

소프트 텍스타일 굽힘 각 센서를 이용한 각도 추정 시스템 개발

Development of an Angle Estimation System Using a Soft Textile Bending Angle Sensor

양승아¹ · 김상운² · 김주용^{3†}

Seung-Ah Yang¹ · Sang-Un Kim² · Joo-Yong Kim^{3†}

Abstract

This study aimed to develop a soft fabric-based elbow-bending angle sensor that can replace conventional hard-type inertial sensors and a system for estimating bending angles using it. To enhance comfort during exercise, this study treated four fabrics (Bergamo, E-band, span cushion, and polyester) by single-walled carbon nanotube dip coating to create conductive textiles. Subsequently, one fabric was selected based on performance evaluations, and an elbow flexion angle sensor was fabricated. Gauge factor, hysteresis, and sensing range were employed as performance evaluation metrics. The data obtained using the fabricated sensor showed different trends in sensor values for the changes in the angle during bending and extending movements. Because of this divergence, the two movements were separated, and this constituted the one-step process. In the two-step process, multilayer perceptron (MLP) was employed to handle the complex nonlinear relationships and achieve high data accuracy. Based on the results of this study, we anticipate effective utilization in various smart wearable and healthcare domains. Consequently, a soft-fabric bending angle sensor was developed, and using MLP, nonlinear relationships can be addressed, enabling angle estimation. Based on the results of this study, we anticipate the effective utilization of the developed system in smart wearables and healthcare.

Key words: Bending Angle Textile Sensors, Smart Wearable Healthcare, CNT Dip-Coating, Multilayer Perceptron, 2-Steps Nonlinear Regression

요약

본 연구의 목적은 기존의 하드 타입의 관성 센서를 대체할 수 있는 소프트 원단 기반 팔꿈치 굽힘 각 센서를 개발하고, 이를 이용하여 굽힘 각도를 추정하는 시스템을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 비교 선정을 위하여 Bergamo, E-band, Span cushion, Polyester의 서로 다른 역학적 특성을 가진 4종류 원단에 SWCNT (Single-Walled Carbon Nanotubes) 함침을 통해 전도성을 부여한 후 성능 평가를 통하여 하나의 원단을 선정하여 팔꿈치 굽힘 각 센서로 제작하였다. 성능을 평가하는 지표로 게이지율(Gauge factor), 이력현상(Hysteresis) 및 센싱 범위를 사용하였다. 제작된 센서를 통해 얻은 데이터는 **bending** 동작에서의 각도에 대한 센서 출력값의 변화와 **extending** 동작에서의 각도에 대한 센서 출력값의 변화가 다른 경향을 갖고 있기 때문에 두 가지 동작을 나누는 것을 1-step으로 하였다. 2-step으로, 데이터의 복잡한 비선형 관계를 처리하고 높은 데이터 정확도를 달성하기 위해 MLP (Multi-Layer Perceptron)를 활용하였다. 따라서 소프트 텍스타일 굽힘 센서를 제작하였고, MLP를 통해 비선형 관계를 처리하고 각도 추정이 가능해졌다. 본 연구 결과를 기반으로 다양한 스마트 웨어러블 및 헬스케어 분야에서 효과적으로 활용되기를 기대한다.

주제어: 굽힘 각 텍스타일 센서, 스마트 웨어러블 헬스케어, CNT 함침, 다층 퍼셉트론, 2단계 비선형 회귀

¹ 양승아: 숭실대학교 신소재공학과 석사과정

² 김상운: 숭실대학교 스마트웨어러블공학과 박사과정

^{3†} (교신저자) 김주용: 숭실대학교 신소재공학과 교수 / E-mail: jykim@ssu.ac.kr / TEL: 02-820-0631

1. 서론

최근 헬스케어 대한 관심이 증가하고, 본인의 건강 관리를 위해 여러 운동에 대한 욕구가 커지고 있다. 이러한 욕구가 증가함에 따라 다양한 연구들이 근육 활동을 측정하여 부상을 방지하고 훈련 방법을 개선하는데 중점을 두고 있다. 따라서 웨어러블 디바이스의 수요도 증가하고 있는데 그 중 소프트한 스마트 웨어러블 디바이스는 부드럽고 유연한 소재로 만들어져 사용자가 편안하게 착용할 수 있으며, 운동 및 활동 중에서 효과적으로 움직임을 따라갈 수 있어 사용자의 활동을 모니터링하고 데이터를 수집하는 데 유용하다. 소프트한 스마트 웨어러블 제품들은 제품에 직물을 기반으로 한 스트레인 센서, 압력 센서, 터치센서 등과 결합한 형태로 데이터를 감지하고 분석할 수 있다. 특히 스트레인 센서는 외부 자극을 전기 신호로 변환하는 센서로 움직임을 감지하는 데 사용된다. 스트레인 센서를 이용하여 몸의 움직임을 모니터링하는 연구도 진행되고 있다(Kang et al., 2006). 소프트한 직물을 기반으로 제작된 스트레인 센서는 부드럽고 견고한 변형 센서로 사용할 수 있어 인간 움직임을 모니터링하는 데 적합하다. 또한 착용감이 더욱 향상되고, 편리해지며 다양한 기능을 탑재할 수 있어 기존의 스마트 웨어러블 디바이스와는 차별화될 수 있다. 관련된 연구로는 텍스타일 스트레인 센서에 마이크로니들을 이용하여 전도성 입자의 침투력을 향상시킨 연구(Hayeong et al., 2022), 생체 신호 측정 압력 및 인장 직물 센서 전극용 자수가 가능한 전도사의 물성을 분석한 연구(Kim et al., 2021), 프로그래밍 노이즈 필터링 방법에 의한 저항 방식 E-밴드 텍스타일 스트레인 센서의 신호해석에 관한 연구(Kim et al., 2022) 등이 있다.

