

OLED 기반 스마트 발광 안전복 개발 연구

김수지 · 유기완 · 조석호[†]

전남대학교 의류학과

Research on Development of OLED-based Smart Luminescent Safety Clothing

Su-Ji Kim, Gi-Wan Yu, and Seok Ho Cho[†]

Dept. of Clothing and Textiles, Chonnam National University; Gwangju, Korea

Abstract: In recent times, many accidents have occurred due to challenges in accurately identifying the location of workers, posing a significant societal concern demanding resolution. Therefore, it is essential to develop smart luminescent safety attire to enhance worker visibility in dim environments, thereby curbing accidents. In this study, we propose the utilization of textile-based OLED devices in creating smart luminescent safety clothing, aiming to augment the discernibility of workers over extended distances in low-luminance environments. In view of this, we engineered an attachable textile-based OLED module that balances high luminous efficiency with wearer comfort. Subsequently, a prototype smart luminescent safety clothing was demonstrated, and a performance evaluation was conducted to determine whether any discomfort occurred on wearing it. The fabricated OLED luminous module exhibited high luminance, thus validating the feasibility of creating smart luminescent attire with adequate brightness. Furthermore, there was no significant wearing stress observed, even after wearing it for more than 8 hours, and there was no impediment to various work-related movements. Through this research, we successfully demonstrated OLED based on smart luminescent safety clothing, which has the potential for wide-ranging applications across various industries and occupations, and is expected to play a crucial role in averting safety incidents.

Key words: textile-based OLED (직물 기반 OLED), smart textile (스마트 텍스타일), luminescent safety clothing (발광 안전복)

1. 서 론

산업 기술의 발달로 인하여 사회 전반에 걸쳐 다양한 개발 사업이 진행되고 있으며 산업 현장에서 종사하는 근로자의 수가 크게 증가하고 있다. 하지만 산업 근로자의 증가와 함께 산업 재해자의 수 또한 빠르게 증가하는 추세를 보이고 있으며 이는 반드시 해결해야 할 사회적 문제로 떠오르고 있다. 고용노동부 산재예방보상정책국 산업재해 현황 분석에 따르면 산업 현장 근로자 수는 2015년 17,968,931명에서 2021년 기준 19,378,565명으로 증가하였으며, 이와 동시에 근무 중 재해자의 수도 2015년 90,129명에서 2021년 기준 122,713명으로 꾸준히 늘어난 것을 볼 수 있다(Occupationalhealthblog, 2022). 2022년 산업 재해 현황 통계에 따르면 건설업 (53%), 제조업

(27%), 기타 업종 (20%) 순으로 재해로 인한 사망자가 발생되었으며, 재해 유형별로는 떨어짐 (52%), 끼임 (17%) 등의 기본적인 안전 수칙 미준수로 인한 사고 외에도 부딪힘 (12%), 물체에 맞음 (10%), 깔림 및 뒤집힘(9%) 등 다양한 형태로 발생하였다(Ministry of Employment and Labor, 2022). 이러한 재해 유형 중 부딪힘, 깔림과 같은 사고는 실제로 어둡고 협소한 공간에서 작업자의 위치를 제대로 식별하지 못하여 발생하는 경우가 대부분이다(“The government's”, 2022; “Darkness poses”, 2021). 또한 고용노동부의 건설공사 사망사고 분석 결과에 따르면 기계 및 중장비에 의한 사망사고가 전체의 50%에 이르며 이 중 대부분의 사고가 중장비 운전자가 근처의 작업자를 인식하지 못해 발생한다고 한다. 작업자의 위치를 인식하지 못해 발생하는 사고를 줄이기 위해 전문 신호수를 현장에 배치하고 있지만 아직까지도 신호수들을 위한 안전 규정이나 교육이 미흡해 큰 효과를 보지 못하고 있으며 오히려 적절한 안전 장비의 부재로 인해 신호수의 사망 사례가 꾸준히 발생하고 있다(“Signalman is”, 2022; “Only 4 hours”, 2023). 근로자의 위치를 정확히 식별하지 못해 발생하는 안전 문제는 낮은 조도 환경에서 근무하는 미화원, 야간 배달원 등과 같은 다양한 직종에서도 꾸준히 발생하며 인명 사고로 이어지고 있다.

근로자의 위치를 확실하게 파악하지 못해 발생하는 안전사

[†]Corresponding author: Seok Ho Cho

Tel. +82-62-530-1342

E-mail: jsh818@jnu.ac.kr

©2024 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). 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.

고를 방지하기 위한 기능성 안전복의 개발은 꾸준히 진행되었으며 시야가 제한되는 저조도 환경에서 근무하는 작업자들의 식별을 도와 안전을 확보하기 위해 개발된 대표적인 사례로는 재귀 반사 필름을 적용한 안전복이 있다(Yoon et al., 2018) 재귀 반사 필름은 필름 표면으로 빛이 입사되었을 때 입사된 빛을 들어온 방향 그대로 되돌려 보내 입사되는 빛의 각도와 상관없이 들어온 방향으로 반사하는 특징을 보인다. 일반적으로 의복에 사용되는 직물보다 반사 특성이 매우 뛰어나 눈에 잘 띄며 저조도 환경에서 식별 가능한 거리가 향상되어 착용자를 위험에서 보호하는 기능을 갖는다. 하지만 재귀 반사 안전복은 재귀 반사 필름을 의복에 부착하는 형태로 일반적인 직물 소재보다 무겁고 유연성이 떨어지는 기계적 특성을 갖기 때문에 재귀 반사 필름이 적용된 안전복을 착용할 때 착용자의 활동성이 저하되며 반복적인 세탁을 진행할수록 세탁 과정에서 재귀 반사 필름이 손상되어 반사율이 감소하는 단점이 존재한다. 무엇보다도 재귀 반사 필름이 적용된 안전복은 스스로 빛을 발생시킬 수 없고 외부에서 들어오는 빛을 반사하는 수동적인 방식이기 때문에 외부에서 충분한 빛이 입사되지 못하는 저조도 환경에서는 반사 효율이 떨어져 착용자의 식별 효과가 크게 떨어지는 문제가 발생한다(“Glittering reflective material”, 2020). 따라서 어두운 환경에서 근무하는 착용자의 위치를 더 효과적으로 인지시키고 안전사고를 방지하기 위해선 스스로 빛을 발광할 수 있는 스마트 발광의류의 개발이 반드시 필요하다.

