



## 심전도용 전극으로의 적용을 위한 폴리피롤 코팅 PVA 나노웹 전기전도성 텍스타일의 제조

김재현 · 양혁주 · 조길수<sup>†</sup>  
연세대학교 의류환경학과

### Production of Polypyrrole Coated PVA Nanoweb Electroconductive Textiles for Application to ECG Electrode

Jae-Hyun Kim, Hyuk-Joo Yang, and Gil-Soo Cho<sup>†</sup>  
Dept. of Clothing & Textiles, Yonsei University, Seoul, Korea

**Abstract:** This study developed electroconductive textiles by coating polypyrrole to PET nonwoven-based Polyvinyl Alcohol (PVA) nanoweb made by electrospinning and applying the developed electrotextiles as ECG Electrodes. To find the optimum coating conditions for high electrical conductivity, the ratios of 2,6-Naphthalenedisulfonic acid with Disodium Salt (NDS) vs Ammonium Persulfate (APS) as an oxidant and a doping agent in the solution were changed from 3:7 to 7:3; the immersion time of the specimen in the solution was 1 hour. PVA nanoweb coated with polypyrrole under various conditions were filmed with FE-SEM. FT-IR analysis was also performed to examine the presence of polypyrrole nanoparticles in the PVA nanoweb. The electrical resistance of the treated specimens were measured with a Multimeter. Consequently, the PVA Nano Web was undamaged even after heat treatment that allowed for coating. Uniform polypyrrole nanoparticles then formed on the surface of the PVA nanoweb after coating. The measured electrical resistance was shown to be at least 12K $\Omega$ /□ from a maximum of 3,456K $\Omega$ /□. The proper amount of NDS content had a positive effect on the conductivity improvement of electroconductive textiles; in addition, the highest electrical conductivity was achieved with a ratio of 3:7 between NDS and APS.

**Key words:** electroconductive textiles (전기전도성 텍스타일), polypyrrole (폴리피롤), nanoweb (나노웹), electrode (전극), doping (도핑), oxidant (산화제)

## 1. 서 론

스마트 의류에 대한 연구가 시작된 초기의 전기전도성 스마트 텍스타일은 소형 컴퓨팅 기기를 분리하여 의류에 넣는 방식으로 시작하여, 2000년대에는 가젯(Gadget) 형태의 전자장치를 의류에 장착하는 방식으로 개발되어왔다(Park & Kim, 2013). 섬유 및 나노기술의 발달로, 향후에는 의류 내에 전자장치의 기능이 포함된 형태의 스마트 의류 개발이 활발해 질 것으로 예상된다(Jang & Cho, 2018). 의류에 전기적 기능을 보유한 회로 또는 장치가 내장된 스마트 의류 개발을 위해서는 유연성, 심미성 등 직물의 고유 특성을 가지면서도, 각종 신호를 감지하고 구동할 수 있는 전기적 성질을 동시에 갖는

전기전도성 소재의 개발이 필요하다(Park, 2014). 이러한 전기전도성 소재를 포함한 스마트 의류를 통해 음악재생 또는 연주, 휴대폰 충전, 바이오 모니터링 등이 가능하다. 특히 온도 또는 맥박측정을 위한 바이오 모니터링 시스템은 기기를 이용한 생체신호를 측정하는 방식에서, 의복을 착용하거나 밴드 형태로 구현된 센서를 통한 모니터링 방식으로 발전하고 있다(Cho et al., 2008).

바이오 모니터링 시스템을 이용하여 측정할 수 있는 생체신호들 중, 심전도는 가장 많은 연구가 진행된 생체신호이며, 주기적인 심전도 검사를 통해 심혈관계 질환 등을 확인하고 이를 예방할 수 있다(Hong et al., 2006; Lee et al., 2014). 전극은 심전도와 같은 생체 전위신호를 측정하는데 필요한 기구로, 생체전위의 기록에는 일반적으로 Ag/AgCl 전극을 활용한다. 하지만, Ag/AgCl 전극은 유연성이 없고 강직하여 장기간 사용 시 접촉에 의한 불쾌감 또는 피부자극 등을 유발함으로써 인체에 직접 접촉이 불가피한 직물기반의 바이오 모니터링 시스템 구현에는 적합하지 않다(Oh et al., 2013).

생체신호들을 측정하기 위한 스마트 텍스타일을 개발하기 위해서는 인체친화력, 유연성, 착용성 등을 고려해야 한다. 유연

<sup>†</sup>Corresponding author; Gil-Soo Cho  
Tel. +82-2-2123-3104, Fax. +82-2-312-8554  
E-mail: gscho@yonsei.ac.kr

© 2019 (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.

