Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 28, No. 5, pp. 332-337 May 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.5.332
ISSN 1226-7945 (Print), 2288-3258 (Online)

태양광 리본용 Sn-Pb-Ag 솔더의 특성에 미치는 Ag의 영향

손연수, 조태식[a]
경북대학교 과학기술대학 나노소재공학부 신소재공학전공

Effects of Ag on the Characteristics of Sn-Pb-Ag Solder for Photovoltaic Ribbon

Yeon-Su Son and Tae-Sik Cho[a]
Department of Nano Materials Engineering, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

(Received March 21, 2015; Accepted April 7, 2015)

Abstract: We have studied the effects of Ag on the characteristics of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) solder for photovoltaic ribbon. Ag atoms in the solder formed an alloy phase of Ag_3Sn after reacting with some part of Sn atoms, while they did not react with Pb atoms, but decreased the mean size of Pb solid phase. The enhancement of peel strength between solar cell and ribbon is an important part in the developments of long-lifespan solar module. The peel strength of the solder ribbon of $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) was 169 N/mm^2, and it was largely enhanced by adding a small amount of Ag atoms. The maximum peel strength was 295 N/mm^2 in the solder ribbon of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%). This result is caused by the high binding energy of 162.9 kJ/mol between Ag atoms in the solder and Ag atoms in Ag sheet.

Keywords: Photovoltaic ribbon, Sn-Pb-Ag solder, Ag addition, Enhancement of peel strength

1. 서 론

최근 신재생에너지가 중요한 관심사로 떠오르고 있으며, 태양광 에너지는 무한정이고 친환경적인 에너지 자원이라는 장점 때문에 중요성이 증가되고 있다 [1-3]. 그림 1(a)에는 한 개의 태양전지 모듈(solar module) 안에서 태양광 셀(solar cell)과 리본(ribbon)의 모식도를 나타내었다. 태양광 리본은 셀과 셀을 연결하는 전선으로서, 일반적으로 인터커넥터(interconnector)와 버스바(bus bar)로 구분된다 [4-6].

일반적으로 외부 환경에 약 20년 이상 노출되어 사용되는 태양전지 모듈에서, 태양광 셀과 리본과의 접착강도(peel strength)는 태양전지의 장수명과 안정성에 중요한 영향을 줄 수 있다 [7,8]. 하지만 태양광 리본은 실리콘(Si) 셀과의 접착성이 좋지 않아서, 테빙(tabbing) 공정 시 셀 위에 은(Ag) 페이스트를 도포한 후 접착하고 있다 [9,10]. 그림 1(b)에서 보듯이, 현재 태양광 리본은 내부 Cu리본 위에 주로 Sn-Pb계 솔더를 용융도금하여 제조되고 있다 [11,12]. Sn-Pb계 솔더는 융점이 낮고 가격이 저렴한 장점을 갖는다 [13,14]. 또한, 테빙 공정 시 Ag 페이스트가 도포된 셀과 리본과의 접착강도 향상을 통한 작업성 개선과 장수명 안정성 향상을 위하여 Sn-Pb의 솔더 조성에 Ag를 소량 첨가하는 연구가 제안되고 있다 [15,16]. 그러나 Sn-Pb-Ag 솔더에서 소량 첨가되는 Ag의 영향에 관한 구체적이고 정량적인 연구 결과는 아직 발표되어 있지 않다.

본 논문에서는 태양광 리본용 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%)

a. Corresponding author; cts@knu.ac.kr

Copyright ©2015 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.

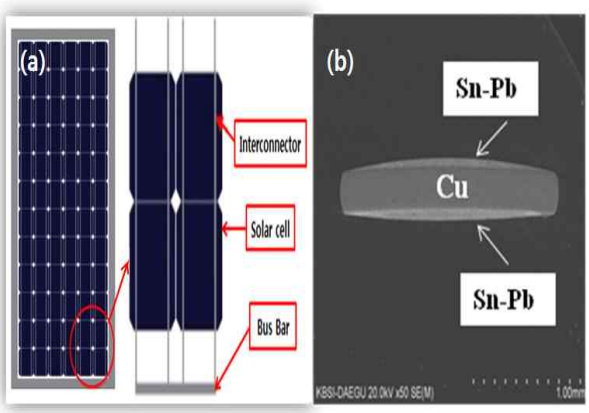

Fig. 1. Schematic diagaram of (a) solar sell and (b) ribbon in solar module.

