

스크린 프린팅을 이용한 PEDOT:PSS/AgNW 기반 전기전도성 스마트 텍스타일의 제조 및 신호전달선으로의 적용

강희은 · 이유진 · 조길수[†]
연세대학교 의류환경학과

Fabrication of PEDOT:PSS/AgNW-based Electrically Conductive Smart Textiles Using the Screen Printing Method and its Application to Signal Transmission Lines

Heeun Kang, Eugene Lee, and Gilsoo Cho[†]
Dept. of Clothing & Textiles, Yonsei University, Seoul, Korea

Abstract: In this study, electroconductive textiles were developed by screen-printing technology using a complex solution of PEDOT:PSS/AgNW on a polylactic acid nanofiber web. A performance evaluation was then conducted to utilize this electroconductive textile as a signal transmission line. To obtain highly conductive electroconductive textiles, this study sought to determine the optimal mixing ratio of PEDOT:PSS/AgNW. Sheet resistance was measured to evaluate the electrical properties of electroconductive textiles, Finite element-scanning electron microscopy images were then used to examine surface properties, and Fourier transform-infrared analysis was performed to evaluate chemical properties. The signal waveform characteristics of the electroconductive textile were observed using a signal generator and an oscilloscope. Radio-frequency characteristics were then evaluated to confirm frequency range, and bending tests were conducted to evaluate durability. The signal transmission lines produced in this study had a sheet resistance value of 3.30 Ω /sq, and signal transmission performance was evaluated to observe that the input value of the voltage was nearly identical to the output value. In addition, S21 analysis confirmed that it was available in the frequency domain up to 35 MHz. The performances of the transmission lines were maintained after 100, 200, 500, and 1,000 repeated bending tests, and sufficient durability was confirmed.

Key words: PLA nanofiber web (PLA 나노섬유 웹), screen printing (스크린 프린팅), signal transmission lines (신호전달선), smart textiles (스마트 텍스타일)

1. 서 론

COVID-19로 인해 건강에 대한 관심이 고조되면서 일상생활 속에서 수시로 건강상태를 점검하고 스스로를 돌보는 셀프 케어(self-care)를 추구하고자 하는 욕구가 증가하고 있다. 특히 집에 머무르는 시간이 길어지고 외부와 온라인으로 연결하여 각종 활동들을 수행할 수 있게 됨에 따라 자연스레 홈 케어(homecare)나 홈 트레이닝(home workout)과 같은 비대면 형태의 헬스 케어(healthcare)가 관심 받고 있다. 더구나 세계적인 ICT(Information and communications Technology) 기업들이 웨어러블 산업을 주도하면서 최근 바이오-모니터링용 스마트

의류의 필요성이 커지게 되었다(Cho, 2008; Lee, 2017). 스마트 의류의 기반이 되는 스마트 텍스타일은 텍스타일 기반의 전자소자, 전극, 신호전달선, 회로 등 다양한 용도로 활용할 수 있으며, 특히 텍스타일을 기반으로 한 신호전달선의 경우 의류에 적용하였을 때 착용감을 유지하면서 동시에 전자기기를 통합하는데 활용할 수 있다(Locher & Troster, 2007; Shin et al., 2021).

나노섬유 웹(nanofiber web)은 수십에서 수백 나노미터(1 나노미터 =10억분의 1 m)의 지름을 가진 초극세 섬유로 이루어진 넌우븐 텍스타일(non-woven textiles)이다. 이는 매우 유연하고, 무수히 많은 미세 다공으로 이루어져 있어 단위부피당 매우 높은 표면적을 가진다(Kim et al., 2019). 이러한 나노섬유 웹의 구조적인 특성으로 인하여 기능성 물질을 첨가할 경우, 기능성 작용기가 섬유 표면에 노출되는 정도가 증가하기 때문에 그 효과를 극대화시킨다는 장점을 가진다(Lee & Lee., 2014; Song et al., 2017). 그중 PLA(Polylactic Acid) 나노섬유 웹은 발효된 옥수수를 글루코스(glucose)와 젖산(lactic acid)의 형태로 제조 후에 축합 반응시켜 만든 폴리락틱산으로 제조된 나노

[†]Corresponding author; Gilsoo Cho
Tel. +82-2-2123-3104, Fax. +82-2-312-8554
E-mail: gscho@yonsei.ac.kr

© 2021 (by) Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

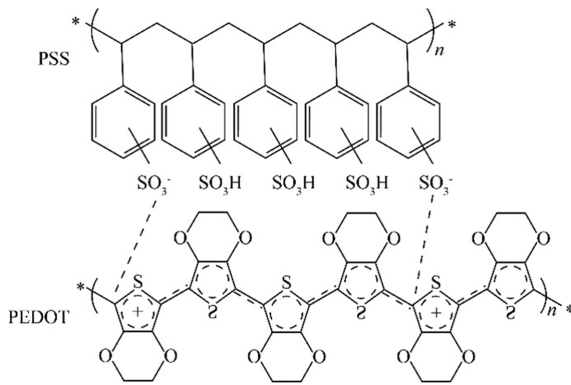


Fig. 1. Chemical structure of PEDOT: PSS.

섬유 웹 직물이며, 생체적합성, 무독성, 생분해성의 특징을 지닌다(Shin et al., 2020; Park et al., 2011).

전도성 고분자는 탄소의 단일결합과 이중결합이 주사슬에 교대로 반복되는 구조를 가지고 있어 π-전자밀도의 비편재화가 일어나며, 불순물을 도핑(doping)함으로써 전기전도도를 향상시킬 수 있는 유기재료이다. 전도성 고분자의 대표적인 물질인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)(PEDOT: PSS)는 전기 전도성 및 광투과도가 뛰어나며, 열 안정성, 가공성, 유연성과 생체적합성이 탁월하며 수용액 상태로 친환경적인 용액 공정이 가능하다(Kim et al., 2015; Fan, et al., 2018). 또한, 박막의 형태(Morphology)와 화학 및 물리적 처리 조건에 따라 전기적 특성을 조절할 수 있다는 강점이 있다(Im et al., 2015). PEDOT:PSS의 화학 구조는 Fig. 1과 같이 나타난다.