팔을 사용하는 다양한 운동에서 팔꿈치의 각도는 중요한 요소로 작용한다. 특히 테니스, 야구, 수영, 농구 등의 운동 및 피트니스에서 팔꿈치의 각도를 올바르게 유지하는 것은 효율적으로 운동을 할 수 있게 하며, 부상 예방에도 큰 도움이 될 수 있게 한다. 관련된 연구(San Juan et al., 2015)에서도 팔굽혀 펴기 운동 시 팔꿈치 각도의 중요성에 대해 강조할 정도로 팔꿈치 각도

는 많은 운동에서 부상 예방에 대한 중요한 요소로 작용하는 것을 볼 수 있다.

다양한 기존 논문에서 가속도계, 자이로스코프, 자기계의 세 가지 주요 관성 센서로 구성된 IMU (Inertial Measurement Unit, 관성측정장치)를 사용하여 근육의 움직임을 측정하는 것을 알 수 있다(Koo et al., 2023; Höflinger et al., 2013; Leardini et al., 2014). 하지만 IMU는 딱딱하고 부피가 커 운동에 사용 시 불편을 겪고, 착용감 저하 등의 단점을 가지고 있다. 스트레인 센서는 소프트하고 몸에 밀착되어 착용감을 향상시켜 이러한 IMU의 단점을 보완할 수 있다.

스트레인 센서는 히스테리시스가 발생할 수 있고, 팔꿈치 모양 혹은 근육 모양 등에 의해 센서에 압력이 발생하고 이에 따라 센서의 측정값에 영향을 준다. 따라서 각도에 따라 선형적인 데이터를 얻기 어렵고 팔꿈치를 굽히는 동작과 펴는 동작에 대한 센서의 데이터 경향이 다르다는 특징을 가지고 있다. 따라서 복잡한 비선형 관계를 처리하고 높은 데이터 정확도를 달성하기 위해 인공 신경망 유형인 Multi-Layer Perceptron (MLP)을 활용하였다(Najah et al., 2011).

MLP는 여러 층의 퍼셉트론으로 구성되며, 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 은닉층으로 구성된다. 이는 뇌의 뉴런 동작을 모방하는 수학적 모델이다(Taud & Mas, 2018). 각 퍼셉트론은 입력의 가중합을 계산하고 활성화 함수를 적용하여 출력을 생성한다. 한 층의 퍼셉트론에서 나온 출력은 다음 층에 입력이 되며, 이 과정은 최종 출력이 생성될 때까지 반복된다. MLP는 입력-출력 쌍을 사용하여 학습하며, 퍼셉트론 간의 가중치를 조절하여 예측과 실제 출력 간의 오차를 최소화할 수 있다(Ergezinger & Thomsen, 1995). 따라서 MLP를 사용할 경우 복잡한 비선형 데이터들에 대한 피팅 알고리즘을 생성할 수 있다. 이러한 이점들로 인해 스트레인 센서를 적용한 스마트 웨어러블 디바이스와 인공지능이 결합된 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 스마트 웨어러블 디바이스의 대표적인 스트레인 센서를 소프트한 직물을 기반으로 제작하기 위해 4가지의 직물을 전도성 센서로 제작한 뒤 물성을 분석하였다. UTM (universal testing machine)을 이용하

여 인장 반복 실험을 진행하였고, 하나의 직물을 선정하여 센서로 사용하였다. 그리고 IMU를 통해 팔꿈치의 굽힘 각에 따른 저항 데이터를 얻어 분석한 뒤, MLP를 이용하여 팔꿈치 각도 예측을 진행하여 소프트 텍스타일 굽힘 센서를 제작하였고, 팔꿈치 각도를 추정하는 시스템을 개발하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 팔꿈치 굽힘 각 측정 원리

전도성 직물은 다양하게 활용되는데 이를 위해 직물에 전도성을 부여하는 연구가 많이 이루어지고 있다. SWCNT (Single-wall carbon nanotube)는 우수한 전기 전도성, 높은 기계적 강도 및 경량의 특성을 가져 전도성 입자로 사용되는 물질이다. 전도성 직물을 만드는 방법은 직물에 전도성 입자 분산액을 함침하는 방식이 있다. Jang et al.(2023)에서는 플라즈마 표면개질을 이용하여 재생PET사의 물성의 한계를 극복하고 텍스타일 센서로 활용하기 위해 SWCNT를 함침하는 연구가 이루어지고 있다. Chun et al.(2021)은 SWCNT를 함침하여 최적의 인장 직물 센서를 선정하여 손목터널증후군을 예방하기 위한 스마트 장갑을 개발하는 연구가 진행되고 있다. 이처럼 함침 공정은 간단하고 효율적인 공정이기 때문에 많이 활용되고 있다.

