

동작센싱 스마트레깅스 프로토타입 개발

황진희 · 지승현¹⁾ · 김선희^{2)†}

인천대학교 뷰티산업학과

^{1)엠피셀}

^{2)인천대학교 패션산업학과}

Developing a Prototype of Motion-sensing Smart Leggings

Jin-Hee Hwang, Seunghyun Jee¹⁾, and Sun Hee Kim^{2)†}

Dept. of Beauty Industry, Incheon National University; Incheon, Korea

^{1)Mcell Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea}

^{2)Dept. of Fashion Industry, Incheon National University; Incheon, Korea}

Abstract: This study focusses on the development of a motion-sensing smart leggings prototype with the help of a module that monitors motion using a fiber-type stretch sensor. Additionally, it acquires data on Electrocardiogram (ECG), respiration, and body temperature signals, for the development of smart clothing used in online exercise coaching and customized health-care systems. The research process was conducted in the following order: 1) Fabrication of a fiber-type elastic strain sensor for motion monitoring, 2) Positioning and attaching the sensor, 3) Pattern development and three-dimensional (3D) design, 4) Prototyping 5) Wearability test, and 6) Expert evaluation. The 3D design method was used to develop an aesthetic design, and for sensing accurate signal acquisition functions, wearability tests, and expert evaluation. As a result, first, the selection or manufacturing of an appropriate sensor for the function is of utmost importance. Second, the selection and attachment method of a location that can maximize the function of the sensor without interfering with any activity should be studied. Third, the signal line selection and connection method should be considered, and fourth, the aesthetic design should be reflected along with functional verification. In addition, the selection of an appropriate material is important, and tests for washability and durability must be made. This study presented a manufacturing method to improve the functionality and design of smart clothing, through the process of developing a prototype of motion-sensing smart leggings.

Key words: online exercise coaching (온라인 운동 코칭), smart clothing (스마트 의류), textile-based strain sensor (섬유형 스트레인 센서), motion-sensing (동작센싱), biosignal monitoring (생체신호 모니터링)

1. 서 론

기술의 발달과 생활수준의 향상으로 인간의 평균 수명이 연장되고 고령화 사회로 변화하면서 사회 전반적으로 건강에 관한 관심이 증대하고 예방적 건강관리의 중요성이 확대되고 있다. 또한, 비대면 문화의 확산과 기술의 발전은 개인화된 다양한 헬스케어 상품 및 서비스에 대한 필요성과 소비욕구를 촉진시키고 있다(Song et al., 2020). 스마트폰의 사용이 일반화되면서 스마트폰과 디지털 헬스케어 기기를 연동하여 실시간으로 사용자의 생체신호와 운동정보 수집이 가능하게 되었으며, 수

집한 정보를 분석하고 의미를 해석하여 사용자가 건강을 관리할 수 있게 되었다(Roh, 2016).

디지털 기기를 이용한 개인 건강관리에 대한 사회적 수요가 증가하면서 생체신호 획득과 과학적 운동 코칭을 위한 스마트 의류에 대한 시장도 확대되고 있다(Cho et al., 2006). 스마트 의류는 일상적 착용을 통해 사용자의 생활습관 및 활동을 파악하고 실시간으로 생체신호를 모니터링할 수 있으며 동작을 센싱하여 비대면 헬스케어 서비스가 가능하게 한다(Chae et al., 2009). 전체 스마트의류의 세계시장규모는 2019년 1.64억달러에서 2024년 5.28억달러로 연평균 26.2% 성장할 것으로 예상하며 특히 헬스케어와 스포츠 피트니스 분야에서 성장이 두드러질 것이라고 전망하고 있다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2021).

일반적으로 스마트의류는 인간과 컴퓨터기기가 상호작용할 수 있도록 접속되는 경계에서 작용하는 인터페이스 구성 요소로서 의복으로서 기본적인 용도를 넘어 인체 신호를 감지하고 정보를 처리하며 반응을 작동시킴으로써 상호접속을 제공할 수

†Corresponding author: Sun-Hee Kim

Tel. +82-32-835-8037

E-mail: shkim001@inu.ac.kr

©2022 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.

있는 새로운 의복이다(Cho et al., 2006). 단순히 전자 장치를 옷에 덧대어 부착하는 웨어러블 컴퓨팅 시스템에 비해 스마트 의류는 전자 장치의 기능을 섬유 형태의 센서와 신호선을 활용하여 구현하는 의복으로, 필요한 전자 기능을 수행함과 동시에 의복의 쾌적성, 내구성, 편의성, 세탁성, 심미성 등을 동시에 만족해야 한다(Cho et al., 2006). 스마트의류의 구현을 위해서는 전기 전도성 특수소재 및 초소형 IC(집적회로), 센서, 네트워크, 제어, 저장, 신호처리 등에 관련된 기술이 필요하며 외부 컴퓨팅 단말 연결을 통해 다양한 기능을 수행할 수 있어야 한다(Good Information).

국내외 건강관리 및 스포츠 분야의 스마트의류 개발 사례를 살펴보면 소프트웨어 기업 Polar는 운동선수의 기량을 향상시킬 수 있도록 심박수 모니터링 및 GPS 트래킹 기능을 제공하는 Polar Team Pro Shirt를 출시하였다. Athos는 옷에 부착된 센서를 통해 실시간 운동자의 신체 데이터를 모니터링하고 모바일 앱으로 전송하여 효율적이고 안전하게 운동할 수 있도록 정보를 제공하는 스마트의류를 개발하였으며, 스마트 요가밴드인 Nadi X는 요가복 내에 부착된 센서가 자세 교정이 필요한 부위에 진동을 주어 운동의 효율성을 높이고 지속적으로 자세 교정 정도를 모니터링 할 수 있도록 하고 있다(Dehghani & Pashna, 2022). 이처럼 스포츠 분야의 스마트 의류는 개인 스포츠 트레이너의 역할을 대신할 수 있도록 발전하고 있음을 알 수 있다.

스마트의류 관련 연구로는 변형, 압력 센서, 온도, 습도 센서, 전기화학 센서, 유연한 전도성 전극, 와이어 및 유연한 전력 장치를 포함한 탄소 기반 유연 장치의 제조, 작동 메커니즘, 성능 및 응용 프로그램을 검토하고 논의한 연구(Kim & Ryoo, 2019), 심전도(ECG)센서, 근전도(EMG)센서, 호흡센서, 온도센서, 3축 가속도계로 신체 자세와 활동을 의류에서 수집하는 장치를 개발하여 생체신호를 모니터링한 연구(Tsai et al., 2014), 모바일 웨어러블 헬스케어 모니터링 의류의 문제점을 보완하기 위해 전도성 패브릭 센서와 Ag-AgCl 전극을 사용하여 심전도 신호를 기록하고 분석하여 휴대폰에서 손쉽게 심전도와 맥박 신호를 표시할 수 있도록 개발한 연구(Kim et al., 2010), 나노 웹 기반의 전도성 고분자를 이용한 전기 전도성 텍스타일을 개발하여 스마트 의류에 적용 가능하도록 한 소재 연구(Jang et al., 2018) 등이 있다.

그러나 현재 시장에 소개되고 있는 대부분의 스마트의류는 획득할 수 있는 건강 관련 데이터가 맥박, 걸음수, 이동 거리 등으로 한정적이고, 디자인적인 측면에서도 소비자의 기대 수준에 미치지 못하고 있다. 또한 개인 운동 코칭과 관련된 디지털 디바이스 시장은 확대되고 있지만, 온라인과 연동된 운동 코칭 스마트 의류는 개발 되지 않고 있는 상황이다. 만약 개인이 운동할 때 동작, 호흡, 맥박, 체온 등 생체신호를 모두 획득하여 데이터화할 수 있다면, 새로운 온라인 운동 시장을 형성하여 개인별 맞춤형 헬스케어 시스템을 구축할 수 있으며 건강 관련 사회비용을 최소화 하고 융합 서비스 산업으로도 발전할

수 있을 것으로 보여진다.

온라인 운동 코칭 스마트 의류의 개발을 위해서는 호흡, 심박, 체온, 동작 등의 생체 신호를 획득할 수 있는 센서 기술, 신호를 처리하는 기기부, 연결선, 이를 통합하는 제작 기술, 인터페이스 디자인 기술 등 융합적인 연구 개발이 필요하다. 뿐만 아니라 내구성, 착용감, 세탁성을 향상시키기 위한 연구가 필요하며 사용자의 편의성과 안전성에 관한 검증, 심미적 디자인에 관한 고려가 이루어져야 한다. 따라서 스마트의류 관련 연구는 섬유, 정보기술, 인문과학, 디자인 연구를 통합한 다학제적 접근이 필요하다고 하겠다(Cho et al., 2008).

