

그래핀/폴리우레탄 나노웹 기반의 스트레인센서 제작 및 호흡측정

Fabrication of Strain Sensor Based on Graphene/Polyurethane Nanoweb and Respiration Measurement

이효철¹ · 조현선² · 이유진³ · 장은지⁴ · 조길수^{5†}

Hyocheol Lee¹ · Hyeon-seon Cho² · Eugene Lee³ · Eunji Jang⁴ · Gilsoo Cho^{5†}

Abstract

The purpose of this study is to develop a strain sensor based on a nanoweb by applying electrical conductivity to a polyurethane nanoweb through the use of Graphene. For this purpose, 1% Graphene ink was pour-coated on a polyurethane nanoweb and post-treated with PDMS (Polydimethylsiloxane) to complete a wearable strain sensor. The surface characteristics of the specimens were evaluated using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM) to check whether the conductive material was well coated on the surface of the specimen. Electrical properties of the specimens were measured by using a multimeter to measure the linear resistance of the specimen and comparing how the line resistance changes when 5% and 10% of the specimens are tensioned, respectively. In order to evaluate the performance of the specimen, the gauge factor was obtained. The evaluation of the clothing was performed by attaching the completed strain sensor to the dummy and measuring the respiration signal according to the tension using MP150 (Biopac system Inc., USA) and Acqknowledge (ver. 4.2, Biopac system Inc., U.S.A.). As a result of the evaluation of the surface characteristics, it was confirmed that all the conductive nanoweb specimen were uniformly coated with the Graphen ink. As a result of measuring the resistance value according to the tensile strength, the specimen G, which was treated with just graphene had the lowest resistance value, the specimen G-H had the highest resistance value, and the change of the line resistance value of the specimen G and the specimen G-H is increased to 5% It is found that it increases steadily. Unlike the resistance value results, specimen G showed a higher gauge rate than specimen G-H. As a result of evaluation of the actual clothes, the strain sensor made using the specimen G-H measured the stable peak value and obtained a signal of good quality. Therefore, we confirmed that the polyurethane nanoweb treated with Graphene ink plays a role as a breathing sensor.

Key words: Graphene, Polyurethane Nanoweb, Smart Textile, Strain Sensor, Respiration Rate

※ 이 논문은 2019년도 BK21플러스 사업(연세대학교 의류환경학과)에 의하여 지원되었음.

※ 이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016R1A2B4014668).

¹ 이효철: 연세대학교 의류환경학과 석사과정

² 조현선: 연세대학교 의류환경학과 석사과정

³ 이유진: 연세대학교 의류환경학과 박사 후 연구원

⁴ 장은지: 연세대학교 의류환경학과 박사과정

^{5†} (교신저자) 조길수: 연세대학교 의류환경학과 교수 / E-mail : gscho@yonsei.ac.kr / TEL : 02-2123-3104

요약

본 연구의 목적은 그래핀(Graphene)을 사용하여 폴리우레탄 나노웹(Polyurethane Nanoweb)에 전기전도성을 부여하고, 이를 이용하여 나노웹 기반의 스트레인센서(Strain Sensor)를 개발하는 것이다. 이를 위해 1% 그래핀 잉크를 폴리우레탄 나노웹에 푸어코팅(Pour-coating)한 후 PDMS(Polydimethylsiloxane)로 후처리를 하여 착용 가능한 스트레인센서를 완성하였다. 시료 표면에 전도성 물질이 잘 코팅되었는지 확인하기 위해 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM)를 이용하여 시료의 표면 특성을 평가하였다. 시료의 전기적 특성 평가는 멀티미터(Multimeter)를 사용하여 시료의 선저항(Linear Resistance)을 측정하고, 시료를 각각 5%, 10% 인장하였을 때 선저항이 어떻게 변하는지 비교하였다. 또한 시료의 성능을 평가하고자 게이지율(Gauge Factor)을 구하였다. 착의평가 실험은 완성된 스트레인센서를 더미에 착용시킨 후 MP150(Biopac system Inc., U.S.A.)과 Acqknowledge(ver. 4.2, Biopac system Inc., U.S.A.)를 사용해 인장에 따른 호흡신호를 측정하였다. 표면 특성을 평가한 결과, 모든 전도성 나노웹 시료들이 그래핀 잉크로 균일하게 코팅되어있음을 확인하였다. 인장에 따른 저항값 측정 결과, 그래핀을 처리한 시료인 시료 G가 가장 낮은 저항값을, 그래핀을 처리한 후 열처리를 한 시료인 시료 G-H가 가장 높은 저항값을 가졌고, 시료 G와 시료 G-H의 경우 길이가 5%, 10%로 늘어남에도 선저항값의 변화가 안정적으로 증가하는 것으로 나타났다. 저항값 결과와는 달리, 시료 G가 시료 G-H보다 더 높은 게이지율을 보였다. 실제로 착의평가 결과, 시료 G-H를 이용해 만든 스트레인센서가 안정된 Peak값으로 측정되어 좋은 품질의 신호를 얻었다. 그러므로 본 연구를 통해 그래핀 잉크를 처리한 폴리우레탄 나노웹이 호흡 센서로서의 역할을 충분히 수행하는 것을 확인하였다.