은나노와이어(Silver nanowire, AgNW)는 대표적인 금속나노물질의 한 종류로 금속의 전기적 특성을 지니고 있으면서 화학 반응 속도가 매우 빠르다. 또한, 낮은 전기저항($1.6 \times 10^{-6} \Omega \times \text{cm}$)을 가지기 때문에 전기전도성 재료로 매우 우수한 성능을 가진다(Choi et al., 2018). 은나노와이어는 단면의 지름이 나노미터(Nanometer, 10^{-9}) 굵기인 얇은 극미세선의 형태로 우수한 유연성과 뛰어난 전기 전도성을 가져 플렉서블(Flexible) 전자 소자 개발에 많이 사용된다. 또한, 분산용액의 농도나 스마트 텍스타일 센서의 제조방법에 따라서 다양한 전기전도도를 달성하는 것이 가능하다(Jang & Cho., 2019; Kim et al., 2016; Lee & Cho., 2019).

이러한 전도성 재료들을 텍스타일에 적용하는 방법으로는 스크린 프린팅(screen-printing method)을 고려할 수 있다. 스크린 프린팅 공정은 매우 간단한 방법으로 텍스타일 표면에 패턴을 적용할 수 있어 뛰어난 생산성을 발휘한다(Lee & Lim., 2017; Sim & Han., 2018). 스크린 프린팅은 스퀴지(squeegee)로 압력을 가하여 제판의 오프닝을 통해 전도성 잉크 또는 페이스트를 피인쇄체인 텍스타일에 전이시킴으로써 제판을 통과하는 방식이다(Fig. 2). 이러한 스크린 프린팅 법은 봉제 상태에서 프린팅이 가능하여 웨어러블 텍스타일로 구현이 용이할 뿐만 아니라 대량생산이 가능하다는 장점이 있다(Lee & Lim, 2017).

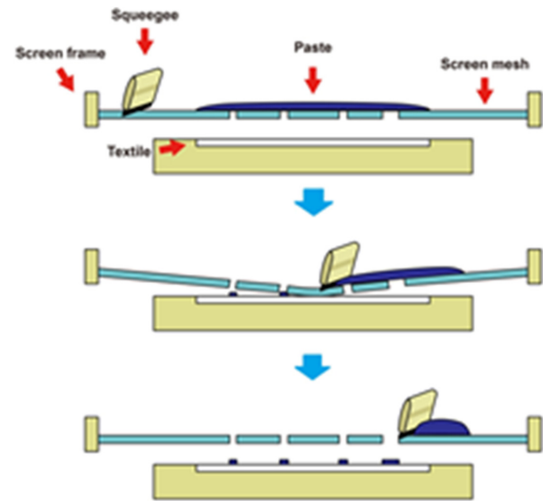


Fig. 2. Process of screen-printing method.

이에 본 연구에서는 전도성 고분자의 대표적인 물질인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)(PEDOT: PSS) PEDOT:PSS와 은나노와이어를 다양한 비율로 혼합하고, 이를 PLA 나노섬유 웹에 스크린 프린팅 기법으로 인쇄하여 스마트 텍스타일을 제작하고자 하였다. 또한, PEDOT:PSS와 은나노와이어의 혼합 비율에 따른 시료의 전기적 특성, 표면 특성, 화학적 특성을 평가하고, 가장 우수한 시료를 선택하여 신호 파형 분석을 실행함으로써 신호전달선으로의 성능을 확인하며, 내구성 평가를 통해 궁극적으로 신호전달선으로의 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 재료

본 연구에서 사용한 기반 직물은 PLA 나노섬유 웹(PLA Nanofiber Web)이며, Pardam사(Czech Republic)에서 구매하였다(Table 1). PLA 나노섬유 웹에 전기전도성을 부여하기 위하여 Sigma-ALDRICH(USA)사에서 구매한 1.3 wt%로 수분산된 PEDOT:PSS를 사용하였다. PEDOT:PSS 스크린 프린팅 시 전기전도성 향상과 접도를 높이기 위해 은나노와이어를 혼합하였으며, KLK (KLK Co., Republic of Korea)에서 구매한 에탄올에 분산된 1 wt% 농도의 은나노와이어를 사용하였다. 실크 스크린 제판과 스퀴지(Squeegee)를 주문 제작(GDQ Factory Co., Republic of Korea)하여, 스크린 프린팅에 사용하였다. 실

Table 1. Characteristics of the PLA nanofiber web

Specimen	PLA nanofiber web
Typical fiber diameter(nm)	200-800
Weight(g/m ²)	5
Melt point(°C)	150
Manufacturing technique	Centrifugal spinning

크스크린 프레임의 사이즈는 30 cm × 40 cm이며, 망사는 폴리 에스테르를 사용하여 제작하였다.

2.2. PEDOT:PSS와 은나노와이어 혼합 용액의 제조

최적의 전기전도성을 가지는 PEDOT:PSS/은나노와이어 혼합 비율을 찾기 위해 1.3 wt% 농도의 PEDOT:PSS 용액과 1 wt%의 에탄올에 분산된 은나노와이어 용액을 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 1:9의 총 9가지 비율로 Vial에 혼합하였다. PEDOT:PSS와 에탄올에 분산된 1 wt% 은나노와이어 용액이 섞인 Vial을 상온(Room Temperature, RT)에서 150 rpm 속도로 30분동안 Magnetic Stirring하여 9가지의 PEDOT:PSS/은나노와이어 혼합 용액을 제조하였다.