성과 착용성이 고려된 생체 신호 측정 스마트 텍스타일을 개발하기 위한 방법으로 나노섬유 웹이 활용될 수 있다. 나노섬유 웹(Nanofiber web)은 넓은 표면적과 유연성, 미세다공성의 특성을 가지고 있어, 전기방사를 통해 제조된 나노웹에 전도성 물질을 코팅한다면 이러한 조건을 충족하면서도 전도성물질의 표면적이 넓어져 전극으로서 가져야하는 물리적 성질이 극대화될 수 있다(Lee & Lee, 2015).

따라서 본 연구에서는 PET Nonwoven을 기반으로 한 Polyvinyl Alcohol(이하 PVA) 나노웹에 폴리피롤을 코팅하여, 전기전도성 텍스타일을 제작하고자 한다. 기반직물로 사용될 PET는 의류소재로 널리 사용되는 소재 중 하나로, 전극으로 활용 시 스냅 단추형으로 사용하거나, PET제질의 의류에 포함된 형태로 사용하는 등 범용성을 가질 수 있다. PVA는 다른 고분자 및 전도성 물질과의 안정적인 상호 작용 및 흡착성을 가지고 있어 가공이 편리하고, 또한 친환경적/인체친화적인 장점이 있어, 장시간 착용 시에도 피부 질환에 대한 피해를 방지할 수 있기 때문에 다양한 E-textile 복합체 개발로의 활용 가능성을 가지고 있다(Lee & Lee, 2015; Zhang et al., 2009). 폴리피롤(Polypyrrole)은 전도성 고분자(ICPs) 중 대표적인 것으로, 전기전도성이 우수하고(Table 1), 상온에서 합성이 쉬우며, 뛰어난 안정성과 고체 표면에 대한 강한 부착력을 가지고, 유기용매에 녹지 않으면서 공기 중에서 열적 대기 안정성이 우수하고 화학중합성 또한 용이하기 때문에 응용가능성이 많은 물질로 분류되어 섬유복합체 제조에 적극적으로 활용되고 있다(Kim, 2017).

폴리피롤 중합 시 산화제로는 Ammonium Persulfate(이하 APS)와 ferric chloride(이하 FeCl<sub>3</sub>)가 일반적으로 사용된다(Singh et al., 2012; Whang et al., 1991). FeCl<sub>3</sub>은 APS에 비해 높은 전도성을 가진 폴리피롤을 형성할 수 있으나, 중합 간 가수분해로 인해 형성된 Fe(OH)<sub>3</sub>가 섬유내의 수소결합을 감소시킴으로서, 전기전도성 텍스타일의 물성을 저하시킬 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 폴리피롤 중합 시 첨가되는 산화제로는 APS를 사용하고, Doping agent로는 Kim(2017)의 연구를 참고하여 2,6-Naphthalenedisulfonic acid, Disodium Salt(이하 NDS)를 사용하였다.

본 연구에서는 NDS와 APS의 다양한 구성비로 제조된 폴리피롤 코팅 PVA 나노웹의 표면 및 화학적 구조를 확인하고, 이들 간의 전기적 특성 차이를 비교하고자 하며, 이를 통해 최적의 전기전도성을 가질 수 있는 폴리피롤 중합조건 및 코팅

시간을 확인하고자 한다.

제조한 텍스타일의 전기적 특성 및 전극으로서의 사용 가능성을 살펴보기 위해서 저항측정기를 활용하여 4침법에 따른 전기 저항값을 측정하였다(Na et al., 2015). 본 연구의 결과를 바탕으로 PET가 가진 범용성과, PVA 나노섬유가 가진 넓은 흡착력 및 인체친화력, 폴리피롤이 가진 우수한 전도성을 바탕으로 향후 PVA 나노웹과 폴리피롤을 활용한 전극 및 전기전도성 텍스타일 개발에 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1. 시료 및 시약

나노웹 제조에는 99% 이상 수분산된 PVA(분자량 89,000~98,000, Sigma Aldrich Co. USA)와 더불어 용매로 증류수를 사용하였다. 폴리피롤 용액 제조를 위한 시약은 피롤(분자량 67.09, Alfa Aesar, USA)과 산화제인 APS(분자량 228.2), Dopping Agent인 NDS(분자량 332.26)를 사용하였다.

### 2.2. PET 부직포를 기반으로 한 PVA 나노웹 제작

본 연구에서는 PVA 나노웹을 제조하기 위해 전기방사법을 사용하였다. 나노웹은 PVA 파우더를 이용하여 10.0wt% 농도의 PVA 솔루션을 제조한 후 PET(40g/cm<sup>2</sup>) 부직포를 기반직물로 하여 전기방사를 통해 제작하였다. 전기방사 조건은 Hong et al.(2006)의 연구를 참고하여 폴리피롤을 코팅하기에 적합한 나노웹을 제조하기 위한 조건으로 설정하였다. 본 연구에서 사용한 PVA 나노웹의 전기방사조건은 Table 2와 같다.

