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%)계 무연 솔더를 수십  $\mu\text{m}$ 두께로 용융 도금하여 제조된 태양광 리본의 단면을 나타내었다. 본 논문에서는  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 무연 솔더로 도금된 태양광 리본의 특성에 미치는 Ag의 영향을 연구하였다. 이를 위하여  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 공정 솔더에 Ag를 첨가함에 따른 결정구조, 모폴로지(morphology), 열분석 결과들과 접착강도, 면저항 등 리본의 물성과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

태양광 리본 시편은 Cu리본의 표면에  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 공정 조성을 기준으로 Ag를 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 wt% 소량 첨가한 솔더를 220°C의 도금조에서 수직으로 용융 도금(hot dipping)하여 제조되었다. Cu리본은 폭이 2 mm이고 두께가 0.2 mm인 (주)산코코리아 제품을 사용하였다. 태양광 리본 시편은 용융 도금조에서 수직으로 5 mm/sec의 도금속도로 제조되었다.

$\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더로 도금된 태양광 리본은 결정구조 분석, 미세조직과 조성 분석, 열분석, 접착강도, 그

리고 면저항을 측정하였으며, Ag 첨가량에 따른 변화를 고찰하였다. X-선회절기(x-ray diffractometer, XRD)를 사용하여 리본용 시편의 결정상과 결정구조를 분석하였다. 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 리본 시편의 표면과 단면 미세조직을 관찰하였으며, 보다 선명한 사진을 얻기 위하여 BSE법을 사용하였다. 추가로 에너지 분산 분광기(energy dispersive spectroscopy, EDS)를 사용하여 조성 분석과 매핑(mapping) 사진을 얻었다. 또한, 열분석기(differential thermal analysis, DTA)를 사용하여 1°C/min의 승온속도로 각 조성에서 솔더의 용융 온도를 정밀하게 측정하였다.

한편, 접착강도 측정은 Ag판 위에 플럭스(flux)를 도포한 후, 250°C에서 접착한 태양광리본 시편을 접착강도 측정기를 사용하여 180° 측정방법으로 수행되었다. 일반적으로 테빙 공정 시 Ag 페이스트를 실리콘 셀 위에 도포하여 리본과 접착하고 있다 [4,5]. 그러나 Ag 페이스트를 사용하면 Ag 페이스트의 일정한 두께 조절이 어렵고, 얇은 150~180  $\mu\text{m}$  두께의 실리콘 셀 반대면의 접착강도를 추가로 고려해야하는 단점이 존재한다. 본 연구에서는 Ag 페이스트 대신에 두께가 1 mm로 일정한 Ag판(sheet)을 사용하여 태양광 리본에 도금된 솔더의 접착강도를 직접적으로 측정하였다.  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더로 도금된 리본과 Ag판 사이의 접착강도는 5회 측정하여 평균값을 사용하였다. 접착강도는 솔더층의 두께에 비례하기 때문에, 태양광 리본의 단면 SEM사진으로부터  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더층의 두께를 측정하여 보정하였다. 또한, 표면저항측정기(4 point probe)를 사용하여  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더의 각 조성에서 솔더 표면의 면저항(sheet resistance)을 측정하였다. 면저항은 6회 측정하여 평균값을 사용하였다(measure count 100).

## 3. 결과 및 고찰

그림 2에는 Ag 첨가량에 따른  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 무연 솔더로 도금된 태양광 리본의 결정구조를 분석하기 위한 XRD 결과를 나타내었다. 태양광 리본 내부의 Cu리본에 해당하는 Cu(111) 회절피크는  $2\theta=43.3^\circ$ 에서 강하게 관찰되었지만,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더층의 약한 회절피크들을 강조하기 위하여 x-축인  $2\theta$  구간에서 제외하였다. Ag를 첨가하지 않은  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 공정 솔

