

## PEDOT:PSS로 코팅된 PLA 나노섬유 웹의 전기전도성 텍스타일 제조

신성은\* · 차수진\* · 조길수†

연세대학교 의류환경학과

### Fabrication of Electroconductive Textiles Based PLA Nanofiber Web Coated with PEDOT:PSS

Sungeun Shin\*, Sujin Cha\*, and Gilsoo Cho†

Dept. of Clothing & Textiles, Yonsei University; Seoul, Korea

**Abstract:** We proposed a simple process of fabricating electroconductive textiles by coating conductive polymer PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)) on biocompatible PLA (Poly Lactic Acid) nanofiber web for application to smart healthcare. Electroconductive textiles were obtained by a drop-coating process using different amounts of PEDOT:PSS solutions., DMSO (dimethyl sulfoxide) was then used as an additive in the post-treatment process to improve conductivity. The surface morphology of the specimens was observed by FE-SEM. The chemical structures of the specimens were characterized using FTIR. The electrical properties (linear and sheet resistance) of the specimens were measured. The effect of the bending angles on the electrical properties was also investigated to confirm their applicability as wearable smart textiles. FE-SEM and FTIR analysis confirmed that the deposition of PEDOT:PSS on the PLA nanofiber web surface was successful. The conductivity of the PEDOT:PSS/PLA nanofiber web was enhanced up to 1.5 m/ with an increasing amount of PEDOT:PSS solutions, but there was no significant difference at 2.0 m/. The optimum condition of PEDOT:PSS deposition was established to 1.5 m/. Even when the specimen coated with 1.5 m/ was bent every 30°, the change in the electrical resistance values was still low within 3.7 Ω. It confirmed that stable electrical performance was maintained and proved the applicability as a flexible textile sensor.

**Key words:** smart textile (스마트 텍스타일), electroconductive textiles (전기전도성 텍스타일), PEDOT:PSS, PLA nanofiber web (PLA 나노섬유 웹), smart healthcare (스마트 헬스케어)

## 1. 서 론

최근 현대인의 라이프 스타일이 변화함에 따라 질병에 따른 치료 중심에서 예방 및 건강관리 중심으로 중요성이 부각되면서 개인의 건강 관리를 위해 생체신호(심전도, 체온, 산소포화도 등)를 측정할 수 있는 스마트 헬스케어 의류가 개발되기 시작했다(Joo et al., 2016). 스마트 의류는 시간과 공간의 제약 없이 사용자의 인체 정보를 지속적으로 모니터링 할 수 있어 스포츠나 건강관리 분야에서 활용 가능성이 높으며, 특히 텍스타일 기반 센서는 사용자들에게 쾌적한 착용감을 제공하기 때문에 미래의 헬스케어 시스템에서 필수적이다(Rho, 2016). 현재 생체신호 측정용 센서로 상용화된 Ag/AgCl 전극은 유연성

이 없고 강직하며, 장기간 사용 시 접촉에 의한 불쾌감과 피부 자극을 유발하므로 인체에 직접적으로 접촉하는 바이오센서에는 부적합하다(Kim et al., 2019). 따라서 착용성과 유연성이 우수하고 직접적인 신체 접촉에도 부작용을 최소화하는 생체적합성을 가진 전도성 텍스타일 센서의 개발이 필요하다.

유연성이 있으며 센서의 전기적 성질을 향상시킬 수 있는 텍스타일로 나노섬유 웹을 고려할 수 있다. 나노섬유 웹은 직경이 수십에서 수백 나노미터인 섬유들로 이루어진 텍스타일로, 유연성, 미세다공성, 넓은 표면적의 특징을 지니며, 코팅 시 전도성 물질이 코팅되는 표면적이 넓어져 전극의 성능을 극대화시킬 수 있다(Kim et al., 2019). 한편, 친환경 및 생체적합성의 관점에서는 PLA 섬유를 살펴볼 필요가 있다. 폴리락티드(Poly (lactic acid), 이하 PLA)는 발효된 옥수수를 글루코스(Glucose), 젖산(Lactic acid)의 상태로 순차적으로 만들고 이것을 축합 반응시켜 만든 친환경 물질이다. 천연원료로 생산되는 PLA 섬유는 생분해성, 인체적합성, 무독성의 특징을 가지고 있어 생의학 분야에서 선호되어 활용되고 있으며(Avinc & Khoddami, 2009), 생분해성 고분자 중에서 가장 저렴한 친환경 재료로(Park et al., 2011) 사용성에 이점이 있다.

텍스타일에 전기전도성을 부여하기 위하여 사용되는 전기전

†Corresponding author; Gilsoo Cho

Tel. +82-2-2123-3104, Fax. +82-2-312-8554

E-mail: gscho@yonsei.ac.kr

\*These authors contributed equally to this work.

