세계 빛의 해

차세대 디스플레이

DOI: 10.3938/PhiT.24.020

김상우·김태훈·홍용택

Next-generation Electronic Displays

Sangwoo KIM, Taehoon KIM and Yongtaek HONG

No longer are electronic displays rigid, flat, simply image-displaying, conventional devices. Such displays have gone beyond flat, even to curved, features. Such are the hottest new features of next-generation electronic display. In the future, electronic displays will be everywhere, conformably covering or being attached to surfaces with various shapes and sizes; thus, imaging our lives without electronics displays would be difficult. As a result, electronic display technology has evolved so that stable operation is guaranteed under mechanical deformations such as folding, flexing, bending, rolling, and even stretching. Flexibility and even stretchability, without a doubt, are the key features of the next-generation electronic displays that will play important roles in implementation of mechanically-deformable electronic systems. In this article, we briefly describe the concept of, progress in, and applications of next-generation flexible and stretchable electronic display technology.

저자약력

김상우 박사는 2014년 서울대학교에서 공학박사를 취득하고 현재 동대학 전기·정보공학부에서 박사 후 연구원으로 재직 중이며 전자피부 응용을 위한 신축성 센서에 대한 연구를 하고 있다. (poirot83@snu.ac.kr)

김태훈 박사는 2014년 서울대학교에서 공학박사를 취득하고 현재 동대학 전기·정보공학부에서 박사 후 연구원으로 재직 중이며 인쇄공정 기반 탄소나노튜브 필름 특성에 대한 연구를 하고 있다. (rhlight4@snu.ac.kr)

홍용택 교수는 2003년 University of Michigan, Ann Arbor에서 공학박사를 취득하고 코닥 회사 시니어 연구원을 거쳐 2006년부터 현재까지 서울대학교 전기·정보공학부에 재직하고 있으며, 디스플레이와 센서 응용을 위한 유연, 신축성 전자 소자 및 회로에 대한 연구를 하고 있다. (yongtaek@snu.ac.kr)

서 론

우리는 지금 디스플레이에 둘러싸여 있다고 해도 과언이 아니다. 집에서, 직장에서, 심지어 야외에서도 아주 손쉽게 디스플레이를 접할 수 있으며, 이를 통해 언제 어디서나 정보를 주고받을 수 있다. 과거의 디스플레이가 수동적인 화면을 단순히 보여주지만 했다면, 현재의 디스플레이는 이를 넘어서, 우리에게 유용한 정보를 적재적소에서 전달해 주는 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 물론 이와 같은 정보 전달의 특성이 디스플레이 단독으로 이루어지는 것은 아니지만, 사용자와 특정 정보 간에 최종적인 접촉이 이루어지는 매개체라는 점에서 디스플레이의 중요도를 헤아릴 수 있다. 이런 의미에서, 단순히 디스플레이라는 표현 대신 '정보 디스플레이'(Information Display)라는 용어로 표현되기도 한다.

지금까지의 디스플레이 발전이 경량화, 대형화 혹은 소형화, 고해상도 등의 대표적인 키워드로 설명될 수 있다면, 앞으로 요구되는 차세대 디스플레이는 이에 더해서 새로운 기계적 특성을 갖출 수 있도록 개발되고 있다. 기존 디스플레이들이 딱딱하고 평면상에 고정된 형태를 지니고 있는 반면, 앞으로는 형태의 자유도가 더해져 사용자의 필요에 따라 구조 변형이 가능한 디스플레이를 주위에서 보게 될 것이다. 마치 우리가 넓은 면적을 가진 종이를 다양한 형태로 말아서, 또는 접어서 보관하고 필요에 따라 넓게 펼쳐 사용하거나, 풍선이나 유연한 고무판처럼 넓게 잡아당겨 화면의 크기를 변화시킬 수 있는 등의 새로운 개념의 디스플레이 기술 개발이 진행되고 있다. 우리는 이런 특성을 가지는 디스플레이를 유연 디스플레이(Flexible Display)와 신축성 디스플레이(Stretchable Display)라고 부른다. 본고에서는 이 두 가지 차세대 디스플레이에 대해 간단히 개념과 연구 동향 위주로 소개하고자 한다.

기계적 변형과 차세대 디스플레이 기술

유연 디스플레이와 신축성 디스플레이 기술에 대한 설명에 앞서 기계적 변형에 대해 잠시 살펴보자. 지구상에 존재하는

Fig. 1. Stress-strain curves in tensile test.