본 연구는 온라인 운동 코칭 스마트 의류 개발을 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 동작센싱 스마트레깅스 프로토타입 개발하고 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서 첫째, 인체의 움직임에 방해가 되지 않으면서 동작을 정확히 센싱할 수 있는 섬유형 동작센서를 제작하며, 둘째, 운동 동작 시 활동에 방해가 되지 않으면서 센서의 기능을 극대화할 수 있는 위치의 선정과 부착 방법을 고찰한다. 셋째, 온라인 운동 코칭용 스마트레깅스 프로토타입을 개발한다. 넷째, 프로토타입의 사용성과 외관에 대한 사용자 평가를 진행하여 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 헬스케어 및 스포츠용 스마트의류

전 세계적으로 산업화와 고령화가 진전됨에 따라 건강생활 실천, 수명 연장 등이 상대적으로 중요한 가치로 인식되면서 스포츠 인구가 크게 증가하고 있다. 최근 체육과학연구원과 서울대학교의 연구에 따르면, 매주 1~2회 규칙적으로 스포츠 활동을 할 경우 국가 전체적으로 연간 16조원의 경제효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 뇌졸중, 당뇨병, 동맥질환 등 주요 질병의 발병률을 최대 16%까지 낮출 수 있다고 보고되었다(Haghi & Stoll, 2017). 이를 위해 올바른 운동방법의 보급을 통한 건강생활 실천의 보편화가 매우 중요한 사회적 수요로 등장하였으며, 헬스케어의 확산을 국가의 중요한 정책목표로 인식되고 있다(Korea Health Promotion and Development Institute, 2020). 개인의 운동 참여율을 높이기 위한 실천 방법으로 운동량, 시간과 같은 목표를 설정하고, 각 개인의 특성에 맞춰서 운동할 수 있도록 관리하는 것이 필수적이다. 과학적인 운동 관리의 각 개인의 체력에 대한 정확한 정보를 확보하는 것으로부터 시작된다고 볼 수 있다. 온라인을 통한 개인 건강관리 및 운동 코칭에 대한 수요가 늘어나면서, 국내에서도 여러 업체에서 운동 및 스포츠 분야에 응용할 디지털 기기를 개발하고자 하는 시도가 지속적으로 추진되고 있으나, 주로 전자 및 센서 기술을 중심으로 한 측정 장비의 개발에 머물고 있다(Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency [SMBTIPA], 2021).

스포츠과학 분야 연구는 체육대학이나 의과대학을 중심으로 일부 추진되고 있으나 과학적 운동 코칭을 위한 응용 기술의






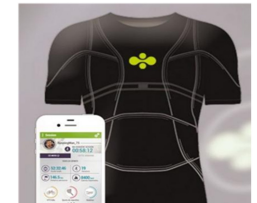
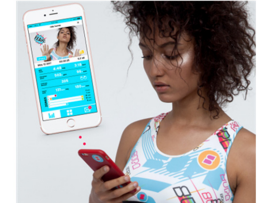





개발은 활발하게 이루어지고 있지 않는 실정이다. 이러한 응용 기술 개발의 미진함은 실제 사용자의 니즈를 만족시키지 못하는 결과를 초래하고 있다. 운동을 핵심 콘텐츠로 하는 디지털 기기와 스마트 의류의 경우에는 정확한 동작 측정 정보를 통하여 얻을 수 있는 콘텐츠의 제공이 중요한 경쟁 요소이다. 이를 위해서는 센서기술, 제품 통합기술, 인터페이스 디자인 기술이 포함되어야 한다. 개인별 온라인 운동 코칭, 맞춤형 헬스케어 시스템을 위해서는 앞에서 언급한 센서기술, 제품 통합기술, 인터페이스 디자인 기술 등 응용 기술 개발이 필수적이다(SMBTIPA, 2021).

스포츠 및 피트니스 분야의 스마트 의류는 가장 빠른 성장을 보이고 있다(Dehghani & Pashna, 2022). 건강관리, 스포츠

를 위한 스마트의류는 피트니스, 요가, 런닝 등 다양한 운동을 하면서 변화하는 호흡, 체온, 맥박, 혈압, 움직임 등과 같은 생체신호를 측정하고 헬스정보를 획득하여 해당 데이터를 스마트폰으로 실시간으로 전달하고 전용 App을 이용해 분석하여 운동량 정보를 제공하거나 자세를 코칭하여 운동효과를 향상시키는 등의 서비스를 제공하기 위해 개발되고 있다. 이러한 건강관리, 스포츠용 스마트의류 개발은 Table 1과 같이 미국, 유럽, 일본, 싱가포르 등 다양한 국가들에서 활발히 진행되고 있다(Lee & Lee, 2020).

Hexoskin과 Sensoria는 블루투스를 사용하여 폐 기능 및 활동 추적용으로 정밀한 ECG 심장 모니터링이 가능한 셔츠를 개발하였고 Cityzen Sciences는 마이크로 센서가 내장되어 있어

Table 1. Smart Clothes development case

	Hexoskin	AiQ Smart Clothing	Wearable X	Athos
Smart fitness clothes	 <p>Image 1. Hexoskin Smart Kits www.hexoskin.com</p>	 <p>Image 2. Bio Man100 www.aiqsmartclothing.com</p>	 <p>Image 3. Nadi X www.wearablex.com</p>	 <p>Image 4. Athos www.liveathos.com</p>
	 <p>Image 5. Sensoria® smart T-shirt www.sensoriafitness.com</p>	 <p>Image 6. Cityzen Dshirt www.cityzensciences.com</p>	 <p>Image 7. SUPA Powered Sports Bra www.movesense.com</p>	 <p>Image 8. Catapult www.playertek.com</p>
	 <p>Image 9. AIO Sleeve www.komodotec.com</p>	 <p>Image 10. OMbra www.smartclothinglab.com</p>	 <p>Image 11. Siren Smart Socks www.siren.care</p>	 <p>Image 12. Healthwatch www.healthwatch.co.uk</p>
	Healthcare clothes	KOMODO	OMsignal	Siren.care

착용자의 체온과 심박수, 속도, 위치 및 가속도등 모니터링 할 수 있도록 하였다. Athos는 2012년 설립하여 스마트 웨어러블 의류의 주요 기업으로 성장하였다. 미국의 화학 관련 기업인 DuPont은 2017년 스마트의류기술인 Intexar기술의 스마트 의류용 신축성 전자 잉크 및 필름을 개발하였으며, AiQ Smart Clothing은 2019년 생체 신호 및 인간의 움직임을 얻을 수 있는 반도체와 융합 신축성 섬유 케이블을 융합한 스마트 의류 플랫폼 솔루션을 선보였다. SUPA 키트에는 센서와 데이터가 포함되어 스포츠, 웰빙 및 건강을 위한 스마트 의류를 비롯한 맞춤형 디지털 애플리케이션을 제공 하고 있다. Wearable X는 햅틱의 진동으로 요가자세 교정에 도움을 줄 수 있는 Nadi X를 출시하였다. 영국의 스포츠 기술 업체인 Catapult Sports의 Playertek은 가속도계, GPS, 지자기 센서로 구성된 트래킹 모듈 제품으로 500mAh용량의 배터리를 내장하고 있어 장시간 운동에도 충분한 용량을 제공한다. Komodo AIO 스마트 슬리브 및 AIO MD는 심장 박동, 수면 분석 및 ECG를 포함한 중요한 건강 데이터를 정확하게 수집하여 제공 하도록 웨어러블 디자인으로 개발되었다. OMbra은 심박수, 호흡, 소모 칼로리, 움직임, 노력 수준 및 피로도를 추적하여 착용자가 피로 수준을 평가하여 효율성을 개선하는 데 도움을 준다. 스마트 양말은 온도를 측정하여 다리 상태를 확인, 조치를 취하라는 메시지도 보낸다. HealthWatch 는 d-textile 기술을 활용하여 심박수 감지, 피부 온도, 호흡 및 신체 자세와 함께 ECG 및 더 넓은 바이탈 사인 모니터링이 가능하다(Table 1).

개인별 온라인 코칭, 맞춤형 헬스케어 시스템이 과학적으로 이루어지기 위해서는 개인의 생체신호와 운동 동작과 같은 정확한 정보의 수집과 분석이 무엇보다 중요한데(Kim et al., 2015), 현재 제공되고 있는 서비스는 주로 사용자로부터 얻은 데이터를 스마트폰의 앱을 통해서 분석하고 이 정보를 다시 사용자에게 제공하는 방식이다. 그러나 앞으로는 각각의 사용자로부터 획득된 정보를 수집하고 분석하여, 코칭할 수 있는 시스템과 연결하고 개인이 원하는 방식으로 피드백 받고 인터넷을 통해서 공유하며 인공지능과 빅데이터 기술을 활용하여 보다 진보된 형태의 개인별 맞춤형 헬스케어 시스템으로 발전할 것으로 보인다. 각 사용자에게 맞춤형 서비스를 제공하는 것은 물론이고 이러한 시스템을 통해서 획득한 데이터를 기반으로 새로운 융합산업 서비스를 개발하여 국가 경제에 기여할 수 있으며 건강 관련 사회비용을 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다(Wang et al., 2018).