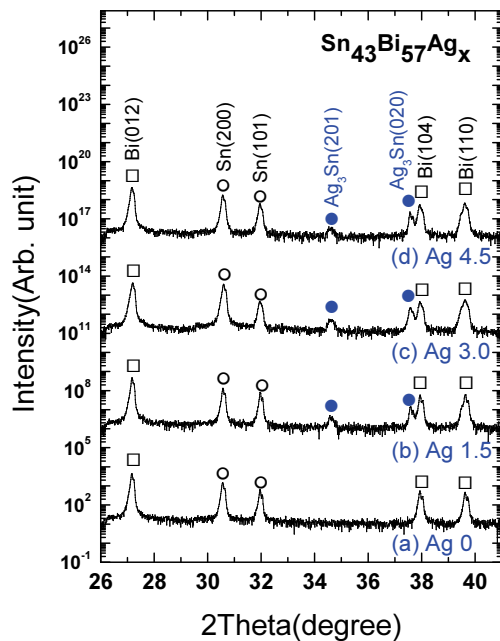


Fig. 2. XRD results of  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  solders by adding a small amount of Ag atoms.

더에서 Sn(200), Sn(101) 회절피크들은 각각  $2\theta = 30.6^\circ$ ,  $2\theta = 32.0^\circ$ 에서 관찰되었고 [JCPDS 04-0673], Bi(012), Bi(104), Bi(110) 회절피크들은 각각  $2\theta = 27.2^\circ$ ,  $2\theta = 37.9^\circ$ ,  $2\theta = 39.6^\circ$ 에서 관찰되었다 [JCPDS 44-1246]. 하지만, Sn-Bi 합금상과 관련된 회절피크는 관찰되지 않았다. 이는 상온에서  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더가 합금상을 형성하지 않고, 체심정방정(body centered tetragonal)의  $\beta$ -Sn상과 삼방정(rhombohedral)의 Bi상으로 서로 상분리(phase separation)되어 존재하는 것을 의미한다.  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더가 서로 상분리되어 공정계로 존재하는 이유는 193.0 kJ/mol의 Sn-Bi 원자간 결합에너지가 187.1 kJ/mol의 Sn-Sn 원자간과 204.2 kJ/mol의 Bi-Bi 원자간 결합에너지의 평균값 보다 작은 것에 기인한다.

한편, Ag를 1.5 wt% 첨가한  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_{1.5}(\text{wt}\%)$  솔더에서는 기존의 Bi(012), Sn(200), Sn(101), Bi(104), Bi(110) 회절피크들 이외에도,  $2\theta = 34.6^\circ$ 와  $2\theta = 37.6^\circ$  위치에서 약한  $\text{Ag}_3\text{Sn}(201)$ ,  $\text{Ag}_3\text{Sn}(020)$  합금상의 회절피크가 추가적으로 관찰되었다 [JCPDS 71-0530]. 하지만, 순수한(pure) Ag의 회절피크 [JCPDS 04-0783]와 Ag-Bi 합금상의 회절피크는 관찰되지 않았다.

$\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더에 Ag의 첨가량이 1.5 wt%에서

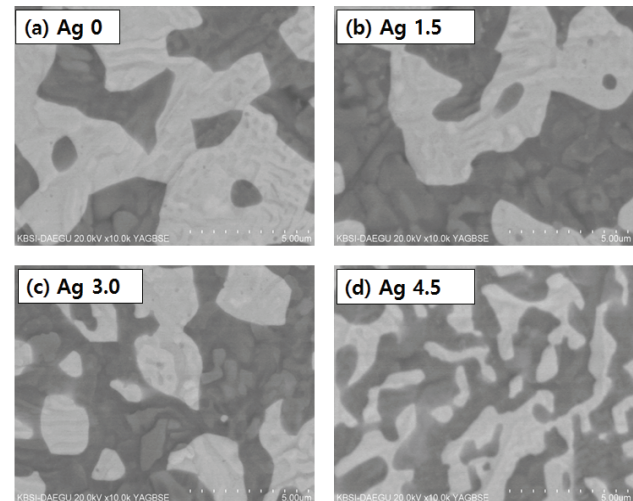


Fig. 3. Surface SEM photographs of  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  solders by adding a small amount of Ag atoms.

4.5 wt%로 증가함에 따라  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ 합금상의 회절피크 강도는 점점 더 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더에 소량 첨가되는 Ag원자들은 Sn원자 일부와 반응하여 모두  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  합금상을 형성하지만, Bi원자와는 합금상을 형성하지 않음을 나타낸다.

