

## 차세대 웨어러블 디바이스를 위한 높은 기계적/전기적 특성을 갖는 CNT-Ni-Fabric 유연기판

김형구<sup>1</sup> · 노호균<sup>2</sup> · 차안나<sup>1</sup> · 이민정<sup>1</sup> · 하준석<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 신화학소재공학과

<sup>2</sup>전남대학교 CORE 에너지 융복합 전문 핵심연구지원센터

### CNT-Ni-Fabric Flexible Substrate with High Mechanical and Electrical Properties for Next-generation Wearable Devices

Hyung Gu Kim<sup>1</sup>, Ho Kyun Rho<sup>2</sup>, Anna Cha<sup>1</sup>, Min Jung Lee<sup>1</sup>, and Jun-Seok Ha<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Advanced Chemicals & Engineering, Chonnam National University, 77 Yong-bong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

<sup>2</sup>Energy Convergence Core Facility, Chonnam National University, 77 Yong-bong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

(Received June 12, 2020: Corrected June 17, 2020: Accepted June 26, 2020)

**초 록:** 최근 웨어러블 장치에 적용하기 위한 유연성 기판에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 유연성 기판 중 의복에 웨어러블 장치를 적용하기 위한 전도성 섬유기판에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는, 면섬유 기판 표면에 CNT와 Pd복합 용액을 스프레이 법을 이용하여 형성하였고, 무전해 도금법을 이용하여 금속층을 도금하였다. 도금된 섬유기판의 형상을 분석하기 위하여 SEM 장비를 이용하였고, CNT를 증착한 섬유기판의 표면에 Ni 레이어가 형성된 것을 확인하였다. EDS 분석을 통하여 섬유기판의 표면에 형성된 물질이 Ni임을 알 수 있었다. 전기적 특성을 확인하기 위하여 4-point probe로 무전해 도금을 진행한 섬유기판의 표면저항 및 저항 분포를 확인하기 위한 맵핑을 진행하였다. 무전해 도금의 진행 시간이 길어질수록 전도성이 향상되었음을 확인할 수 있었고, 표면 위치 별 저항의 분포가 균일함을 알 수 있었다. 인장력, 굽힘, 뒤틀림 시험을 통하여 기계적 스트레스로 인한 저항변화를 측정하였다. 그 결과 도금 시간이 길어질수록 유연성 기판의 저항변화가 점점 사라지는 것을 확인하였다. UTM(Universal testing machine)을 이용하여 도금 시간 변화에 대한 무전해 도금 기판의 기계적 특성 향상 여부에 대하여 분석하였다. 인장강도는 무전해 도금을 2 시간 동안 진행한 전도성 섬유기판의 경우, 면섬유 기판보다 약 16 MPa 증가하였다. 이러한 결과들을 토대로 Ni-CNT-Fabric 유연기판은 의류 일체형 전도성 기판으로 이용되기에 충분함을 확인하였고, 이러한 연구 결과는 유연기판, 웨어러블 디바이스뿐만 아니라 유연성이 필요한 배터리, 촉매, 태양전지 등에 적용되어 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

**Abstract:** Recently, numerous researches are being conducted in flexible substrate to apply to wearable devices. Particularly, Conductive substrate researches that can implement the wearable devices on clothing are massive. In this study, we formed fiber substrate spraying CNT and Pd mixed solution on it and plated metal layer with electroless plating. Used SEM equipment and EDS analysis to analysis structure of the plated fiber substrate and discovered Ni layer was created. For check electrical properties, mapping was performed to check surface resistance and distribution of resistance of electroless plated fiber substrate with 4-point probe. It was confirmed that conductivity was improved as the duration of electroless plating was increased, and it was found that distribution of resistance by surface location was uniform. Changes in resistance due to mechanical stress were measured through tensile, bending, and twisting tests. As a result, it was confirmed that resistance change of flexible substrate gradually disappeared as plating time increased. Using UTM (Universal testing machine), it was analyzed mechanical properties of the electroless plated substrate with respect to changes in plating time were improved. In the case of conductive fiber substrate in which electroless plating was performed for 2 hours, tensile strength was increased by 16 MPa than fiber substrate. Based on these results, we found that Ni-CNT-Fabric flexible substrate is adequate for clothing-integrated conductive substrate and we positively expect that this experiment shows flexible substrate can adapt to and develop not only a wearable device technology but also other fields needing flexibility such as battery, catalyst and solar cell.