모든 물질들은 그 물질에 가해지는 늘어나는 변형(기계적 인장력, tensile stress)에 대해 서로 다른 두 가지 반응 양상을 보이는데, 이를 각각 ‘탄성 변형(elastic deformation)’과 ‘소성 변형(plastic deformation)’으로 칭한다. 탄성 변형은 내부 원자 배열순서나 결정 구조의 변화 없이 발생하는 변형으로, 외부의 힘이 제거되면 다시 원래 상태로 회복한다. 반면, 소성 변형은 외부의 힘에 의해 내부의 미세한 결정 구조나 원자 배열순서의 변화가 축적되어 발생하는 변형으로, 외부의 힘이 제거되어도 소성 변형된 만큼의 변화량은 영구적으로 남게 된다. 이 두 가지의 변형 기구는 서로 개별적으로 존재하는 것이 아니고, 한 물질 안에서 동시에 존재한다. 특정한 크기의 힘에 의해 물질은 탄성 변형을 경험하게 되고, 이 수준을 넘어선 힘에 대해서는 순차적으로 소성 변형을 경험한다. 모든 물질은 인장 시험(tensile test) 시 서로 다른 탄성, 소성 변형 영역을 가진다. 예를 들면, 고무는 탄성 영역이 굉장히 넓은 재료이고, 세라믹은 탄성 영역이 좁은 재료이며 단단하지만 쉽게 부서진다. [그림 1]

현재 우리가 사용하고 있는 디스플레이 기기는 탄성 영역이 좁은 재료를 이용하여 만들어지므로, 최근 몇몇 핸드폰에 대해서 강도 실험 결과가 보도되기도 했지만, 어느 정도의 힘이 가해지면 원치 않게 휘기도 하며, 한계 이상의 힘이 가해지면 쉽게 부서지기도 한다. 앞서 설명한 기계적 변형에서처럼 탄성 및 소성 변형의 성질을 이용하기보다는 한계 이하의 힘을 미리 가해서 다소 휘어서 고정시킨 형태의 디스플레이 제품을 우리는 시장에서 접할 수 있다. 이러한 디스플레이들은 차세대 디스플레이에는 미치지 못하지만 새로운 기계적 형태를 가진 과도기적 제품들에 응용되어 빠르게 출시되고 있다. 최근 디스플레이 시장의 구도가, 기존의 고해상도, 패널의 크기와 얇기 등의 경쟁으로부터 유연한 응용, 다양한 기능, 인간 중심의 인

Fig. 2. Concept illustrations of curved, flexible and stretchable displays.

터페이스 위주의 경쟁으로 옮겨지면서, 곡면 디스플레이(TV나 스마트 워치, 엣지(Edge) 디스플레이 스마트 폰 등 새로운 디스플레이 시장이 창출되고 있다. 딱딱한 유리 기판 위에 제작된 기존의 평면 디스플레이를, 곡면 성형이 가능한 기판에 제작하여 다양한 응용이 가능한 디스플레이로 변모시키고, 인간 친화적인 곡면 인터페이스를 새롭게 개발하여 최종적으로 미래에 다가올 인간의 신체 위에서 모든 업무, 진료와 여가활동이 가능한 인간 중심의 유비쿼터스(Ubiquitous) 시대의 시각적 표시장치를 개발하고자 많은 노력을 기울이고 있다.

현재의 과도기적 디스플레이는 곡면의 형태를 가지기는 하나, 그 형태가 ‘고정된’ 것이므로 유연성 디스플레이라고 말하기는 어려우며, 대신 커브드(Curved) 디스플레이라고 불린다. 다만, 현재의 커브드 디스플레이의 기계적 특성이 진화하게 되면 유연 디스플레이가 등장하며, 그 이후에는 신축성 디스플레이로 발전할 것으로 예상된다. [그림 2] 현재 삼성, LG와 같은 디스플레이 패널 제작 회사에는 주로 커브드 타입의 패널을 제작하여 상업적으로 공급하고 있으며, 이를 기반으로 2013년 1월 CES(Consumer Electronics Show) 기조강연에서 삼성 디스플레이는 굽은 형태의 디스플레이를 발표하였으며, 2014년부터는 LG 디스플레이와 삼성 디스플레이에서 커브드 타입의 디스플레이가 차용된 스마트폰과 곡면 TV를 상업적으로 판매하고 있다. 다음 장에서는 차례로 유연 및 신축성 디스플레이의 자세한 소개 및 동향을 알아보도록 하겠다.