소프트한 원단 기반 스트레인 센서의 원리는 압저항 효과(Piezo-resistive effect)에 의해 설명된다. 외력이 가해졌을 때 초기 길이(L_0)가 증가(ΔL)하면서 동시에 단면적(A)이 감소하거나 초기 길이가 감소하면서 동시에 단면적(A)이 증가하게 된다. 따라서 외력에 의해 센

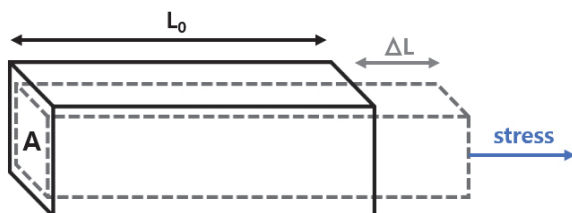


Fig. 1. Elbow bending angle measurement principle (Roh, 2016)

서의 길이가 증가하거나 감소하면서 저항이 바뀌는 압저항 효과가 발생하여 저항의 변화를 측정할 수 있게 되는 원리이다(Fig. 1).

센서의 성능을 평가하는 지표로 게이지율(Gauge Factor)과 이력현상(Hysteresis)을 보았다. 게이지율은 일반적으로 센서의 전기 저항 변화에 대한 민감도를 측정하는데 사용되는 파라미터이다. 직물의 길이 변화율에 따른 저항 변화율을 나타낸 것으로 아래와 같은 식을 통해 구한다(1).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (1)$$

GF : gauge factor

R : initial resistance

ΔR : applied resistance

L : initial length

ΔL : applied length

ϵ : strain value

이력현상은 직물을 늘리고 다시 줄일 때, 초기 응력-변형 곡선과 다르게 나타나는 현상을 말한다. 직물을 신장 또는 수축 시 섬유 간의 결합이 재형성되거나 구조적인 변화가 있을 수 있어 초기 곡선과 차이가 발생한다. 이러한 히스테리시스 현상은 센서의 데이터를 측정할 때 측정값을 달라지게 하여 이력현상이 최소화되는 직물을 사용하여야 한다.

2.2. 텍스타일 팔꿈치 인장 측정 원리

텍스타일 스트레인 센서의 성능 분석을 하기 위해 Universal testing machine (UTM, FGA-5, DACELL)을 활용하고 있다. UTM은 다양한 재료의 물리적 및 기계적 특성을 측정하는데 사용되며, 주로 재료 강도, 인장 강도, 압축 강도 등을 측정하는데 활용된다. 사용방법은 성능을 평가하고자 하는 재료를 고정하고, 특정 횟수 동안 인장 및 수축을 반복하여 재료의 물리적 특성을 정밀하게 측정한다(Fig. 2).

UTM 인장 반복 시험을 통해 텍스타일 스트레인

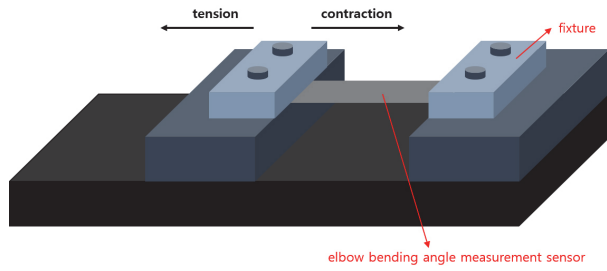


Fig. 2. Schematic diagram of UTM (universal testing machine)

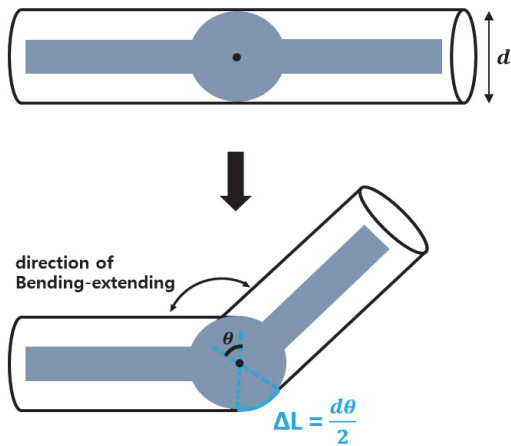


Fig. 3. Simulation of elbow bending angle

센서의 성능을 분석한 뒤 선정된 직물을 팔꿈치 굽힘 각 측정에 사용한다. 성인의 팔꿈치 뼈의 지름(d)을 측정하였을 때 약 5cm가 나왔다. 따라서 5cm의 센서를 사용하였고, 굽힘의 최대인 140°로 굽혔을 때의 늘어난 길이(ΔL)를 계산해 보면, 6.10이다 (Fig. 3).

따라서 슬리브의 밀림과 같은 요소를 고려했을 때 센서의 성능 분석 시 최대 인장 길이를 5cm로 하였다.

3. 연구방법 및 절차

3.1. 굽힘 센서 제작

굽힘 센서를 제작하기에 앞서 편안한 착용감의 장점을 가지고 있으며, 탄성이 우수한 대표적인 직물 Bergamo, E-band, Span cushion, Polyester 4개의 성능 분석을 시행하여 팔꿈치 굽힘 각 센서에 가장 적합한 직물을 선정하였다(Fig. 4). 슬리브에 부착하기 위한 직물들은 Table 1과 같이 설정하였다.

