KJSB
Korean Journal of Sport Biomechanics 2021; 31(3): 183-188
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2021.31.3.183
http://e-kjsb.org eISSN 2093-9752
ORIGINAL

Development of Stretchable Joint Motion Sensor for Rehabilitation based on Silver Nanoparticle Direct Printing

은 나노입자 프린팅 기반의 재활치료용 신축성 관절센서 개발

Woen-Sik Chae, Jae-Hu Jung

Department of Physical Education, Kyungpook National University, Daegu, South Korea

Received : 11 August 2021
Revised : 16 September 2021
Accepted : 16 September 2021

Corresponding Author
Jae-Hu Jung
Department of Physical Education, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, South Korea
Email : jjhjjh81@naver.com

Objective: The purpose of this study was to develop a stretchable joint motion sensor that is based on silver nano-particle. Through this sensor, it can be utilized as an equipment for rehabilitation and analyze joint movement.

Method: In this study, precursor solution was created, after that, nozel printer (Musashi, Image master 350PC) was used to print on a circuit board. Sourcemeter (Keithley, Keithley-2450) was used in order to evaluate changes of electric resistance as the sensor stretches. In addition, the sensor was attached on center of a knee joint to 2 male adults, and performed knee flexion-extension in order to evaluate accurate analysis; 3 infrared cameras (100 Hz, Motion Master 100, Visol Inc., Korea) were also used to analyze three dimensional movement. Descriptive statistics were suggested for comparing each accuracy of measurement variables of joint motions with the sensor and 3D motions.

Results: The change of electric resistance of the sensor indicated multiple of 30 times from initial value in 50% of elongation and the value of electric resistance were distinctively classified by following 10%, 20%, 30%, 40% of elongation respectively. Through using the sensor and 3D camera to analyze movement variable, it showed a resistance of 99% in a knee joint extension, whereas, it indicated about 80% in flexion phase.

Conclusion: In this research, the stretchable joint motion sensor was created based on silver nanoparticle that has high conductivity. If the sensor stretches, the distance between nanoparticles recede which lead gradual disconnection of an electric circuit and to have increment of electric resistance. Through evaluating angle of knee joints with observation of sensor's electric resistance, it showed similar a result and propensity from 3D motion analysis. However, unstable electric resistance of the stretchable sensor was observed when it stretches to maximum length, or went through numerous joint movements. Therefore, the sensor need complement that requires stability when it comes to measuring motions in any condition.

Keywords: Stretchable joint motion sensor, Joint movement, Angular kinematic parameters, Rehabilitation

INTRODUCTION

최근 건강과 운동에 대한 관심이 높아짐에 따라 스포츠 활동에 참여하는 인구가 점진적으로 늘어나고 있다. 하지만 건강과 운동에 대한 관심이 높아진 만큼이나 운동에 의해 발생되는 부상 빈도도 증가하고 있는 추세이며(Grice, Kingsbury & Conaghan, 2014), 부상 발생 후 회복 과정에서 재활 치료의 중요성이 부각되고 있다(Ford, Myer & Hewett, 2003; Lim, 2007).

재활 치료는 부상의 원인을 찾아 위험 요인을 최소화하고 기능적으로 완전한 회복을 위한 필수적인 치료 방법이다. 부상 후 염증, 통증, 부종은 빠른 시일 내에 사라질 수 있지만, 조직이 치유되어도 휴식을 취하는 동안 연부조직의 구축과 근육 경직으로 인해 관절 움직임의 제한이 발생되기 때문에 단계적인 재활 치료가 시행되어야 하며, 이와 더불어 부상 부위에 대한 관절가동범위 회복이 우선되어야 한다(Park, 2016).