유연 디스플레이

현재 유연 디스플레이는 1~2년 내 상업적 응용을 목표로 발 빠른 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 상업적인 활용의 가능성은 디스플레이에 필요한 각 핵심 분야에서의 높은 기술 수준을 바탕으로 하고 있다. 디스플레이에 필요한 핵심적인 다음의 요소-기판소재, 디스플레이 구동방식, 디스플레이 구동소자에 대한 설명과 함께 유연성 디스플레이에 대해 살펴해보도록 하자.

1. 기판소재

디스플레이 구성의 근본이 되는 기판 소재 및 기술에서는

Fig. 3. Schematic description of two different types of displays.

유연성이 가장 핵심적인 특성이다. 얇게 하여 유연성을 향상시킨 유리 기판, 다양한 변형이 가능한 종이 기판, 고온 공정이 가능한 금속 포일(metal foil) 기판 등 다양한 후보 군이 존재하지만, 유연성 디스플레이 기판 소재에서 가장 높은 가능성을 가진 재료는 플라스틱 기판이다. 저렴한 제조비용으로 대면적 제작이 가능하며, 유리와 비견될 만큼 높은 광학특성과 플라스틱 특유의 가벼운 무게는 운반, 가공, 공정상에 많은 유리함을 제공한다. 하지만, 유리나 금속 포일과 같은 타 기판에 비해 높은 투습율로 인해 수분의 침투를 막기 위한 추가적인 보호막이 필요한 점, 낮은 열 안정성과 화학적 안정성으로 인해 구동 소자 제작에 많은 제한을 야기하는 점은 플라스틱의 가장 큰 단점으로 지적되고 있으나, 기판의 온도를 올리지 않는 새로운 공정 기술의 개발과 투습율을 저감시키는 다층구조의 도입 등으로 기술적인 문제를 해결하고 있다. 대표적인 플라스틱 기판 소재로는 PET(Polyethyleneterephthalate), PES(Polyethersulfone)와 PI(Polyimide) 등이 있다.

2. 디스플레이 방식

디스플레이의 구동방식은 크게 투과형(transmissive)과 발광형(emissive) 디스플레이로 나뉜다. [그림 3] 투과형 디스플레이는 액정(liquid crystal)과 같은 광학 스위치 어레이를 이용하여 뒷면에 존재하는 광원(back light unit)의 빛을 선택적으로 투과시켜 원하는 영상을 표시하며, 발광형 디스플레이는 장치 내 전류를 직접 발광 소재(light emitting device)에 전달하여 특정 파장의 빛을 발광하여 영상을 표시한다. 투과형 디스플레이 작동방식은 수분과 산소에 상대적으로 덜 민감하며, 기존의 대면적 디스플레이 공정 기술을 이용하기 때문에 높은 산업적인 연계성을 가지지만, 근본적인 작동방식인 뒷면 광원을 이용한 선택적 투과로 인해 기계적으로 변형된 곡물에서는 빛의샘(leakage) 현상 등 다양한 문제를 일으킬 수 있는 단점을 가지고 있다. 반면 발광형 디스플레이 작동방식은 개별적인 발광소자가 각 소자에 공급되는 전류에 의해 발광하는 형태이기 때문에 추가적인 광원이 따로 필요하지 않으며, 유연한 기판에

의한 형태 변화에 대해서는 자유로운 장점을 지니지만, 가장 많이 이용되는 발광 소재인 유기물이 수분과 산소에 의해 치명적인 수명 단축이 발생하는 점, 오랜 사용시 발생하는 발광 소재의 번인(burn-in) 현상 등은 반드시 해결되어야 할 부분이다. 그 외에도 반사형(reflective) 디스플레이를 기반으로 하는 e-paper의 경우 FPD(Flat Panel Display) International 2005 행사에서 LG Philips에 의해 흑백 유연성 디스플레이 형태 시제품이 발표되기도 했다. 다양한 색상 조합과 빠른 화면전환이 어려운 단점이 있지만, 전력 소모가 낮은 점을 이용하여 모바일이나 e-book 등 특정한 영역에서의 응용이 기대된다.

