

# 레이저 경화된 Ag 나노 전극의 기계적 유연성 및 접착력 평가 Mechanical Reliability and Adhesion Evaluation of Ag Nanoparticle Electrode by Laser Annealing

\*김민수<sup>1</sup>, #좌성훈<sup>1</sup>, 은경태<sup>1</sup>, 고승환<sup>2</sup>, 여준엽<sup>2</sup>, 홍석준<sup>2</sup>, 김건웅<sup>2</sup>, 이승현<sup>3</sup>

\*M. S. Kim<sup>1</sup>, #S. H. Choa([shchoa@seoultech.ac.kr](mailto:shchoa@seoultech.ac.kr))<sup>1</sup>, K. T. Eun<sup>1</sup>, S. H. Ko<sup>2</sup>, J. Y. Yeo<sup>2</sup>, S. J. Hong<sup>2</sup>, K. U. Kim<sup>2</sup>, S. H. Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원, <sup>2</sup>카이스트 기계설계자동화공학부

<sup>3</sup>한국기계연구원

Key words : Laser annealing, Thermal annealing, Ag nanoparticle, Flexible, Bending fatigue, Scratch test

## 1. 서론

최근 기술의 발전에 따라 roll-to-roll(R2R) 장비를 이용한 유연 박막 및 유연 전기 소자의 대량 생산 및 연속 생산 공정이 중요한 요소로 대두되고 있다. Gravure offset 방식을 적용한 R2R 장비를 이용하여 폴리머 기반의 기판 위에 미세 금속 패턴이 된 샘플을 제작 할 수 있으며, 이러한 공정 방식은 저 가격 및 공정 속도에 큰 장점을 갖고 있다. R2R 공정으로 제작된 미세 금속 패턴의 전기적 특성을 높이기 위해 열 경화 (thermal annealing) 방식이 필요하게 되는데, 이러한 열을 직접 가하는 방식은 사용되는 기판이 허용하는 온도 이상의 열이 가해졌을 때 기판이 손상을 입게 된다는 단점이 있다. 따라서 다양한 경화 기술이 연구 되고 있다. 이 중에서 레이저 경화 (laser annealing) 의 경우, laser focusing 에 의해 열 영향부를 최소화 시켜 기판에 손상을 적게 주면서, 열 경화에 비해 빠른 시간에 공정을 할 수 있는 특징이 있다. 금속 나노 입자는 레이저 에너지를 흡수하게 되고 흡수된 에너지를 금속 입자 내 lattice 의 vibration 을 일으키게 되어 이를 통해 생성된 열로 인하여 경화가 일어나게 된다.[1]

따라서 본 연구에서는 자체적으로 제작된 기계적 신뢰성 장비를 이용하여 레이저 와 열로 경화된 두 종류의 Ag 나노 전극의 bending fatigue 실험을 하여 비교 하였다. 또한 경화 된 Ag 나노 전극의 나노 스크래치 실험을 통한 접착력을 분석 하였다.

## 2. 시편 제작 및 실험 준비

본 실험에 사용된 Ag 나노 입자 paste 는 ANP사의 DGPOS(12000) 제품으로 후처리 없이 바로 사용되었다. PET 기판에 Ag 나노 전극을 패터닝 시키기

위해 gravure offset 공정을 사용 하였다.

사용된 열 경화 방식은 항상 일정한 온도를 유지시키기 위하여 온도가 feedback 이 되는 hot chuck (MS-Tech)을 사용하였고, 정확한 열 전달을 위해 hot chuck 을 진공 상태로 만들어 고정시켰다. Hot chuck의 온도를 80 °C, 100 °C, 120 °C의 온도에서 유지하여 2시간동안 열 경화 하였다.

사용된 레이저 경화 방식은 532nm의 wavelength 를 가지는 diode-pumped continuous wave (CW) ND:YAG 레이저(Millenia V, Spectra Physics) 이며, 레이저 경화를 하기 위해, Half Wave Plate (HWP) 및 Polarized Beam Splitter (PBS)을 이용하여 power 를 제어하였고, 사용되는 레이저 빛의 균일함을 보장하기 위해 homogenizer를 사용해 uniformity를 개선하였다.

빠른 속도의 레이저 경화 공정을 위해 갈바노 (galvano) 미러와 f-theta 렌즈 (f=100 mm)를 이용한 레이저 스캐너 (hurry SCAN II, Scanlab)를 사용하였다. 레이저 경화 공정을 위해 사용된 레이저 파워는 200 mW, 250 mW이며, 및 주사 속도는 500 mm/s로 동일하다. Fig.1 은 PET 기판에 증착된 Ag 나노 전극을 나타내고 있다. Fig.1 은 PET 기판에 증착된 Ag 나노 전극을 나타내고 있다.