**Keywords:** Wearable device, Conductive fiber, Flexible substrate, CNT spray, Ni electroless plating

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: [jsha@jnu.ac.kr](mailto:jsha@jnu.ac.kr)

© 2020, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

### 1. 서 론

최근 스마트 시계, 스마트 의복, 스마트 안경 등 웨어러블 디바이스 관련 기술이 급속히 발전하고 있고, 헬스케어, 패션 등 더 넓은 분야로 확대되고 있다. 웨어러블 디바이스 및 관련 ICT 디바이스의 수요가 증가함에 따라 웨어러블 연구를 다양한 분야에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>1-2)</sup> 웨어러블 분야는 크게 액세서리형, 의류 일체형 그리고 신체부착 및 생체이식형으로 나누어져 있다. 그 중 의류 일체형 디바이스의 경우, 전도성 섬유와 직물을 이용한 회로보드 및 접착형 전자소자 패키징 기술을 위한 전도성 기판 연구가 진행되고 있다.<sup>3-5)</sup>

웨어러블 디바이스에 적용하기 위한 전도성 기판 소재로는 전통적으로 금속이 이용되어 왔다. 하지만 금속의 경우, 유연성이 부족하고, 지속적인 스트레스에 취약하며, 무겁다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 진공 증착법을 이용하여 유연기판의 표면에 얇은 두께의 금속 박막을 형성하기 위한 시도가 이루어졌지만, 증착되는 면이 섬유의 복잡한 표면이기 때문에 단면 증착방식은 일상 생활에서 발생할 수 있는 굽힘 스트레스에 대한 내구성이 매우 낮다는 문제가 발생하였다.<sup>6-10, 20)</sup> 이를 해결하고자 삼차원 전면 금속층 형성이 가능한 도금법을 이용하는 연구가 진행되었으나,<sup>11-15)</sup> 역시 굽힘에 대한 내구성의 문제가 발생하는 등 단일 금속소재의 한계가 보고되었다. 금속 이외의 재료로는 전도성 고분자 섬유 및 CNT, Graphene과 같은 탄소소재와 같은 신소재가 개발되고 있다. 하지만 전도성 고분자는 상대적으로 낮은 전기전도도로 인하여 디바이스에 적용하기 어렵다는 단점이 있다.<sup>16)</sup> 따라서 가볍고, 우수한 전도도 및 기계적 강도를 갖는 탄소소재가 각광받고 있으며, 특히 섬유 형태를 갖는 CNT가 가장 적합한 재료로 평가받고 있다. 하지만 CNT가 갖는 우수한 전기전도도는 단일 섬유일때만의 특성이며, bulk 구조에서는 접촉저항으로 인하여 그 특성이 제대로 발휘되지 못한다는 문제가 있다.<sup>17-19)</sup> 따라서 이를 해결하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

이러한 이유로, 본 연구에서는 CNT와 Ni을 Fabric의 표면에 형성하여, 높은 전도성을 갖는 유연섬유기판을 제작하였고, 이렇게 제작된 시편의 기계적 스트레스에 대한 기판의 신뢰성, 그리고, 전기전도도 변화 등 유연기판에의 적용 가능성에 대하여 살펴보았다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 Ni-CNT-Fabric 유연기판 제조

SWCNT 용액(SAD-003DW, Nano solution, Korea) 30 ml와 Pd activator (Hosung ST, Korea) 10 ml를 섞어주었다. 10×10 cm<sup>2</sup>의 면직물을 160 °C hot plate 위에 고정시키고, 스프레이법을 이용하여 앞서 제조한 용액을 40 ml 분사하였다. 분사가 완료된 후 남은 수분을 완전히 제거하

기 위하여 80 °C 오븐에서 1시간 건조하였다. 그 후 Ni 무전해 도금 용액(Hosung ST, Korea)을 이용하여 유연기판에 Ni를 도금하였으며, 이 때, 도금조의 온도는 80 °C로 설정하였다. 도금 시간은 각각 30분, 60분, 120분 진행하였고, 도금이 완료된 후 유연기판을 증류수에 10분간 세척한 후, 80 °C 오븐에서 1시간 건조하였다. 위 모든 과정은 전남대학교 에너지 융복합 전문핵심 연구지원센터에 있는 Yellow room에서 진행하였다.

