

기술 특 집

플렉시블 LCD 모드

김재훈 (한양대학교)

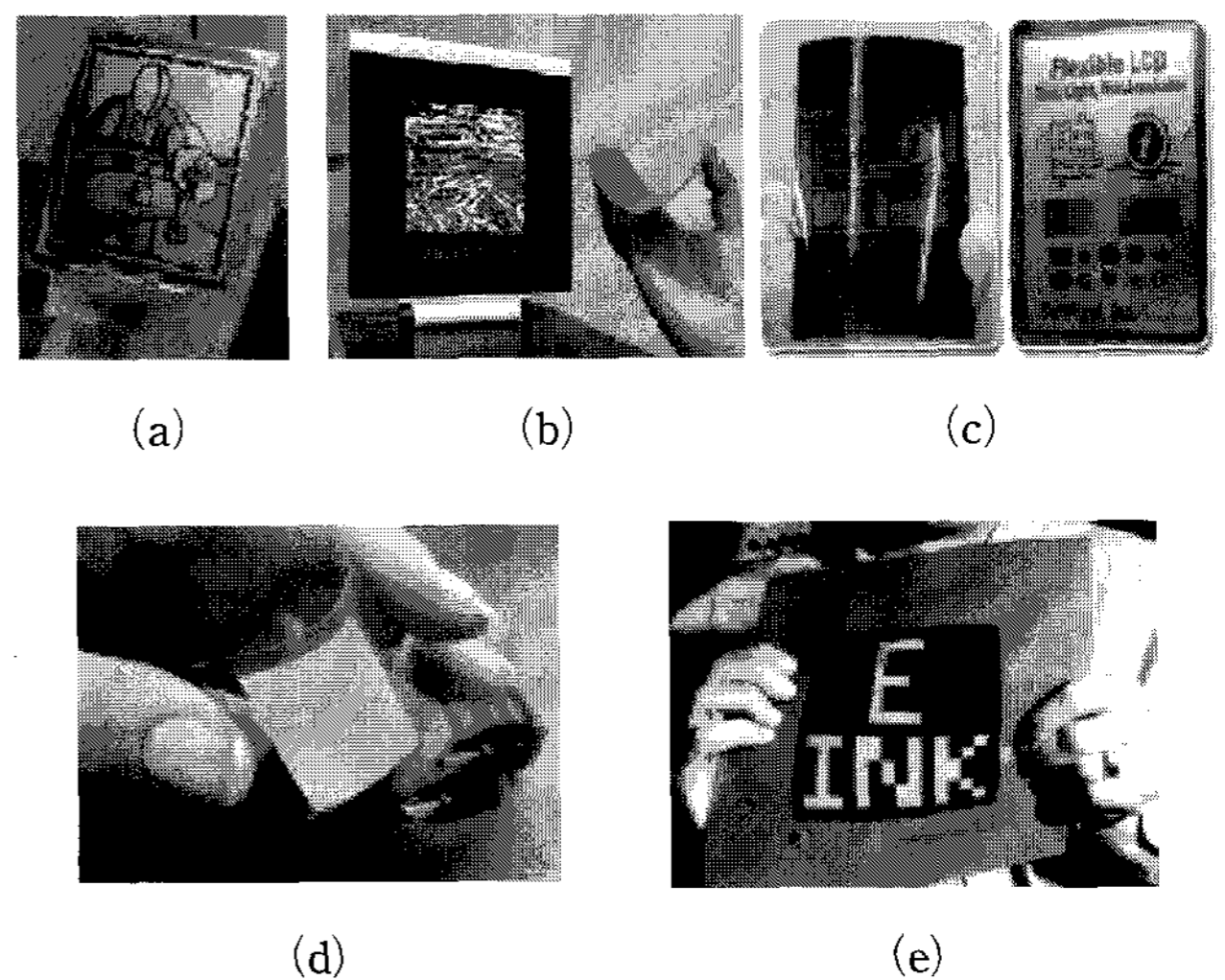
I. 들어가는 글

디스플레이는 현대의 고도화된 정보화 시대에 가장 효율적인 그리고 최종적인 인간으로에 정보전달 방법이다. 이전에는 정보전달의 매체인 디스플레이가 크고 무거웠기 때문에 특정 장소와 시간에서 정보의 전달이 가능했었지만 현재는 LCD를 이용한 노트북 컴퓨터, PDA 또는 휴대전화와 같이 통신과 결합된 휴대용 디스플레이가 널리 이용되기 때문에 특정 장소와 시간 등의 제한 없이 정보의 전달이 가능하다. 또한 과거의 일방향의 정보전달 방식에서 쌍방향의 정보전달이 가능해지고 이에 따라 언제 어디서나 원하는 정보를 보내고 받을 수 있는 유비쿼터스 디스플레이(ubiquitous display)로 발전해 가고 있다. 이러한 추세에서 디스플레이의 발전방향은 보다 더 가볍고 깨지지 않으며 변형이 가능한 그래서 보다 인간에게 가까이 있을 수 있는 디스플레이로의 발전은 당연하다고 할 수 있다. 이에 따라 기존의 유리 기판을 사용한 디스플레이의 무겁고 깨지기 쉬우며 변형이 어려운 단점을 플라스틱과 같은 유연한 기판을 사용하여 보완하고, 디자인도 자유롭게 할 수 있는 플렉시블 디스플레이(flexible display)에 대한 연구개발이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

최근의 플렉시블 디스플레이에 사용되는 모드로 물질적인 측면에서 볼 경우 액정을 이용한 방식, 유기 전기발광(EL) 물질을 이용한 방식 그리고 전기영동 디스플레이(electrophoretic display)와 같이 안료를 이용하는 방식으로 크게 구분할 수 있다. 그리고 기술적인 접근으로서는 디스플레이로부터의 접근과 종이로부터의 접근으로 구분할 수 있고, 안료를 이용한 E-ink사의 전기영동 디스플레이가 전자종이의 대표적인 예라고 할 수 있다. 그리고 LCD와 EL은 디스플레이로부터의 접근이라고 볼 수 있다.

