



<연구논문>

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 50, No. 6, 2017.

<https://doi.org/10.5695/JKISE.2017.50.6.510>

저융점 합금(Bi58Sn42)을 이용한 Metal Mesh Touch Sensor용 Ag 페이스트의 전기적 특성

김태형^{a,b}, 허영우^a, 김정주^a, 이준형^{a,*}

^a경북대학교 신소재공학부
^b대구경북첨단의료산업진흥재단

Electrical Characteristics of the Ag Past with addition of Low-melting Alloy of Bi58Sn42 for Metal Mesh Touch Sensors

Tae-Hyung Kim^{a,b}, Young-Woo Heo^a, Jeong-Joo Kim^a, and Joon-Hyung Lee^{a,*}

^aSchool of Materials Science and Engineering Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

^bDaegu-Gyeongbuk Medical Innovation Foundation 88 Dongnae-ro, Dong-gu, Daegu 41061, Korea

(Received November 15, 2017 ; revised December 6, 2017 ; accepted December 18, 2017)

Abstract

In this study, a transient liquid phase sintering (TLPS) process of Ag pastes mixed with a fusible metal alloy of Bi58Sn42 with the melting temperature of 138°C, was examined. After screen printing of the Ag pastes with and without Bi58Sn42 powders on polyimide (PI) substrates, the electrodes were heat-treated at different temperatures in the range between 150 and 300°C for 60 min in air. Comparing the electrical conductivity of the Ag pastes with and without Bi58Sn42 alloy powder after the heat treatment, it was manifested that the low melting temperature alloy definitely played a major role in an increased conductivity when it is added into the Ag pastes by providing more electrical conduction paths between Ag particles. This can be explained by the fact that capillary force of the melts of Bi58Sn42 can contribute to the rearrangement of the Ag particles during the heat-treatment inducing better connectivity between the Ag particles.

Keywords : Metal mesh, Electrode, Heat treatment, Alloy

1. 서 론

최근 스마트폰, 태블릿 PC와 같은 소형 디스플레이 장치가 구비된 전자 기기, 특히 터치스크린 패널과 같은 입력수단이 구비된 전자기기가 널리 사용되고 있다[1]. 일반적으로 터치스크린 패널은 윈도우 기판, 블랙매트릭스층, 투명전극층, 금속전극층, 프라이머층 등으로 구성된다. 이 중에서 투명전극층의 소재로서 ITO (Sn-doped indium oxide) 박

막이 널리 사용되고 있다. 그러나 ITO는 가시광선 투과도나 전기 전도성은 우수하지만, 높은 취성을 가질 뿐만 아니라[2,3] 값비싼 진공증착 공정과 포토리소그래피 공정이 포함되어 제조단가가 비교적 높으며, 고온공정, 낮은 유연성 플라스틱 기판과의 열팽창계수 차이 등의 문제로 인하여 플렉서블 디스플레이와 같은 유연전자소자로서의 적용에 어려움이 많다는 문제점이 있다[4-6]. 따라서, ITO를 대체하기 위한 다양한 소재 및 다양한 방법이 연구되고 있다. 근래 진공 증착공정이 필요 없으면서도 상온 상압에서 도전성 페이스트를 이용하여 고정밀 인쇄를 하고 이를 통하여 ITO를 대체할 수 있는 터치 센서용 전극을 형성하는 메탈메쉬에 대한 연구

*Corresponding Author: Joon-Hyung Lee

School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University

Tel: +82-53-950-7512 ; Fax: +82-53-950-5645

E-mail: joonlee114@gmail.com

가 활발하게 진행되고 있으며[7] 일부는 상용화에 성공하였다.