2.3. 시료 제작 과정

제조된 PEDOT:PSS/은나노와이어 혼합 용액을 2 cm × 8 cm 크기의 직사각형 틀에 1 ml씩 떨어뜨리고 스퀴지기로 밀어 스크린 프린팅 하였다. 이후, 60°C로 설정된 진공건조기(Vacuum Oven Chamber Volume, JEIO Tech. co., LTD)에서 15분간 건조하였다. 최종적으로 P9A1, P8A2, P7A3, P6A4, P5A5, P4A6, P3A7, P2A8, P1A9 시료 총 9개를 제조하였다(Fig. 3).

2.4. 시료의 특성 평가

2.4.1. 전기적 특성 평가

시료의 전기적 특성 평가를 위해 AIT사의 면저항 측정기 4 Point Probe CMT-SR1000N을 사용하여 10회 면저항(Ω /sq, Sheet Resistance)을 반복 측정 후 평균값을 계산하였다.

2.4.2. 표면 특성 평가

시료의 표면 특성을 평가하기 위해 Field Emission Scanning Electron Microscope(JEOL-7800F)를 사용하여 PEDOT:PSS/은

나노와이어 혼합 용액으로 스크린 프린팅 하기 전과 후의 PLA 나노섬유 웹 표면 특성의 변화를 분석하였다.

2.4.3. 화학적 특성 평가

PEDOT:PSS/은나노와이어의 혼합 비율에 따른 시료의 화학 구조의 변화를 살펴보기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR, Vertex 70) 사용하였다.

2.4.4. 신호 파형 특성 평가

시간의 흐름에 따른 전압 신호의 파형을 관찰하기 위하여 신호발생기를 시료에 연결하여 Input을 발생시킨 후, 오실로스코프를 사용하여 시간의 흐름에 따른 입력과 출력(Input/Output, I/O)의 신호 파형변화를 관찰하였다(Fig. 4).

2.4.5. RF 특성 평가

신호전달선의 성능 평가를 위하여 포트 별 주파수에 따른 삽입 손실(insertion loss)과 반사손실(return loss)을 측정해주는

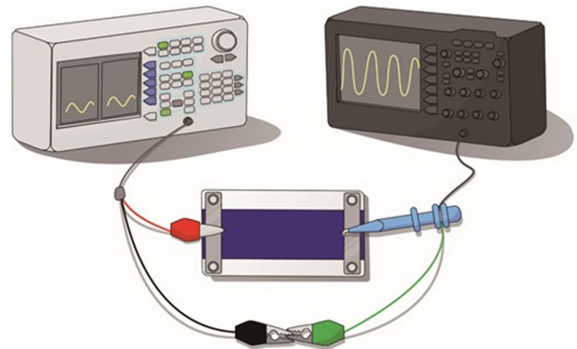


Fig. 4. A schematic of signal waveforms measurement of specimens.

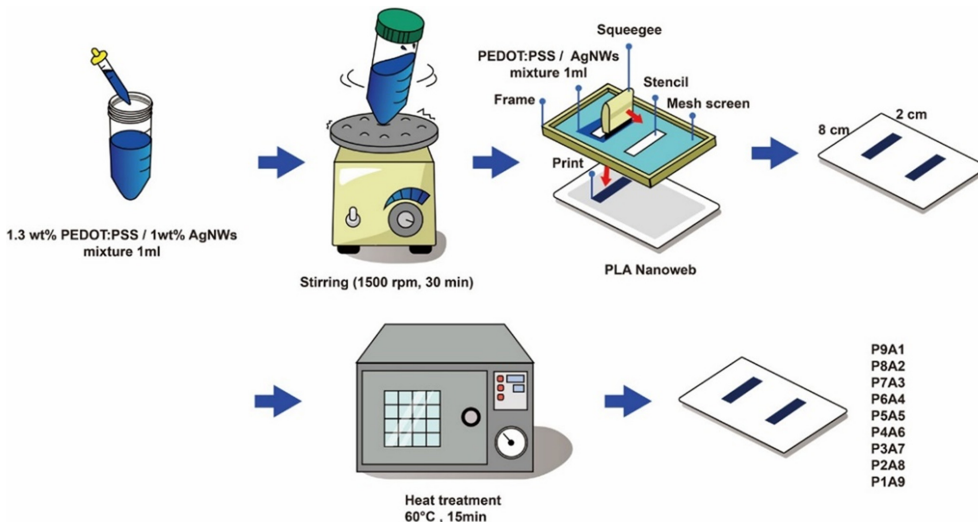


Fig. 3. Procedure of specimen fabrication.

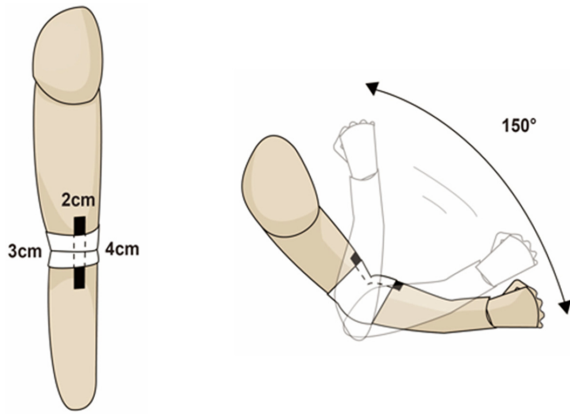


Fig. 5. Performance of arm bending test using a dummy.

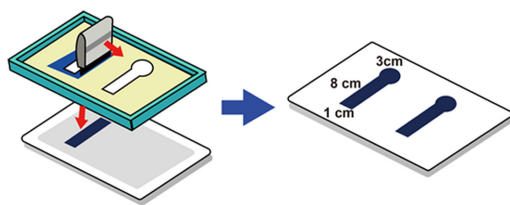
장비인 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, VNA)를 통하여 RF(Radio Frequency) 특성을 측정하였다.