주제어: 그래핀, 폴리우레탄 나노웹, 스마트텍스타일, 스트레인센서, 호흡률

1. 서론

제4차 산업혁명의 바람이 불어오면서 ICT 산업의 기술혁신이 일어남에 따라 주변 환경을 감지하고 반응하는 스마트의류 시스템이 주목 받고 있다(Lee et al., 2017). 특히 초연결사회에 들어서면서 사물인터넷(Internet of Things, IoTs)의 출현으로 웨어러블 전기 소자(Wearable electronics)에 대한 수요가 급증함에 따라 스마트의류는 유연하고 착용 가능한 형태로 발전하고 있다. 스마트의류(Smart clothing)는 각종 생체 신호나 활동 등을 인체에 가장 밀접한 상태로 측정할 수 있으며, 측정된 정보에 대한 확인이 즉각적으로 가능하다. 이러한 이유로 미래의 일상에서 사용가능성이 높은 것으로 예측되어 주목받고 있으며, 착용 시 불편함과 이질감을 최소화하여 개발하는 것이 중요하다.

특히, 스마트텍스타일 센서(Smart textile sensor)는 스마트의류 분야에서 주목받고 있는 분야 중 하나로, 의류소재에 전기전도성이 부여된 스마트텍스타일인 전기전도성소재(Electronic Textiles, E-textiles)를 이용하여, 심전도나 호흡과 같은 생리신호를 측정하는데 주로 사용되고 있다(Kim & Cho, 2018). 이에, 이러한 시대적 흐름에 발맞추어 생리신호를 측정할 수 있으

면서 동시에 착용가능한 형태인 스마트텍스타일 센서를 개발하기 위한 연구가 필요하다. 텍스타일을 센서화하기 위해서는 먼저 텍스타일에 전기전도성을 부여해야 한다. 전기전도성을 부여하기 위해 사용할 수 있는 전도성 물질로는 크게 금속계 물질과 비금속계 물질로 나뉘며, 비금속계 물질은 대표적으로 그래핀(Graphene), 탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNTs) 등과 같은 탄소동소체가 있다. 그래핀(Graphene)은 탄소 원자들이 육각형으로 결합해 있는 벌집 형태의 탄소 동소체로, 높은 전기전도성, 우수한 유연성, 화학적 안정성을 가진다. 비산화 그래핀(Non-oxidized Graphene)은 비산화 박리(Non-oxidative exfoliation)법을 이용하여 제작한 물질로, 산화그래핀과는 다르게 그래핀 본연의 특성을 최대한 유지한다는 장점을 갖는다(Jang et al., 2017).

한편, 초고령 사회에서 노인은 뉴실버 세대(New silver generation)나 액티브 시니어(Active senior)와 같이 새로운 소비주체로 떠오르고 있다. 이들은 과거의 노인과는 달리 다양한 라이프 스타일을 즐기며 적극적으로 삶을 살아가기 위해 자신들의 건강과 삶의 질 향상에 대한 관심이 커지고 있다. 노인의 흔한 질병중 하나로, 수면무호흡증을 앓고 있어 잠이 들기 힘들거