부상 부위에 대한 관절가동범위 회복을 위한 재활 치료는 일반적으로 재활의학과나 재활전문병원에서 운동처방사 또는 의료진를 통해 이루어진다. 일반인들의 경우 전문 의료진에 의한 재활 치료의 효과 및 중요성에 대해 인지하고 있지만, 시간 할애 및 비용 부담 등과 같은 현실적인 문제들로 인해 부상 후 지속적인 재활 치료 참여가 어려운 실정이다(Lim & Jin, 2012). 부상 후 치료 과정에서 재활 치료의 적절한 시기를 놓칠 경우 부상 부위의 회복이 늦어질 뿐만 아니라 관절가동범위 제한과 같은 신체 기능 저하, 재손상 발생 등 재활 치료 과정에 부정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 전문 의료진에 의한 재활 치료 참여가 어려운 환자들의 경우, 대부분 부상 후 감소된 관절가동범위를 회복하기 위해 본인 스스로 재활 운동을 시행하게 된다. 이러

Copyright © 2021 Korean Journal of Sport Biomechanics
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 환자들의 정상적인 관절가동범위 회복 및 재활 치료 과정에서의 동기 부여를 위해 관절 각도 정보를 제공하거나 치료 경과를 확인할 수 있는 새로운 관점에서의 측정 센서 개발이 필요한 실정이다.

신체 움직임 측정을 위한 기존 센서들의 경우 강체적 특성을 지닌 재료를 사용하기 때문에 센서의 착용 및 부착에 있어서 불편함이 발생될 수 있으며, 활동적인 상황에서의 운동 정보를 얻는데 있어서 제약이 있다. 따라서 신체 움직임 발생 시 불편함을 최소화하기 위해 가볍고 신축성을 가진 소재를 활용한 웨어러블 형태의 측정 센서 개발이 요구된다.

인체에 착용이 가능하고 신체 동작 및 관절 움직임을 감지할 수 있는 신축성 센서는 스포츠 및 의료 산업과 같은 다양한 분야로의 응용이 가능하여 주목을 받고 있다(Lee et al., 2014). 신체의 움직임을 방해하지 않고 인체에 착용한 상태에서 관절가동범위를 측정하기 위해서는 연신이 가능한 부드러운 재질의 센서가 필수적이다. 이러한 센서를 구현하기 위해 그래핀, 탄소 나노 튜브, 은 나노선 등의 전도성 나노입자와 연신성 고분자를 혼합하거나 전도성 고분자의 성질을 개질하여 넓은 구동범위를 가지는 신축성 연신 센서를 제작하는 연구들이 진행되었다(Heikenfeld et al., 2018; Kim, Park, Sohn, Cho & Jeon, 2016).

전도성 고분자를 이용한 선행연구들을 살펴보면, 전도성 고분자가 가지는 낮은 전도성을 극복하고자 많은 연구가 진행되고 있으나, 현재까지 기존 금속 물질들을 뛰어넘는 전도성을 가지지 못하는 것으로 보고되었다. 또한 신축성 센서나 전극으로 많이 사용되는 나노 물질들과 고분자 복합체를 패터닝하여 복잡한 구조의 센서를 제조하기 위해서는 복잡한 공정이 필요하며, 이로 인해 공정의 재현성이 낮고 복잡한 구조의 센서 혹은 회로를 구성하는데 큰 어려움이 있다(Park et al., 2012; Song et al., 2017). 하지만 은은 다른 금속 물질에 비해 전도성이 높은 물질이기 때문에 은 나노입자들이 서로 연결될 경우 높은 전도성을 가지게 된다. 이에 본 연구에서는 이미 보고된 은 전구체가 폴리스타이렌 기반의 블록 공중합체 내부에 흡수되어 은 나노입자가 생성되는 현상과 은 전구체 기반의 잉크를 직접 프린팅하는 방법을 활용함으로써 신체 움직임 측정을 위한 신축성 관절센서를 개발하고자 한다.

따라서 본 연구의 목적은 은 나노입자를 기반으로 하는 신축성 관절센서를 개발하고 개발된 센서의 측정 정확도를 검증하는데 있다. 또한 본 연구를 통해 관절 움직임 측정이 가능한 재활 치료 보조기기로 신축성 관절센서의 활용 방법을 모색하고자 한다.

