

스마트 텍스타일 구현을 위한 OLED 기반 웨어러블 디스플레이 리뷰

정은교¹⁾ · 이창민^{2)†} · 조석호^{1)†}

¹⁾전남대학교 의류학과

²⁾전남대학교 수의학과/BK21FOUR 프로그램

Review of OLED-based Wearable Display for Smart Textiles

Eun Gyo Jeong¹⁾, Chang-Min Lee^{2)†}, and Seok Ho Cho^{1)†}

¹⁾Dept. of Clothing and Textiles, Chonnam National University; Gwangju, Korea

²⁾Dept. of Veterinary Internal Medicine, College of Veterinary Medicine/
BK21 FOUR program, Chonnam National University; Gwangju, Korea

Abstract: Clothing has a very important role in human life, and it is the most human-friendly platform because humans wear it in almost all the time. In the recent years, smart clothing integrated with various functions is solidifying its position as the core of next-generation Information and Communications Technology(ICT). With this global trend, the smart textiles, textiles embedded with electronic devices that are capable of performing various functions, have been attracting a lot of attention. Therefore, various research activities on the smart textiles are in progress, and the global market outlook for the smart textiles is also showing rapid growth. Among the various smart textile technologies, the textile/fiber-based wearable display has been attracting more attention because it is an essential element for wearers to intuitively control the functions integrated in the smart textiles. This paper provides insightful information and the technological elements of organic light emitting diodes(OLEDs) display, which have been evaluated as the most ideal device for luminescent clothing. Since, OLEDs have many advantages such as light weight, extremely thin thickness and great flexibility, the textile/fiber-based wearable OLEDs can be worn without any inconvenience. In addition, by introducing previous studies on the textile/fiber-based OLED displays, we intend to consider the commercial potential of the textile/fiber-based smart luminescent clothing using the OLED technologies.

Key words: wearable display (착용 가능한 디스플레이), textile-based display (직물 기반 디스플레이), fiber-based display (섬유 기반 디스플레이), organic light emitting diodes (유기 발광다이오드), smart textile (스마트 텍스타일)

1. 서 론

의복은 인간의 삶에서 매우 중요하며, 가장 오랜 시간 붙어 있는 인체 친화적인 플랫폼이다. 초창기 의복의 주된 목적은 거친 외부환경으로부터 착용자의 신체를 안전하게 보호하는 것이었지만 최근 들어서 신체의 물리적 보호 뿐만 아니라 다양한 기능이 융합된 기능성 스마트 의류가 차세대 ICT의 핵심으로 입지를 굳혀 나가고 있다. 이러한 추세로 다양한 전자소자들을 실제 의복에 사용되는 직물 위에 직접 구현하는 스마트 텍스타일(smart textile)에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 활발한 연구 활동과 함께 글로벌 시장전망 또한 급격한 성장세를

보이고 있다.

스마트 텍스타일이란 고품질, 고성능의 섬유, 하이엔드 텍스타일 제조 등 타 기술과의 융합을 통해 다양하고 높은 성능을 갖는 섬유소재 및 제품을 나타낸다. 이러한 스마트 텍스타일은 단순한 기능성이 부여된 섬유부터 2가지 이상의 복합 기능이 부여된 섬유를 거쳐 현재는 IT(information technology), NT(nano technology) 등 타 기술과의 융합을 통해 주변환경을 감지하고 그 변화에 따라 능동적으로 대응할 수 있는 형태로 발전을 거듭하고 있다. 스마트 텍스타일의 초창기 제품들은 ICT 기기를 의류 제품에 단순히 부착하거나 직접 착용하는 수준이었지만, 최근에는 이를 섬유제품에 내장하는 수준까지 발전하였다. 전도성 섬유를 이용한 압력센서, 온도 조절이 가능한 발열 섬유, 각종 생체 신호를 모니터링 할 수 있는 직물 등이 이에 해당한다. 이러한 기술들은 1980년대 스티브 만 교수의 연구를 시작으로 활발히 개발되어 현재까지 이어지고 있다. 하지만 아무리 좋은 기능을 만족하는 스마트 텍스타일이라 하더라도 착용자가 입기에 불편하고 착용 스트레스가 발생한다면 소비자로부터 철저하게 외면 받을 가능성이 매우 크다.

†Corresponding author; Chang-Min Lee and Seok Ho Cho

Tel. +82-62-530-2871 / Tel. +82-62-530-1342

E-mail: cmlee1122@jnu.ac.kr / jsh818@jnu.ac.kr

© 2021 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.

따라서 스마트 텍스타일 기술 중 직물 기반의 웨어러블 디스플레이 기술이 더욱 주목을 받고 있는데 전자기기와 직물이 융합되어 있는 스마트 텍스타일의 특성상 착용자가 스마트 텍스타일에 융합되어 있는 기능들을 직관적으로 컨트롤 하려면 직물 기반의 웨어러블 디스플레이 시스템이 필수적이기 때문이다. 또한 직물 기반의 디스플레이 기술은 기능적인 측면과 함께 심미적, 안정성 측면에서도 폭넓게 활용될 수 있는 잠재성을 가지고 있다. 최근 들어 직물 기반의 디스플레이를 무대의 상이나 드레스 등에 적용하여 착용자의 개성과 심미성을 극대화하는 IT 패션으로 활용하고자 하는 도전적인 시도가 발표되고 있으며 시야확보가 어려운 환경에서 근무하는 사람들 또는 어두운 환경에서 근무하거나 자전거를 타는 사람들의 안전을 위한 발광 의류의 프로토타입이 개발되어 안정성 향상 효과에 대한 기능성을 인정받고 있다(Na et al., 2021a; Na et al., 2021b). 이렇듯 직물 기반의 디스플레이시스템이 구현되었을 때 얻을 수 있는 장점들과 활용할 수 있는 분야 또한 매우 넓기 때문에 직물 기반의 발광 시스템 구현을 위한 연구들이 꾸준히 진행되어 왔다. 현재까지 개발되었던 직물 기반의 발광 시스템 연구들의 방향성을 간략히 요약해보면 다음과 같다.

가장 먼저 시도되었던 직물 기반의 발광 의류는 LED 소자를 활용한 방식이었다(Cochrane et al., 2011). 초기에는 기존의 LED 소자를 직물에 단순히 부착하고 전기적으로 연결하여 발광 의류를 구현하였다. 하지만 이러한 방법은 직물에 LED를 직접 부착하는데 많은 시간이 소요되고 기존 LED 소자의 크기와 부착 방법의 한계로 매우 낮은 해상도만 가능하다는 단점들이 존재하였다. 이후 초기 방법의 단점을 보완하고자 직물에 부착된 LED를 연결하는 유연한 커넥터가 개발되기도 하였다. LED를 활용한 발광 의류의 경우 LED의 긴 수명이나 스스로 빛을 발생시킬 수 있는 자발광 특성, 낮은 동작 전압 등의 장점을 그대로 가져올 수 있었으나 무기물질 기반의 LED 소자는 유연하지 못하고 단단하기 때문에 직물에 LED 소자를 많이 부착할수록 직물의 유연성은 크게 떨어지고 착용자가 느끼는 불편함 또한 커지게 되는 큰 단점을 보여 성공적으로 상용화되지 못하였다.