최근에 많이 다루어지고 있는 캡슐형 전기영동법은 1996년 미국 MIT Media Lab.에서 분리되어 설립된 E-ink사가 개발한 방법으로서 특정한 전하를 가진 특정 색의 잉크 미립자와 반대전하를 띤 다른 색의 잉크 미립자(혹은 색을 띤 유전유체) 및 투명 유전유체를 담은 지름 100-200 μ m의

투명한 마이크로캡슐을 이용한 것으로 이들 마이크로캡슐을 바인더와 혼합하여 상, 하부 투명전극 사이에 위치시키고 전압을 인가하여 동작시키는 방식이다. 최근에 E-ink사와 한국의 LG필립스LCD의 공동개발에 의해 10인치 흑백 및 6인치 컬러 전자종이를 일본에서의 FPR 2005 행사에서 발표한바 있다. 유기 EL 디스플레이는 최근 소자의 상용화를 위한 기술발전에 힘입어 빠르게 상용화 단계로 진입하고 있으며, 또한 플렉시블 유기 EL 디스플레이 역시 세계적으로 연구 개발이 가속화되고 있다. 유기 EL의 경우 플라스틱 기판 위에서 제작하는 방법은 저분자를 진공에서 증착하는 방법과 고분자용액을 잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 형성하는 두 가지 방법이 있는데 후자의 경우 roll-to-roll 방식에도 적합하기 때문에 대량생산 가능성과 원가절감 등의 이유로 활발한 개발이 진행되고 있다. [그림 1]은 현재까지 연구된 여러 가지 방식의 플렉시블 디스플레이 시작품들의 예이다.



[그림 1] 다양한 디스플레이 시작품 (a) Sharp 사의 a-si TFT를 이용한 4인치 반사형 color LCD, (b) SEC사의 a-si TFT를 이용한 5인치 plastic LCD, (c) Soft-pixel사의 plastic STN-LCD, (d) Dupont사의 flexible PLED, (e) E-ink사의 전기영동 디스플레이

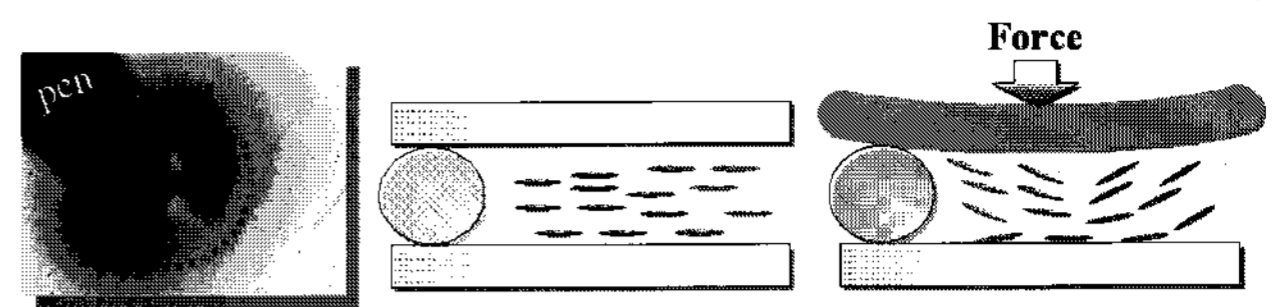
유기 EL에 비해 상대적으로 장시간 사용에 대한 신뢰성과 안정성 그리고 대면적 평판 디스플레이에서 성공적으로 시장을 점유하고 있는 액정 디스플레이 역시 플렉시블 디스플레이 상용화를 위해 국내외에서 활발하게 연구개발되고 있다. 특히 LCD는 동화상 구현을 위한 dynamic 모드와 전자종이와 같이 반영구적으로 정보를 표시할 수 있는 memory 모드를 구현할 수 있어서 향후의 플렉시블 디스플레이 시장의 변화 추이에 능동적으로 대응할 수 있다는 장점으로 인해 다양한 모드를 이용한 연구개발에 박차를 가하고 있다. 본 글에서는 이러한 플렉시블 LCD에 대해 현재 진행되는 연구 및 관련 기술사항들에 대해 기술하고자 한다.

II. 플렉시블 LCD 모드

액정 디스플레이 모드의 경우 지난 30년간 LCD의 상업화를 위한 연구를 통해 확립된 장시간 사용에 대한 신뢰성 및 안정성, 넓은 온도 범위, 상용성의 확보 및 생산능력 등과 같이 다른 기술 또는 물질을 이용한 디스플레이에서 찾아보기 힘든 장점을 가지고 있기 때문에 차세대 플렉시블 디스플레이 모드로 각광을 받고 있다. 평판 디스플레이의 경우와 마찬가지로 플렉시블 디스플레이에서도 액정의 모드는 크게 dynamic 모드와 memory 모드로 구분할 수 있으며 각각의 경우에 있어서 반사형 및 투과형 모드로 구분되며 최근에는 반사형과 투과형을 같이 사용하는 반투과형에 대한 연구 개발도 활발히 진행되고 있다. 대부분의 memory 모드는 전원이 차단된 상태에서도 화면을 유지하는 쌍안정 특성을 이용한 것으로 주로 반사형 모드로 개발이 이루어진다. 이에 반해 동영상 구현할 수 있는 dynamic 모드의 경우 투과형이 주류를 이루고 있으며 실내, 외에서도 사용 가능한 반투과형 역시 개발이 활발하다. 뿐만 아니라, 최근에는 dynamic 모드와 memory 모드의 동시 구현이 가능한 모드가 국내의 연구진에 의해 개발되어 많은 주목을 받고 있다.