© 2020 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도성 고분자(Intrinsically conductive polymers, 이하 ICPs)는 고분자가 지니는 가공성, 물리적 강도의 이점을 가지면서도 전기적으로 우수하고, 전기적 신호의 정도와 시간을 정확하게 제어할 수 있기 때문에 의공학적인 응용을 위한 생체 재료로 주목받고 있다(Jang et al., 2015). 대표적인 ICPs로 폴리피롤(Polypyrrole), 폴리아세틸렌(Polyacetylene), 폴리아닐린(Polyaniline) 등이 있으며, 그 중에서 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜):폴리(스티렌설포네이트) (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(Styrenesulfonate), 이하 PEDOT:PSS)는 높은 전기전도성, 안정성 및 유연성을 지니며 수성 공정이 가능하다는 점에서 잠재성이 있다(Tadesse et al., 2019). 특히, 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜)(Poly(3,4-ethylenedioxythiophene), 이하 PEDOT)은 높은 전도성과 함께 산화된 상태에서 전기화학적 안정성, 생체적합성을 나타내므로 생체 신호 측정을 위한 스마트 텍스타일로 활용되기에 적합하다(Gotovtsev et al., 2019). 전도성 물질인 PEDOT의 중합은 용액 공정이 가능하도록 친수성의 폴리(스티렌설포네이트)(Poly(styrenesulfonate), 이하 PSS)를 템플릿으로 사용하여 수용액에서 산화 중합을 통해 이루어지며, PEDOT:PSS는 양전하를 띠는 PEDOT과 음전하를 띠는 PSS가 강한 이온 결합(Ionic bonding)을 이루어 수용액 상에서도 분리되지 않은 입자로 분산되어 존재할 수 있다(Na et al., 2010). PEDOT:PSS의 화학 구조는 Fig. 1과 같다.

PEDOT:PSS의 전기전도성은 디메틸설폭사이드(Dimethyl sulfoxide, 이하 DMSO), 에틸렌글리콜(Ethylene glycol), 디메틸포름아미드(Dimethylformamide), 알코올(Alcohol)과 같이 끓는 점이 높고 극성이 큰 첨가제를 사용하여 향상시킬 수 있다(Na et al., 2010). 이러한 현상의 메커니즘은 용매 첨가로 인해 PEDOT:PSS 입자가 커지면서 절연체인 PSS가 얇아지고 전도성 물질인 PEDOT 사이에 접촉과 전하 이동이 용이해지면서 전도성이 향상되는 것으로 설명할 수 있다(Åkerfeldt et al., 2013; Na et al., 2010).

PEDOT:PSS를 사용한 선행연구로는 면, 폴리에스터(Polyester, 이하 PET) 직물을 코팅처리하여 심전도(Electrocardiogram) 전극으로의 사용 가능성을 평가한 연구(Pani et al., 2015), 면직

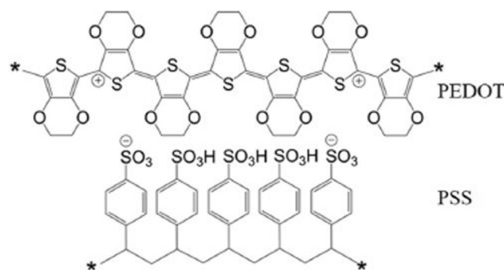


Fig. 1. Chemical structure of PEDOT:PSS (Tadesse et al., 2019).

물에 프린트하여 스트레인 센서로 적용한 연구(Calvert et al., 2008), 견사 및 면사를 침지시켜 세탁 후 전도성을 평가한 연구(Ryan et al., 2017), 니트 소재를 코팅법과 침지법으로 PEDOT:PSS 처리하여 처리 방법의 효과를 조사한 연구(Tadesse et al., 2019)가 있으며 PEDOT 나노입자를 PLA 고분자와 복합 전기 방사하여 전도성 나노섬유를 제조한 연구(Praharaj Bhatnagar et al., 2017) 등이 있다. 또한 나노섬유 웹 기반 전기전도성 텍스타일 관련 선행연구(Jang et al., 2019a)에서는 PU 나노섬유 웹에 PEDOT:PSS를 코팅하여 신축성 및 유연성이 있는 전기전도성 텍스타일을 제조하였다. 이렇게 일반적인 PET, 면, 폴리우레탄(Polyurethane, 이하 PU) 직물이나 섬유에 전도성을 부여한 연구가 대부분이며, 생체친화력을 가지고 전기적 성질을 개선시킬 수 있는 PLA 나노섬유 웹을 간단한 코팅 공정으로 처리한 연구는 아직 이루어지지 않은 실정이다. 특히, PU 나노섬유 웹을 그래핀(Graphene) 코팅한 연구에 의하면(Jang et al., 2019b), 인장강도가 5 MPa, 파단 신도가 110% 내외로 신축성이 있어 호흡이나 모션을 감지하는 스트레인 센서로 적용이 용이한 반면, PLA 나노섬유 웹을 이용한 전도성 텍스타일은 인체친화적인 물질로써 신체 접촉이 요구되는 의학 분야 등의 새로운 용도로 적용 가능할 것이다.

따라서 본 연구의 목표는 PLA 나노섬유 웹을 PEDOT:PSS로 코팅한 후 DMSO로 도핑 처리하여 전기전도성을 부여하고, 이때 처리된 PEDOT:PSS 양에 따른 표면 및 화학적 구조를 확인하며 전기적 특성을 평가하고자 한다. 또한, 텍스타일로 적용 시 인체의 움직임에 따른 변형이 발생하므로 굽힘 상태에서도 전기적 성질이 유지되는지 평가하고자 한다. 그리하여 전기 전도성 향상을 위해 필요한 PEDOT:PSS 처리 양의 최적 값을 찾아 코팅 공정의 효율성을 제고하며, 텍스타일 센서로써의 사용 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 재료

본 연구에 사용된 기반 직물은 PLA 나노섬유 웹으로 Pardam사(Czech Republic)에서 구매하였다(Table 1). PLA 나노섬유 웹에 전기전도성을 부여하기 위해 1.3 wt%로 수분산된 PEDOT:PSS를 사용하였으며 Sigma-Aldrich사(USA)에서 구매하였다. 또한 전도성 향상을 위한 첨가제로 Duksan pure chemicals(South Korea)에서 구매한 DMSO를 증류수에 희석하여 사용하였다.

