

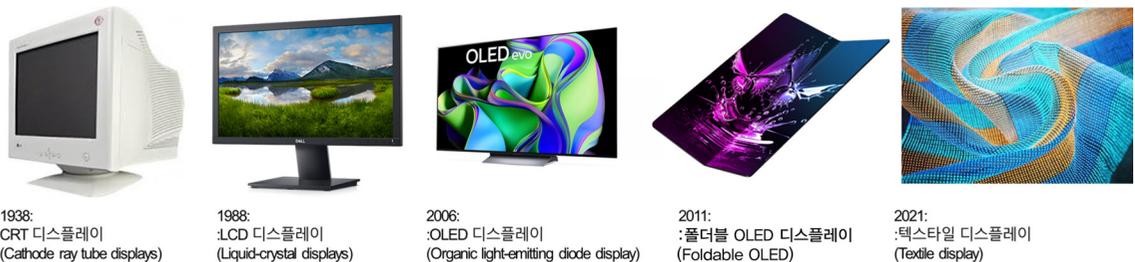
디스플레이의 변신은 어디까지? 텍스타일 디스플레이 도래



진형민

- 2011. 연세대학교 금속시스템공학 학사
- 2013. 한국과학기술원 신소재공학 석사
- 2017. 한국과학기술원 신소재공학 박사
- 2017-2018. KAIST 응용화학연구소 박사후연구원
- 2018-2018. 시카고대학교 박사후연구원
- 2019-2022. 한국원자력연구원 선임연구원
- 2022-현재. 충남대학교 유기재료공학과 조교수

디스플레이(display) 기술은 인간과 디바이스 간의 소통창구 역할로서 우리의 일상에서 폭넓게 사용되고 있다. 우리가 일상적으로 사용하는 스마트폰, 컴퓨터, 텔레비전 등은 모두 디스플레이 기술을 근간으로 하고 있으며, 다양한 폼팩터(form factor) 구현과 소자 경량화 등을 목적으로 디스플레이 기술은 계속해서 발전해 나가고 있다. 초창기 디스플레이로 대표되는 CRT(cathode-ray tube)는 부피가 크고 딱딱한 형태를 가지고 있었으나, 액정 디스플레이(LCD, liquid crystal display)의 개발과, 이후에 이어지는 유기발광다이오드(OLED, organic light-emitting diode)의 등장으로 더 얇고 유연한 디스플레이가 대중화되었다. 이러한 디스플레이 기술의 진보는 전자기기의 이동성과 편의성 향상시켜 스마트폰과 태블릿과 같은 모바일 기기의 대중화를 이끌었으며, 다양한 폼팩터를 가능케함으로써 최근에는 폴더블(foldable) 스마트폰 등의 개발도 가능케하였다. 이렇듯 디스플레이 기술의 발전은 전자소자의 혁신을 이끌어왔다. 하지만 현재 대중적으로 활용되는 LCD의 경우 대부분 유리기판 등 딱딱한 기판 위에 정형화된 박막형태 소자로 제작되며, OLED로 제작된 유연한(flexible) 디스플레이의 경우에도 여전히 폴리이미드(polyimide)와 같은 유연기판에 박막형태 소자로 제작되기 때문에 신축성 및 유연성이 여전히 한정적이다. 현재 시판되고 있는 폴더블 스마트폰의 굽힘 범위가 한정적인 것도 이때문이다.



1938:
CRT 디스플레이
(Cathode ray tube displays)

1988:
LCD 디스플레이
(Liquid-crystal displays)

2006:
OLED 디스플레이
(Organic light-emitting diode display)

2011:
폴더블 OLED 디스플레이
(Foldable OLED)

2021:
텍스타일 디스플레이
(Textile display)

Figure 1. 디스플레이 기술의 변천사.

이러한 한계를 근본적으로 극복하기 위해 최근 섬유에 발광 소자를 통합한 텍스타일 디스플레이(textile display)가 등장했다. 텍스타일 디스플레이는 섬유 직조물형태로서 유연하고 통기성이 뛰어나며, 기존의 디스플레이와 달리 착용할 수 있다는 장점도 있다. 이러한 장점이 다양한 IT기술이 인간의 일상생활과 더욱 밀접하게 연결될 수 있으며, 텍스타일 센서, 연산장치 등과의 집적화를 통해 인간-기기 간 상호작용이 가능한 스마트 텍스타일(smart textile)을 구현하여 새로운 일상경험을 제공할 것이다. 무엇보다 유연성, 경량성, 내구성을 갖춘 텍스타일 디스플레이는 IoT, 헬스케어, 스포츠, 스마트홈, 패션 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용될 수 있는 무궁무진한 가능성을 지니고 있다. 텍스타일 디스플레이는 더 이상 공상과학소설 속 상상의 기술이 아니라, 빠르게 실현가능한 기술로 발전하고 있다. 따라서 본 고에서는 우리에게 성큼 다가온 텍스타일 디스플레이의 기술 발전의 변천사 및 향후 다양한 응용분야에 대해 소개하고자 한다.