도전성 페이스트의 대표적인 소재인 Ag 전극은 유연 디스플레이, FPCB(Flexible Printed Circuit Board), 유연 태양광 모듈, 유연 배터리, RFID tag 등 고분자 필름 기반의 유연 전자 제품에 널리 사용될 수 있다. 그러나 순수 Ag 전극의 경우 높은 전기전도도를 얻기 위해서는 Ag 페이스트를 구성하는 소재에 따라 열처리 공정이 다를 수 있으나 적어도 Ag 분말입자들의 치밀화가 시작되는 온도까지 (약 250~300°C) 승온하여 소성할 필요가 있다. 이러한 경우 전이온도 (T_g)가 낮은 대부분의 고분자는 기관으로 사용이 불가능하며 고온용 폴리이미드(Polyimide: PI) 등과 같은 몇몇 고가의 내열 고분자 필름에만 한정적으로 적용 가능한 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 Pb가 포함되지 않으면서 용점이 100~200°C 사이에 존재하는 여러 종류의 합금 중에서 용점이 약 138°C인 Bi58Sn42 조성을 갖는 합금을 Ag와 같은 도전성 필러로 선택하였다. 솔더 재료로 많이 사용되고 있는 Bi58Sn42 합금 (이하 BiSn)은 합금은 기존의 Pb계(Pb-Sn) 조성의 합금과 Sn-Ag-Cu계 합금보다 상대적으로 높은 강도 값을 가지며 젖음성이 좋을 뿐만 아니라 가격적인 측면에서도 Ag와 비교하였을 때 저렴하다는 장점을 가지고 있다[8,9].

본 연구에서는 Bi58Sn42 나노합금 분말을 첨가량을 달리하여 나노 Ag분말 전극과 혼합하여 페이스트를 제조하였다. 합금 페이스트를 인쇄한 후 온도를 달리하여 열처리하고, 전극의 미세구조, 전기전도도를 분석하였다. 실험결과 저온융점합금인 BiSn를 첨가한 경우 전기전도도는 급격히 증가하였는데 이것은 BiSn 합금의 용융에 의해 생성된 액상 필름이 Ag 입자간 연결성(connectivity)을 증가시켰을 뿐만 아니라 분말 재배열에도 기여하였기 때문으로 해석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 Ag 페이스트를 제조하기 위한 원료로 평균 입자크기가 300 nm 및 70 nm인 Ag 분말 (99.9%) 를 사용하였다. 도전성 필러로 사용된 Ag 분말의 전기전도 네트워크 역할로 사용된 저융점 나노합금 분말 (Bi58Sn42: Ditto technology, Able metal)은 particle size analyzer로 분석한 결과 평균 입자크기는 약 34 nm였으나 입자크기 분포가 다소 커 약 20-70 nm의 입자크기 분포를 나타내었다. Bi58Sn42 합금분말의 용융점은 문헌상 약 138°C

인 것으로 보고 되었으나 본 실험에서는 DSC 분석을 통하여 136.9°C에서 용융됨을 확인하였다[9].

Ag 페이스트의 제조를 위하여 고분자 바인더로는 수계 acrylic binder (Samwon chemical, BP-30A)를 사용하였다. 전극의 인쇄특성과 직접적으로 관련이 있는 페이스트의 점도 조절을 위하여 수성 solvent (N-Methyl-2-pyrrolidone, Acros organics)를 사용하였다. Ag 나노분말의 분산특성을 향상시키기 위해 인쇄 잉크 및 접착제용 분산제 (BYK-190, BYK)를 사용하였다. 페이스트 내 Ag 분말의 함량은 평균입자크기가 300 nm인 경우 50-80 wt% 까지 10 wt% 간격으로 첨가하였으며, 평균입자크기가 70 nm인 경우 40-70 wt% 까지 10 wt% 간격으로 첨가하였다. Ag 페이스트에 BiSn 합금 분말을 첨가하는 경우 Ag 분말에 대한 첨가비율을 변화시켰는데 이때 Ag와 BiSn 합금을 포함한 총 도전성 금속 분말의 함량은 40-60 wt% 범위에서 제조하였다. 예를 들어 도전성 필러의 함량이 50 wt%인 경우 Ag의 함량이 20~50 wt%로 5 또는 10 wt%씩 증가함에 따라 BiSn 분말의 함량은 30~0 wt%로 5 또는 10 wt% 씩 감소함으로써 Ag와 BiSn 함량을 합한 중량비가 59 wt%가 되도록 하였다. 나머지 50 wt%는 페이스트를 구성하는 바인더, solvent, 분산제 등이 차지한다.