발광 의류 구현을 위해서 최초로 시도되었던 방법은 조명으로 넓게 활용되고 있는 Light Emitting Diode(LED) 소자를 의복에 부착하고 전기적으로 연결하는 방식이었다(Cochrane et al., 2011). 이 방식은 LED 소자가 보여주는 자발광 특성, 낮은 구동 전압, 뛰어난 발광효율 등의 장점들을 그대로 활용할 수 있었지만 실리콘 기반의 LED 소자는 단단하고 유연성이 전혀 없기 때문에 의복에 LED 소자를 많이 부착할수록 의복 전체의 유연성이 크게 저하되었으며 착용자가 느끼는 스트레스가 커지는 치명적인 단점을 나타내어 성공적으로 상용화되지는 못하였다. LED 소자를 의복에 부착하여 발광 의류를 구현할 때 발생하는 단점들을 해결하고자 광섬유를 활용하여 발광의류를 개발하는 방식이 새롭게 시도되었다. 광섬유는 광 통신에 활용될 목적으로 개발되어 전반사 효과를 통해 빛을 손실없이 전달해주는 통로의 역할을 하지만 발광 의류를 개발하는 연구자들은 광섬유 표면의 클래딩층이 손상되었을 때 전반사가 억제되어 빛이 광섬유 표면으로 방출되는 현상에 주목하여 새로운 형태의 발광 의류를 구현하고자 하였다(Koncar, 2005). 이때 광섬유 표면의 클래딩층이 균일하게 손상될수록 더 많은 빛이 방출될 수 있기 때문에 광섬유의 클래딩층을 인위적으로 손상시키는 다양한 방법들이 고안되었다. 발광의류에 활용되는 광섬유는 플라스틱 재질이지만 직경이 작은 섬유 형태를 가지고 있어 일정 이상의 유연성을 만족하여 일반적인 섬유와 함께 직조되어 직물을 형성할 수 있으며 LED 기반의 발광의류가 가지는 낮은 유연성 문제를 극복할 수 있었다. 하지만 광섬유는 빛

을 전달해주는 역할로 스스로는 발광할 수 없기 때문에 추가적인 광원이 반드시 필요했으며 가볍고 소형인 LED 소자가 광섬유 기반 발광의류의 광원으로 사용되었다(Song & Cho, 2014). 광섬유 기반의 발광의류를 구현할 때 하나의 LED 광원에 수백 가닥의 광섬유를 커넥터로 연결하여 빛을 공급하는 방식을 활용했기 때문에 개별적인 광섬유에 공급되는 빛의 양이 매우 적어 필연적으로 광섬유 표면에서 방출되는 빛도 약할 수밖에 없다(Kim et al., 2011). 이렇듯 광섬유 기반의 발광의류는 10 cd/m^2 미만의 매우 낮은 휘도를 보여주어 일반적인 조도 환경에선 눈으로 확인이 어렵고 매우 어두운 제한적인 환경에서만 인식이 가능했다. 스스로 발광할 수 없고 고효율의 광원을 활용해도 매우 낮은 휘도를 보여준다는 치명적인 단점으로 인해 광섬유 기반의 발광의류 또한 성공적인 상용화를 이루지 못하였다.

이처럼 스마트 발광 의류 구현을 위해 다양한 연구들이 꾸준히 수행되었지만 각 방식마다 큰 단점이 존재하여 성공적인 상용화는 이루어지지 못하였다. 그러다 최근 차세대 디스플레이로 많이 활용되고 있는 Organic Light Emitting Diode(OLED)가 스마트 발광 의류를 위한 새로운 광원 소자로 관심을 받고 있다. OLED 소자는 LED와는 다르게 유연성이 높은 유기물로 구성되어 있으며 소자의 총 두께도 수백 nm로 매우 얇아 태생적으로 뛰어난 유연성과 형태 안정성을 만족한다. 따라서 OLED 소자는 다양한 폼팩터에 적용이 가능하며 직물 기반으로 제작되어 의복에 적용되어도 의복 전체의 기계적 유연성을 떨어뜨리지 않기 때문에 착용자의 스트레스를 최소화할 수 있다. 또한 스스로 발광하는 자발광 소자이기 때문에 광섬유와 다르게 별도의 광원이 필요 없고 인체에 무해한 6-10 V 이내의 낮은 전압에서 높은 휘도를 구현할 수 있어 광섬유를 활용한 발광 의류의 치명적인 단점인 낮은 휘도 문제도 해결 가능한 장점이 있다. 이에 본 연구는 야간 작업자 및 저조도 환경에서 근무하는 근로자들의 식별 가능 거리를 향상시키고 안전하게 보호하면서도 착용 스트레스를 최소화할 수 있도록 직물 기반의 OLED 소자를 활용한 스마트 발광 안전복을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 스마트 발광 안전복은 착용자의 필요에 따라 발광 기능을 선택적으로 사용할 수 있도록 발광 모듈을 탈부착가능한 형태로 설계하여 일상복으로도 착용이 가능하며 OLED 소자의 가벼운 무게와 유연한 기계적 특성을 활용하여 착용자의 활동성에 제약을 주지 않도록 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 스마트 발광의류 (Smart luminescent clothing)

스마트 발광의류는 의복에 내장 또는 탈부착이 가능한 발광 소자를 통해 빛을 발현하는 기능을 지닌 스마트 의류의 일종이다. 이는 주변 환경의 온도나 특정한 조건에 따라 섬유의 색상이 변하는 기존의 수동적 특성을 가진 의류와 대조적으로, 발광소자를 활용해 빛을 발산하는 원리를 활용하여 착용자가 직

접 발광을 조절할 수 있는 능동적인 특성을 갖추고 있다. 이러한 스마트 발광 의류의 기능은 크게 세 가지 범주로 나눌 수 있다. 첫번째 범주인 엔터테인먼트 기능은 착용자에게 흥미와 즐거움을 제공하며, 의복에서 발생하는 빛을 통해 시각적으로 흥미로운 경험을 제공한다. 두번째 범주는 커뮤니케이션 기능으로 착용자는 스마트 발광 의류를 통해 메시지를 전달하고 소통할 수 있으며, 이는 의사소통의 보조적인 도구로 사용된다. 마지막 범주인 안전 보호 기능은 본 연구에서 목표로 하는 내용으로 의복의 발광을 통해 착용자의 안전을 보호하고 다양한 활동 중에 위험을 최소화하는 역할을 할 수 있다(An & Lim, 2020; Park et al., 2009)

2.2. OLED 소자 (Organic Light Emitting Diode)

OLED는 전기에너지를 빛 에너지로 변환시켜주는 발광소자로 LED와는 다르게 유기물질 기반으로 구성되어 있으며 소자의 총 두께가 수백 nm 정도로 매우 얇아 기계적인 특성이 뛰어나고 낮은 전압으로 구동이 가능하기 때문에 다양한 분야에 활용되고 있다. OLED는 기본적으로 두 전극(음극과 양극) 사이에 발광층이 위치해 있는 구조를 가지며 구동을 위해 전압을 인가하면 양극과 음극 사이에 전위차이가 생겨 전기장이 발생하고 발생한 전기장에 의해 음극에는 전자가 양극에는 정공이 주입된다. 주입된 전자와 정공은 수송층을 통과하여 발광층에 도달하여 전자-정공 쌍(엑시톤)을 형성하고 재결합하는데 이 과정에서 엑시톤의 전기 에너지가 빛 에너지로 변환되어 발광현상이 일어나게 된다. 이때 OLED에서 방출되는 빛의 파장은 발광 물질의 에너지 밴드갭과 반비례 관계에 있으며 에너지 밴드갭이 다른 발광 물질을 활용하면 다양한 색을 구현할 수 있다. 최초로 보고되었던 OLED 소자는 음극과 양극 사이에 발광층만 존재하는 간단한 구조였으나 더 많은 전자와 정공을 발광층에 도달시켜 발광효율을 높이기 위해서 전자와 정공의 이동에 도움을 주는 기능층이 추가된 다층구조로 발전하였다. Fig. 1은 최근 제작되는 기본적인 OLED 소자의 구조를 보여주며 각 기능층의 역할은 다음과 같다(Jeong et al., 2021).

