



# 비발광형 Flexible 디스플레이 모드 기술 동향



유창재 교수 (한양대학교 융합전자공학부)



## 1. 서론

1990년대까지 반세기 이상 디스플레이 기술의 최정상에 있던 CRT (cathode ray tube) 디스플레이는 1990년대 중반, 얇고 가벼우며 대형화가 용이한 액정 디스플레이 (liquid crystal display: LCD)와 플라즈마 디스플레이 패널 (plasma display panel: PDP)을 위시한 평판 디스플레이 (flat panel display: FPD)로 빠르게 대체되었다. 특히, LCD는 모니터의 성공을 바탕으로 TV 시장에서 PDP와 어깨를 나란히 했으며 약점이던 시야각 문제와 응답 속도를 개선하고 높은 해상도를 앞세워 대형 TV 시장에서도 PDP를 넘어서게 됐다.

2000년대 중반에 삼성 모바일 디스플레이 (현 삼성 디스플레이)가 능동구동 유기발광 다이오드 (active matrix organic light emitting diode: AMOLED) 디스플레이를 소형 이동전화기에 적용하면서 LCD의 아성에 도전하고 있으며 이를 통해 AMOLED의 대형화를 위한 기반이 마련되었다. 후발주자인 엘지 디스플레이도 최근 대형 TV의 양산화에 성공하면서 AMOLED의 향후 발전과 LCD와의 경쟁 결과에 주목하고 있다.

하지만, 기존 FPD 시장은 최근 몇 년 사이에 포화되어 성장이 현저히 둔화되었다. 특

히, 디스플레이 화질이 사람의 인지 한계를 넘어서면서 기술의 차별성 보다는 가격 경쟁력이 우선시되면서 산업 구조가 중국을 중심으로 한 저가격화로 재편되는 상황이다. 이에 따라, 고부가가치 신시장 창출을 위한 차세대 디스플레이 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한, 급속도로 발전해 온 정보화 기술 덕분에 언제 어디서나 쉽게 정보를 얻을 수 있는 유비쿼터스 환경이 마련되었으며, 이동전화기의 성능이 소형 컴퓨터 수준에 이르게 되었다. 이에 따라 더 얇고 더 가벼우며 휴대하기 쉬운 디스플레이가 휴대용 기기의 기본적인 요구사항이 되고 있다. 특히, flexible 디스플레이는 전자기기의 소형화 추세와 디스플레이의 대형화 추세를 모두 만족시킬 수 있는 디스플레이 기술로 비교적 오래 전부터 관심을 받아 왔다.

Flexible 디스플레이는 크게 두 가지 접근 방식으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 하나는 우수한 FPD 기술에 기반하여 단단한 디스플레이에 유연성을 부여하는 방향 (디스플레이로부터의 접근)으로, 기존 LCD와 AMOLED에 유연기판 소재와 저온공정 기술을 접목하는 것이다. 이는 고화질 영상 구현과 같은 디스플레이의 고유의 기능을 전자기기로서의 종이 인쇄물로 발전시키고자 하는 기술이다. 다른 하나는 종이 인쇄물과 같은 구조를 기반으로 고화질의 영상을 구현하는 방향 (종이로부터의



접근)으로, 특정한 색을 입힌 마이크로미터 크기의 입자를 대전시켜 전기장을 인가하여 입자의 운동을 제어하는 전기영동 디스플레이 (electrophoretic display: EPD)가 이에 해당한다. 이는 전기로 제어 가능한 잉크를 백색 종이에 인쇄하는 기능을 기존의 디스플레이의 우수한 화질로 발전시키고자 하는 기술이다. 일반적으로, 디스플레이로부터의 접근 방식은 화질은 우수하지만 유연성 및 공정성이 부족하고, 종이로부터의 방식은 유연성과 공정성은 우수하지만 화질이 떨어지는 단점이 있어 이를 극복하기 위한 기술 개발이 진행되고 있다.