#### 2.2 Ni-CNT-Fabric 유연기판 특성 분석

제작된 유연기판의 구조와 성분을 분석하기 위하여 SEM(Zeiss, Germany)과 EDS 분석을 진행하였다. 기판의 전기적 특성을 확인하기 위해서 4-point probe 장비(Dasol ENG, Korea)를 사용하여 표면 저항을 측정하였다. 또한, 균일한 도금이 진행되었는지 확인하기 위하여 120분 도금된 유연기판을 10×10 cm<sup>2</sup>크기로 자른 후, 1 cm 간격으로 면저항을 측정하여 맵핑 하였다. 스트레스가 인가된 상태에서의 전기전도도 변화를 분석하기 위하여 인장력, 굽힘, 뒤틀림 시험을 진행하면서 전기특성 변화를 측정하였다. 인장력 만능 인장 시험기(UTM, Shimadzu, Japan)를 이용하여 기계적 강도를 측정하였다. 인장력 측정을 위한 cell의 무게는 10 kN으로 설정하였다. 5 MPa씩 인장력을 가하고 측정 간격을 1 cm로 설정하여 측정을 진행하였다.

굽힘 실험에는 Bending Tester를 이용하였고, 곡률반경 10 mm로 총 5,000회의 굽힘 실험을 진행하였다. 뒤틀림 실험에서는 기판을 90° 유연기판에 3600°까지의 뒤틀림을 가하여 이에 따른 저항변화를 측정하였다. 제작된 유연성 기판의 기계적 강도를 확인하기 위하여 인장강도 시험을 진행하였다. 인장강도 시험에는 UTM 장비를 이용하였고, 인장력 측정을 위한 cell의 무게는 10 kN으로, Stroke 속도는 30 mm/sec로 설정하였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 샘플은 전체 길이 80 mm, 표점 거리 40 mm,

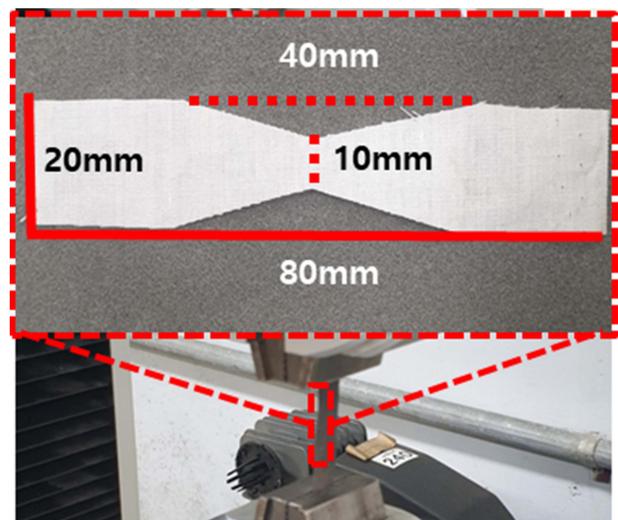


Fig. 1. Size for samples made to measure Tensile strength.

표점의 폭 10 mm, 표점 이외의 부분의 폭은 20 mm의 크기로 제작하였다.

### 3. 결과 및 토론

Fig. 2(a)는 니켈 무전해 도금에 대한 과정을 간단하게 나타낸 모식도이다. 10×10 cm<sup>2</sup> 크기의 면직물에 CNT 용액을 스프레이 하였고, Ni 무전해 도금을 진행하였다. 스프레이법을 이용한 이유는 일반적으로 사용되는 스펀 코팅 방법에 비해 소량의 용액을 사용하여 전면에 도포가

가능하므로 비용 절감 효과가 있다. 또한 기판의 상, 하부 및 측면의 코팅이 원활히 수행되고 딥핑 방식에 의한 코팅과 비교하였을 때 step coverage가 더 우수하다는 장점이 있기 때문이다. 공정단계 및 도금 시간별 표면의 변화를 확인하기 위하여 SEM을 이용하였고, 이의 SEM image를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 사진에서 보이는 바와 같이 도금이 30분 및 60분 진행된 경우, 금속이 섬유 표면에 완전히 형성되지 못하였으나, 120분이 지난 후에는 직물의 섬유 표면에 금속층이 완전히 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. EDS 분석을 통하여 섬유의 표면에