굽힘 센서를 만들기 위해 0.1wt% SWNT 분산액을 직물에 함침하여 전도성 직물로 제작하였다. 4가지 직물을 SWCNT 분산액에 1분 동안 침지 한 후 패딩기(padder)를 통해 직물 안쪽으로 SWCNT 분산액이 잘 스며들도록 하였다. 이후 100℃ 온도의 건조기(dryer)에서 10분 동안 건조시켜 직물 표면에 SWCNT 전도성 입자들이 네트워크를 이루어 전도성이 높아지도록 하였다(Fig. 5).

함침된 직물을 레이저 커팅기(laser cutting)를 이용하여 80mm×20mm로 자른 뒤 열전사기(Heat Transfer Machine)를 이용하여 슬리브에 함침된 직물을 부착하였다. 그리고 슬리브에 IMU를 부착하여 굽힘 센서를 제작하였다(Fig. 6).

3.2. 굽힘 센서 성능 측정

함침된 직물을 굽힘 센서로 활용하기 전 UTM을 이용하여 직물의 성능 분석을 진행하였다. 80mm×20mm 직물의 파지 길이는 좌, 우 각각 15mm로 실험 직물의

Table 1. Comparison of 4 fabric types

Fabric	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)	Volume (ml)	Density (g/ml)	Width (mm)	Length (mm)	Yarn composition
Bergamo	0.8	300	1.28	0.38	20	80	polyester 94%, spandex 6%
E-band	0.95	500	1.52	0.51	20	80	composite
Span cushion	0.85	300	1.36	0.35	20	80	nylon 85%, spandex 15%
Polyester	0.73	231.25	1.17	0.32	20	80	polyester 100%

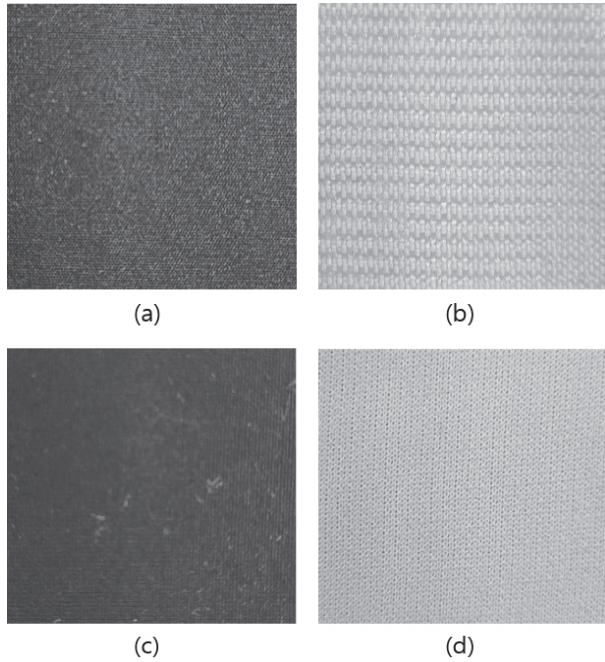


Fig. 4. 4 fabric types (a) bergamo, (b) e-band, (c) span cushion, (d) polyester

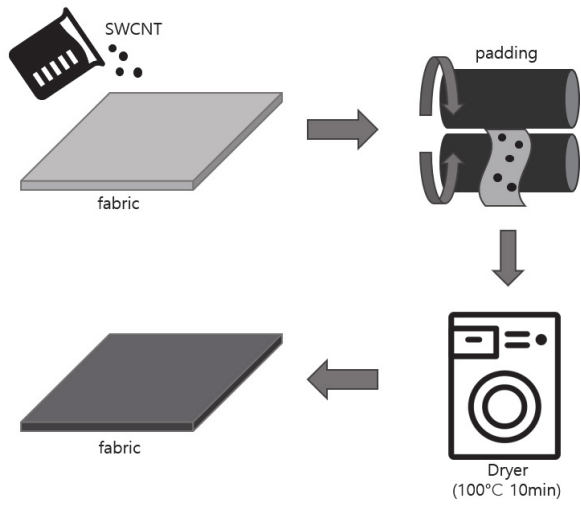


Fig. 5. Process of fabric impregnation

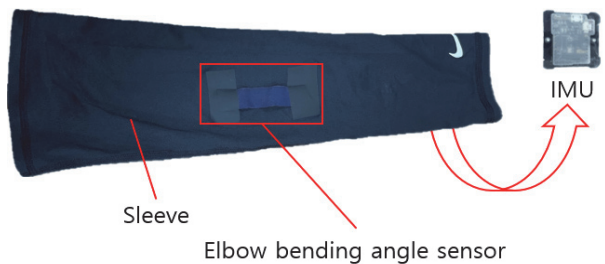


Fig. 6. Structure of the sleeve with elbow bending angle sensor and IMU sensor

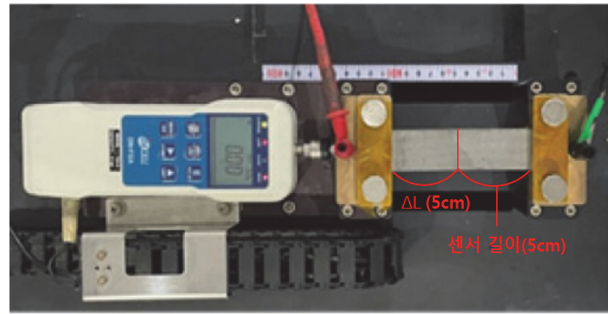


Fig. 7. Images of UTM test



Fig. 8. Bending elbow angles (0°-140°)

크기는 50mm×20mm, 속도는 10mm/sec, 반복횟수는 10회, 인장 길이는 50mm로 실험 조건을 설정하여 성능 분석을 하였다(Fig. 7).

