

## 1. 들어가는 말

혹시 '마이내리티 리포트' 라는 영화를 본 일이 있는지? - 쫓겨 다니던 주인공 톰 쿠루즈가 지하철을 타고서는 감시의 눈초리가 있는지 두려워하며 두리번거릴 때, 몇 좌석 건너편의 할머니 손에 들려 있던 신문이 computer 화면처럼 바뀌면서 수배자 '톰 쿠루즈'의 얼굴이 나타난다. - 영화 속 상상의 일일까? 종이처럼 돌돌 말아 들고 다니면서, 필요할 때마다 펴보고, 조금 더 욕심을 내어 실시간으로 원하는 정보를 표시할 수 있는 것이 있다면! 먼 미래의 일, 상상 속의 일일 것 같던 것들이 점점 눈 앞에 다가오고 있다.

일상에서 가장 많이 사용하는 신체 기관이라면 역시 눈이 아닐까? 세상 돌아가는 일, 지식을 얻는 것, 각종 정보

들고 다니면서 보려면 이런 것들로 가능할까?

종이를 생각해 보자. 거의 매시간 들여다 보고 있는 LCD monitor와 다른 점은?

- 인쇄된 것이 웬만해선 지워지지 않는다.
- 보려면 환한 장소만 있으면 되고 따로 전원이 필요 없다.

- 가볍고 구부러도 된다.

- 큰 돈 안 들여도 살 수 있다.

여기에 필요한 것을 교체해서 볼 수 있다면?

전자 종이는 여기에서 출발한다. 전기적으로 화면을 기록하고, 기록한 정보는 전원이 없어도 일정 시간 동안 유지되며, 선명하게 보이도록 충분한 대조비(contrast ratio)가 있어야 한다. 그리고 '너'도 '나'도 쉽게 사용하려면 값이 싸야 한다. 이런 기술이 있을까? 다음에서 그

# 특집 「디스플레이 II

## 전자 종이(Electronic Paper)

강승열\*, 서경수\*

를 받아들이는 것 모두 가장 큰 역할은 역시 눈일 것이다. 그리고 그러한 정보를 제공하는 일차적인 접점은 TV monitor, 컴퓨터 화면, 신문, 책 등이다. 부피가 크고, 무거운 CRT monitor 대신 얇고, 가볍고, 평평하고, 눈도 피로하지 않은 LCD monitor를 사용하는 사람이라면, '이런 것이 지금보다 더 얇고 가벼워서 들고 다닐 수 있고, 지금 쓰는 notebook computer처럼 무거운 battery를 사용하지 않고 매일 쓰는 건전지만 가지고도 사용할 수 있으면 좋을 텐데!' 라는 상상을 하는 것은 당연하지 않은가!

사람들의 상상력과 필요성은 새로운 기술을 만들어 낸다. CRT에서 LCD, OLED로 발전한 디스플레이 기술은 유리 대신 플라스틱을 써서 더 얇고, 더 가볍고, 깨지지 않는 Flexible display의 방향으로 가고 있다. 그런데, 우리가 매일 읽는 신문, 잡지, 책을 필요할 때마다 바꿔서

예를 보기로 하자.

## 2. 전자 종이를 향해

전자 종이는 아직 상용화가 이루어지지 않아서인지 접근 방법이 매우 다양하다<sup>1)</sup>. 표 1에 현재 전자종이를 위한 여러 기술적 접근 방식들을 나열하였다. 이러한 많은 방법 중에서 '디스플레이' 보다는 '종이'에 중심을 두고 그에 적합한 것들에 대해 알아보기로 하자.

앞서 언급한 것과 같이 '종이'의 특성을 가장 잘 표현하는 것은 얇으면서도 전원이 차단되어도 화면이 유지된다는 것이다. 이러한 특성을 보통 '쌍안정성(bistability)'이라고 한다. 이러한 쌍안정성을 갖는 디스플레이를 전자 종이라 부르기로 하고 이의 구현을 위한 기술적 접근 방

\* 한국전자통신연구원 기반기술연구소

# 전자 종이(Electronic Paper)

표 1. 전자종이 구현을 위한 기술적 접근 방식(Nikkei Microdevices, 2001년 2월 기사를 참조로 작성)