나 수면 유지에 어려움을 느끼며, 심각한 불면증을 겪고 있다. 수면무호흡증(Sleep apnea)은 호흡이 10초 이상 정지되는 상태가 1시간당 5회 이상 나타났을 경우로, 진단 시 호흡의 수가 중요한 부분을 차지한다. 또한 수면무호흡증은 진단 이후에도 환자의 장기적인 관찰이 요구되는데, 일회성으로 관찰하는 기존의 검사 방식에서 탈피하여 환자의 수면 패턴을 장기적으로 관찰하여 수면 중 호흡수 등에 대한 빅데이터(Big data)를 이용한 분석이 필요한 실정이다. 호흡을 모니터링 하기 위해 주로 사용되는 텍스타일 기반의 센서로는 가속도 센서(Accelerometer), 압력 센서(Pressure sensor), 스트레인센서(Strain sensor) 등이 있다. 스트레인센서란, 재료의 길이가 변형(인장)됨에 따라 전기 저항이 변하는 원리를 적용한 센서로, 이를 활용하여 동작, 움직임, 호흡 등과 관련한 생체신호를 측정할 수 있다. 스트레인센서 개발에 있어서, 게이지율(Gauge Factor, GF)은 센서의 성능을 평가하기 위해 사용되는 지표 중 하나로(Atalay et al., 2013), 센서의 민감도(Sensitivity)에 관한 정보를 얻는데 매우 중요한 파라미터이다(Roh, 2016). 선행연구에서는 수면 중 호흡을 위한 가슴과 배의 운동을 측정할 수 있는 가속도 센서에 관한 연구(Yoon et al., 2010), 수면자세와 호흡신호를 측정하기 위한 압력 센서에 관한 연구(Jung et al., 2016) 등이 있었으나, 본 연구에서는 나노웹 기반의 스트레인센서를 이용하여 호흡신호를 관찰하고자 한다. 나노웹(Nanoweb)이란, 지름이 수십에서 수백 나노미터(1나노미터=10억분의 1m)에 불과한 초극세실로 만든 텍스타일로, 미세다공성, 유연성, 높은 표면적 등의 특성을 가지고 있다. 특히 질량 대비 매우 높은 표면적을 가지기 때문에 코팅방법에 이용 시 전기전도성을 향상시킨다(Youn & Lee, 2010).

따라서, 본 연구에서는 비산화그래핀으로 전도성이 부여된 폴리우레탄(Polyurethane, PU) 나노웹을 이용하여 텍스타일 기반의 스트레인센서를 개발하고자 한다. 이를 위한 본 연구의 세부목표는 첫째, 시료의 표면 특성과 전기적 특성을 평가한다. 둘째, 시료의 인장률에 따른 게이지율(Gauge Factor, GF) 변화를 비교한다. 셋째, 시료를 이용하여 나노웹 기반의 스트레인센서를 제작한다. 마지막으로, 더미(Dummy)를 대상으로 인장률에 따른 신호를 측정한다.

2. 연구방법

2.1. 재료 및 시료

본 연구에 사용된 재료는 1 wt% 그래핀 잉크(Mexplorer Co., Republic of Korea)와 PU 나노웹(PU Nanoweb, Pardam, s.r.o., Czech Republic)으로, PU 나노웹의 자세한 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of the polyurethane nanoweb

Specimen	Fiber diameters(nm)	Thickness (μm)	Weight (g/m ²)
PU Nanoweb	500-1000	20	13

텍스타일에 전도성을 부여하기 위하여, 1 wt% 그래핀 잉크를 이용하여 PU 나노웹을 푸어코팅법(Pour-coating method)으로 코팅하였다. 그런 다음, 실온(21℃)에서 24시간 동안 건조시켜 시료 G를 제작하였다. 1 wt% 그래핀 잉크를 이용하여 PU 나노웹을 푸어코팅법으로 코팅한 뒤, 50℃의 진공건조기(Vacuum Oven), JEIO Tech.co., LTD)에서 1시간 동안 건조시켜 시료 G-H를 제작하였다. 선행연구(Lee & Cho, 2018)에 따르면 50℃의 진공건조기에서 건조시켰을 때 시료표면에 전도성 입자들이 네트워크를 이루게 되어 저항값이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 1 wt% 그래핀 잉크를 이용하여 PU 나노웹을 코팅하기 전에 나노웹을 에탄올에 담근 후 그래핀 잉크를 이용하여 푸어코팅 한 뒤, 실온(21℃)에서 24시간 동안 건조시켜 시료 G-E를 완성하였다. 선행연구(Ahn et al., 2012)에 따르면 에탄올 전처리 시 전도성 물질이 시료에 균일하게 스며들었음을 확인할 수 있었다. 이렇게 전도성이 부여된 시료 3종의 내구성을 향상시키기 위하여 시료 모두 PDMS(Polydimethylsiloxane) precursor(10:1 mixture of liquid prepolymer) part-A(Sylgard 184A, Dow Corning Company)와 part-B(Sylgard 184B, Dow Corning Company)를 이용하여 시료를 코팅시켰다. 선행연구(Kim & Cho, 2018)에 따르면 실제로 PDMS 처리후의 내구성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