LED 소자를 직물 기반 디스플레이에 활용할 때 LED 소자가 유연하지 못하고 단단해서 착용자의 불편함을 야기했던 단점을 극복하고자 시도되었던 두번째 연구 방향은 광섬유를 활용하여 발광 의류를 개발하는 방식이었다. 본래 광섬유는 전반사 효과를 통해 빛을 손실없이 전송하여 광 통신에 활용되는 목적으로 개발되었으나 발광 의류를 개발하는 연구자들은 광섬유의 클래딩층에 손상이 발생했을 때 손상된 부분에서 전반사 현상이 억제되어 빛이 광섬유 밖으로 나오는 현상에 착안하여 광섬유를 활용한 발광 의류를 개발하였다(Koncar, 2005). 광섬유를 활용하여 직물 기반 디스플레이를 구현하려면 광섬유를 통해서 빛이 균일하게 나올 수 있어야 하며 이를 위해서 광섬유의 클래딩 층을 인위적으로 균일하게 손상시켜야 한다. 광섬유의 클래딩 층을 균일하게 손상시킬 수 있는 방법은 크게 물

리적인 손상 방법과 화학적 손상 방법이 있으며 이러한 방법들을 통해 빛을 비교적 균일하게 방출할 수 있는 광섬유를 제작할 수 있다.

광섬유는 균일한 직경을 갖고 LED 소자에 비해 상대적으로 유연하기 때문에 일반적인 섬유와 함께 직조되어 쉽게 직물로 형성될 수 있고 형성된 직물을 통해 직물 기반의 발광 의류를 제작할 수 있다. 그러나 광섬유가 LED 소자보다 높은 유연성을 가지고 있음에도 불구하고 구성 물질의 특성상 실제 의복에 사용되는 섬유와 비교하면 유연성이 크게 떨어지기 때문에 일반적인 섬유와 함께 직조되는 과정에서 외부의 스트레스를 견디지 못하고 부러지는 현상이 발생하기도 한다.

또한 광섬유는 빛을 전달해주는 통로의 역할로 스스로 빛을 발생시키지 못하기 때문에 광섬유를 활용한 발광 의류를 구현하기 위해서는 광원이 꼭 필요하며 일반적으로 크기가 작고 가벼운 LED 소자를 이용한다(Song & Cho, 2014). 하지만 보통 하나의 LED 광원에 수십~수백개의 광섬유가 커넥터를 통해 연결되어 빛을 공급받기 때문에 하나의 광섬유에 전달되는 빛의 양은 매우 적고 광원으로부터 빛을 공급받을 때 발생하는 빛의 손실률도 크기 때문에 광섬유에서 나오는 빛의 세기도 매우 약해질 수밖에 없다(Kim et al., 2011). 따라서 광섬유를 활용한 발광 직물은 매우 낮은 휘도를 보여주어 일반적인 환경에선 광섬유에서 나오는 빛을 눈으로 확인하기 힘들고 주위가 매우 어두운 제한적인 환경에서만 광섬유를 통해 나오는 빛을 눈으로 확인할 수 있다. 이러한 휘도 문제를 해결하기 위해선 광원의 수를 늘려 더 많은 빛을 공급해주어야 하는데 LED 광원의 수가 늘어날수록 발광 의류의 무게는 무거워지고 유연성은 떨어져 착용자에게 불편함을 야기하게 된다. 이렇듯 광섬유를 활용한 발광 직물은 스스로 빛을 내지 못한다는 점, 고효율의 광원을 이용하더라도 휘도가 매우 낮다는 치명적인 단점이 있어 상용화 되지 못하였다.

위에서 기술한대로 직물 기반의 발광 의류를 개발하고자 하는 연구들이 꾸준히 시도되어 왔으나 큰 단점들이 존재하여 상용화 되지 못하고 있었다. 그러다 최근 차세대 디스플레이 소자로 각광받고 있는 유기 발광다이오드(Organic Light Emitting Diode, OLED)를 직물 기반의 디스플레이에 적용하고자 하는 연구가 시도되었고 주목할 만한 결과들이 발표되었다. OLED는 소자의 총 두께가 수백 nm정도로 매우 얇고 기계적으로 유연성이 뛰어난 유기물질을 기반으로 이루어져 있어 매우 높은 유연성과 기계적 안정성을 동시에 만족하기 때문에 직물 기반의 의복 형태로 제작되어도 착용자의 불편함을 최소화할 수 있다. 또한 스스로 빛을 낼 수 있는 자발광소자로 별도의 광원이 필요 없고 인체에 무해할 정도의 낮은 전압 범위에서 동작이 가능하며 높은 휘도를 만들어 낼 수 있기 때문에 광섬유를 활용한 발광 의류의 가장 큰 단점인 낮은 휘도를 해결할 수 있다. 현재 OLED는 스마트폰이나 TV와 같은 디스플레이에 넓게 적용되어 이미 성숙한 기술수준에 도달해 있으며 기존 설치된 생산 장비를 활용할 수 있기 때문에 추가적인 핵심 기술개

발이나 시설 구축이 필요하지 않다는 점도 OLED가 직물 기반 디스플레이에 적용될 때 발생하는 장점 중 하나이다.

이에 본 논문에서는 현재까지 발광 의류에 가장 이상적인 소자로 평가받고 있는 OLED 디스플레이가 더 넓은 분야에서 활용될 수 있도록 스마트 의류 연구자들에게 의미 있는 정보와 요소기술들을 제공하고 직물/섬유 기반의 OLED 디스플레이에 대한 선행 연구들을 소개하여 OLED 소자를 통한 직물 기반의 스마트 발광 의류의 상용화 가능성에 대해 고찰하고자 한다.

2. OLED의 기초 개념

2.1. OLED의 기본 동작 원리 및 구조

OLED는 전기에너지를 빛 에너지로 변환하는 전자 소자로 스스로 빛을 낼 수 있는 자발광 특성을 보유하고 있다. OLED의 구동을 위해 양쪽 전극에 동작 전압을 인가하면 양 전극의 전위 차이로 인해 전기장이 발생하고 전자와 정공이 각각 음극과 양극을 통해 주입된다. 음극과 양극을 통해 주입된 전자와 정공은 발광층에 도달하여 전자-정공 쌍인 엑시톤(exciton)을 형성하며 엑시톤을 구성하는 전자와 정공이 재결합하면서 엑시톤이 가지고 있는 전기 에너지가 빛 에너지로 변환되어 발광 현상이 발생한다. 이때 발광 되는 빛의 파장은 발광층 물질의 에너지 밴드갭에 의해 결정되며 에너지 밴드갭이 다른 발광 물질을 사용하여 다양한 색을 발광하는 OLED를 구현할 수 있다.

이러한 OLED의 기본구조는 1987년 Tang과 Van Slyke에 의해 보고되었다. 이것은 매우 획기적인 연구였으며 ‘최초의 OLED 논문’의 의미를 갖는다(Tang & VanSlyke, 1987). OLED 소자가 처음 보고되었을 때에는 양극과 음극 사이에 발광층이 존재하는 단순한 구조였지만 OLED 소자에 대한 연구가 진행되고 소자의 효율이 향상됨에 따라 각 전극과 발광층 사이에 기능층이 추가된 다층 구조로 발전하였다. Fig. 1은 최근 생산되는 OLED 소자의 일반적인 구조를 나타내며 각 층이 갖는 기능은 다음과 같다(Bender et al., 2015).