그림 3에는 Ag 첨가량에 따른  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더로 도금된 태양광 리본의 표면 SEM 사진을 나타내었다. 그림 3(a)에서 보듯이, Ag를 첨가하지 않은  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더의 표면 모폴로지는 어두운 색의 Sn상과 밝은 색의 Bi상들이 서로 상분리되어 존재하였으며, EDS 성분분석을 통하여 이를 확인하였다. 이러한 결과는 그림 2(a)에서 보듯이,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더의 XRD 결과와도 잘 일치하였다. 또한, 그림 3(b), 3(c), 3(d)에서 보듯이,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더에서 Ag의 첨가량이 1.5 wt%에서 4.5 wt%로 증가함에 따라서 Bi 결정상의 크기가 작아지는 경향을 나타내었다. Sn의 용융온도는  $231.9^\circ\text{C}$ 이고, Bi의 용융 온도는 이보다 높은  $271.5^\circ\text{C}$ 이다.  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  합금상은 용융 도금시 먼저 응고되는 Bi원자들의 이동을 억제함으로써, Ag의 첨가량이 증가함에 따라 Bi결정상의 크기를 감소시키는 것으로 사료된다.

그림 4에는  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더에서 Ag의 존재를 확인하기 위한 도금된 태양광 리본의 표면 SEM-EDS-mapping 사진을 나타내었다. 그림 4(a)에서 보듯이, Ag 원자를 3.0 wt% 첨가시킨 SEM사진에

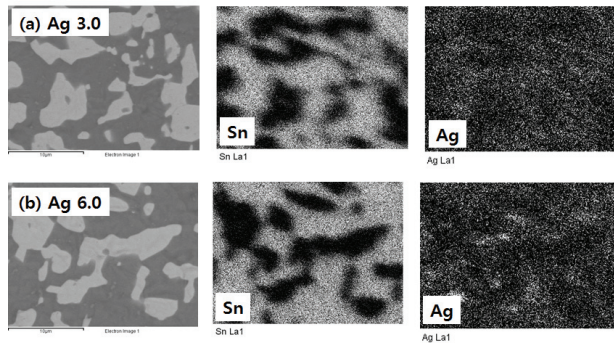


Fig. 4. SEM-EDS-mapping photographs of  $\text{Sn}_{47}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  solders by adding of Ag atoms (a) 3.0 wt% and (b) 6.0 wt%.

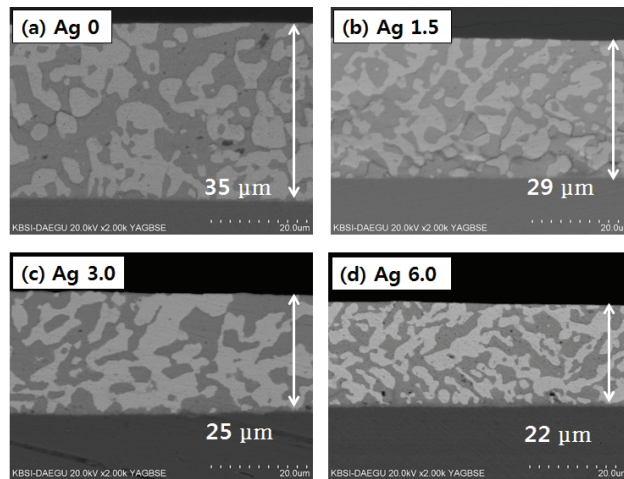


Fig. 5. Cross-section SEM photographs of  $\text{Sn}_{47}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  solders by adding a small amount of Ag atoms.

서 어두운 색은 Sn상으로 확인되었다. 3.0 wt% 소량 첨가된 Ag 원자들은  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  합금상을 형성하여 Sn상 내부에 균일하게 분포하는 것을 확인하였다. 그림 4(b)에서 보듯이, Ag 원자의 첨가량을 6.0 wt%로 증가시킨 SEM사진에서 어두운 색은 Sn상으로 확인되었다. 하지만, Ag원자들은  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  합금상을 형성하여 Sn상 내부에서 부분적으로 응집하여 조대화되는 경향을 나타내었다.

