

전자페이퍼의 개발동향

김보성 · 이용욱 · 류민성 · 최태영 · 홍문표 · 정규하

1. 서론

미래에는 디지털네트워크를 통하여 대규모의 다양한 정보를 시간과 환경에 관계없이 언제 어디서든 이용할 수 있는 유비쿼터스 (Ubiquitous) 시대로의 변화를 예상한다.¹ 전자 디스플레이의 모바일 영역에서 기술 Mega-trend는 표시품질의 고성능화와 함께 personalization과 connectivity의 가속화 및 편리함을 추구하는 방향으로 발전하고 있다. 특히 최근 개발되고 있는 전자페이퍼는 종이를 대체할 수 있는 전자디스플레이를 말하며 “페이퍼-

라이크 디스플레이 (paper-like display)”라고도 하는데, 종이 또는 인쇄물 수준의 해상도와 시인성을 가짐으로써 장시간 문장을 읽거나 긴 메일을 읽어도 불편함을 느끼지 않는 신문이나 텍스트의 느낌을 가진 전자디스플레이이다. 전자페이퍼가 보급되어 네트워크를 이용해 무선으로 텍스트를 보여지게 되면, 매일 신문을 살 필요가 없어질 것으로 많은 전문가들은 기대한다.

최근에 이러한 흐름에 부합하는 e-Book, 전자신문 등과 같은 새로운 상품이 구체화되고 있으며, 전자치판과 같은 교육/업무용 및 CAD/CAM 화면

김보성	이용욱	류민성
1990 부산대학교 화학과 (학사)	1995 서울대학교 섬유고분자공학과 (학사)	1998 중앙대학교 화학과 (학사)
1992 한국과학기술원 화학과 (석사)		2000 연세대학교 화학과 (석사)
2000 서울대학교 화학과 (박사)	1997 서울대학교 섬유고분자공학과 (석사)	2000~ 삼성전자 TN총괄 광사업부
2000~ 삼성전자 AMLCD사업부		2002 광학접착제 개발
현재 차세대 Display팀 책임연구원	2001 서울대학교 재료공학부 (박사)	2003~ 삼성전자 AMLCD사업부
	2001~ 삼성전자 AMLCD 사업부	현재 차세대 Display팀 선임연구원
	현재 차세대 Display팀 책임연구원	

최태영	홍문표	정규하
2001 고려대학교 물리학과 (학사)	1987 한양대학교 원자핵공학과 (학사)	1974 서울대학교 섬유공학과 (학사)
2003 고려대학교 물리학과 (석사)		1980 Massachusetts Institute of Technology 재료공학과 (석사)
2003~ 삼성전자 AMLCD 사업부	1989 한양대학교 원자핵공학과 (석사)	1985 Massachusetts Institute of Technology 재료공학과 (박사)
현재 차세대 Display팀 연구원	1995 Univ. of Wisconsin - Madison Engineering Physics, Ph.D	2000~ 삼성전자 AMLCD사업부
	1995~ 삼성전자 AMLCD 사업부	현재 차세대Display팀 상무
	현재 차세대 Display팀 수석연구원	

Technology Trends of Electronic Papers (e-Papers)

삼성전자 AMLCD 사업부 차세대 Display팀 (Bo Sung Kim, Yong Uk Lee, Min Seong Ryu, Tae-Young Choi, Munpyo Hong, and Kyuha Chung, Flat Panel Display R & D Team, AMLCD Division, Samsung Electronics Co., Ltd., San#24 Nongseo-Ri, Giheung-Eup, Yongin-City, Gyeonggi-Do 449-711, Korea)
e-mail: bskim86@samsung.com

등 장시간 작업하는 산업용 디스플레이, 네트워크 식 매장 전광판, 광고판, 홍보물 등으로 활용이 가능하여 향후 차세대 디스플레이 사업의 큰 축을 이룰 것이다. 이러한 전자페이퍼는 flat panel display (FPD)의 차원을 한단계 넘어서는 다음세대 기술로 평가되며 이에 적합한 디스플레이 모드와 구동 모드에 대한 연구개발이 급격히 이루어지고 있다.