### 2.2. 시료 제조

Fig. 2는 도포되는 전도성 물질의 양에 따른 시료 제작 과정

Table 1. Characteristics of the substrates used in this study

Fabric material	Fiber diameter (nm)	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Melt point (°C)	Manufacturing technique
PLA nanofiber web	200-800	5	150	Centrifugal spinning

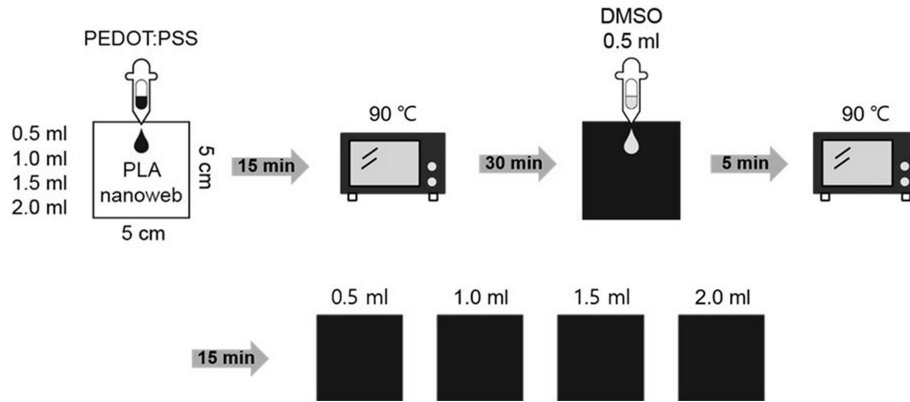


Fig. 2. Procedure of specimen fabrication.

을 나타낸 것이다. 먼저 (5×5)cm<sup>2</sup> 크기의 PLA 나노섬유 웹에 수분산 PEDOT:PSS 용액을 0.5 ml, 1.0 ml, 1.5 ml, 2.0 ml로 15분간 Drop-coating 하였으며, 대기상태에서 30분간 90°C로 열처리하였다(Kim et al., 2015). 예비 실험을 통해 PEDOT:PSS를 2.5 ml로 코팅한 시료에서는 PEDOT:PSS 용액이 모두 흡수되지 않고 겔도는 것이 확인되어 시료에서 제외하였다. 또한 70°C, 90°C, 110°C의 건조 온도에 따른 PLA 나노섬유 웹의 손상 정도를 확인한 결과, 70°C에서는 완전히 건조되지 않았고, 110°C에서는 나노섬유 웹이 손상되어 본 실험에서는 90°C로 열처리하였다.

전도성 향상을 위해 DMSO(99.9%) 용액을 증류수에 7.5 vol%로 희석하여 DMSO 수용액을 준비하였다. PEDOT:PSS 코팅이 완료된 시료를 DMSO 수용액 0.5 ml로 5분간 Drop-coating 방법으로 후처리하고, 대기 상태에서 90°C의 온도로 15분간 열처리하였다(Kim et al., 2015).

### 2.3. 표면 특성 분석 및 두께 측정

제작된 시료의 표면특성은 주사전자 현미경 JSM-7610F Plus(Jeol Ltd, USA)을 사용하여 1,000 배율에서 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope) 촬영을 통해 분석하였다. 시료의 두께는 FE-SEM의 단면 촬영을 통해 미처리 PLA 시료의 경우 250 배율에서 촬영하고, 전도성 고분자가 처리된 4가지 시료는 1,000 배율에서 코팅된 시료의 최종 두께를 측정하였다.

### 2.4. FT-IR 분석

제작된 시료의 화학적 구조를 알아보기 위해, 시료를 (1×1)cm<sup>2</sup>로 준비하고 Cary 670 FTIR 분석기(Agilent Technologies, USA)를 사용하여 필름법으로 FTIR(Fourier Transform Infrared) 스펙트럼 분석을 실시하였다. FTIR 분석은 감쇠 전반사(Attenuated total reflection, ATR) 방식으로, 분석 범위는 6000~650 cm<sup>-1</sup>, 분해능은 0.075 cm<sup>-1</sup>, 스캔 속도는 110 spectra/second이다. 이를 통해 PLA 나노섬유 웹에 전도성 물질인 PEDOT:PSS가 안정적으로 코팅되었는지 확인하였다.

### 2.5. 전기적 특성 측정

PEDOT:PSS로 코팅된 PLA 나노섬유 웹의 전기적 특성을 확인하기 위해 선저항 값과 면저항 값을 측정하였다. 선저항 값은 DM1010 Multimeter (Donghwa, South Korea)를 사용하여 측정하였으며, 코팅된 나노섬유 웹 (5×5) cm<sup>2</sup>의 접촉면에서 임의의 5곳을 측정하여 평균값을 계산하였다. 면저항 값은 4 point probe 면저항측정기 CMT-SR1000N(AIT, South Korea)를 사용하였고, (5×5) cm<sup>2</sup> 접촉면에서 임의의 5곳을 측정하여 평균값을 계산하였다. 위 과정을 통해 측정된 면저항의 평균값과 두께로 비저항 값( $\Omega\cdot\text{cm}$ , Specific resistance)을 도출하였다. 비저항 값은 물질의 고유저항으로, 아래의 식을 통해 산출할 수 있다(Kim et al., 2019).

$$\text{Specific resistance } (\Omega\cdot\text{cm}) = \text{Sheet resistance } (\Omega/\square) \times \text{thickness (cm)}$$