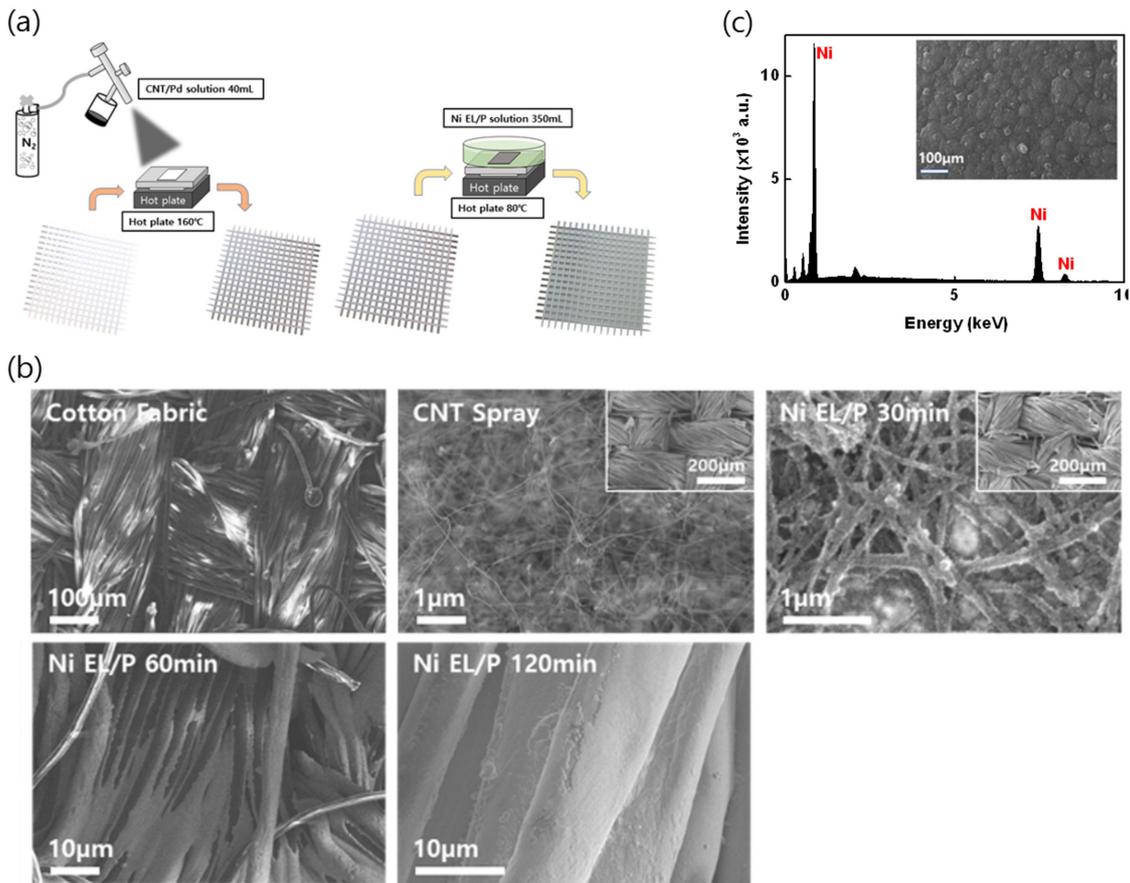


Fig. 2. (a) Schematic diagram of the whole process, (b) Surface SEM images by plating process, (c) Composition analysis EDS results.