3. 디스플레이 구동소자

주로 박막 트랜지스터(thin film transistor)를 이용하는 구동소자는 어레이 형태로 구성되어, 특정 위치에 원하는 전기적 신호를 전달하여 앞서 언급한 여러 방식의 디스플레이 형태에서 영상을 표시하는 역할을 한다. 구동소자의 특성, 즉 동작전압, 전하이동도는 소비 전력, 구현 가능한 해상도 등 디스플레이의 성능에 밀접한 영향을 준다. 기존 디스플레이 시장에서 가장 많이 활용된 구동소자용 재료는 LCD 디스플레이에 활용되는 비정질 실리콘(amorphous-Si) 또는 AMOLED 디스플레이에 활용되는 다결정 실리콘(Low Temperature Poly-silicon)과 같은 실리콘 기반의 반도체 물질이며,^[1] 플라스틱 기판 위에 실리콘 기반 반도체 물질을 이용한 디스플레이 기술이 초기에는 발표되었다.^[2] 최근에는 낮은 공정온도, 고성능, 높은 균일도를 가지며 대면적 제작에도 비교적 용이한 산화물(oxide) 반도체 물질을 활용하는 경향도 증가하는 추세이다.^[3] 실리콘과 산화물(oxide) 반도체 물질의 우수한 동작 특성과 높은 균일도를 기반으로 다양한 상업적인 제품들이 출시되고 있지만, 이러한 세라믹 물질들의 근본적인 한계인 취성(brittleness) 특성 때문에 높은 차원의 기계적 변형에서는 TFT 본연의 특성이 크게 변화하기 때문에 유연 디스플레이 응용에 기술적인 한계가 있으나, 빠른 상용화를 위해서 기계적 변형 시 가장 스트레스를 적게 받는 층(neutral plane)에 TFT 어레이가 위치하도록 하는 공정 기술이 개발되어 현재 활용되고 있다. 하지만, 궁극적으로는 아주 낮은 온도에서 공정이 가능하고, 완전한 유연성을 가지는 새로운 반도체 물질 기반의 TFT 구동 소자에 대한

REFERENCES

- [1] Y. Hong *et al.*, Appl. Phys. Lett. **83**, 3233 (2003).
- [2] A. Asano *et al.*, SID Symposium Digest of Technical Papers **33**, 1196 (2002).
- [3] J.-h. Lee *et al.*, SID Symposium Digest of Technical Papers **39**, 625 (2008).

요구는 지속적으로 커 갈 것으로 예상된다. 유기물 기반의 반도체 물질은 낮은 공정온도와 상대적으로 높은 기계적 특성으로 많은 변형이 요구되는 유연 디스플레이에 적합할 것으로 예상되어 많은 연구가 이루어지고 있으나,^[4] 실리콘 반도체 물질에 비해 상대적으로 낮은 이동도, 짧은 소자 수명, 수분에 대한 취약성 등이 해결되어야 상업적인 활용이 가능할 것으로 예상된다.

이상의 세 가지 분야의 기술이 밀접하게 연관되고 집약되어, 현재의 커브드 디스플레이 패널이 상업적으로 활용되고 있다. 유연 디스플레이는 유연하게 제작된 디스플레이에 임의적이고 지속적으로 다양한 기계적 변형을 가하여도 본연의 특성을 유지하는 디스플레이를 의미한다. 기계적 변형이 지속적으로 디스플레이 패널이 가해지는 형태이며, 앞서 소개된 기계적으로 고정된 형태의 커브드 디스플레이보다 높은 기계적 변형 에너지가 디스플레이에 지속적으로 전달된다. 이는 앞서 설명한 재료의 두 가지 변형 메커니즘에 추가로 두 가지 파괴 메커니즘(fracture mechanism)을 통해 이해할 수 있다. 앞서 언급한 대로 금속 배선, 반도체 물질, 기판 소재 등은 고유한 항복 강도(yield strength)를 가지고 있으며, 항복 강도 이상에서는 재료의 소성변형, 더 나아가 파괴(fracture)가 진행된다. 하지만, 물질에 항복 강도보다 낮은 힘이 주어지더라도 기계적 변형이 지속적이고 반복적으로 주어질 경우 피로파괴(fatigue failure) 현상이 발생한다.^[5] 유연 디스플레이에서는 지속적인 변형과 피로파괴에 의한 디스플레이 패널의 표시 기능 저하를 방지할 대책이 추가적으로 필요하다. 또한 커브드 타입의 디스플레이는 기존의 디스플레이가 휘어진 상태로 고정되어 다변화된 가시성을 부분적으로 활용한다면, 유연 디스플레이는 본연의 변형 가능한 기계적 특성을 이용하여 보다 능동적인 변화와 응용을 이끌어 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 스마트폰이나 노트북을 접어서 다양한 크기의 멀티화면으로 분할해 이용하거나, 접는 방향, 횡수에 따라 태블릿 pc와 스마트폰을 병행적으로 사용 가능한 제품을 구현할 수 있다. 특히 대면적의 TV나 모니터 제품의 자유로운 형태 변화를 이용하여 다양한 형태로 보관 설치 가능하고, 휴대성이 향상되는 점을 이용한다면 새로운 휴대기기 시장을 형성할 것으로 예측된다. 또한 기판의 유연함은 외부의 충격으로부터 전자기기를 보호하여 쉽게 파손되지 않는 장점을 가지고 있다. 최근 국내 기업에서 OLED 기술을 이용하여 중형 크기의 유연 디스플레이를 구현하여 세계의 이목을 집중한 바 있고, 디스플레이 제품 회사들은 접이식 디스플레이가 장착된 휴대 기기 출시를 위해 앞다퉈 경쟁하고 있다.