원료들을 골고루 혼합하기 위하여 3-roll-mill을 사용하여 5회 연속하였다. 제조한 페이스트는 Polyimide (PI) 필름위에 실크스크린으로 인쇄 하였다. 이때 인쇄용 스크린 제작은 300 mesh 크기의 망 위에 선폭을 0.5 mm부터 2.0 mm까지의 0.5 mm 간격으로 증가시켜 제작하였으며, 전용 스퀴지 (squeegee)를 이용하여 프린트 하였다. 순수한 Ag 페이스트는 인쇄, 건조 후 150, 200, 250, 300°C의 온도에서, BiSn가 첨가된 페이스트는 150, 180, 200°C에서 각각 1시간 열처리를 진행하였다. 열처리 온도에 따른 Ag 나노분말의 미세구조를 관찰하기 위해 FE-SEM (6701F, JEOL)을 이용하였다. 전극의 저항은 I-V measurement system (4155C, Agilent)를 이용하여 측정하였으며, 전극의 비저항을 계산하기 위해 Daktak thickness (Bruker)를 사용하여 두께를 측정 하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Ag 페이스트의 원료로 사용된 평균 입자크기가 300 nm인 Ag 분말을 150 ~ 300°C 온도 범위에서 1시간 열처리 한 후 FE-SEM을 이용하여 입자의 형상을 관찰한 사진이다. 사진에서 관찰된

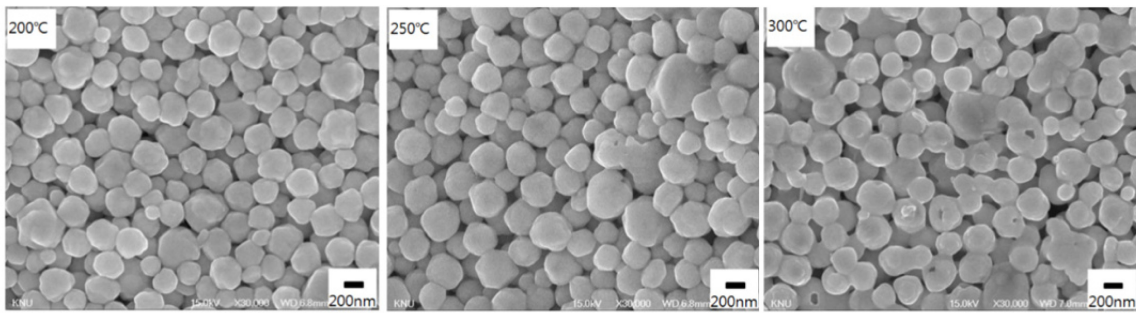


Fig. 1. SEM image of the 300 nm Ag particles after a heat treatment at various temperatures for 1h.

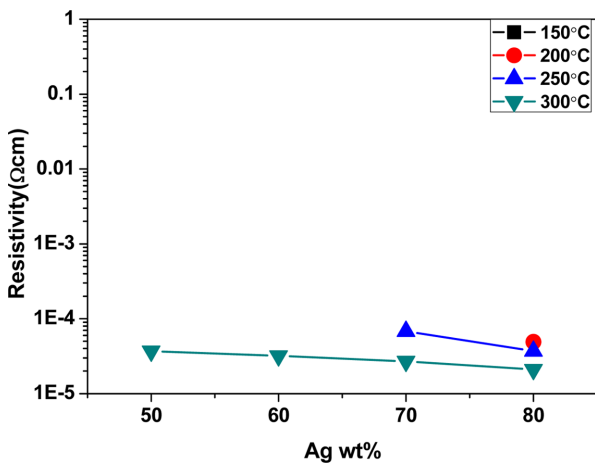


Fig. 2. Change in the resistivity of the 300 nm Ag paste as functions of Ag content and heat treatment temperature.

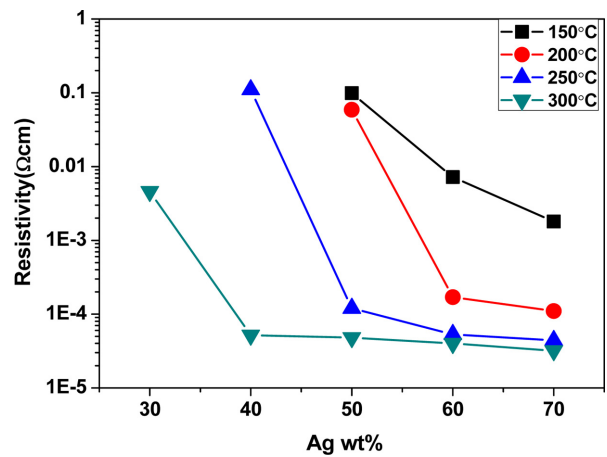


Fig. 3. Change in the resistivity of the 70 nm Ag paste as functions of Ag content and heat treatment temperature.