1. 플라스틱 LCD의 기술 개요

플렉시블 LCD에 있어서 액정의 모드는 위에서 본 바와 같이 다양한 환경과 제품 어플리케이션에 따라 다양한 모드가 존재한다. 그러나 유연성이 있고 휘 수 있는 플라스틱 기판 사이에서의 액정 모드는 그 액체적인 특성에 의해 외부의 충격이나 휨에 의해 쉽게 변형이 일어날 수 있다[그림 2]. 뿐만 아니라 액정을 담는 두 기판 역시 휨 등에 의해 접착성에 문제가 발생할 수도 있다. 플렉시블 디스플레이의 경우 사용자와 항상 가까이 있고 항상 변형시킬 수 있어야 하기 때문에 형태변형 시 액정모드를 유지하는 것은 매우 중요하다. 따라서 기존의 유리기판을 사용한 액정 디스플레이에서 플라스틱 기판을 사용함으로써 우리가 특별히 고려해야 할 사항은 액정 모드의 안정화와 일정한 셀갯을 유지하기 위해 유연한 두 플라스틱 기판의 접착성을 어떻게 유지



[그림 2] 플라스틱 기판으로 스페이서 산포 후 제작된 셀에 외부의 충격이 가해질 경우 액정 분자들의 변형을 나타낸다.

하느냐가 플렉시블 액정 디스플레이에 있어서 매우 중요한 문제란 것을 알 수 있다. 아울러 이러한 점들은 각각 개별적으로 해결하는 것이 아닌 공정 내에서 동시에 해결해야 할 문제이기도 하다.

플라스틱 기판을 사용함으로써 고려해야 할 또 다른 사항은 기판 자체로부터 기인한다. 유리기판에 비해 낮은 공정 온도가 유지되어야 하기 때문에 공정 재료 및 공정 단계도 달라질 것이다. 최근에는 보다 내열성이 좋은 플라스틱 기판을 개발하는 연구가 진행되고 있으며 특히 플라스틱 LCD의 경우 기판 자체의 광학적 이방성도 적어야 한다는 제한이 따른다. 그래서 선진국에서는 플라스틱 대신 어느 정도 휨이 가능한 얇은 유리를 사용하여 시작품을 제작하기도 한다.

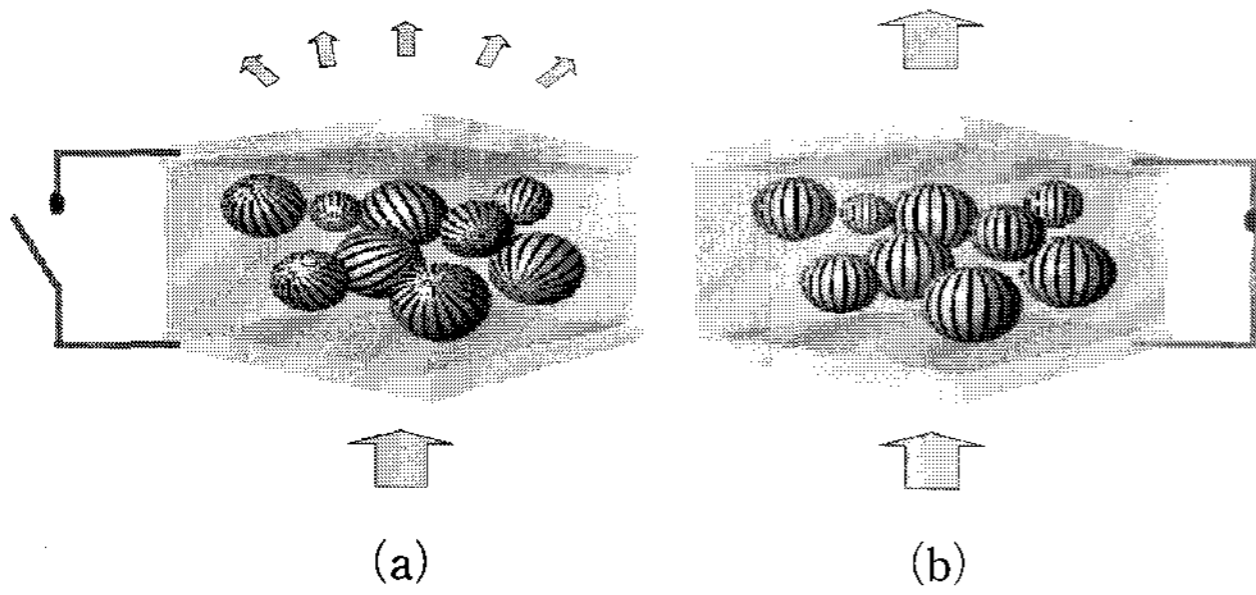
현재 플렉시블 디스플레이의 기술 로드맵으로 대부분 공감하는 것은 다음과 같은 기술발전 단계이다. 초기에는 플라스틱 기판을 사용함으로써 깨지지 않는 디스플레이를 개발하고 그 후, 곡면의 디스플레이와 휨이 가능한 디스플레이를 개발한 후, 최종적으로 접을 수 있고 자유자재로 변형이 가능한 디스플레이를 개발하는 것이다.

위에서 서술한 플렉시블 LCD에서의 주요 기술 개발 사항은 기술 로드맵 상의 단계와 밀접한 관계를 가지고 상품화가 이루어질 것이며, 또한 LCD 특성상 전자종이와 같이 memory 모드가 가능할 뿐 아니라 동영상 구현이 가능함으로 플렉시블 디스플레이의 상품화에 따라 단계적으로 유연하게 대응할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

2. dynamic 모드

동영상 구현과 휨이 가능한 플렉시블 액정 디스플레이가 개발 되기 위해서는 앞에서 서술한 바와 같이 적절한 액정 모드와 이를 외부의 변형에 대해서도 유지할 수 있는 안정화 방법 그리고 두 기판의 접착성을 향상시키는 구조의 개발이 필수적이다. 최근 이에 대한 연구 중 고분자와 액정의 상분리를 이용하여 안정화 구조를 형성하는 방법과 셀 내부에 패터닝된 구조물을 이용하는 방법이 연구되고 있다.