전도성이 부여된 3 종의 시료를 사용하여 웨어러블(Wearable) 형태의 스트레인센서를 제작하기 위해, 전

도성이 부여된 2 cm x 10 cm 크기의 시료들의 양쪽 끝에 스냅버튼을 부착하고 PDMS로 딥코팅(dip-coating)을 15분 동안 실시한 후 진공오븐에 80°C에서 두시간 동안 열처리를 하여 최종적으로 G, G-H, G-E 세가지 시료의 스트레인센서를 완성하였다. 이를 이용하여 텍스타일에 전도성을 부여한 시료는 총 3종이다. 전도성 시료를 제작하는 과정은 Fig. 1과 같다.

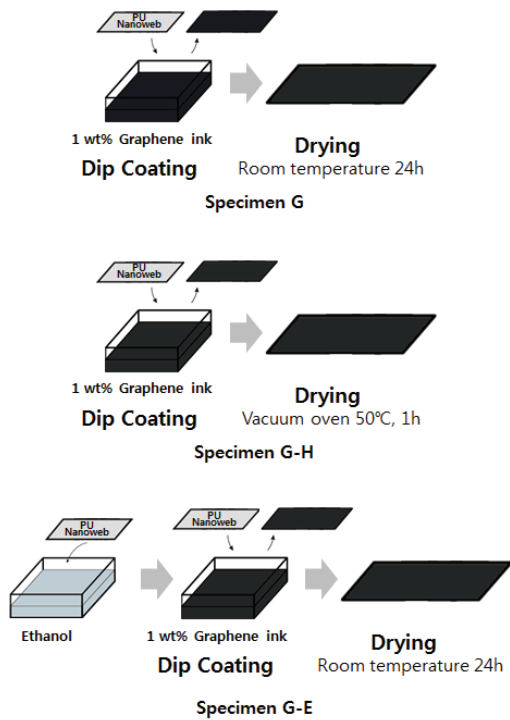


Fig. 1. Process of conductive specimen fabrication

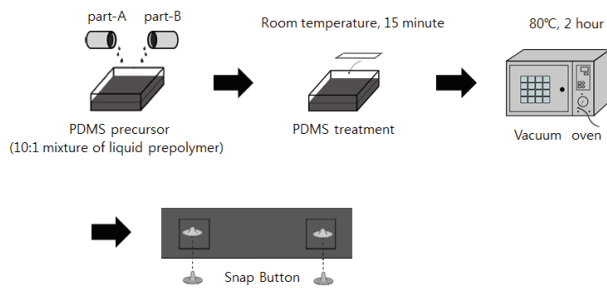


Fig. 2. Process of wearable strain sensor fabrication

2.2. 시료의 특성 평가

시료 표면에 전도성 물질이 잘 코팅되었는지 확인하고자 전도성 시료를 PU 나노웹 미처리 시료와 비교하기 위해서 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-6701F JEOL Ltd)를 이용하여 표면 특성을 평가

한다. 시료의 전기전도도를 평가하고자, 멀티미터(Multimeter, DONGHWA DM 1010)를 사용해 선저항을 측정한다. 또한 시료를 인장함에 따른 전기전도도의 변화를 살펴보기 위하여 시료를 각각 5%, 10% 인장하였을 때의 전기저항을 측정하고 이를 비교한다. 이때 인장률 5%와 10%는 선행연구(Kim et al., 2004)를 토대로 설정하였다. 시료를 이용하여 센서로 제작하기에 앞서 그 성능을 평가하고자 게이지율을 아래와 같은 식을 이용하여 게이지율을 구한다.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

R : 저항

ρ : 전기전도도

A : 단면적

L : 길이

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{\Delta R}{\epsilon R_0}$$

GF : 게이지율

L_0 : 최초 길이

ΔL : 길이 변화

R_0 : 최초 저항

ΔR : 저항 변화

ϵ (strain value) : 섬유에 인장 방향으로 외력이 가해져서 최초 길이 L_0 인 섬유가 ΔL 만큼 변할 때의 길이변형을 $\Delta L/L_0$

