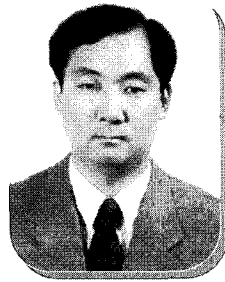
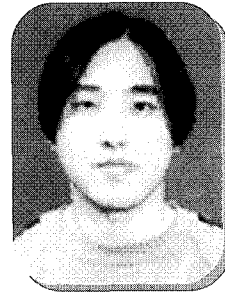


## Microparticle 기반의 E-Paper 기술개발



◦ 한정인 ◦  
전자부품연구원  
디스플레이연구센터 센터장



◦ 김영훈 ◦  
전자부품연구원  
디스플레이연구센터 연구원

### 1. 서론

일반적으로 통용되고 있는 전자종이(Electronic paper)의 정확한 의미는 현재 널리 사용되는 전통적인 종지와 유사한 특성을 지닌 과 동시에 재사용(reusable)이 가능한 일종의 플렉서블 디스플레이이라고 할 수 있다. 현재 사용되고 있는 종이는 유연하고 얇아 어떤 형태로든지 변형이 가능하며 자체적으로 발광하지 않아도 반사율이 뛰어나(~65%) 주위의 빛으로도 충분히 사용이 가능할 뿐만 아니라 시야각이 넓어 정보의 왜곡이 없다. 전자종이는 이러한 고유의 특성을 보유하면서도 원거리 통신(telecommunication) 혹은 다른 형태의 정보 교환 기능으로 언제든지 다른 정보로의 전환이 가능한 형태를 가져야 한다.

최근의 정보 처리용 휴대기기의 발달은 평판 디스플레이(FPD) 산업의 폭발적인 성장에 있어서 커다란 기여를 했다고 할 수 있다. 특히 액정 디스플레이(Liquid Crystal Displays)는 휴대기기에 적합한 적은 소비전력과 비교적 저렴한 생산단가로 인해 평판 디스플레이 산업의 주축이 되었다. 하지만 일반적으로 사용되고 있는 액정 디스플레이의 경우에는 정보를 표시하려면 지속적으로 전극에 전압을 가해 주어야 하며 특히 투과형 액정 디스플레이의 경우에는 백라이트를 사용하기 때문에 소비전력이 커 전자종이의 응용은 매우 어렵다. 또한 반사형 액정 디스플레이의 경우

에도 소비전력은 작지만 화질에 한계가 있어 장시간 사용이 어려워진다.

현재 상용화되어 있는 전자책(Electronic book)은 반투과형 액정 디스플레이를 사용하고 플렉서블한 재질이 아닌 일반 유리 기판을 사용했기 때문에 엄밀히 말해서는 단순화된 노트북의 일종이라고 생각할 수 있다. 기존의 액정 디스플레이가 가진 이러한 문제점들을 극복하기 위해 다양한 형태의 디스플레이 기술들이 시

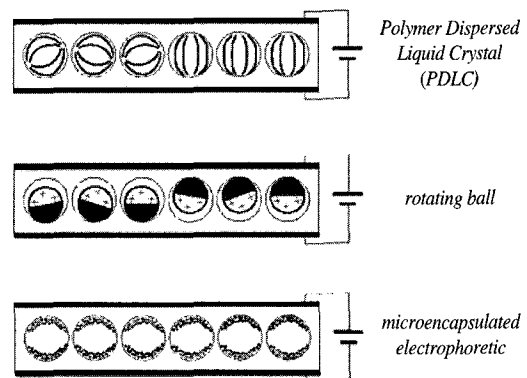


그림 1. 캡슐화된 디스플레이 매개체.

도되었다. 특히 Ferroelectric liquid crystal, bistable nematic, electrochromic, electrophoretic, rotating ball, polymer dispersed liquid crystal 등의 기술들에 대한 연구가 활발했는데, 아래 그림에 있는 바와 같이 encapsulated display media를 이용한 기술들이 현재 가장 각광을 받고 있다. 본 고에서는 encapsulated display media를 이용한 기술, 특히 particle-based 디스플레이 기술을 중심으로 전개하도록 하겠다.

## 2. 기술 동향

현재까지 시도된 전자종이 구현 기술 중 가장 상용화에 근접한 혹은 이미 상용화된 기술은 이미 언급한 바와 같이 encapsulated display media를 이용한 기술들이다. 우선 encapsulated display media를 이용한 가장 대표적인 기술로는 Xerox사에서 개발한 bichromal ball 혹은 rotating ball을 이용한 Gyricon Display와 E Ink사에서 개발한 microencapsulated electrophoretic ink를 이용한 디스플레이가 있다.