본 원고에서는 스스로 빛을 내는 발광형 flexible 디스플레이 모드인 AMOLED를 제외한 비발광형 flexible 디스플레이 모드 기술로 디스플레이로부터의 접근 방식인 LCD 기반 flexible 디스플레이와 종이로부터의 접근 방식인 전기영동, 전기습윤 (electrowetting), 전기변색 (electrochromic) 기반의 flexible 디스플레이 기술에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 비발광형 flexible 디스플레이 기술

FPD 기술은 영상을 구현할 때 개별 화소 (pixel)가 스스로 빛을 낼 수 있는 PDP와 AMOLED와 같은 (자)발광형 디스플레이와 별도의 광원이 필요한 LCD와 같은 비발광형 디스플레이로 나뉘어졌다. 특히, 스스로 빛을 내는 발광형 AMOLED는 유기물을 적층한 박막 구조로 flexible 디스플레이 적용에 용이한 장점이 있어 상용화를 위한 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 AMOLED의 우수한 화질에도 불구하고 대면적화의 어려움과 유연기판 소재의 높은 산소 및 수분 투과율에 의한 OLED의 성능을 저하 등의 문제는 해결해야 할 과제로 남아

있다.

비발광형 flexible 디스플레이는 개별 화소가 스스로 빛을 내지 못하므로 투과형 LCD와 같이 패널 뒤에 별도의 백색 광원을 사용하거나 주변 광을 이용하는 반사형으로 구현된다. 일반적으로 반사형 디스플레이에 비해 투과형 디스플레이의 화질이 우수하다. 앞서 언급한 flexible 디스플레이 기술의 접근 방식에서처럼 비발광형 flexible 디스플레이는 기존의 고휘도 FPD 기술을 바탕으로 유연성을 높인 LCD 기반 flexible 디스플레이 기술과 종이 인쇄물과 같은 구조를 바탕으로 고휘도의 영상을 구현하는 전자종이 기반 flexible 디스플레이 기술로 나누어 생각할 수 있다. LCD 기반의 flexible 디스플레이 기술은 기존 유리 기반의 패널 제작 공정을 플라스틱 기반의 저온 및 유연 기판 공정으로 변화시켜야 하며 변형에 따른 화질 저하현상을 최소화하는 방향으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 전자종이 기반의 flexible 디스플레이 기술은 전압에 의해 제어되는 표시부의 안정적인 제어 방법 확보와 고계조, 고색성, 고해상도, 고속 응답과 같은 화질의 직접적인 인자를 개선하는 방향으로 기술 개발이 이루어지고 있다.

본 원고에서는 비발광형 flexible 디스플레이 모드인 LCD 기반의 flexible 디스플레이와 전자종이 (E-paper) 기반의 전기영동, 전기습윤 (electrowetting), 전기변색 (electrochromic) flexible 디스플레이의 동작 원리 및 기술적 장단점에 대해 소개한다.

### 2.1 LCD 기반 flexible 디스플레이 기술

지난 20여 년 동안 LCD 모드는 상업화 및 양산화 과정을 통해 생산성, 신뢰성 및 안정성이 확보되고 충분한 시장이 형성되어 상품화에 유리한 위치에 있다. 기존 LCD 제조 공



정은 유리기판을 사용하여 공정 과정의 변형이 적고 유리기판 간격의 유지가 쉬워 높은 신뢰도의 디스플레이를 양산할 수 있었다. 하지만, 플라스틱과 같은 유연한 기판을 사용하여 구부리는 경우, 액정이 채워진 두 장의 기판 사이에 간격을 일정하게 유지하기 위한 기술과 두 기판의 박리를 방지하는 기술이 필수적이다. 또한, LCD 구조는 두 장의 기판 외부에 두 장의 기능성 편광자가 놓이게 되는데, 이러한 다층 film 구조는 구부리는 경우 기계적으로 매우 불안정하다. 특히, 기능성 편광자의 경우 화질 개선을 위해 광학보상필름의 기능을 갖게 되는데, 패널을 구부리는 경우 광학 특성이 변하게 되어 화질을 저하시키는 요인이 된다.