형 태	명 칭	연 구 기 관
액정	네마틱 액정	샤프, 세이코엡슨, 마쓰시타 전기산업
	3층 게스트/호스트 액정	도시바, ASET
	홀로그래픽 PDLC	ASET
	지향성 반사형	ASET
	콜레스테릭 액정	미 Kent State 대, 미놀타
	ZBD	영국 ZBD 사
	BTN	세이코엡슨
유기EL		동해대학, 대일본인쇄
可動필름		파이오니아, 대일본인쇄, 미 Universal Display사
반사 필름 반사형 표시		도시바
전기영동	마이크로캡슐형	캐나다 British Columbia 대
	인-플레인형	미 E-ink 사, TDK
트위스트볼		캐논, IBM
미케니컬 반사형 표시		미 Gyricon 사
Thermal Rewritable	iMod	미 Iridigm Display 사
		리코, 도시바, 오키정보 시스템, 미쓰비시 제지

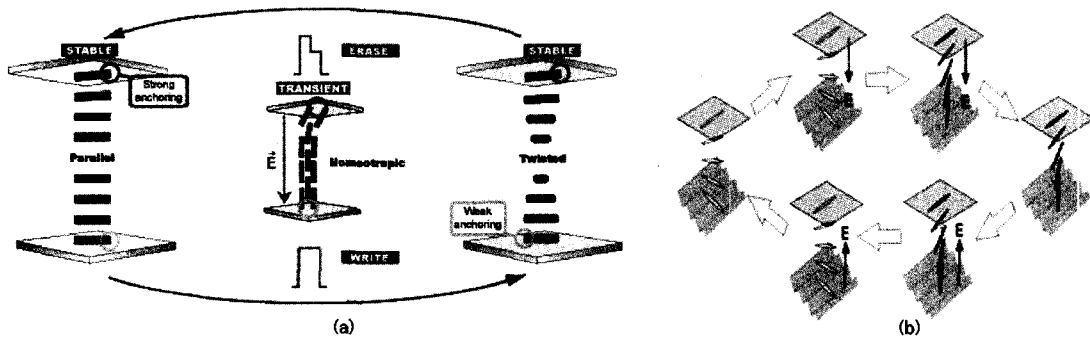


그림 1. NemOptic 사(a)와 ZBD 사(b)의 네마틱(nematic) 액정을 이용한 쌍안정액정디스플레이의 작동 원리. 기존의 TN-LCD와는 달리 두 종류의 안정한 상이 존재하고 이를 이용하여 전원이 차단된 상태에서도 화면을 유지한다.

법을 살펴보기로 한다.

우선 '디스플레이로부터의 접근' 방향이 있을 수 있다. 이는 기존 평판디스플레이(Flat Panel Display: FPD) 기술을 응용하여 접근하는 것으로, 현재 전체 평판디스플레이를 평정하고 있는 LCD로부터 출발하는 것이다. 매일 접하는 TFT-LCD와는 다른 방식의 제조 방법과 다른 종류의 액정을 사용하여 이러한 특성을 얻을 수 있다. 대개 이러한 기술 앞에는 'bistable'이라는 명칭이 붙어 있다.

제조 방법을 달리하는 것은 대부분 액정의 방향성을 유지하도록 해주는 배향막을 달리하는 경우이다. 영국의 ZBD<sup>2)</sup>, NemOptic<sup>3)</sup> 등에서 개발하고 있는 기술로 기존의 두 polyimide 배향막 대신 한쪽을 변형시켜 '쌍안정

성'을 확보하는 기술이다. 예를 들어, NemOptic 사의 경우 그림 1(a) 보듯이 한쪽의 배향막의 특성을 변화시켜 두가지 안정한 상태를 얻고, 이를 이용하여 쌍안정성을 갖는 전자종이를 개발하였다. 쓰고 지우는 것은 그림에서와 같이 다른 모양의 파형으로 가능하다.

ZBD 사의 경우에는 한쪽 배향막을 grating 형태로 만들어 사용하고 있다. Grating의 표면은 아래 위 방향으로 걸리는 전기장과 수직하지 않으므로 이를 이용하여 역시 두가지 안정한 상태를 얻을 수 있다. 그림 1(b)는 작동 원리를 보여준다.