솔더로 도금된 리본의 특성에 미치는 Ag의 영향을 체계적으로 연구하였다. 이를 위하여 공정(eutectic) 조성 근처의 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더에 Ag를 소량 첨가함에 따른 리본의 접착강도와 솔더의 결정구조와 모폴러지(morphology)와의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

태양광 리본 시편은 Cu 리본의 표면에 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 조성을 기준으로 Ag를 1, 2, 3, 4, 6 wt% 소량 첨가한 솔더를 250℃의 도금조에서 용융 도금하여 제조되었다. Cu리본은 폭이 2 mm이고, 두께가 0.2 mm인 (주)산코코리아 제품을 사용하였다. 태양광 리본 시편은 용융 도금조에서 수직으로 5 mm/sec의 도금속도로 제조되었다.

각각의 태양광 리본은 접착강도 측정, 결정구조 분석, 미세조직과 조성 분석을 수행하였으며, $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더에서 Ag 첨가량에 따른 변화를 고찰하였다. 접착강도 측정은 Ag판 위에 플럭스(flux)를 도포한 후, 250℃에서 접착한 태양광 리본 시편을 접착강도 측정기(peel strength tester)를 사용하여 180℃ 측정 방법으로 수행되었다. 일반적으로 테빙 공정 시 Ag 페이스트를 실리콘 셀 위에 도포하여 리본과 접착하고 있다[9,10]. 그러나 Ag 페이스트를 사용하면 Ag 페이스트의 일정한 두께 조절이 어려운 단점이 존재한다. 또한, 150~180 ㎛ 두께를 갖는 얇은 실리콘 셀과의 반대편면의 접착강도를 추가로 고려해야하는 단점이 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 Ag 페이스트 대신에 Ag 판(sheet)을 사용하여 태양광 리본에 도금된 솔더의 접착강도를 직접적으로 측정하였다. $Sn_{60}Pb_{40}$-Ag_x (wt%) 솔더로 도금된 리본과 Ag 판 사이의 접착강도는 6회 측정하여 평균값을 사용하였다. 또한, 접착강도는 솔더층의 두께에 비례하기 때문에, 태양광 리본의 단면 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM) 사진으로부터 Sn-Pb-Ag 솔더층의 두께를 측정하여 보정하였다. 또한, 각각의 태양광 리본 시편은 X-선 회절기(X-ray diffractometer, XRD)을 사용하여 결정상과 결정구조를 분석하였다. SEM을 사용하여 태양광 리본 시편의 표면과 단면 미세조직을 분석하였으며, 보다 선명한 사진을 얻기 위하여 후방 산란 전자(back scattered electron, BSE) 모드를 사용하였다. 추가로 EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy) 원소 분석기를 사용하여 태양광 리본의 조성을 분석하였다. 표면 SEM 사진으로부터 Pb 결정상의 평균 크기는 입도 크기 분석기(particle size analyser, PSA)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

$Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더에서 접착강도에 미치는 Ag의 영향을 조사하기 위하여, 먼저 Ag 첨가량에 따른 Sn-Pb 솔더로 도금된 태양광 리본의 접착강도를 측정하였다.