그림 5에는 Ag 첨가량에 따른  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더로 도금된 태양광 리본 내부의 모폴로지를 관찰하기 위하여 정밀하게 폴리싱된 리본의 단면 SEM 사진을 나타내었다. 그림 5(a)에서 보듯이, Ag를 첨가하지 않은  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더의 내부 모폴로지는, 그림

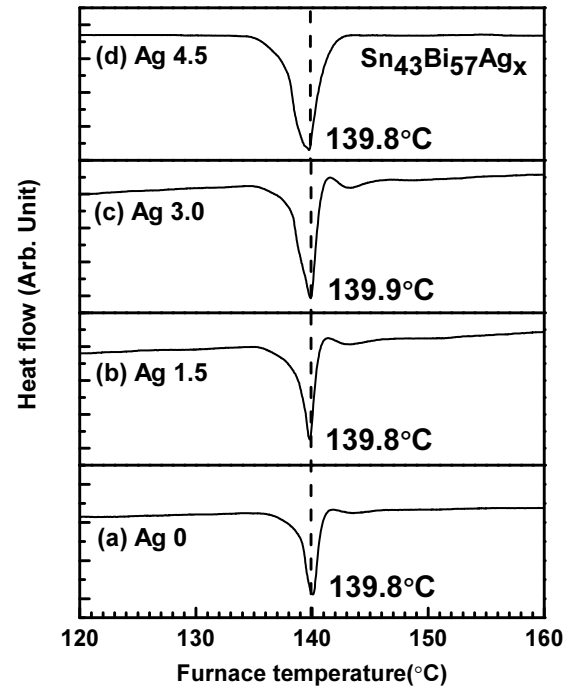


Fig. 6. DTA results of  $\text{Sn}_{47}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  solders by adding a small amount of Ag atoms.

3(a)의 표면 모폴로지와 유사하게, 상대적으로 어두운 색의 Sn상과 밝은 색의 Bi상이 서로 상분리 되어 존재하였으며, 이는 EDS 성분분석을 통하여 확인되었다. 그림 5(b), 5(c), 5(d)에서 보듯이, Ag를 첨가한  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더의 내부에서도 Sn상과 Bi상이 서로 상분리 되어 존재하였다. 한편,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  솔더로 도금된 솔더 층의 두께는 약 35  $\mu\text{m}$ 를 나타내었다.  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더로 도금된 솔더 층의 두께는 Ag의 첨가량이 1.5 wt%에서 6.0 wt%로 증가함에 따라서 약 29  $\mu\text{m}$ 에서 약 22  $\mu\text{m}$ 로 점차적으로 감소하였다. 이는 220°C의 도금조에서 일정한 속도로 수직으로 용융 도금시 Ag의 첨가량이 증가함에 따라  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더의 용융액이 상대적으로 많이 흘러내림에 기인한다.

Ag의 첨가량에 따른 도금층 두께 변화의 원인을 규명하기 위하여,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더의 용융 온도를 측정하기 위한 열분석 실험을 수행하였다. 그림 6에는 Ag 첨가량에 따른  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x(\text{wt}\%)$  솔더의 DTA 열분석 결과를 나타내었다. 그림 6(a)에서 보듯이, Ag를 첨가하지 않은  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}(\text{wt}\%)$  공정 솔더의 용융온도는 139.8°C로 낮은 온도를 나타내었다. 이는  $\text{Sn}_{62}\text{Pb}_{38}$

(wt%) 솔더의 공정온도인 183°C와 비교하여 약 43°C 낮은 값이다 [10]. 그림 6(b), 6(c), 6(d)에서 보듯이, Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) 솔더의 용융온도는 Ag 1.5 wt% 첨가 시 139.8°C, Ag 3.0 wt% 첨가 시 139.9°C, 그리고 Ag 4.5 wt% 첨가시 139.8°C를 나타내었으며, 이는 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>(wt%) 솔더의 용융온도인 139.8°C와 거의 유사한 값을 나타내었다. 용융열의 크기 변화는 열분석 시료의 양에 기인한다. 이상의 결과에서 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) 솔더의 용융온도는 Ag의 첨가량에 관계없이 거의 변화가 없는 유사한 값을 나타내었으며, 도금층의 두께 감소는 Ag의 첨가량에 비례하여 도금액의 유동성 향상과 연관이 있는 것으로 사료된다.