-HTL (Hole Transport Layer): 양극으로 주입되는 정공이 발광층으로 도달할 수 있도록 도움을 주는 기능층이다. 양극과 발광층 사이의 에너지 차이를 계단처럼 나누어 더 많은 정공이 발광층에 도달할 수 있도록 한다.

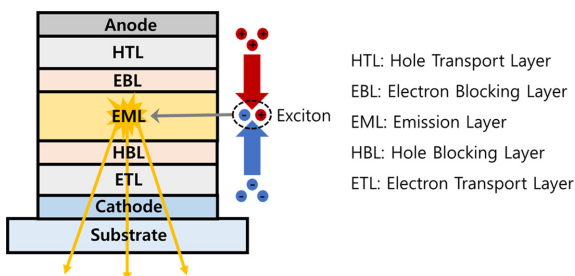


Fig. 1. The structure of a multi-layered OLED.

- EBL (Electron Blocking Layer): 발광층에 도달한 전자들을 가두는 역할을 하는 기능층이다. 발광층에 도달한 정공과 전자들이 최대한 많은 엑시톤을 형성해야 더 많은 빛을 생성되어 효율이 높아지기 때문에 음극과 양극 사이에 인가되는 전압으로 인해 발광층에 도달한 전자들이 양극 방향으로 휩쓸리는 현상을 막아주어 엑시톤 생성 확률을 높여준다.

- EML (Emission Layer): OLED 소자에서 실제 발광이 일어나는 층이다. 발광층에 도달한 정공과 전자가 엑시톤을 형성한 후 재결합을 하는 과정에서 엑시톤의 전기 에너지가 빛 에너지로 변환되며 광자가 방출된다.

- HBL (Hole Blocking Layer): EBL과 마찬가지로 발광층에 도달한 정공이 음극 방향으로 휩쓸리지 않도록 발광층 안에 가두어 엑시톤 생성 확률을 높여주는 역할을 한다.

- ETL (Electron Transport Layer): HTL과 마찬가지로 음극을 통해 주입되는 전자가 발광층에 도달할 수 있도록 도움을 주는 기능층이다. 음극과 발광층 사이의 에너지 차이를 계단처럼 나누어 더 많은 전자가 발광층에 도달하게끔 도움을 준다.

3. 연구방법

본 연구는 저조도 환경에서 근무하는 근로자들의 식별 가능 거리를 증가시키고 안전을 확보할 수 있도록 직물 기반의 OLED 발광 모듈을 활용한 스마트 발광 안전복을 구현하고자 한다.

3.1. 스마트 발광 안전복 구현을 위한 모듈 설계

기존 LED 기반의 발광 의복이 가지고 있던 낮은 유연성으로 인해 발생하는 착용자의 불편함이나 광섬유 기반의 발광 의복에서 보이는 발광 모듈의 낮은 휘도로 인한 인식의 어려움 같은 단점들을 해결하기 위해서 본 연구에서는 가볍고 유연하며 자발광이 가능한 직물 기반의 OLED 소자를 발광 모듈로 활용하였고 이를 통해 착용자의 불편함 없이 높은 발광 효율을 만족하여 발광 안전복의 성능을 극대화할 수 있는 형태로 시제품을 설계하였다. Fig. 2는 스마트 발광의류의 발광 모듈 구현을 위한 구성 요소들을 보여준다. 직물 기반 OLED 소자에 전력을 공급하기 위한 직물 기반 회로는 전도사를 통해 구현하였다. 해당 전도사는 소이텍스(Soitex)사에서 판매하는 중국 생산 제품으로 일반 재봉틀을 활용하여 봉제가 가능한 장점이 있으며 280 denier 두께의 나일론 원사에 은(Ag)이 증착 되어있는 구조로 나일론 85%, 은 15%의 구성비와 1~2 Ω/cm의 낮은 선저항을 만족한다. 본 연구에선 OLED 소자의 구동을 위해 코인 형태의 리튬이온 배터리 2개를 직렬로 연결하여 활용하였으며 코인 형태의 리튬이온 배터리를 직물 기반 전도사 회로에 탈부착이 가능하도록 코인셀 배터리 홀더를 활용하였다. OLED 구동 시 2개의 코인형 리튬이온 배터리가 직렬로 연결되어야 하기 때문에 2개의 코인셀을 직렬로 연결해주고 전력 공급을 on/off 해주는 스위치 기능이 있는 캠캄사의 중국생산 제품을 이용하였다. 또한 OLED 소자와 배터리 홀더를 전도사 회로에

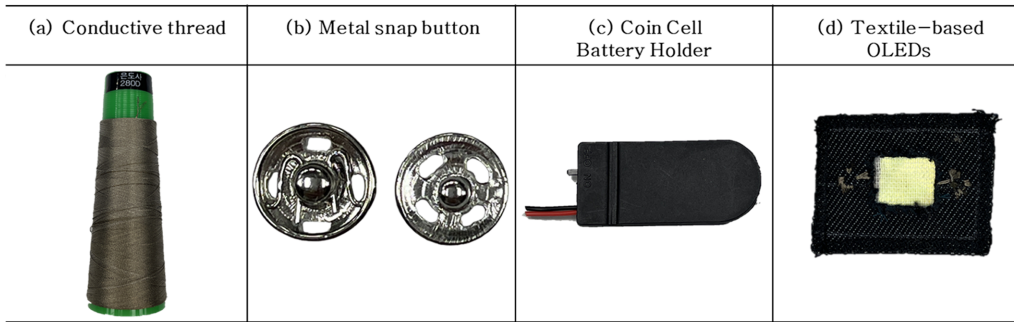


Fig. 2. Components for the fabrication of the luminescent module of a smart luminous safety clothing.