그림 2에는 Ag 첨가량에 따른 Sn-Pb-Ag 솔더의 접착강도 변화를 나타내었다. Ag를 첨가하지 않은 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 기준 솔더의 접착강도는 174 N/mm^{2}이었다. Ag를 1 wt% 첨가한 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_1$ (wt%) 솔더의 접착강도는 263 N/mm^{2}를 나타내었으며, 기준 솔더의 접착강도와 비교하여 약 51% 크게 증가하였다. $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더의 접착강도는 295 N/mm^{2}로 최댓값을 나타내었으며, 기준 솔더의 접착강도와 비교하여 약 70% 증가하였다. 하지만, Ag를 3 wt% 첨가한 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_3$ (wt%) 솔더의 접착강도는 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더의 접착강도와 비교하여 오히려 감소하는 결과를 나타내었다. $Sn_{60}Pb_{40}Ag_6$ (wt%) 솔더의 접착강도는 211 N/mm^{2}를 나타내었으며, $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 기준 솔더의 접착강도와 비교하여 약 21% 증가하였지만, $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더의 최대 접착강도와 비교하여 약 28% 감소하였다. 이상의 결과로부터 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%)

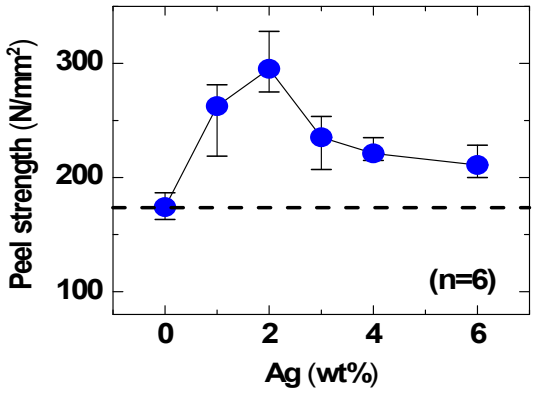

Fig. 2. Peel strength results of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) solders by adding a small amount of Ag atoms.

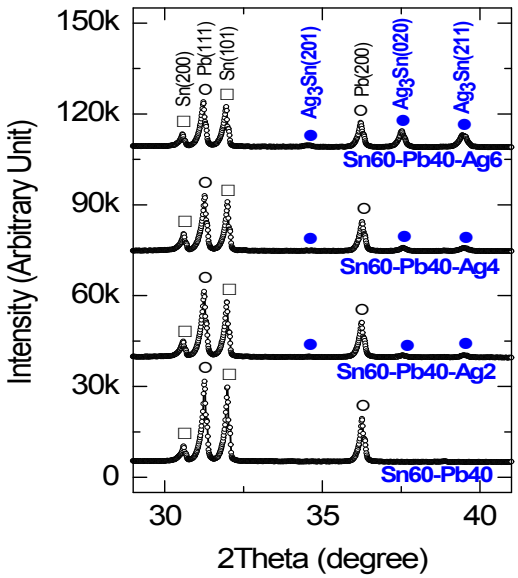

Fig. 3. XRD results of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) solders by adding a small amount of Ag atoms.

기준 솔더에 Ag를 소량 첨가할 때 접착강도가 증가하는 이유는, 136.0 kJ/mol의 Sn-Ag 원자간과 58.8 kJ/mol의 Pb-Ag 원자간 결합에너지의 평균값과 비교하여, 솔더에 첨가하는 Ag 원자와 Ag 판(페이스트)의 Ag 원자간 162.9 kJ/mol의 높은 결합에너지에 기인하리라 사료된다 [17,18]. Sn-Pb-Ag 솔더의 접착강도 향상과 Ag의 비싼 가격을 고려할 때, $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더에 적정한 Ag의 첨가량은 2 wt%이었다. 한편, Ag 첨가량에 따른 Sn-Pb-Ag 솔더의 접착강도 변화 원인을 규명하기 위하여, XRD를 통한 솔더의 결정상 분석과 SEM을 통한 솔더의 표면과 내부의 미세구조를 추가적으로 분석하였다.