2.3. 척의 평가

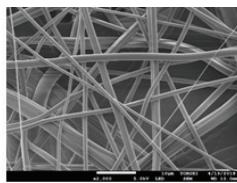
전도성이 부여된 시료를 가지고 호흡수를 측정하기 위하여, 더미를 대상으로 MP150 (Biopac system Inc., U.S.A.)과 Acqknowledge (ver. 4.2, Biopac system Inc., U.S.A.)를 이용하여 인장에 따른 호흡신호를 측정한다. 호흡신호를 측정하기 위하여 선행연구(Hwang et al., 2018)를 토대로 흉부와 유사한 형태를 가진 최소 둘레 80 cm 최대둘레 85 cm의 더미에 센서를 부착시킨 후 더미를 1분간 0.5 cm, 1 cm 반복적으로 개폐하여 신호를 획득하였다. 또한 호흡센서로서의 정확한

신호와 재현성을 평가하기 위해 0.5 Hz 와 0.05 Hz의 주기로 더미를 0.5 cm 반복적으로 1분간 개폐하여 호흡 시뮬레이션을 통한 신호품질을 비교하였다.

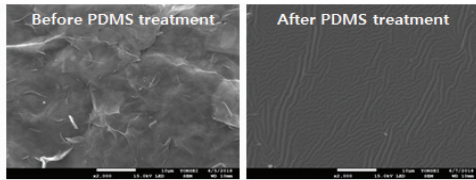
3. 연구 결과

3.1. 전도성 시료의 표면특성

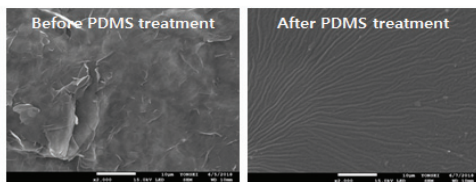
Fig. 3과 같이 표면 특성을 평가하고자 3가지 시료들을 PDMS로 처리하기 전과 후의 FE-SEM 이미지를 분석한 결과, PDMS 코팅의 유무와 상관없이 모든 전도성 나노웹 시료들이 그래핀 잉크로 균일하게 코팅되어있음을 확인할 수 있다.



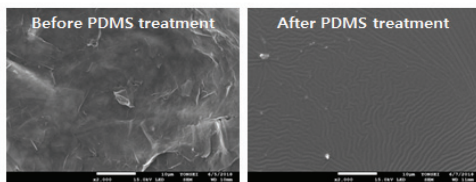
Untreated (PU Nanoweb)



Specimen G



Specimen G-H



Specimen G-E

Fig. 3. SEM Image of specimen(x2,000)

3.2. 인장에 따른 저항값 측정결과

Fig. 4와 같이 전기적 특성을 평가하고자 3가지 시료들의 선저항값을 측정한 결과, 전도성이 부여된 2

cm x 10 cm 크기의 시료 G, G-H, G-E의 선저항 값은 각각 9.4Ω, 275Ω, 9.7Ω로 나타났다. 이는 시료 G가 실온에서 24시간 동안 균일하게 코팅되어 시료의 저항값이 낮은 것으로 생각된다. 시료 G-E의 경우 에탄올 전처리를 하여 나노웹 시료의 표면에너지를 낮추어 그래핀 잉크가 더 잘 스며들어 낮은 저항값을 가졌으나(Lee & Cho, 2018), 시료G의 저항값보다 0.3Ω 정도 높게 나타났다. 따라서 시료 G가 가장 낮은 저항값을, 시료 G-H가 가장 높은 저항값을 가졌다.

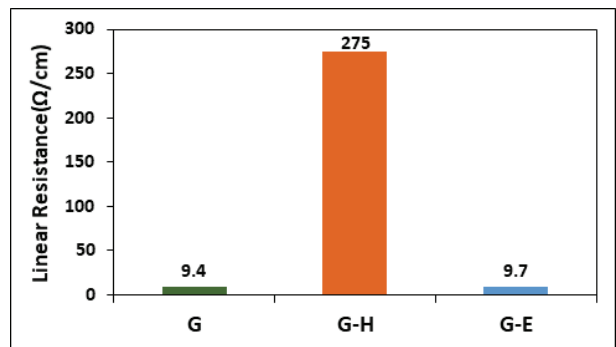


Fig. 4. Linear resistance of specimen

3.3. 인장에 따른 전기저항의 변화

Fig. 5와 같이 인장률(5%, 10%)에 따라 3가지 시료들의 선저항값이 어떻게 변하는지 평가하였다. 그 결과, 시료 G는 5% 인장 시와 10% 인장 시 각각 20.9Ω, 223.8Ω, 시료 G-H는 각각 445.4Ω, 887.6Ω, 시료 G-E는 각각 711Ω, 4548.4Ω로 나타나, 시료를 5%, 10% 인장하였을 때 시료 G-E의 경우 다른 두 시료들과는 달리 저항값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 시료를 인장함에 따라 크랙(Crack) 현상이 나타나 왜곡된 저