두 장의 기판 간격을 유지하고 박리를 방지하는 접착 기술이 제안되고 있다. LCD 기반의 flexible 디스플레이 기술은 크게 기존 LCD 구조에 rigid spacer를 형성하여 기판 간격을 일정하게 유지하며 접착하는 방식과 액정과 고분자를 혼합해 기판 간격의 유지 및 접착을 강화하는 방식으로 개발되고 있는데, rigid spacer의 두 기판 사이의 접착력 한계로 인해 액정-고분자 복합계를 이용한 다양한 방법이 제안되었다 [1-4]. 액정-고분자 복합계를 이용하면 두 기판의 접착력을 확보할 수 있어 변형에도 비교적 안정적인 특성을 보이게 된다. 일반적으로 액정-고분자 복합계 구조는 자외선 조사를 통해 액정과 고분자 상분리가 일어나는데 액정-고분자의 공간적 상분리의 정도에 따라 등방성 상분리와 비등방성 상분리로 분류된다. 액정-고분자 상분리 정도가 미시적인 수준에 머물러 화소보다 작은 공간에서 상분리가 일어나는 경우를 등방성 상분리라고 하며 [1,2], 화소 수준까지 상분리가 일어나는 경우는 비등방성 상분리라고 한다 [3,4].

등방성 상분리를 이용하는 Flexible LCD 모드는 polymer-dispersed LC (PDLC)와

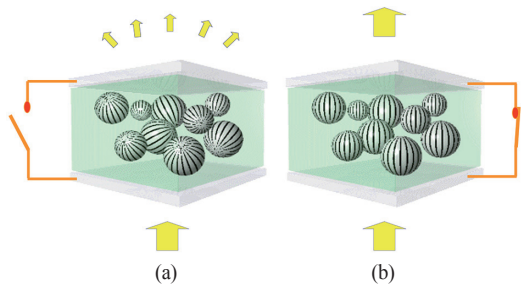


그림 1. PDLC 모드의 동작원리 (a) 전기장을 인가하지 않았을 때 입사 빛은 산란됨, (b) 전기장을 인가했을 때, 입사 빛은 투과됨.

polymer-stabilized cholesteric texture (PSCT)가 개발되었다 [1,2]. PDLC와 PSCT는 모두 편광자가 필요 없는 액정 모드로 구부리는 경우 편광자 및 광학필름의 변형이 없어 flexible 디스플레이 구현에 적합한 액정 모드라고 할 수 있다. PDLC 모드는 고분자의 비율이 액정보다 높아 자외선 조사에 의해 액정분자가 구형의 고분자 방울 속에 모이게 된다. 이때 액정 방울의 크기는 가시광선의 파장 수준을 이루며 조사해 주는 자외선의 세기와 시간에 의해 조절 가능하다 [1]. 개별 액정 방울에 있는 액정 분자는 곡면에 나란하게 정렬하여 양극에서 수렴하는 구조를 형성한다. 이때, 개별 액정 방울의 양극의 정렬방향은 무작위로 형성되고 액정 방울의 평균 굴절률이 무작위 분포를 이루게 된다. 이때 액정 방울의 크기가 가시광선의 파장 수준에 이르면 입사된 빛은 산란되어 어두운 상태를 구현하게 된다. 전기장을 인가하는 경우, 개별 액정 방울에 있는 액정 분자가 전기장의 방향에 따라 일정하게 정렬되면 모든 액정 방울의 평균 굴절률이 같아져 입사한 빛은 산란 없이 통과하여 밝은 상태를 구현하게 된다.