태양광 리본과 셀과의 접착강도 향상은 태빙공정 시작업성과 태양광 모듈의 장수명 향상과 연관된다. 그림 7에는 Ag 첨가량에 따른 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) 솔더로 도금된 태양광 리본의 접착강도 변화를 나타내었다. Ag를 첨가하지 않은 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>(wt%) 기준 솔더의 접착강도는 52 N/mm<sup>2</sup>이었다. 이는 자체 측정한 Sn<sub>60</sub>Pb<sub>40</sub>(wt%) 솔더의 접착강도 174 N/mm<sup>2</sup>와 비교하여 약 30% 수준으로 매우 낮은 값이다 [10]. Ag를 1.5 wt% 첨가한 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>1.5</sub>(wt%) 솔더의 접착강도는 73 N/mm<sup>2</sup>를 나타내었으며, 기준 솔더와 비교하여 41% 증가하였다. 그리고 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>3.0</sub>(wt%) 솔더의 접착강도는 121 N/mm<sup>2</sup>를 나타내었으며, 기준 솔더와 비교하여 132% 크게 증가하였다. 한편, Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>4.5</sub>(wt%) 솔더의 접착강도는 121 N/mm<sup>2</sup>를 나타내었으며, Ag를 3.0 wt% 첨가한 솔더의 접착강도와 비교하여 더 이상 크게 증가하지 않고 거의 유사한 값을 나타내었다. Sn<sub>47</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) 솔더의 접착강도가 Ag 첨가량에 비례하여 증가하는 이유는 솔더에 첨가하는 Ag원자와 Ag판의 Ag원자 간 162.9 kJ/mol의 높은 결합에너지에 기인한다 [10]. 한편, Ag를 4.5 wt% 이상 첨가한 솔더의 접착강도가 더 이상 크게 증가하지 않는 이유는 Ag의 첨가로 형성되는 Ag<sub>3</sub>Sn상이 Sn상의 내부에서 Ag-Ag 원자간 높은 결합에너지로 인해 응집하여 조대화(coarsening)되는 현상과 관련이 있다고 사료된다 [10].

그림 8에는 Ag 첨가량에 따른 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) 솔더의 표면저항 측정 결과를 나타내었다. Ag를 첨가하지 않은 Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>(wt%) 기준 솔더의 표면저항은 1.55×10<sup>-4</sup> Ω/sq을 나타내었다. Ag를 1.5 wt% 첨가한 Sn<sub>47</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>1.5</sub>(wt%) 솔더의 표면저항은 1.52×10<sup>-4</sup> Ω/sq를 나타내었으며, 기준 솔더보다 약 2% 감소하였다. Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>3.0</sub>(wt%) 솔더의 표면저항은 1.42×10<sup>-4</sup>

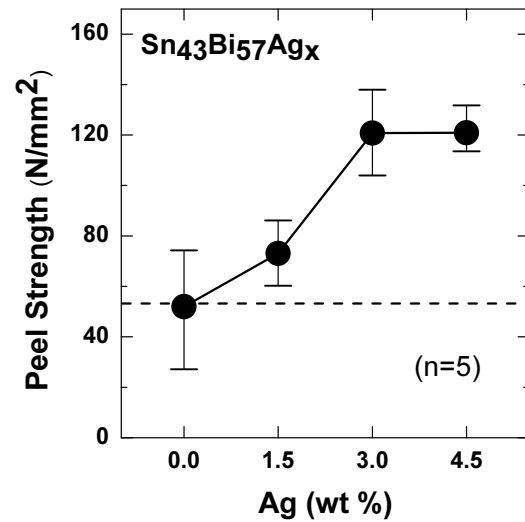


Fig. 7. Peel strength results of Sn<sub>47</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) solders by adding a small amount of Ag atoms.