UTM 인장 반복 시험을 통해 선정된 하나의 직물과 IMU를 슬리브에 부착하여 각도에 따른 저항 데이터를 측정하였다. 팔꿈치의 굽힘에 따른 대표적인 센서의 작동 모습은 Fig. 8과 같다.

3.3. 2-steps 팔꿈치 굽힘 각 추정 시스템 설계

제작된 굽힘 센서를 통해 얻은 데이터는 bending 동작에서의 각도에 대한 센서 값의 변화와 extending 동작에서의 각도에 대한 센서 값의 변화가 다른 경향을 갖고 있기 때문에 두 가지 동작을 나누는 것을 1-step으로 하였다. 2-step으로, 데이터를 복잡한 비선형 관계를 처리하고 높은 데이터 정확도를 달성하기 위해 matlab R2021b의 MLP 회귀를 활용하였다. input은 저항,

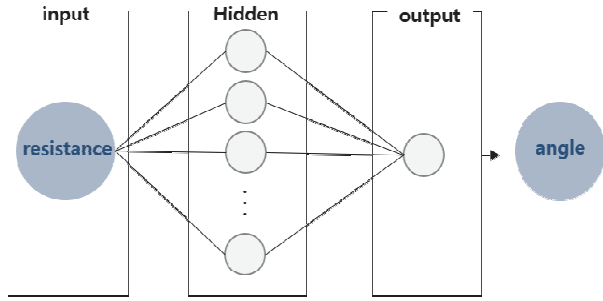


Fig. 9. An algorithm for measuring resistance-angle variations using MLP

output은 팔꿈치 굽힘 각이며, MLP 회귀 모델은 저항과 팔꿈치 굽힘 각을 1:1 비율로 적합하여 훈련되었다 (Fig. 8).

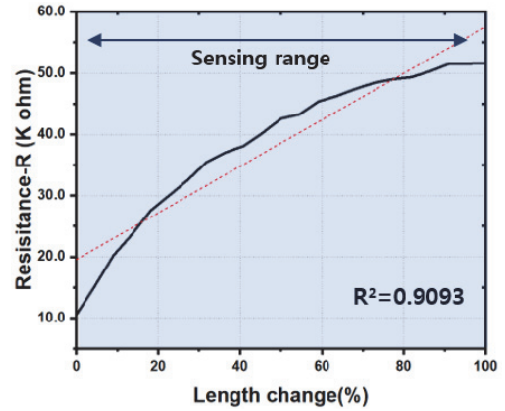
4. 연구 결과 및 논의

4.1. 굽힘 센서 성능 분석 결과

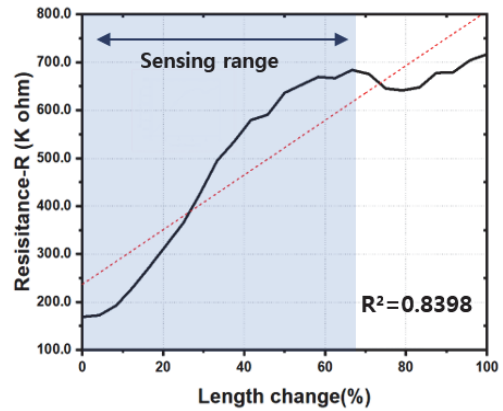
4가지 직물을 함침한 뒤 UTM을 통해 인장 반복 시험을 한 결과 데이터를 통해 인장율-저항 그래프를 그렸다(Fig. 10).

그래프에서 Bergamo의 경우 인장률 100%까지 센서의 길이가 증가함에 따라 저항이 선형적으로 증가한다. 하지만 E-band의 경우 인장률 70% 이상에서 저항의 감소가 일어나기 시작하였다. 또한 Span cushion의 경우 비선형적인 랜덤한 저항 변화가 일어났으며, Polyester의 경우 민감도가 감소하는 구간이 나타났다. 따라서 종합적으로 센싱 범위 즉, 제일 선형성을 띠고 센서로써 사용할 수 있는 유효 범위는 Bergamo, E-band, Span cushion, Polyester 순으로 큰 것을 확인할 수 있었다. 그리고 UTM 인장 반복 시험을 통해 얻은 데이터를 식 (1)을 이용하여 게이지율을 구했다. 그 결과 Bergamo가 가장 큰 게이지율을 가지는 것을 확인하였다(Table 2).