PSCT 모드는 낮은 농도의 고분자를 콜레스테릭 액정에 혼합하고 자외선을 조사하여 고분자 network 구조를 형성하도록 제작한



다 [2]. 전기장이 인가되지 않았을 때 콜레스테릭 액정은 기판에 평행한 평면에 나란하게 정렬되고 기판의 수직한 방향으로 연속적으로 회전하는 구조를 형성하게 된다 (planar texture). 액정의 회전 주기와 일치하는 파장과 원형 편광판 선택적으로 반사하고 나머지는 통과하는 특성을 가지고 있다. 그러므로 편광자와 color filter 없이 입사한 빛 중에서 특정한 파장의 빛만을 반사하여 추가적인 광학필름 없이 디스플레이를 구현할 수 있다. 전압을 인가하게 되면 콜레스테릭 액정 분자는 전기장의 방향에 따라 일정한 방향으로 정렬하려는 특성과 액정의 회전성을 유지하려는 힘이 상호작용하면서 focal conic 상을 이루게 되는데, focal conic 상은 평균 굴절률이 공간적으로 변하게 되고 입사한 빛은 산란되어 어두운 상태를 나타내게 된다. 특히, 고분자 network 은 focal conic 상태를 안정화시켜 전기장이 인가되지 않아도 focal conic 상을 유지하여 전력소모를 최소화할 수 있다.

비등방 상분리를 이용하는 flexible LCD 모드는 phase-separated composite organic film (PSCOF)와 pixel-isolated liquid crystal (PILC) 모드가 개발되었다 [3,4]. 비등방 상분리 모드는 화소 수준 이상으로 상분리가 일어나는 것으로, 기본 원리는 비균질 자외선 조사에 의해 공간적으로 고분자화의 정도를 조절하는 것으로 PSCOF의 경우에는 기판에 수직한 방향으로 비균질 고분자화가 일어나도록 하여 제작하고, PILC의 경우에는 기판에 수평한 방향으로 비균질 고분자화가 일어나도록 선택적으로 자외선을 조사하여 제작한다.

PSCOF 모드는 액정과 고분자를 혼합한 복합체로 시편을 제작하고 자외선을 조사하면 일반적으로 기판에 수직한 방향으로 자외선의 세기가 점차 감소하는데, 자외선의 세기 차이에 의해 고분자 단량체의 고분자화에 차이가 발생하게 된다. 위치에 따라 고분자

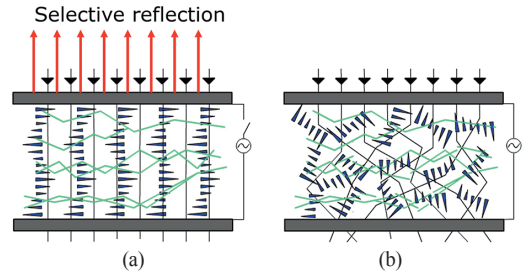


그림 2. PSCT 모드의 동작원리 (a) 전기장을 인가하지 않았을 때 입사 빛은 반사됨 (planar texture), (b) 전기장을 인가했을 때, 입사 빛은 산란됨 (focal conic texture).

화 정도에 따라 단량체의 농도가 변하게 되면 단량체의 농도를 일정하게 유지시키기 위해 고분자에 비해 상대적으로 유동성이 높은 단량체가 자외선 세기가 큰 쪽으로 이동하게 되고, 이동된 단량체는 쉽게 고분자화가 이루어져 결과적으로 자외선의 세기가 큰 쪽에 고분자화가 많이 일어나고 반대쪽으로는 액정의 농도가 높아지게 된다 [3]. 이렇게 제작하면, 자외선을 조사한 기판 쪽에 고분자 박막이 형성되어 안정된 시편을 제작할 수 있다. 일반적으로 자외선이 조사된 기판에 고분자 박막이 존재하여 구동 전압이 다소 증가하게 된다.