바와 같이 200°C에서 열처리를 하여도 입자간의 neck은 좁처럼 형성되기 어려웠으나 300°C에 이르러서는 나노 입자간에 neck이 다수 형성되었음을 볼 수 있었다. 이러한 입자간 neck이 형성되면서 페이스트의 전기저항은 급격히 감소할 것으로 생각되며, 인쇄한 페이스트를 열처리하는 과정은 Ag 나노 입자 사이에 존재하는 solvent를 휘발시키고 고분자 바인더의 거리를 좁혀 Ag 입자간의 접촉 및 연결성을 증가시켜주기 위해 필요한 열에너지를 공급하는 것으로 이해된다.

그림 2에는 평균 입자크기가 300 nm인 Ag 분말을 50~80 wt% 첨가하여 페이스트를 제조한 후 150~300°C에서 1시간 열처리한 전극의 비저항을 나타내었다. 열처리 온도가 150°C로 낮은 경우 Ag 분말의 량을 80 wt%까지 증가하여 첨가하여도 비저항 값은 1 Ωcm를 초과하였으나, 이것을 200°C에서 열처리한 경우 4.9×10⁻⁵ Ωcm의 비저항 값을 나타내었다. Ag 분말의 량이 80 wt% 미만인 경우에는 비저항 값이 수 kΩcm 에서 수 MΩcm 범위의 높은 값을 나타내었다. 한편 평균 분말입자의 크기가 70

nm인 Ag 나노분말을 30~70 wt% 첨가하여 제조한 페이스트의 경우 그림 3에 나타난 바와 같이 Ag 함량이 증가할 수록, 또 열처리 온도가 증가할 수록 비저항 값이 감소하였다. 그림 2와 3을 비교하면 입자크기가 다른 Ag 분말을 70 wt%로 동일량을 첨가하고 150 및 200°C에서 열처리하면, 입자크기가 작은 70 nm 분말을 사용한 경우 300 nm에 비하여 비저항 값이 두드러지게 낮게 나타났다. 이것은 Ag 입자크기가 작을 수록 더 큰 치밀화의 구동력을 가질 수 있어 좀 더 낮은 온도에서 neck을 쉽게 형성함으로써 전기전도에 기여하였을 것으로 생각된다. 전기전도도가 매우 높은 Ag라 할 지라도 이들이 입자 상태로 접촉만 하고 있을 경우 완벽한 전기적 접촉을 이루는 것은 어려우며, 전류가 통할 경우 그 접촉점 부근에 전류밀도가 높아져 전기저항이 발생하는 이른바 접촉저항이 생성된다. 그러나 neck이 생성될 경우 입계 (grain boundary) 에서 전자의 scattering은 존재할 수 있으나 접촉저항은 크게 감소될 수 있다. 한편 Ag paste는 고분자 바인더와 Ag 입자의 혼합체로 이루어져 있어 mixing

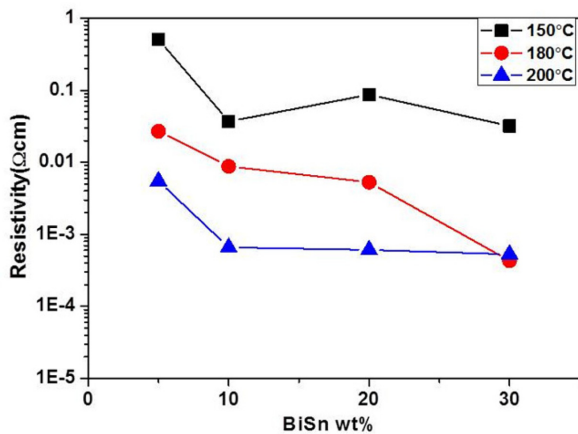


Fig. 4. Resistivity of the 50 wt% 300 nm Ag paste as functions of the BiSn content and heat treatment temperature.