2.4.6. 굽힘 평가

신호전달선이 내구성을 지니는지를 평가하기 위하여 굽힘 시험을 진행하였다. 더미의 팔 안쪽 굽힘이 있는 지점 중앙에 스펙트럼 밴드를 사용하여 시료를 고정한 후, 팔을 구부렸을 때 150°의 각도를 유지하도록 하며 1초 간격으로 굽힘을 100회, 200회, 500회, 1,000회 거듭하여 실시하였다(Fig. 5).

2.4.7. 전극과 신호전달선을 통합한 스마트 텍스타일의 성능 평가

본 연구에서 제작한 신호전달선을 전극과 통합하여 활용할 수 있는지 가능성을 살펴보기 위하여 전극과 신호전달선을 통합한 스마트 텍스타일을 제작하여 성능 평가를 진행하였다. 신호발생기와 오실로스코프를 사용하여 인체에서 발생하는 전압에 근접한 20 mV~150 mV의 미소한 전압을 가지는 파형을 입력하여 출력 결과를 관찰하고자 하였다. 이를 위해, 심전도 측정에 보편적으로 사용하는 Ag/AgCl전극과 유사한 크기인 지름 3 cm의 원형과 신호전달선의 역할을 하는 1 cm × 8 cm의 직사각형이 연결된 스마트 텍스타일을 제작하였다. 이후, 전압의 값을 150 mV, 100 mV, 50 mV, 20 mV로 줄여가며 입력(Input)에



대하여 출력(Output)에 나타나는 변화를 살펴보았다(Fig. 6).

3. 결과 및 고찰

3.1. 두께와 중량

PLA 나노섬유 웹에 PEDOT:PSS/은나노와이어 복합 용액을 스크린 프린팅 하기 전과 후 시료의 두께 변화를 관찰한 결과를 Table 2에 나타내었으며, 은나노와이어의 비율이 높은 시료일수록 두께가 점점 두꺼워지다가 은나노와이어의 비율이 80%(v/v) 이상이 되면 다시 감소하는 경향을 확인하였다. 시료의 애드온 값을 산출하여 PLA 나노섬유 웹에 증착된 PEDOT:PSS/은나노와이어 혼합 용액의 양을 확인한 결과(Table 2), 은나노와이어의 비율이 높아질수록 시료의 무게가 증가하여 애드온 값이 증가하다가 은나노와이어의 비율이 80%(v/v) 이상을 차지하는 시료 P2A8, P1A9의 애드온 값은 다시 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 PLA 나노섬유 웹의 표면에 PEDOT:PSS/은나노와이어 혼합 용액이 균일하게 프린팅 되지 않음으로 인한 현상으로 사료되며, 은나노와이어의 비율이 80%(v/v) 이상이 되는 시료부터 두께가 다시 얇아지는 것과 상응하는 결과임을 확인하였다.

3.2. 면저항 변화

PEDOT:PSS와 은나노와이어 혼합 비율에 따른 시료의 전기

Table 2. Thickness, weight and add-on of the specimen

Specimen	Thickness(mm)	Weight(g/cm ²)	Add-on(%)
Untreated	0.040	0.0005	-
P9A1	0.041	0.0007	40
P8A2	0.045	0.0007	40
P7A3	0.050	0.0009	80
P6A4	0.057	0.0009	80
P5A5	0.065	0.0010	100
P4A6	0.072	0.0011	120
P3A7	0.080	0.0012	140
P2A8	0.069	0.0011	120
P1A9	0.065	0.0009	80

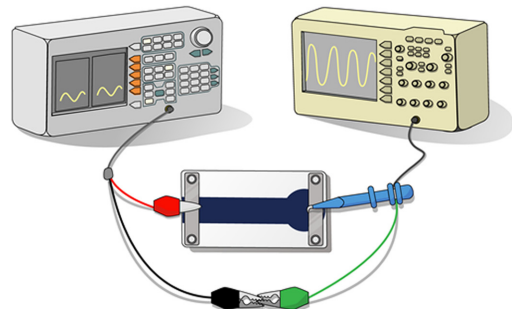


Fig. 6. Procedure of specimen fabrication and signal waveforms measurement of the specimens.

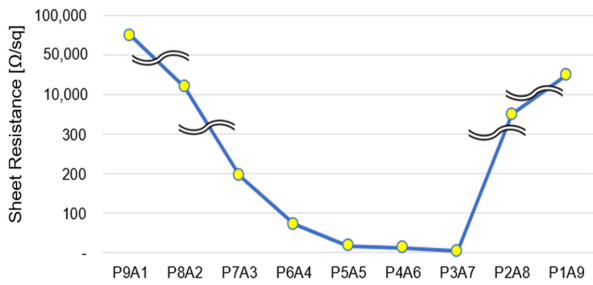


Fig. 7. Sheet resistance of the specimen treated with PEDOT:PSS and AgNW.

적 특성을 평가한 결과, 은나노와이어의 비율이 높아짐에 따라 면저항이 감소하였다. 그러나 은나노와이어의 비율이 80%(v/v) 이상이 되는 시료 P2A8과 P1A9에서는 면저항 측정값이 다시 증가하였다. 이는 혼합 용액 내부 입자 간의 뭉침 현상이 발생하여 농도가 균일하지 않게 되어 면저항 측정값이 반등하는 것으로 해석하였다.

3.3. 표면 특성

PEDOT:PSS/AgNW 복합 용액을 스크린 프린팅 한 PLA 나노섬유 웹 시료의 표면 미세 구조를 확인하기 위하여 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)로 이미지를 촬영하였다. 미처리 PLA 나노섬유 웹 시료의 표면을 관찰하여 나노섬유의 수많은 가닥이 불규칙하게 얽혀 있는 것을 확인하였다. 한편, 은나노와이어의 비율이 80%(v/v) 이상인 시료 P2A8, P1A9은 PLA 나노섬유 웹 표면에 불균일하게 스크린 프린팅 되었다(Fig. 8). 이러한 표면 변화가 시료 P2A8과 P1A9의 낮

은 전기전도도에 영향을 준 것으로 사료된다.