HTL(Hole Transport Layer): 양극으로 들어오는 정공이 발광층으로 도달할 수 있도록 도움을 주는 기능층이다. 양극과 발광층의 HOMO(highest occupied molecular orbital) 레벨에 차이가 나는 경우 정공이 발광층에 도달하기 쉽지 않기 때문에 양극과 발광층 중간 정도의 HOMO를 갖는 물질을 HTL로 활용하여 정공이 양극으로부터 발광층까지 효과적으로 도달할 수

있도록 도움을 준다.

EBL(Electron Blocking Layer): 발광층에 도달한 전자가 양극으로 넘어가지 못하도록 가두는 역할을 하는 기능층이다. OLED 소자를 동작할 때 음극과 양극에 전위 차이가 발생하기 때문에 발광층에 도달한 전자와 정공은 발광층에 머무르지 않고 양극의 전위차에 의해 발생한 전기장에 휩쓸려 반대 전극으로 넘어가버리게 된다. OLED의 발광 효율을 높이기 위해선 최대한 많은 전자와 정공을 발광층에서 재결합시켜야 하기 때문에 전자와 정공을 발광층 내부에 가둘 수 있는 방어층(blocking layer)이 필요하다.

EML(Emission Layer): OLED에서 실제로 발광이 일어나는 층이다. OLED의 동작을 위해 전압을 인가하면 양극과 음극을 통해 각각 정공과 전자가 발광층에 도달하여 전자-정공 쌍인 엑시톤이 생성되며 전자 정공 재결합을 통해 엑시톤이 소멸되면서 엑시톤의 전기적인 에너지가 빛 에너지로 변환되어 발광이 일어난다.

HBL(Hole Blocking Layer): EBL과 마찬가지로 발광층에 도달한 정공이 음극으로 넘어가지 못하도록 가두어 OLED 소자의 발광 효율을 높여주는 역할을 하는 기능층이다.

ETL(Electron Transport Layer): HTL과 마찬가지로 음극으로 들어오는 정공이 발광층으로 도달할 수 있도록 도움을 주는 기능층이다. 음극과 발광층의 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital) 레벨에 차이가 있는 경우 전자가 발광층에 도달하기 쉽지 않기 때문에 음극과 발광층 중간 정도의 LUMO를 갖는 물질을 ETL로 활용하여 전자가 음극으로부터 발광층으로 효과적으로 도달할 수 있도록 도움을 준다.

2.2. 직물 기반 OLED 디스플레이 구현을 위해 필요한 요소 기술

본래 OLED 소자는 유연하지 않고 평평한 기존의 디스플레이 시스템을 위해 개발되었기 때문에 직물 기반 위에 제작되고 매우 높은 유연성을 만족해야 하는 직물 기반의 OLED 디스플레이 구현을 위해서 몇가지의 요소기술들이 필요하다. 직물 기반의 OLED 디스플레이 구현을 위한 대표적인 요소기술들을 정리해보면 다음과 같다.

2.2.1. 직물 기반의 평탄화 기술

기본적으로 OLED는 여러 기능층이 샌드위치 구조로 구성되어 있지만 각 층의 두께가 수십 nm로 매우 얇기 때문에 OLED 소자의 전체 두께 또한 수백 nm정도로 매우 얇다. 이에 반해, 통상적으로 의복에 사용되고 있는 직조된 직물들은 섬유가 직조되면서 생기는 단차로 인해 표면의 거칠기가 수백 μm 정도로 커서 박막 형태의 전자소자들을 직물 위에 바로 고정하는 것은 어렵다고 알려져 있다. 이로 인해 직물 위에 OLED 소자를 직접적으로 제작하게 되면 직물의 거칠기로 인해 OLED 소자의 양쪽 전극이 접촉하고 누설전류가 많이 발생되어 소자의 안정적인 동작이 불가능해진다(Kim et al., 2013).

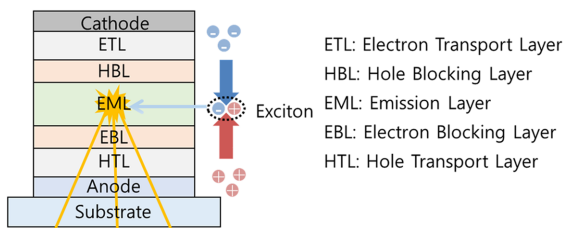


Fig. 1. The structure of multilayer OLED.

따라서 직물 위에 OLED 소자를 제작하기 위해서는 적절한 평탄화 공정이 필수적이다. 이를 위해 반복적인 폴리머 코팅을 통한 평탄화 또는 플라스틱 필름 부착을 기반으로 한 직물 기반 EL(electroluminescence, 전계 발광) 소자가 보고된 바 있지만 (De Vos et al., 2016; Hu et al., 2011), 이러한 공정은 직물의 유연한 기계적 특성을 잃게 할 뿐만 아니라, EL 소자의 태생적 한계로 인해 발광 효율이 낮고 구동 전압이 높다는 단점이 있다.

그러므로 직물 기반의 OLED 소자를 위한 직물 기반의 평탄화 공정을 설계할 때 고려해야 할 사항은 공정이 최대한 간단해야 하며 공정으로 인한 직물 고유의 유연성 저하를 최소화하는 것이다. 즉, OLED 기반 발광 직물의 성공적인 상용화를 위해서는 직물 기반의 평탄화 공정이 복잡하지 않고 대면적 공정이 가능해야 하며 평탄화를 마친 후에도 직물이 가지고 있는 유연한 특성을 잘 유지해야 한다. 특히 평탄화 공정 후에 직물의 유연성이 크게 감소하는 것을 방지해야 하는데 평탄화에 주력하여 직물의 유연성이 크게 떨어지면 의복으로 구성하였을 때 착용자의 움직임을 따라오지 못해 큰 불편함이 발생하고 결국 의복의 형태로 입을 수 있는 직물 기반의 디스플레이의 의미도 사라지기 때문이다.

2.2.2. 투명하고 유연한 상부 전극 제작 기술

직물 기반의 OLED 디스플레이를 구현할 때 기판으로 사용되는 직물은 투명하지 않기 때문에 OLED 소자의 발광층에서 발생하는 빛은 직물 방향이 아닌 바깥 방향을 통해 방출되어야 한다. OLED 소자의 발광층에서 발생하는 빛을 바깥방향으로 효과적으로 방출하려면 OLED의 상부 전극이 투명해야 하며 상부 전극이 불투명할 경우 OLED의 발광층에서 발생하는 빛은 위쪽으로 나오지 못하고 OLED 소자 안에 갇혀버리게 된다. 또한 직물 기반의 OLED 디스플레이는 의복의 형태로 제작되어 착용자의 움직임에 방해될 주면 안되기 때문에 매우 높은 유연성을 확보해야 하는데 이를 위해서는 높은 유연성을 가지는 전극을 사용해야 한다. 결과적으로 직물 기반의 OLED 디스플레이를 구현하려면 투명하면서 동시에 높은 유연성을 만족하는 상부 전극이 필요하다.

TV나 스마트폰 화면과 같은 기존의 OLED 디스플레이에서는 투명전극 물질로 ITO (Indium Tin Oxide)를 가장 많이 활용하였다. ITO는 높은 투과도와 적당한 전기적 특성을 만족하여 일반적인 디스플레이 소자에 적용하기엔 문제가 없지만 유연성이 없고 단단한 특성을 가지고 있기 때문에 살짝만 구부러도 전극의 능력을 상실해버리는 단점이 있다. 따라서 기존의 투명전극 물질로 사용되던 ITO는 직물 기반 OLED 디스플레이에는 적합하지 않아, 투명하면서 동시에 높은 유연성을 만족하는 상부 전극에 대한 연구가 진행되었다. 지금까지 개발된 투명하면서 유연한 상부 전극들은 전도성 고분자, 금속 나노와이어, 탄소 나노튜브(carbon nanotube, CNT)나 그래핀과 같은 저차원의 탄소물질, dielectric-metal-dielectric(DMD) 구조의 다층 전극 등이 있다(Han et al., 2017). 개발된 투명 유연 전극들은 각각의 장단점이 존재하기 때문에 사용용도에 맞춰서 선택적으로 활용되고 있다.