### 2.1 Gyricon Display

Gyricon Display는 이미 1970년대 Xerox사의 Palo Alto Research Center(PARC)에서 개발이 시작된 기술이다. 하지만 그다지 큰 관심을 받지 못하다가 최근에 들어서야 다시 관심을 얻게 되었다. Xerox사는 2000년 12월 Gyricon Display를 상용화할 목적으로 Gyricon Media란 회사를 창립하였고 최근에는 3M과 상호협력 속에 양산용 제품 생산에 주력하고 있다.

Gyricon Display의 기본 동작 개념은 아래 그림 2와 같이 비교적 간단하다. 우선 투명한 실리콘 합성고무(silicone elastomer)에 존재하는 미세한 구형의 공간 속에 크기가 약 30~100 $\mu\text{m}$ 인 bichromal

ball 혹은 rotating ball을 일정한 두께로 분산시키게 된다. Bichromal ball의 크기에 따라 디스플레이의 resolution이나 다른 전기광학 특성이 달라지게 되는데, [1] 표 1에서는 각각의 bichromal ball의 크기에 따른 디스플레이의 resolution 변화를 나타내었다. 이 작은 ball들은 서로 다른 극을 가지는 흰색 반구와 검은색의 반구로 이루어져 있어 상판과 하판 전극에 전압을 걸어주게 되면 그 방향에 따라 구들이 공간 속에서 회전하게 되어 색을 나타내게 된다. 또한 이 구들이 회전하다 실리콘 합성고무의 내벽에 닿게 되면 그 상태로 정착이 되어 전압을 걸지 않아도 이전 상태를 유지할 수 있게 된다.

Gyricon Display는 아래 그림에서 나타나는 바와 같이 상부와 하부의 색이 다른 bichromal ball이 서로 다른 전하를 가진 흰색과 검은색의 형태를 가진다. 상판과 하판의 전압 조절에 따라 이 ball의 방향이 바뀌게 되어 흰색, 검은색은 물론 회색계열의 색 구현이 가능하다.

### 2.2 E Ink

E Ink사는 1997년 설립되어 electronic ink를 이용한 다양한 응용

표 1. 구의 크기에 따른 해상도 변화.

Size of bichromal ball	100 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
Resolution (dots/inch)	100	200	300

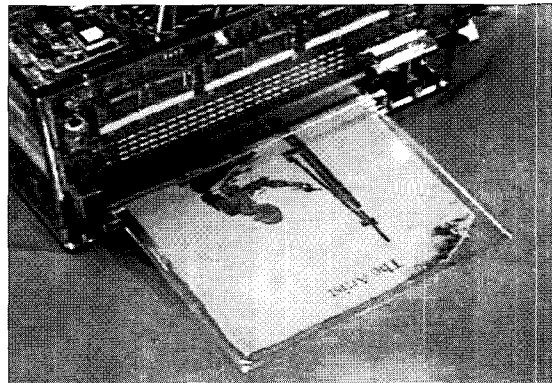
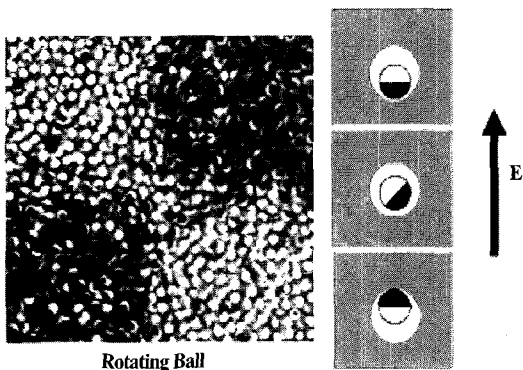


그림 3. 자이리콘 전자종이와 프린터.



Rotating Ball

그림 2. 자이리콘 디스플레이의 회전구.

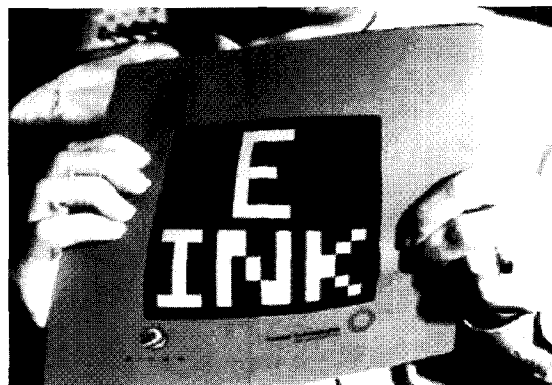


그림 4. 플렉서블한 능동소자 전자종이.

### 3. Particle-based Technology

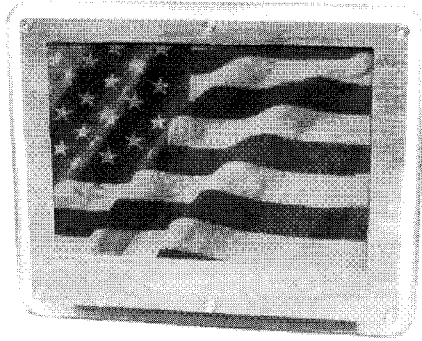


그림 5. 컬러 전자잉크 디스플레이(5" type, 80ppi).