PILC 모드는 PSCOF와 비슷한 방식으로 시편을 제작하지만, 자외선을 조사할 때 photomask를 이용하여 수평 방향으로 선택적으로 자외선을 조사하여 제작하게 된다 [4]. 이 경우, 자외선이 조사된 영역은 PSCOF에서와 같이 고분자의 농도가 높고 조사되지 않은 곳은 액정만 남게 된다. 특히, 화소 영역에는 자외선을 조사하지 않고 기타 비동작 영역에 자외선을 조사하여 고분자 격벽을 형성하게 되면, flexible LCD의 구조적인 안정성을 높일 수 있으며, 화소 영역에 액정만 있어 구동전압 손해가 없는 장점이 있다. 일반적으로 PILC 시편을 제작할 때, photomask를 이용한 자외선 조사 후에

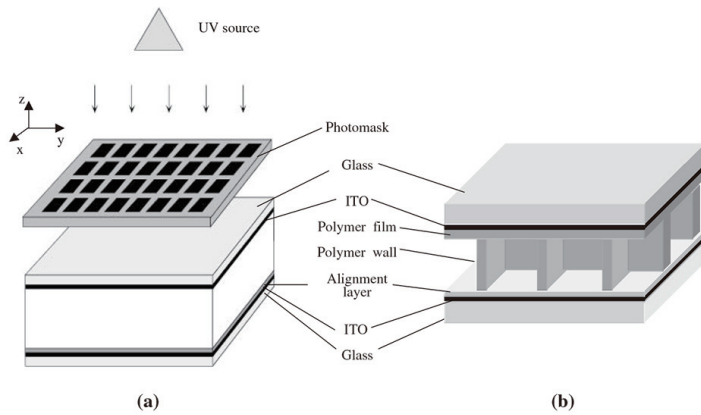


그림 3. PILC 모드 시편의 제작 방법 (a) photomask를 이용해 자외선을 선택적으로 조사함, (b) 최종 시편제작 후 고분자 격벽 구조, 격벽 이외의 영역에는 액정으로 채워짐 [4].

photomask를 제거하고 전 영역에 자외선을 조사하여 잔류 고분자 단량체를 고분자화 시키게 되며, PSOCF와 같은 조건이 되어 자외선을 조사한 기관 쪽으로 고분자 막이 형성된다. 이 경우 고분자 박막이 있는 기관은 제거할 수 있어 단일 기관 액정 패널을 제작할 수 있다. 하지만, PILC 모드는 여전히 편광판이 필요하므로 구부리는 경우 광학 필름에 의한 광투과 특성에 변화가 상대적으로 크게 일어나게 된다.

최근에는 대형 curved LCD 제품이 생산되고 있는데, 이러한 대형 curved TV의 경우는 기존 유리기관을 사용한 상용 LCD TV를 물리적으로 구부린 것으로 기존 양산 LCD 기술을 사용한 제품으로 매우 큰 휨 변형을 유도하기 어려운 기술이다.

## 2.2 E-paper 기반 flexible 디스플레이 기술

Flexible 디스플레이 구현을 위한 종이로부터의 접근 방법

인 전기 영동, 전기 습윤, 전기 변색 기반의 Flexible 디스플레이의 동작원리와 장단점에 대해 소개한다. 앞서 언급한 것과 같이 공정 및 구조적인 측면에서 flexible 디스플레이에 적용하기 용이한 특성을 갖고 있으나, 응답속도, color 구현 등 화질이 기존 FPD에 비해 낮아 화질 개선을 위한 연구가 이루어지고 있다.

### 2.2.1 전기영동 flexible 디스플레이 기술

전기영동 (Electro-phoresis) 현상은 유동성 매체 내에서 대전된 입자가 전기장의 영향을 받아 이동하는 것을 말한다. 대부분의 전기영동 디스플레이는 양 또는 음으로 고정된 전하로 대전된 입자가 전기장의 극성에 따라 이동하여 영상을 구현하게 되고, 전기장을 제거해도 상태를 유지하는 특성이 있어 정적인 정보를 표시할 때 에너지 절감 효과가 있다. 전기영동 디스플레이의 대표적인 형태는 E-ink사의 전자종이다 [5].