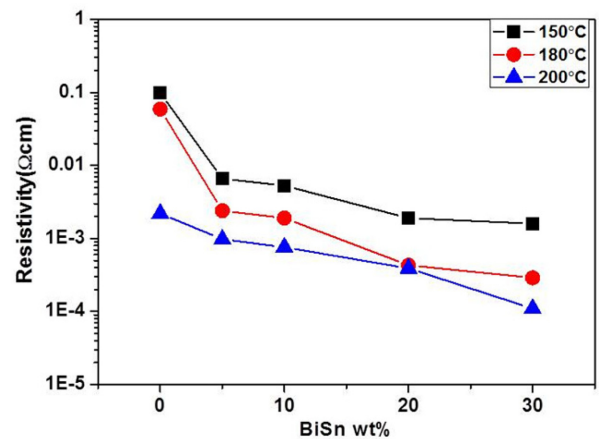


Fig. 5. Resistivity of the 50 wt% 70 nm Ag paste as functions of the BiSn content and heat treatment temperature.

rule에[10-12] 의한 물성의 평가가 가능하다. 절연성인 고분자와 도전성 입자가 혼합되어 있을 경우 도전성 입자간의 연결이 확립되어야 전기가 통할 수 있는데 혼합체에서 도전성 입자간의 3차원적 연결이 일어나는 percolation threshold 부피분율은 입자의 크기, 모양, 분산정도 등에 의해 영향을 받는다. 이 중 도전성 물질의 입자 크기가 작을 수록 3차원적 연결이 일어나는 percolation threshold 부피분율이 감소하는 경향을 보임으로써 그림 2 및 3에서 나타난 바와 같이 같은 부피분율의 Ni 분말을 첨가한 경우라 할 지라도 입자크기가 작은 70 nm 분말을 사용한 경우 300 nm에 비하여 비저항 값이 두드러지게 낮게 나타난 것으로 믿어진다.

그림 4에는 평균 입자크기가 300 nm인 Ag 분말과 평균 입자크기가 34 nm인 BiSn 합금 분말을 사용하여 전도성 필러의 총 함량이 50 wt%가 되도록 제조한 페이스트를 150, 180, 200°C에서 열처리 한 후 비저항 값을 나타내었다. 이때 BiSn 합금의 함량은 0, 5, 10, 20, 30 wt%로 증가하였으며, Ag 분말의 함량은 50, 45, 40, 30, 20 wt%로 감소하였다. 그림 2에서 보았듯이 300 nm인 Ag 분말을 50 wt% 첨가한 경우 터치센서로 사용하지 못할 정도로 비저항 값이 높았으나 BiSn 분말을 5 wt%만 소량 첨가하더라도 비저항 값은 크게 감소하였다. 또 같은 량의 5 wt%만 첨가한 경우라도 열처리 온도가 150°C 에서 200°C로 증가할 경우 비저항 값은 5.1×10^{-1} 에서 $5.5 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 으로 약 100배 정도 감소하였다. 이것은 BiSn 합금의 용융점인 138°C를 넘어 온도가 계속 증가하면 용융합금의 점도가 낮아져 모세관작용에 의하여 Ag 분말 사이로 더 깊

이 침투할 수 있었기 때문인 것으로 생각된다. 이로써 BiSn 저융점 합금이 용융되면서 Ag 입자간의 연결성이 향상 되었고 첨가량이 많아질수록 Ag 입자의 젖음성 및 연결성이 증가 되었을 것이라 생각된다. 그러나 BiSn 함량이 증가하여도 비저항 값이 10^{-5} 이하로 감소하지는 않았는데 그것은 Bi58Sn42 자체의 비저항 값이 Ag의 비저항 값 ($1.55 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$)에 비하여 약 25배 이상 높아 순수한 Ag만을 사용한 전극에 비하여 저항이 다소 높을 수 밖에 없을 것으로 생각된다.