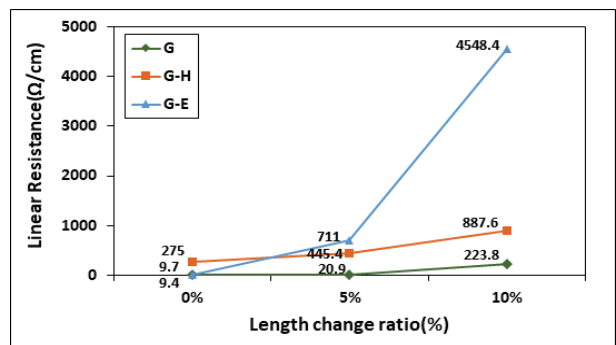


Fig. 5. Changes in linear electrical resistance as the length change ratio of specimen

항값을 갖게 된 것으로 사료된다. 그러나 시료 G와 시료 G-H의 경우 길이가 5%, 10%로 늘어남에도 선저항값의 변화가 안정적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 시료를 5%, 10%로 인장 시 시료 G가 가장 낮은 저항값을, 시료 G-E가 가장 높은 저항값을 가졌다.

3.4. 게이지율(Gauge Factor, GF)

Table 2와 Fig. 6과 같이 인장률(5%, 10%)에 따라 3가지 시료들의 게이지율이 어떻게 변하는지 평가하였다. 그 결과, 시료 G의 게이지율은 5%와 10% 인장 시 각각 1.17, 20.74, 시료 G-H의 게이지율은 각각 0.59, 2.03으로 나타났다. 그러나 시료 G-E의 경우, 시료를 인장함에 따라 크랙(Crack) 현상이 나타나 게이지율 역시 왜곡된 값을 보였다(Table 2). 시료 G와 시료 G-H의 경우 저항값 결과와는 달리, 시료 G가 시료 G-H보다 더 높은 게이지율을 보였으며, 특히 시료를 10% 인장 시 시료 G의 게이지율이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 시료 G를 10% 인장 시 게이지율의 급격한 증가로 인하여 스트레인센서의 민감도가 높을 것으로 예상된다.

Table 2. Gauge factor of specimen

Specimen	Length Change Ratio(%)	
	5	10
G	1.17	20.74
G-H	0.59	2.03
G-E	68.86	425.37

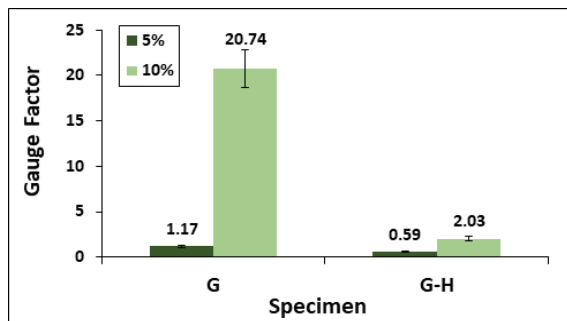


Fig. 6. Gauge factor of specimen

3.5. 착의 평가

Fig. 7과 같이 인장률(5%, 10%)에 따라 3가지 시료

들의 호흡신호 데이터가 어떻게 변하는지 측정하였다. 그 결과, 5%, 10% 인장 시 모든 시료들이 안정된

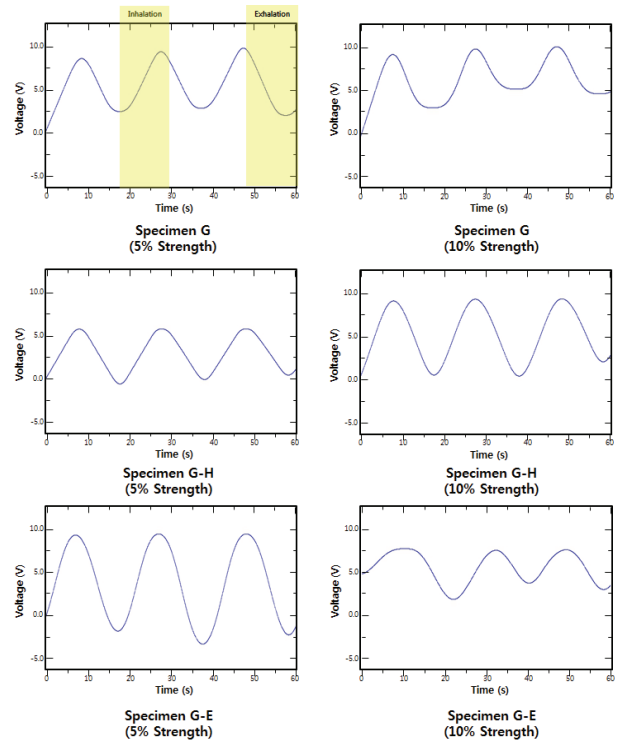


Fig. 7. Comparison of respiratory signals as the length change ratio of specimen(0.05 Hz)