고분자와 액정의 상분리를 이용한 모드의 대표적인 예로 1980년 중반 미국의 Kent State University에서 처음 제안된 고분자 분산 액정(Polymer dispersed liquid crystal: PDLC)이 있다. 이는 [그림 3]과 같이 수~수십 μm 크기의 액정방울이 고분자 분산된 필름 형태로 고분자 내에 존재하며 이 구조에 대한 많은 관심과 연구가 행해져 오고 있다. 이러한 PDLC 디스플레이는 액정과 고분자의 굴절률 차를 이용한 산란형 디스플레이로 편광자가 없이 광투과를 조

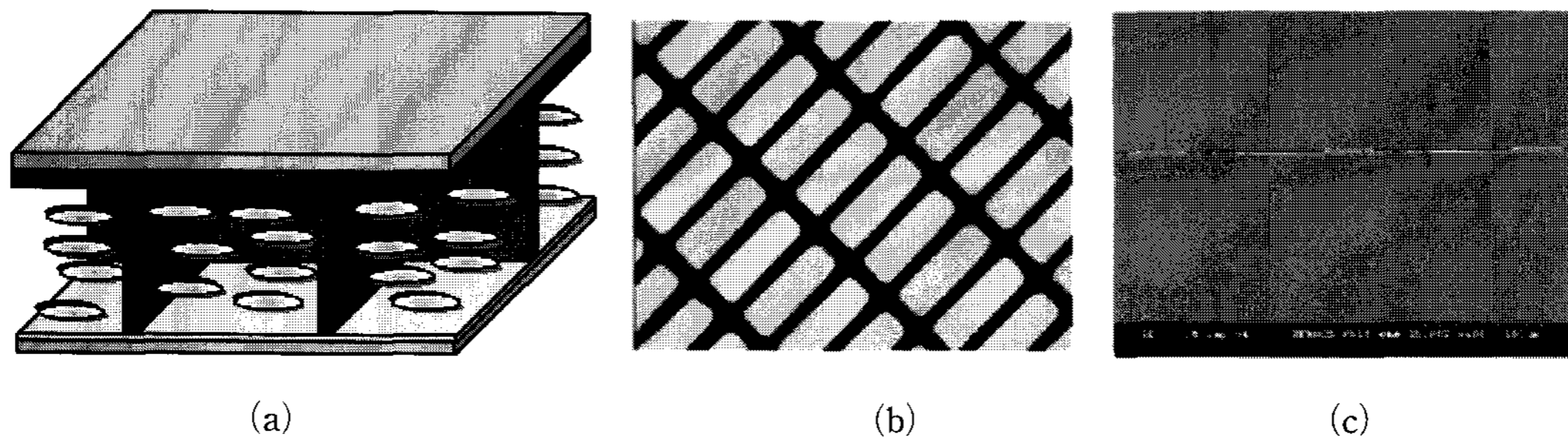


[그림 3] PDLC 구동원리 (a) 전기장을 인가하지 않았을 때의 산란모드. (b) 전기장을 인가하였을 때의 투과모드

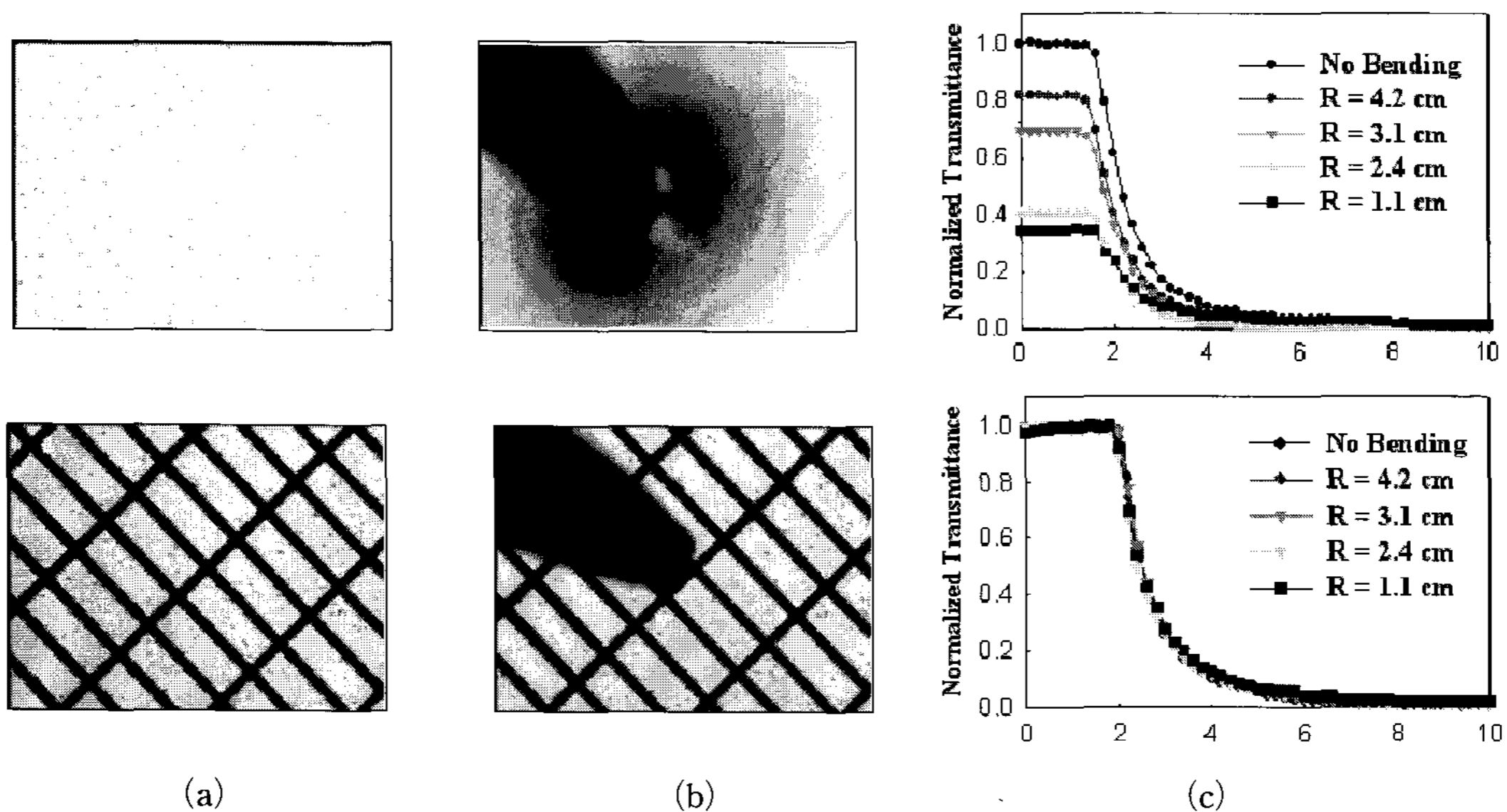
절할 수 있으며, 구형, 타원형 등 액정방울의 형태나 방울 내 액정분자의 구조, 강유전성 액정(FLC) 등의 다양한 액정상, 고분자 중합 반응방법을 달리한 여러 가지 상분리방법 등의 여러 가지 조합에 의해 다양한 동작특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 특히 PDLC에서 고분자 matrix는 단단한 substrate 역할을 하고 있어 충격에 안정하여 대면적 플렉시블 디스플레이에 응용가능성이 있다. 그러나 높은 구동전압, 느린 응답속도 및 낮은 대비 등은 앞으로도 계속 연