2.2. 섬유형 스트레인 센서

생체 신호와 동작을 모니터링하는 온라인 운동 코칭용 스마트 의류를 개발하기 위해서는 스트레인 센서가 매우 중요한 핵심 기술이다. 스마트 의류에 사용되는 섬유형 스트레인 센서는 전기적 신호를 활용하여 인체의 동작과 호흡에 대한 데이터를 수집하고 제공할 수 있다(Huang et al., 2008; Paradiso et al., 2005; Yamada et al., 2011). 동작과 호흡 모니터링을 위한 스

트레인 센서에 일반적으로 사용되는 전도성 섬유는 높은 전도성과 상대적으로 쉬운 제조 공정으로 인해 스테인리스 스틸과 같은 금속을 기반으로 한다(Paradiso et al., 2005). 그러나 금속사는 촉감, 굴곡 내구성, 세탁성 등의 단점과 함께 산화로 인해 발생할 수 있는 문제점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 다른 소재와 금속을 혼합하여 원사, 직물, 부직포 등의 소재를 혼합하는 여러 연구가 보고되고 있다(Good Information, 2021). 그러나 금속 함량 및 혼합 방법에 따라 편안함 특성, 내마모성 및 유지 견고성이 제한될 수 있다(Good Information, 2021).

최근에는 섬유형 스트레인 센서를 제조하기 위하여 탄소 기반 재료와 폴리피롤, 폴리티오펜, 폴리아닐린과 같은 고유 전도성 고분자 재료에 대한 연구가 진행되고 있다(Castano & Flatau, 2014). 그 중에서 탄소는 높은 전도성으로 인해 스마트 의류의 금속 기반 실을 대체할 수 있고 최근 개발된 탄소 나노튜브(CNT)는 전도성, 단일 및 기계적 강도 증가의 이점을 제공한다(Good Information, 2021, Shim et al., 2008; Yamada et al., 2011). CNT의 단일 탄소 원자는 탄소 간 결합을 통해 벌집형의 육각형을 형성하며, 튜브의 직경이 수 나노미터에 불과하기 때문에 나노튜브라고 한다. CNT는 이방성 구조(Diameter: 수십 ~ 수백 nm, 길이: 수십 ~ 수백 μm)를 가지며, 단일벽(SW), 다중벽(MW), 로프 등 다양한 벽 구성을 갖는다(Lee et al., 2014). CNT의 고유한 구조와 특성을 기반으로 하는 다양한 기능은 현재 개발된 스마트 기기의 한계를 극복할 수 있다. 그러나 탄소 기반 물질, 특히 탄소 입자, 탄소 나노튜브, 그래핀은 가공이 어렵고 나일론이나 폴리에스터와 같은 섬유와 결합하면 전도성이 크게 감소하는 단점이 있으며 탄소 함량은 최종 제품의 색상에 영향을 미친다(Good Information, 2021, Castano & Flatau, 2014).

Ko et al.(2018)의 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브로부터 제조된 전도성 잉크를 진공 여과하여 전도성 섬유 스트레인 센서로 제조하였다. 제작된 전도성 섬유 스트레인 센서는 0%~20%의 변형률로 10,000번 반복 신장하는 검증 실험을 통해 ±3% 미만의 저항 변화를 보였고 0%~20%의 변형률에서 저항 변화의 펄스는 스트레칭 주기 동안 균일하게 유지되어 신호 측정의 정확성과 내구성을 검증하였다. 전도성 섬유 스트레인 센서를 이용하여 제작된 동작 감지 장갑은 오실로스코프의 펄스가 손가락의 움직임에 따라 정확하게 변하는 것을 보여주었다.

3. 연구방법

3.1. 프로토타입 개발

스마트레깅스 프로토타입을 개발하고 평가하기 위하여 Ko et al.(2018)의 연구를 기반으로 동작센싱 센서를 제작하고, 프로토타입을 개발하였다. 센서의 성능과 내구성은 저항 측정을 통해 평가하였다. 개발을 위한 기본 설계 및 평가 기준을 수립하기 위하여 예비 실험을 계획, 실행하여 프로토타입 레깅스에

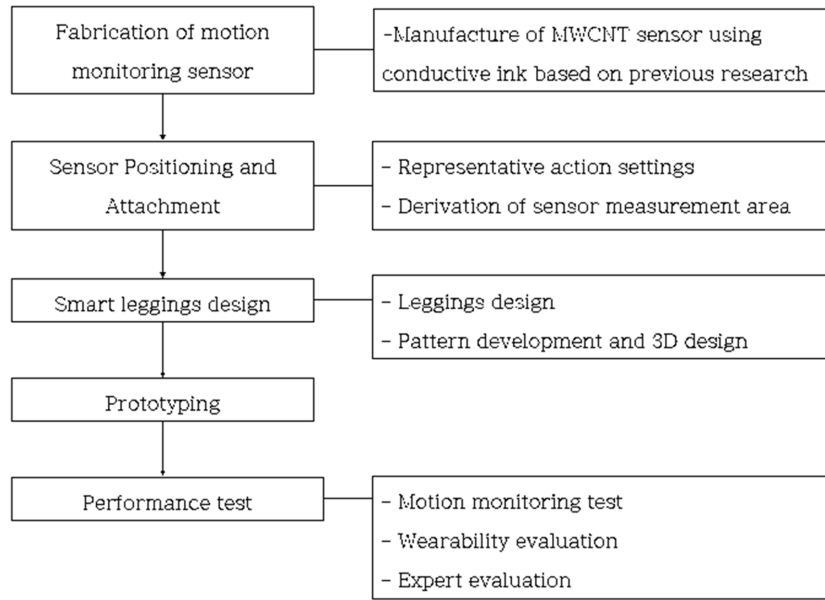


Fig. 1. Research procedure.

부착할 스트레인 센서의 방향과 하체 동작에 따른 체표의 길이 변형을 측정하였다. 체표의 길이 변형이 가장 큰 부위의 표면적 데이터를 추출하여 평균값과 최대값으로 정리하였다. 이렇게 얻어진 예비실험 결과값을 바탕으로 센서 측정 부위를 도출하고 레깅스를 제작하였다. 연구 절차는 다음과 같다(Fig. 1).

3.2. 착용성 평가

제작된 프로토타입의 착용성 평가를 위하여 레깅스 착용에 익숙한 남성 3명, 여성 3명을 공개모집하여 착의 후 운동동작을 수행하게 한 후 설문을 실시하였다. 착의 평가 설계 및 착용성 평가 문항은 Park and Lee(2018), Hong(2017)의 선행연구를 참고하였다. 착용성 평가항목은 Hong(2017)의 ‘사이클용 스마트 재킷의 성능 개선 연구’를 참고하여 작성하였다. 평가항목은 외관 및 활동성 5항목, 수용성 2항목, 안전성 2항목, 사용 편의성 3항목, 작동 기능성 5항목으로 분류하여 매우 불만

족 1점~매우만족 5점으로 5점 리커트 척도로 평가하였다. 착용성 평가 기간은 4월 20일 에서 6월 30일까지이며, 스마트의류의 사용성과 외관 평가를 위하여 피험자들은 피트니스 운동이나 요가를 일주일에 2회 정도 참여하는 20대~40대 일반인들로서, 레깅스 착용에 익숙한 남성 3명, 여성 3명을 착의평가자로 하였다(Table 2).

제한된 여건으로 인해 보다 많은 착용자를 모집하여 실험을 진행할 수 없었던 점이 아쉽지만 프로토타입을 개발하고 평가한 선행연구를 보면 3-6명을 대상으로 실험하고 기초적인 데이

Table 2. Subject analysis

Item	M1	M2	M3	W1	W2	W3
Men(M)/	Age	33	27	24	32	34
	Height	169	175	180	162	159
Women(W)	Weight	59	70	75	60	57

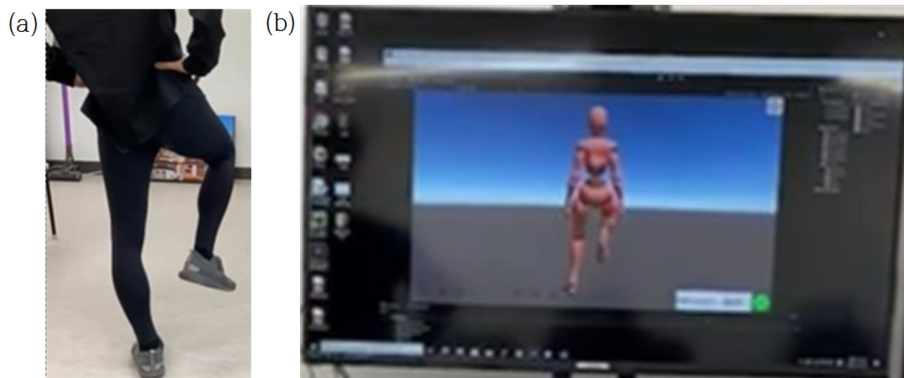


Fig. 2. Smart leggings wearability evaluation; (a) wearing smart leggings, (b) motion monitoring.