그림 6. 전자 잉크의 단면.

제품들을 생산해 내고 있다. 현재에는 일본의 Toppan 및 Lucent Technologies와의 partnership을 통해 보다 진보된 형태의 prototype을 개발 중에 있다. 특히 Lucent Technologies에서 개발한 플렉서블 유기 박막 트랜지스터(Organic thin film transistor)를 구동 소자로 이용한 디스플레이[2]와 Toppan의 CFA(Color filter array) 기술을 이용한 컬러(4,096 colors) 구현이 가능한 시제품도 최근에 선을 보였다.

E Ink사에서 사용하고 있는 electronic ink는 작은 microcapsule 내에 각각 양전하를 띠는 흰색의 pigment chip과 음전하를 띠는 검은색의 pigment chip이 투명한 액체와 함께 공존하는 형태를 지닌다. 이러한 형태의 microencapsulated electrophoretic ink는 상판과 하판에 있는 전극에 일정한 전압을 걸어줌으로써 흑백 및 grayscale 이미지를 표현해 낼 수 있게 되는데, 반사율이 매우 높고 (~60%) 시야각이 매우 넓어 기존의 인쇄된 종지와 유사한 성능을 가지고 있다. 또한 소비전력이 매우 낮을 뿐만 아니라 electrophoretic ink의 bistable한 특성으로 전압을 차단해도 이미 가지고 있던 이미지를 충분한 시간 동안(~106s) 저장할 수가 있다.

#### 2.3 IBM 외

Gyricon Media와 E Ink 외에도 IBM(electronic ink), Sony(electro deposition device), 및 N-Tera (electrochromic technology) 등에서도 다양한 기술을 접목한 전자종이를 개발하고 있다.

위에서 언급된 여러 가지의 전자종이 구현기술 중에서 현재까지 가장 뛰어난 기술로 평가되고 있는 기술은 particle-based 기술이다. Particle-based 기술은 E Ink사에서 사용하고 있는 microencapsulated electrophoretic 기술과 Gyricon 디스플레이에 사용되는 rotating ball 기술로 분류되는데, Particle-based 기술을 이용한 전자종이의 개발은 1970년대 Gyricon Display에서 사용하는 bichromal ball을 바탕으로 시작되었다. Particle-based 디스플레이는 일반 액정 디스플레이와 비교해 광학적으로나 전기적으로 우수한 특성을 가지는데 이는 액정에 비해 particle들에 의한 산란 효과가 훨씬 강하기 때문이다. 또한 particle-based 디스플레이는 별도의 편광판이 필요 없기 때문에 높은 반사율을 얻을 수 있다.[3]

이런 특성에도 불구하고 micro-particle을 이용한 디스플레이는 몇 가지의 문제점을 안고 있다. 우선 bichromal ball을 이용한 시스템의 경우, 제조 자체가 힘들뿐만 아니라 수직인 각도 근처에서 dipole force가 저하되기 때문에 완전한 회전을 얻어내기 힘들다. Bichromal ball이 완전히 회전하지 않을 경우 대비는 결국 감소하게 된다. 또한 electrophoretic 시스템의 경우에도 콜로이드 불안정성 때문에 시스템의 수명이 감소하게 되는 문제점을 가진다. 이러한 문제점들 이외에도 두 가지 경우 모두 소자 제작 방법이 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. E Ink에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 쉽게 인쇄가 가능한 bistable electrophoretic ink를 개발하였는데, 우선 직경이 30~300 $\mu$ m인 microcapsule속에 electrophoretic material을 넣어 electrophoretic ink를 합성했다. 그림 7a는 microcapsule 시스템에서 서로 다른 색과 전하를 가진 입자들의 구성을 대략적으로 보여주고 있다. 각각의 입자들은 외부에서 가해진 전기장에 의해 상하로 이동하게 되어 흑색 혹은 회색을 나타내게 된다. 그림 7b는 전기장을 반대 방향으로 걸어 주었을 때 microcapsule의 cross-sectional 현미경 사진을 보여주고 있다.

Microencapsulation 기술을 이용한 electronic ink의 개발은 기존에 electrophoretic 디스플레이가 가지고 있던 문제점을 해결함과 동시에 플렉서블하고 인쇄가 가능한 시스템 개발을 가능하게 해주었다. 기존의 electrophoretic 디스플레이는 particle clustering, agglomeration, lateral migration에 의해 수명이 있어서 한계를 가지고 있었다. 하지만 particle들이 microcapsule 속에 들어있을 경우 capsule 밖으로 나올 수 없게 되기 때문에 이런 문제점들은 자연스럽게 해결된다. 보고된 바에 따르면 10<sup>7</sup>이상의 switching cycle 후에도 디스플레이 성능의 저하가 발견되지 않았다.