양의 전하로 대전된 흰색의 입자와 음의 전하로 대전된 검은색의 입자를 투명한 유체

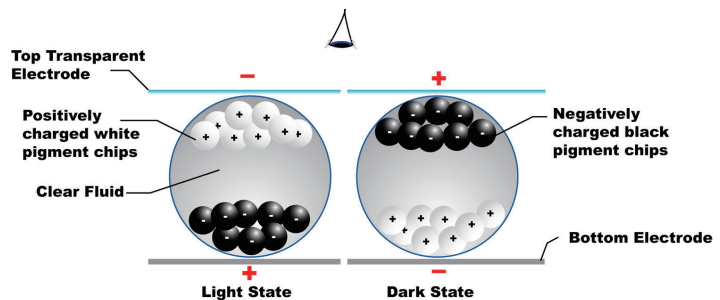


그림 4. E-ink의 동작 원리 [5].



와 함께 캡슐에 분산시켜 투명전극 기판 사이에 넣어서 시편을 제작한다. 두 대전 입자가 Coulomb 상호작용에 의해 서로 결합하지 않도록 분산시키는 기술이 매우 중요하다. 이렇게 제작된 시편에 상하 전극에 인가하는 전기장의 극성에 따라, 서로 다른 극성의 대전 입자가 Coulomb 힘에 의해 이동하게 된다. 위쪽 기판에 음의 전압이 인가되면 양으로 대전된 흰색 입자가 위쪽으로 이동하여 외부 광선을 반사시켜 밝은 색을 나타내게 되고, 반대 극성이 인가되면 검은색 입자가 위쪽으로 이동하여 어두운 상태를 표시하게 된다. 전기영동 디스플레이의 장점은 기존의 인쇄 종이 매체와 같이 잉크 입자를 이용하므로, 종이와 같은 표현이 가능하며, LCD 수준의 해상도, 낮은 소비전력 등의 장점이 있다. 하지만, 대전입자가 유체 속을 이동해야 하므로 일반적으로 응답 속도가 느리며, 작은 전기장이 인가되어도 Coulomb 힘에 의해 입자의 이동이 일어나므로 능동 (active matrix) 구동 방법을 이용해야 한다. 화소를 여러 작은 화소로 나누어 영역별로 반사도를 제어하는 공간분할 방법을 이용해 계조 (grayscale)를 표시할 수 있으나, 계조 분해능을 높이면 해상도가 낮아지는 문제가 있으며, 현재까지는 full color 구현을 위해서 액정에서와 같이 color filter를 사용해야 한다. 최근에는 전하밀도가 다른 다른 색을 갖는 입자를 이용하여 흑백 이외의 색을 구현하고 있으나 구현할 수 있는 색의 수는 제한적이다 [5].

### 2.2.2 전기습윤 flexible 디스플레이 기술

전기습윤 (electrowetting) 현상은 정전기 및 계면 화학에 의해 제어되는 것으로 전압에 의해 물질 표면의 친수성 (hydrophilicity)/소수성 (hydrophobicity)을 조절하여 영상을 구현하게 된다. 이러한 현상을 이용하여 2003년 9월에 Philips

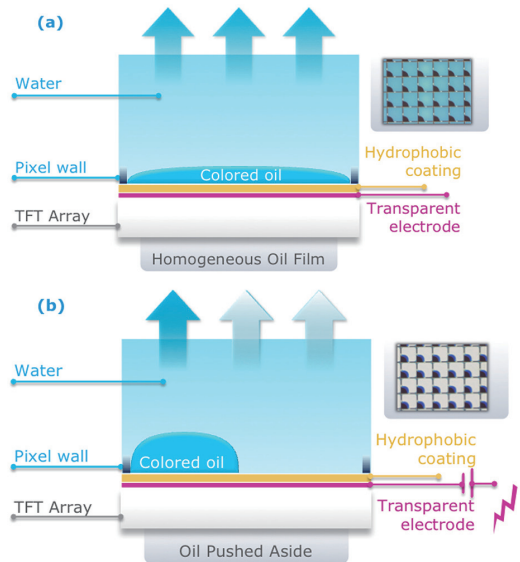


그림 5. Liquavista사의 전기습윤 디스플레이의 동작 원리. (a) 전압을 인가하지 않았을 때 Colored oil이 화소 영역을 모두 덮어 특정한 색을 표시함, (b) 전압을 인가하여 색상을 띤 기름방울이 한곳에 모여 화소 영역이 투명해짐 [7].