액정의 종류를 바꾸어서도 이러한 특성을 가질 수 있게 할 수 있다. 콜레스테릭(cholesteric) 액정은 자체의 성질에 의해 칼라 표시를 위한 필터가 따로 필요 없다. 또한,

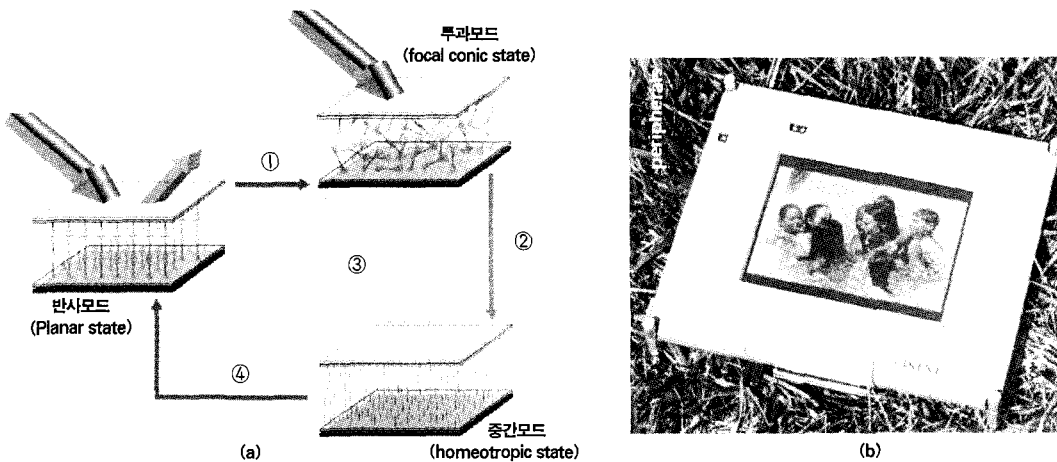


그림 2. Cholesteric LC의 작동 원리. 반사모드에서 20-30V의 전압을 인가하면 투과모드로 변환한다. 투과모드에서 30-40V의 전압인가로 중간모드로 변환을 하며, 이때 인가전압을 빠르게 제거하면 반사모드로, 천천히 제거하면 투과모드로 변화한다. (b) Kent사의 cholesteric LC를 이용한 천연색 반사형 디스플레이

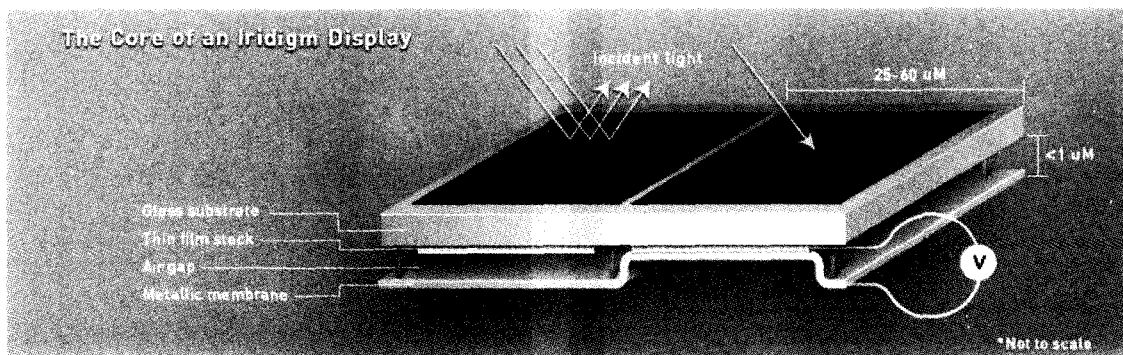


그림 3. Iridigm 사의 iMod 디스플레이 작동 원리

액정 특성상 쌍안정성을 확보할 수 있어서 반사형 칼라 전자 종이도 가능하다. 현재 콜레스테릭 액정을 이용하여 칼라 전자 종이를 개발하고 있는 곳으로는 Kent Display 사가 있다<sup>4)</sup>. 역시 두 종류의 안정한 상태가 있어서 이를 이용하여 화면을 유지할 수 있다. 일반적인 네마틱 (nematic) 액정과는 달리 색을 표시할 수 있는 장점이 있어서 그림 2 (b)에서와 같이 칼라필터 없이도 천연색의 디스플레이를 만들 수 있다.