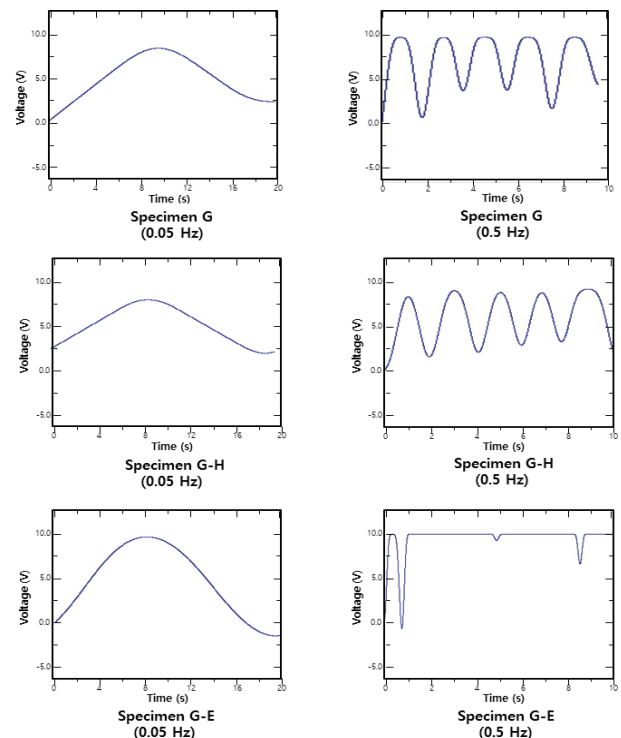


Fig. 8. Comparison of respiratory signals as Hertz of specimen(5% length)

Peak값을 보였다. 선행연구(Yoo et al., 2010)에 따라 들숨과 날숨에 해당하는 파형이 나타났다(Fig. 7). 특히 시료 G-H의 경우 신호 데이터에서 잡음(Noise)이 관찰되지 않았으며 인장률과 상관없이 가장 안정된 Peak값을 보였다. 이는 시료 G-H의 게이지율이 인장률과 상관없이 2 이내의 값을 보였기 때문이라 사료된다. 선행연구(Roh, 2016)에 따르면, 변형율이 수십 %에 달하는 매우 큰 변형을 측정하는 텍스타일 기반 스트레인센서와는 달리 호흡신호와 같이 작은 변형을 측정하는 스트레인센서의 게이지율은 2 이하가 적합하다. 그러나 시료 G의 경우 10% 인장 시 게이지율이 급격하게 증가하게 됨에 따라서 호흡신호 데이터에서 잡음이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 인장률과 상관없이 높은 게이지율을 보였던 시료 G-E의 경우 신호 데이터에서 심한 잡음을 보이는 것으로 나타났다. 호흡센서로서의 정확한 신호와 재현성을 평가하기 위해 0.5 Hz와 0.05 Hz의 신호품질을 평가한 결과, 5% 인장 시 시료 G-H가 가장 안정된 품질을 나타내었다. 시료 G-E의 경우 높은 게이지율로 인하여 호흡신호가 나타나지 않았다. 세가지 시료의 10% 인장 시 게이지율이 높기 때문에 정확한 호흡신호를 측정할 수 없었다. 따라서 시료 G-H를 이용해 만든 스트레인센서가 정확한 호흡신호를 측정하기에 가장 적합한 것을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 폴리우레탄 나노웹에 전기전도성을 부여하기 위해 그래핀 잉크(Graphene ink)를 코팅한 폴리우레탄 나노웹에 PDMS를 코팅하여 각각의 스트레인센서를 제작하고 호흡신호를 측정하였다. 그 결과 시료 G-H가 선저항값이 가장 높았으나, 인장률에 따른 게이지율은 가장 낮은 것으로 나타났다. 특히 인장률과 상관없이 시료 G-H의 게이지율은 2 이내의 값을 보였다. 이는 호흡신호 데이터의 품질에 직접적인 영향을 미쳤으며, 시료 G-H로 측정된 호흡신호 데이터에서는 잡음(Noise)이 거의 관찰되지 않았고 우수한 신호품질과 가장 안정된 Peak값을 보였다. 따라서 본 연구를 통해 그래핀 잉크를 처리한 폴리우레탄 나노

웹이 호흡 센서로서의 역할을 충분히 수행하는 것을 확인하였다.