구되어야 할 과제로 남아있다. 또한 액정방울의 크기나 구조 위치 등을 정밀하게 조절할 수 없기 때문에 기판 전체에 고른 광학적 특성을 얻기가 쉽지 않다. 그래서 switchable window 등에는 이용가능하나, 고정세 디스플레이에의 응용에는 문제점이 있다.

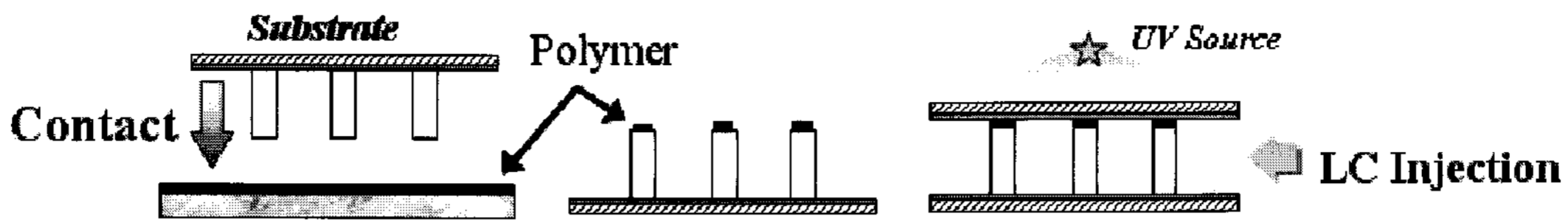
위와 같은 액정 고분자의 등방 상분리를 이용한 PDLC의 여러 문제점을 해결하기 위해 최근 21세기 프론티어 사업의 하나인 차세대 디스플레이 개발사업의 지원을 받아 본 연구실에서는 화소고립화 액정(pixel-isolated LC: PILC) 모드를 개발 중에 있다[그림 4]. 이 모드는 적절한 UV 조사 조건, 공정 온도 그리고 표면조건을 이용하여 액정과 고분자를 완전히 비등방 상분리 함으로써 액정이 고분자와 표면에 의해 3차원적으로 화소 하나하나에 고립되는 구조를 가지는 것이다. 본 구조는 화소 내의 액정 모드가 기판이 휘더라도 액정의 모드를 유지할 수 있어 플라스틱 기판을 이용한 LCD 제작에 있어서 최적의 구조로 평가 받고 있다. PILC 모드를 이용한 플라스틱 LCD와 기존의 스페이서 만을 이용하여 제작된 플라스틱 LCD의 외부 충격과 휨 변형에 따른 V-T 특성 [그림 5]을 비교해 보면 PILC 모드의 경우 외부 충격과 휨 변형에 매우 안정하다는 것을 명확히 알 수 있



[그림 4] (a) PILC 개념도, (b) 제작 시편을 편광현미경을 이용하여 관찰한 결과, (c) 시편 단면 SEM 사진



[그림 5] 충격 전, 후의 일반 플라스틱 LCD(위)와 화소고립 구조(아래)의 비교 및 V-T특성 (a) 충격 전, (b) 충격 후, (c) 휨에 따른 V-T 특성 변화



[그림 6] 마이크로 contact 방법을 이용한 PILC 모드 구현 개략도

다. 액정과 고분자의 3차원 비등방 상분리를 이용하는 모드는 Single substrate LCD 제작에도 응용되며, 본 연구실에서는 단일기판에서 액정 고분자 비등방 상분리를 이용하여 제작한 Single substrate LCD를 보고한 바 있다. 이러한 PILC 구조를 형성하기 위해 3차원 비등방 상분리를 유도할 시 2단계의 UV 조사를 실시하는데 처음 단계에서의 UV 조사는 사각 패턴의 마스크를 통과하게 함으로써 UV가 통과한 지역에서 고분자 벽 구조를 이루게 된다. 이어서 두 번째 UV 조사 시 강도를 약하고 균일하게 쬐어주면 UV가 쬐어지는 기판 쪽으로 경화된 고분자 층이 상분리되어 액정 층과 고분자 층으로 형성된 구조인 PSCOF(Phase separated composite organic film) 구조를 이루게 된다. 이 고분자 층을 한쪽 기판으로 사용하는 경우 Single substrate LCD를 만들 수 있게 된다. 이와 유사하게 기판과 고분자 층 사이에 release layer를 미리 형성함으로써 기판을 분리하기 쉽도록 형성한 후 고분자 막과 기판을 분리하여 플렉시블 LCD를 구현 할 수 있음이 최근 일본에서 논문으로 보고되기도 하였다.