독특한 방식의 전자 종이도 있다. Iridigm 사의 iMod<sup>5)</sup> 라는 명칭의 디스플레이로 MEMS 기술을 이용하여 만들고 있다. 원리는 그림 3에서 보듯이 아래, 위 두판 사이에 얇은 갭(gap)을 만들어 전원이 없는 경우 입사된 빛이 갭을 통과하여 아래쪽 금속 막에서 반사되게 하고, 전압을 가하면 아래의 금속 막이 위 판에 밀착되어 빛을 흡수하도록 하는 것이다. 원하는 파장의 색을 투과하도록 갭

을 조절하면 흑/백 뿐만 아니라 칼라표시도 가능하다.

다음으로는 종이로부터 접근하는 방법의 예를 보기로 하자.

종이에 글을 쓰거나 프린터를 이용하여 종이에 인쇄하는 것을 생각해 보라. 흰색 종이에 검은 색의 잉크가 '뿌려' 진다. 만일 전기적으로 마음대로 움직일 수 있는 흑/백 잉크가 있어서 - 사실 종이에 흑색 잉크만 있지만 - 쓰고 지우기를 할 수 있고 일단 쓰면 일정 시간 동안 지워지지 않도록 할 수 있으면 종이가 다르지 않을 것 같다. 단, 여기에 쓸 '종이'가 구부릴 수 있고 얇기만 하다면 말이다.

흑/백의 잉크가 있다. 어떻게 만들고 어떤 성질을 이용하면 흑/백을 선택하여 전기적으로 '종이' 위에 '쓸' 수 있을까? 전기의 플러스, 마이너스의 극성을 이용하여 보자. 예를 들어, 작은 공을 받은 검은 색으로 칠하고, 나머지 받은 흰색을 칠했다고 하자. 검은 색 부분에 플러스 전

## 전자 종이(Electronic Paper)

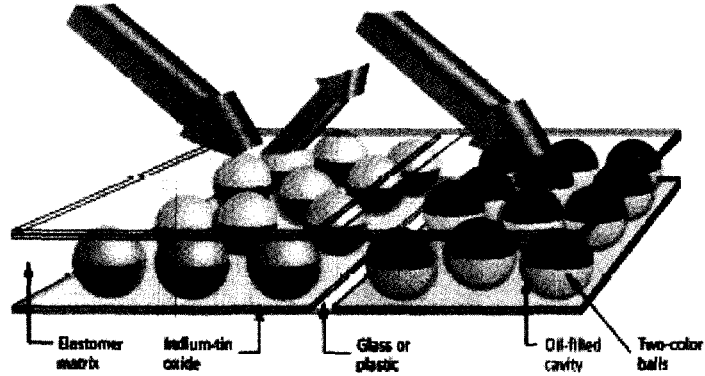


그림 4. Gyricon사의 twist ball을 이용한 전자종이 작동 원리

기를 띠도록 조작하고, 흰색 부분에 마이너스 전기를 띠도록 조작한 후, 이 공이 자유롭게 돌 수 있는 어떤 유체 안에 띄어 보자. 위쪽에서 플러스 전기를 가하면 공은 마이너스 전기를 띤 부분이 위로 향하도록 돌게 된다. 마찬가지로 마이너스 전기를 가하면 플러스 전기를 띤 검은 부분이 위로 향한다. 이렇게 빙글빙글 도는 공을 트위스트 볼이라고 부르자.

트위스트 볼 형태의 디스플레이는 1975년 미국의 Xerox Palo Alto Research Center(PARC)의 Sheridan 박사에 의해 개발되었다<sup>[6]</sup>. 이 디스플레이는 그림 4(a)에서 보듯이 투명한 두 개의 플라스틱 시트 사이에 오일과 함께 반은 백색, 나머지 반은 흑색으로 칠해져 있는 지름이 약 100  $\mu\text{m}$ 를 가진 수백만 개의 작은 볼로 구성되어 있다. 작은 볼의 백색과 흑색으로 칠해져 있는 영역에 반대 전하를 띠게 하여 외부에서 가하는 전기장의 극성에 의해서 볼이 회전하여 흑/백의 이미지가 표시된다. 또한 이들 볼들과 오일은 거의 비중이 비슷하여 인가 전압에 의해서 볼이 회전한 후 한번 위치가 정해지면 인가 전압을 제거한 이후에도 수일 이상 이미지가 유지된다. 이 디스플레이는 회전하는 볼이라는 그리스 어원을 가진 "gyricon"이라고도 불린다. 또한 볼의 재료와 흑/백 영역의 극성 및 전하량을 조절함으로써 볼의 회전 속도 및 이동을 조절할 수 있다. 2000년 Xerox사에서 분리, 설립된 Gyricon Media Inc.<sup>[7]</sup>에서 트위스트 볼 형태의 디스플레이를 주도적으로 연구, 개발하고 있다. 6:1 이상의 대비비와 20% 이상의 백색광 대비비를 가진다. 또한 회전볼은 대량 생산이 가능한 단순 공정인 스프레이 몰든