PVA는 물과 접촉 시 용해되는 성질로 인해 나노웹의 손상이 발생할 수 있으나, 이를 극복하기 위해 선행연구(MirafTAB et al., 2015; Park et al., 2003)의 내용을 참고하여 열처리를 실시하였다. 열처리 온도와 시간은 Table 3과 같다.

### 2.3. 폴리피롤 용액의 제조

본 연구에서 제작한 PVA 나노웹에 전도성 코팅을 위하여 폴리피롤(Polypyrrole)을 중합하였다. 전자가 풍부한 피롤 단량체가 화학적 산화에 의하여 라디칼 양이온(Radical cation)을 형성하게 되고, 이러한 상태의 두 분자들이 서로 결합하여 전자가 2개 부족한 이량체를 형성하게 된다. 이 후 이량체는 2개의 수소원자를 잃어버리고 방향족성을 회복하게 되는데, 이렇게 형성된 이량체는 지금까지의 과정을 반복하고, 도핑과정을

**Table 1.** Electrical conductivity of ICPs (Kim, 2017)

ICPs	Conductivity (S/cm)
Polypyrrole	600
Polyaniline	10
Polythiophene	200
poly-p-phenylene	500
Polyacetylene	10 <sup>5</sup>

**Table 2.** Electrospinning processing condition

Voltage(kV)	Working distance(cm)	Feed rate(ml/hr)	Needle gauge
20	15	0.2	26

**Table 3.** Heat treatment for making cross linking

Processing temperature (°C)	165
Time (min)	3

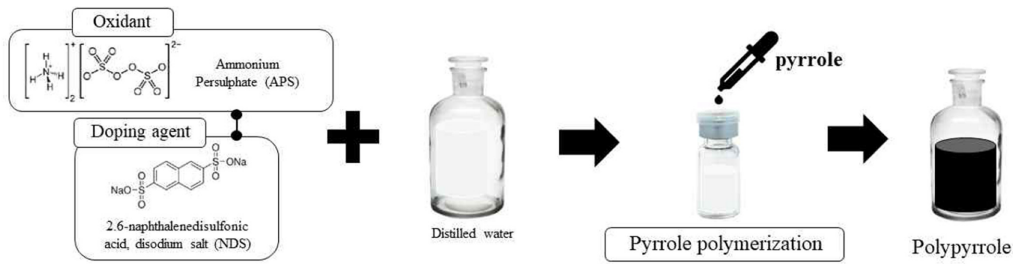


Fig. 1. Schematic of polypyrrole solution making.

Table 4. Polypyrrole solution condition for obtain optimal electrical conductivity

Sample code	Mass of Pyrrole	APS : NDS (w:w)	Distilled water	Total
NDS 0		100:0 (4g:0g)		
NDS 30	1g	70:30 (2.8g:1.2g)	45ml	50ml
NDS 50		50:50 (2g:2g)		
NDS 70		30:70 (1.2g:2.8g)		

거친 후 전기전도성 폴리피롤로 중합된다(John & Wallace, 1991). 본 실험에 앞서 다양한 비율로 피롤과 NDS, APS의 함량을 조절하면서 침전물이 생기지 않는 함량비를 탐색한 결과, 피롤 1g과 NDS 및 APS 4g, 증류수 50ml를 혼합하였을 때 침전물이 적게 발생하여, 본 실험에서는 피롤 1g, 증류수 50ml의 조건을 고정한 상태에서, APS(Oxidant)와 NDS(Doping agent)의 비율을 독립변수로 하여 전기전도성 및 나노웹의 표면특성을 확인하고자 한다. Fig. 1은 폴리피롤 용액을 제조하기 위한 산화제(Oxidant)와 Doping agent, 증류수, 피롤(Pyrrole)의 혼합과정을 나타낸 개요도이다. 그림과 같이 증류수에 APS(Oxidant)와 NDS(Doping agent)를 첨가한 후, 피롤을 중합하였다.

최적의 전도성을 얻을 수 있는 조건을 도출하기 위해 다양한 조건 하에서 폴리피롤 용액을 제조하였고, 그 제조조건은 Table 4와 같다.

2.4. 폴리피롤의 코팅 및 두께 측정

Table 4에서의 Sample code별로 제조한 폴리피롤 용액에 PVA 나노웹을 침지하여 코팅하였다. 예비실험을 통해 코팅시간에 따라 나노웹의 손상여부를 확인하기 위해 1시간, 3시간, 5시간으로 나누어 폴리피롤을 코팅하였고, 1시간 동안 코팅한 시료를 제외한 나머지 시료들은 나노웹상의 섬유들이 손상되어, 본 실험에서는 1시간 동안 코팅을 실시하였다. 코팅 후에 시료 표면에 남은 폴리피롤의 잔여물은 증류수에 수세하여 제거한 후, 50°C의 진공오븐에서 24시간 동안 건조하였고, 디지털 캘리퍼(Digital caliper)를 사용하여 각 시료별 두께를 측정하였다.