연결할 때 외경 6 mm의 금속 스냅 단추를 활용하여 탈부착이 가능하면서도 전기적으로 안정적으로 연결될 수 있도록 하였다. 스마트 발광 안전복 설계 과정에서의 위의 구성 요소들을 활용하는 구체적인 방법 및 이유에 대해선 결과 및 논의 부분에서 조금 더 상세히 다루고자 한다.

3.2. 스마트 발광 안전복을 위한 직물 기반 OLED 발광 모듈 제작 및 성능평가

Fig. 2의 (d)와 Fig. 3은 각각 스마트 발광 안전복을 위해 제작된 직물 기반 OLED 소자의 사진과 구성도를 보여준다. 본 연구에서 직물 기반 OLED 소자를 제작할 때 중요하게 고려한 두가지 사항이 있는데, 첫째는 기관의 역할을 하는 직물 표면의 거칠기 제어이며 두번째는 투명하면서 동시에 높은 유연성을 갖는 전극제작이다. 첫째 고려사항의 경우, OLED 소자의 총 두께는 수백 nm로 매우 얇은 반면 직물 기관의 표면은 수십~수백 μm 의 거칠기가 존재하여 직물 기관에 바로 OLED 소자를 제작하면 직물의 심한 거칠기로 인해 소자가 안정적으로 동작하지 못한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 평평한 표면을 갖는 10 μm 의 PET 박막위에 OLED 소자를 공정한 후 실리콘 기반의 신축성 접착 물질을 활용하여 제작된 OLED 소자 전체를 직물 기관에 전사하는 방법을 선택하였다. 이때 전사된 OLED 소자에서 발생하는 빛이 직물 기관 방향으로 나오도록 설계했는데 직물 기관을 메쉬 형태로 선택하여 OLED에서 발생한 빛이 직물 기관을 통과하며 산란이 발생하도록 하였으며 직물 기관을 통과한 빛이 산란을 통해 은은하게 퍼져 다

른 작업자의 시야를 방해하지 않도록 유도하였다. 두번째 고려 사항의 경우, 직물 기반의 OLED 소자를 안전복에 활용할 때 높은 유연성을 만족해야 하는데 이를 위해 OLED 소자의 전극 역시 유연해야 하며 동시에 발광층에서 발생하는 빛이 소자 밖으로 효과적으로 빠져나오기 위해 투명해야 한다. 본 연구에선 유연하면서 투명한 전극을 구현하기 위해 매우 얇은 두께의 은(Ag) 필름과 반사를 억제해주는 capping layer를 활용하였으며 OLED 소자의 전체적인 제작 과정은 다음과 같다. 투명 유연한 음극 제작을 위해 반사를 억제하는 capping layer 역할인 삼산화몰리브덴(MoO_3) 30 nm와 음극 역할을 하는 은(Ag) 10 nm를 열 증착을 통해 증착하고 그 위로 ETL의 역할을 하는 산화아연(ZnO) 20 nm와 polyethylenimine(PEI) 5 nm를 스핀 코팅을 통해 증착한다. 그 후 EML로 노랑색 빛을 내는 발광물질인 Super Yellow(SY) 80 nm를 스핀 코팅을 통해 증착하고 HTL의 역할을 하는 삼산화몰리브덴(MoO_3) 10 nm와 양극의 역할을 하는 은(Ag) 100 nm를 열 증착을 통해 증착해주었다. 최종적으로 스마트 발광 안전복에 사용한 발광 모듈의 전체적인 틀은 데님 직물로, OLED 소자에서 빛이 나오는 부분은 메쉬 직물로 구성해주었다. 제작된 OLED 발광 모듈의 발광특성을 측정하기 위해 Source Meter(Keithley 2400)와 분광휘도계(CS-1000A)가 활용되었으며 인가되는 전압에 따른 휘도값과 단위 전류당 얼마만큼의 빛이 발생하는지를 의미하는 전류효율을 성능 지표로써 측정하였다.

Fig. 4는 SY를 EML로 사용한 소자의 Electroluminescent (EL) spectrum을 보여준다. SY의 EL spectrum으로부터 주 발광 파장 대역은 550 nm이지만 장파장 대역까지 tail이 형성되기 때문에 우리 눈에 노란색으로 인식되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 스마트 발광 안전복의 EML로 SY를 사용한 이유는 다음과 같다: 1) SY는 넓은 발광 스펙트럼을 가지고 있어 눈에 부담을 덜 주는 은은한 노란색 빛을 발광하며, 2) 간단한 용액 공정을 통해 제조할 수 있고 뛰어난 공정 재현성을 보여주며 고분자 발광 물질 중에서 높은 효율과 긴 구동 수명을 만족한다.

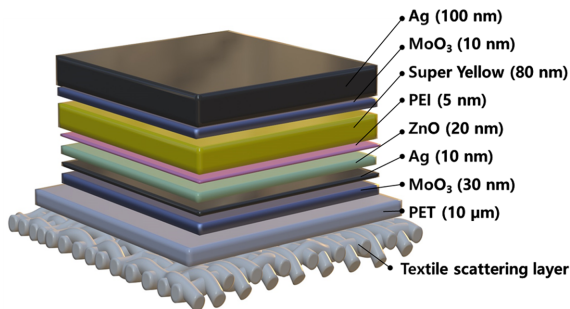


Fig. 3. Structure of textile-based OLED components.

3.3. 스마트 발광 안전복 시제품 제작 및 실착 평가

스마트 발광 안전복의 시제품을 제작하고 실착하여 코인셀

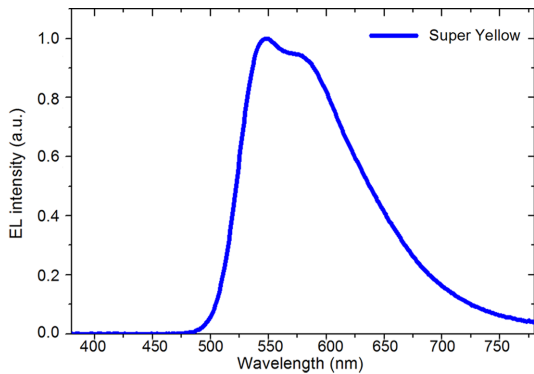


Fig. 4. EL spectrum of Super Yellow based OLEDs.

로 구성된 전원부 및 OLED 모듈로 인한 무게 증가나 착용 불편함이 발생하지 확인한다. 스마트 발광 안전복의 시제품은 내구성이 뛰어나며 작업복에 많이 쓰이는 데님 직물을 활용하였으며 착용자의 다양한 체형을 고려하여 어깨 부분의 스트랩을 통해 안전복의 길이를 자유롭게 조절할 수 있도록 제작하였다. 제작된 스마트 발광 안전복을 착용했을 때 OLED 발광 모듈로 인한 불편함을 느끼거나 움직임에 제약이 생기는지 확인해보기 위해 8시간 동안 착용하고 일상적인 동작을 취하며 착용 평가를 진행하였다. 착용 평가의 착용 시간은 안전복을 착용하는 근로자들의 업무 시간을 고려하여 8시간으로 선정하였고 앉았다 일어섬 등과 같이 착용자가 근무하면서 발생할 수 있는 다양한 움직임을 시도해 보면서 OLED 발광 모듈로 인한 불편함이나 방해가 생기는지 중점적으로 평가하였다.