법으로 제조한 wax-like plastic이 사용되어 저가격 실현에 잇점이 있다. 이 디스플레이는 매우 안정적이며, 3백만 사이클 이상의 동작에서도 특성의 저하가 없는 것으로 보고되어 있다. 동작 전압과 응답 속도는 사용하는 재료의 전기적 특성, 볼의 크기, 오일 특성에 의해서 좌우되며, 각각 50 - 100 V, 80 - 100 ms의 영역에 있다. 동작 전압을 낮추고 응답속도를 올리기 위해서는 회전 볼의 크기를 줄여야 하는데 이는 대비비의 저하를 동반하는 문제점이 있다.

다시 종이로 돌아가 흑/백 잉크를 생각해 보자. 이번에는 작은 공에 흑/백을 반씩 나누어 칠한 것이 아니라 매우 작은 흰색, 검은 색 입자가 있고 앞에서와 같이 각각에 다른 전하(흰색은 플러스, 검은 색은 마이너스)를 부여했다고 해 보자. 그리고 이들 입자들이 서로 다가가 붙지 않고 - 이를 분산이라고 한다. 자유롭게 떠 다니도록 유체에 넣어 두자. 위쪽에서 플러스 전기를 가하면 흰색이 위로 올라오고 검은 색은 아래로 내려갈 것이다. 흰색 화면을 얻게 된다. 반대 전압을 가하면, 검은 색 화면을 얻을 수 있다. 여기에 각 입자들의 밀도를 유체의 밀도와 같게 만든다면 전기적으로 움직인 입자는 중력의 효과를 받지 않게 되므로 전원이 꺼져도 움직인 위치에서 멈추게 될 것이고 화면은 전원이 꺼져도 남아 있게 된다.

전하가 부여된 미립자가 전기 극성의 반전으로 이동하는 현상을 전기영동(Electrophoresis)이라고 하고, 이러한 현상을 이용한 디스플레이를 전기영동디스플레이(electrophoretic display)라고 한다. 전기영동현상을 이용한 디스플레이 기술은 1970년대 초에 제안되었으나,

시간에 따른 분산 불안정성 즉, 잉크 미립자들이 전기의 극성을 연속적으로 바꿀 때 서로 뭉치는 일이 발생한다. 더군다나 유체에 와류가 생기는 등의 문제가 발생하여 실제 상용화까지는 이르지 못했다. 1996년 미국 MIT Media Lab.에서 분리되어 설립된 E-Ink사<sup>18)</sup>에서는 마이크로캡슐을 사용하여 이러한 문제점들을 해결하였다<sup>9,10)</sup>. 그림 5(a)와 같이 특정한 전하를 가진 특정색의 잉크 미립자와 반대 전하를 띤 다른 색의 잉크 미립자(혹은 색을 띤 유전유체) 및 투명 유전 유체를 담은 지름 100 - 200  $\mu\text{m}$ 의 투명한 마이크로캡슐을 제조하였다. 이들 마이크로캡슐을 바인더와 혼합하여 상, 하부 투명전극 사이에 위치시키고 전압을 인가하면 위에서 설명한 방식에 의해서 문자나 이미지를 표시하게 된다. E-Ink사의 초기 디스플레이는 백색 반사율이 우수한  $\text{TiO}_2$  미립자에 청색 유체

를 사용하여 청색 배경에 흰색 이미지를 구현하였으며, 현재에는 투명 유체에 양전하를 띤 백색 미립자와 음전하를 가진 흑색 미립자를 분산시킨 마이크로캡슐을 제조하여 흑/백 표시가 가능하다.