이러한 액정과 고분자의 비등방 상분리 방법을 이용한 PILC 모드의 구현에 있어서의 문제점은 비등방 상분리를 유도하는 데 소요되는 공정시간이 길고, 액정과 고분자의 혼합상태의 공간적 균일성 확보가 어려우며, 한쪽 기판에 배향을 조절하기 어렵다는 것이다. 이러한 단점을 해결하기 위한 접근으로 한쪽 기판에 미리 미세 구조물을 형성함으로써 문제점을 해결하려는 연구가 진행되고 있다. [그림 6]에서 보듯이 미리 격벽구조나 규칙적으로 배열된 column spacer를 패터닝하고 고분자를 지역적으로 경화시킴으로 두 플라스틱 기판 사이의 셀갭과 접착성을 동시에 해결할 수 있다. 아울러 상, 하판 모두에 배향막을 도포할 수 있으므로 액정 모드

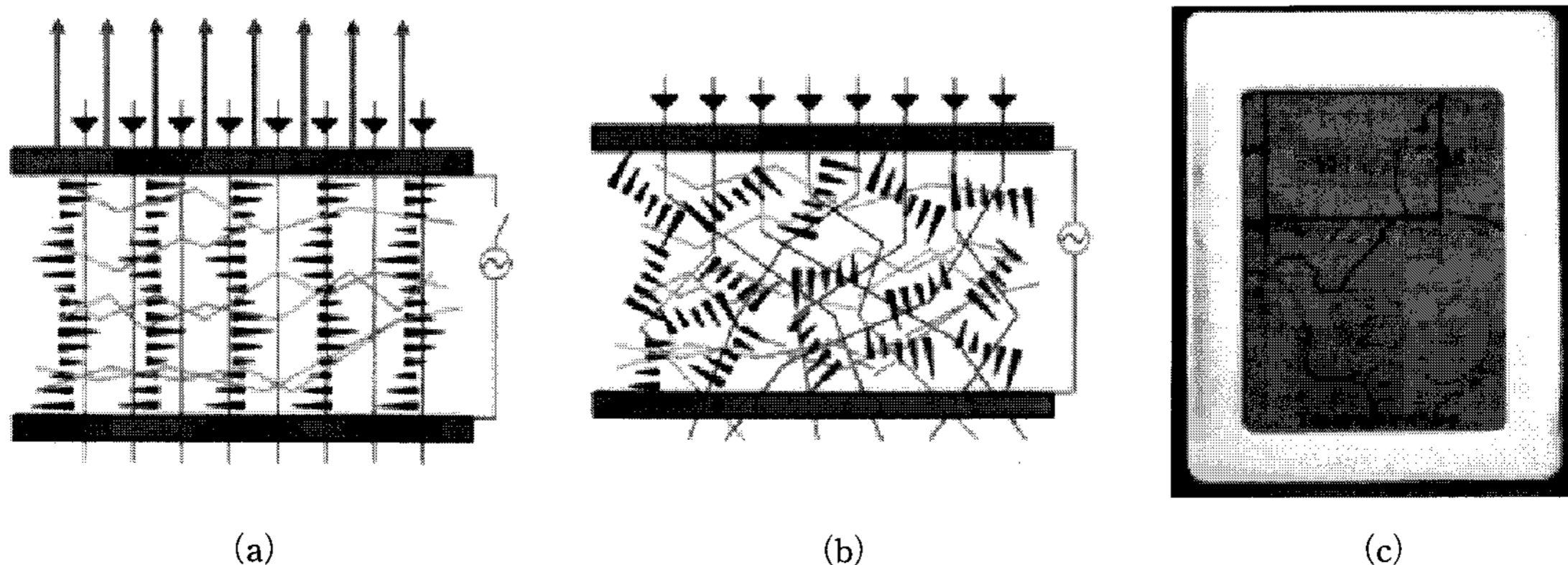
의 선택에 있어서 보다 유연할 수 있으며 양산에도 적합할 것으로 보이기 때문에 본 연구실에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Dynamic 모드를 이용한 플렉시블 액정 디스플레이의 상용화는 일본 sharp사에서 color STN 모드를 이용하여 제품화하고 있으며 국내에서는 Softpixel사에서 올해부터 양산라인을 적용하여 상용화 하였다. 그러나 아직까지는 TFT 구동소자문제 등이 있어서 자유롭게 휘거나 구부릴 수 있는 단계의 제품은 아니며 제한된 곡면의 디스플레이로 제품화 되고 있는 실정이다.