그림 3에는 Ag 첨가량에 따른 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더로 도금된 태양광 리본의 결정상과 결정구조를 분석하기 위한 X-선 회절 결과를 나타내었다. 태양광 리본 내부의 Cu 리본에 해당하는 Cu(111) 회절피크는 2 θ=43.3°에서 강하게 관찰되었지만, Sn-Pb-Ag 솔더층의 약한 회절피크들을 강조하기 위하여 x축인 2 θ 구간에서 제외하였다. Ag를 첨가하지 않은 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더에서 Sn(200), Sn(101) 회절피크들은 2 θ =30.6°, 2 θ=32.0°에서 각각 관찰되었고, [JCPDS 04-0673], Pb(111), Pb(200) 회절피크들은 2 θ=31.3°, 2 θ=36.3°에서 각각 관찰되었다 [JCPDS 04-0686]. 하지만, Sn-Pb 합금상(alloy phase)과 관련된 회절피크는 관찰되지 않았다. 이는 상온에서 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더가 합금상을 형성하지 않고, 체심정방정(BCT)의 β-Sn상과 면심입방정(FCC)의 Pb상으로 서로 상 분리(phase separation)되어 존재하는 것을 의미한다.

Sn-Pb 솔더가 서로 상 분리되어 공정계로 존재하는 이유는 126.3 kJ/mol의 Sn-Pb 원자간 결합에너지가 187.1 kJ/mol의 Sn-Sn 원자간과 86.6 kJ/mol의 Pb-Pb 원자간 결합에너지의 평균값보다 작은 것에 기인한다 [17,18]. 한편, Sn-Pb 공정계의 공정조성은 $Sn_{61.9}$-$Pb_{38.1}$ (wt%)이고 [19], 현재 산업체에서 주로 사용되고 있는 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 조성은 공정조성 근처의 조성이다. Sn의 용융온도는 231.9℃, Pb의 용융온도는 327.5℃, 그리고 Ag의 용융온도가 961.9℃이지만, Sn-Pb의 공정온도는 이것보다 크게 낮은 183℃이다 [19]. Ag를 2 wt% 첨가한 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더에서는 Sn(200), Pb(111), Sn(101), Pb(200) 회절피크들 이외에도, 2 θ=34.7°, 2 θ=37.6°, 2 θ=39.6° 위치에서 약한 Ag_3Sn(201), Ag_3Sn(020), Ag_3Sn(211) 합금상의 회절피크가 추가적으로 관찰되었다 [JCPDS 71-0530]. 사방정(orthorhombic)인 Ag_3Sn 합금상의 회절피크 강도는 Ag의 첨가량이 2 wt%에서 6 wt%로 증가함에 따라 점점 더 강해지는 결과를 나타내었다. 하지만, 순수한(pure) Ag의 회절피크 [JCPDS 04-0783]와 Ag-Pb 합금상의 회절피크는 관찰되지 않았다. 이상의 결과로부터, $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더에 소량 첨가되는 Ag원자들은 Sn원자 일부와 반응하여 모두 Ag_3Sn 합금상으로 존재하였지만, Pb원자와는 합금상을 형성하지 않았다.

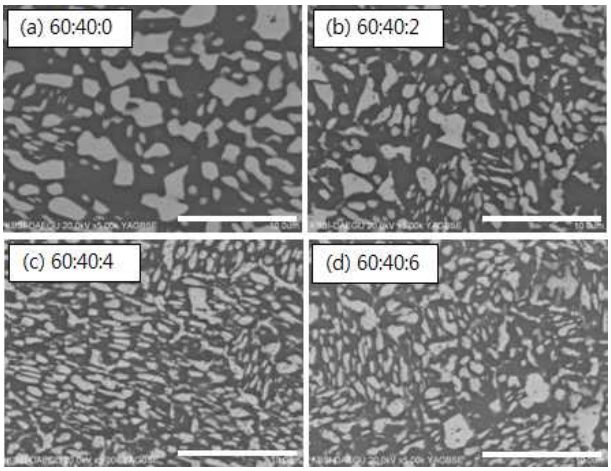

Fig. 4. Surface SEM images of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) solder by adding a small amount of Ag atoms; (a) 0, (b) 2, (c) 4, and (d) 6. (Magnification is 5 K, and scale bar is 10 ㎛).