2.2.3. 안정적인 동작을 위한 기능성 봉지막 기술

OLED 소자는 수분과 산소에 매우 취약한 것으로 알려져 있으며 Fig. 2에 나와있는 것처럼 수분과 산소에 노출되었을 경우 1시간 이내에 열화(degradation)가 진행되어 더 이상 빛이 발광 되지 않는 암점(dark spot)이 발생하게 된다(Jeong et al., 2016). 따라서 직물 기반의 OLED 디스플레이 시스템의 안정적인 동작시간을 확보하기 위해서 대기중의 수분과 산소가 OLED 소자 안으로 침투되지 못하도록 막아주는 박막 봉지막(thin-film encapsulation, TFE)이 필요하다.

일반적인 OLED 디스플레이 소자의 경우 유연할 필요가 없어 유리를 봉지막으로 사용하여 수분과 산소의 침투를 막아주지만 유리의 특성상 유연성이 없고 쉽게 깨지기 때문에 직물 기반의 디스플레이에는 적용할 수 없어 유연 특성을 만족하는 봉지막이 필요하다. 또한 대기중의 수분과 산소는 OLED 소자의 위쪽과 아래쪽에서 동시에 침투할 수 있기 때문에 보통 봉지막은 OLED 소자의 위쪽과 아래쪽에 모두 적용해야 한다. 이때 OLED 소자의 위쪽에 적용되는 봉지막은 상부 전극과 같은 이유로 OLED의 발광층에서 생성된 빛이 잘 통과해서 나가야 하기 때문에 유연한 특성 외에도 투명한 특성을 동시에 만

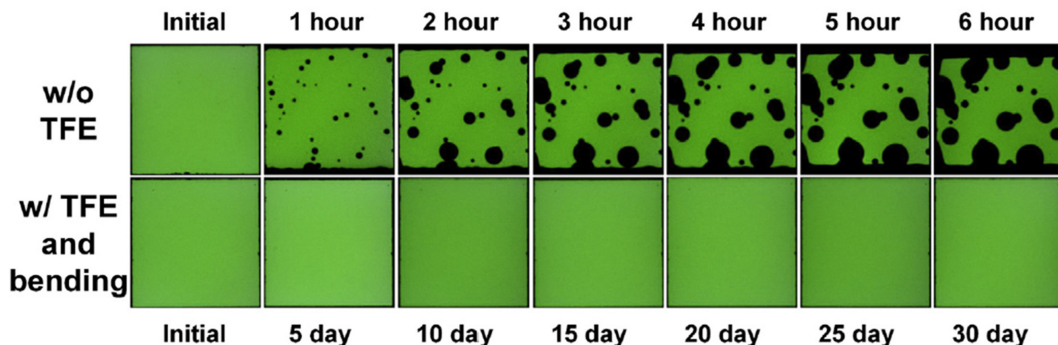


Fig. 2. Comparison of shelf lifetime cell images with and without a TFE barrier(Jeong et al., 2016).

축해야 한다. 유연성과 투명성을 동시에 만족하면서 대기중의 수분과 산소의 침투를 효과적으로 막아주는 기능성 봉지막을 위해 유기물질과 무기물질을 번갈아 증착하여 제작하는 다층구조의 기능성 봉지막에 대한 연구결과가 발표되었으며, 이를 통해 OLED의 수명을 안정적으로 확보할 수 있음이 밝혀졌다. 보통 무기층은 밀도가 높아 수분과 산소를 잘 막아주는 특성을 갖지만 유연성이 떨어지고 유기층은 밀도가 낮아 수분과 산소를 막아주는 능력은 떨어지지만 유연한 특성을 만족한다. 이렇게 특성이 다른 두 층을 번갈아 적층해주어 수분과 산소의 확산투과경로를 극대화하여 수분과 산소에 대한 저항성을 높이고 유기층을 통해 유연성도 확보 가능한 투명/유연 봉지막을 구현할 수 있다.

3. 직물/섬유 기반 OLED 디스플레이

3.1. 직물 기반 OLED 디스플레이 연구

앞서 기술한 직물 기반의 디스플레이에 사용할 수 있는 평탄화 기술로 100 μm 두께의 폴리에스터 섬유를 이용한 직물 OLED가 Kim et al.에 의해 보고된 바 있다(Kim et al., 2013). 거친 직조 직물 표면에 OLED를 직접 제작하기는 어렵기 때문에 표면을 20-50 μm 두께의 폴리우레탄(polyurethane, PU)과 500 nm 두께의 폴리비닐 알코올(polyvinyl alcohol, PVA) 층으로 코팅하여 평탄화 진행하였다. 이러한 평탄화 공정으로 인해 직물의 통기성은 약간 저하되었지만, RMS(root mean square) 거칠기는 Fig. 3a에 표시된 것처럼 OLED 제조에 적합한 0.386 μm 로 감소하였다. 결과적으로 OLED는 부드러운 직물 위에 균일하게 제작되었으며 8 cd/A의 전류 효율로 안정적으로 작동하였다. 비록 통기성은 약간 저하되었지만, 직물의 드레이프성이 전체 공정 동안 유지됨에 따라 제작된 샘플

은 1000회의 굽힘 시험($R = 5 \text{ mm}$)에서 동작신뢰성을 보여주었다. 실제 의복에 사용되는 직물을 OLED를 위한 기판으로 사용하기 때문에 웨어러블 전자 제품과 의류용 원단 사이의 큰 차이를 줄일 수 있다는 점에서 의의가 있다.

일반적인 OLED 구조에서 광자(photon)는 전자(electron)와 정공(hole)의 재결합에 의해 발광층에서 생성된다. 이와 관련하여 OLED는 형광 및 인광의 유형으로 구분하여 정의할 수 있다. 형광 OLED에서는 전기 여기 동안 25%의 일중항과 75%의 삼중항이 형성되는데, 여기서 일중항 상태에서 바닥 상태로의 전이에서 나오는 빛의 방출을 형광 방출이라 한다. 이때 내부 양자 효율(internal quantum efficiency, IQE)은 이론적으로 25%로 제한된다. 인광 발광은 중금속 효과 (heavy metal effect)를 통해 삼중항을 발광에 이용하는 기술이다. 이러한 중금속 효과를 이용하면 중금속에 의해 단일항이 계간 교차(intersystem crossing, ISC)에 의해 삼중항으로 전이가 되기 때문에 단일항 엑시톤도 발광에 활용할 수 있어 이론적으로 모든 엑시톤이 발광에 활용되는 100%의 IQE를 달성할 수 있다. 즉, 인광 발광 재료는 계간 교차로 이론적으로 100%의 IQE를 달성할 수 있으므로 인광 OLED는 형광 OLED에 비해 발광 효율을 높일 수 있게 된다. OLED 소자의 발광 효율이 향상되면 동일한 휘도에서 OLED의 구동 전류가 낮아 지므로 OLED의 동작 신뢰성을 높일 수 있다.