METHOD

1. 연구대상자

본 연구에서는 개발 단계의 은 나노입자 기반 신축성 관절센서 샘플에 대한 각도 측정 정확도를 알아보기 위해 성인 남성 2명을 연구대상자로 선정하였으며, 연구대상자의 무릎관절에 신축성 관절센서 샘플을 부착한 후 무릎관절의 신전-굴곡 움직임에 따른 센서의 저항값 변화를 측정하였다. 본 연구에 참여한 연구대상자 1의 신체적 특성은 신장 176.0 cm, 체중 70 kg, 나이 25세이며, 연구대상자 2의 신체적 특성은 신장 178.0 cm, 체중 72 kg, 나이 28세이다.

2. 실험장비

1) 직접 프린팅 방법을 이용한 신축성 관절센서 개발

신축성 관절센서 개발을 위해 은 전구체의 일종인 트리플루오로아세테이트 은과 아세톤을 혼합한 은 전구체 용액을 프린팅용 잉크로 제작하였다. 은 전구체 용액에 폴리스타이렌 블록과 폴리부타다이엔 블록의 폴리스타이렌(SBS) 고분자를 1,000:1의 질량비로 혼합하여 녹였으며, 앞서 제작한 프린팅용 잉크를 노즐 프린터(Musashi, Image master 350PC)를 이용하여 SBS 기판에 프린팅하였다(Figure 1). SBS 기판은 SBS를 클로로포름에 15 wt%로 녹여 스핀 코팅하여 제작하였다. 외부의 측정기기와 센서의 연결을 위해 'ㄷ' 자 형태로 프린팅하였으며, 프린팅 후 하이드록실 아민 용액을 이용하여 SBS 기판에 흡수된 은 전구체를 환원시켜 주었다. 신축성 관절센서 제작 시 은 전구체의 농도와 압력, 속도 등 프린팅 조건의 조절을 통해 100 μm 수준의 프린팅 해상도를 구현하였으며, 프린팅 두께 조절을 통해 센서의 민감도 및 전도성을 확보하였다.

본 연구에서는 무릎관절 굴곡-신전 동작 수행을 위해 은 전구체를 이용하여 프린팅 제작한 신축성 관절센서를 (Figure 2)과 같이 PI (polyimide) tape를 이용하여 무릎관절 중앙에 부착하였다.

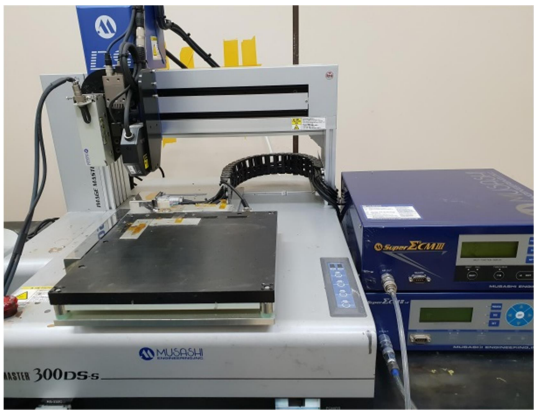

Figure 1. Nozzle printer

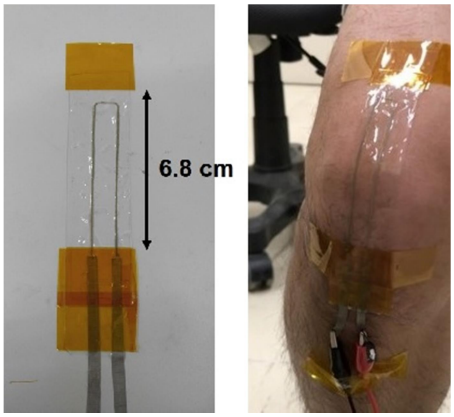

Figure 2. Joint motion sensor

2) 3차원 동작 분석

본 연구에서는 무릎관절의 굴곡-신전 동작에 대한 3차원 동작 분석을 위해 3대의 적외선카메라(100 Hz, Motion Master 100, Visol Inc., Korea)를 피험자의 우측, 우측 전방 45°, 우측 후방 45° 지점에 각각 설치하였다(Figure 3). 또한 인체관절 중심의 좌표화를 위해 직경 0.8 cm 크기의 반사마커를 우측 엉덩이, 무릎, 발목에 각각 부착하였다.