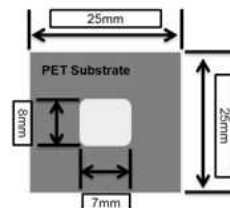


Fig.1 Schematic drawing of Ag nanoparticle sample

## 3. Ag 나노 전극의 기계적 유연성 평가

본 연구에서는 기계적 굽힘 장비를 이용하여 레이저 와 열로 경화된 Ag 나노 전극의 bending fatigue 실험을 진행 하였으며, fatigue 횟수에 따른 저항 변화를 측정하였다. 또한, Ag 나노 박막의 스크래치 실험을 진행하여 박막이 파괴되기 시작 하는 부분을 분석하여 critical loads를 측정하였다.

#### 4. 실험 결과

Fig2 (a)는 2시간 동안 120 °C 온도에서 열 경화된 Ag 나노 전극을 bending radius 7 mm [2]에서 10,000 cycle의 bending fatigue 실험 결과이다. 초기 저항은 1.9 Ω 이며, 약 1,000 번의 fatigue 실험에서 서서히 증가하기 시작하여 10,000 번까지 fatigue 실험을 진행 하였을 경우 저항은 2.45 Ω으로 증가하였다.

Fig.2 (b)는 레이저 조건으로 파워를 250 mW 및 주사 속도는 500 mm/s로 경화한 Ag 나노 전극을 동일한 방식으로 실험한 결과이다. 실험 결과, 열 경화된 Ag 나노 전극과 유사한 경향을 나타내고 있지만, 저항 변화가 약간 작다. 초기 저항은 2.09 Ω이며, 1,000 번의 fatigue 실험에서 서서히 증가하기 시작하여 10,000 번까지 fatigue 실험을 진행 하였을 경우 저항은 2.28 Ω으로 증가하였다.

Fig.3 은 열 경화 된 Ag 나노 전극을 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 나노 스크래치 실험을 진행하였을 때 박막의 failure mode 나타내고 있다.

박막이 파괴되기 시작했을 때의 critical load 는 5.3 mN 이며, 박막이 완전히 파괴되었을 때 scratch load 는 8.1 mN 으로 측정 되었다.

Fig.4 는 레이저 경화 된 Ag 나노 전극의 역시 동일한 방식으로 나노 스크래치 실험을 진행하였을 경우, 박막의 failure mode 결과를 나타내고 있으며, 실험 결과, 박막이 파괴되기 시작했을 때의 critical load 는 2.85 mN 이며, 박막이 완전히 파괴되었을 때 scratch load 는 5.4 mN 으로 측정되었다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 Ag 나노 전극을 열 경화와 레이저 경화 처리 하였을 때 bending fatigue 특성 및 나노 스크래치 시험을 진행하였다. Bending fatigue 실험 결과, 열 경화 및 레이저 경화시킨 Ag 나노 전극 모두 좋은 bending fatigue 특성을 나타냈다. 그러나 나노 스크래치 시험 결과에서는 레이저 경화 된 Ag 나노 전극의 접착력은 열 경화된 Ag 나노 전극의 접착력 보다 좋지 않다고 판단된다.

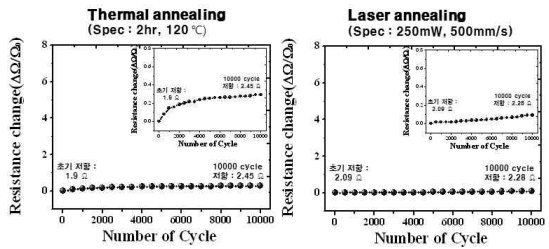


Fig.2 (a) Thermal annealed Ag nanoparticle and (b) laser annealed Ag nanoparticle after bending fatigue test

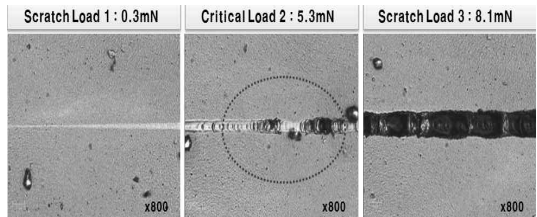


Fig.3 Failure modes when scratching the thermal annealed Ag nanoparticle

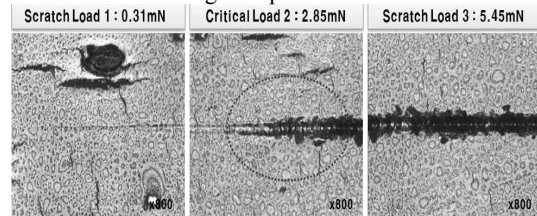


Fig.4 Failure modes when scratching the laser annealed Ag nanoparticle

#### 후기

본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업의 일환인 “나노 잉크를 이용한 박막 형 슈퍼 캐패시터 연속 생산 공정 및 시스템 개발” 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. Ko, S. H, et al., “All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles,” Nanotechnology, 18, 34, 345202, 2007.
2. Park, S. I, et al., “Theoretical and experimental studies of bending of inorganic electronci materials on plastic substrates,” Adv. Funct. Mater. 18, 2673-2684, 2008.