터를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. Hong(2017)의 연구에서는 프로토타입을 제작하여 착의 평가자 3명을 의도표집하여 착의자를 선정하였고 의류학 전공 대학생 10명이 전문가 외관평가를 진행하였다. Park and Lee(2018)의 연구에서는 표집된 착의 평가자 6명을 대상으로 심층면접을 통해 평가하였다. 본 연구에서는 6명의 평가자를 임의 모집하였고 설문을 통해 착용성을 평가하였다.

실험복은 한국 남성 M 사이즈, 여성 M사이즈로 제작되었고 피험자의 인체치수 측정값은 Table 2와 같다. 피험자들은 별도의 설비가 갖춰진 실험실에서 평가에 들어가기 전에 연구의 목적과 과정에 대해 충분히 설명을 듣고 자발적으로 참여의사를 밝혔다. 피험자는 실험실에 도착하여 10분 정도 안정을 취하고 난 후 센서가 부착된 실험복을 착용한 후 운동자세 모니터링을 위해 무릎 굽히기, 앉기 동작을 수행하였다. 착의 평가는 약 30분가량 소요되었다. 착용성 설문은 Fig. 2와 같이 무릎 굽히기, 앉기 동작을 하고 난후 스마트 레깅스의 기능을 체험하고 착용감을 문항별로 체크하는 방식으로 진행하였다.

3.3. 전문가 평가

스마트레깅스 프로토타입에 대한 전문가 평가는 착의한 모델의 동작 모니터링을 통해 외관 평가로 이루어 졌으며, 평가 항목은 착용성 평가와 동일하였고 인터뷰를 통해 디자인과 기능성에 대한 평가의견을 작성하도록 하였다. 전문가 평가자는 스포츠의류분야 현업에 종사하는 실무자 3명으로, 1명은 스마트의류 개발 연구과제에 참여한 적이 있는 기획자이고, 2명은 스포츠의류를 개발하는 디자이너이며 모두 10년 이상의 경력을 가지고 있다. 의견을 포함한 설문지를 작성하고 추가적인 질문을 통해 평가결과를 정리하였다.

4. 연구 결과

4.1. 프로토타입 개발

4.1.1. 동작 모니터링 센서 제작

동작 감지를 위한 스트레인 센서에서 스트레인(strain)은 외부로부터 압력과 같은 영향을 받았을 때 일어나는 변형을 뜻하는 의미로 이때 센서는 외부에서 가해지는 외형적 변형을 전기적인 신호로 감지하는 센서이다(Roh, 2016). 기존의 금속으로 제작된 스트레인 센서의 신축성은 3%미만이므로 의복에 적용되기 위해서는 신축성을 가진 섬유 타입의 스트레인센서가 필요하다. 또한 스마트의류에 적용되는 신축성 스트레인 센서는 첫째, 땀과 세탁으로부터 방수가 가능해야 하며, 둘째, 피부와의 마찰과 세탁시 발생하는 마찰에 내구성이 강해야 하고 셋째, 여러 횟수 착용 후 활동한 후에도 신축성이 유지되어야 한다(Roh, 2016). 본 연구에서는 Ko et al. (2018)의 연구를 참고하여 Fig. 3와 같이 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT) 전도성 잉크를 이용한 섬유형 센서를 레깅스에 적합하도록 제작하였다. 또한 센서의 성능을 Table 3에서 보는 바와 같이 길이 변화에 따른 저항 값을 측정하였다. MWCNT 센서의 장점은 필요한 모양으로 프린트가 가능하며, 섬유소재가 가지는 특성인 신축성에 적합한 장력을 가지고 있으며 코팅은 방진 방수 기능을 더해준다(Ko et al., 2018).

Fig. 4에서 보는 바와 같이 늘림 테스트 완료 후 저항값을 측정하고 아래의 계산식을 통해 성능을 확인하였다. 성능 평가 결과는 Fig. 5에서와 같이 계산하여 $\pm 3\%$ 미만의 저항 변화를 보였고 0%-20%의 변형률에서 저항 변화의 펄스는 스트레칭 주기 동안 균일하게 유지 되어 신호 측정의 정확성과 내구성을 검증하였다.

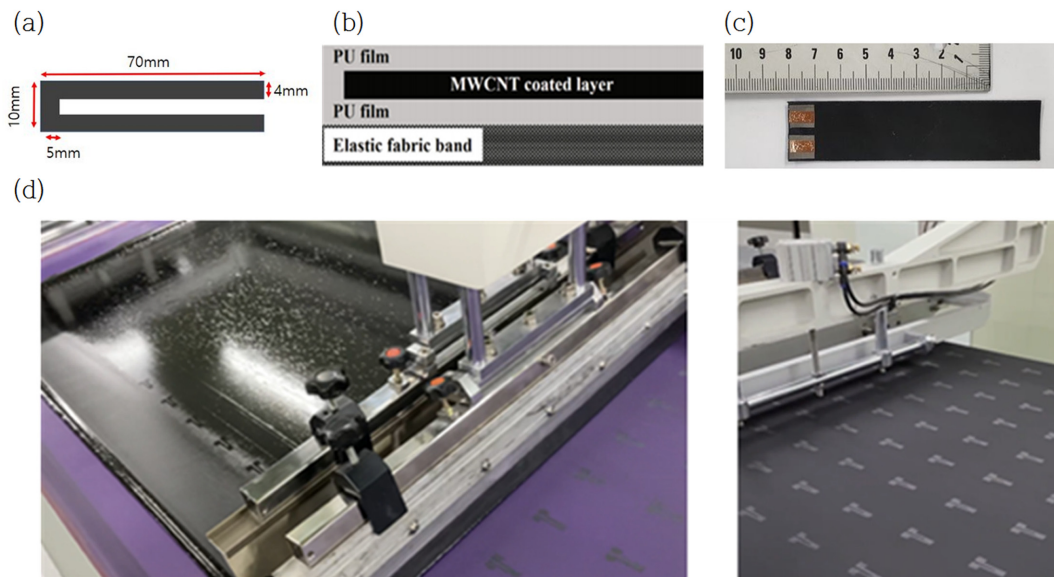


Fig. 3. Schematics of the stretch sensor; (a) Top view, (b) Sectional view. (c) Photograph of the stretch sensor, (d) MWCNT strain sensor printing.

Table 3. Strain sensor resistance change measurement experiment according to length change

Stretch	0.5 cm				1 cm				1.5 cm				2 cm				2.5 cm			
Number	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Strain sensor (MΩ)	1.1	1	0.9	0.97	1.2	1.0	1.0	1.0	1.4	1.14	1.11	1.07	1.4	1.3	1.2	1.2	1.5	1.4	1.35	1.34



Fig. 4. Ten thousand times of stretching test of strain sensor.

$$100 - \left(\frac{\text{최초저항} - 1\text{만회 늘린 후 저항}}{\text{최초저항}} \right) * 100$$

Fig. 5. Stretch resistance test formula.

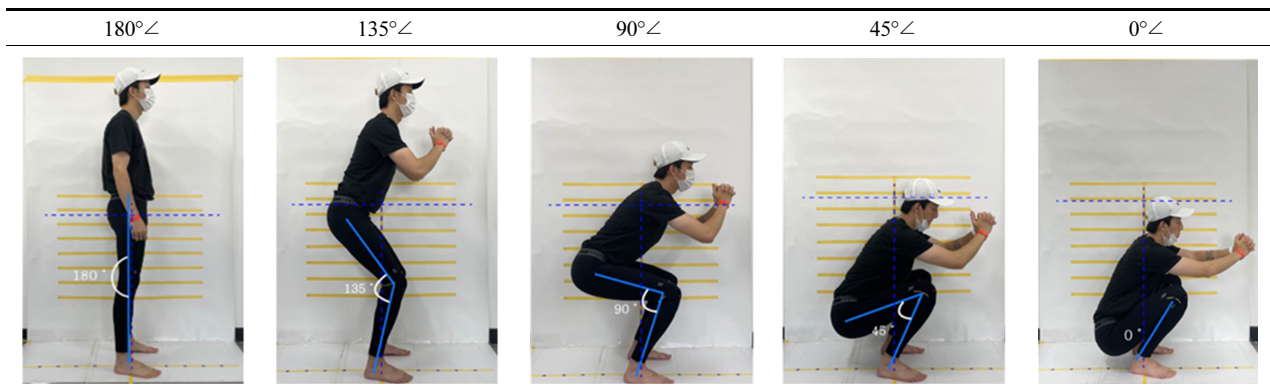
4.1.2. 센서 위치 선정 및 부착

센서는 동작에 방해가 되지 않으면서 센서의 기능을 극대화할 수 있는 위치에 부착되어야 한다. 동작에 따른 센서의 저항 변화값이 가장 큰 위치를 파악하기 위해 피험자의 사용 근육 움직임에 대한 조사를 바탕으로 센서의 위치와 부착 방향을 정하고 레깅스에 센서를 부착하여 저항값을 비교하였다. 실험 동작은 실험복 레깅스를 착용하고 무릎을 바르게 편 자세에서 무릎을 135도, 90도, 45도, 0도의 각도로 구부렸을 때 무릎과 힉

부위의 저항값을 측정하였다. 또한 센서를 붙이는 방향을 사선과 수직 방향으로 나누어 비교하였다. 무릎 센서를 직선, 사선 방향으로 부착하고, 엉덩이 센서를 사선, 직선방향으로 부착한 후 무릎을 폈을 때(180도), 135도, 90도, 45도, 0도로 구부렸을 때 체표면의 변화와 저항값을 Table 4과 같이 측정하였다. 무릎과 엉덩이의 저항 값 변화는 Fig. 6와 같다.