지금까지 텍스타일 디스플레이를 개발하기에 앞서 여러 섬유형태의 발광소자 기술이 개발되어 왔다. 텍스타일 디스플레이의 개발이 성공적으로 이어지기 위해서는 기본적인 발광성능 뿐 아니라, 생산성과 내구성도 두루 갖춰야 한다. 또한, 직조과정에서 발생하는 마찰이나 늘어짐을 견딜 수 있어야 하고, 화학적 안정성과 더불어 기계적 유연성도 함께 갖춰야 한다. 이러한 요구사항을 충족시키기 위한 다양한 섬유 발광소자 개발을 위한 전략들을 아래에 소개하였다.

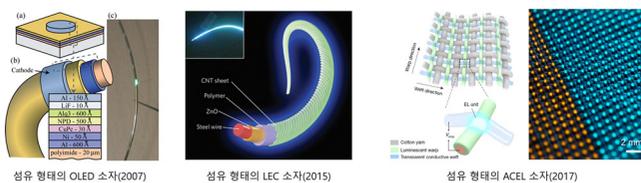


Figure 2. 다양한 섬유형태 발광소자들.

OLED의 경우 이미 다양한 유연디스플레이 제작에 활용되고 있기 때문에 이를 그대로 적용하여 섬유 혹은 텍스타일 디스플레이 형태로 제작하려는 연구가 2000년대 초부터 시도되고 있다. OLED 기반 섬유 발광소자는 섬유 위에 소자를 구성하는 각 기능층(전극, 정공주입층, 정공수송층, 유기발광층, 전자수송층, 전자주입층 등)을 순차적으로 증착하여 제작되며, 이렇게 만들어진 소자에 전압이 인가되면 전하가 전극으로부터 발광층으로 주입되면서 빛을 내게 된다. OLED 기

반 섬유 발광소자는 낮은 작동전압, 높은 발광강도, 우수한 휘도, 유연성 등의 장점을 가지고 있으나, 소자 제작 시 고진공 및 고온에서 여러층을 증착 과정이 수반되며, 유기소자 특성상 섬유 기관의 거친 표면과 변형으로 인해 디스플레이의 손상이 쉽게 발생할 수 있다는 단점이 있다. 무엇보다 유기 발광소자는 공기중에 노출 시 쉽게 열화가 발생하기 때문에 패키징되더라도 기계적 변형이나 마찰이 많이 발생하는 텍스타일 디스플레이에 도입하기에는 취약점이 존재한다.

무기계 발광소재를 사용하는 일반 발광다이오드(LED, light emitting diode)의 경우 OLED와 비교하여 더 높은 발광강도와 휘도, 그리고 화학적/기계적 안정성을 갖는다. LED는 무기반도체 층을 발광층으로 사용하며, 일반적으로는 섬유형태로 발광소자를 제조하기 보다는 마이크로 LED 모듈형태로 제조하고 이를 섬유 혹은 직물에 부착하는 형태로 주로 제작한다. 무기계 발광소자는 유기계 소재보다 안정성이 뛰어나며, 열적 및 기계적으로도 더 나은 안정성을 기대할 수 있다. 하지만 LED 기반 텍스타일 디스플레이 또한 복잡한 제조과정이 수반되며 OLED 대비 고증량으로 인해 대형 디스플레이나 고해상도 구현에 한계가 존재한다.

발광 전기화학셀(LEC, light-emitting electrochemical cell)은 직류(DC)전계에 의해 주입된 전자가 발광층 내 전해질과 반응하여 전하이온을 생성하고, 이 전하이온이 발광물질과 전기화학적으로 결합하면서 빛을 발생시킨다. 따라서 양 전극 사이에 이온전해질을 포함하는 발광층이 삽입된 아주 단순한 구조를 갖는다. OLED, LED와 비교하여 상대적으로 간단한 구조로 인해 저비용으로 대규모 섬유 발광소자 혹은 텍스타일 디스플레이 제작에 용이하다는 장점이 있다. 또한 단순한 구조로 인해 기계적 내구성 및 유연성이 뛰어나며, 세탁 후에도 안정적인 발광성능을 유지할 수 있다. 그러나 이온기반 소자이므로 응답속도가 여타 소자에 비해 느리고, 발광 강도가 낮아 추가적인 기술개발이 필요하다.