이러한 사실을 바탕으로 매우 우수한 유연성을 가지는 고효율의 직물 기반 인광 OLED 소자에 대한 연구가 보고되고 있다(Choi et al., 2017). 인광 OLED는 폴리에틸렌 나프탈레이트(polyethylene naphthalate, PEN) 섬유로 직조된 기판 위에 제작되었으며, 유한 요소 방법(finite element method, FEM)을 이용한 기계적 시뮬레이션을 통해 직물 기반 특유의 우수한 유연성이 확인되었다(Fig. 3b). 직물은 개별적인 섬유들로 구성되

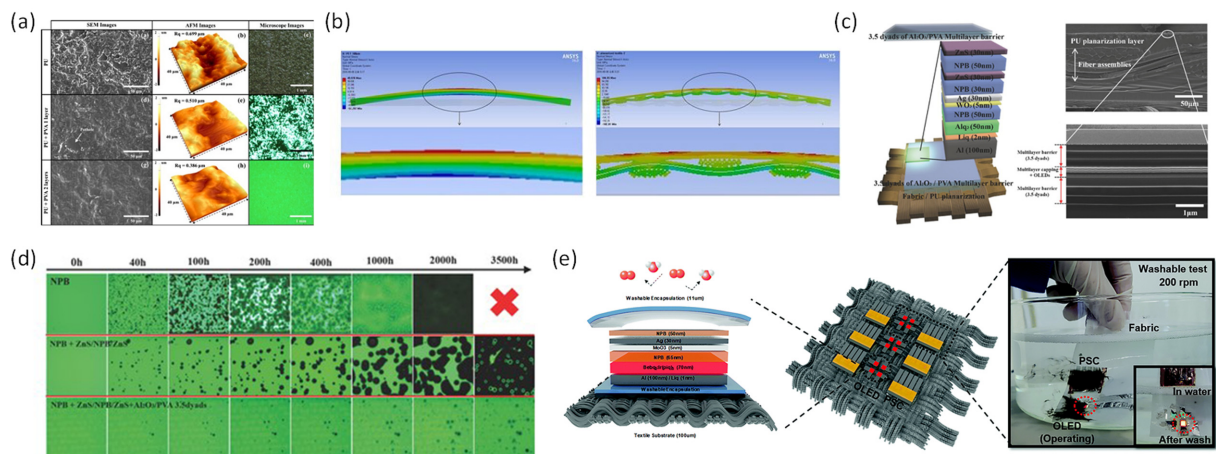


Fig. 3. Textile-based OLED displays; (a) Surface morphologies of fabric based on planarization process(Kim et al., 2013). (b) Finite element method (FEM) simulation results of film substrate and fabric substrate(Choi et al., 2017). (c) Schematic diagram and cross-sectional images of fabric-based OLEDs with multilayer encapsulation barrier(Kim et al., 2016). (d) Shelf lifetime of various kinds of multilayer encapsulated fabric-based OLEDs (Kim et al., 2016). (e) Schematic diagram of fabric-based wearable display module and its operating picture in water(Jeong et al., 2019).

어 있기 때문에, 플라스틱 필름과는 달리 응력이 한 곳에 집중되지 않고 복잡한 응력 분포를 나타내고 있다. 직물은 독립적인 섬유로 직조되었기 때문에 씨실과 날실 사이에 빈 공간이 존재하며 이러한 빈 공간으로 인해 직물은 일반적인 평판 기판과는 달리 응력의 집중을 방지할 수 있는 다중 중립축을 가지게 된다. 요약하면, 직물은 직조 패턴에 따라 기계적인 응력을 분산시킬 수 있어 플라스틱 필름보다 기계적으로 더 우수한 특성을 가진다. 직물의 우수한 기계적인 물성을 바탕으로 제작된 인광 OLED는 $35,000 \text{ cd/m}^2$, 70 cd/A 이상의 높은 발광 특성을 나타냈으며, 굽힘 반경 2 mm에서 3,000회 이상의 굽힘 실험 이후에도 안정적으로 동작하는 것이 확인되었다.

이와 같은 기술로 인해 OLED 소자는 실제 직물에서 직물 특유의 뛰어난 기계적 물성을 유지하며 안정적으로 동작이 가능하지만 소자의 수명과 동작 신뢰성에 있어 여전히 한계점을 가지고 있다. 특히 OLED 내부의 유기 물질은 수분과 산소에 노출되었을 때 쉽게 산화되고 결정화가 진행되어 열화가 진행되며 그렇기 때문에 OLED를 외부의 대기 환경으로부터 보호하는 봉지막 기술은 직물 기반 웨어러블 디스플레이에 있어 필수적이다. 산화 바륨(BaO) 혹은 산화 칼슘(CaO) 건조체를 사용한 유리 봉지의 경우 OLED가 요구하는 낮은 투습도를 만족할 수 있었기 때문에 많이 활용되었지만, 유리의 단단하고 부서지기 쉬운 특성은 높은 유연성을 요구하는 웨어러블 디스플레이에는 적용이 어렵다. 따라서 이러한 단점을 보완하는 동시에 OLED를 효과적으로 보호하기 위한 새로운 봉지막 기술이 연구되고 있다(Dameron et al., 2008; Meyer et al., 2010).

유리 봉지 기술의 대안으로 제시되는 기술 중 TFE 기술은 높은 유연성을 가질 뿐만 아니라 가장자리로 침투할 수 있는 수분과 산소도 방지할 수 있기 때문에 유망한 기술로 여겨지고 있다. TFE의 구조로는 유기층과 무기층이 반복되거나, 나노 단위의 무기물질을 적층하는 형태의 구조가 많이 사용되고 있고 일반적으로 이러한 유연 봉지막에서는 굽힘 응력이 봉지막 내부의 결합의 성장을 가속화 시키므로 이를 방지하는 것이 매우 중요하다. 유연 봉지막의 기계적 손상을 방지하기 위해 완충층을 도입하여 전체 소자 시스템의 중립 축을 제어하고 균열 방지 기능을 TFE에 삽입하는 것과 같은 새로운 접근 방식이 시도되고 있다. 최근에는 유연하고 세탁이 가능한 TFE가 직물 기반 웨어러블 OLED 용으로 개발되어 적용되고 있다.

이러한 이유로 웨어러블 OLED에 외부 환경으로부터의 수분과 산소의 침투를 차단하기 위해 알루미늄 산화물과(Al_2O_3) 폴리비닐 알코올(PVA)로 구성된 다층 박막 봉지가 개발되었다(Kim et al., 2016). OLED 소자는 폴리우레탄 및 3.5 dyads의 다층 박막 봉지막으로 평탄화가 이루어진 직물 기판에 진공 증착공정으로 제작되었다. 이후 원자층 증착(atomic layer deposition, ALD) 및 스핀 코팅 공정을 이용한 또 다른 다층 박막 봉지막이 직물 기반 OLED 위에 적용되어, 직물 방향과 외부 방향으로부터 유입될 수 있는 수분과 산소를 동시에 차단한다(Fig. 3c). 이렇게 양면으로 봉지막을 가지는 직물 기반

OLED는 봉지막 공정을 거치지 않은 OLED 소자나 유리 기판 위에 제작된 OLED 소자와 유사한 전기적 성능을 가지는 것이 확인되었다. 뿐만 아니라 일반적인 대기환경에서 보관할 때 3500시간이 지나도 안정적으로 구동 되었으며 11.1 mA/cm^2 의 일정한 전류 밀도에서는 1000시간 이상의 긴 동작 수명을 나타낸다(Fig. 3d). 다층 박막 봉지는 전체 소자의 유연성을 다소 감소시키지만, 직물의 경우 특유의 구조로 인해 우수한 기계적인 특성을 유지할 수 있다.