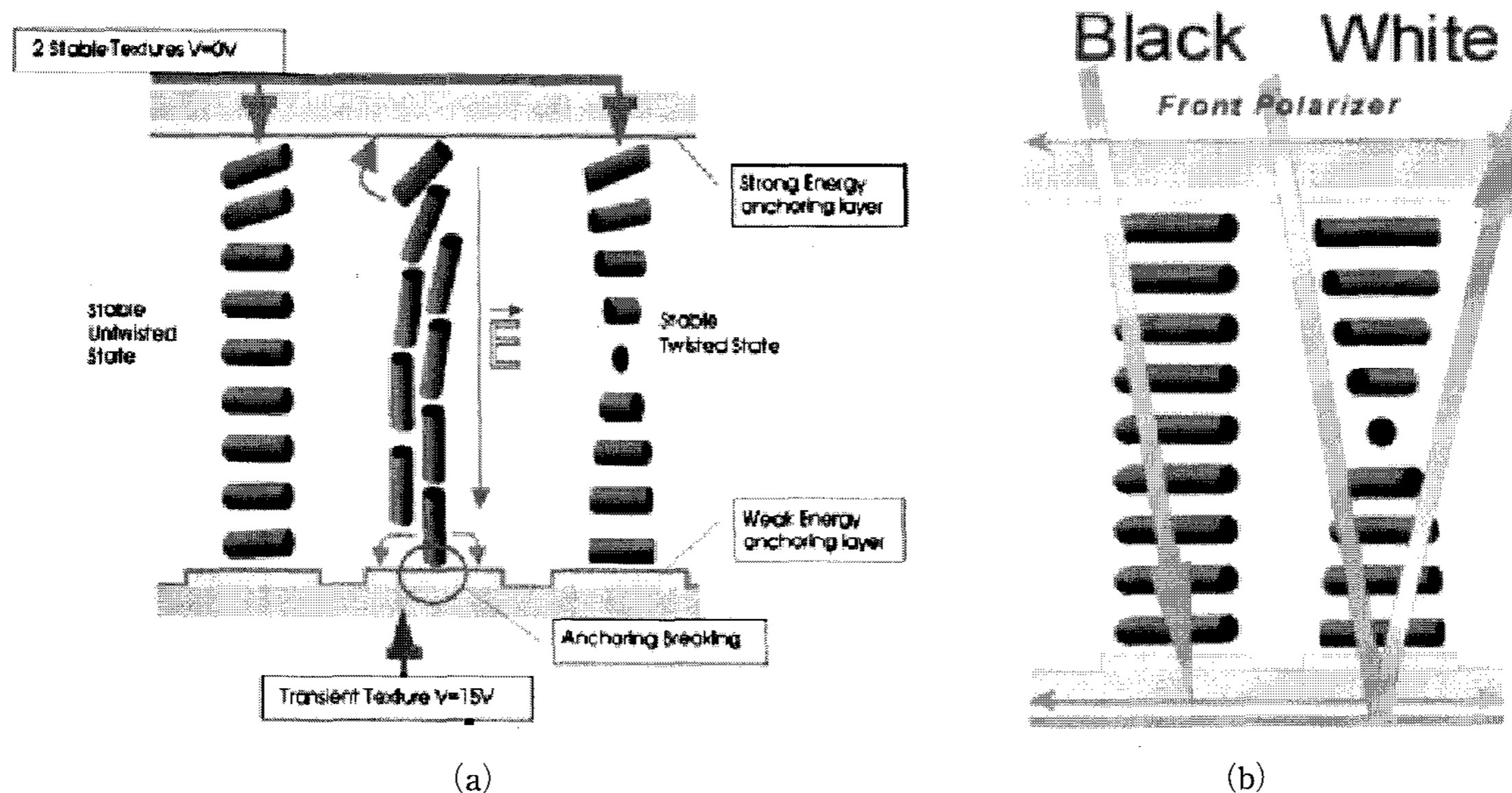
3. memory 모드

Memory 모드는 전술한 바와 같이 외부에서 전원공급이 차단되어도 기존의 정보를 표시할 수 있는 것으로서 최근 상품화를 목표로 활발히 연구가 진행되고 있다. 액정의 쌍안정 특성을 이용한 memory 모드에는 콜레스테릭 액정을 이용한 고분자 안정화 콜레스테릭 액정(Polymer Stabilized Cholesteric Texture : PSCT) 모드, Bistable Nematic 모드 등이 있다.

PSCT 모드는 반사형 플렉시블 LCD에 적용할 목적으로 개발된 모드로서 기본 동작 원리는 [그림 7]과 같다. 즉 planar texture에서의 선택반사를 bright 상태로, focal conic texture의 산란을 dark 상태로 사용하는 것으로, 그 광학 특성은 물론 양산성도 우수하여 e-book 용도에 유망한 모드로 알려져 있다. 아직까지는 고해상도의 실현이 어렵고 full-color의 구현이 힘들며 구동전압이 높을 뿐만 아니라, planar texture와 focal conic texture 간의 전이를 위해서는 reset pulse를 인가해 수직배향 상태를 거쳐야 하기



[그림 7] PSCT의 동작원리 (a) 전기장을 인가하지 않았을 때의 선택 반사모드, (b) 전기장을 인가하였을 때의 산란모드, (c) PSCT를 이용해 제작한 전자 책



[그림 8] (a) Bistable nematic 모드 개략도, (b) black 및 white 상태의 액정분자 배열

때문에 복잡한 구동파형이 요구된다는 단점이 있어 간단한 디스플레이에만 적용되고 있다. 그러나 이론적으로 영구 memory가 가능하여 이미지의 변화 시에만 전압을 인가하면 되기 때문에 전력소모가 매우 적고, 별도의 편광판이 필요 없으며 컬러 필터 없이도 색 구현이 가능하다는 점에서 휴대용 플렉시블 디스플레이로의 응용이 크게 기대되고 있다.

Bistable nematic 모드는 프랑스의 Nemoptic사에서 E-book 및 반사형 plastic LCD 시작품에 적용하는 방법으로 chirality가 있는 nematic 액정의 쌍안정성을 이용하는 모드이다. [그림 8]에서 보듯이 anchoring 에너지가 다른 두 기판 사이에 chiral nematic 액정이 있을 경우 액정 분자가 꼬여 있지 않는 상태와 180도 꼬인 상태의 쌍안정 상태가 존재한다. 이를 이용하여 반사형 디스플레이에 적용한 것으로서 꼬여있지 않은 상태에서는 dark 상태이며 180도 꼬인 상태에서는 bright 상태가 되어 정보를 표시한다. 정보를 기록할 때는 전압을 특정 형태의 펄스로 가함으로써 수직배향상태의 중간단계를 거쳐 쌍안정 상태 중 하나로 전이하게 된다. 현재 Nemoptic사는 유럽의 카드 시스템회사들(Gemplus, Oberthur Card System, ASK)과의 공동연구로 smart card에 사용될 passive matrix plastic LCD를 개발하고 있다. 또한, 위에 열거한 반사형 모드 외에 한쪽 기판의 배향 층을 grating 구조로 하여 액정 분자의 defect 구조 상태가 high pretilt 및 low pretilt의 쌍안정성을 가지는 특성을 이용하는 ZBD(Zenithal Bistable Device) 모드 등도 memory 모드에 사용되고 있다.