2.5. 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 표면 및 적외선 분광 분석(FT-IR spectroscopy)

PVA 나노웹에 폴리피롤을 코팅한 후, 전기전도성 측정 가능

여부를 살펴보기 위해 다양한 조건의 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹을 침지시간별로 구분하여 FE-SEM을 촬영하였다. 또한 PVA나노웹 내의 폴리피롤 나노파티클의 존재여부와 효과적 합성여부를 확인하기 위해 적외선 분광분석(FT-IR spectroscopy)을 실시하였다. FT-IR분석은 폴리피롤 파우더와 PVA나노웹, 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹을 대상으로 실시하여 폴리피롤 파우더의 FT-IR 스펙트럼에서 관찰되는 주요 피크들을 분석하고, 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹 시료와 비교하였다.

2.6. 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 전기 저항값 측정

폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 전기적 특성을 확인하기 위해 선저항값( $\Omega$ , linear resistance)과 면저항( $\Omega/\square$ , sheet resistance)을 측정하였다. 선저항값은 Multi meter(DM-1010)를 사용하여 측정하였으며, 코팅된 PVA 나노웹의 접촉면 세 곳을 임의로 선정하여 측정한 후 평균값을 계산하였다. 면저항값은 표면저항측정기(CMT-SR1000N)를 사용하여 측정하였으며, 마찬가지로 접촉면을 임의로 세 번 설정하여 측정하였다. 위 과정을 통해 측정된 면저항값의 평균을 계산하여 면저항값을 비저항값( $\Omega\cdot\text{cm}$ , Specific resistance)으로 환산하였다. 비저항값은 물질의 고유저항으로, 혼합물의 경우 아래의 식을 통해 산출할 수 있다.

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

3. 결과 및 논의

3.1. PET 부직포를 기반으로 한 PVA 나노웹 제작

10.0wt% 농도의 PVA 솔루션을 제조한 후 PET(40g/cm<sup>2</sup>) 부직포를 기반직물로 하여 전기방사를 통해 PVA 나노웹을 제작하였다. Fig. 2의 (a)는 열처리를 하지 않은 나노웹의 형태이고, (b)는 PVA의 친수성으로 인해 차후 물과의 접촉에 의한 웹의 손상을 방지하기 위하여 열처리를 실시한 나노웹의 형태이다. 열처리 이후에도 폴리피롤 코팅이 가능한 섬유의 형태가 유지되었다.

3.2. 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 표면특성 및 두께

Fig. 3은 다양한 조건의 폴리피롤이 PVA 나노웹에 코팅된

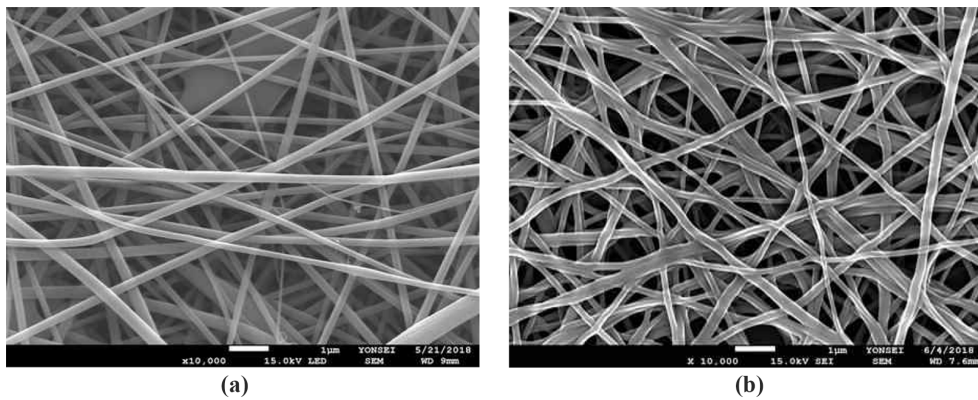


Fig. 2. FE-SEM image of PVA nanoweb (a) Before heat treatment (b) After heat treatment.