3.4. 화학적 특성

미처리 PLA 나노섬유 웹의 FT-IR 분석 결과, 1180 cm⁻¹ 부근의 C-O-C stretching이 나타났으며, 카보닐기(Carbonyl group, C=O)에 의한 1757 cm⁻¹ 부근의 C=O stretching 피크가 관찰되었다. PEDOT:PSS 용액의 FT-IR 분석 결과, 704 cm⁻¹ 부근에서 PEDOT의 Thiophene Ring 작용기인 C-S Stretching 피크가 관찰되었다. 1520 cm⁻¹ 부근에서는 PSS에 해당하는 C-C stretching이 관찰되었다. 처리 조건과 관계없이 모든 시료에서 PLA 나노섬유 웹과 PEDOT:PSS의 특성 피크가 관찰되었고, 이에 모든 시료에 PEDOT:PSS/은나노와이어 복합 용액이 잘 프린팅 되었음을 확인하였다(Fig. 9).

3.5. 신호 파형

전기적 특성이 가장 우수하며, PLA 나노섬유 웹에 스크린 프린팅 하였을 때 패턴이 가장 명확하게 나타난 시료 P3A7을 사용하여 시간 영역에서 신호 전달 특성 성능을 평가하였다. 시간의 흐름에 따른 신호 전달 성능을 측정하기 위하여 신호발생기로 입력 신호를 발생시켰으며, 오실로스코프를 이용하여 시료 P3A7의 입력(Input) 신호와 출력(Output) 신호를 비교하였다. 그 결과, 전압의 입력 값인 10.44 V_{pp}가 출력 값에도 온전히 출력되는 것을 관찰할 수 있었다. 기존 구리선과 제작한 시료의 성능을 비교하기 위하여 구리선의 출력 신호 파형을 분석하였을 때 시료의 출력 신호 파형과 거의 일치하는 경향이 나타났다(Fig. 10).

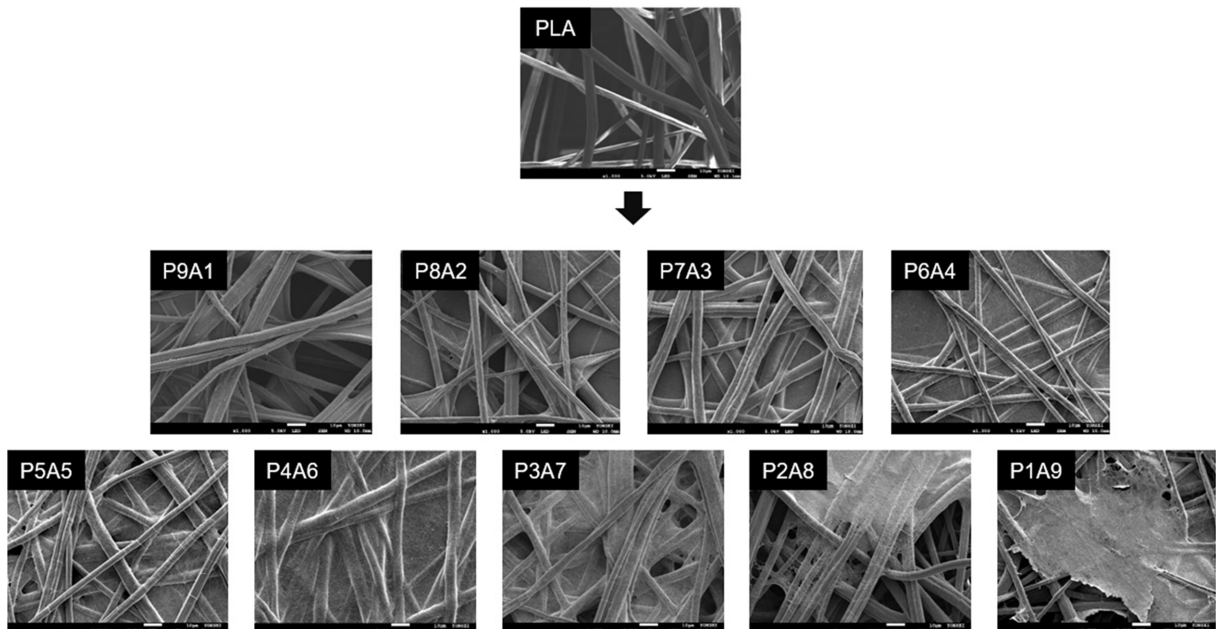


Fig. 8. FE-SEM images of the specimens(x1,000).