그림 5에는 평균 입자크기가 70 nm인 Ag 분말과 평균 입자크기가 34 nm인 BiSn 합금 분말을 사용하여 전도성 필러의 총 함량이 50 wt%가 되도록 제조한 페이스트를 150, 180, 200°C에서 열처리 한 후 비저항 값을 나타내었다. 그림 4에 비하여 비저항 값이 약 10배 정도 낮게 나타났는데 이것은 위의 그림 2, 3에서 언급한 바와 같이 Ag 입자크기에 따른 치밀화 구동력 및 mixing rule에 의한 전도성 필러간의 연결성 증가의 효과 때문인 것으로 생각된다.

본 논문에는 나타나지 않았지만 순수한 Ag 분말을 사용한 페이스트 및 BiSn 합금을 첨가한 페이스트에 대하여 150~200°C의 온도 범위에서 열처리 시간을 10분~60분으로 증가함에 따른 비저항 변화 거동 관찰하였다. 비저항 값은 BiSn 합금분말이 첨가되지 않은 순수 Ag (70 nm)전극에서 $10^{-1} \Omega\text{cm}$ 에서 $10^{-3} \Omega\text{cm}$ 범위까지 약 100배 정도 감소하였으며 BiSn 분말이 첨가된 경우는 $10^{-2} \Omega\text{cm}$ 에서 $10^{-3} \Omega\text{cm}$ 정도로 약 10배 정도 감소함을 보였다. 한편 열처리 시간이 증가할 경우 순수한 Ag 페이스트는 열처리시간 초기에 저항이 급격히 감소하여

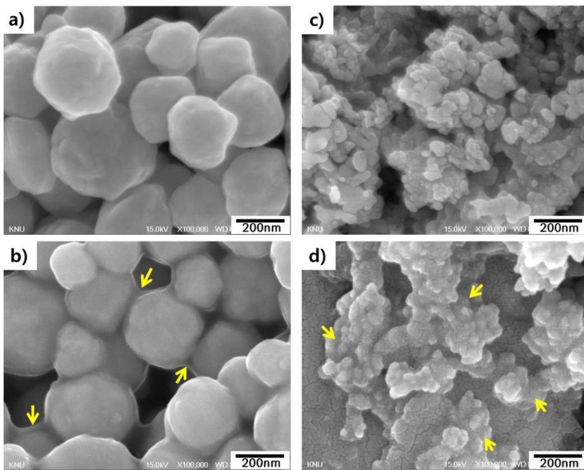


Fig. 6. SEM microstructure of the 50 wt% filler added pastes after a heat treatment at 200 °C for 1 h. (a) pure 300 nm Ag paste, (b) 300 nm Ag paste with the 5 wt% BiSn alloy powder, (c) pure 70 nm Ag paste, and (d) 70 nm Ag paste with the 5 wt% BiSn alloy powder.

안정화되는데 까지 소요되는 시간은 70 nm 분말을 200°C에서 열처리하는 경우 최소 30분 이상이 필요하였으며 300 nm 분말의 경우 10분 경과시 $0.08 \times 10^{-1} \Omega\text{cm}$ 에서 60분 경과시 $0.1 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 로 감소하였는데 시간이 지나도 저항의 감소폭이 줄어들지 않고 계속적으로 감소하였다. 반면 BiSn 합금이 첨가된 페이스트는 열처리시간이 10분이 지나면서 부터 비저항 값이 비교적 안정화되는 것이 관찰됨으로써 저융점 합금이 용융되면서 Ag 입자의 연결성 또한 빠르게 진행되어 열처리 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 생각되었다.

그림 6에는 50 wt% 전도성 필러가 포함되고 Ag 분말의 입자크기와 BiSn 합금의 첨가 유무에 따라 제조된 페이스트를 200°C에서 1시간 열처리한 후 전자현미경으로 관찰한 사진을 나타내었다. (a)는 300 nm 순수 Ag 페이스트, (b)는 5 wt% BiSn 합금이 포함된 300 nm Ag 페이스트, (c)는 70 nm 순수 Ag 페이스트, (d)는 5 wt% BiSn 합금이 포함된 70 nm Ag 페이스트의 미세구조 사진이다. (a)는 그림 2에서 관찰한 바와 같이 200°C에서는 300 nm Ag 분말이 neck을 형성할 수 없는 낮은 온도이기 에 Ag 분말들의 연결성이 떨어져 비저항 값이 매우 높은 경우이다. 5 wt% BiSn 합금이 포함된 경우 (b, d) 200°C 열처리 후 화살표로 나타낸 바와 같이 용융된 BiSn 합금이 Ag 입자간 neck을 형성하여 연결성이 증대 되었음을 관찰할 수 있었다. 위에서 관찰된 저융점 합금 BiSn의 효과는, 소결초기에는 융점이 낮은 조성이 용융되어 액상이 존재하나, 소결이 진행됨에 따라 액상이 입계나 triple