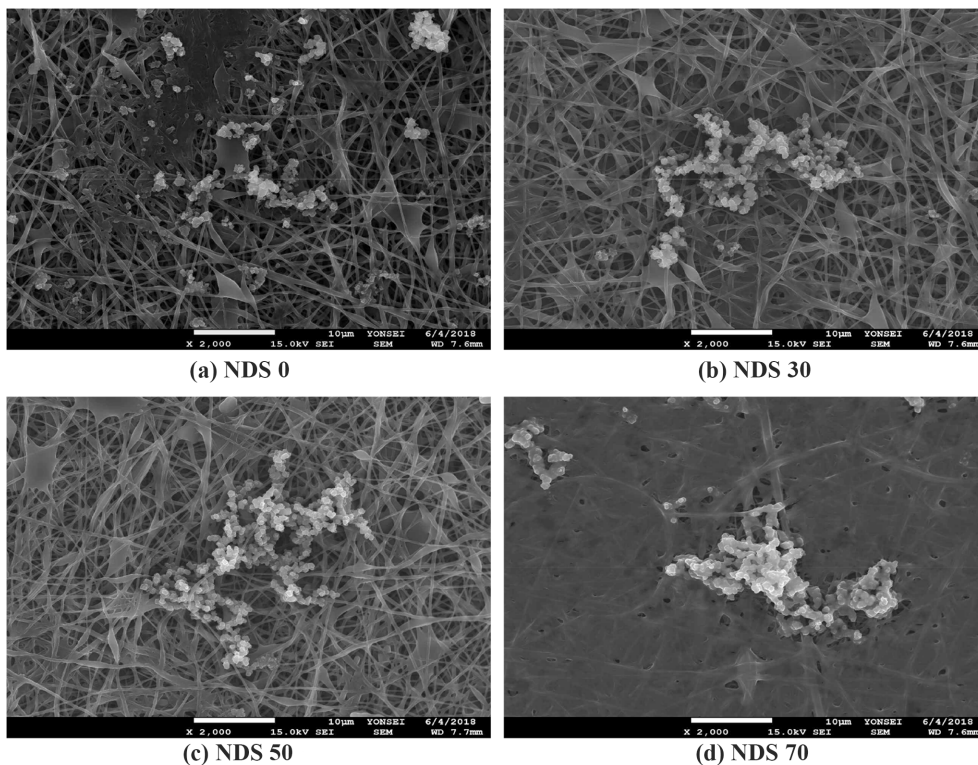


Fig. 3. SEM image of Polypyrrole(manufactured by content of NDS & APS) coated PVA nano web.

시료들의 FE-SEM(JEOL-7610F-Plus) 촬영이미지로, 가느다란 PVA 나노섬유 가닥이 불규칙하게 배열된 가운데 원형의 폴리피롤 나노파티클이 그 위에 형성된 모습을 관찰할 수 있었다. 나노섬유의 손상정도 및 파티클의 함량 등 전체적인 섬유형태는 (b)NDS 30과 (c)NDS 50의 형태가 상대적으로 가장 양호하였다. 또한, (d)NDS 70에서는 일부 나노섬유의 손상이 관측되어, 일정 함유량 이상의 NDS 첨가는 나노섬유의 손상을 초래할 수 있다는 점을 확인하였다. 가장 표면형태가 양호한 NDS 30의 SEM이미지를 통해 폴리피롤 나노파티클의 크기를 측정된 결과, 형성된 폴리피롤 나노파티클은 최소직경 125nm, 최대직경 205nm, 평균 156nm의 균일한 직경을 가지고 있었

다(Fig. 4).

폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 두께는 디지털 캘리퍼(Digital caliper)를 사용하여 측정하였고, 측정결과는 Table 5와 같다.

### 3.3. 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 FT-IR 분석

Fig. 5는 미처리 PVA 나노웹과 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 화학구조적 특성을 비교하기 위해 400~4,000cm<sup>-1</sup> 영역에서 수행한 FT-IR 분석결과이다. (1)은 폴리피롤 파우더, (2)는 미처리된 PVA 나노웹, (3)은 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 적외선 흡수스펙트럼으로, 각각의 스펙트럼은 공통적으로

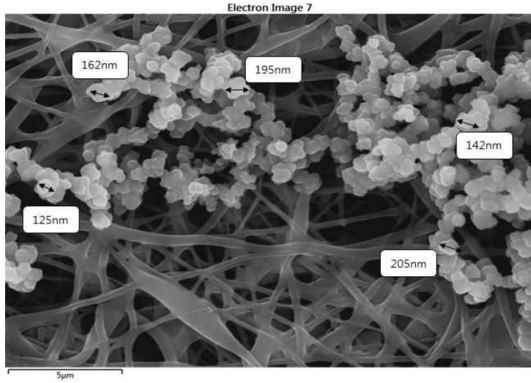


Fig. 4. Size of polypyrrole nanoparticles(NDS 30).

Table 5. Thickness of polypyrrole coated PVA nanoweb

NDS 0	NDS 30	NDS 50	NDS 70
0.13mm	0.15mm	0.15mm	0.14mm

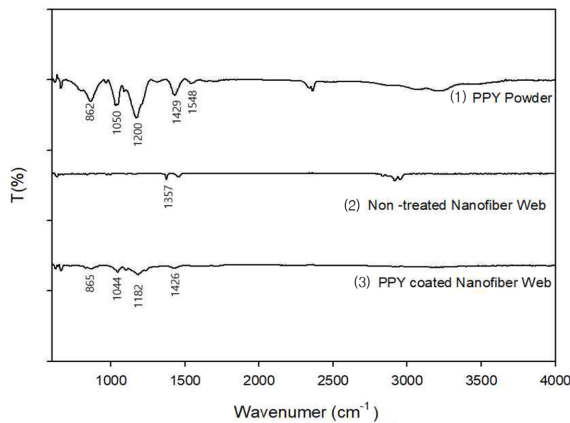


Fig. 5. FT-IR Spectrum of (1) Polypyrrole powder, (2) Non treated nanofiber web, (3) PPY coated nanofiber web.