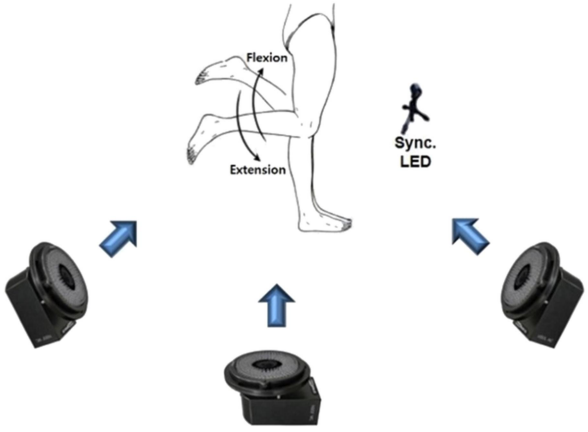

Figure 3. Experimental setup

3. 실험절차

피험자들은 실험에 들어가기 전 피로를 유발할 수 있는 강도 높은 신체 활동을 금지하였으며, 실험에 앞서 5분간 가볍게 워밍업을 실시하였다. 본 실험에서는 개발된 신축성 관절센서의 각도 측정 정확도를 평가하기 위해 무릎관절에 대한 전후면 상에서의 신전 및 굴곡 동작을 실시하였다. 각 수행 동작에 대해 3회씩 반복 측정하여 자료 분석을 실시하였다.

4. 자료분석

1) 제작된 신축성 관절센서의 성능 측정

직접 프린팅을 이용하여 제작된 신축성 관절센서의 성능 평가를 위해 늘어남에 따라 연신성 고분자 내부의 은 나노입자들 간의 거리가 멀어지면서 저항이 커지는지 측정하였다. 센서를 정밀하게 늘리거나 수축시킬 수 있는 전자동 스트레쳐(Teraleader, UMP 100)를 이용하여 신축성 관절센서의 성능을 측정하였으며, 동시에 물질의 전기적 저항값을 측정할 수 있는 소스미터(Keithley, Keithley-2450)를 이용하여 센서의 전기적 저항을 측정하였다.

2) 주요 시점 설정

본 연구에서는 무릎관절의 굴곡-신전 동작에 대한 각도 및 가동범위 분석을 위해 무릎관절을 기준으로 동작 시작 전 최대로 신전된 순간을 신전 시점, 최대로 굴곡된 순간을 굴곡 시점으로 설정하였다.

3) 신축성 관절센서

신축성 관절센서에서 측정된 전압값을 각도값으로 치환하기 위해 sensor calibration을 진행하였다. 먼저 무릎 각도 측정을 위한 동작분석시스템과 신축성 관절센서를 동조시킨 후 실제 무릎 각도값과 전압값을 산출하였다. 산출된 실제 무릎 각도값과 전압값의 곡선 피팅 방법(curve fitting method)을 통해 추세선을 도출한 후 아래와 같이 무릎 각도 변환 공식을 산출하였다.

$$Y = A + B X + C X^2$$

X = voltage
Y = angle
A = 365.022
B = -0.0021175
C = -0.000271194

4) 3차원 동작 분석

3차원 동작 분석은 Kwon3D 3.1 program (Visol Inc., Korea)을 사용하였으며, 직접 선형 변환 방법(direct linear transformation, Abdel-Aziz & Karara, 1971)을 통해 3차원 좌표값을 산출하였다. 영상 좌표화 과정에서 발생되는 노이즈를 최소화하기 위해 2차 Butterworth low-pass digital filter를 사용하였으며, 이때 차단 주파수는 6 Hz로 설정하였다.