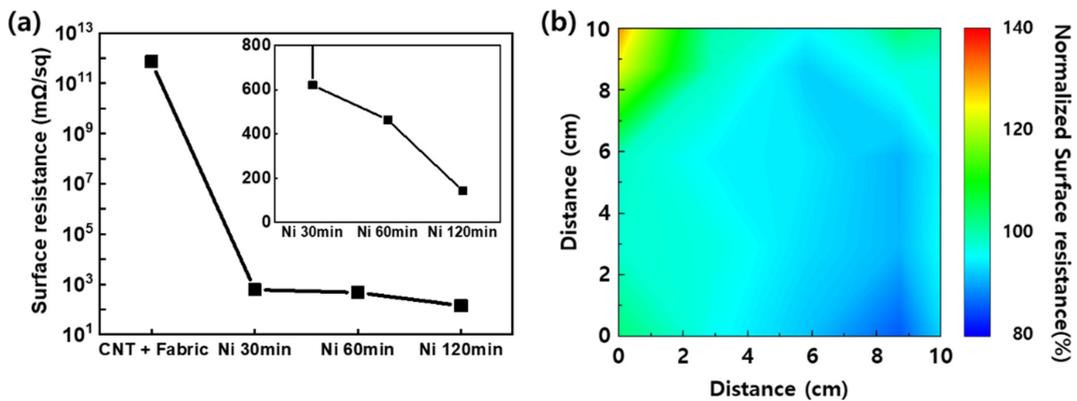


Fig. 3. Using 4-point-probe, (a) Comparative graph of average surface resistance of flexible substrate by manufacturing process, (b) Surface resistance distribution map of flexible substrate with 10×10 cm<sup>2</sup> are aelectroless plated for 2 hours.

형성된 금속이 Ni임을 확인하였다(Fig. 2(c)).

4-point probe 법을 이용하여 Ni-CNT-Fabric 유연기판의 표면 저항을 측정하였다.  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  크기의 유연기판을 1 cm 간격으로 10포인트를 측정하였고 그 결과를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 순수한 면직물의 표면저항은 측정되지 않았으며, CNT만이 형성된 유연기판은  $7.13 \times 10^8 \text{ } \Omega/\text{sq.}$ 로 측정되었다. Ni층이 형성된 유연기판의 경우, 30분 도금한 기판이  $0.62 \text{ } \Omega/\text{sq.}$ , 60분 도금한 기판은  $0.46 \text{ } \Omega/\text{sq.}$ , 그리고 120분 도금한 기판은  $0.14 \text{ } \Omega/\text{sq.}$ 로 각각 측정되었다. 120분 도금한 유연기판의 경우, CNT만을 형성시킨 기판과 비교하였을 때, 약  $10^{12}$ 배의 면저항 차이를 보였다. 120분 도금된 유연기판을  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  크기로 제작한 후, 1 cm 간격으로 면저항을 측정하여 맵핑 하였고, 이를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 결과로부터 알 수 있듯이 위치별로 면저항의 분포가 매우 고른 것을 확인할 수 있다. 이처럼 전기적 특성이 향상될 수 있는 이유는 섬유 표면에서 형성된 Ni 층 때문으로 보인다. 섬유 표면의 Ni는 전류가 흐를 수 있는 통로 역할을 수행하며, 섬유기판이 갖지 못하는 전도도를 부여한다. 내부의 CNT는 웹 구조를 형성하여 Ni의 연결을 강하게 만들어주고, 유연기판 전 영역에 고르게 전류가 흐를 수 있도록 돕는 역할을 하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 기계적 스트레스가 인가된 상태에서의 전기전도도 변화를 분석하기 위하여 인장력, 굽힘, 뒤틀림 시험을 진행하면서 전기특성 변화를 측정한 그래프이다. 먼저 인장력이 가해진 상태에서의 저항 변화를 확인하였고 Fig. 4(a)에 나타내었다. 인장 실험에서 이용된 장비는 UTM이며 실험 조건의 자세한 내용은 실험방법에 작성되어 있다. Ni 도금 30 min 유연기판의 경우 30 MPa가 넘어가면서부터 급격하게 저항이 증가하는 것을 확인하였다. 반면 60 min과 120 min의 경우, 40 MPa가 넘어가더라도 저항의 변화는 10% 이내로, 저항의 증가폭이 크지 않았다. Fig. 4(b)와 같이 굽힘 실험 결과에서도 마찬가지로 5000 회의 굽힘을 진행하였음에도 저항의 변화율이 10% 이내로 저항의 변화는 크지 않았다. 마지막으로 Fig. 4(c)의 그래프를 보았을 때에도 뒤틀림 실험에서도 각각의 유연기판에 3,600°까지 뒤틀림이 가해졌음에도 저항 변화는 발견되지 않았다.