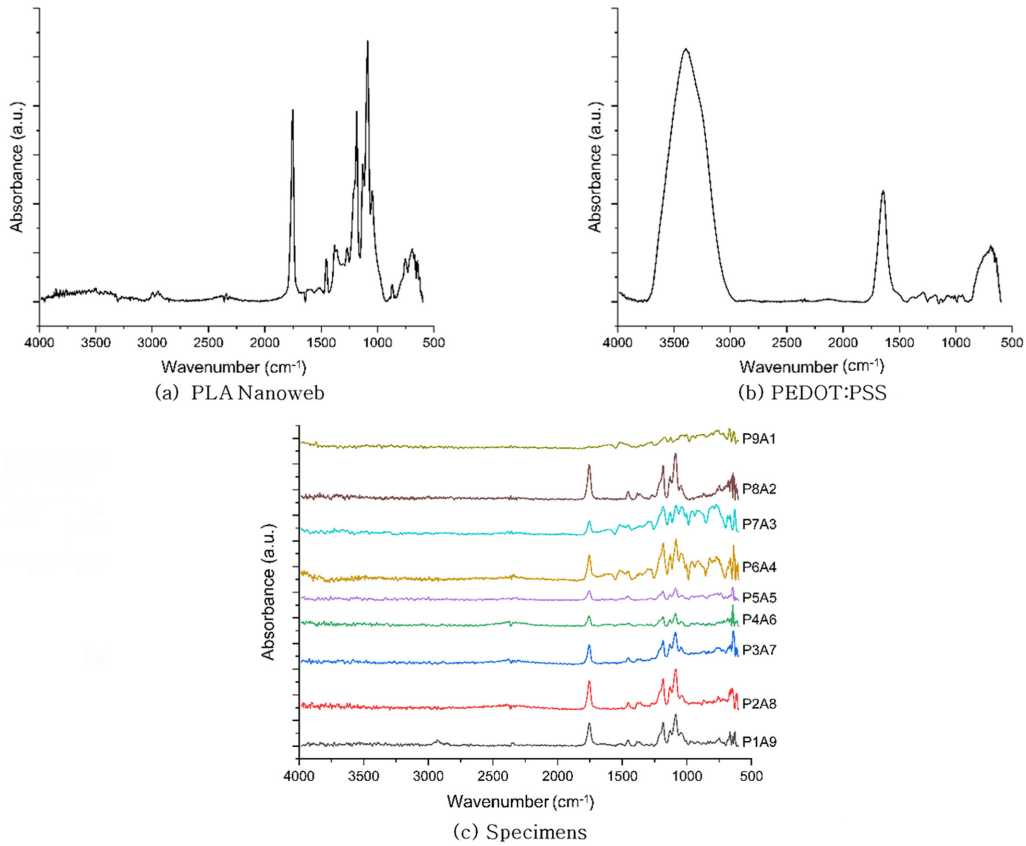


Fig. 9. FT-IR spectra of the specimens.

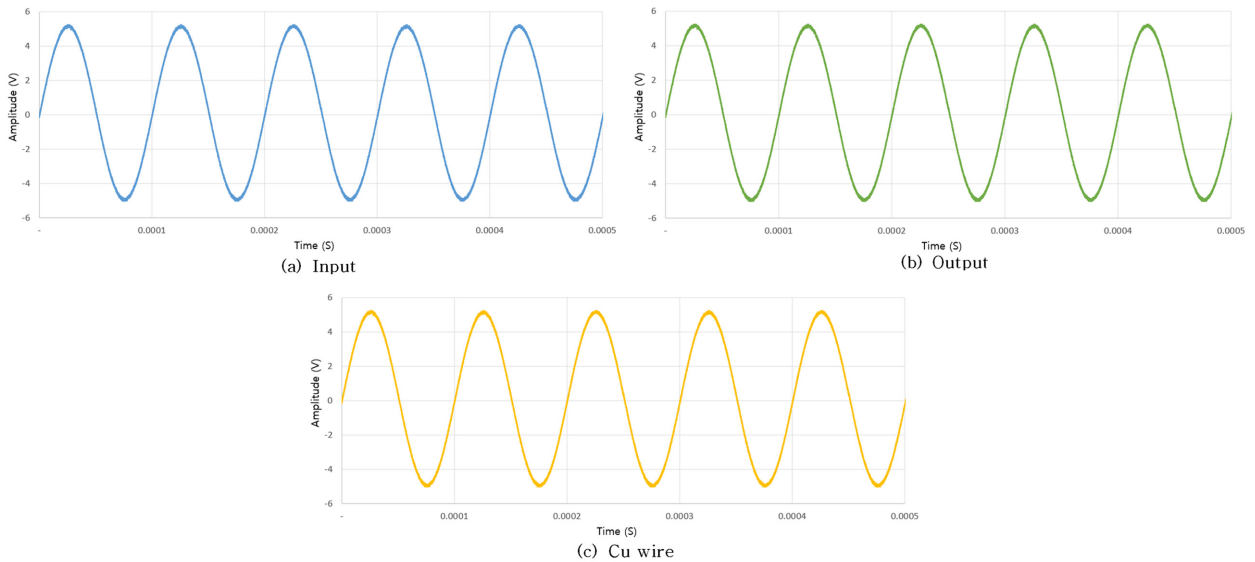


Fig. 10. Comparison of signal waveforms between the specimens and Cu wire.

3.6. RF 특성

전기전도성이 가장 우수한 시료 P3A7을 준비하여 신호전달 선의 $S_{21}(\text{dB}, \text{Insertionloss})$ 을 측정하였다. 시료의 $S_{21}(\text{dB})$ 이 -3 dB

에 근접하는 주파수를 찾고자 하였으며, -3 dB 에 해당하는 $S_{21}(\text{dB})$ 은 입력(Input) 대비 출력(Output) 전력이 절반으로 감소하는 지점을 나타낸다. $S_{21}(\text{dB})$ 이 -2.7839 dB 에 해당하는 값을

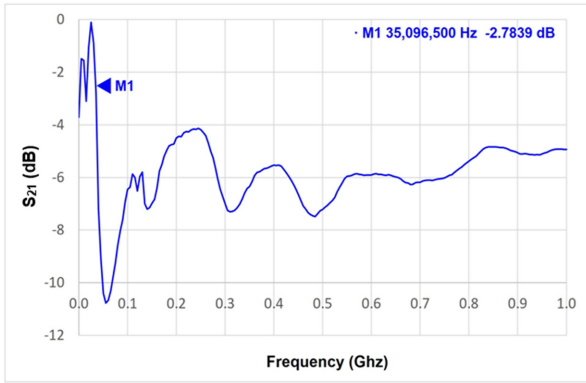


Fig. 11. S21(Insertion loss) characteristics of the specimen.

나타내는 지점은 35 MHz 주파수 영역이었다. 따라서 본 연구에서 제작한 신호전달선은 35 MHz의 주파수 영역까지 사용할

수 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 11).

3.7. 굽힘 특성

전기적 특성이 우수한 시료 P3A7을 사용하여 100회, 200회, 500회, 1,000회의 굽힘 테스트를 시행한 시료들은 출력된 전압의 값이 $10.53 V_{p-p} \sim 10.32 V_{p-p}$ 의 범위로, 입력한 전압의 값인 $10.60 V_{p-p}$ 와 비교하였을 때 미미한 차이를 보였다(Fig. 12). 이러한 결과는 본 연구에서 제작한 PLA 나노섬유 웹 기반 스마트 텍스타일이 신호전달선으로 활용하기에 충분한 내구성을 지닌다는 것을 의미한다.