### 2.6. 굽힘 각도에 대한 전기적 특성

텍스타일 센서로써 인체의 굴곡이나 움직임에도 전기적 성질이 유지되는지 평가하기 위하여 관절의 굽힘(Joint flexion)에 대한 전기저항 값을 7회 반복 측정하였으며 실험 방법은 Kim and Cho(2018)의 연구를 참고하였다. 굽힘 각도별 실험은 제조된 전도성 텍스타일 중에서 선행된 특성 분석과 전기 저항 결과들을 고려하여 최적 처리 조건을 갖는 시료를 선택하였고 (2.5×10) cm<sup>2</sup>로 제작한 후 실시하였다. 관절의 굽힘 시현은 인체를 모방하여 제작된 팔 더미를 사용하여 팔꿈치 부분을 측정하였고, PET 88%, PU 12%로 스트레칭성이 좋은 슬리브 밴드를 6 cm 폭으로 준비하여 시료를 팔꿈치 뼈 중심에 고정시켰다(Fig. 3). 팔꿈치 굽힘 각도의 범위는 제 7차 한국인 인체 치수조사사업(Size Korea, 2015)의 데이터를 바탕으로 30° 단위로 0~150°까지의 선저항 값이 기록되었으며, 선저항 값은 PM6304(Fluke, USA)를 사용하여 측정하였다.

### 2.7. 통계 분석

측정된 전기저항 값이 처리 조건별로 유의한 차이가 있는지 검증하기 위하여 SPSS 25 통계프로그램을 사용하였다. PEDOT:

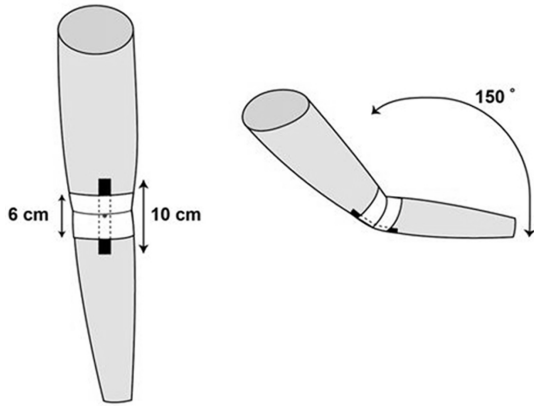


Fig. 3. Measurement method of electrical resistance by angle of arm bending using a dummy.

PSS 처리 양에 따른 선저항 및 면저항 값의 차이를 알아보기 위해 독립표본 *t* 검정을 실시하였고, 굽힘 각도별 전기저항 값은 반복측정 분산분석(Repeated Measures ANOVA)을 통해 차이를 검증하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1. PEDOT:PSS 처리 양에 따른 표면 분석 및 두께 측정

각각 다른 PEDOT:PSS 양으로 처리된 PLA 나노섬유 웹 시료의 표면 특성을 분석한 결과, 각 시료의 여러 부위에서 PEDOT:PSS가 고른 분포를 보였음을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 또한 코팅되는 PEDOT:PSS 용액의 양이 증가할수록 나노

섬유의 굽기가 점차 굽어지고, 표면의 섬유 가닥들이 PEDOT:PSS로 덮여 가려지는 것을 확인할 수 있었다.

FE-SEM 단면 촬영을 통해 시료의 두께를 측정한 결과, 미처리 PLA 나노섬유 웹의 두께는 52.5  $\mu\text{m}$ 이며, 전도성 고분자 PEDOT:PSS 처리된 양에 따른 시료의 최종 두께는 0.5 ml는 13.9  $\mu\text{m}$ , 1.0 ml는 19.9  $\mu\text{m}$ , 1.5 ml는 28.9  $\mu\text{m}$ , 2.0 ml는 38.8  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이를 통해 코팅되는 PEDOT:PSS의 양이 늘어날수록 두께도 점차 두꺼워지는 것을 확인하였고, 이는 처리된 PEDOT:PSS 용액의 양이 증가함에 따라 PLA 시료에 증착되는 양이 증가하였기 때문이다. 또한 미처리 PLA 시료가 PEDOT:PSS 용액이 처리된 4가지 시료들보다 두꺼운 두께를 보였는데, 이는 방사 시 나노섬유 웹이 무작위로 적층되었다가 PEDOT:PSS 용액 코팅 과정에서 PLA 나노섬유 웹 공간에 PEDOT:PSS 용액이 채워지면서 압착이 일어나 두께가 감소한 것으로 사료된다.

표면 특성 분석 및 두께 측정에서 도출된 결과, PEDOT:PSS 용액의 코팅 양이 0.5 ml, 1.0 ml, 1.5 ml로 증가할수록 시료 표면의 섬유가닥들이 많이 덮이는 것을 명확하게 확인할 수 있으며, 1.5 ml와 2.0 ml에서는 큰 차이가 없었다. 또한 코팅 양이 증가할수록 두께가 0.5 ml 시료 대비 약 1.4, 2.1, 2.8 배로 점차 증가하였고, 2.0 ml가 1.5 ml보다 훨씬 두꺼운 것으로 나타났다.