Ni-CNT-Fabric 유연기판에서 인장, 반복 굽힘, 뒤틀림 실험 모두 안정적인 전기적 특성을 보여주었는데, 이러한 이유는 CNT와 Ni의 유기적 결합 때문이다. 도금된 Ni는 섬유의 전도성을 향상시키는 역할을 담당하지만, Ni 자체만으로는 경우, grain boundary는 반복되는 스트레스에 취약하다는 문제가 있다.<sup>20)</sup> 이에 대하여 본 연구에서도 도금으로 형성된 Ni의 grain들을 CNT가 사이에서 연결하여 스트레스가 인가되더라도 각각의 Ni grain들이 분리되는 것을 억제한다. 즉, CNT는 스트레스가 인가되는 상황에서 Ni에서 발생하는 crack을 억제하여 유연기판의 신뢰도를 향상시킨다.

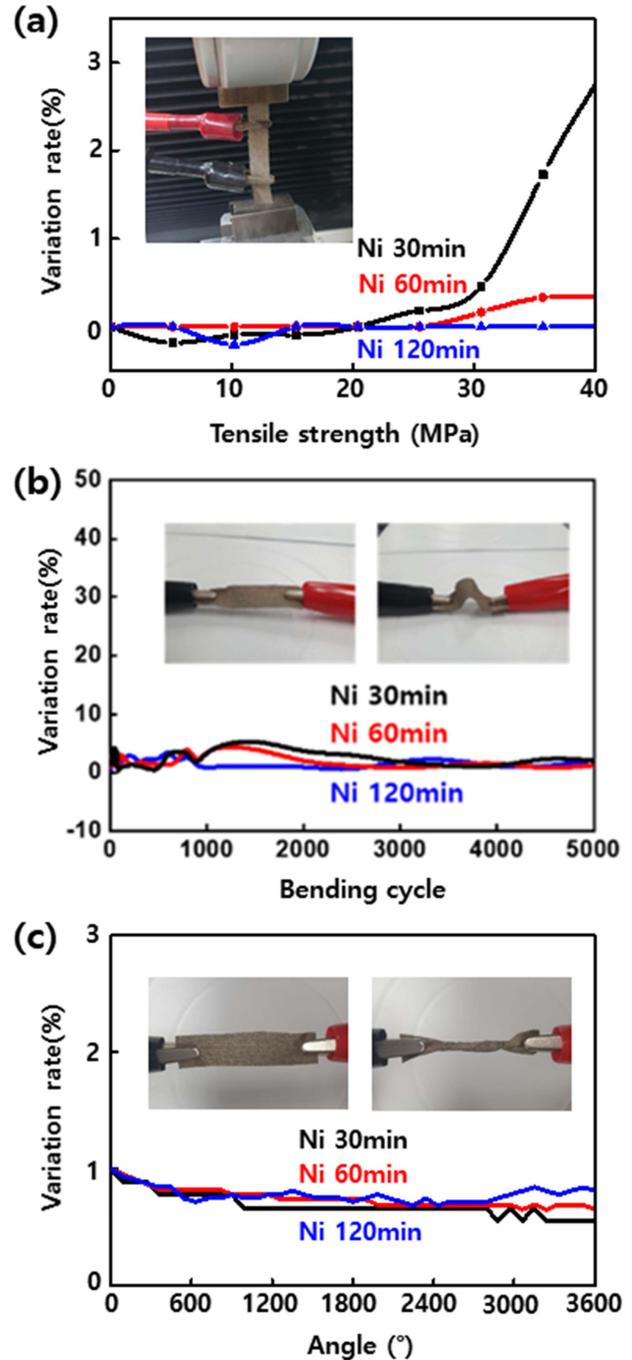


Fig. 4. (a) Ni electroless plating graph showing the resistance change of the substrate due to the application of stress at each time, (b) resistance change rate graph of the flexible substrate plated for 2 h through 5,000 bending test, (c) Graph of resistance change rate according to the degree of warpage of the flexible substrate for each plating time.