3.8. 신호전달선과 전극을 통합한 스마트 텍스타일의 신호 파형 특성

본 연구에서 제작한 신호전달선이 전극과 통합하여 사용하였을 때 성능을 유지하는지 살펴보고자 가장 우수한 시료 P3A7

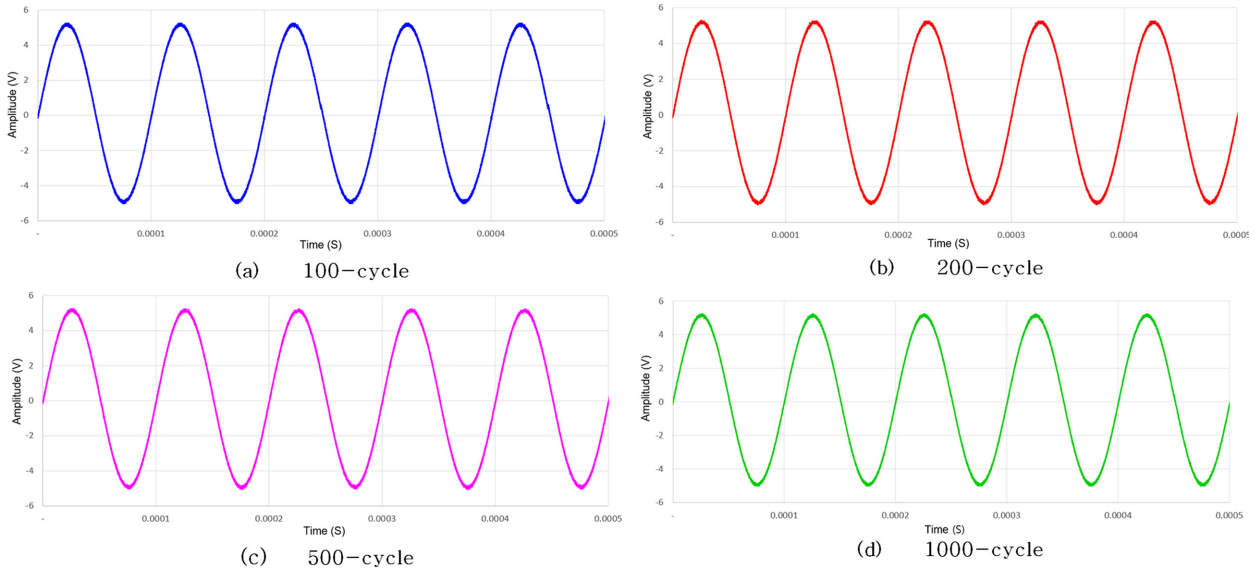
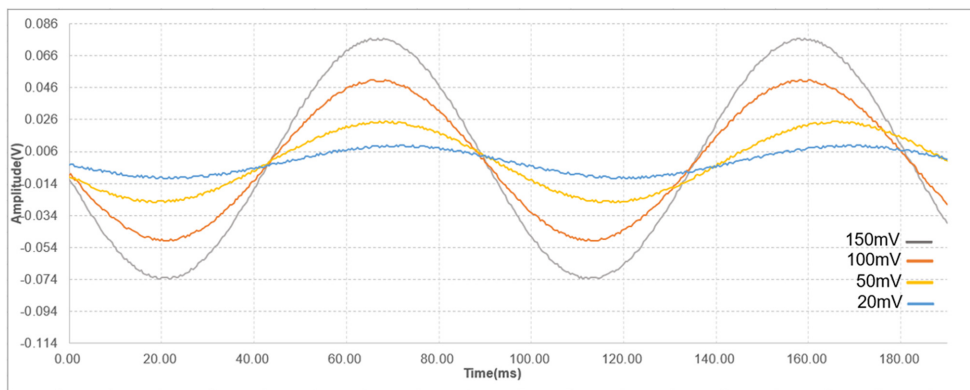
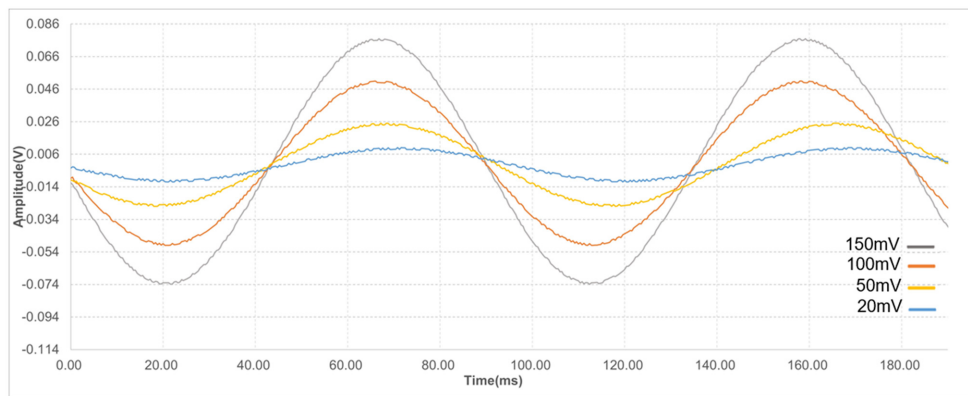


Fig. 12. Signal waveforms of specimens after 100, 200, 500, 1000-cycle bending motion.



(a) Input

Fig. 13. Comparison of signal waveforms between the specimen input and output.



(b) Output

Fig. 13. Continued.