#### 3.2. PEDOT:PSS 처리 양에 따른 FT-IR 분석

코팅되는 PEDOT:PSS 양 증가에 따른 시료의 화학적 구조와 기능기의 존재여부를 파악하기 위해 FT-IR분석을 실시하였

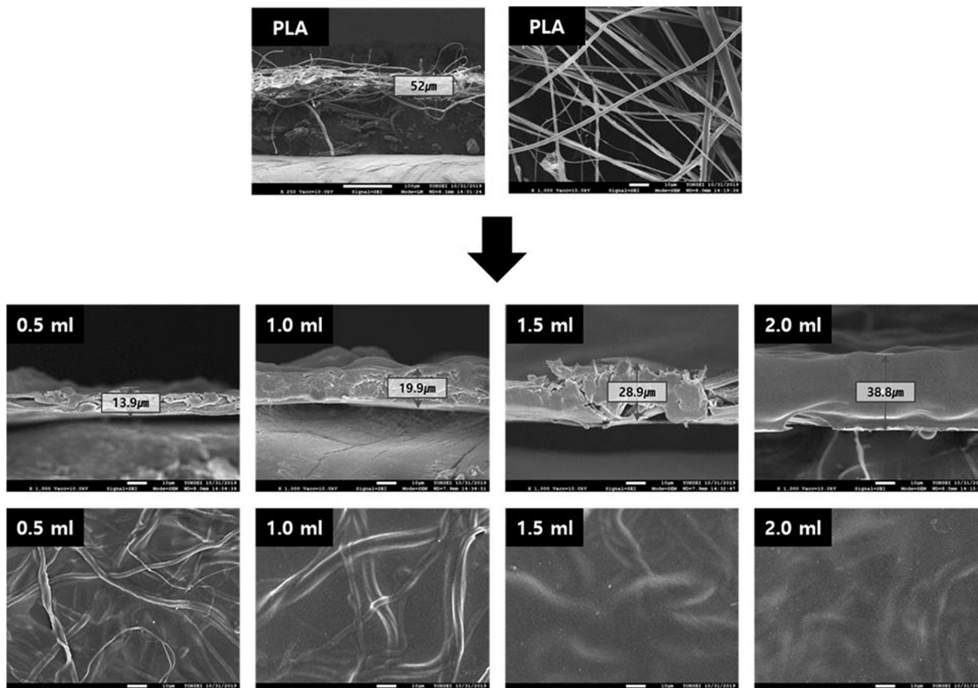


Fig. 4. FE-SEM images of specimens.

다(Fig. 5). PEDOT:PSS와 PLA 특성 피크들은 Olovares et al.(2019), Wisitsoraat et al.(2013)과 Yang et al.(2008)의 문헌을 참고하였다.

PEDOT:PSS의 스펙트럼에서 1515 cm<sup>-1</sup>부근의 C=C 피크, 1292 cm<sup>-1</sup>부근의 C-C 피크가 관찰되었고, 1157 cm<sup>-1</sup>와 1121 cm<sup>-1</sup>부근에서 S-O bond 피크를 확인하였다. 1012 cm<sup>-1</sup>에서는 S-phenyl bond가, 952 cm<sup>-1</sup>, 845 cm<sup>-1</sup>, 704 cm<sup>-1</sup>부근에서는 thiophen backbone에 해당하는 C-S bond 피크가 검출되었다(Olivares et al., 2019; Wisitsoraat et al., 2013). 각 시료의 스펙트럼에서도 PEDOT:PSS의 피크들이 동일하게 검출되었으며, 이 피크들의 존재를 통해 PEDOT:PSS 고분자가 분해되지 않고 증착과 처리가 이루어졌음을 확인하였다. 또한 미처리된 PLA 스펙트럼에서 나타나는 1180 cm<sup>-1</sup>부근의 C-O-C stretching, 1756 cm<sup>-1</sup> 부근의 C=O stretching 피크들도 확인할 수 있었으나(Yang et al., 2008), PEDOT:PSS로 코팅되는 양이 증가하고 두께가 두꺼워짐에 따라 피크의 intensity는 현저하게 감소하였다.

결과적으로, 시료들의 스펙트럼이 PLA 나노섬유 웹과 PEDOT:PSS에서 나타나는 functional group의 밴드를 포함하고 있으므로 PEDOT:PSS가 성공적으로 코팅되었음이 확인되었다. 또한 코팅 처리를 하면서 PLA 피크 진폭은 급격히 감소하고, 코팅 용액을 증가시킨 1.5 ml와 2.0 ml 시료에서 PEDOT:PSS의 두드러진 피크가 관찰되는 것을 볼 때, PEDOT:PSS 처리 양의 증가로 인한 두께의 증가는 전도성 고분자의 특성을 향상

시키는데 도움이 될 것으로 사료된다.

### 3.3. PEDOT:PSS 처리 양에 따른 전기적 특성 분석

Table 2와 Fig. 6은 제작된 시료의 전기저항 값을 보여주는 표 및 그래프이며, 각 조건에 따른 전기저항 값의 차이를 독립 표본 *t* 검정으로 분석하였다. PLA 나노섬유 웹에 코팅되는 PEDOT:PSS의 양에 따른 선저항의 평균값을 도출한 결과, 0.5 ml에서는 85.4 Ω, 1.0 ml에서는 64.8 Ω, 1.5 ml에서는 42.4 Ω, 2.0 ml에서는 44.0 Ω으로, 1.5 ml까지는 점차 감소하였으나 2.0 ml에서는 유사한 값을 보였다. 통계분석을 통해 0.5 ml, 1.0 ml, 1.5 ml의 선저항 값들은 각각 유의수준 *p* < .05, *p* < .01 이하에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 1.5 ml와 2.0 ml의 선저항 값은 유의한 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

PLA 나노섬유 웹에 코팅되는 PEDOT:PSS의 양이 증가함에 따른 면저항의 평균값을 도출한 결과, 0.5 ml에서는 30.16 Ω/□, 1.0 ml에서는 12.35 Ω/□, 1.5 ml에서는 7.17 Ω/□, 2.0 ml에서는 6.24 Ω/□의 값을 보여 1.5 ml까지는 급격하게 면저항이 감소하는 것을 확인하였다. 통계분석 결과에서도 0.5 ml, 1.0 ml, 1.5 ml의 면저항 값은 유의한 차이로 감소하였으며, 1.5 ml와 2.0 ml에서는 유의한 차이가 나타나지 않아 선저항 값과 동일한 경향성을 보였다.