최근 섬유 및 텍스타일 디스플레이 개발을 위해 각광받고 있는 기술로는 교류전계발광소자(ACEL, alternating current electroluminescent)가 있다. 기본적인 원리는 LEC와 유사하지만, LEC의 경우 직류전압을, ACEL은 교류(AC)전압을 인가해 발광한다는 점이 가장 큰 차이점이다. 이러한 원리 차이로 인해 LEC는 전극과 발광층이 직접 맞닿아 있어야 하지만, ACEL의 경우 전계만 가해지면 되므로 발광층이 전극과 직접 맞닿아 있을 필요가 없다. 그러므로 단순한 구조는 유지하면서도 발광층을 유전체층 등으로 쌓을 수 있어 내구성을 더 높

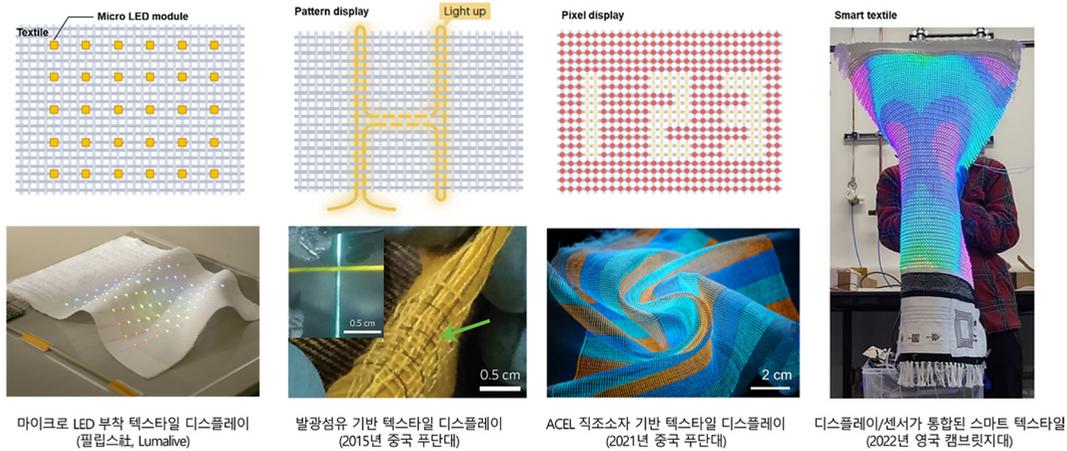


Figure 3. 텍스타일 디스플레이의 형태 및 텍스타일 디스플레이 기반 스마트 텍스타일 장치.

일 수도 있다. 또한 전극과 발광층을 서로 다른 섬유로 분리하여 경사(warp yarn)-위사(filling yarn)의 직조 형태로 소자를 제작할 수도 있기 때문에 텍스타일 디스플레이를 구현하는데 큰 강점을 갖는다. 하지만 높은 작동전압과 낮은 발광효율은 여전히 개선되어야 함으로 아직 남아있다.

섬유형 발광소자를 넘어 텍스타일 디스플레이를 개발하기 위해서는 적절한 텍스타일 디스플레이 모듈의 설계가 수반되어야 한다. 초창기의 방식으로는 텍스타일 기판에 얇은 필름형 LED를 부착하는 방식이 있으며, 매우 작은 크기의 마이크로 LED 모듈을 제작하여 텍스타일 위에 픽셀형태로 덧붙여 텍스타일 디스플레이를 구현하는 방식도 있다. 그러나 LED를 덧붙여 무게가 무겁고 모듈크기로 인해 고해상도 구현이 어려우며, 모듈의 박리 등 내구성 문제가 발생할 수 있다는 한계점이 존재한다. 이 문제를 해결하기 위해 디스플레이를 단순히 부착하는 방식에서 벗어나, 발광섬유를 텍스타일 직조 시에 포함시키는 짜 넣는 방식이 활발하게 연구되고 있다. 이를 통해 텍스타일과 디스플레이 간의 구조적 호환성을 높이고, 일상적인 사용 중에도 안정적인 디스플레이 성능을 유지하는 것이 이 전략의 핵심이다.