4. 결과 및 논의

4.1. 스마트 발광 안전복 구현을 위한 모듈 설계

현재까지 다양한 형태의 안전복 제품들이 개발되었지만 본

연구에서는 한 벌로 구성되어 착용이 간편하고 원단이 가슴까지 올라와 몸 전체를 보호할 수 있는 오버롤 팬츠의 형태로 스마트 발광 안전복의 시제품을 제작하였다. 오버롤 팬츠는 작업복 및 안전복으로 알려져 있으며 예로부터 현재까지 다양한 산업 현장에서 많은 작업자들이 착용해온 대표적인 의복이다. 산업 현장에서 발생할 수 있는 각종 위험상황에서 신체를 보호해주며 착용하기 쉽다는 이점과 더불어, 의복에 여러 포켓이 존재하여 작업자들의 공구나 물건 수납에 도움을 준다. 또한 전신을 모두 감싸고 있는 점프 슈트와는 다르게 상체 부분은 소매 대신 스트랩으로 구성되어 있어 상대적으로 통기성이 우수하며 작업중 발생하는 땀으로 인한 착용자의 불편함을 줄여줄 수 있다. 이러한 장점들을 바탕으로 오버롤 팬츠는 다양한 작업 환경에서 효율적으로 사용될 수 있기에 본 연구가 제안하는 발광 안전복의 형태로 채택하였다. 현재까지 주머니 위치, 크기, 스트랩 형태 등 여러 구성 요소들의 변화에 따른 여러 형태의 오버롤 팬츠가 발표되었지만 본 연구에서는 보편적인 오버롤 형태의 안전복을

구현하기 위해 영국 “Merchant&Mills” 사의 클래식 패턴을 채택하여 시제품 설계에 활용하였다(Merchant&Mills, 2023). 스마트 발광 안전복의 전체적인 설계 패턴 및 OLED 기반 발광 모듈이 적용된 시제품의 구성도는 Fig. 5와 같다. 설계된 발광 안전복의 시제품은 한국 남성의 평균 신장인 172.5 cm (Korean Agency for Technology and Standards, 2020)에 맞추어 높이 148 cm, 폭 54 cm로 디자인되었으며, 착용 시 어깨 부분의 스트랩을 통해 착용자의 체형에 맞춰 길이 조절이 가능하도록 설계하였다. 설계한 발광 안전복의 재질은 외부환경의 물리적인 위험 요소들로부터 착용자를 보호할 수 있도록 내구성이 뛰어난 데님 직물을 활용하였다. 데님 직물은 매우 질기고 내구성이 높기 때문에 산업 근로자들을 위한 작업복에 많이 활용되어왔으며 작업 중 발생하는 격한 움직임에도 마모가 적

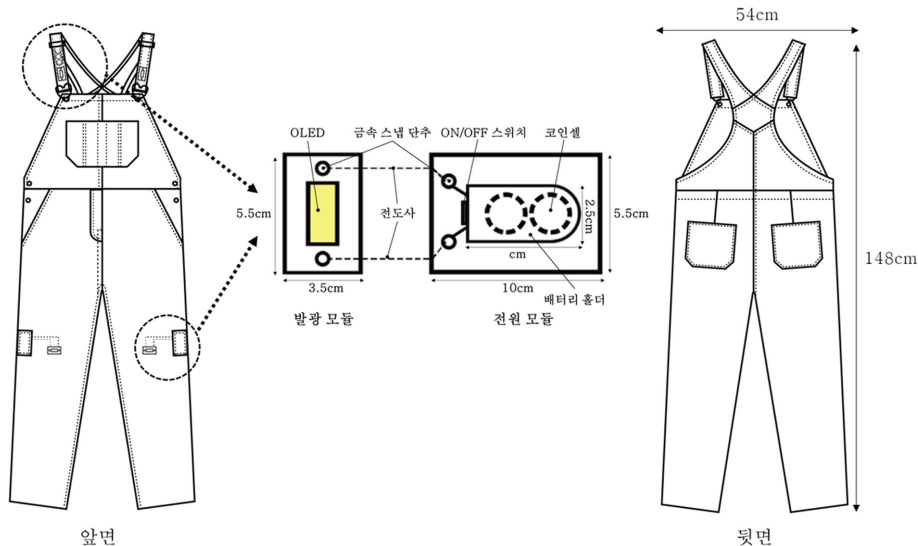


Fig. 5. Design patterns for smart luminous safety clothing and schematic for OLED-based luminous modules.

다는 이점이 있다.