Microencapsulation 기술을 이용한 electronic ink의 또 다른 장점은 굴곡이 있는 표면에도 인쇄가 가능하다는 사실이다. 또한 인쇄된 ink 역시 플렉서블한 특성을 가지게 되어 기관으로 플렉서블한 플라스틱 필름을 사용해도 성능에는 큰 변화가 없다. E Ink사에서는 이미 Lucent Technologies의 유기 박막 트랜지스터 기술을 접목하여 전자종이를 개발한 바 있다. 유기 박막 트랜지스터 기술을

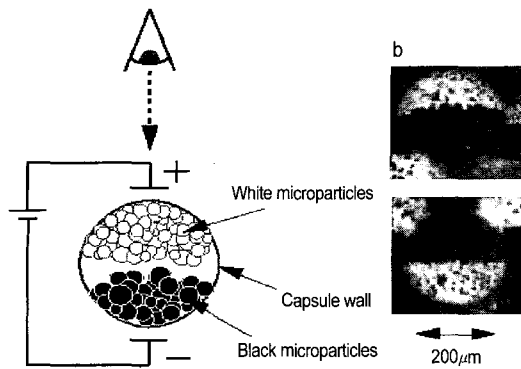


그림 7. a) Electrophoretic 마이크로캡슐, b) 캡슐의 현미경 사진

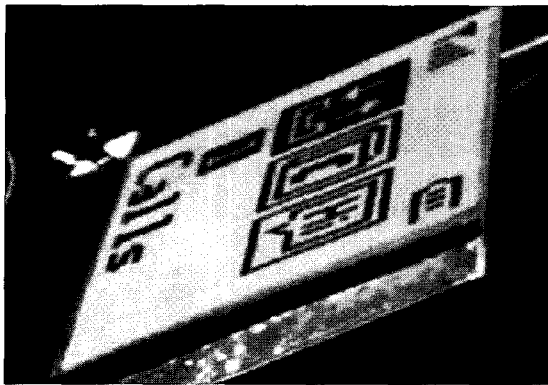


그림 8. 플렉서블한 기판 위에 제작된 비정질 실리콘 기판의 전자종이 프로토타입.

이용할 경우 저온 공정이 가능하고 전극은 micro-contact stamping 을 이용한 soft lithography로 패터닝할 수 있어서 저가격의 플렉서블한 backplane 제작이 용이해 진다. 최근에는 250 $\mu$ m 두께의 steel foil 기판 위에 비정질의 박막 트랜지스터 array를 제작, prototype을 선보였다(그림 8). 제작된 prototype은 40dpi의 해상도와 52 $\times$ 64의 픽셀로 이루어 졌으며 크기는 1.3"  $\times$  1.6" 이다. Steel foil과 같은 플렉서블 필름을 기판으로 사용할 경우 roll-to-roll 공정을 적용할 수 있어 저가격의 제품을 양산하는데 있어서 그 잠재력은 크다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

Particle-based 기술을 이용한 전자종이의 개발은 현재 다른 기술 보다 비교적 많이 진보된 상태이지만 전자종이가 상용화되기 위해서는 아직까지도 극복해야 할 점이 많다. 특히 전자종이는 디스플레이 소자 외에도 원거리 통신용 유닛, 드라이버, 메모리 등이

통합된 형태를 요구하기 때문에 다른 장치들의 개발 역시 뒤따라야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] T. Pham, N. Sheridan, and R. Sprague, "Electro-optical characteristics of the gyricon display", SID 02 Digest, p. 119, 2002.
- [2] Karl Amundson, Jay Ewing, Pter Kazlas, Ray McCarthy, J.D. Albert, Robert Zehner, and Paul Drzaic, "Flexible, active matrix display constructed using a microencapsulated electrophoretic material and an organic-semiconductor-based backplane", SID 01 Digest, p. 160, 2001.
- [3] Barrett Comiskey, J. D. Albert, Hidekazu Yoshizawa, and Joseph Jacobson, "An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays", Nature, Vol. 394, p. 253, 1998.

### 저 자 약 력

성 명 : 한정인

❖ 학 력

- 1983년 연세대 금속공학과 학사
- 1985년 KAIST 재료공학과 석사
- 1989년 KAIST 재료공학과 박사

❖ 경 력

- 1989년 - 1992년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
- 1992년 3월 - 현재 전자부품연구원 디스플레이연구센터 센터장

성 명 : 김영훈

❖ 학 력

- 1999년 서울대 재료공학과 학사
- 2001년 서울대 대학원 재료공학과 석사

❖ 경 력

- 2001년 - 현재 전자부품연구원 디스플레이연구센터 연구원