신축성 디스플레이

신축성 디스플레이는 말 그대로, 화면이 고무처럼 늘어날 수 있는 디스플레이 장치를 의미한다. 외부에서 가해지는 힘에 의해 일시적인 구조 변형이 발생해도 영구적인 손상 없이 다시 원래 상태로 회복할 수 있는 고무의 탄성 변형 특성과 마찬가지로, 신축성 디스플레이도 주어진 변형 범위 안에서 반복적인 변형과 원래 상태로의 회복이 가능해야 한다. 이와 같은 종류의 늘어나는 기계적 변형은, 앞서 설명했던 유연 디스플레이가 견뎌내야 하는 변형에 비해 훨씬 극심한 수준의 변형을 의미하며, 모든 종류의 기계적 변형을 아우르는 궁극적인 개념으로 볼 수 있다.

유연 디스플레이에 요구되는 사항과 비슷하게, 신축성 디스플레이도 인가되는 기계적 변형에 대해 디스플레이를 구성하고 있는 모든 요소들이 견뎌낼 수 있어야 한다. 기판부터, 구동을 위한 각종 전자 소자들, 소자간의 전기적 연결을 담당하는 전극, 그리고 화면 표현을 위한 광학 소자에 이르기까지, 모든 개별 요소들이 주어진 기계적 변형 조건에서 정상 동작을 해야 한다.

다만, 신축성 디스플레이에 전달되는 매우 높은 기계적 변형으로 말미암아, 기존의 디스플레이 기술 그리고 유연 디스플레이와는 다른 수준의 큰 어려움이 존재한다. 현재 전 세계적으로 연구 수준은 매우 초기적인 단계이고, 해결된 문제보다 앞으로 해결해야 할 난제가 더 많은 상황이다. 현재 집중적으로 연구 중인 몇 가지 주제에 관련해 신축성 디스플레이에 대해 알아보도록 하자.

1. 기판소재

기판의 선택에 있어 중요한 부분은 소재의 신축성이다. 유연 디스플레이에서는 유리, 종이, 포일, 플라스틱 등 그 후보군이 다양하지만, 신축성 디스플레이에서는 한 축 방향으로 최소 10% 이상의 길이 변형을 견뎌내야 하기 때문에 흔히 탄성체(elastomer)라 불리는 재료를 기판으로서 사용한다. 탄성체의 범주에 포함되는 다양한 종류의 재료들 중 각각의 기계적, 전기적, 광학적 특성과 공정 적합성 등을 판단해 기판으로 적합한 재료가 선택되는데, 아직까지 기초 연구 수준에 머물고 있어 현재로서는 PDMS(Polydimethylsiloxane)나 폴리우레탄(Polyurethane) 등의 재료가 주로 연구되고 있다.

REFERENCES

- [4] C. D. Dimitrakopoulos *et al.*, Science **283**, 822 (1999).
- [5] K. Alzoubi *et al.*, Display Technology **7**, 593 (2011).