센서의 위치는 Fig. 7과 같이 무릎 부위는 센서의 방향이 사선일 때 스트레치 정도가 큰 결과값을 보이므로 사선으로 위치를 정하고, 엉덩이 부위는 양쪽 엉덩이 중앙에 수직으로 위치를 정하였다. 센서와 기기부를 연결하는 전선은 세탁과 스트레칭이 가능한 기능성 섬유 개발 업체인 Kazhtex의 제품을 사용하였으며, 전선과 MWCNT 센서의 부착 방법은 내구성과 세탁을 고려하여 Fig. 8과 같이 열코팅하였다.

Table 4. Sensor positioning experiment



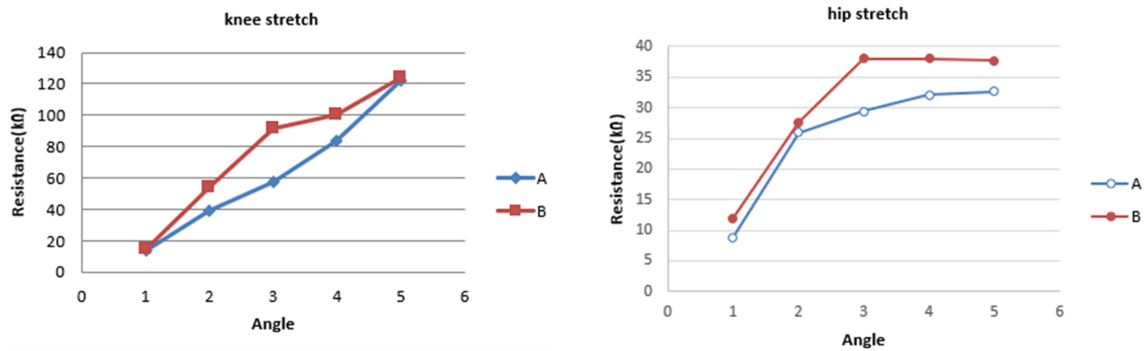


Fig. 6. Resistance values changes in knee and hip.

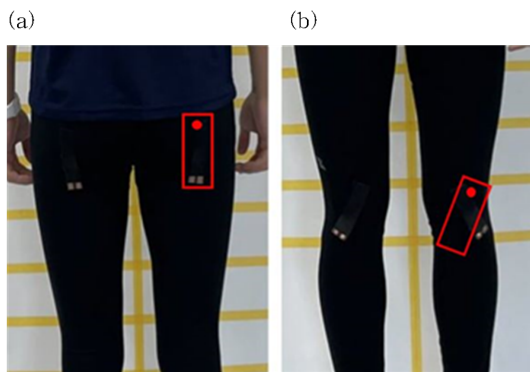


Fig. 7. Selection of sensor position and orientation; (a) Sensor position, center vertical direction of the hip, (b) Central oblique direction of the knee.

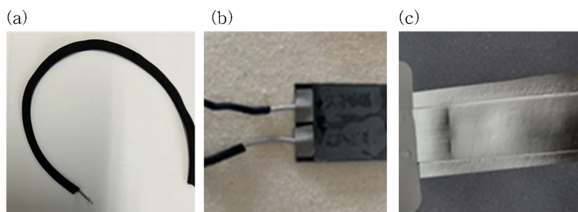


Fig. 8. (a) Ultra-low resistance stainless steel cable, (b) MWCNT sensor and wire connection, (c) Heat-sealed coating.

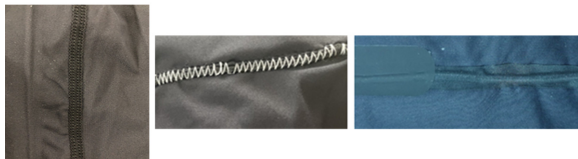


Fig. 9. Textile-based conductive wire connection method considering stretch.

센서와 기기를 연결하는 스트레칭성 전선을 지그재그 스티치로 고정하고 원단의 내구성 강화와 착용감 개선을 위해 오드랩프 봉제기술을 활용하였다. 오드랩프 봉제기술은 원단과 피부에 슬립 현상을 줄여주며 착용감 및 활동성 등이 다른 봉제

방법과 달리 우수하여 동작센싱과 인체 활동을 고려한 스마트 웨어에 적합하다(Fig. 9).

4.1.3. 스마트 레깅스 디자인 제안

스마트의류가 소비자의 구매에까지 이어지기 위해서는 기능성뿐만 아니라 심미적 디자인이 매우 중요하다. 스마트 레깅스의 기능을 최대한 살리면서 날씬해 보이고 심플하도록 디자인하였다. 신체의 움직임과 착용감을 고려하여 스판덱스 30% 이상 스트레치 원단 가운데 두께와 스트레칭성을 고려하여 Nylon 70%/Spandex 30% 기능성 소재를 사용하였고 무릎 안쪽 부분에 매쉬 원단을 배색처리 하여 땀 배출에 도움을 주고 디자인에 변화를 주었다. 디자인할 때 센서와 기기부의 연결 라인은 끊어지지 않고 연결 되도록 패턴을 설계하였으며 센서를 보호하고 깔끔해 보이도록 두 겹 처리하였다. 기기부의 위치는 호흡과 심박을 측정하기 적합한 복부 위쪽으로 선정하였으며 기기부와 동작센서를 연결한 신호선은 운동 동작 시 근육의 움직임에 영향을 적게 받도록 근육의 바깥쪽으로 배치하였다. 신체의 움직임에도 센서의 감지부분의 위치가 일정하도록 뒷꿈치에 절개선을 넣어 디자인 하였다. 디자인과정은 처음에 아이디어 스케치를 바탕으로 도식화를 제작하였으며 인체 마네킹에 라인테이프를 사용하여 패턴 제작의 아이디어를 시각화하였다. 마네킹에 붙인 라인을 확인하면서 패턴을 제작하고 이를 입력하여 3D로 디자인을 시각화하였다. 전체 균형과 라인의 흐름을 고려하여 패턴 수정을 거쳐 다시 3D로 확인하는 과정을 여러 차례 반복 진행하였다. 전체적으로 패턴설계는 센서의 기능과 착용감을 고려하였고 근육의 형태에 기초한 라인을 사용하였다. 최종 패턴의 이미지는 Fig. 10과 같다.

개발된 CAD패턴을 이용하여 3D 디자인으로 컬러 배색의 변화를 시도하였으며 디자인 수정작업을 하였다(Fig. 11).

4.1.4. 프로토타입 제작

스마트 레깅스에 적합한 패턴을 개발하고 CAD 프로그램으로 3D 이미지를 통해 디자인을 미리 확인하는 작업을 거치고 수정 작업을 진행하여 패턴 작업을 마쳤다. 작업 지시서에 따라 원단을 재단하고 센서를 부착하였으며 센서와 전선, 전선과

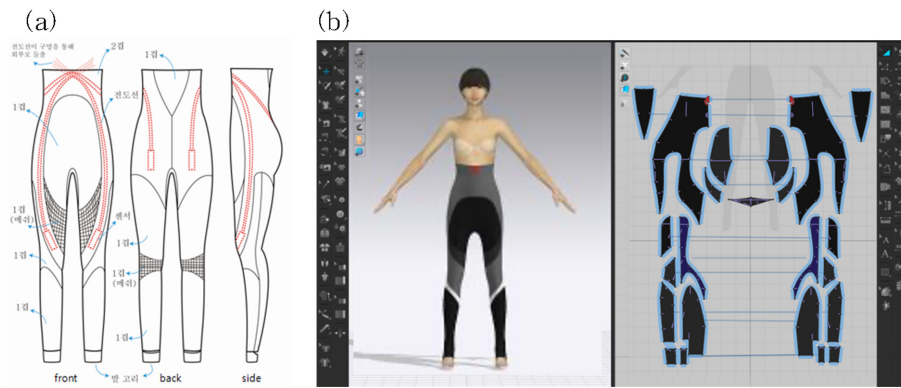


Fig. 10. (a) Schematic, (b) 3D image and CAD pattern design.