또한 면저항의 평균값과 두께를 이용하여 비저항 값을 계산한 결과, 0.5 ml에서는 0.042 Ω·cm, 1.0 ml에서는 0.025 Ω·cm,

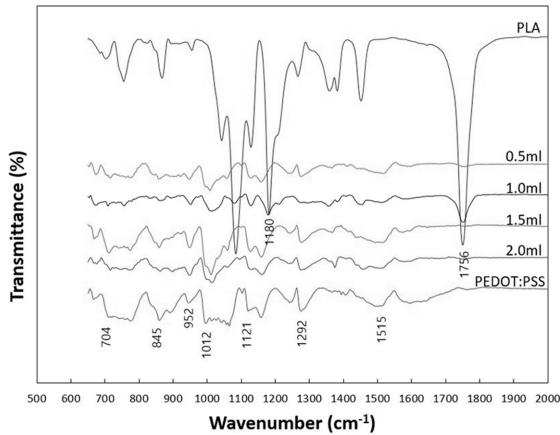


Fig. 5. FT-IR spectrums of specimens coated in different amount of PEDOT:PSS.

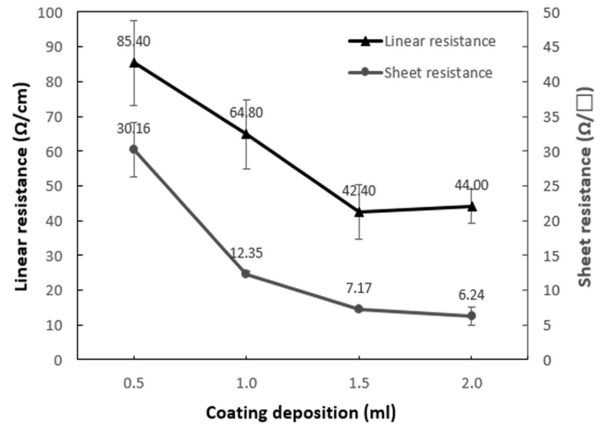


Fig. 6. Linear resistances and sheet resistances of specimens coated in different amount PEDOT:PSS.

Table 2. Statistical analysis of electrical resistance values of specimens

Coating deposite (ml)	Linear resistance (Ω / cm)			Sheet resistance (Ω / □)			Specific resistance (Ω·cm)
	M±SD	Significance		M±SD	Significance		
0.5	85.40±12.24			30.16±3.90			0.042
1.0	64.80±9.98	0.5-1.0 ml	0.020*	12.35±0.34	0.5-1.0 ml	0.000***	0.025
1.5	42.40±7.83	1.0-1.5 ml	0.005**	7.17±0.34	1.0-1.5 ml	0.000***	0.021
2.0	44.00±4.85	1.5-2.0 ml	0.710	6.24±1.28	1.5-2.0 ml	0.154	0.024

\* *p* < .05, \*\* *p* < .01, \*\*\* *p* < .001

**Table 3.** Electrical resistance values at different bending angles

Angles (°)	0	30	60	90	120	150
Resistance ( $\Omega$ ) (M $\pm$ SD)	51.07 $\pm$ 0.12	51.29 $\pm$ 1.84	51.63 $\pm$ 0.88	52.33 $\pm$ 0.68	54.24 $\pm$ 2.99	54.82 $\pm$ 3.69

1.5 m/에서는 0.021  $\Omega \cdot \text{cm}$ , 2.0 m/에서는 0.024  $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 값이 도출되었으며, 1.5 m/로 코팅한 시료에서 가장 낮은 비저항 값을 보였다.

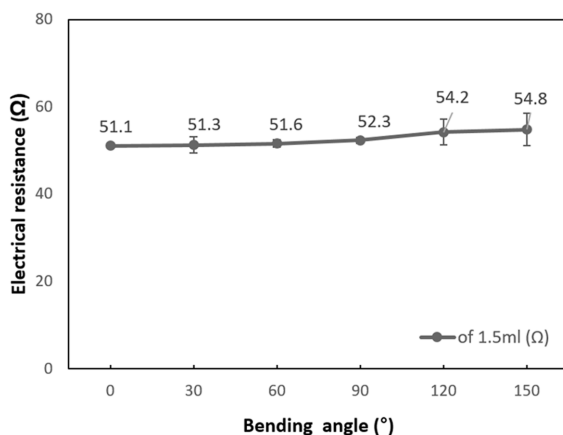
위의 전기저항 값 측정 결과를 종합할 때, PEDOT:PSS의 코팅 양이 1.5 m/로 증가할수록 전기저항 값은 점차적으로 감소하였으며, 이보다 더 많은 2.0 m/ 양으로 코팅된 시료에서는 오히려 전기저항 값이 증가하거나 크게 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 25 cm<sup>2</sup> 크기의 PLA 나노섬유 웹에 PEDOT:PSS 용액 1.5 m/를 처리하여 전기전도성을 부여하는 것이 가장 적합한 양으로 사료된다. 코팅 양의 증가에 따른 전기저항 값 감소는 전도성 물질의 단면적, 즉 두께 증가로 인한 결과로 판단되며 전기저항 값의 감소에는 임계치가 있음을 확인하였다.

#### 3.4. 굽힘 각도에 대한 전기적 특성 분석

지금까지 수행된 시료의 표면 특성 및 화학적 특성, 전기적 특성의 결과들을 바탕으로 텍스타일 센서를 제조하기 위해 필요한 PEDOT:PSS의 최적 처리 조건을 선택하였다. 1.5 m/와 2.0 m/로 처리되었을 때 선저항 및 면저항이 가장 낮은 값을 나타내었고 두 시료에 유의한 차이가 없었으므로, 1.5 m/ 시료가 더미를 이용한 굽힘 각도 효과를 평가하는데 사용되었다.