2. 신축성 전자 소자 구현

기본적으로, 탄성체 기관 위에 제작되는 전자 소자는 굉장히 불안정한 상황에 놓여 있다. 심지어, 외부에서 가해주는 힘이 전혀 없어도 탄성체 기관 위에 놓여 있는 전자 소자는 기계적 스트레스를 겪게 된다. 이는 우리가 단단한 땅 위에 서있을 때와, 트램펄린 위에 서있을 때를 상상해보면 쉽게 이해할 수 있다. 트램펄린 위에서는 누가 건드리지 않아도 중심을 잡고 가만히 서있는 것이 어려우며, 자세를 잡고 서 있다 할지라도 우리 몸이 느끼는 긴장은 단단한 땅 위에 서있는 것과는 비교도 할 수 없이 심할 것이다. 이와 동일한 현상이 물렁물렁한 탄성체 기관 표면에 제작되는 전자 소자들에게 발생한다. 대부분의 전자 소자들은, 그 전기적 성능이 물리적인 구조 변화에 굉장히 민감하게 반응하는 특성을 보인다. 대개의 경우, 아주 미세한 구조 변화에도 전자 소자의 특성은 눈에 띄게 저하되며, 심지어 동작하지 않는 경우도 쉽게 발생한다. 이를 해결하기 위해서 최근 소수의 연구 그룹들에서는, 매우 특수한 차세대 물질이나 새로운 소자 구조의 채택을 통해 전자 소자 자체가 신축성을 가질 수 있는 방법에 대한 연구들을 발표하고 있다.^[6,7] 하지만, 이들 역시 소자 특성의 저하는 완벽히 차단하지 못할 뿐더러, 여전히 단위 전자 소자의 동작 측면만을 고려한 초기 연구들이다.

디스플레이는 다양한 종류의 전자 소자들이 매우 많은 수로 모여 이루어지는 복합적인 시스템이기 때문에, 개별 전자 소자 각각이 스스로 외부 인가 힘에 의해 구조 변형을 경험하고 특성을 유지할 수 있게 만드는 것은 적절하지 않은 방법으로 여겨진다. 이 문제를 해결하기 위한 대표적인 방안으로는, 탄성체 기관 내부 혹은 표면에 적절한 구조물을 배치해 인가되는 외부의 힘을 적절히 분산시키는 방법이다. 구조물의 형태나 배치, 그리고 기계적 특성에 따라 기관 상에 원하는 영역으로 인가 힘을 몰아넣거나, 혹은 제거할 수 있다. 즉, 전체적인 규모에서 탄성 기관이 변형하더라도 특정 영역은 변형하지 않거나 혹은 변형량을 최소화할 수 있는 것이다. 이런 영역에 전자 소자를 배치하면, 외부 인가 힘에 대해서도 전자소자 자체는 전혀 힘을 받지 않도록 보호할 수 있다. 하지만 대부분의 외부 인가 힘은 소자 간을 연결하는 배선에 집중이 되므로, 대규모의 전자 소자 어레이를 구현하고 기계적 변형으로부터 보호하기 위해서는 신축성 배선 등에 대한 연구가 필요하며 널리 진행 중에 있다.^[8,9]

3. 신축성 배선

신축성 디스플레이에서 픽셀 간, 그리고 다양한 소자 간의 전기적 연결은 신축성 배선이 담당하게 된다. 앞서 언급했듯이

전자 소자를 외부 인가 힘으로부터 보호하더라도, 신축성 배선은 필연적으로 기계적 변형을 맞이하게 된다. 다행스럽게도, 기계적 변형에 대한 배선의 특성 제어는 전자 소자가 기계적 변형을 거치도록 설계한 경우와 비교하면 수월한 편이다. 신축성 배선 구현을 위해서는 대표적으로 금속 박막을 사용하고 있다. 박막의 수평적, 수직적 구조에 물결 무늬 형태의 변화를 줘 신축성을 최대한 확보하려는 연구는 널리 진행되고 있다.^[10,11] 다만, 금속 박막은 특유의 전도 메커니즘으로 인해 최대 20-30 % 수준의 변형까지만 견뎌낼 수 있다. 30 % 이상의 높은 변형률을 견디기 위한 대안으로 최근 신축성 전도성 복합 재료에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 탄성체와 전도성 필러의 혼합으로 만들어지는 신축성 전도성 복합재료는, 구성하고 있는 탄성체의 특성에 유사한 높은 신축성을 가짐과 동시에 전도성 필러의 전기적 특성도 보유할 수 있다. 기존의 전도성 복합 재료로는 높은 전기 전도도의 달성이 어려워 전도체로 여겨지지는 않았었지만, 최근 고품질의 나노 필러를 이용해 금속 박막에 버금가는 매우 높은 전기 전도도를 달성한 신축성 전도성 복합 재료가 발표되었다.^[12,13] 또, 전도성 필러의 정렬을 통해, 늘어날수록 오히려 전기 저항이 감소하는 새로운 신축성 전도성 복합 재료도 개발되어 고신축성 배선과 신축 시 해상도가 유지되는 신축성 디스플레이 구현 연구에도 적용되었다.^[14]