REFERENCES

- Ahn, Y. J., Yoon, S., & Kim, K. J. (2012). Preparation of conductive nanoweb through electrospinning Followed by electroless silver-plating and its application as dry-type electrode for ECG measurement. *Textile Science and Engineering*, 49(1), 47-55.
- Atalay, O., Kennon, W. R., & Husain, M. D. (2013). Textile-based weft knitted strain sensors: Effect of fabric parameters on sensor properties. *Sensors*, 13(8), 11114-11127.
- Bae, S. H., Lee, Y., Sharma, B. K., Lee, H. J., Kim, J. H., & Ahn, J. H. (2013). Graphene-based transparent strain sensor. *Carbon*, 51, 236-242.
- Hwang, S. J., Jung, Y. W., & Lee, J. H. (2018). A study on the textile sensor applied to smart wear for monitoring meditation breathing. *Science of Emotion & Sensibility*, 21(1), 83-90.
- Kim, K. A., Lee, T. S., & Cha, E. J. (2004). Characteristics of conductive rubber for monitoring lung volume change. *Journal of Korea Intellectual Patent Society*, 6(4), 125-128.
- Kim, I., & Cho, G. (2018). Polyurethane nanofiber strain sensors via in situ polymerization of polypyrrole and application to monitoring joint flexion. *Smart Materials and Structures*, 27(7), 075006.
- Jang, E., & Cho, G. (2018). Development of PU nanoweb based electroconductive textiles and exploration of applicability as a transmission line for smart clothing. *Fashion & Textile Research Journal*, 20(1), 101-107.
- Jang, E., Kim, I., Lee, E., & Cho, G. (2017). Exploring requirements of the smart textiles for bio-signal measurement based on smart watch user sensibility. *Science of Emotion & Sensibility*, 20(4), 89-100.
- Jung, H. C., Moon, J. H., Baek, D. H., Lee, J. H., Choi, Y. Y., Hong, J. S., & Lee, S. H. (2012). CNT/PDMS composite flexible dry electrodes for long-term ECG monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(5), 1472-1479.

- Jung, H. Y., Wang, C. W., Ho, J. G., Na, Y. J., Lee, H. L., & Min, S. D. (2016). Development of multi-functional sleep monitoring system based on textile pressure sensor. *In Proceeding of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 24-26.
- Lee, E., & Cho, G. (2018). Polyurethane nanoweb-based textile sensors treated with single-walled carbon nanotubes and silver nanowire. *Textile Research Journal*, 0040517518805382.
- Lee, E., Kim, I., Liu, H., & Cho, G. (2017). Exploration of AgNW/PU nanoweb as ECG textile electrodes and comparison with Ag/AgCl electrodes. *Fibers and Polymers*, 18(9), 1749-1753.
- Lee, Y., Chang, M. S., Lee, H. W., & Kwak, H. W. (2011). Attention deficits and characteristics of polysomnograms in patients with obstructive sleep apnea. *The Korean Journal of Health Psychology*, 16(3), 557-575.
- Roh, J. S. (2016). Wearable textile strain sensors. *Fashion & Textile Research Journal*, 18(6), 733-745.
- Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D. N., & Hata, K. (2011). A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection. *Nature Nanotechnology*, 6(5), 296.
- Youn, B., & Lee, S. (2010). Comparison of mechanical properties of electrospun nanofiber web layered systems and conventional breathable waterproof fabrics. *Science of Emotion & Sensibility*, 13(2), 391-402.
- Yoon, J. M., Lim, C. Y., & Kim, K. H. (2010). A study of baby sleeping positions sensing and safety band using an accelerometer. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 15(6), 11-18.
- Yoo, W. J., Jang, K. W., Heo, J. Y., Moon, J. S., Park, J. Y., & Lee, B. S. (2010). Development of respiration sensors using plastic optical fiber for respiratory monitoring inside MRI system. *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(3), 235-239.
- DOI: 10.3807/JOSK.2010.14.3.235
- 원고접수: 2018.12.03
수정접수: 2019.01.07
게재확정: 2019.01.30