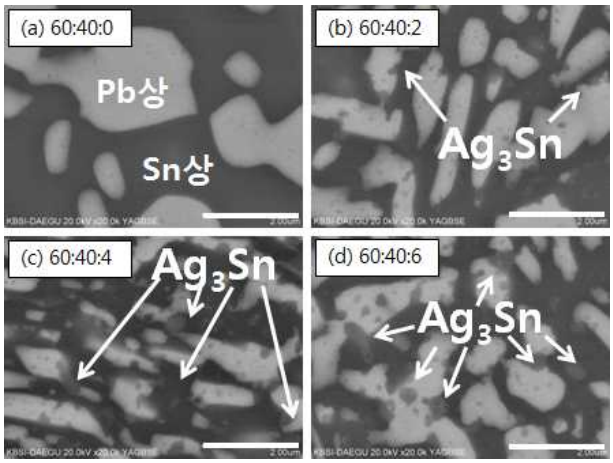

Fig. 5. Surface SEM images of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) solders by adding a small amount of Ag atoms; (a) 0, (b) 2, (c) 4, and (d) 6. (Magnification is 20 K, and scale bar is 2 ㎛).

Ag 첨가량에 따른 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더로 도금된 태양광 리본의 표면 모폴로지를 관찰하기 위하여 SEM 실험을 수행하였다.

그림 4에는 Ag 첨가량에 따른 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더의 표면 SEM 저배율 사진(5 K)을 나타내었다. 그림 4(a)에서 보듯이, Ag를 첨가하지 않은 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더의 표면 모폴로지는 어두운 색의 Sn상 내부에 밝은 색의 Pb상들이 서로 상 분리되어 존재하였으며, EDS 성분 분석을 통하여 이를 확인되었다. 이러한 결과는 그림 3의 X-선 회절분석 결과와도 잘 일치하였다. Pb상의 평균 크기는 4.70 ㎛로 큰 값을 나타내었다. 한편, 그림 4(b)와 4(c)에서 보듯이, $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더에 Ag를 첨가하면 Pb 결정상의 크기가 감소하는 경향을 나타내었다. Pb상의 평균 크기는 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더 표면에서 1.72 ㎛, $Sn_{60}Pb_{40}Ag_4$ (wt%) 솔더 표면에서 1.54 ㎛로 감소하였다. 하지만, 그림 4(d)에서 보듯이, $Sn_{60}Pb_{40}Ag_6$ (wt%) 솔더 표면에서 Pb상의 평균 크기는 1.58 ㎛로 약간 증가하였으며, 이는 상대적으로 3 ㎛ 이상의 조대한 Pb상들의 존재에 기인하였다.

그림 5에는 Ag_3Sn 합금상의 존재를 확인하기 위하여, Ag 첨가량에 따른 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더의 표면 SEM 고배율 사진(20K)을 나타내었다. 그림 5(a)에서 보듯이, Ag를 첨가하지 않은 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더의 표면 모폴로지는 어두운 색의 Sn상 내부에 밝은 색의 Pb상들이 서로 상 분리되어 존재하였다. 그림 5(b)에서 보듯이, Ag를 2 wt% 첨가한 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더의 표면 모폴로지는 어두운 색의 Sn상 내부에 상대적으로 평균 크기가 작아진 밝은 색의 Pb상들이 상 분리되어 존재하였다. 또한, 회색 반점 모양의 Ag_3Sn 합금상이 추가적으로 관찰되었다 [20]. 그림 5(c)와 그림 5(d)에서 보듯이, Ag의 첨가량이 4 wt%에서 6 wt%로 증가함에 따라 Pb 결정상의 표면에는 회색 반점의 Ag_3Sn 합금상이 점점 더 많이 존재하였다. 이상의 결과로부터, $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더에 소량 첨가되는 Ag원자들은 Sn원자 일부와 반응하여 모두 Ag_3Sn 합금상을 형성하며, 이 안정한 Ag_3Sn 합금상들은 Pb 결정상의 표면에 존재하면서 Pb원자들의 이동을 제한하여 Pb상의 크기를 감소시키는 것으로 판단된다.