이렇듯 유연 디스플레이를 넘어 신축성 디스플레이가 구현되고 제품화되기 위해서는 앞서 설명한 여러 기술적인 난제들이 완벽히 극복되어야 한다. 또한 고해상도의 디스플레이 구현을 위해서는 신축성 배선과 전자 소자의 미세 패턴 형성 기술이 절실히 요구되고 있으나, 아직 뚜렷한 해결책은 제시되지 못하고, 기존의 포토 공정, 프린팅, 자기장에 기반한 패터닝 등 기초적인 연구가 진행되고 있을 뿐이다. 패터닝 문제가 해결된다 하더라도 디스플레이가 신축될 때 화면 해상도의 변형은 여전히 중요한 기술적인 난제로 남게 된다. 화면의 해상도는 단위 길이에 존재하는 화소의 숫자로 정의 내릴 수 있다. 그런데 기존의 디스플레이 구조를 잡아당긴다면 단위 길이 당 화소의 숫자는 줄어들게 되어 화질의 저하를 야기한다. 이 문제의 해

REFERENCES

- [6] J. Liang *et al.*, Nat. Photonics **7**, 817 (2013).
- [7] D. J. Lipomi *et al.*, Adv. Mater. **23**, 1771 (2011).
- [8] I. M. Graz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 124101 (2011).
- [9] R. Li *et al.*, Soft Matter **9**, 8476 (2013).
- [10] S. P. Lacour *et al.*, IEEE Electron Device Lett. **25**, 179 (2004).
- [11] S. Chung *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 153110 (2011).
- [12] K.-Y. Chun *et al.*, Nat. Nanotechnol. **5**, 853 (2010).
- [13] M. Park *et al.*, Nat. Nanotechnol. **7**, 803 (2012).
- [14] S. Kim *et al.*, Adv. Mater. **26**, 3094 (2014).

결에 관해서는 아직 본격적인 연구가 진행되고 있지는 않은 것이 사실이다. 하지만 최근, 화소와 화소 사이에 숨겨진 화소를 추가해, 특정 신축 이상에서 숨겨진 화소가 동작해 해상도를 유지하려는 연구가 발표된 바 있다.^[14] 이 문제와 관련해서는, 현재 연구 수준으로는 정상 동작하는 신축성 디스플레이의 제작만으로도 벅찬 실정하기에 아직 심각한 수준으로 고려해야 할 문제는 아니지만, 추후 반드시 해결되어야 할 문제임에는 틀림이 없다.

결 론

지금까지 차세대 디스플레이 기술로서, 유연 디스플레이와 신축성 디스플레이에 대한 내용들을 살펴보았다. 유연 디스플

레이의 경우에는 접이식 제품의 형태로 조만간 상품화가 되겠지만, 완전한 유연성이 확보되는 기술은 상업화까지는 아직 부족한 부분이 남아 있는 상태이고, 특히 신축성 디스플레이는 기술적인 난제가 굉장히 많이 남아 있는 극히 초기 수준의 연구들이 진행되고 있는 실정이다. 하지만, 최근, 커브드 디스플레이를 채용한 제품들이 모바일 기기에서 TV에 이르기까지 다양한 형태로 시장에 출시되고 있으며 접이식 제품은 1~2년 내에 선보일 예정이다. 10년 전만 해도 쉽게 상상하지 못했던, 고품질의 디스플레이가 빠른 시간 안에 개발되고 시장에서 널리 판매된 상황을 돌아볼 때, 유연 디스플레이와 신축성 디스플레이도 머지않은 미래에 널리 이용될 수 있으리라 기대해 본다.