5. 통계처리

개발된 신축성 관절센서와 3차원 동작 분석 간의 각운동 변인에 대한 측정 정확도를 비교 분석하기 위해 측정 항목별 기술통계량(descriptive statistics)을 제시하였다.

RESULTS

1. 연신에 따른 신축성 관절센서의 전기적 저항값 변화 측정

전자동 스트레쳐(Teraleader, UMP 100)를 이용하여 신축성 관절센서를 최대 50%까지 늘리면서 센서의 전기적 저항값의 변화를 소스미터(Keithley, Keithley -2450)를 이용하여 측정하였다. 연신에 따라 초기 저항값 대비 저항의 변화량을 표시한 (Figure 4)와 같이 50%의 연신에서 신축성 관절센서의 저항은 초기값의 약 30배 정도 증가한 것으로 나타났다. 또한 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 연신에서 각각 센서가 나타내는 저항값이 명확히 구분되는 것으로 나타났다.

2. 무릎 관절의 움직임에 따른 신축성 관절센서의 전기적 저항값 변화 측정

제작된 신축성 관절센서를 인체 동작 측정에 활용하기 위해 센서를 무릎관절에 부착한 후 센서의 저항값을 측정하였다. (Figure 5)와 같이

무릎관절의 움직임 변화에 따라 센서의 저항값이 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

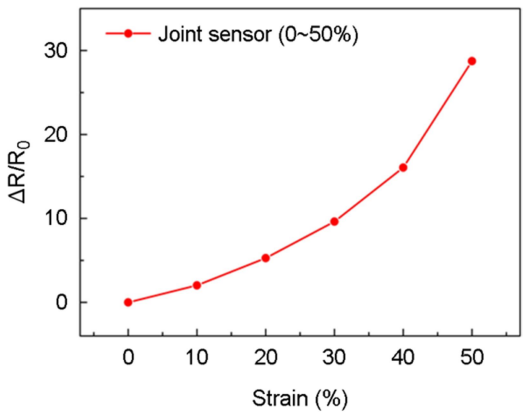

Figure 4. Relative electrical resistance change depending on stretching of joint motion sensor

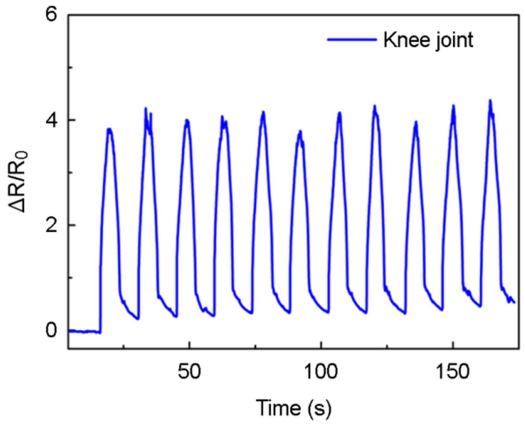

Figure 5. Relative electric resistance change of joint motion sensor depending on motion of knee

3. 신축성 관절센서와 3차원 동작 분석 간의 각운동 변인 측정 정확도 분석

무릎관절의 신전-굴곡 동작 시 신축성 관절센서와 3차원 동작 분석을 통한 각운동 변인을 분석한 결과, 2명의 피험자 모두 무릎관절의 신전 시점에서는 관절 각도값의 정확도가 약 99% 정도인 것으로 나타났다. 하지만 무릎관절의 굴곡 시점 및 관절가동범위에서는 관절 각도값의 정확도가 약 80% 정도인 것으로 나타났다(Table 1-2, Figure 6-7).