일반적으로, 작업을 위한 안전복은 먼지 등의 오염 물질에 노출되는 환경에서 착용되기 때문에 오염물질을 제거하기 위한 세탁 가능성이 고려되어야 한다. 본 연구에서 제안하는 스마트 발광 안전복 또한 오염 제거를 위한 세탁이 필수적이므로 발광 안전복을 설계할 때 반복적인 세탁이 가능하도록 발광 모듈의 구성요소들이 탈부착될 수 있도록 설계하였다. Fig. 5 가운데에 삽입된 그림은 스마트 발광 안전복을 위한 OLED 기반 발광 모듈의 확대된 도면을 보여준다. OLED 소자와 전원을 연결해주는 회로 구성을 위해 은이 증착된 전도사를 활용했으며 전력 손실을 최소화하기 위하여 전도사 5 가닥을 겹쳐 봉제하여 직물 기반의 전력 회로를 구성하였다. 제작된 직물 기반 회로는 $0.2 \Omega/\text{cm}$ 의 낮은 선저항이 측정되었고 큰 전력손실 없이 전력을 전달할 수 있음이 확인되었다. 안정적인 발광을 위한 전력원으로는 부피가 작고 가벼우면서도 3.6 V의 높은 출력 전압을 제공하는 코인 형태의 리튬이온 전지(LiR2032) 2개를 직렬로 연결하여 사용하였으며, 이를 전력 회로에 연결하고 발광 모듈의 on/off를 제어할 수 있도록 스위치 기능이 포함된 배터리 홀더를 통해 직물에 고정하였다. OLED 소자에 전원을 연결하기 위해 전도사 회로를 설계할 때 전원과 OLED 소자 사이를 최단거리로 연결하여 전력이 손실없이 전달될 수 있도록 하였으며 OLED 소자 및 배터리 홀더는 금속 스냅 단추를 활용하여 전도사 회로와 연결되어 세탁을 위한 탈부착이 가능하면서도 전기적으로 연결될 수 있도록 구성하였다. 발광 모듈의 전원을 구성할 때 부피가 큰 9 V 배터리 대신 2개의 코인셀을 직렬로 연결하여 활용하였는데 OLED 소자의 특성상 6-7 V의 낮은 전압으로도 충분히 밝은 휘도를 보여주며 보다 가벼운 무게로 착용자의 스트레스를 최소화할 수 있기 때문이다. 스마트 발광 안전복을 설계할 때 사용할 발광 모듈의 개수와 배치는 매우 중요한 고려사항이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 착용자가 쉽게 인식될 수 있으면서 상·하체 관절과 떨어져 있어 착용자의 움직임에도 굽힘 스트레스를 크게 받지 않는 양쪽 가슴 상단과 허벅지 하단에 OLED 발광 모듈을 배치하였다. 설계된 스마트 발광 안전복에는 총 4개의 발광 모듈이 사용되었으며 원활한 전력 공급을 위해 각 모듈마다 전력원을 배치하였다. 앞가슴 상단에 위치한 OLED 발광 모듈의 경우, 배터리 홀더는 착용시 이질감을 최소화하기 위해 스트랩 사이 중간에 배치한 후 금속 스냅 단추를 통해 스트랩에 제작된 전도사 회로와 연결하였다. 발광 모듈은 스트랩의 폭에 맞춰 $3.5 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$ 의 크기로 제작하였으며 발광 모듈의 전체적인 틀은 데님 직물로, OLED 소자로부터 빛이 나오는 부분은 메쉬 직물로 구성된 후 배터리 홀더와 동일한 방법으로 전도사 회로와 탈부착이 가능하도록 연결해 주었다. 허벅지 하단에 위치한 OLED 발광 모듈의 경우, 산업 현장에서 노출될 수 있는 외부의 이물질과 충격으로부터 배터리 홀더를 보호하기 위하여 $10 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$ 규격의 포켓을 설계해 주었다. 발광 모듈의 경우 상단 모듈과 같은 방식으로 제작하였으며 전도사 회로와의 연결 방

법도 상단 모듈과 동일하게 금속 스냅 단추를 활용해 탈부착이 가능하도록 하였다.

4.2. 스마트 발광 안전복을 위한 직물 기반 OLED 발광 모듈 제작 및 성능평가

스마트 발광 안전복의 발광을 위한 직물 기반의 OLED 발광 모듈을 제작한 후 성능평가를 진행하였다. Fig. 6(a)는 제작된 직물 기반 OLED 모듈의 전류밀도-전압 곡선과 전압에 따라 측정된 휘도 값을 보여주며 OLED 모듈의 휘도 측정은 빛이 들어오지 않는 암실 환경에서 진행되었다. Fig. 6(a)로부터 제작된 직물 기반 OLED 모듈에 10 V의 전압이 인가되었을 때 최대 10000 cd/m^2 가 넘는 휘도값이 측정되었는데 일반적으로 사용되는 모니터의 최대 휘도가 $400\text{-}500 \text{ cd/m}^2$ 정도임을 고려하였을 때 매우 높은 값을 알 수 있으며 이를 통해 OLED 소자를 활용하면 고휘도를 만족하는 스마트 발광 의류를 구현할 수 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 5(a)에 삽입된 이미지는 제작된 직물 기반 OLED 소자를 리튬이온 코인셀 2개가 직렬 연결된 실제 발광 안전복에 사용된 전력 모듈로 발광시키는 모습을 보여주며 해당 OLED 소자는 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 의 발광면적을 가지고 있다. 삽입된 이미지가 보여주듯이 제작된 직물 기반 OLED 소자가 구동될 때 발광면적에서 균일하게 빛이 방출되는 것을 5번의 휘도 반복 측정을 통해 확인하였고 측정 결과 평균 773 cd/m^2 의 휘도값을 보여 광섬유 기반 발광의류가 보였던 10 cd/m^2 미만의 낮은 휘도로 인한 단점들이 확실하게 해결될 수 있다(Kim et al., 2011). Fig. 6(b)는 제작된 직물 기반 OLED의 휘도에 따른 전류효율(current efficiency) 그래프를 보여준다. 전류효율은 발광소자에서 사용되는 단위 전류 대비 얼마나 많은 빛이 생성되는지를 의미하는 성능 지표로서 측정된 직물 기반 OLED 소자의 전류효율은 6.3 cd/A 의 준수한 값으로 코인형태 배터리의 한정된 전력으로도 충분한 빛을 생성할 수 있다는 의미를 갖는다.

제작된 OLED 기반 발광 모듈이 착용자의 움직임에 버틸 수 있는 충분한 유연성을 가지고 있는지 확인하기 위해서 bending test를 진행하였다. Fig. 6(c)는 직물 기반 OLED 소자의 bending test 결과를 보여주며 1 cm 반지름을 갖는 원형 막대를 활용해서 굽힘을 200회 반복해주었다. Fig. 6(c)로부터 1 cm의 곡률 반경 조건에서 200회의 반복적인 굽힘 후에도 초기 휘도 대비 큰 저하없이 일정한 휘도가 유지되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(d)는 bending test 진행에 따른 정규화된 휘도값 변화를 수치상으로 보여주며 200회의 굽힘 후에도 휘도값의 변화가 미미함을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 구현한 OLED 기반 발광 모듈이 안전복에 활용되기 충분한 유연 특성을 만족함을 실험적으로 검증하였다.