2000년에 E-Ink사의 마이크로캡슐 전기영동 디스플레이와 Lucent Technology사의 soft-lithography방법을 이용하여 제작한 유기트랜지스터가 결합된 능동 구동형 전자 종이 발표되어 전자 종이 제조의 획기적인 전환점을 마련하였다. 이는 가볍고, 얇고, flexible한 디스플레이를 제조하기 위해 필수적인 사항으로, 제조에 있어서 상판(마이크로캡슐)과 하판(트랜지스터) 모두 대량 생산이 용이한 프린팅 기술을 이용함으로써 저가의 디스플레이 제조에 크게 기여할 수 있다. 마이크로캡슐 전기영동 디스플레이는 우선 종이 질감에 가장 가까운 특성과

**Cross-Section of Electronic-Ink Microcapsules**

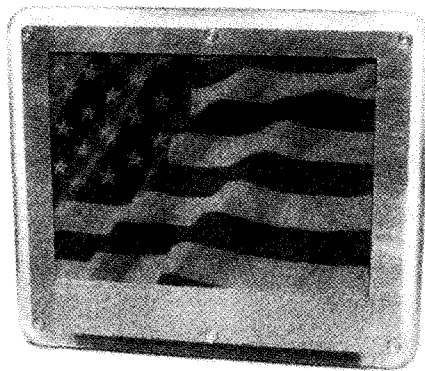
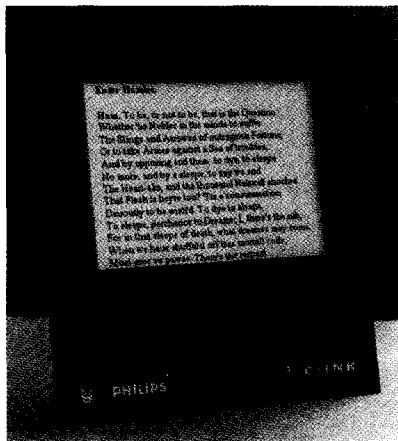
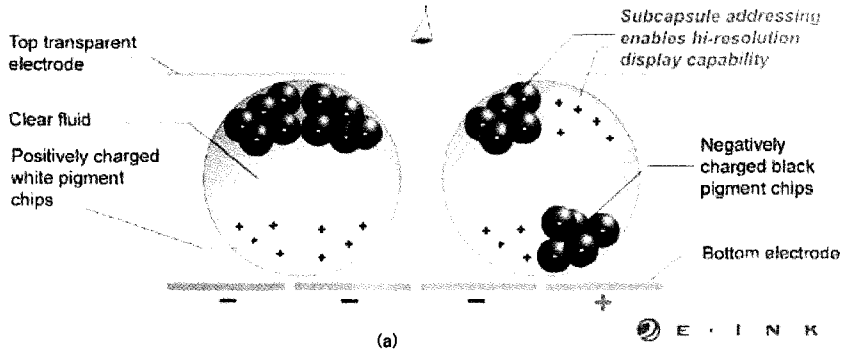


그림 5. (a) E-ink 사의 전기영동디스플레이의 작동 원리  
 (b) 기존 LCD의 비정질실리콘 박막트랜지스터를 이용한 능동구동형 전자종이  
 (c) 칼라필터를 사용한 천연색 전자종이

## 전자 종이(Electronic Paper)

10:1의 대비비를 가져 시인성이 우수하다. 또한 백색광의 반사율이 40%이며, 구동전압은 약 90V이다. 또한 구동전압의 조절에 의해서 그레이스케일의 표현이 가능하고 약 천만번의 사이클에도 안정적인 동작을 보이는 것으로 보고되어 있다. 그러나 응답속도가 약 100 ms로 느려 동영상 구현에는 많은 개선이 필요하며 이는 주로 마이크로캡슐의 소형화에 의해서 개선하려는 연구가 진행 중이다. 또한 컬러 필터를 이용하여 컬러 표시가 가능한 소자의 제조가 연구 중이다.