을 사용하여 신호전달선과 전극을 통합한 스마트 텍스타일을 스크린 프린팅을 통해 제작하였으며, 이의 성능을 평가하였다. 인체에 흐르는 전압과 유사한 범위의 전압(20 mV~150 mV)을 이용하여 성능을 평가하였으며 그 결과, 150 mV, 100 mV, 50 mV, 20 mV 4가지의 전압 값에서 입력(Input) 대비 출력(Output) 신호 파형이 미미한 차이를 보이는 것을 확인하였다(Fig. 13). 이는 곧 본 연구에서 제작한 스마트 텍스타일이 신호전달선으로 활용하기에 적합한 성능을 지니는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 스마트 텍스타일인 신호전달선을 제작하여 성능을 평가하고 활용 가능성을 살펴보았다. 이를 위하여 PLA 나노섬유 웹에 PEDOT:PSS와 은나노와이어 혼합 용액을 스크린 프린팅 하여 스마트 텍스타일을 제작하여 전기적, 표면적, 화학적 특성을 관찰하였다. 더 나아가, 신호전달선으로 활용하기 위한 성능 평가를 진행하였다. 오실로스코프를 사용하여 신호 파형을 분석한 결과, 전압의 입력(Input) 값이 출력(Output) 값에도 거의 동일하게 출력되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 주파수에 따른 신호 손실을 알아보기 위하여 S_{21} 측정을 통해 35 MHz 주파수 영역까지 사용할 수 있음을 확인하였다. 내구성 평가를 위해 100회, 200회, 500회, 1000회의 굽힘 테스트를 시행한 시료들은 출력된 전압의 값이 $10.53 V_{pp} \sim 10.32 V_{pp}$ 의 범위로, 입력한 전압의 값인 $10.60 V_{pp}$ 와 비교하였을 때 미미한 차이를 보여 신호전달선으로 사용하기에 충분한 내구성을 지니는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제작한 신호전달선을 전극과 통합하여 활용할 수 있는지 살펴보기 위하여 전극과 신호전달선을 통합한 스마트 텍스타일을 제작하였으며, 인체에서 발생하는 전압과 유사한 값인 150 mV, 100 mV, 50 mV, 20 mV의 전압 값을 설정하여 입력(Input)과 출력(Output)의 파형을 비교하였다. 그 결과, 전압 강하 현상이 미미하게 발생하는 것을 확인하였고, 이로써 본 연구에서 제작한 스마트 텍스타일이 신호전달선

으로서 충분한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2018R1D1A1B 07049804).

References

- Cho, G. S., Yang, Y. J., & Sung, M. S. (2008). Development and its present status of bio-monitoring smart clothing and e-textiles. *Fashion & Textile Research Journal*, 10(1), 1-10.
- Fan, X., Wang, N., Wang, J., Xu, B., & Yan, F. (2018). Highly sensitive, durable and stretchable plastic strain sensors using sandwich structures of PEDOT:PSS and an elastomer. *Materials Chemistry Frontiers*, 2(2), 355-361. doi:10.1039/C7QM00497D
- Im, S. E., Kim, S. Y., Kim, S. Y., Kim, S. J., & Kim, J. H. (2015). A study on improving electrical conductivity for conducting polymers and their applications to transparent electrodes. *Applied Chemistry for Engineering*, 26(6), 640-647. doi:10.14478/ace.2015.1105
- Jang, E. J., & Cho, G. S. (2019). The classification and investigation of smart textile sensors for wearable vital signs monitoring. *Fashion & Textile Research Journal*, 21(6), 697-707. doi:10.5805/SFTL.2019.21.6.697
- 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
- Kim, Y. S., Lee, E. J., Lee, J. T., Hwang, D. K., Choi, W. K., & Kim, J. Y. (2016). High-performance flexible transparent electrode films based on silver nanowire-PEDOT:PSS hybrid-gels. *RSC advances*,

- 6(69), 64428-64433. doi:10.1039/C6RA06590B
- Lee, D. J., & Lim, S. J. (2017). Metamaterial based absorber for wearable applications. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 28(1), 2017.1, 19-24. doi:10.5515/KJKIEES.2017.28.1.19
- Lee, E. G., & Cho, G. S. (2019). PU nanoweb-based textile electrode treated with single-walled carbon nanotube/silver nanowire and its application to ECG monitoring. *Smart Materials and Structures*, 28(4), 045004. doi:10.1088/1361-665x/ab06e0
- Lee, E. S., & Lee, S. S. (2014). Fabrication of Lignin Nanofibers Using Electrospinning. *Journal of The Korean Society of Clothing and Textiles*, 38(3), 372-385. doi:10.5850/JKSCCT.2014.38.3.372
- Locher, I., & Troster, G. (2007). Screen-printed textile transmission lines. *Textile Research Journal*, 77(11), 837-842. doi:10.1177/0040517507080679
- Lee, Y. K. (2017). The Age of 4.0 Industry, the ICT convergence in fashion industry. *Journal of the Korean Society of Design Culture*, 23(2), 497-507. doi:10.18208/ksdc.2017.23.2.497
- 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.
- Sim, S. B. & Han, J. D. (2018). Sonochemical synthesis of copper-silver core-shell particles for conductive paste application. *Applied Chemistry for Engineering*, 29(6), 782-788. doi:10.14478/ace.2018.1097
- Shin, S., Cha, S., & Cho, G. (2020). Fabrication of electroconductive textiles based PLA nanofiber web coated with PEDOT:4PSS. *Fashion & Textile Research Journal*, 22(2), 233-239. doi:10.5805/SFTI.2020.22.2.233
- Shin, S. E., Lee, E. G., & Cho, G. S. (2021). Nylon 6 nanofiber web - Based signal transmission line treated with PEDOT:PSS and DMSO treatment, *Materials*, 14(3), 498. doi:10.3390/ma14030498
- Song, Y. J., Lee, E. S., & Lee, S. S. (2017). Water absorption properties and biodegradability of lignin/PVA nanofibrous webs. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 41(3), 517-526. doi:10.5850/JKSCCT.2017.41.3.517

(Received 9 June, 2021; 1st Revised 28 June, 2021;
2nd Revised 30 July, Accepted 13 August, 2021)