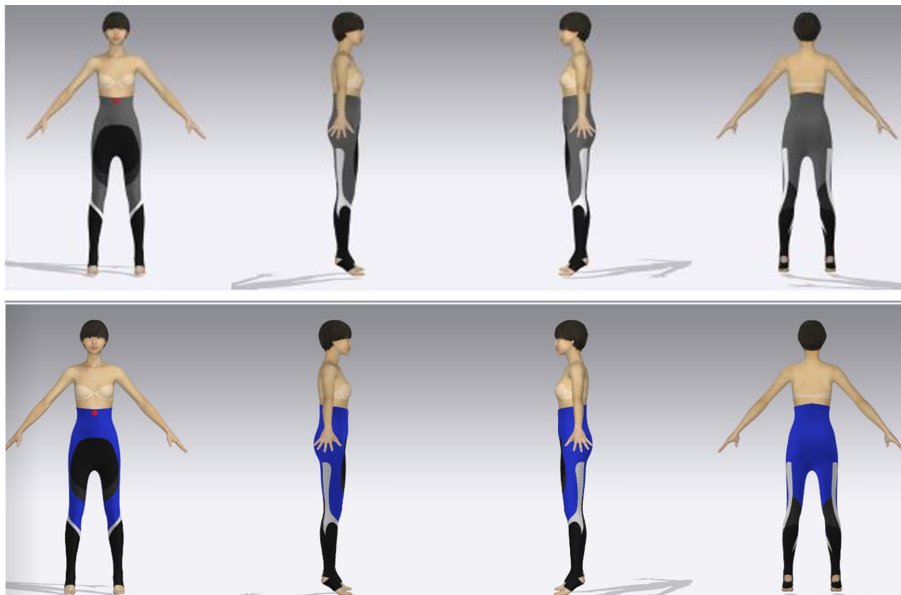


Fig. 11. 3D Design by CLO.

원단을 Fig. 12와 같이 연결하였다. 봉제는 시접없이 봉제 라인을 연결하도록 오드랩트 특수 봉제 기법으로 작업하였다. 센서와 전선 연결은 스트레치되는 부분을 고려하여 지그재그 스티치로 전선과 센서를 부착하고 내구성을 위해 열융착 테이프

를 이용하여 코팅하였다. 작업의 과정과 완성된 외관은 Fig. 12와 같다. 기기부(PCB)는 배꼽 부위에 스냅 형태로 탈부착 되도록 설계하였다(Fig. 13). 완성된 스마트 레깅스의 착의 모습은 Fig. 14와 같다.

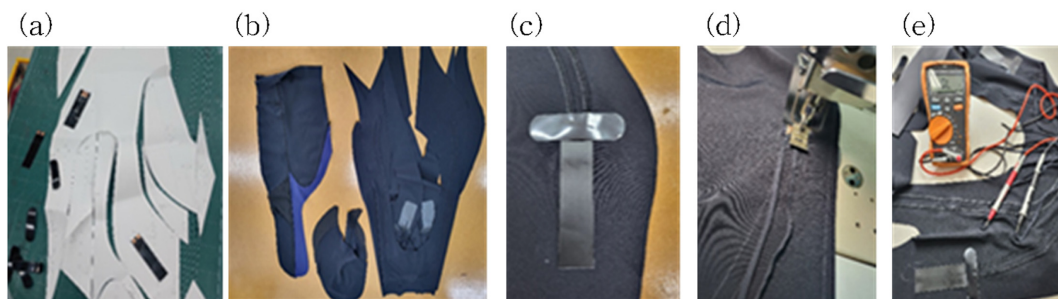


Fig. 12. Sewing method; (a) pattern considering the sensor and wire, (b) pattern blocks, (c) sensor adhesion, (d) wire finishing, (e) resistance measurement after sensor attachment.

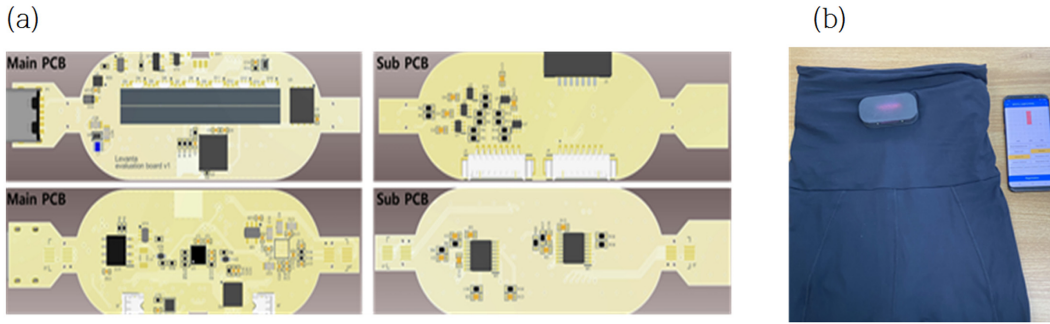


Fig. 13. (a) PCB image, (b) Attached to PCB leggings.



Fig. 14. Smart leggings for online exercise coaching; (a) for women, (b) for men.

4.2. 착용성 평가

의도표집으로 선정된 착의평가자를 프로토타입 스마트 레깅스를 착용한 후 평가를 진행하였고 5단계 리커트 평가 척도를 사용하여 활동성, 수용성, 안전성, 사용 편의성, 작동기능성 측면으로 나누어 Table 5와 같이 정리하였다. 문항에 대한 각각의 평균은 4.0 이상으로 대부분의 문항에서 높게 나타났다. 표본수가 6명으로 매우 적어 통계적으로 유의미하지는 않지만 스마트의류의 프로토타입 개발에 관한 선행연구에서도 소수 피험자가 착의 평가를 진행하고 착용 후 인터뷰 등을 통하여 착용성 평가를 진행한 사례를 참고하여 결과를 해석하였다(Park & Lee, 2018; Hong, 2017).

활동성은 착용 후 활동 시 레깅스의 착용감을 묻는 문항으로 허리의 밀착감, 기기조작, 입고 벗을 때 기기의 방해정도를

묻는 문항으로 구성되어있다. 설문 결과 전체적인 착용감이 좋으며 하이 웨스트 디자인으로 인해 활동 시 허리 말림이 거의 없는 것으로 나타났다. 활동성에 대한 전체적 의견은 ‘만족’, ‘매우 만족’의 의견이 높게 나타났다. 그러나 활동 시 기기에 대한 문항에서 ‘보통’의 의견이 16.7%로 운동 시 기기의 위치에 대해 대부분 만족하지만 스마트 의류에 부착하는 기기의 크기와 위치가 움직일 때 방해가 되는 것으로 보인다. 수용성에 관한 문항은 일반 레깅스와 스마트 레깅스의 차이점과 기기로 인한 긴장감을 묻는 문항으로 ‘만족(66.7%)’, 첫번째 문항에서 ‘매우 만족(33.3%)’의 비율이 높게 나타났다. 안전성과 사용 편의성 문항의 결과에서도 ‘만족’, ‘매우 만족’ 비율이 높게 나타났으며, ‘인체에 안전한가’를 묻는 문항에서는 ‘매우 만족(83.3%)’의 비율이 가장 높게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 객관적으로 안전하다고 확대해석 할 수는 없지만 개발된 프로토타입이 일반 레깅스와 크게 다르지 않아 안전하다고 느끼는데 도움을 주는 것으로 보여진다. 이는 Kang & Hyun(2008)의 연구에서 스마트 의류 디자인은 일반 옷과 비슷하게 디자인하는 것이 소비자들의 위험 지각을 낮추는데 도움을 줄 것이라는 의견과 유사하다. 이처럼 일반 레깅스 디자인에서 크게 벗어나지 않으며 기기의 무게감을 줄이고 센서와 전도선의 연결 부위를 편안하게 부착한 디자인이 소비자의 스마트 의류에 대한 거부감을 줄일 수 있을 것으로 보인다. 그러나 작동 기능성 문항에서는 호흡센서의 기능 만족도를 묻는 문항은 ‘매우 만족’이 높게 나타났으나 대부분 항목에서 ‘만족’의 의견이 다수인 것으로 나타났다. 운동 시 인체를 모니터링 할 수 있는 다양한 센서의 개발이 필요할 것으로 보여진다.