600~2,000cm<sup>-1</sup> 영역에서 강한 피크들이 관찰되었다. 이 영역이 피롤 단량체에서 나타나는 대표적인 흡수피크가 나타나는 구간으로, 폴리피롤의 주요 화학적 결합피크인 1,550cm<sup>-1</sup>~1,455cm<sup>-1</sup> 부근의 신축진동피크는 일반적으로 피롤에서 나타나는 탄소와 탄소 간의 이중결합(C=C)과 단일결합(C-C)에 의한 흡수피크이며, 1,200cm<sup>-1</sup> 부근의 피크는 도핑된 폴리피롤에 의한 신축진동피크이고, 1,050cm<sup>-1</sup> 부근의 피크는 C-N평면내 흡수피크로서, 1,100~920cm<sup>-1</sup> 부근에서 나타나는 바이폴라폰에 의한 전하운반체의 흡수밴드로 알려져 있다(Ribo et al., 1998).

본 연구에서 제조한 폴리피롤 파우더의 흡수피크(1)는 탄소 간의 이중 또는 단일결합에 의한 1,548cm<sup>-1</sup>, 1,429cm<sup>-1</sup> 부근의 신축진동피크와 산화제에 의한 1,200cm<sup>-1</sup> 부근의 피크, 1,050cm<sup>-1</sup>, 960cm<sup>-1</sup> 부근의 피크가 관찰되었다. 1,050cm<sup>-1</sup> 부근의 피크는 바이폴라폰으로 사료되며, 960cm<sup>-1</sup>,

862cm<sup>-1</sup> 부근의 피크는 C-C 및 C-H평면의 고리변형 진동밴드가 나타난 것으로 판단된다. 미처리된 PVA 나노웹(2)의 경우에는 피롤에서 나타나는 주요 흡수피크는 관찰되지 않았고, 2,838~2,951cm<sup>-1</sup> 및 1,357cm<sup>-1</sup> 부근에서 PVA 고분자 성분에 의한 피크만 관찰되었다. 반면에 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 스펙트럼(3)에서는 1,426cm<sup>-1</sup>, 1,182cm<sup>-1</sup>, 1,044cm<sup>-1</sup>, 865cm<sup>-1</sup> 부근에서 폴리피롤 파우더(1)의 주요 흡수피크들이 관찰되었고, 이를 통해 PVA 나노섬유 웹에 피롤성분이 안정적으로 증착되었음을 확인할 수 있었다.

3.4. 폴리피롤로 코팅된 PVA 나노웹의 전기적 특성

다양한 조건의 Polypyrrole coated PVA 나노웹의 전기적 특성을 확인하기 위해 선저항과 면저항을 측정하였다(Table 6, Fig. 6). 그 결과 선저항과 면저항 모두 NDS 30 시료가 가장 낮은 저항값을 나타내, 시료들 중 가장 양호한 전기전도성을 가진 것으로 나타났다. 선저항값과 면저항값은 NDS 0 시료를 제외하고는 NDS의 양이 증가할수록 저항값이 증가하였다. 선저항값은 NDS의 비율이 30%일 때 137kΩ이었으나 70%일 때 2,093kΩ까지 높아졌고, 면저항값은 30%일 때 12kΩ/□에서 70%일 때 3,456kΩ/□까지 높아졌다. 즉, 본 연구에서 가장 높은 전도성을 나타낸 시료는 Doping agent와 산화제의 비율이 약 3:7인 시료였음을 알 수 있다. 또한, Table 5 및 Fig. 6에서 NDS가 함유되지 않은 시료 NDS 0보다 NDS 50의 선저항값이 더 낮았다는 점을 볼 때, 적절한 양의 NDS첨가가 전기전도성 향상에 정(+)적인 영향을 미친다는 점과, 임계점 이상의 NDS함유는 오히려 전기전도성을 급격히 감소시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. NDS의 비율이 50%인 시료의 전도성이 30%인 시료보다 낮은 점을 볼 때, 최적의 전기전도

Table 6. Electrical resistance of polypyrrole coated PVA nanoweb

Sample code	Linear resistance(Ω)	Sheet resistance(Ω/□)	Specific resistance(Ω·cm)
NDS 0	517K	2,678K	34,814
NDS 30	137K	12K	180
NDS 50	667K	57K	855
NDS 70	2,093K	3,456K	48,384

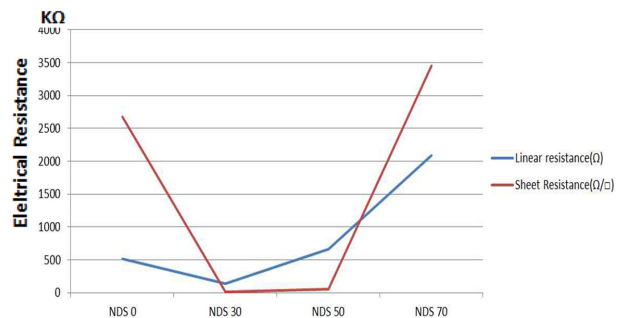


Fig. 6. Electrical resistance of the polypyrrole coated PVA nano web.