Table 3과 Fig. 7은 더미의 팔 관절 각도에 따른 전기저항 값 변화를 보여준다. 1.5 m/의 시료는 굽힘 각도가 커질수록 전기저항 값이 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 도체의 전기저항 값이 단면적에 반비례하고 길이에 비례하는 성질에 의한 것으로, 굽힘 각도가 커질수록 시료의 길이가 미세하게 길어지면서 전기저항 값이 증가한 것으로 판단된다.

시료의 굽힘 각도별 전기저항 값의 차이를 알아보기 위하여

**Fig. 7.** Variation of electrical resistance values at different angles.

반복측정 분산분석을 실시한 결과, 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다( $p > .05$ ). 따라서 1.5 m/ 처리 시료는 0°에서 150° 사이의 각도에서 전기적 성능이 유의한 차이가 없는 수준 내에서 유지되는 것을 확인하였다.

결과적으로 굽힘 각도별 전기저항 값은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않으며, 최초 0° 대비 150°의 전기저항 값 차이가 3.7  $\Omega$  이내로 유지되는 것을 볼 때, 본 연구에서 제작된 전도성 텍스타일은 인체의 굽힘 반응에도 전기적 성능을 유지할 것으로 예상되며, 이를 통해 텍스타일 센서로서 적용가능성이 있음을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 PLA 나노섬유 웹 표면에 수분산된 PEDOT:PSS를 코팅하여 전기전도성 텍스타일을 제작하고 유연성이 있는 텍스타일 전극으로써 사용 가능성을 탐색하였다. PLA 나노섬유 웹에 전도성을 부여한 후, PEDOT:PSS의 전기적 성능을 향상시키기 위하여 DMSO로 후처리 공정을 진행하여 총 4가지의 시료를 제조하였다. 제작된 시료로 PEDOT:PSS 처리 양에 따른 표면, 화학적 구조 및 전기저항 값을 측정하고, 텍스타일으로써의 활용 가능성을 확인하기 위하여 굽힘 상태에서 전기적 특성을 평가하였다.

PEDOT:PSS 처리 후 모든 시료 표면의 여러 부분에서 PEDOT:PSS가 고르게 분포되었고, 코팅 용액의 양이 증가할수록 표면의 섬유 가닥들이 덮여 가려졌다. 또한 두께를 측정된 결과, 코팅 용액이 증가할수록 시료의 두께가 점차적으로 두꺼워지는 것을 확인하였다. 제작된 시료로 FT-IR을 분석한 결과, 코팅 용액의 양이 증가하면서 두께가 두꺼워질수록 PLA 나노섬유 웹의 C-O-C stretching과 C=O stretching 피크의 intensity는 현저히 감소하였으며, PEDOT:PSS의 C=C, C-O, S-O bond, 그리고 thiophens backbone에 해당하는 C-S bond의 두드러지는 피크가 관찰되었다. 전기저항 값은 코팅 용액 양의 증가로 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 1.5 m/ 이상으로 처리된 시료에서는 선저항, 면저항, 비저항 값이 오히려 약간 증가하거나 차이가 거의 없는 결과를 보였다. 또한 최적 처리 조건인 1.5 m/의 PEDOT:PSS로 코팅된 시료의 굽힘 각도별 (0~150°) 전기적 특성을 측정된 결과, 전기저항 값의 변화가 3.7  $\Omega$  이내로 유지되었다.

연구 결과를 바탕으로 도출된 결론은 다음과 같다. 첫째, PLA 나노섬유 웹에 코팅되는 PEDOT:PSS의 용액 양이 증가할수록 전기적 성능이 우수해지는 것을 확인할 수 있고, 1.5 m/와 2.0 m/의 코팅 양에서는 전기적 특성에 유의한 차이가 없었으므로 1.5 m/ 코팅이 전기적 성능 향상의 임계치로 사료된다.

둘째, 1.5 ml 코팅 시료가 굽힘 상태에서도 전기저항 값의 변화가  $3.7 \Omega$  이내로 유지되는 것을 확인하여 텍스타일 센서로의 사용 가능성을 확인하였다.

본 연구는 생체친화성을 갖는 PLA 나노섬유 웹에 간단한 용액 코팅 공정을 사용하여 생체친화적인 텍스타일 센서를 제조한 것에 의의가 있으며, 이는 생체신호 측정용 스마트 헬스케어 의류 개발에 필요한 기초 자료가 될 것으로 기대한다. 후속연구에서는 PLA 섬유의 장점인 생체친화성을 평가하고, 피험자를 대상으로 착의 실험을 수행함으로써 센서의 성능을 평가할 필요성이 있다. 더불어 인장강도 및 신도 등 텍스타일의 물리적 특성과 내세탁성과 내마모성, 반복 굽힘 등에 의한 성능 변화에 대한 평가가 이루어진다면 텍스타일 센서로의 적용 가능성에 의미를 더할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 2019년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며 (No. NRF-2019R1F1A1060955), 2019년도 BK21플러스 사업 (연세대학교 의류환경학과)에 의하여 지원되었음.