그림 6에는 Ag 첨가량에 따른 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더로 도금된 태양광 리본 내부의 모폴로지를 관찰하기 위하여 정밀하게 폴리싱된 리본의 단면 SEM 사진을 나타내었다. 그림 6(a)에서 보듯이, Ag를 첨가하지 않은 $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더의 내부 모폴로지는, 그림 4(a)의 표면 모폴로지와 유사하게, 어두운 색의 Sn상 내부에 밝은 색의 Pb상들이 서로 상 분리되어 존재하였으며, 이는 EDS 성분 분석을 통하여 확인되었다. 그림 6(b)에서 보듯이, $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더의 내부 모폴로지는 Sn상 내부에 상대적으로 작은 Pb상들이 상 분리되어 균일하게 분포되어 있었다. 하지만, 그림 6(c)에서 보듯이, $Sn_{60}Pb_{40}Ag_4$ (wt%) 솔더의 내부에는 Sn상 내부에 5 ㎛ 이상의 조대한 Pb상이 관찰되었으며, Ag의 첨가량이 6 wt%로 증가하면 [그림 6(d)],

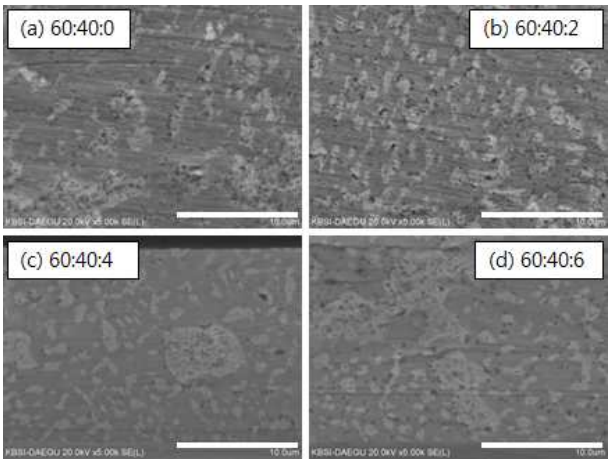

Fig. 6. Cross-section SEM images of $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) solders by adding a small amount of Ag atoms; (a) 0, (b) 2, (c) 4, and (d) 6. (Magnification is 5 K, and scale bar is 10 ㎛).

조대한 Pb상들의 개수가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러므로 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더 리본의 접착강도는 265 N/mm^{2}의 최댓값을 나타내었지만, Ag를 3 wt% 이상 첨가하면, 조대한 Pb 결정상의 존재로 인하여 접착강도가 감소하였다. 이는 136.0 kJ/mol의 Sn-Ag 원자간과 162.9 kJ/mol의 Ag-Ag 원자간 결합에너지와 비교하여, Pb-Ag 원자간 결합에너지가 58.8 kJ/mol로 매우 작은 것에 기인한다 [17,18]. 이러한 결과를 확인하고자 순수한 Pb와 순수한 Sn으로 각각 용융 도금된 태양광 리본의 접착강도를 추가적으로 측정하였다. 순수한 Pb 솔더의 접착강도는 81 N/mm^{2}이었으며, 순수한 Sn 솔더의 접착강도는 218 N/mm^{2}이었다. 그러므로 순수한 Pb 솔더의 접착강도가 순수한 Sn 솔더의 접착강도보다 약 2.7배 작은 결과를 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 태양광 리본용 $Sn_{60}Pb_{40}Ag_x$ (wt%) 솔더의 특성에 미치는 Ag의 영향을 연구하였다. Sn-Pb 솔더에서 Sn결정상과 Pb결정상은 서로 상 분리되어 공정계로 존재하였으며, 소량 첨가되는 Ag원자들은 일부 Sn원자들과 반응하여 모두 Ag_3Sn 합금상을 형성하였지만, Pb원자들과는 반응하지 않았다. Pb결정상의 표면에 존재하는 Ag_3Sn 합금상은 Pb원자들의 이동을 억제함으로 Ag의 첨가량이 증가함에 따라 Pb 결정상의 평균 크기를 감소시켰다. 태양광 셀과 리본 사이의 접착강도 향상은 장수명 모듈의 중요한 요소 중의 하나이다. $Sn_{60}Pb_{40}$ (wt%) 솔더로 도금된 리본의 접착강도는 169 N/mm^{2}를 나타내었으며, 소량의 Ag를 첨가함에 따라 리본의 접착강도는 크게 향상되었다. 이러한 결과는 솔더에 첨가하는 Ag원자와 Ag 판의 Ag원자간 162.9 kJ/mol의 높은 결합에너지에 기인한다. $Sn_{60}Pb_{40}Ag_2$ (wt%) 솔더 리본의 접착강도는 265 N/mm^{2}의 최댓값을 나타내었지만, Ag를 3 wt% 이상 첨가하면, 조대한 Pb 결정상의 존재로 인하여 접착강도가 감소하였다. 이는 136.0 kJ/mol의 Sn-Ag 원자간과 162.9 kJ/mol의 Ag-Ag 원자간 결합에너지와 비교하여, Pb-Ag 원자간 결합에너지가 58.8 kJ/mol로 매우 작은 것에 기인한다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원, 대경선도사업지원단, (주)산코코리아의 지원으로 연구되었습니다. 또한, 이 논문은 경북대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다. 저자들은 SEM-EDS 실험에 도움을 준 한국기초과학지원연구원(대구센터) 황기주 선생에게 감사드립니다.