아직은 전자 종이를 개발하기 위해 여러 다양한 기술들이 제안되고 있는 상황이다. 학문적인 연구와는 달리 기술에서는 어느 기술이 먼저 개발되어 시장에 진입하는가가 다른 무엇보다 중요하다. 위의 여러 기술 중 지금까지는 E-ink 사의 electrophoretic display가 전자 종이로서 실용화에 가장 가깝게 접근하고 있다고 여겨진다. 이는 제품 생산에 필요한 재료비가 매우 적게 들고, 대량 생산을 위한 비싼 장비가 크게 필요하지 않다는 장점과 일반적인 라미네이션(lamination) 공정을 사용할 수 있어서 대면적을 매우 손쉽게 만들 수 있다는 장점 때문이다. 그러나, 이 기술의 약점은 문턱전압(threshold voltage)이 없다는 것이다. 즉, 전압을 가하면 크기에 상관없이 입자가 일정 정도 이동을 하게 된다. 이는 실제 사용에 있어서 해상도에 한계를 가져올 뿐만 아니라, 픽셀을 직접적으로 구동하여야 하기 때문에 구동부분이 픽셀 수에 비례하여 복잡해지며, 고해상도를 얻기 위해서는 트랜지스터(transistor)와 같은 능동소자(active device)가 필요하므로 디스플레이의 제조 가격이 오르는 원인이 되어 쓴 '종이'를 만드는데 어려움이 있다. 능동소자가 없이 수동 구동(passive matrix addressing)이 가능하거나, 앞서 언급한 것과 같이 프린팅 등과 같은 저가격의 방법을 사용하여 능동 소자를 제작하려는 시도가 있고 이의 성공이 전자 종이의 성공과 연결되어 있다고 생각된다.

## 3. 글을 마치며

전자 종이는 아직까지 구체적인 적용 대상을 명확하게 하지 못 하고 있다. 그러나, Economist지(2000년 12월호)에서 분석하기로는 전자종이가 옥, 내외 광고판으로 사용되고 있지만, 다양한 형태의 인터넷 기기 및 전자책의 정보 표시 매체 등으로 이용될 것이 확실하다고 전망하고 있다. 또한 미국의 Gartner Group에서는 2003년 말경 전자 종이의 상용화 제품이 PDA(Personal Digital Assistants)를 비롯한 이동 통신기기에 이용되고 2004년에는 e-book이 나올 수 있을 것으로 전망하고 있다

머리에서 상상하던 것을 구체화시키려고 노력하다 보면 예상 못 한 많은 새로운 기술을 개발하고, 새로운 현상을 발견할 수 있다. 지금 내가 쓰고 있는 종이를 바꿔보려는 생각이 이처럼 다양한 기술을 개발하는 원동력이었을 것이다. 지금 이 글을 읽는 이공계학도들 중, 공부한 것을 실생활에 '구체적'으로 적용시키고 싶은 사람이 있다면 전자종이도 하나의 매력 있는 분야가 아닐는지 생각해 보기 바란다!

## 참고문헌

- (1) G. P. Crawford, IEEE Spectrum, October, p. 40(2000).
- (2) <http://www.zbdisplays.com/index.html>
- (3) <http://www.nemoptic.com/>
- (4) <http://www.kentdisplays.com/>
- (5) <http://www.iridigm.com/>
- (6) N. K. Sheridon, E. A. Richley, J. C. Mikkelsen, D. Tsuda, J. C. Crowley, K. A. Oaha, M. E. Howard, M. A. Rodkin, R. Swidler, and R. Sprague, J. SID, 7/2 p.141(1999).
- (7) <http://www.gyriconmedia.com/index.html>
- (8) <http://www.eink.com/>
- (9) B. Comiskey, J. D. Albert, H. Yoshizawa, and J. Jacobson, Nature, 394(16), p. 253(1998).
- (10) J. Ritter, Proc. IDW 01, p.343(2001).

## 약 령



**강승열**

1987년 : 서울대학교 자연과학대 물리학과, 이학사  
 1990년 : 한국과학기술연구원 물리학과, 이학석사  
 1994년 : 한국과학기술연구원 물리학과, 이학박사  
 경력  
 1994년-현재 : 한국전자통신연구원, 선임연구원



**서경수**

1979년 : 서강대학교 화학과, 이학사  
 1989년 : 보르도 1대학(불란서) 고체화학 이학석사  
 1991년 : 보르도 1대학(불란서) 재료과학 이학박사  
 경력  
 1979년- 1988년 : 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원  
 1991년 - 1992년 : 불란서 고체화학연구소(CNRS) 선임연구원  
 1992년 - 현재 : 한국전자통신연구원, 책임연구원