Table 1. Angular kinematic parameters of subject 1 (deg)

	3D motion	Motion sensor	Accuracy (%)
Extension	175.2±0.2	176.2±0.1	99.4±0.1
Flexion	90.2±3.0	73.1±6.1	81.0±4.3
ROM	84.6±2.8	102.8±6.0	78.6±3.6

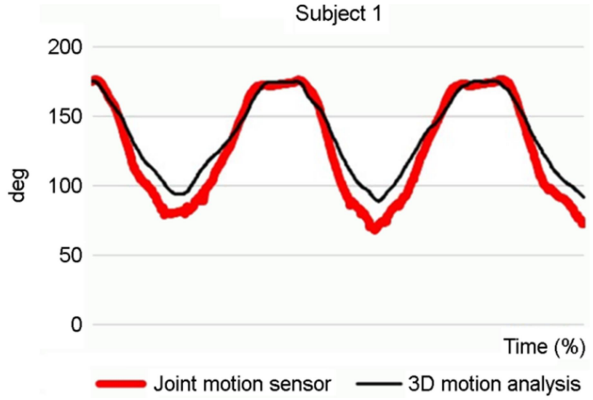

Figure 6. Angular kinematic parameters of subject 1

Table 2. Angular kinematic parameters of subject 2 (deg)

	3D motion	Motion sensor	Accuracy (%)
Extension	175.6±0.3	175.9±0.3	99.8±0.3
Flexion	88.0±1.8	71.2±3.3	80.9±2.0
ROM	87.2±1.5	104.0±2.8	80.8±1.3

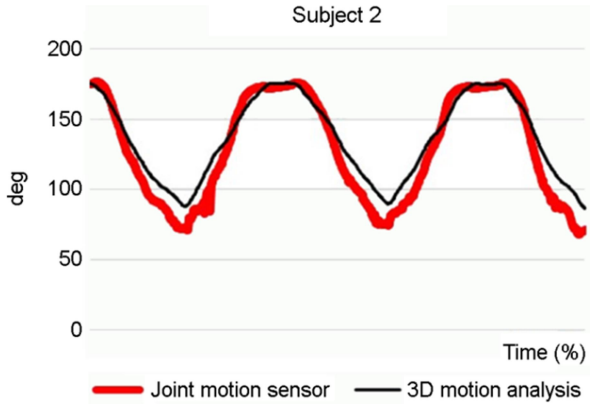

Figure 7. Angular kinematic parameters of subject 2

DISCUSSION

1. 신축성 관절센서의 저항값 변화 원리와 해석

본 연구에서 사용한 신축성 관절센서는 은 전구체를 SBS 기판에 직접 프린팅을 통해 원하는 형태로 흡수시킨 뒤에 하이드록실 아민을 통해서 화학적으로 전구체를 환원시켜 제작하였다. 이 공정을 통해서 연신성 고분자인 SBS 내부에 은 나노입자들이 형성되었다. 은은 전도성이 높은 금속 물질이기 때문에 은 나노입자들이 서로 연결된 센서는 높은 전도성을 가지게 된다. 이 센서를 늘리게 되면 은 나노입자들 사이의 연신성이 있는 SBS 고분자는 늘어나지만 연신성이 없는 은 나노입자는 늘어나지 않는다. 그 결과 은 나노입자들 간의 간격이 멀어지게 되고 전기적 연결이 점차 끊어지게 된다. 최종적으로 센서를 늘

리면 센서의 전기적인 저항값이 증가하게 되는 것이다. 다시 말해서 센서가 보여주는 전기적인 저항값을 측정하면 센서가 얼마만큼 늘어났는지 알 수 있다(Figure 8).