직물 기반 OLED의 여러가지 성능이 향상되고는 있지만 환경 안정성, 구성 요소 간의 상호 연결 및 세탁 가능성은 반드시 해결되어야 하는 문제이다. 최근에는 직물 기반 웨어러블 디스플레이의 성공적인 상용화를 위해, 직물 기반의 OLED와 태양전지를 포함하는 세탁 가능한 웨어러블 디스플레이 모듈이 개발되어 보고된 바 있다(Jeong et al., 2019). 이는 새로운 유형의 세탁 가능한 봉지막을 개발하여 실제 세탁 과정에서 디스플레이 모듈을 보호하여 안정적으로 구동하도록 하였다. 일반적으로 세탁으로 인한 봉지막의 성능 저하는 세탁 중에 발생하는 봉지막 내부 물질의 분해가 주된 원인으로 알려져 있다. 이러한 열화를 방지하기 위해 Si-O 결합과 Al_2O_3 사이에서 기인하는 양성자화-탈양성자화 반응을 이용하여 세탁 환경에서의 봉지막 분해를 방지하였다. 기능성 봉지막이 적용된 세탁 가능한 웨어러블 디스플레이 모듈은 실제 직물 위에 제작되었으며 세탁 이후에도 안정적인 동작을 보여주었다. 또한 20회의 반복 세탁 이후에도 별다른 성능 저하가 없었으며 3 mm의 굽힘 반경에서도 안정적으로 동작하여 우수한 기계적 성능을 나타내는 등 최신 직물 기반 웨어러블 디스플레이 모듈의 성능 및 상용화 가능성을 보여주고 있다(Fig. 3e).

3.2. 섬유 기반 OLED 디스플레이 연구

직물을 기판으로 활용하는 방법 이외에도 섬유 자체를 OLED 소자의 플랫폼으로 응용하는 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. O'Connor et al.(2007)에 의해 $480 \mu\text{m}$ 두께의 PI (polyimide)가 코팅된 실리카 섬유 위에 OLED 소자를 진공 증착하여 최초의 섬유 모양의 OLED 소자가 보고 되었다(Fig. 4a). 보고된 섬유 기반의 형광 OLED는 회전식 진공 증착법을 사용하여 섬유 전체 표면에 균일하게 증착 되었다. 이러한 섬유형 OLED의 경우 유기층이 양 금속 전극 사이에 위치하지만, 섬유 특유의 원통형 구조로 인하여 평면형 OLED와 달리 마이크로캐비티 효과가 유발되지 않는다. 따라서 이러한 원통형 섬유 기반 OLED의 전계발광 스펙트럼은 시야각의 독립성을 가질 수 있어 조명 응용 분야에 큰 장점을 가진다. 하지만 회전식 진공 증착법의 경우 증착 공정에 비용이 많이 들고 대량 생산에 적합하지 않다는 한계점이 있다. 그럼에도 불구하고 현재 상용화 되어 있는 산업용 OLED 패널의 경우 대부분 고진공 열증착 공정법을 사용한다는 점에서 미루어 볼 때, 이러한 결과는 열증착 OLED를 섬유 형태의 폼팩터에 적용할 수 있다는 의의를 가진다.

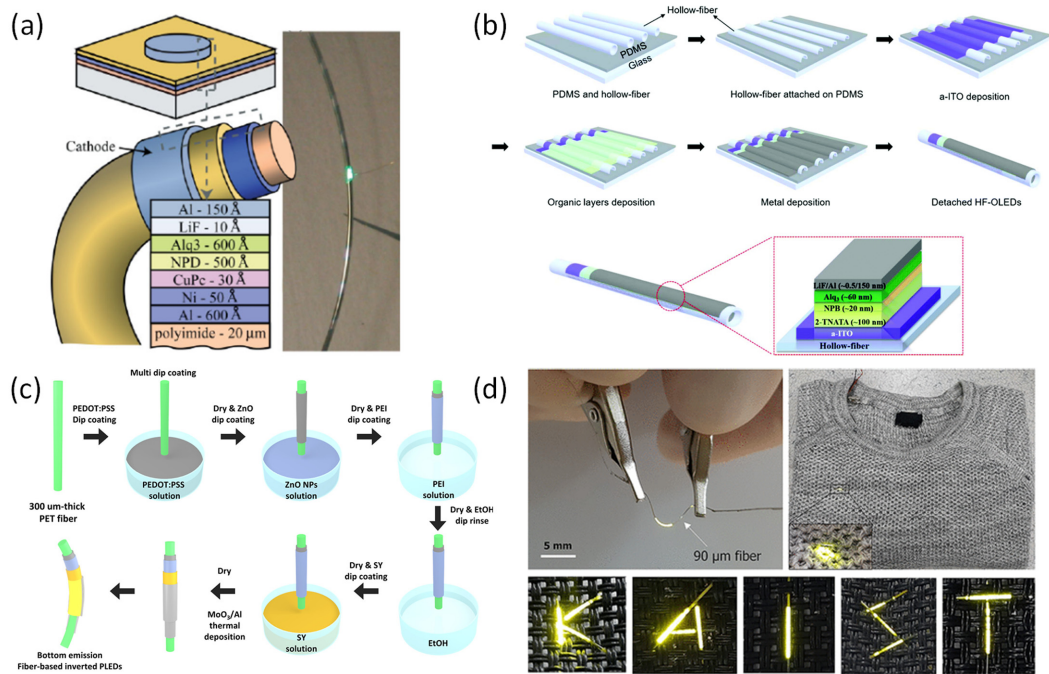


Fig. 4. Fiber-based OLED displays; (a) An illustration of a fiber-based OLED structure and its photograph(O'Connor et al., 2007). (b) Schematic of the fabrication process of the hollow-fiber shaped organic light emitting diodes(HF-OLED) (Ko et al., 2018). (c) Schematic illustration of the proposed fabrication scheme on cylindrical fibers(Kwon et al., 2018). (d) Demonstration of fiber OLEDs hand-woven into textiles(Kwon et al., 2018).

다음으로 PDMS(polydimethylsiloxane)와 중공사를 이용하여 ITO를 전극으로 사용하는 간단한 구조의 중공사 형태의 섬유형 OLED가 Ko et al.(2018)에 의해 개발되었다. 일반적으로 원통형 구조의 섬유를 사용하면 열증착특성 상 중앙보다 측면에서 더 얇은 두께를 가질 수밖에 없는데 이는 OLED 소자의 특성이 관측 방향에 따라 다르게 나오는 단점을 야기하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유리 중공사를 PDMS에 부착한 후 열증착하여 증착된 층이 섬유의 측면에서 훨씬 얇아지는 것을 방지할 수 있었다(Fig. 4b). 중공사를 이용하여 OLED를 제작했을 때 일반적인 평면형 OLED에 비해 2배 더 높은 외부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE)을 얻을 수 있음이 확인되었는데 이러한 EQE의 증가는 중공사의 기하학적 구조에서 기인하는 발광 효율(outcoupling efficiency)의 향상으로 인한 것임을 광학 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 또한 간단한 공정으로 슈퍼 엘로우 같은 발광 재료를 중공 코어에 주입함으로써 발광 색 변화를 이룰 수 있지만, 전극과 기판에 사용되는 취성 물질인 ITO와 유리 섬유는 태생적으로 유연성이 부족하므로 웨어러블 응용에 제한을 가지게 된다.