4.3. 스마트 발광 안전복 시제품 제작 및 실착 평가

Fig. 7(a)는 앞에서 기술한 설계내용을 바탕으로 제작된 스마트 발광 안전복의 발광 기능이 구동되고 있는 전체적인 모습을,

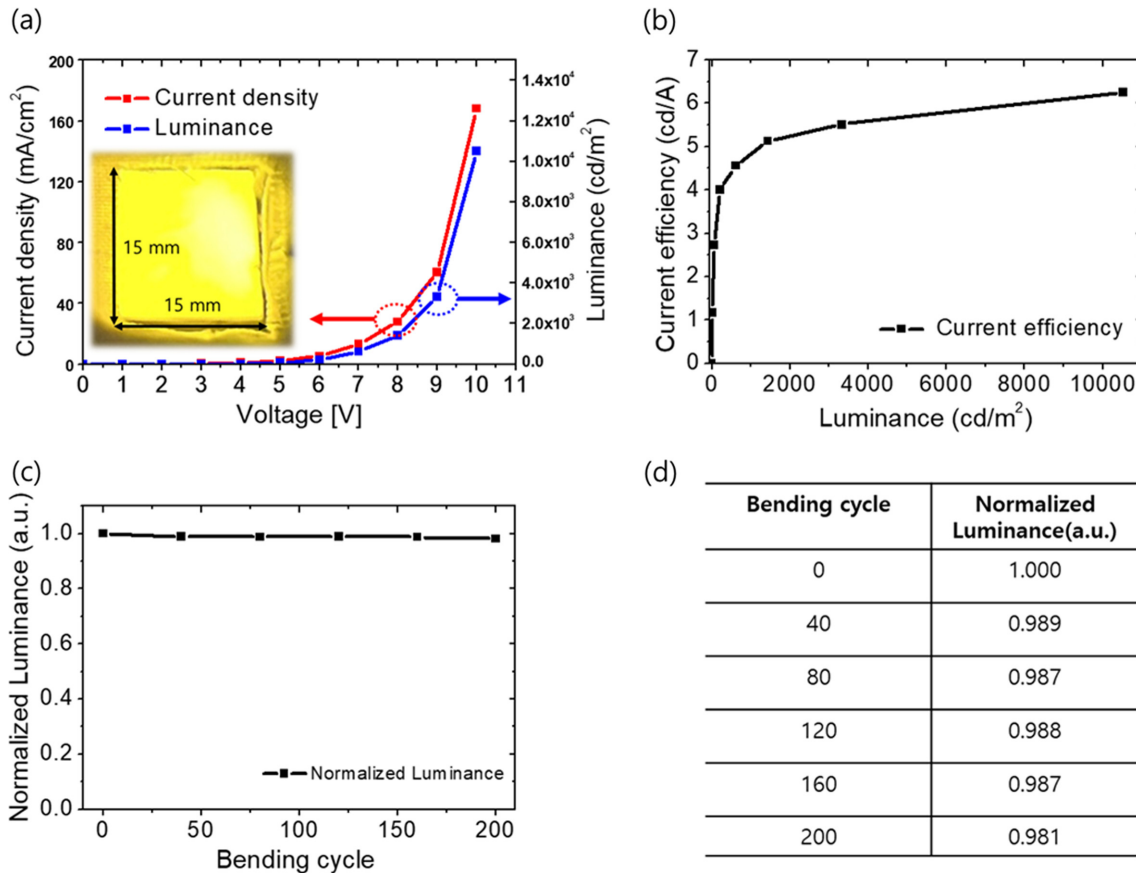


Fig. 6. Performance evaluation of fabricated textile-based OLEDs.
 (a) Current density-voltage curve and luminance of textile-based OLED luminescent modules
 (b) Current efficiency of textile-based OLED luminescent modules
 (c) Bending Test for evaluating OLED flexibility
 (d) Normalized Luminance data from Bending Test

Fig. 7(b,c,d)에 삽입된 사진들은 스마트 발광 안전복에 적용된 직물 기반 OLED 발광 모듈 및 전원부의 모습을 확대하여 보여준다. 설계 부분에서 기술한 것과 같이 원활한 전력 공급을 위한 직물 기반 회로는 은이 증착된 전도사를 5가닥 겹쳐 봉제하여 구현하였으며, 직물 기반 OLED 소자와 배터리 홀더는 각각 금속 스냅 단추를 통해 전도사 회로와 연결되어 있어 세탁을 위해 탈부착이 가능하도록 연결되었다. 상부의 배터리 홀더는 스트랩 원단 사이에 하부의 배터리 홀더는 전용 포켓을 통해 수납하여 착용 시 이질감을 최소화했으며 외부의 오염으로부터 홀더가 보호될 수 있도록 하였다. 금속 스냅 단추를 통한 연결에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 반복적인 탈부착 테스트를 진행하였고, 200회 이상의 탈부착 이후에도 초기 접촉 저항값인 0.2Ω을 안정적으로 유지했으며 기계적인 결합 또한 큰 변화 없이 초기 상태를 유지하는 것을 확인하였다.

이후 발광 안전복에 적용된 전원부 및 OLED 모듈로 인한 무게증가와 착용 불편함이 발생하는지 확인하기 위해 착용 평가를 진행하였으며 제작된 스마트 발광 안전복 시제품이 한국 남성의 평균 신장에 맞춰 설계 및 제작되었기에 173 cm의 신

장의 보통의 체형을 갖는 남성을 착용자로 선정하였다. 이때 제작된 스마트 발광 안전복을 구성하는 의복 패턴으로 이미 검증되어 상업적으로 널리 활용되고 있는 영국 “Merchant&Mills”사의 클래식 패턴을 채택했기 때문에 본 평가에서는 바탕이 되는 의복보다는 OLED 발광 모듈 적용에 따른 의복의 무게증가와 착용 스트레스 발생 여부를 집중적으로 확인하였다. OLED 발광 모듈로 인한 의복의 무게 증가 정도를 확인해보기 위해 전원부와 직물 기반 OLED 패치의 무게를 각각 측정하였고 그 결과, 코인셀 2개가 내장된 전원부는 9g, 직물 기반 OLED 패치는 1g이었으며 발광 안전복 전체 무게 905g 중 OLED 발광 모듈로 인해 증가한 무게는 총 40g으로 전체 의복 무게 대비 모듈의 무게로 인한 영향이 크지 않음을 확인하였다. 또한, 제작된 스마트 발광 안전복은 착용자의 관절 부위와 떨어져 있어 굽힘이 발생하지 않는 가슴 상단부와 허벅지 하단부에 발광 모듈이 결합된 구조로 설계되어 착용자의 움직임에도 발광 모듈에 별다른 변형이 일어나지 않았으며 8시간 이상 착용하고 일상생활을 수행했을 때 OLED 발광 모듈 적용 유무에 따른 착용감 차이가 발생하지 않음을 확인하였다.

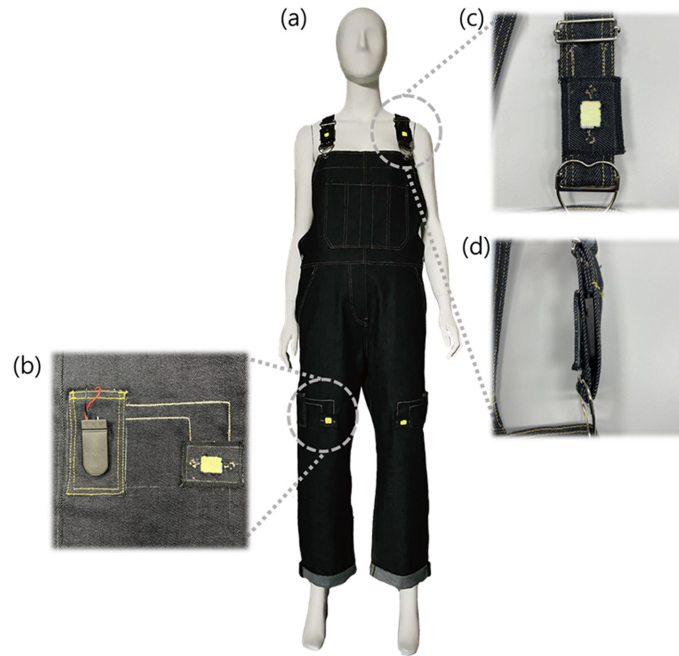


Fig. 7. Prototype of smart luminescent safety clothing and evaluation.
 (a) Operational demonstration of the produced smart luminescent safety clothing
 (b) Underlying power system and OLED luminescent modules of the smart luminous safety clothing
 (c) Upper OLED luminescent modules of the smart luminescent safety clothing
 (d) Upper power unit integrated into the straps