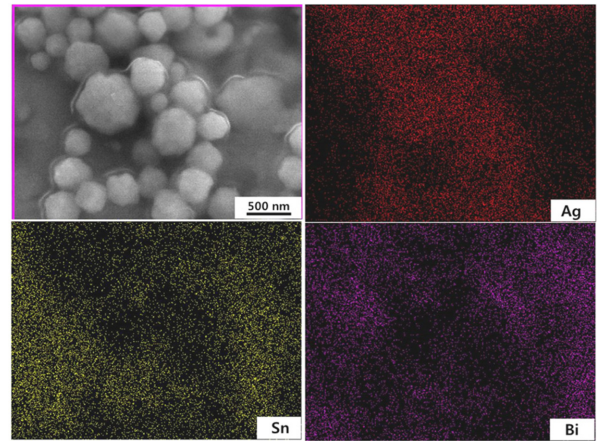


Fig. 7. EDS analysis of the 50 wt% filler added paste (40 wt% Ag and 10 wt% BiSn) after a heat treatment at 200°C for 1 h.

junction으로 스며들어 사라짐에 따라 거의 고상만이 존재하는 상태에서 소결이 완료되는, 천이액상 소결 (transient liquid phase sintering) 현상으로 설명할 수 있다[14-16]. 즉, BiSn 저온 융점 분말이 열처리과정 동안 용융하여 액상을 형성하게 되고 이 액상은 페이스트 내부의 solvent 등이 휘발한 후 생성된 기공 및 Ag 입자간 공극을 통하여 모세관력의 힘으로 스며나가는 과정에서 BiSn 액상의 점도 (열처리온도), 기공 및 공극크기 (Ag 입자크기), 열처리시간 등이 액상이 퍼져나가 Ag 입자간의 연결성에 영향을 미쳐 페이스트의 비저항 값을 변화시켰을 것으로 믿어진다.

그림 7에는 40 wt% Ag 분말 (300 nm)과 10 wt%의 BiSn 합금 분말을 첨가한 Ag 페이스트를 200°C에서 열처리한 샘플의 EDS 분석 결과를 나타내었다. 미세구조에서는 Ag 입자들이 용융된 BiSn에 의해 둘러싸여져 있는 모양이 관찰 되었으며, EDS 분석에서는 Bi 및 Sn원소가 샘플 전체에 골고루 퍼져 분포하고 있음이 관찰 되었다.

4. 결 론

Ag 페이스트를 구성하는 Ag 입자들은 약 250°C가 되어야 Neck이 형성 되고 이를 통하여 전기 전도도가 급격히 향상 된다. 이러한 이유로 인해 flexible 소자들을 구현하기 위해 사용할 수 있는 고분자 기판의 선택 폭이 매우 좁아진다는 문제점이 있다. 본 연구에서는 Ag 페이스트를 제조하는데 있어서 저온 융점 합금인 BiSn 분말을 량을 달리하여 첨가하고 열처리 과정을 거친 후 전기전도도 (비저항) 변화거동을 관찰 하였다.

BiSn 합금을 소량 (5 wt%) 첨가한 경우에도 200°C 미만의 열처리 온도에 따라 비저항 값이 급격히 감소하였는데 이것은 저융점 합금이 용융되면서 모세관력이 작용하여 Ag 입자들 사이로 퍼져 나가 액상 필름을 형성하게 되고, 이에 따라 Ag 입자가 재배열 할 수 있도록 도움을 줄 뿐만 아니라 Ag 입자끼리의 연결성을 향상 시켰기 때문으로 생각된다. 또 BiSn 저온 융점 합금 분말을 첨가한 경우 전극 페이스트를 인쇄한 후 열처리 공정을 거치게 되는데 적절한 전기전도도 (비저항) 값에 도달하기 위한 열처리 시간을 단축할 수 있는 효과도 확인되었다.