성을 나타내는 NDS의 함유량은 30~50% 구간에 존재하는 것으로 판단되었다.

측정한 면저항값을 토대로 비저항값을 환산하였고, 가장 양호한 비저항값을 가지는 NDS 30시료의 비저항값은 180Ω·cm로 나타났다(Table 6).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 PVA 나노웹 표면에 중합된 폴리피롤을 코팅하여 전기전도성 텍스타일을 제작하고 심전도 측정을 위한 전극으로서의 활용가능성을 탐색하였다. PVA 나노웹이 물과 접촉할 경우 발생할 수 있는 손상을 방지하기 위해 열처리를 진행하였고, Oxidant인 APS와 Doping agent인 NDS의 비율에 따른 나노웹의 전기적 특성과 이에 따른 전극으로서의 활용성을 확인하기 위해 다양한 조건으로 시료를 제작하여 각각의 전기저항값을 측정하였고, 그 결과 2가지의 주요 결론을 얻을 수 있었다.

첫 번째는 PVA 나노웹의 내구성에 대한 입증으로, 열처리 후에도 PVA 나노웹은 폴리피롤을 침지하여 코팅이 가능할 수준의 내구성을 지녔으며, 코팅 후에는 전체적으로 균일한 폴리피롤 나노파티클이 안정적으로 PVA 표면에 안착된 것을 확인하였다. 이는 높은 가공성과 인체친화성을 가진 PVA의 내구성을 입증하며, 전극 외에도 다양한 E-Textile 복합체 개발로의 활용가능성을 의미한다.

두 번째는 Oxidant인 APS와 Doping agent인 NDS의 비율에 따른 나노웹의 전기적 특성으로, 폴리피롤의 함량이 1g일 때, NDS와 APS의 함량비가 3(1.2g) : 7(2.8g)에서의 전기전도성이 가장 우수하였다. Doping agent인 NDS의 함량이 높아질수록 웹의 손상정도가 심해지고, 저항값이 높아졌으나, 적정량의 NDS함유는 폴리피롤 나노파티클의 형성과 전도성 향상에 정(+)적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

연구를 진행하면서 PVA 나노웹에 폴리피롤을 코팅함에 있어, 폴리피롤의 화학적 특성상 중합 이후 고체화되는 현상이 있었고, 이로 인해 고체화되지 않는 최대치인 피롤 1g, 증류수 45ml, APS, NDS 5g의 조건하에서 실험을 진행하였다. 폴리피롤의 고체화현상은 계면활성제의 첨가 등을 통해 해소 가능할 것이라 예측하였다. 이에, 후속연구에서는 계면활성제를 이용하여, 폴리피롤 내에 피롤의 함량을 높임으로서 전기전도성의 향상이 가능할 것으로 판단된다.

또한, NDS와 APS의 비율이 3:7인 시료에서 가장 높은 전기전도성을 나타낸 것을 확인하였으나, 후속연구에서는 1:9, 2:8, 3:7, 4:6과 같이 함량비를 더 세분화하여 실험을 진행한다면 최적의 전기전도성을 발현하는 NDS함유량을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

마지막으로, 기반직물에 전도성물질인 폴리피롤을 코팅하는 방법에 있어, 폴리피롤 입자를 균일하고 안정적으로 코팅하기 위해 다양한 방법이 연구되어야 할 것으로 판단된다. PU 나노

웹에 수분산 비산화 그래핀을 코팅한 선행연구에서도 딥(Dip) 코팅 방식과 닥터 블레이드(Doctor blade) 코팅방법 간에 입자의 균일함에서 상당한 차이를 확인할 수 있었던 바, 본 연구에서 적용한 딥 코팅방식 및 닥터블레이드, 브러쉬 페인팅(Brush painting) 방식 등을 통해 각각의 전도성의 차이를 확인함으로써, 코팅방법에 따른 전도성의 차이를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 폴리피롤의 고체화현상의 개선과 폴리피롤 입자의 균일한 코팅 및 전도성물질과 산화제 간의 최적조건을 찾아낸다면 심전도용 전극 등에 활용이 가능한 전도성을 가질 수 있는 전기전도성 텍스타일을 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016R1A2B4014668). 이 논문은 2019년도 BK21플러스 사업(연세대학교 의류환경학과)에 의하여 지원되었음.