5. 결론 및 제언

최근 낮은 조도 환경에서 근무하는 작업자의 위치를 정확히 인식하지 못해 발생하는 안전사고가 꾸준히 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 기능성 안전복의 필요성이 대두되고 있다. 어두운 환경에서 근무하는 작업자들의 안전을 위해 재귀 반사 필름을 적용한 의복이 사용되고 있으나 스스로 빛을 발생시킬 수 없다는 단점이 존재한다. 스스로 발광이 가능한 의복 개발을 위해 LED와 광섬유가 활용되었지만 유연성 부족으로 인한 착용 스트레스 발생과 낮은 휘도로 인한 활용 제한으로 성공적인 상용화는 이루어지지 않았다. 이에 본 연구는 직물 기반의 OLED 발광 소자를 활용한 스마트 발광 안전복을 제안하였다. OLED 소자는 매우 얇은 두께로 직물 기반으로 제작되어 의복에 적용되어도 직물 특유의 유연성을 방해하지 않기 때문에 착용자의 스트레스를 최소화할 수 있고 낮은 전압에서도 높은 휘도를 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 안전복의 특성상 외부 오염 물질에 노출되는 경우가 많고 주기적인 세탁이 가능해야 하기 때문에, 발광 모듈을 반복적으로 탈부착할 수 있게 설계하였으며 착용자가 쉽게 인식될 수 있으면서 동작에 의한 스트레스가 적을 것으로 예상되는 양쪽 가슴 상단과 허벅지 하단에 발광 모듈을 배치하였다. 제작된 OLED 발광 모듈은 최대 10000 cd/m² 이상의 휘도와 6.3 cd/A의 전류효율을 보여주어 고 휘도를 만족하는 스마트 발광 의류 구현이 가능함을 확인하였다. 마지막으로, 제작한 스마트 발광 안전복을 실제 착용해 본 결과 8시간

동안 다양한 움직임을 수행했을 때 별다른 이질감이나 불편함이 발생하지 않았다. 본 연구에서 제안하는 OLED 기반의 스마트 발광 안전복은 추가 연구를 통해 다양한 체형과 착용자의 근로 형태에 맞추어 제작된다면 더욱 폭넓은 직업군에 활용이 가능할 것이며 다양한 산업 현장에서 근무하는 작업자의 안전을 향상시키고 안전사고 방지에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단, 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터, 전남대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00251856, No. 2020R1F1A1076261, No. 2019R1A6C1010024, No. 2020-1906).

References

An, M. H., & Lim, H. S. (2020). Designing user participation smart photonic clothing prototype using arduino. *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 22(1), 55-65. doi:10.5805/SFTI.2020.22.1.55

Cochrane, C., Meunier, L., Kelly, F. M., & Koncar, V. (2011). Flexible displays for smart clothing - Part I - Overview. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 36(4), 422-428.

*Darkness poses a serious risk of accidents...Environmental sanitation

- workers risking their lives for early morning cleaning' (2021, December 19). *heraldcorp* Retrieved December 19, 2022, from <http://news.heraldcorp.com/view.php?ud=20211217000658>
- 'Glittering reflective material attention' (2020, October 26). *apparelnews* Retrieved October 26, 2020, from http://m.apparelnews.co.kr/news/news_view/?idx=185803
- Jeong, E. G., Lee, C. M., & Cho, S. H. (2021). Review of OLED-based Wearable Display for Smart Textiles. *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 23(6), 860-868. doi:10.5805/SFTI.2021.23.6.860
- Kim, J. S., Park S. J., Kim Y. J., & Lee J.H. (2011). An exploratory study on luminescent properties and the relevant applications of POF-based flexible textile display for mountaineer wear with safeguard function. *Science of Emotion and Sensibility*, 14(1), 165-174.
- Koncar, V. (2005). Optical fiber fabric displays. *Optics and Photonics news*. 16(4), 40-44. doi:10.1364/OPN.16.4.000040
- Korean Agency for Technology and Standards, (2020, October 6). The 8th Korean Anthropometric Survey. *Korean Agency for Technology and Standards* Retrieved October 6, 2020, from <https://www.kats.go.kr/main.do>
- Merchant&Mills. (2023). Harlene sewing patterns. Retrieved 2023, from <https://merchantandmills.com/uk/>
- Ministry of Employment and Labor (2022, May 6). *Ministry of Employment and Labor* Retrieved May 6, 2022, from https://m.blog.naver.com/molab_suda/222722508582
- 'Occupationalhealthblog'. (2022, December 5). *Occupationalhealthblog* Retrieved December 5, 2022, from <https://blog.occupationalhealthblog.net/2022%EB%85%84-%EC%82%B0%EC%97%85%EC%9E%AC%ED%95%B4-%ED%98%84%ED%99%A9-%ED%86%B5%EA%B3%84/>
- 'Only 4 hours of indoor training-The signalmen at the construction site are concerned' (2023, January 28). *mdilbo*. Retrieved January 28, 2023, from <http://www.mdilbo.com/detail/c3QycN/687525>
- Park, S. H., Park, S. H., & Lee J. H. (2009). A study on the modular design of smart photonic sports clothing based on optical fiber technology. *Science of Emotion and Sensibility*, 12(4), 393-402. https://www.koses.or.kr/html/sub02_02.asp
- 'Signalman is in danger...Another death at the Gwacheon construction site' (2022, April 6). *imbc* Retrieved April 6, 2022, from https://imnews.imbc.com/replay/2022/nwdesk/article/6356910_35744.html
- Song, H., & Cho, H. (2014). Design of Illuminating Car Seats based on Woven Fabric of Optical Fiber. *Science of Emotion and Sensibility*, 17(1), 29-38. doi:10.14695/KJSOS.2014.17.1.29
- 'The government's response to the demand for providing portable flashlights for accident prevention among environmental sanitation workers.' (2022, April 28). *safetynews* Retrieved April 28, 2022, from <https://www.safetynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=211955>
- Yoon, J. A., Oh, Y., Oh, H., & Lee, Y. (2018). Development of energy-harvesting based safety apparel for night workers. *The Research Journal of the Costume Culture*, 26(4), 503-518. doi: 10.29049/rjcc.2018.26.4.503

(Received January 8, 2024; 1st Revised January 17, 2024;
2nd Revised January 19, 2024; Accepted February 2, 2024)