REFERENCES

[1] H. Graßl, J. Kokott, M. Kulessa, J. Luther, F. Nuscheler, R. Sauerborn, H. J. Schellnhuber, R. Schubert, and E. D. Schulze, *WBGU* (German Advisory Council on Global Change) *Berlin Special Report* (2003).
[2] A. Rose, *Physica Status Solidi. A*, **56**, 11 (1979).
[3] J. M. Pearce, *Futures*, **34**, 663 (2002).
[4] R. Lathrop and K. Pfluke, *Published in the proceedings of the 26th European Union Photovoltaic Solar Energy Conference*, 5 (2011).
[5] T. S. Cho, C. S. Cho, and M. S. Chae, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **15**, 217 (2014).
[6] T. S. Cho and C. S. Cho, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **16**, 20 (2015).
[7] J. S. Jeong, N. Park, and C. Han, *Microelectronics Reliability*, **52**, 2326 (2012).
[8] M. A. Quintana, D. L. King, T. J. McMahon, and C. R. Osterwald, *Photovoltaic Specialists Conference*, 1436

(2002).
[9] J. Wendt, M. Träger, R. Klengel, M. Petzold, D. Schade, and R. Sykes, *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) 2010 12th IEEE Intersociety Conference*, 1 (2010).
[10] M. Schaefer, R. A. Fournelle, and J. Liang, *Journal of Electronic Materials*, **27**, 1167 (1998).
[11] S. Choi, T. R. Bieler, K. N. Subramanian, and J. P. Lucas, *Soldering & Surface Mount Technology*, **13**, 26 (2001).
[12] W. B. Hampshire, *Soldering & Surface Mount Technology*, **5**, 49 (1993).
[13] C. Y. Liu, C. Chan, and K. N. Tu, *J. of Applied Physics*, **88**, 5703 (2000).
[14] J. H. Lee, Y. H. Lee, and Y. S. Kim, *Scripta Materialia*, **42**, 789 (2000).
[15] P. Schmitt, P. Kaiser, C. Savio, M. Tranitz, and U. Eitner, *Energy Procedia*, **27**, 664 (2012).
[16] Q. Ran, H. L. Lukas, and V. lvanchenko, *Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry*, **11C3**, 113 (2007).
[17] Y. R. Luo and J. A. Kerr, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 89 (2012).
[18] Y. R. Luo, *Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies* (CRC Press, Boca Raton 2007) p. 475.
[19] W. D. Callister and D. G. *Rethwisch, Materials Science and Engineering: an Introduction*, *7th ed* (John Wiley & Sons, New York, 2007) p. 278.
[20] K. Y. Lee, M. Li, D. R. Olsen, and W. T. Chen, *2001 Electronic Components and Technology Conference*, 478 (2001).