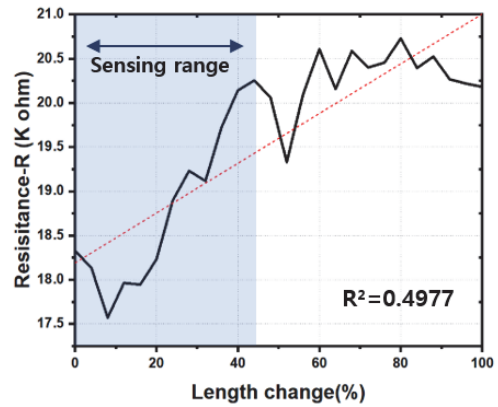
그리고 그래프의 x축 길이변화와 y축 저항의 선형 상관계수를 나타내는 계수인 결정계수(R^2)를 비교하였다. 결정계수가 크다는 것은 길이 변화율에 대한 저항 변화율이 균일하다는 것으로 이력현상이 적다는 것을 의미한다. 비교 결과 Bergamo, Polyester, E-band,



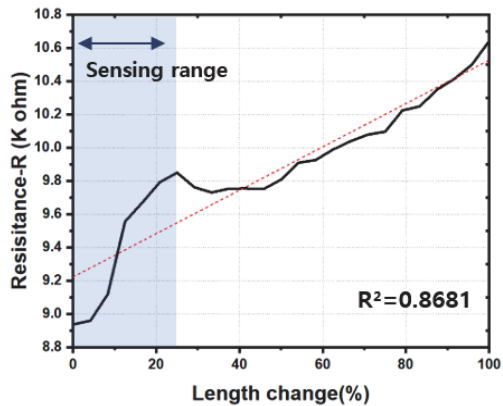
(a) Bergamo with dip-coating processes



(b) E-band with dip-coating processes



(c) Span cushion with dip-coating processes



(d) Polyester with dip-coating processes

Fig. 10. Tensile test result (repeated times, n=10)

Table 2. Gauge factor and R^2 for 4 fabrics types

Subject	R^2	Gauge factor
Bergamo	0.91	4.82
E-band	0.84	3.28
Span cushion	0.50	2.12
Polyester	0.87	0.19

Span cushion 순으로 결정계수가 크며, Bergamo가 4.82로 가장 큰 게이지율을 가져 이력현상이 4가지 직물 중 가장 적은 것을 확인하였다.

이러한 Bergamo는 polyester와 spandex로 구성되어 있어 내구성과 탄성이 뛰어난 성질을 가져 굽힘 센서 성능 분석에서 가장 좋은 결과가 나타난 것으로 보인다. 또한 Bergamo는 다른 직물들보다는 선형성을 띠지만, 초기 게이지율과 전 범위의 게이지율이 달라져 log 스케일의 게이지율을 구하여 확인해 보았다(Fig. 11).

또한 scanning electron microscope (SEM)을 사용하여 가장 성능이 적합하다고 판단된 Bergamo의 표면을 관

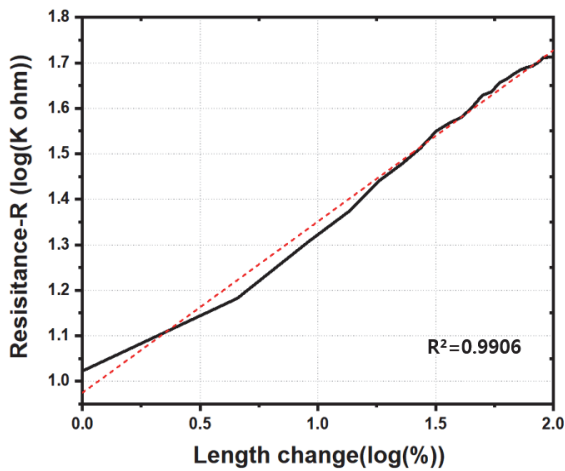


Fig. 11. Gauge factor on a logarithmic scale

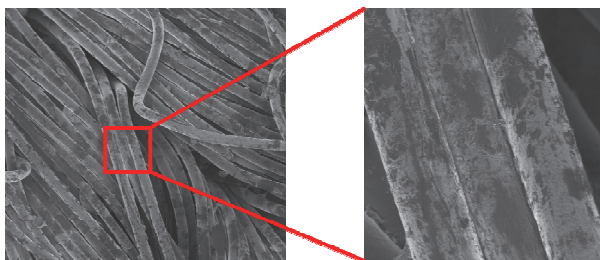


Fig. 12. SEM image of a bergamo

찰하였다(Fig. 12). 그 결과 Bergamo 표면에 SWCNT의 입자가 잘 부착되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

4.2. 실제 팔꿈치 굽힘 각 측정 슬리브 착용 후 센서 성능 결과

굽힘 센서는 다음과 같은 식을 따른다(2).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

R : resistance

ρ : resistivity

l : length

A : cross-sectional area

즉, 굽힘 센서에서 저항은 단면적에 비례하고 길이에 반비례한다.

굽힘 센서는 팔꿈치를 굽힐 때 저항이 증가하고, 다시 펼 때 저항이 감소하도록 슬리브에 부착되었다. 실제 팔꿈치 굽힘 각 슬리브 착용 후 센서 성능의 데이터를 각도-저항 그래프로 나타내었다(Fig. 13). 그래프는 팔꿈치를 굽히고 다시 펼 때 두 가지 별개의 동작의 경향을 보였다. 센서에 대한 저항과 굽힘 각에 대한 정확한 모델링을 위하여 1-step으로 bending과 extending을 나누었다. 그 방법은 식 (3)에 의해 n 번째 센서 값과 그 다음 센서 값인 $n+1$ 번째 센서 값의 차이를 통해 두 동작을 나누었다.