따라서 최근에는 웨어러블 폼팩터에 맞도록 폴리에틸렌 테레프타레이트(polyethylene terephthalate, PET) 섬유를 이용한 섬유형 OLED 개발이 이루어지고 있다. 그 중에서도 Kwon et al.(2018)과 Hwang et al.(2021) 등에 의해 용액 공정과 열 증착 공정의 조합을 기반으로 하는 섬유형 OLED가 보고 되었다(Fig. 4c, 4d). 용액 공정은 비용이 저렴하고 대면적 제작에 유

리한 장점을 가지고 있지만 현재까지 보고된 대부분의 용액 공정 OLED는 여전히 상부 전극을 열 증착 공정을 통해 만들고 있다. Kwon et al.(2018) 역시 상부 전극을 제외한 모든 층을 PET 섬유에 딥 코팅한 다음 금속 재질의 상부 전극을 열 진공 증착법을 통해 원통형 섬유의 한쪽 면에만 증착을 하고 섬유의 다른 면은 빛을 바깥으로 내보내기 위해 상부 전극을 달지 않은 형태로 섬유형 OLED를 제작하였다. 따라서 섬유형 OLED는 섬유와 수직인 방향에서 독특한 전계 발광 특성을 나타내는데, 이는 상부 전극이 증착 되었지만 섬유의 측면에서는 그 두께가 얇아지기 때문에 OLED 소자의 전하 균형에 영향을 미치지 때문이다.

한편 다중 딥코팅된 PEDOT:PSS(poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate))는 전극의 역할을 수행할 뿐 아니라 평탄화 층의 역할도 수행할 수 있기 때문에 거친 표면을 가지는 섬유의 추가적인 평탄화 작업을 피할 수 있다. 또한 전극의 일 함수를 낮추기 위해 용액 공정 가능한 산화아연 나노입자(zinc oxide nanoparticles, ZnO NPs)와 폴리에틸렌이민(polyethylenimine, PEI)를 사용하였다. 특히 콜로이드 나노입자의 경우 저온의 어닐링 과정에서도 고품질의 층을 형성할 수 있는 장점을 갖는데, 이는 나노 입자의 합성과 증착 공정이 분리되어 수행되었기 때문이다. 따라서 대부분의 의류에 사용되는 소재인 면, 폴리에스테르 또는 나일론의 물성을 고려하여 전체 제조 공정을 105°C 이하에서 진행할 수 있다. 이러한 과정을 통해 제조된 PET 섬유 기반 OLED는 10 V 미만

에서 10,000 cd/m² 이상의 높은 휘도와 11 cd/A 이상의 전류 효율을 기록했으며 각 층의 두께는 주사형 투과전자현미경(scanning transmission electron microscope, STEM)을 통해 측정되었다.

섬유 기반의 OLED 소자 제작에 활용되는 딥 코팅 공정에서는 섬유의 인출 속도를 조절하여 증착 속도 및 두께를 정할 수 있기 때문에 90~300 μm 범위의 다양한 직경을 가진 섬유에 적용이 가능하다. 여기에서 섬유의 직경이 얇아진다는 것은 더욱 유연한 섬유형 OLED를 제작할 수 있다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 직경이 얇은 섬유형 OLED는 3.5 mm의 굽힘 반경에서도 정상적으로 동작하며 손으로 직조가 가능하다. 마지막으로 ALD를 통해 Al₂O₃로 구성된 봉지막을 제작하여 섬유형 OLED의 구동 수명이 정전류 구동 기준으로 80시간을 만족한다는 것을 보여주었다. 하지만 OLED 구성 요소에 비해 상대적으로 취성 특성이 강한 봉지막 재료는 섬유형 OLED 전체의 유연성을 저하시키며, 이는 기계적 유연성 측면에서 섬유형 OLED의 잠재력을 발휘하는데 있어 장애물로 여겨진다.

4. 결 론

인류는 선사 시대부터 일상 생활에서 직물을 다양하게 활용해 왔으며 추위로부터 인류를 지켜준 직물은 이제 다양한 패션을 통해 심미적인 기능을 수행하고 있다. 전통적인 직물은 섬유와 필라멘트를 사용한 직조 구조로 구성되었지만, 최근 전자 기술의 발전으로 인해 전자 섬유 및 스마트 섬유와 같은 새로운 섬유 기술이 등장하고 있다. 이러한 전자 섬유는 두 가지 유형으로 분류할 수 있는데, 전자 부품이 내장된 섬유를 직물로 직조하는 방식과 전자 소자를 직물 기판에 직접 증착하는 방식이다. 전자 섬유는 스마트 웨어러블 전자 장치를 구현할 수 있기 때문에 인간의 편의를 증진하는 차세대 첨단 기술로 간주된다. 따라서 많은 연구 그룹들이 OLED, 전계 효과 트랜지스터(field effect transistor, FET), 태양 전지 및 광전자 소자와 같은 유연한 장치를 직물에 통합하기 위해 적극적으로 연구를 수행하고 있으며 이러한 흐름에 따라 전자 섬유 기술을 이용한 웨어러블 전자 소자의 최근 발전에 대한 여러 가지 광범위한 연구가 보고되고 있다. 하지만 직물 기반 OLED 개발에 대한 집중적인 검토는 아직 많이 보고되지 않았으므로, 본 논문은 이와 관련하여 섬유 또는 직물 기반 OLED의 제조 방법, 기계적 유연성, 신뢰성 및 세탁 가능성과 그 응용 방안에 대해 논의하고자 하였다.

현재의 OLED 기반 웨어러블 디스플레이는 직물의 평탄화 기술, 투명하고 유연한 전극 제작 기술 그리고 안정적인 동작을 위한 기능성 봉지막 기술 중심으로 연구 개발이 진행되어 오고 있다. 우선 직물의 거친 표면 위에 박막 형태의 OLED 소자가 직접적으로 증착되기 어렵기 때문에 이를 위한 평탄화 기술이 필요하다. 이때 직물의 유연성과 드레이프성을 해치지 않는 것이 가장 중요하다. 다음으로 OLED 디스플레이 소자의

발광 특성을 최대로 나타내기 위한 유연 투명 전극 기술개발이 필요하다. 유연 투명 전극은 직물 기반 웨어러블 디스플레이에 적합하도록 뛰어난 유연성과 높은 투과도를 확보하는 것이 기존의 전극 제작 기술과의 차이점으로 볼 수 있다. 마지막으로 직물 기반 OLED의 안정적인 동작을 위한 봉지막 기술이 요구되는데, 이 역시 다른 요소 기술들처럼 뛰어난 유연성과 높은 투과도를 요구한다. 즉, OLED 기반 웨어러블 디스플레이는 기존의 디스플레이와 비교했을 때, 직물 고유의 기계적 물성을 유지하기 위한 높은 유연성이 요구되는 것을 알 수 있다.