발광섬유 기반 디스플레이는 앞서 언급한 다양한 종류의 섬유 발광소자를 직조 시 함께 넣음으로써 상대적으로 손쉽게 제작할 수 있다. 이러한 발광섬유 기반 디스플레이는 텍스타일 형태로 제작 후에도 마모, 굽힘 및 세탁에 대한 저항성이 뛰어난 특성을 유지한다. 하지만 해당 전략은 발광섬유가 지나가는 사전에 설계된 패턴만을 표시할 수 있어 완벽한 형태의 동적 디스플레이(dynamic display)를 구현하기는 어렵다.

일반적으로 일컬어지는 동적 디스플레이는 전기신호를 통

해 행과 열의 개별 발광유닛(혹은 픽셀)을 제어하여 시간에 따라 다양한 패턴을 표시할 수 있는 디스플레이를 일컫는다. 우리가 마주하는 텔레비전이나 모니터는 모두 동적 디스플레이에 해당한다. 짜임방식(interwoven)으로 만들어진 직물은 본래 수천 개의 경사-위사 교차 지점을 가지고 있어 행과 열의 교차구조를 이미 지니고 있다. 이러한 교차 지점에 ACEL 기반 마이크로 발광유닛을 도입하여 각 교차지점이 하나의 개별 픽셀로 작동하는 동적 디스플레이가 2021년 네이처지에 보고되었다. 해당 연구의 경우 교류 발광층이 증착된 경사를 투명한 도전성 섬유가 포함된 위사와 교차하도록 하여 각 교차지점이 하나의 ACEL 발광소자로 작동하도록 하였다. 이를 통해 유연성과 통기성이 우수하면서도 각 교차지점이 하나의 픽셀로 작동하는 완전한 형태의 텍스타일 동적 디스플레이를 성공적으로 구현하였다.

이와 같이 텍스타일 디스플레이 기술은 어느덧 우리에게 성큼 다가와 있으며, 이는 진정한 의미의 스마트 텍스타일의 상용화가 가까이 왔음을 의미한다. 종래 평면형 디스플레이는 크기와 유연성의 한계로 인해 텍스타일 및 웨어러블 기기에 사용이 제한되어 왔으나, 텍스타일 디스플레이는 이러한 문제를 근본적으로 해결할 수 있기 때문이다. 특히 의류나 대면적 직물에 위화감 없이 적용될 수 있기 때문에 헬스케어 및 패션 분야에서 여러 잠재성을 지니고 있다. 이미 학계에서는 텍스타일 디스플레이에 여러 센서와 에너지 발생장치 등을 통합한 스마트 텍스타일 소자들이 보고되고 있으며, 향후 상용화를 위한 적극적인 기술개발을 통해 우리의 일상에서 스마트 텍스타일 제품들을 쉽게 접하게 될 날을 고대해 본다.

참고문헌

1. B. O'Connor, K. H An, Y. Zhao, K. P Pipe, M. Shtein, "Fiber Shaped Light Emitting Device", *Adv. Mater.* 2007, **19**(22), 3897-3900.
2. R. D. Costa, E. Orti, H. J. Bolink, F. Monti, G. Accorsi, N. Armaroli, "Luminescent ionic transition-metal complexes for light-emitting electrochemical cells", *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, **51**(33), 8178-8211.
3. H. Yang, C. R. Lightner, L. Dong, "Light-emitting coaxial nanofibers", *ACS Nano* 2012, **6**(1), 622-628.
4. W. Weng, P. Chen, S. He, X. Sun, H. Peng, "Smart Electronic Textiles", *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, **55**(21), 6140-6169.
5. Zhitao Zhang, et al., "A colour-tunable, weavable fibre-shaped polymer light-emitting electrochemical cell", *Nat. Photonics* 2015, **9**(4), 233-238.
6. X. Shi, et al., "Large-area display textiles integrated with functional systems", *Nature* 2021, **591**(7849), 240-245.
7. H. W. Choi, et al., "Smart textile lighting/display system with multi-functional fibre devices for large scale smart home and IoT applications", *Nat. Commun.* 2022, **13**(1), 814.
8. Zhen Wang, Yue Liu, Zihao Zhou, Peining Chen, Huisheng Peng, "Towards integrated textile display systems", *Na. Rev. Electr. Eng.* 2024, **1**(7), 466-477.