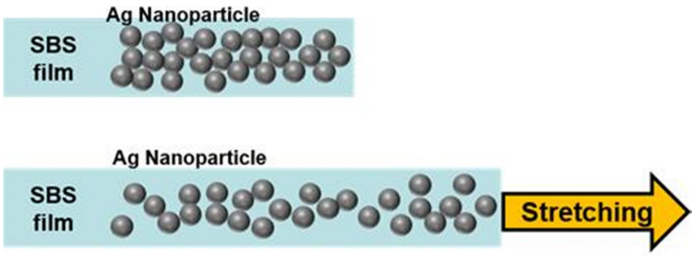

Figure 8. Mechanism of strain sensing

따라서 저항값을 측정하여 연신 정도를 측정할 수 있는 신축성 관절센서를 실제 피부에 밀착하여 부착하면 피부의 연신을 측정할 수 있다. 이를 응용하여 목표로 하는 관절의 피부에 신축성 관절센서를 밀착하여 부착한 뒤 관절을 움직이게 되면 피부의 신축에 따라서 센서의 저항값이 변화하게 된다. 관절의 움직임이 클수록 피부의 연신이 많이 일어나게 되고 센서의 저항값 변화가 크다. 다시 말해서 관절의 움직임에 비례해서 센서의 저항값이 변화한다. 따라서 (Figure 5)와 같이 센서의 저항값 변화를 통해서 관절의 움직임을 측정할 수 있다. 이와 같이 신축성 관절센서는 높은 유연성을 가지기 때문에 무릎관절과 같은 1축성 관절의 신전-굴곡 동작에 따른 각도 변화를 측정하는 센서로 활용하는데 적합할 것으로 판단되며, 이를 통해 관절가동범위와 같은 관절 움직임에 대한 각도 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 신축성 관절센서와 3차원 동작 분석 간의 각운동 변인 측정 정확도 분석

무릎관절의 신전-굴곡 동작 시 3차원 동작 분석과 신축성 관절센서를 통한 각운동 변인을 분석한 결과, 2명의 피험자 모두 무릎관절의 신전 시점에서는 관절 각도값의 정확도가 약 99% 정도인 것으로 나타났다. 하지만 무릎관절의 굴곡 시점 및 관절가동범위에서는 관절 각도값의 정확도가 약 80% 정도인 것으로 나타났다. 특히 무릎관절의 최대 굴곡 시점에서 신축성 관절센서의 정확도가 현저히 감소하는 것으로 나타났다.

무릎관절의 신전 및 굴곡 동작 시 (Figure 6-7)와 같이 3차원 동작 분석과 신축성 관절센서 간의 관절 각도 변화에 대한 전반적인 그래프의 형태가 비교적 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 특히 무릎관절 신전 동작에 대한 관절 각도값의 측정 정확도는 매우 높은 것으로 나타났다. 하지만 무릎관절의 중앙 부위에 부착된 신축성 관절센서의 길이가 최대로 증가하여 상대적으로 큰 저항을 받게 되는 무릎관절의 굴곡 동작 시 전기적 저항값의 변화가 불안정한 것으로 판단되며, 이러한 이유가 무릎관절 굴곡 시점에서 신축성 관절센서의 관절 각도값 측정 정확도가 감소된 원인인 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 수행한 무릎관절 신전-굴곡 동작의 형태가 원위 분절의 활동성이 높은 개방사슬 운동(open kinetic chain)의 특성을 가지기 때문에 상대적으로 무릎관절의 자유로운 움직임으로 인해 신축성 센서의 전기적 저항값이 불안정한 양상을 보인 것으로 판단된다.

따라서 무릎관절의 신전 및 굴곡 동작 수행 시 3차원 동작 분석과 신축성 관절센서 간의 측정된 관절 각도는 전반적으로 유사한 경향을 보였지만, 무릎 관절의 굴곡 동작과 같이 센서의 길이가 최대로 증가하거나 갑자기 늘어나는 경우 신축성 관절센서의 측정 정확도가 감소되는 것으로 나타났기 때문에 이러한 상황에서의 측정 안정성 보완이 필요할 것으로 판단된다.