4.3. 전문가 평가

개발된 스마트레깅스 프로토타입에 대하여 전문가 평가를 실시하여 스마트의류의 기능성과 디자인을 개선하고자 하였다. 평가 방법은 착의한 모델의 외관 평가로 이루어 졌으며, 기능성 평가의 평가 항목은 착용성 평가와 동일하며, 착의자의 동작 모니터링을 통해 평가하였다. 모델은 스마트레깅스의 동작 모니터링과 프로토타입의 착용감을 고려하여 M사이즈 남녀 각각 1명을 선정하였다. 평가결과 기능성과 외관 디자인에 관한 모든 항목에서 4.5 이상의 긍정적인 평가를 얻었다. 평가의견을

Table 5. Wearability evaluation descriptive statistical analysis result

(N = 6)

Division	Question	Percentage(%)					
		Very unsatisfied	Slightly dissatisfied	Usually	Satisfied	Very good	Average
Activity	Overall fit			16.7	16.7	66.7	4.3
	Waist tight fit			16.7	33.3	50.0	4.1
	Leggings rolling				16.7	83.3	4.8
	Instrument operation				66.7	33.3	4.3
	Discomfort in dressing				50.0	50.0	4.5
Receptivity	Leggings fit comparison				66.7	33.3	4.3
	Stress on the device			16.7	66.7	16.7	4.0
Safety	Is it safe for human body				16.7	83.3	4.8
	Safety against external impact			16.7	16.7	66.7	4.5
Ease of use	Appropriate location				50.0	50.0	4.5
	Weight				33.3	66.7	4.6
	Convenience of detachment				16.7	83.3	4.8
Operational functionality	Behavior monitoring				50.0	50.0	4.5
	Respiratory sensor function				33.3	67.3	4.6
	Knee stretch motion function				50.0	50.0	4.5
	Hip stretch motion function				50.0	50.0	4.5

살펴보면 아래와 같다.

“전반적 디자인은 인체의 곡선을 고려하여 절개선을 곡선으로 처리하고 일부 부분을 메쉬 원단을 사용하여 비치게 하여 통기성과 심미성을 동시에 만족함”

“색상을 배색으로 처리하여 변화를 주고 날씬해 보이는 효과를 주었으며 전반적으로 디자인이 우수하여 상품성이 있음.”

“기기부의 위치가 상복부에 위치하여 생체 신호를 모니터링 하기에 적합하나 움직임에 방해가 되지 않는지 확인이 필요함.”

“운동 동작의 횟수, 운동량 계산 등 모니터링 기능에 대한 업그레이드를 보완해 나갈 필요가 있음. 심박수, 호흡, 체온의 생체 신호, 운동량 정보는 개인의 건강 관리에 매우 유용한 데이터가 될 것으로 보임.”

전문가의 평가를 보면 디자인적인 측면에서 인체의 곡선, 근육의 모양을 반영한 절개선의 사용, 색상 배색, 원단 선택과 무릎 뒤쪽의 통기성 있는 원단의 사용은 긍정적 평가를 하였다. 그러나 기기부의 크기와 위치, 모양은 개선해야 한다고 평가하였으며, 측정 데이터의 정확성과 유효성은 검증이 필요하다는 의견을 주었다.

전반적으로 외관 디자인에서 사용자의 편의성을 고려한 심미적 디자인으로 평가 되었으며, 기능적인 면에서 정확도를 높이고 기기부의 무게나 디자인을 개선해야한다고 제안하였다.

4.4. 개선방안

스마트의류의 기능성, 편의성, 디자인의 심미성을 개선하기 위해서는 첫째, 기능에 맞는 적절한 센서의 선택 혹은 제작이

무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 인체의 움직임에 방해가 되지 않고 동작을 정확히 센싱하기 위하여 스트레치 원단에 MWCNT를 코팅한 섬유형 동작센서를 제작하여 활용하였으며 이는 딱딱한 전자 소자로 동작을 센싱하는 것에 비하여 착용감이 우수하고 레깅스의 디자인에 적합하다고 하겠다. 스마트의류의 활용 목적에 따라 적절한 센서를 제작 혹은 선택하는 것이 스마트의류의 기능성, 편의성, 심미성을 향상시키기 위한 핵심적인 고려 사항이라고 하겠다. 센서 기술이 발전함에 따라 보다 많은 종류의 섬유형 센서를 활용할 수 있게 되었으며 이러한 섬유형 센서를 적극적으로 활용하는 것이 바람직하겠다. 둘째, 활동에 방해가 되지 않으면서 센서의 기능을 극대화할 수 있는 위치의 선정과 부착 방법이 연구되어야 한다. 본 연구에서는 센서 위치 선정을 위하여 센서 부착 위치를 달리하여 동작 실험을 진행하고 센서의 기능을 검증하였으며 신호 획득이 용이하면서 디자인의 전체적 심미성을 해치지 않는 위치를 선정하고, 부착 방법이 운동 동작을 방해하지 않는지 평가하였다. 섬유형 센서의 부착은 스트레치 필름을 열융착하여 코팅하는 방식을 사용하였는데 이는 센서를 보호하면서 움직임을 센싱하는데 용이하다는 것을 알 수 있었다. 셋째, 신호선의 선택, 연결 방식에 대한 고려가 있어야 한다. 신호선은 운동 동작에 따라 편안하게 늘어나고 다시 복원되어야한다. 이를 위해서 신호선 자체가 스판덱스 원사를 포함하는 것으로 선택하였으며 지그재그 스티치를 이용하여 원단과 결합하였다. 여러 번의 스트레치 반복 실험을 통해 끊김이 없는지 확인할 필요가 있다. 넷째, 기능에 대한 검증과 함께 심미적 디자인이 반영되어야 한다. 여러 번의 실물 제작이 어려우므로 가상 피팅 프로그램을

활용하여 디자인 변경을 시도하고 이를 통해 디자인을 선택하여 실물을 제작하는 방식이 효율적이라고 하겠다. 이 밖에도 적절한 소재의 선택이 주요하며, 세탁성, 내구성에 대한 테스트가 이루어져야 한다.

5. 결 론

본 연구는 비대면 환경에서도 운동 자세를 모니터링하고 코칭할 수 있는 스포츠용 스마트레깅스의 프로토타입을 개발하고 평가하여 스마트의류의 기능성, 편의성, 디자인의 심미성 개선 방안을 제안하였다. 이를 위하여 스포츠용 스마트의류에 관한 선행 연구와 개발 동향을 분석하였으며 운동 자세를 모니터링할 수 있는 센서를 개발하고 운동 동작과 생체 신호를 측정하도록 센서와 기기부의 위치선정과 디자인 설계, 소재 선정, 패턴 설계 과정을 거쳐 프로토타입을 제작하였다. 개발된 스마트레깅스 프로토타입에 대한 착용감 테스트와 전문가 평가를 실시하여 스마트의류의 기능성과 디자인을 개선하는 방안을 제시하였다. 이전 스마트의류 개발에 관한 연구를 살펴보면 센서 개발에 관한 연구(Wang et al., 2019), 센서의 부착위치에 관한 연구(Lee, 2020), 스마트의류 디자인에 관한 연구(Park & Lee, 2018) 등으로 세분화되어 있는 경우가 많고 디자인이나 프로토타입 개발에 관한 연구는 센서 성능이나 부착 방법에 대한 자세한 개발 내용이 빠져 있는 경우가 많아 전체적인 디자인과 성능의 개선을 동시에 고려하기에는 한계가 많았다. 본 연구에서는 기능에 부합하는 센서의 선택과 부착 위치와 방법, 심미성을 고려한 디자인 개발과 제작의 전체 프로세스를 보여줌으로써 스마트의류 개발 시 고려해야 하는 사항을 제시하였다는 데 의의를 둘 수 있겠다.

개인 건강관리에 대한 사회적 수요가 증가하고 생체신호 획득과 과학적 운동 코칭을 위한 스마트의류에 대한 시장도 확대되고 있는 상황에서, 스포츠용 스마트의류 제조를 위한 기초자료로서 의미를 가진다고 하겠다. 그러나 개발된 프로토타입은 하나의 사이즈로 제작되어 제한된 피험자에게 착용하였다는 한계를 지니며, 체형에 따른 비교가 어려웠다. 향후 연구에서는 보다 많은 다양한 체형의 사용자를 대상으로 제작하고 사용성을 비교할 필요가 있다. 또한 동작이 스쿼트와 같은 무릎을 굽히고 앉는 동작에 국한되어 있어 앞으로의 연구에서 보다 다양한 동작을 포함하여 실험하고 디자인에 반영하여야 한다. 호흡과 심박, 체온을 측정하는 벨트 타입의 기기부가 크고 다소 무겁게 느껴지는 것은 기술적으로 개선되어야 할 부분이며 무엇보다 스마트의류가 상용화되기 위해서는 안정성, 내구성, 편의성에 대한 실증적 검증과 기준 마련이 필요하다고 하겠다. 후속연구에서는 본 연구를 기반으로 기능과 디자인 측면에서 개선된 스마트의류를 개발해야 할 것이며, 본 연구가 스마트의류 제품 개발 연구 분야에 도움이 되는 기초 연구로 활용되기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 기본 연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2022R1F1A1074625).