최근, 차세대 프론티어 과제의 지원을 받아 국내 연구진에 의해 dynamic 모드와 memory 모드의 동시구현이 가능한 BCSN(Bistable Chiral-Splay Nematic) 모드를 플렉시블 디스플레이에 적용하는 연구가 진행되고 있다. BCSN 모드는 bistable nematic 모드의 구조와 유사하나 0도 및 180도 꼬인 상태로 전이하는 중간단계를 전압에 따른 계조 표현이 가능하도록 함으로서 dynamic 모드와 memory 모

드를 함께 구현할 수 있는 모드이다. 이와 같은 dual 모드는 전자 종이로서의 역할뿐 아니라 동영상 구현하는 디스플레이로서의 역할도 수행 가능하기에 향후 플렉시블 LCD 발전에 큰 축이 될 것으로 예상된다.

III. 맺음 말

현재까지는 기존 디스플레이에서 유리기판을 플라스틱 기판으로 대체함으로써 가볍고 견고한, 그리고 보다 얇은 플렉시블 디스플레이를 구현하려는 시도가 주를 이루고 있다. 가까운 시일에는 E-book, smart card 등에 반사형 플렉시블 LCD를 이용한 제품들이 상용화 될 것이다. 최근 일본에서는 샤프·쓰미토모화학·다이닛폰인쇄 등 일본의 14개 LCD 패널 및 소재 기업들이 오는 2009년까지 자유자재로 구부릴 수 있는 '차세대 초박막 곡면 LCD 패널'을 공동 개발하는 컨소시엄을 결성했다고 한다. 또한 개발중인 곡면 패널의 크기는 현재 사용되고 있는 박형 LCD 패널보다 3분의 1 두께인 것으로 알려졌으며 화질은 기존 LCD TV 수준과 같은 것을 목표로 하며 2009년부터 휴대용 디스플레이나 곡면 디스플레이 등의 용도로 수요 개척에 나설 것임을 밝혔다. 국내에서도 삼성, LG필립스LCD, Softpixel 등의 기업에서 a-Si TFT 기반의 7인치 크기의 plastic LCD 시작품을 발표하며 dynamic 모드를 기반으로 한 플렉시블 LCD 개발에 박차를 가하고 있다. 이는 플렉시블 디스플레이의 기술 이정표가 한 단계 앞으로 진전되고 있음을 보여준다고 하겠다.

2010년대의 전유기 디스플레이는 미래형 플렉시블 디스플레이로서 자유롭게 말수도 있고 접을 수도 있기 때문에 그 응용범위는 현재의 개인용 컴퓨터나 TV 뿐만 아니라 전자 종이, 입는 컴퓨터, rollable 디스플레이 등 정보기기 전반에 걸쳐 다양하게 이용될 것으로 예상된다. 따라서 이러한 다양

한 응용에 적합한 dual 모드 및 투과형과 반사형을 같이 사용할 수 있는 반투과형 모드의 개발이 요청된다. 뿐만 아니라 이와 같은 모드는 양산성 및 가격의 경쟁력을 갖춘 roll-to-roll 방식의 공정진행도 가능하여야 할 것이다. 이와 같은 요구를 충족하는 플렉시블 LCD 기술은 미래의 거대한 규모의 디스플레이시장에서 충분히 경쟁력을 가질 것이다. 따라서 그러한 기술의 개발은 기술 및 시장 선점 그리고 막대한 특허 이익이 예상되므로 산·학·연의 적극적인 연구 참여가 요청된다.

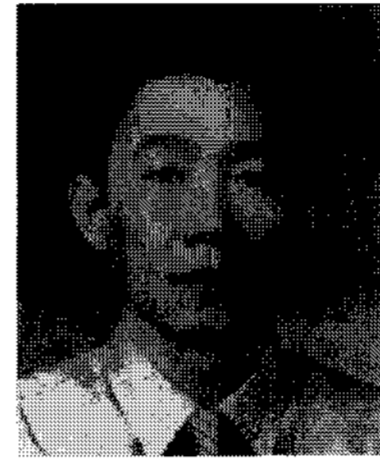
참 고 문 헌

- [1] 김보성 등, "Flexible display 개발 현황과 향후 전망", 인포메이션 디스플레이 제 3 권 제 5 호 (2002).
- [2] S. Wu and D. Yang, "Reflective Liquid Crystal Displays", Wiley-SID Series in Display Technology (2001).
- [3] 김재훈, "Flexible Display 기술동향", 인포메이션 디스플레이 제 5 권 제 5 호 (2004).
- [4] G. P. Crawford, "Flexible Flat Panel Displays",

John Wiley & Sons, Ltd (2005).

- [5] P. Drzaic, "Liquid Crystal Dispersions", World Scientific (1995).
- [6] www.kentdisplays.com
- [7] www.nemotic.com
- [8] www.e-ink.com
- [9] www.sharp-world.com

저 자 소 개



김 재 훈 (Jae-Hoon Kim)

서강대학교 물리학과(이학학사, 1987), 미국 오리곤대학교 물리학과(이학석사, 1989), 서강대학교 물리학과(이학박사, 1996), 1996~1999: 미국 켄트주립대학교 액정연구소 Post. Doc, 1999~2000: 삼성전자 AMLCD 사업부 책임연구원, 2000~2004: 한림대학교 물리학과 조교수, 2004~현재: 한양대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수