의 연구진은 디스플레이를 구현했으며 결과를 Nature지에 최초로 발표했다 [6]. Liquavista사는 색상을 띤 기름방울의 응축을 제어하는 방식으로 디스플레이를 구현했다. 먼저, 흰색 기판 위에 투명전극과 화소 공간을 설치한 다음 물과 색상을 띤 기름을 함께 채워 시편을 제작한다. 전극에 전압을 통해 전극의 친수성과 소수성을 제어하게 된다. 화소 내에 소수성 기름과 친수성 물이 존재하고 있을 때, 표면이 소수성이면 표면이 물을 밀어내어 기름이 화소 영역을 덮게 되고 해당하는 색상을 표시하게 된다. 전압을 인가하여 표면을 친수성으로 바꾸면 물이 채워지고 기름이 밀려나 한 곳으로 모이게 되어 배경의 흰색을 표시하게 된다. 기판을 투명하게 만들 경우, 투명 디스플레이로도 적용이 가능하다.

전기습윤 디스플레이는 정전기력과 표면장력 간의 균형을 통해 색상을 띤 기름 층의 퍼



짐 정도를 조절할 수 있어 전압에 의한 물과 기름의 상대적인 면적 조절을 통해 계조 표시가 가능하다. 하지만, 단일 기판에서 full color 구현을 위해서는 서로 다른 색상을 띤 기름을 개별 화소별로 분리하여 시편을 제작하는 방법이 도입되어야 하나 쉽지 않다. 서로 다른 색상의 전기습윤 디스플레이를 3장 쌓아 놓은 구조를 이용하고 있으나 고해상도 적용 시 개별 색상이 분리되어 화질이 저하되는 문제가 있다.

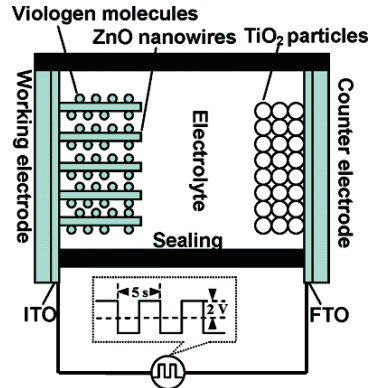


그림 6. 다공성 전극을 도입하여 전기변색 속도를 향상시킨 전기변색 디스플레이의 구조 [9].

### 2.2.3 전기변색 기반 flexible 디스플레이 기술

전기변색 (electrochromism)은 전압을 인가하였을 때 전기장 방향에 의해 가역적으로 색상이 변화하는 전기화학 현상으로, 1960년대 후반에 발견되었다 [8]. 전기변색 디스플레이는 전기화학적 산화/환원 반응으로 재료의 광 특성이 가역적으로 변화시키며, 금속 산화물 박막, 분자 염료, 전도성 폴리머 등으로 제작된다. 전기변색 물질이 산화 (전자 공여) 상태에서는 무색이고 환원 (전자 주입) 상태에서는 고유의 색을 나타내는 경우를 환원 발색 (cathodic coloration)이라 하고  $WO_3$ ,  $MoO_3$ ,  $TiO_3$ 와 같은 물질들이 이에 해당한다. 예를 들어,  $WO_3$ 에  $Li^+$ 이나  $H^+$ 과 전자가 주입되면 파란색을 띠게 되고, 방출 시에는 투명하게 된다. 반대로 환원 상태에서는 무색이고 산화 상태에서는 고유의 색을 나타내는 경우를 산화 발색 (anodic coloration)이라 하고  $V_2O_5$ ,  $IrO_2$ ,  $NiO$ 와 같은 물질들이 이에 해당한다. 하지만, 다공성 전극을 이용하여 색 변환을 위한 시간을 줄였으나 여전히 수백 ms로 디스플레이

의 응답 속도가 느리며 아직 장기 신뢰성이 확보되지 못한 상태이다 [9].