Acknowledgement

이 논문은 2015학년도 경북대학교 복원학술연구비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Flexible Flat Panel Displays, Gregory P. Crawford, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [2] J. Y. Kim, S. I. Hong, A Study on the Resistance and Crack Propagation of ITO/PET Sheet with 20 nm Thick ITO Film, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 46 [1] (2009) 86-93.
- [3] T. Ono, M. Agari, S. Mori, T. Imamura, T. Miyayama, T. Nakamura, N. Nakagawa, High-performance large-area projected capacitive touch screen using double layered metal mesh electrodes, *Society for Information Display International Symposium digest of technical papers*, 44 [S1] (2013) 215-218.
- [4] M. Aryal, J. Geddes, O. Seitz, J. Wassel, I. McMackin, B. Kobrin, Sub-Micron Transparent Metal Mesh Conductor for Touch Screen Displays, *Society for Information Display Symposium Digest of Technical Papers* 45 [1] (2014) 194-196.
- [5] Y. M. Choi, K. Y. Kim, E. S. Lee, T. M. Lee, Reverse-Offset Printed Single-layer Metal-Mesh Touch Screen Panel, *Society for Information Display Symposium Digest of Technical Papers*, 45 [1] (2014) 197-199.
- [6] I. Nojiri, T. Ono, M. Agari, S. Mori, T. Imamura, T. Miyayama, T. Nakamura, N. Nakagawa, High-Performance Mutual-Capacitive Touch Screen using Double-Layered Metal-Mesh Electrodes with Separated Floating Electrodes, *Society for Information Display Symposium Digest of Technical Papers*, 45 [1] (2014) 544-547.
- [7] L. Wu, W. He, D. Teng, S. Ji, C. Ye, A New Route To Fabricate Large-Area, Compact Ag Metal Mesh Films with Ordered Pores, *Langmuir*, 28 [19] (2012) 7476-7483.
- [8] H. W. Miao, J. G. Duh, Microstructure Evolution in Sn-Bi and Sn-Bi-Cu Solder Joints Under Thermal Aging, *Materials Chemistry and Physics* 71 (2001) 255-271.
- [9] T. H. Kim, The Ag paste manufacture for metal mesh touch sensor and characteristic study using the low-melting alloy (Sn58Bi), Master Thesis, (2014) Kyungpook National University.
- [10] N.F. Uvarov, Estimation of Composites Conductivity Using a General Mixing Rule, *Solid State Ionics*, 136-137 (2000) 1267-1272.
- [11] H. W. Choi, Y. W. Heo, J. H. Lee, J. J. Kim, H. Y. Lee, E. T. Park, Y. K. Chung, Effects of Ni Particle Size on Dielectric Properties of PMMA-Ni-BaTiO₃ Composites, *Integrated Ferroelectrics*, 87 (2007) 85-93.
- [12] A. Sihvola, Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 1 (2000) 393-415.
- [13] Y. P. Mamunya, Y. V. Muzychenko, P. Pissis, E. V. Lebedev, and M. I. Shut, Percolation Phenomena in Polymers Containing Dispersed Iron. *J. Polymer Engineering*, 42 (2002) 90-100.
- [14] Y. Xiong, H. Wang, Z. Fu, Transient liquid-phase sintering of AlN ceramics with CaF₂ additive, *Journal of the European Ceramic Society*, 33 [11] (2013) 2199-2205.
- [15] H. Feng, J. Huang, J. Yang, S. Zhou, R. Zhang, S. Chen, A Transient Liquid Phase Sintering Bonding Process Using Nickel-Tin Mixed Powder for the New Generation of High-Temperature Power Devices, *Journal of Electronic Materials*, 46 [7] (2017) 4125-4159.
- [16] H. Greve, L. Chen, I. Fox, F. McCluskey, Transient Liquid Phase Sintered Attach for Power Electronics, 2013 IEEE 63rd Electronic Components & Technology Conference, (2013) 435-440.