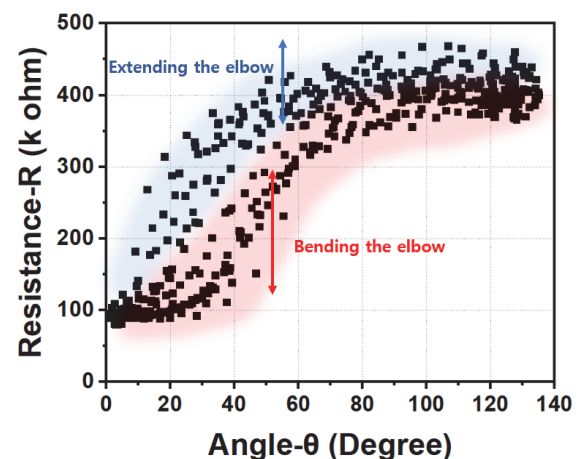


Fig. 13. Resistance linear fitting as a function of elbow angle

$$X_n - X_{n+1} \begin{cases} > 0, \textit{Extending} \\ < 0, \textit{Bending} \end{cases} \quad (3)$$

4.3. 2-steps 팔꿈치 굽힘 각 추정 시스템 설계 결과

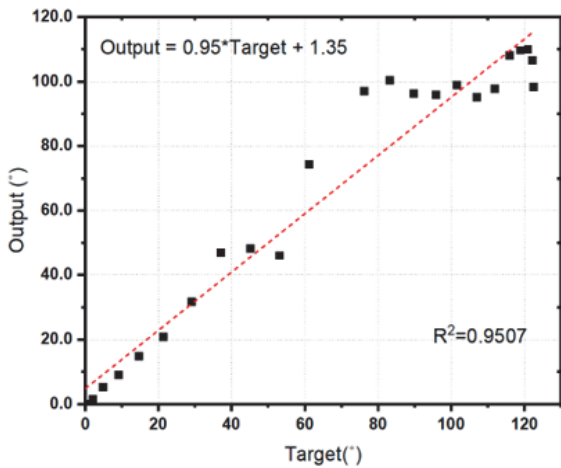
팔꿈치 굽힘 각 측정 슬리브 착용 후 얻은 각도에 따른 저항 데이터는 MLP 모델 input 데이터로 입력하였으며, 대상 출력은 팔꿈치 굽힘 각이다. Fig. 14는 팔꿈치를 굽히고 펼 때에 대한 각각의 회귀 분석 결과를 나타낸다. 가로축은 실제 팔꿈치 각도 값(Target)을 나타내며, 세로축은 각 모델에서 얻은 예측값이다. R^2 은 종속 변수의 분산 중 독립변수의 모델에서 설명할 수 있는 비율을 나타내는 통계 측정값이다. 이 값은 0에서 1 사이의 범위를 가지며, 높은값은 모델에서 데이터의 정확도가 높다는 것을 의미한다. 즉, R^2 이 1에 가까울

수록 실제 팔꿈치의 각도와 예측된 팔꿈치의 각도가 비슷한 값으로 산출되는 것이다. 훈련의 결과 팔꿈치를 굽히는 동작에서의 R^2 값은 0.96, 팔꿈치를 펴는 동작에서의 R^2 값은 0.98을 가진다. 이러한 결과는 MLP를 사용하여 저항 데이터를 기반으로 팔꿈치 굽힘 각을 높은 정확도로 예측하는 효과를 보여준다.

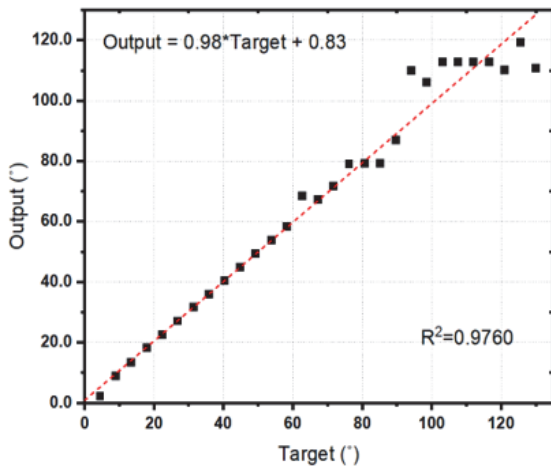
5. 결론

본 연구의 목적은 소프트 텍스타일 굽힘 센서를 제작하고, 다층 퍼셉트론 기반 2-steps 비선형 회귀 시스템을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 팔꿈치를 굽힐 때 팔꿈치가 늘어나는 것을 이용하여 굽힘 센서가 같이 늘어나면서 생기는 저항 변화를 통해 팔꿈치 각도를 알아내고자 하였다. 따라서 적합한 센서용 직물을 찾기 위하여 소프트한 직물 4가지에 SWCNT 함침을 통해 전도성 직물로 제작한 뒤, UTM을 사용하여 각각의 전도성 직물의 성능을 평가하여 Gauge factor가 높고, 센싱 범위가 제일 넓으며, 이력현상이 제일 적은 Bergamo 직물을 센서 소재로 선정하였다. 그 후 슬리브에 함침한 Bergamo 직물과 IMU를 부착하여 팔꿈치 굽힘 각에 따른 저항의 데이터를 도출하였다. 도출된 데이터를 고찰한 결과 팔꿈치를 굽히고 펼 때의 두 가지 동작에서의 굽힘 각과 저항 값이 달라 본 연구에서는 2-steps 시스템을 개발하여 사용하였다. 1-step을 통해 동작을 먼저 분류하였으며, 2-step으로 각각의 동작에서 MLP를 사용하여 팔꿈치 굽힘 각 - 저항 변환 시스템을 개발하여 굽힘 센서에 적용하였다. 최종적으로 소프트한 원단 기반 스트레인 센서와 시스템의 설계 및 분석을 통해 딱딱하고 부피가 큰 IMU를 부착하지 않고도 팔꿈치 굽힘 각을 추정할 수 있는 굽힘 센서를 개발하였다.