2. 전자페이퍼의 정의와 필요성

최근 PC나 인터넷의 폭발적인 보급으로 디지털 정보량이 증가하고 있다. 이러한 증가에 따라 정보가 전자적으로 처리되게 되어 아날로그 정보매체의 하나인 종이 사용량도 줄어들 것으로 생각되었다. 실제로 모 출판사 사장은 취미나 미술품으로서의 책을 제외하고 2030년에는 종이책이 없어질 것이라고 예측했다. 이것은 책의 경우지만 사무실이나 가정에서도 마찬가지로 정보의 디지털화가 진행되면서 '페이퍼리스 환경'이 올 것이라는 견해가 한때 강해졌다. 그러나 현재 종이 사용량이 줄어들기는 커녕 오히려 증가하는 경향이 보고되고 있다. 주요 요인으로는 인터넷이나 전자메일을 비롯해 다양한 디지털 정보를 디스플레이로 보는 것이 아니라 종이에 출력해 보기 때문이다. PC용 모니터를 비롯해 PDA나 휴대전화 디스플레이로는 장시간 문장을 읽거나 긴 메일을 읽기에 적합하지 않다. 즉 디지털 정보의 장점을 인식하면서도 전자 디스플레이에 대한 불편함을 느끼고 있는 것이다.²

그러한 가운데 주목 받게 된 것이 전자페이퍼/페이퍼-라이크 디스플레이라고 하는 것이다. 이 디바이스는 전자 디스플레이면서 종지와 같은 특성을 겸비한 디지털 페이퍼이다. 즉 디지털 페이퍼란 종이의 편리성과 전자 디스플레이의 장점을 모두 가진 표시 디바이스라고 할 수 있다. 그러면 종이의 편리성이란 어떤 것일까? 무엇보다 문자를 읽고 쓰기 쉽고, 가벼우면서도 휴대하기 쉽다. 얇고 구부리거나 접어서 부피를 줄일 수 있어 편리하다. 마지막으로 가격이 매우 싸다는 것이다. 따라서 전자 디스플레이에 요구되는 것은 첫째, 종이나 인쇄물 수준만큼 보기 쉽고, 삭제와 기록이 쉽고, 전압을 꺼도 표시한 상태로 존재하는 페이퍼-라이크 표시 소자이고, 둘째, 가볍고, 얇고, 접거나 구부릴 수 있지만 튼튼하여 휴대성이 용이해야 하고, 셋째,

인치 당 1달러 이하로 가격이 저렴하여 구입에 큰 부담이 없어야 한다. 기존의 평판 디스플레이의 시장에서 경쟁하기 위해서는 부가적으로 풀컬러 표시가 가능하고, 빠른 응답속도로 동영상 표시할 수 있는 기능을 가지면 디스플레이 응용범위가 훨씬 넓어질 것이다.

실용화에 대한 가속도가 높아진 전자페이퍼는 정보표시 형태로서 차세대 기술의 상층 중 하나다. 현재는 다양한 방식의 새로운 테크놀로지에 의한 표시체가 전자페이퍼라 불리고 있지만, 기본적으로는 'Rewritable'하고 또 '메모리성을 지니며', '반사형'인 paper like한 특징을 구비한 디스플레이 디바이스가 이렇게 불리고 있다.

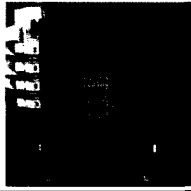
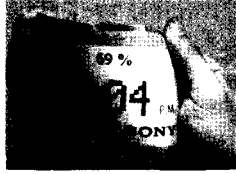
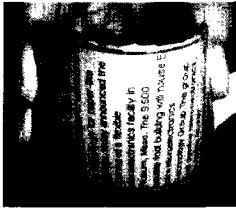
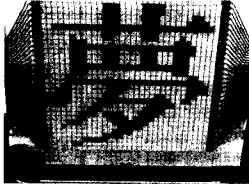
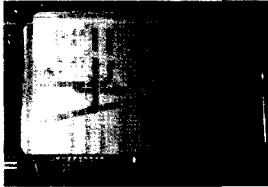