이를 토대로 직물 기반 OLED 디스플레이와 섬유 기반 OLED 디스플레이로 나뉘어 개발이 진행 중이다. 직물 기반 OLED 디스플레이는 상기 기술한 요소 기술을 중점으로 연구 개발이 이루어지고 있으나, 이들을 융합할 수 있는 집적화 기술에 대한 연구 개발은 미흡한 상태이다. 섬유 기반 OLED 디스플레이의 경우 직물 기반 OLED 디스플레이와는 달리 직조를 통해 직물을 형성하고 통기성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 기술의 성숙도와 소자의 발광 성능이 아직 직물 기반 OLED에 비해 상대적으로 부족하며, 추가적인 직조 기술에 대한 연구 개발도 필요하다. 결론적으로, OLED 기반 웨어러블 디스플레이는 상용화 측면에서 볼 때 아직은 완전하지 않다. OLED 기반 웨어러블 디스플레이가 성공적으로 상용화되기 위해서는 요소 기술들의 집적화가 필요하며, 인체 굴곡을 비롯한 각종 변형에서의 기계적인 거동에 대한 정확한 해석이 필요하다. 또한 다양한 온도와 습도, 세탁 환경 등 가혹한 환경에서도 성능을 안정적으로 유지할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 현재 직물 기반 OLED 웨어러블 디스플레이의 상용화를 위해 전세계적으로 연구 및 기술 개발이 활발하게 진행되고 있으며 긍정적인 결과들이 꾸준히 발표되고 있다. 가볍고 유연하며 신축성 있는 직물 기반 OLED 디스플레이는 사용자가 불편함 없이 일상생활에서 착용 가능하기 때문에 이를 활용한 폭넓은 스마트 텍스타일 어플리케이션이 개발될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부, 농림축산식품부, 농촌진흥청)의 재원으로 한국연구재단, 한국농림식품기술기획평가원, 한국스마트팜 R&D재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1F1A1076261, No. 421015041HD020).

References

- Bender, V. C., Marchesan, T. B., & Alonso, J. M. (2015). Solid-state lighting - A concise review of the state of the art on LED and OLED modeling. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 9(2), 6-16. doi:10.1109/MIE.2014.2360324
- Choi, S., Kwon, S., Kim, H., Kim, W., Kwon, J. H., Lim, M. S., Lee, H. S., & Choi, K. C. (2017). Highly flexible and efficient fabric-based organic light-emitting devices for clothing-shaped wearable

- displays. *Scientific Reports*, 7(1), 1-8. doi:10.1038/s41598-017-06733-8
- 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.
- Dameron, A. A., Davidson, S. D., Burton, B. B., Carcia, P. F., McLean, R. S., & George, S. M. (2008). Gas diffusion barriers on polymers using multilayers fabricated by Al₂O₃ and rapid SiO₂ atomic layer deposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(12), 4573-4580. doi:10.1021/jp076866+
- De Vos, M., Torah, R., Glanc-Gostkiewicz, M., & Tudor, J. (2016). A complex multilayer screen-printed electroluminescent watch display on fabric. *Journal of Display Technology*, 12(12), 1757-1763. doi:10.1109/JDT.2016.2613906
- Han, J. H., Kim, D. H., Jeong, E. G., Lee, T. W., Lee, M. K., Park, J. W., Lee, H., & Choi, K. C. (2017). Highly conductive transparent and flexible electrodes including double-stacked thin metal films for transparent flexible electronics. *ACS applied materials & interfaces*, 9(19), 16343-16350. doi:10.1021/acsami.7b04725
- Hu, B., Li, D., Ala, O., Manandhar, P., Fan, Q., Kasilingam, D., & Calvert, P. D. (2011). Textile-based flexible electroluminescent devices. *Advanced Functional Materials*, 21(2), 305-311. doi:10.1002/adfm.201001110
- Hwang, Y. H., Kwon, S., Shin, J. B., Kim, H., Son, Y. H., Lee, H. S., Noh, B., Nam, M., & Choi, K. C. (2021). Bright-multicolor, highly efficient, and addressable phosphorescent organic light-emitting fibers - Toward wearable textile information displays. *Advanced Functional Materials*, 31(18), 2009336. doi:10.1002/adfm.202009336
- Jeong, E. G., Han, Y. C., Im, H. G., Bae, B. S., & Choi, K. C. (2016). Highly reliable hybrid nano-stratified moisture barrier for encapsulating flexible OLEDs. *Organic Electronics*, 33, 150-155. doi:10.1016/j.orgel.2016.03.015
- Jeong, E. G., Jeon, Y., Cho, S. H., & Choi, K. C. (2019). Textile-based washable polymer solar cells for optoelectronic modules - Toward self-powered smart clothing. *Energy & Environmental Science*, 12(6), 1878-1889. doi:10.1039/C8EE03271H
- 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.
- Kim, W., Kwon, S., Lee, S. M., Kim, J. Y., Han, Y., Kim, E., Choi, K. C., Park, S., & Park, B. C. (2013). Soft fabric-based flexible organic light-emitting diodes. *Organic Electronics*, 14(11), 3007-3013. doi:10.1016/j.orgel.2013.09.001
- Kim, W., Kwon, S., Han, Y. C., Kim, E., Choi, K. C., Kang, S. H., & Park, B. C. (2016). Reliable actual fabric-based organic light-emitting diodes - Toward a wearable display. *Advanced Electronic Materials*, 2(11), 1600220. doi:10.1002/aem.201600220
- Ko, K. J., Lee, H. B., Kim, H. M., Lee, G. J., Shin, S. R., Kumar, N., Song, Y. M., & Kang, J. W. (2018). High-performance, color-tunable fiber shaped organic light-emitting diodes. *Nanoscale*, 10(34), 16184-16192. doi:10.1039/C8NR05120H
- Koncar, V. (2005). Optical fiber fabric displays. *Optics and Photonics news*, 16(4), 40-44. doi:10.1364/OPN.16.4.000040
- Kwon, S., Kim, H., Choi, S., Jeong, E. G., Kim, D., Lee, S., Lee, H. S., Seo, Y. C., & Choi, K. C. (2018). Weavable and highly efficient organic light-emitting fibers for wearable electronics - A scalable, low-temperature process. *Nano letters*, 18(1), 347-356. doi:10.1021/acs.nanolett.7b04204
- Meyer, J., Schmidt, H., Kowalsky, W., Riedl, T., & Kahn, A. (2010). The origin of low water vapor transmission rates through Al₂O₃/ZrO₂ nanolaminate gas-diffusion barriers grown by atomic layer deposition. *Applied Physics Letters*, 96(24), 117. doi:10.1063/1.3455324
- Na, Y., Tang, C., Han, R., & Kim, S. (2021a). A study on the development of LED stage costume design using arduino lilypad and sound sensor. *Journal of Fashion Business*, 25(1), 133-149. doi:10.12940/jfb.2021.25.1.133
- Na, Y., Tang, C., Han, R., & Kim, S. (2021b). Research on the development of inclusive safety vest design for traffic accidents using lilypad and a light sensor. *Journal of the Korean Society of Costume*, 71(2), 142-162. doi:10.7233/jksc.2021.71.2.142
- O'Connor, B., An, K. H., Zhao, Y., Pipe, K. P., & Shtein, M. (2007). Fiber shaped light emitting device. *Advanced Materials*, 19(22), 3897-3900. doi:10.1002/adma.200700627
- 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
- Tang, C. W., & VanSlyke, S. A. (1987). Organic electroluminescent diodes. *Applied physics letters*, 51(12), 913-915. doi:10.1063/1.98799

(Received November 18, 2021; 1st Revised November 30, 2021;
2nd Revised December 15, 2021; 3rd Revised November 26, 2021;
Accepted December 22, 2021)