References

- 'AIO Sleeve'. (2018). *KOMODO*. Retrieved April 8, 2022, from <https://komodotec.com/product/aio-sleeve/>
- 'Athos'. (2012). *Liveathos*. Retrieved April 8, 2022, from <https://torontolife.com/style/athos-wearable-tech-workout-gear-sportchek/>
- 'Bio Man100'. (2017). *AiQ Smart Clothing*. Retrieved April 1, 2022, from <https://www.aiqsmartclothing.com/product-service/bioman-plus/>
- 'Cityzen Dshirt'. (2008). *Cityzen Sciences*. Retrieved April 8, 2022, from <http://cityzensciences.fr/en>
- 'Catapult'. (2006). *Payertek*. Retrieved April 12, 2022, from <https://www.catapultsports.com/>
- Chae, J. M., Cho, H. S., & Lee, J. H. (2009). A study on consumer acceptance of commercialized smart clothing. *Emotional Science*, 12(2), 181-192.
- Cho, H. Y., Lee, J. H., Lee, C. K., & Lee, M. H. (2006). Development of smart clothing design prototype for healthcare based on biosignal measurement technology. *Korean HCI Society Conference*, 9(2), pp. 141-150.
- Cho, G. S., Yang, Y. J., & Seong, M. S. (2008). Bio-monitoring smart clothing and E-textile development status. *Journal of the Korean Apparel Industry Association*, 10(1), 1-10.
- Castano, L. M., & Flatau, A. B. (2014). Smart fabric sensors and e-textile technologies - A review. *Smart materials & structures*, 23(5), 053001. doi:10.1088/0964-1726/23/5/053001
- Dehghani, M., Abubakar, A. M., & Pashna, M. (2022). Market-driven management of start-ups - The case of wearable technology. *Applied Computing and Informatics*, 18(2), 45-60. doi:10.1016/j.aci.2018.11.002
- 'Healthwatch'. (2012). *Master Attention*. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.healthwatch.co.uk/>
- Hong, Y. H. (2017). *A study on improving the performance of a smart jacket for cycling*. Unpublished master's thesis, Seoul National University, Seoul
- Haghi, M., Thurow, K., & Stoll, R. (2017). Wearable devices in medical internet of things: scientific research and commercially available devices. *Healthcare informatics research*, 23(1), 4-15. doi:10.4258/hir.2017.23.1.4
- Huang, C. T., Shen, C. L., Tang, C. F., & Chang, S. H. (2008). A wearable yarn-based piezo-resistive sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 141(2), 396-403, doi:10.1016/j.sna.2007.10.069
- Jang, E. J., Jo, H. S., & Cho, G. S. (2018). Development of Nanoweb based PEDOT:PSS electrode prototype for active senior's EMG measuring smart clothing. *Fall Conference of the Korean Society for Emotional Performance, Korea*, pp. 37-38.
- Ko, J. H., Jee, S. H., Lee, J. H., & Kim, S. H. (2018). High durability conductive textile using MWCNT for motion sensing. *Sensors and Actuators A*, 274, 50-56. doi:10.1016/j.sna.2018.02.037

- Kim, J. D., Kim, K. J., Chung, G. S., Lee, J. H., Ahn, J. H., & Lee, S. G. (2010). The mobile health-care garment system for measurement of cardiorespiratory signal. *The KIPS Transactions - PartA, 17A*(3), 145-152. doi:10.3745/KIPSTA.2010.17A.3.145
- Kim, C. M., Kang, K. H., & Kim, E. S. (2015). Active spinning training system using complex biosignals. *Journal of the Korean Contents Association, 15*(7), 591-600. doi:10.5392/JKCA.2015.15.07.591
- Korea Health Promotion and Development Institute. (2020). *Current status and development direction of public digital health care services*. Seoul: Korea Health Promotion Institute
- Kim, S., & Ryoo, K. (2019). Research on information & communication work business in response to the Fourth Industrial Revolution. *The Journal of the Convergence on Culture Technology, 5*(1), 139-146. doi:10.17703/JCCT.2019.5.1.139
- Kang, K. Y., & Jin, H. J. (2008). Transactions - The study on the perceived risk and product innovativeness evaluation of smart clothing. *Fashion & Textile Research Journal, 10*(5), 618-624.
- Lee, S. M., & Lee, D. (2020). Healthcare wearable devices - An analysis of key factors for continuous use intention. *Service Business, 14*(4), 503-531. doi:10.1007/s11628-020-00428-3
- Lee, J. K., Chu, H. J., & Kim, H. Y. (2021). Product case study of smart clothing - Focusing on smart clothing patent application technology. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles, 45*(1), 28-45. doi:10.5850/JKSCT.2021.45.1.28
- Lee, J. K., Lee, S., Kim, J. G., Min, B. K., Kim, Y. I., Lee, K. I., An, K. H., & John, P. (2014). Structure of single-wall carbon nanotubes - A graphene helix. *Small, 10*(16), 3283-3290. doi:10.1002/sml.201400884
- Lee, J. E. (2020). *Development of strain sensor-based smart step compression leggings*. Unpublished doctoral dissertation, Chonnam National University, Gwangju
- Ministry of Trade, Industry & Energy. (2021). *2020 Textile Industry Digital Professional Talent Cultivation Plan, Textile Industry Digital Professional Talent Cultivation Plan Final Report*. Sejong : Government Printing Office.
- 'OMbra'. (2011). *Smart Clothing Lab*. Retrieved April 8, 2022, from <https://smartclothinglab.com/brands/omsignal/>
- Paradiso, R., Loriga, G., & Taccini, N. (2005). A wearable health care system based on knitted integrated sensors. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 9*(3), 337-344. doi:10.1109/TITB.2005.854512
- Park, S. Y. & Lee, J. H. (2018). Development of design prototype of smart fitness wear for self-training based on qualitative analysis of consumer demand. *Journal for the Korean Society Design Culture, 24*(2), 257-267. doi:10.18208/ksdc.2018.24.2.257
- Roh, J. S. (2016). Wearable textile strain sensors. *Fashion & Textile Research Journal, 18*(6), 733-745. doi:10.5805/SFTI.2016.18.6.733
- Research and Development Special Zone Promotion Foundation. (2020). *Smart clothing market*. Seoul: Author.
- 'Sensoria® smart T-shirt'. (2012). *Sensoria*. Retrieved April 8, 2022, from <https://www.sensoriafitness.com/>
- 'Siren Smart Socks'. (2016). *Siren*. Retrieved April 12, 2022, from <https://www.siren.care/certified-providers/>
- Song, H. Y., Kim, J. E., & Kim, T. N. (2020). Artificial intelligence and health communication. *Journal of Communication Research, 57*(3), 196-238. doi:10.22174/jcr.2020.57.3.196
- Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency. (2021). *SME Strategic Technology Roadmap_Bio Health 2020-2022*. Sejong: Jinhan M&B
- Shim, B. S., Chen, W., Doty, C., Xu, C., & Kotov, N. A. (2008). Smart electronic yarns and wearable fabrics for human biomonitoring made by carbon nanotube coating with polyelectrolytes. *Nano Letters, 8*(12), 4151-4157. doi:10.1021/nl801495p
- 'SUPA Powered Sports Bra'. (2016). *Movesense*. Retrieved April 12, 2022, from <https://www.movesense.com/showcase/supa/>
- Technology development trends and application cases and industry analysis for each major application field of smart textiles*. (2021). Seoul: Good Information.
- Tsai, T., You, K., Ma, Y., & Chao, Y. (2014). CGU smart clothes platform - Development of a gateway device and real-time mobile display. *IEEE-EMBS Diagnostics and Health Informatics (BHI), pp.* 17-20. doi:10.1109/BHI.2014.6864293.
- 'Nadi X'. (2016). *Wearable X*. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.wearablex.com/pages/how-it-works>
- Wang, C., Xia, K., Wang, H., Liang, X., Yin, Z., & Zhang, Y. (2018). Advanced carbon for flexible and wearable electronics. *Advanced Materials, 31*(9), 1801072. doi:10.1002/adma.201801072
- Wang, J., Lu, C., & Zhang, K. (2019). Textile-based strain sensor for human motion detection. *Energy Environ. Mater, 3*, 80-100. doi:10.1002/eem2.12041
- Yamada, T., Hayamizu, Y., & Yamamoto, Y. (2011). A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection. *Nature Nanotech, 6*, 296-301. doi:10.1038/nnano.2011.36

(Received October 4, 2022; 1st Revised October 12, 2022;
2nd Revised October 25, 2022; 3rd Revised November 3, 2022;
Accepted November 30, 2022)