본 연구를 통하여 최근 헬스케어 대한 관심이 증가하고, 개인의 건강관리를 위해 여러 운동에 대한 욕구가 커지고 있어 근육 활동을 측정하여 부상을 방지하고 훈련 방법을 개선하는 연구가 다양하게 진행되고 있다. 특히 팔을 사용하는 운동에서 팔꿈치의 각도는



(a) Accuracy of elbow flexion angle prediction



(b) Accuracy of elbow extension angle prediction

Fig. 14. MLP Regression algorithm accuracies

중요하게 작용한다. 이에 팔꿈치 동작을 측정하는 장치는 다양하지만, 본 연구에서는 소프트 직물 기반 센서를 사용함으로써 운동 중 착용감의 단점을 보완할 수 있었다. 또한 팔꿈치 굽힘 각 추정 시스템의 개발을 통해 팔꿈치 각도의 효율적인 예측을 가능하게 하였다. 이와 같이 SWCNT 함침을 통해 굽힘 센서를 이용한 E-textile의 제작과 복잡한 비선형 관계를 처리하고 높은 데이터 정확도를 달성하기 위해 인공지능망을 활용한 방법은 웨어러블 디바이스, 예방 및 치료 등의 헬스케어 분야에서 효과적으로 활용되기를 기대한다.

REFERENCES

- Chun, S.-H., Kim, S.-U., & Kim, J.-Y. (2021). Development of wrist tunnel syndrome prevention smart gloves using cnt-based tensile fabric sensor: Focusing on mouse use. *Science of Emotion and Sensibility*, 24(4), 117-128.
- Ergezinger, S., & Thomsen, E. (1995). An accelerated learning algorithm for multilayer perceptrons: optimization layer by layer. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 6(1), 31-42.
- Hayeong, Y., Wonjin, K., & Jooyong, K. (2022). Enhancement of penetration by using mechanical micro needle in textile strain sensor [enhancement of penetration by using mechanical micro needle in textile strain sensor]. *Science of Emotion & Sensibility*, 25(4), 45-52. Retrieved from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3993527>
- Höflinger, F., Müller, J., Zhang, R., Reindl, L. M., & Burgard, W. (2013). A wireless micro inertial measurement unit (IMU). *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 62(9), 2583-2595.
- Jang, J.-H., Kim, S.-U., & Kim, J.-Y. (2023). Manufacture of recycled PET e-textile by plasma surface modification and CNT dip-coating. *Science of Emotion and Sensibility*, 26(1), 79-86.
- Kang, I., Schulz, M. J., Kim, J. H., Shanov, V., & Shi, D. (2006). A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, 15(3), 737.
- Koo, B., Nguyen, N. T., & Kim, J. (2023). Identification and classification of human body exercises on smart textile bands by combining decision tree and convolutional neural networks. *Sensors*, 23(13), 6223.
- Leardini, A., Lullini, G., Giannini, S., Berti, L., Ortolani, M., & Caravaggi, P. (2014). Validation of the angular measurements of a new inertial-measurement-unit based rehabilitation system: Comparison with state-of-the-art gait analysis. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 11(1), 1-7.
- Najah, A., El-Shafie, A., Karim, O., Jaafar, O., & El-Shafie, A. H. (2011). An application of different artificial intelligences techniques for water quality prediction. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(22), 5298-5308.
- Roh, J.-S. (2016). Wearable textile strain sensors. *Fashion & Textile Research Journal*, 18(6), 733-745.
- San Juan, J. G., Suprak, D. N., Roach, S. M., & Lyda, M. (2015). The effects of exercise type and elbow angle on vertical ground reaction force and muscle activity during a push-up plus exercise. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 16(1), 1-9.
- Kim, S. U., Choi, S. O., & Kim, J. Y. (2021). Analysis of the necessary mechanical properties of embroiderable conductive yarns for measuring pressure and stretch textile sensor electrodes [analysis of the necessary mechanical properties of embroiderable conductive yarns for measuring pressure and stretch textile sensor electrodes]. *Science of Emotion & Sensibility*, 24(2), 49-56. Retrieved from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3892875>
- Kim, S. J., Kim, S. U., & Kim, J. Y. (2022). Resistive e-band textile strain sensor signal processing and analysis using programming noise filtering methods [resistive e-band textile strain sensor signal processing and analysis using programming noise

filtering methods]. *Science of Emotion & Sensibility*, 25(1), 67-78. Retrieved from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3937999>

원고접수: 2023.11.21

수정접수: 2024.03.04

게재확정: 2024.03.12.

Taud, H., & Mas, J. (2018). Multilayer perceptron (MLP). *GeoMatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*, 451-455.