CONCLUSION

인체 관절의 움직임을 측정하는 것은 부상 부위의 재활 치료에 있어서 매우 중요한 역할을 하며, 특히 특정 관절의 각도 변화를 측정하는 것은 부상의 회복 정도를 판단하는 중요한 기준이 될 수 있다(Karantonis, Narayanan, Mathie, Lovell & Celler, 2006). 하지만 관절 각도 측정을 위해 사용되는 기존의 의료용 측각도계, 스트레인 게이지, 적외선 카메라 분석시스템을 비롯한 분석용 장비들의 경우, 측정자의 주관적인 측정 방식, 특정 구간에서 측정 불가능한 제한적인 각도, 측정 공간의 제약 등 여러 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 측정 장비들의 제한점을 보완하고자 전도성이 높은 은 나노입자를 직접 프린팅 방법을 통해 신축성 관절센서를 제작하였으며, 제작된 센서의 전기적 저항 변화를 통해 관절 각도 정보 제공이 가능한 재활 치료 보조기기로 활용하고자 하였다.

본 연구에서 제작된 은 나노입자를 기반으로 하는 신축성 관절센서는 무릎과 같은 관절 부위에 부착이 가능한 얇고 가벼운 소재로 제작되어 공간적인 제약을 받지 않으며, 객관적인 측정 값의 산출이 가능하다. 개발된 신축성 관절센서는 센서의 길이가 늘어나게 되면 은 나노입자들 간의 간격이 멀어지고 전기적 연결이 점차 끊어지게 됨에 따라 센서의 전기적인 저항값이 증가하게 된다. 이러한 신축성 관절센서의 전기적 저항 변화를 통해 무릎관절 각도를 측정한 결과, 3차원 동작 분석 결과와 비교해 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 따라서 개발된 신축성 관절센서는 측정 정확도가 높고 실시간 모니터링이 가능하기 때문에 재활 치료 시 관절가동범위의 회복 정도를 파악하는데 효과적일 것으로 판단된다.

REFERENCES

Abdel-Aziz, Y. & Karara, H. M. (1971). *Direct linear transformation from comparator coordinates in object-space coordinates in object-space coordinates in close range photogrammetry.* Proceedings of the ASP Symposium of Close-Range Photogrammetry. Urbana, IL.

Ford, K. R., Myer, G. D. & Hewett, T. E. (2003). Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *35*(10), 1745-1750.

Grice, A., Kingsbury, S. R. & Conaghan, P. G. (2014). Nonelite exercise-related injuries: Participant reported frequency, management and perceptions of their consequences. *Scandinavian Journal of Medicine*

& Science in Sports, *24*(2), e86-e92.

Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., Li, R., Khine, M., Kim, J., Wang, J. & Kim, J. (2018). Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects. *Lab on a Chip*, *18*(2), 217-248.

Karantonis, D. M., Narayanan, M. R., Mathie, M., Lovell, N. H. & Celler, B. G. (2006). Implementation of a real-time human movement classifier using a triaxial accelerometer for ambulatory monitoring. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, *10*(1), 156-167.

Kim, T., Park, J., Sohn, J., Cho, D. & Jeon, S. (2016). Bioinspired, highly stretchable, and conductive dry adhesives based on 1D-2D hybrid carbon nanocomposites for all-in-one ECG electrodes. *ACS Nano*, *10*(4), 4770-4778.

Lee, J., Kim, S., Lee, J., Yang, D., Park, B. C., Ryu, S. & Park, I. (2014). A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection. *Nanoscale*, *6*(20), 11932-11939.

Lim, B. O. (2007). Does a knee brace decrease recurrent anterior cruciate ligament injuries? *Health & Sports Medicine; Official Journal of KACEP*, *9*(1), 103-109.

Park, M., Im, J., Shin, M., Min, Y., Park, J., Cho, H., Park, S., Chung, D. Y., Park, J., Jeong, U. & Kim, K. (2012). Highly stretchable electric circuits from a composite material of silver nanoparticles and elastomeric fibres. *Nature Nanotechnology*, *7*, 803-809.

Song, J. H., Kim, Y. T., Cho, S., Song, W. J., Moon, S., Park, C. G., Park, S., Myoung, J. M. & Jeong, U. (2017). Surface-embedded stretchable electrodes by direct printing and their uses to fabricate ultrathin vibration sensors and circuits for 3D structures. *Advanced Materials*, *29*(43), 1702625.