## References

- Åkerfeldt, M., Strååt, M., & Walkenström, P. (2013). Electrically conductive textile coating with a PEDOT:PSS dispersion and a polyurethane binder. *Textile Research Journal*, 83(6), 618-627. doi:10.1177/0040517512444330
- Avinc, O., & Khoddami, A. (2009). Overview of poly(lactic acid) (PLA) fibre. *Fibre Chemistry*, 41(6), 391-401.
- Calvert, P., Duggal, D., Patra, P., Agrawal, A., & Sawhney, A. (2008). Conducting polymer and conducting composite strain sensors on textiles. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 484(1), 291-657. doi:10.1080/15421400801904690
- Gotovtsev, P. M., Badranova, G. U., Zubavichus, Y. V., Chumakov, N. K., Antipova, C. G., Kamyshinsky, R. A., Presniakov, M. Y., Tokaev, K. V., & Grigoriev, T. E. (2019). Electroconductive PEDOT:PSS-based hydrogel prepared by freezing-thawing method. *Heliyon*, 5(9), e02498. doi:10.1016/j.heliyon.2019.e02498
- Jang, E. J., Cho, H. S., & Cho, G. S. (2019a). Enhancing the conductivity of PEDOT:PSS/PU nanoweb via dimethyl sulfoxide solvent treatment. *Proceedings of the Fiber Society, Spring Conference, Hong Kong, China*, pp. 21-23.
- Jang, E. J., Liu, H., & Cho, G. S. (2019b). Characterization and exploration of polyurethane nanofiber webs coated with graphene as a strain gauge. *Textile Research Journal*, 89(23-24), 4980-2991. doi:10.1177/0040517519844604
- Jang, Y. S., Yang, S. M., Lee, H. J., Yang, J. C., Kim S. M., Chung, S. C., & Lee, J. Y. (2015). Electrically conducting polymer-Based biomaterials and their biomedical applications and development direction. *Polymer Science and Technology*, 26(4), 305-312.
- Joo, M. I., Ko, D. H., & Kim, H. C. (2016). Development of smart healthcare wear system for acquiring vital signs and monitoring personal heal. *Journal of Korea Multimedia Society*, 19(5), 808-817. doi:10.9717/kmms.2016.19.5.808
- Kim, I. H., & Cho, G. S. (2018). Polyurethane nanofiber strain sensors via in situ polymerization of polypyrrole and application to monitoring joint flexion. *Smart Materials and Structures*, 27(7), 075006. doi:10.1088/1361-665X/aac0b2
- Kim, J. H., Seo, Y. K., Han, J. W., Oh, J. Y., & Kim, Y. H. (2015). Effect of solvent doping and post-treatment on the characteristics of PEDOT:PSS conducting polymer. *Applied Chemistry for Engineering*, 26(3), 275-279. doi:10.14478/ace.2015.1018
- Kim, J. H., Yang, H. J., & Cho, G. S. (2019). Production of polypyrrole coated PVA nanoweb electroconductive textiles for application to ECG electrode. *Fashion & Textile Research Journal*, 21(3), 363-369. doi:10.5805/SFTL.2019.21.3.363
- Na, S. I., Yeo, J. S., Yun, J. M., Kim, J. G., & Kim, D. Y. (2010). Polymer PEDOT:PSS-based transparent electrode material technology. *The Korean Information Display Society*, 11(5), 57-63.
- Olivares, A. J., Cosme, I., Sanchez-Vergara, M. E., Mansurova, S., Carrillo, J. C., Martinez, H. E., & Itzmoyotl, A. (2019). Nanostructural modification of PEDOT:PSS for high charge carrier collection in hybrid frontal interface of solar cells. *Polymers*, 11(6), 1034. doi:10.3390/polym11061034
- Pani, D., Dessi, A., Saenz-Cogollo, J. F., Barabino, G., Fraboni, B., & Bonfiglio, A. (2015). Fully textile, PEDOT:PSS based electrodes for wearable ECG monitoring systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(3), 540-549. doi:10.1109/TBME.2015.2465936
- Park, J. Y., Lee, I. W., Kim, M. J., & Hwang, C. H. (2011). Preparation, properties and applications of electrospun polylactic acid (PLA) fibers containing silver. *Journal of Advanced Engineering and Technology*, 4(4), 491-495.
- Praharaj Bhatnagar, M., Kelkar, S., & Mahanwar, P. (2017). Synthesis and characterization of poly (3, 4 ethylenedioxythiophene)/poly (lactic acid) nanofibres by electrospinning. *Polymer International*, 66(3), 359-365. doi:10.1002/pi.5267
- Rho, J. S. (2016). Wearable textile strain sensors. *Fashion & Textile Research Journal*, 18(6), 733-745. doi:10.5805/SFTL.2016.18.6. 733
- Ryan, J. D., Mengistie, D. A., Gabrielsson, R., Lund, A., & Mu?ller, C. (2017). Machine-washable PEDOT:PSS dyed silk yarns for electronic textiles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(10), 9045-9050. doi:10.1021/acsami.7b00530
- Tadesse, M. G., Mengistie, D. A., Chen, Y., Wang, L., Loghin, C., & Nierstrasz, V. (2019). Electrically conductive highly elastic polyamide/lycra fabric treated with PEDOT:PSS and polyurethane. *Journal of Materials Science*, 54(13), 9591-9602. doi:10.1007/s10853-019-03519-3
- Wisitorsaat, A., Pakapongpan, S., Sriprachubwong, C., Phokharatkul, D., Sritongkham, P., Lomas, T., & Tuantranont, A. (2013). Graphene-PEDOT:PSS on screen printed carbon electrode for enzymatic biosensing. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 704, 208-213. doi:10.1016/j.jelechem.2013.07.012
- Yang, S. L., Wu, Z. H., Yang, W., & Yang, M. B. (2008). Thermal and mechanical properties of chemical crosslinked polylactide (PLA). *Polymer Testing*, 27(8), 957-963. doi:10.1016/j.polymertesting.2008.08.009

(Received 10 December, 2019; 1st Revised 27 December, 2019  
2nd Revised 21 January, 2020, Accepted 7 February, 2020)