Ni-CNT-Fabric 유연기판의 물리적 한계를 확인하기 위하여 인장 분리실험을 진행하였고, 이에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 시편의 모양 및 측정 방법은 실험방법에 서술하였다. 각 조건에 따른 최대 인장강도는 Fig. 5의 그래프에서 확인할 수 있는데, 순수한 면직물의 경우는 29 MPa로, CNT층만을 형성한 면직물의 37 MPa보다 작았다. 이와 달리, Ni층을 형성한 유연기판의 경우, 도금시간

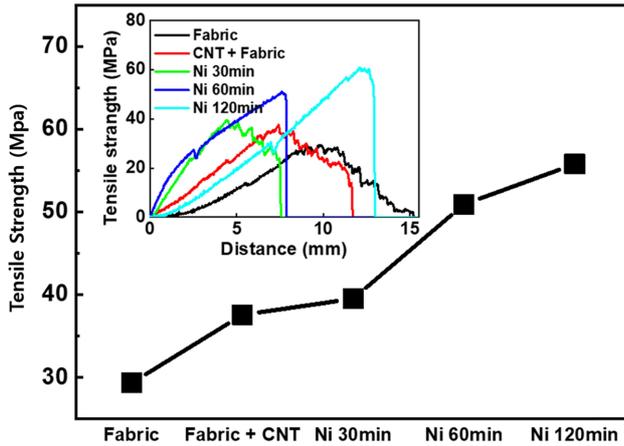


Fig. 5. Measurement graph of tensile strength according to Ni electroless plating time using UTM.

이 증가할수록 인장강도도 증가하였으며, 30 min, 60 min, 120 min 조건에서 각각 39 MPa, 50 MPa, 55 MPa로 측정되었다. 이것은 Ni이 형성되면서 섬유에 Ni가 침투하여, 완전한 층이 형성되면 Ni의 물질 특성이 나타나기 때문으로 판단된다.

순수한 면직물 및 CNT 그리고 Ni 도금 30 분 샘플의 경우, 최대 인장강도 이후 점진적으로 감소하는 추세가 발견된다. 이것은 면직물에서 섬유가 풀리면서 발생하는 shear stress로 인한 것으로 보인다. 섬유 바닥의 표면의 Ni이 완전히 merge된 60 min 이후의 샘플에서는 Ni의 결합이 끊어질 때 내부의 섬유도 같이 끊어지기에 섬유가 풀리며 발생하는 shear stress가 발생하지 않으며, 그래프 상에서 점진적으로 감소하는 추세는 보이지 않는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 면직물상에 CNT를 스프레이 법으로 형성하였고, 그 위에 무전해 도금법을 이용하여 Ni층을 형성하였다. 면직물을 이루고 있는 섬유 바닥의 표면에 CNT와 Ni층이 완전히 형성되어 있는 것을 SEM과 EDX를 이용하여 확인하였다.  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  크기로 제작된 Ni-CNT-Fabric 유연기판의 전기적 특성을 4-point probe로 확인하였고, 120 min 조건에서  $0.14 \Omega/\text{sq}$ 로 측정되었다. 또한 면저항 맵핑 분석으로 모든 영역에서 균일한 전기적 특성을 확인하였다. 표점 폭 10 mm, 길이 80 mm 크기로 샘플을 제작하였고, 스트레스 상황인 인장, 굽힘, 뒤틀림 조건에서 전기적 특성 변화를 관찰하였다. 모든 스트레스 조건(인장력 40 MPa, 곡률반경 10 mm, 굽힘 5,000회, 그리고 뒤틀림  $3,600^\circ$ 에서 저항 변동 폭 3% 이내의 안정적인 전기적 특성을 확인하였다. 이러한 특성은 CNT와 Ni의 복합구조에서 비롯된 것으로 판단된다. 유연기판의 물리적 한계를 인장강도를 통하여 확인하였고, Ni가 완전히 merge된 60 min과 120 min 조건에서 각각 50 및 55 MPa

로 측정되었다. 반면 순수한 면직물은 37 MPa로 측정되어, 120 min 조건에서 약 148.6% 물리적 특성이 향상되었음을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 유연기판 및 웨어러블 디바이스뿐만 아니라 유연성이 필요한 배터리, 태양전지, 촉매 등에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2018R1A6A1A03024334)과 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설 장비진흥센터의 지원을 받은 기초과학연구역량강화사업 핵심연구지원센터 조성 지원 과제에서 에너지 융복합 전문핵심 연구지원센터를 조성하여(2019R1A6C1010024) 수행된 연구임.