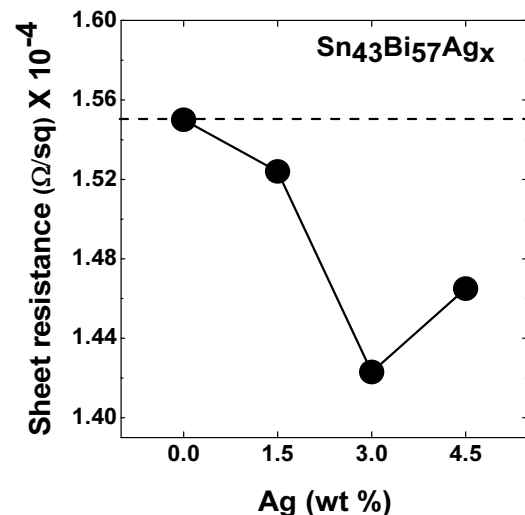


Fig. 8. Sheet resistance results of Sn<sub>47</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>x</sub>(wt%) solders by adding a small amount of Ag atoms.

Ω/sq로 최소값을 나타내었으며, 기준 솔더보다 약 9% 감소하는 우수한 특성을 나타내었다. 이는 첨가되는 Ag의 비저항(resistivity)이 0.16×10<sup>-7</sup> Ω·m로서, Sn의 비저항 1.15×10<sup>-7</sup> Ω·m와 Bi의 비저항 10.50×10<sup>-7</sup> Ω·m와 비교하여 매우 작은 것에 기인한다. 하지만, Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>Ag<sub>4.5</sub>(wt%) 솔더의 표면저항은 1.46×10<sup>-4</sup> Ω/sq를 나타내었으며, Sn<sub>43</sub>Bi<sub>57</sub>(wt%) 솔더