## 3. 결론

1990년 중반 이후 LCD의 비약적인 발전은 지난 2010년에 이르러 디스플레이 산업이 포화되며 성장이 둔화되었다. 고화질 디스플레이의 진입 장벽이 낮아지고 중국의 가격 경쟁력이 높아지면서 디스플레이 산업은 패러다임의 변화가 요구되고 있다. 이에 따라 고부가가치 신시장 창출을 위한 차세대 디스플레이 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. Flexible 디스플레이는 전자기기의 소형화

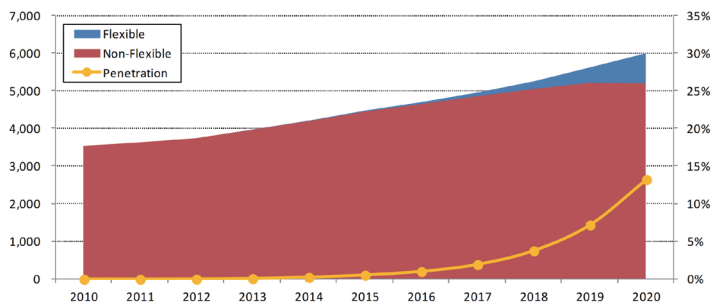


그림 7. 출하량 기준 디스플레이 산업 전망 [10].



추세와 디스플레이의 대형화 추세를 모두 만족시킬 수 있는 디스플레이 기술로 성장 잠재력이 높다. Flexible 디스플레이 구현을 위해 디스플레이로부터의 접근 방법은 우수한 화질을 바탕으로 공정성 및 유연성을 개선하는 방향으로 기술이 개발되고 있다. 종이로부터의 접근 방법은 우수한 공정성과 유연성을 바탕으로 화질 개선에 힘쓰고 있다. 비록, 현재 개발되고 있는 flexible 디스플레이는 기존 디스플레이를 대체할 수 있는 수준은 아니지만, 지속적인 기술 개발을 통해 초기에 제안된 flexible 디스플레이에 비해 성능이 향상되었으며, 향후 발전 가능성도 높다.

### 참고 문헌

- [1] P. S. Drzaic, "Liquid Crystal Dispersions" (World Scientific Publishing, Singapore, 1995)
- [2] D. -K. Yang, L. -C. Chien, and J. W. Doane, Appl. Phys. Lett. 60, 3102 (1992)
- [3] T. Qian, J.-H. Kim, S. Kumar, and P. L. Taylor, Phys. Rev. E 61, 4007 (2000)
- [4] J.-W. Jung, S.-K. Park, S.-B. Kwon, and J.-H. Kim, Jpn. J. Appl. Phys. 43, 4269 (2004)
- [5] <http://www.eink.com/technology.html>
- [6] R. A. Hayes and B. J. Feenstra, Nature 425, 383 (2003).
- [7] B. J. Feenstra and R. A. Hayes, "Electrowetting Display" (Liquavista BV, 2009) [<http://www.liquavista.com/technology/>]
- [8] S. K. Deb, Appl. Opt. 8, 192 (1969)
- [9] X. W. Sun and J. X. Wang, Nano Lett. 8, 1884 (2008)
- [10] 플렉서블 디스플레이 기술동향 및 시장전망 (Displaybank, 2012)

### 저자약력



성명 : 유창재

◆ 학력

- 1996년 서강대학교 물리학과 이학사
- 1998년 서강대학교 대학원 물리학과 이학석사
- 2005년 서울대학교 대학원 전기공학부 공학박사

◆ 경력

- 2005년 - 2006년 서울대학교 반도체공동연구소 연구원
- 2006년 - 2007년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 재료공학과 Post-Doc.
- 2007년 - 현재 한양대학교 융합전자공학부 교수
- 2013년 - 2014년 LG 디스플레이 자문교수