#### References

1. J. S. Yang and J. Y. Kim, "A case study on the fashion wearable device development", *Journal of the Korean Society Design Culture*, 21, 363 (2015).
2. J. H. Lee, J. Y. Song, S. M. Kim, Y. J. Kim, and A. Y. Park, "Development of Polymer Elastic Bump Formation Process and Bump Deformation Behavior Analysis for Flexible Semiconductor Package Assembly", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26(2), 31 (2019).
3. J. F. Gu, S. Gorgutsa, and M. Skorobogatiy, "Soft capacitor fibers using conductive polymers for electronic textiles", *Smart Mater. Struct.*, 19(11), 1 (2010).
4. D. D. Rossi, A. D. Santa, and A. Mazzoldi, "Dressware: wearable hardware", *Mater. Sci. Eng. C*, 7(1), 31 (1999).
5. M. Engin, A. Demirel, E. Z. Engin, and M. Fedakar, "Recent developments and trends in biomedical sensors", *Measurement*, 37(2), 173 (2005).
6. S. T. Senthilkumar and R. Kalai Selvan, "Fabrication and performance studies of a cable-type flexible asymmetric supercapacitor", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16, 15692 (2014).
7. Z. Zhang, F. Xiao, and S. Wang, "Hierarchically structured  $\text{MnO}_2/\text{graphene}/\text{carbon fiber}$  and porous graphene hydrogel wrapped copper wire for fiber-based flexible all-solid-state asymmetric supercapacitors", *J. Mater. Chem. A*, 3, 11215 (2015).
8. X. Wang, B. Liu, R. Liu, Q. Wang, X. Hou, D. Chen, R. Wang, and G. Shen, "Fiber-Based Flexible All-Solid-State Asymmetric Supercapacitors for Integrated Photodetecting System", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53(7), 1849 (2014).
9. D. Gao and M. Zhan, "Fabrication and electrical properties of metal-coated acrylate rubber microspheres by electroless plating", *Appl. Surf. Sci.*, 255(7), 4185 (2009).
10. X. Gu, G. Xue, S. Jin, and F. Li, "FTIR-RAS Studies of the Coordination of Surface Oxide Layers of Copper with Poly(acrylonitrile)", *Spectrosc. Lett.*, 30(1), 139 (1997).
11. D. S. Eun, D. W. Kim, C. T. Seo, J. H. Lee, Y. H. Bae, I. S. Yu, and C. G. Suk, "Photoresist Spray Coating for Resist Film Performance of Deep Silicon Cavities", *J. Korean Physical Society*, 50(6), 1947 (2007).

12. N. Atthi, K. Saejok, J. Supadech, W. Jeamsaksiri, O. Thongsuk, P. Dulyaseree, C. Hruanun, and A. Poyai, "Improvement of Photoresist Film Coverage on High Topology Surface with Spray Coating Technique", *J. Microscopy Society of Thailand*, 24(1), 42 (2010).
13. T. Luxbacher and A. Mirza, "Spray Coating for MEMS, Interconnects, and Advanced Packaging Applications-MEMS devices with extreme topography in height and size or with square-shaped substrates can be covered with a uniform", *Sensors*, 16(7), 61 (1999).
14. N. P. Pham, T. L. M. Scholtes, R. Klerks, E. Boellaard, P. M. Sarro, and J. N. Burghartz, "Direct spray coating of photoresist – a new method for patterning 3-D structures", *Euro-sensors XVI*, 182, Prague, Czech Republic (2002).
15. K. H. Lee, "Application of Plating Simulation for PCB and Packaging Process", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(3), 1 (2012).
16. X. Xu, J. Zhou, and J. Chen, "Thermal Transport in Conductive Polymer-Based Materials", *Advanced Functional Materials*, 30(8), 1904704 (2019).
17. F. Su and M. Miao, "Asymmetric carbon nanotube-MnO<sub>2</sub> two-ply yarn supercapacitors for wearable electronics", *Nanotechnology*, 25(13), 135401(2014).
18. B. Zheng, T. Huang, L. Kou, X. Zhao, K. Gopalsamy, and C. Gao, "Graphene fiber-based asymmetric micro-supercapacitors", *J. Mater. Chem. A.*, 2(25), 9736 (2014).
19. E. W. Wong, P. E. Sheehan, and C. M. Lieber, "Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes", *Science*, 277(5334), 1971 (1997).
20. W. D. Callister and D. G. Rethwisch, "Materials science and Engineering", 5, pp.291, John Wiley & Sons, New York (2011).