보다는 작지만,  $\text{Sn}_{47}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_{3.0}$ (wt%) 솔더의 표면저항보다는 오히려 증가하였다. 이는 그림 4(b)에서 보듯이, Ag의 첨가로 형성되는  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ 상이 Sn상의 내부에서 Ag-Ag 원자간 높은 결합에너지로 인해 응집하여 조대화되는 것과 관련이 있다 [10]. 태양광 리본용  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더에서 접착강도 향상, 면저항의 감소, 그리고 Ag의 비싼 가격 등을 고려할 때, Ag의 적절한 첨가량은 3 wt%라고 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 태양광 리본용  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 무연 솔더의 특성에 미치는 소량 첨가되는 Ag의 영향이 연구되었다. 공정 조성  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 솔더에서 Sn결정상과 Bi결정상은 서로 상분리 되어 존재하였으며, Ag 원자들은 일부 Sn원자들과 모두 반응하여  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  합금상을 형성하였지만, Bi원자들과는 반응하지 않았다.  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더에서 Ag의 첨가량이 증가하면, Bi결정상의 평균크기는  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  합금상의 존재로 인해 감소하였으며, 용융도금 시 솔더층의 두께도 감소하였다. 한편,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 솔더의 용점은 138.9°C로 낮은 값을 나타내었으며, Ag의 첨가량에 관계없이 매우 유사한 값을 나타내었다.  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더로 도금된 리본의 접착강도는 Ag를 첨가하지 않은  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}$ (wt%) 솔더에서 52 N/mm<sup>2</sup>를 나타내었으며,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_3$ (wt%) 솔더에서 121 N/mm<sup>2</sup>로 크게 증가하였다. 이는 솔더에 첨가하는 Ag원자와 Ag판의 Ag원자 사이의 높은 결합에너지에 기인한다. 또한,  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더의 면저항은 Ag의 첨가량에 따라 감소하였으며, Ag를 3 wt% 첨가할 때 최소값을 나타내었다.  $\text{Sn}_{43}\text{Bi}_{57}\text{Ag}_x$ (wt%) 솔더에서 접착강도 향상, 면저항의 감소, 그리고 Ag의 비싼 가격 등을 고려할 때, Ag의 적절한 첨가량은 3 wt%라고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 ‘산업통상자원부’, ‘한국산업기술진흥원’, ‘경북지역사업평가단’의 ‘지역주력산업육성사업’으로 (주)산코코리아와 공동으로 수행된 연구결과입니다. 저자들은 SEM-EDS 실험에 도움을 준 한국기초과학지원연구원(대구센터) 황기주 선생에게 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] J. M. Pearce, *Futures*, **34**, 663 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(02\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(02)00008-3)]
- [2] A. Rose, *Physica Status Solidi. A*, **56**, 11 (1979). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.2210560102>]
- [3] R. Lathrop and K. Pfluke, *Published in the Proceedings of the 26th European Union Photovoltaic Solar Energy Conf.*, **5** (2011).
- [4] T. S. Cho, C. S. Cho, and M. S. Chae, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **15**, 217 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2014.15.4.217>]
- [5] T. S. Cho and C. S. Cho, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **16**, 20 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2015.16.1.20>]
- [6] J. S. Jeong, N. Park, and C. Han, *Microelectronics Reliability*, **52**, 2326 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.027>]
- [7] M. A. Quintana, D. L. King, T. J. McMahon, and C. R. Osterwald, *Photovoltaic Specialists Conf.*, 1436 (2002).
- [8] J. Wendt, M. Träger, R. Klengel, M. Petzold, D. Schade, and R. Sykes, *12th IEEE Intersociety Conf.*, 1 (2010).
- [9] M. Schaefer, R. A. Fournelle, and J. Liang, *J. of Electronic Materials*, **27**, 1167 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-998-0066-7>]
- [10] Y. S. Son and T. S. Cho, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 332 (2015).
- [11] S. Choi, T. R. Bieler, K. N. Subramanian, and J. P. Lucas, *Soldering & Surface Mount Technology*, **13**, 26 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1108/09540910110385220>]
- [12] W. B. Hampshire, *Soldering & Surface Mount Technology*, **5**, 49 (1993). [DOI: <https://doi.org/10.1108/eb037826>]
- [13] C. Y. Liu, C. Chan, and K. N. Tu, *J. of Applied Physics*, **88**, 5703 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1319327>]
- [14] J. H. Lee, Y. H. Lee, and Y. S. Kim, *Scripta Materialia*, **42**, 789 (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00431-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00431-5)]
- [15] I.K.A. Qader and Y. B. Zainuddin, *Interdisciplinary J. of Contemporary Research in Business*, **3**, 366 (2011).
- [16] J. S. Jeong, C. M. Oh, G. Y. Goo, Y. H. Yoon, U. H. Hwang, and W. S. Hong, *J. of the Korean Welding and Joining Soc.*, **29** (2011).
- [17] *Official J. of the European Union*, **46**, 19 (2003).
- [18] J. F. Li, S. H. Mannan, M. P. Clode, D. C. Whalley, and D. A. Hutt, *Acta Materialia*, **54**, 2907 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.02.030>]
- [19] J. W. Yoon, C. B. Lee, and S. B. Jung, *Materials Transactions*, **43**, 1821 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.1821>]

- [20] J. Gong, C. Liu, P. P. Conway, and V. V. Silberschmidt, *Mater. Sci. and Eng. A*, **427**, 60 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.034>]
- [21] L. R. Garcia, W. R. Osório, and A. Garcia, *Materials and Design*, **32**, 3008 (2011).
- [22] D. Q. Yu, C. M. L. Wu, C. M. T. Law, L. Wang, and J.K.L. Lai, *J. of Alloys and Compounds*, **392**, 192 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.046>]
- [23] R. A. Islam, Y. C. Chan, W. Jillek, and S. Islam, *Microelectronics Journal*, **37**, 705 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.12.010>]
- [24] L. R. Garcia, W. R. Osório, L. C. Peixoto, A. Garcia, *Materials Characterization*, **61**, 212 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.11.012>]
- [25] C. M. Chen and C. C. Huang, *J. of Alloys and Compounds*, **461**, 235 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.07.059>]
- [26] K. Sugauma, T. Sakai, K. S. Kim, Y. Takagi, J. Sugimoto, and M. Ueshima, *IEEE Trans. on Electr. Pack. Manuf.*, **25**, 257 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TEPM.2002.807718>]