#### References

- Cho, G. S., Yang, Y. J., & Sung, M. S. (2008). Bio monitoring smart clothing and development of current situation of E-textile. *Fashion & Textile Research Journal*, 10(1), 1-10.
- Hong, J. H., Kim, N. J., Cha, E. J., & Lee, T. S. (2006). A PDA-based wireless ECG monitoring system for u-healthcare. *Journal of Korean Society of Medical Informatics*, 12(2), 153-160.
- Hong, K. H., Park, J. L., Sul, I. H., Youk, J. H., & Kang, T. J. (2006). Preparation of antimicrobial poly(vinyl alcohol) nanofibers containing silver nanoparticles. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(17), 2468-2474.
- Jang, E. J., & Cho, G. S. (2018). Development of pu nanoweb based electro-conductive textiles and exploration of applicability as a conducting wire for smart clothing. *Fashion & Textile Research Journal*, 20(1), 101-107. doi:10.5805/SFTI.2018.20.1.101
- John, R., & Wallace, G. G. (1991). The use of microelectrodes to probe the electropolymerization mechanism of heterocyclic conducting polymers. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 306(1-2), 157-167. doi:10.1016/0022-0728(91)85228-H
- Kim, I. H. (2017). *Polyurethane nanoweb strain sensors via in situ polymerization of polypyrrole and their application to monitoring joint flexion*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul.
- Lee, K., & Lee, S. S. (2015). Electrospun zinc oxide/poly(vinyl alcohol) nanofibrous membranes: in vitro and wear trial evaluation of antimicrobial activity. *Textile Research Journal*, 85(19), 1999-2008. doi:10.1177/0040517515578325
- Lee, J. S., Lee, W. K., Lim, Y. G., & Park, K. S. (2014). Adhesive polyurethane-based capacitive electrode for patch-type wearable electrocardiogram measurement system. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 35, 203-210.
- Mirafteb, M., Saifullah, A. N., & Çay, A. (2015). Physical stabilisation

- of electrospun poly (vinyl alcohol) nanofibres : Comparative study on methanol and heat-based crosslinking. *Journal of Materials Science*, 50(4), 1943-1957. doi:10.1007/s10853-014-8759-1
- Na, H. Y., Sureshkumar, M., & Lee, S. J. (2015). Preparation and properties of electrically conductive polystyrene / silver nanowire nanocomposites. *Polymer-Korea*, 39(4), 655-661. doi:10.7317/pk.2015.39.4.655
- Oh, T. I., Yoon, S., Kim, T. E., Wi, H., Kim, K. J., Woo, E. J., & Rosalind, J. S. (2013). Nanofiber web textile dry electrodes for long-term biopotential recording. *IEEE Transaction Biomedical Circuits and Systems*, 7(2), 204-211.
- Park, H. W. (2014). Department of R&D management. *Korea High Tech Textile Research Institute*, 11, 11-19.
- Park, K. R., Park, S. H., Hwon, I. H., & Nho, Y. C. (2003). Improvement of heat resistance of poly(vinyl alcohol) hydrogels by radiation crosslinking and heating. *Applied Chemistry*, 7(2), 459-462.
- Park, S. K., & Kim, W. K. (2013). Electronic and smart textiles. *Polymer Science and Technology*, 24(1), 38-44.
- Ribo, J. M., Anglada, M. C., Hernandez, J. M., Zhang, X., Ferrer-Anglada, N., Chaibi, A., & Movaghar, B. (1998). High field conductivity in polypyrrole. *Synthetic Metals*, 97(3), 229-238. doi:10.1016/S0379-6779(98)00134-9
- Singh, R. K., Kumar, A., Agarwal, K., Dwivedi, D., Sood, K. N., & Singh, R. (2012). Influence of binary oxidant (FeCl<sub>3</sub>:APS) ratio on the spectroscopic and microscopic properties of poly (2, 5-dimethoxyaniline). *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2(3), 105. doi:10.4236/ojchem.2012.23014
- Whang, Y. E., Han, J. H., Motobe, T., Watanabe, T., & Miyata, S. (1991). Polypyrroles prepared by chemical oxidative polymerization at different oxidation potentials. *Synthetic Metals*, 45(2), 151-161. doi:10.1016/0379-6779(91)91799-G
- Zhang, Y., Sun, X., Pan, L., Li, H., Sun, Z., Sun, C., & Tay, B. K. (2009). Carbon nanotube-zinc oxide electrode and gel polymer electrolyte for electrochemical supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 480(2), 17-19. doi:10.1016/j.jallcom.2009.01.114

(Received 22 January, 2019; 1st Revised 22 February, 2019;  
2nd Revised 22 March, 2019; 3rd Revised 26 March 2019;  
Accepted 29 March, 2019)