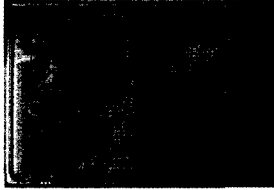
3. 전자페이퍼의 개발 현황

전자페이퍼, 즉 페이퍼-라이크 디스플레이의 표시물질은 의미 그대로 종이 위에 표시된 정보와 같은 수준으로 만족시키기 위해 표시모드 부문에 대한 다양한 연구개발이 이루어지고 있다. 대표적으로 cholesteric, ferroelectric, 고분자 분산형 액정 (PDLC) 표시방식과 electrochromic, electrophoretic, electrodeposition, organic EL 방식 등의 표시소자가 그것이다. 불휘발성, 저소비전력을 만족하는 표시소자 후보로는 出光興産 등에서 개발되고 있는 강유전성 액정,³ Kent Displays나 미놀타에서 개발한 콜레스테릭 액정,⁴ 고분자 분산형 액정 등의 액정표시와 산화/환원반응에 따른 화학물질의 색 변화를 이용하는 electrochromic 방식, 전장을 이용하여 안료의 집합상태를 변화시켜 contrast 차이를 표시원리로 하는 electrophoretic 방식,⁵ Sony에서 개발한 전기화학반응을 통한 Ag의 용해와 석출을 이용하는 electrodeposition 방식과⁶ 마찰대전형 toner 방식의 표시소자가 있다. Electrochromic 방식의⁷ 표시매체인 Nanomat은 광 콘트라스트가 우수하고 소비전력량이 적으며 스위칭 속도가 빠르고 녹색, 청색, 보라색, 검정색을 낼 수 있다. 전기 영동 (泳動)표시 방식으로는 Xerox의 twisting ball 표시매체나 e-Ink사의 microcapsule 방식과⁵ 캐논의 In-Plane형 electrophoretic 방식 등이 있다. 전자페이퍼 구현을 위해 현재까지 각 디스플레이 관련 회사별로 발표한 전자페이퍼의 proto-type을 표 1에 정리하였다.

전자페이퍼의 구현은 액정과 같은 기존의 디스플레이 기술을 토대로 한 전자 디스플레이의 종이

화 기술과 종이 질감을 가진 새로운 기술을 토대로 한 종이의 디스플레이화 기술로 크게 분류된다. 전

표 1. 최근 Display Mode별 전자페이퍼 발표 내용

Display Mode	Display 종류		개발내용
Cholesteric (Philips)		4.5" Flexible LC Display	해상도 : 64×64 16 gray level curved at 4.5cm radius
Electro-deposition (Sony)		4" Reflective Display	해상도 : 160×120 (100 ppi) Reflectance: 73% Contrast 20:1 응답속도 : 100 msec
Electrophoretic (e-Ink)		3" a-Si TFT e-Ink	해상도 : 160×240 (96 ppi) White reflectance : 43% Contrast 8.5:1 75um Steel-foil Substrate
Toner Display (Sony)			반사율 : 40% Contrast 20:1
Interferometric (Iridigm)		3" Reflective iMoD	해상도 : 240×160 (100 dpi) Pixel : 257×257 um Contrast > 10:1
Twistig Ball (Gyricon/Plastic Logic)		2" Reflective	All Printing Organic TFT
Electrophoretic (Samsung/e-Ink)		5.7" hVGA a-Si TFT e-Ink	해상도 : 320 X 480 White reflectance : 41% Contrast 11.5:1

자페이퍼는 다양한 종류가 있으나, 액정과 같은 표시소자로는 종이 질감의 전자페이퍼를 구현하기에 현재로서는 한계가 있다.

트위스트 볼 형태의 디스플레이는 1975년 미국의 Xerox Palo Alto Research Center(PARC)의 Sheridon 박사에 의해 개발되었으며, **그림 1**과 같이 투명한 두 개의 플라스틱 시트 사이에 오일과 함께 반은 백색, 나머지 반은 흑색이 칠해져 있는 수백만 개의 작은 볼로 구성되어 있다. 작은 볼의 백색과 흑색으로 칠해져 있는 영역에 반대의 전하를 띠게 하여 외부에서 가하는 전기장의 극성에 의해서 볼이 회전하여 흑/백의 이미지가 표시된다. 또한 이들 볼들과 오일은 비중이 거의 같아서 인가전압에 의해서 볼이 회전한 후 한번 위치가 정해지면 인가전압을 제거한 이후에도 수일 이상 이미지가 유지된다. 2000년 Xerox사에서 분리, 설립된 Gyricon Media Inc.에서는 트위스트 볼 형태의 디스플레이를 주도적으로 연구, 개발하고 있다.

한편 최근 전자페이퍼의 디스플레이 모드로서 마이크로캡슐형 전기영동방식의 e-Ink 디스플레이가 개발되었는데 해상도와 시인성 측면에서 종이와 비슷한 표시품질에 주목 받고 있다. 구동원리는 **그림 2**에 설명하는 바와 같이 기판 위에 코팅된 투명 마이크로캡슐 내부에 대전한 백색 (마이너스)과 흑

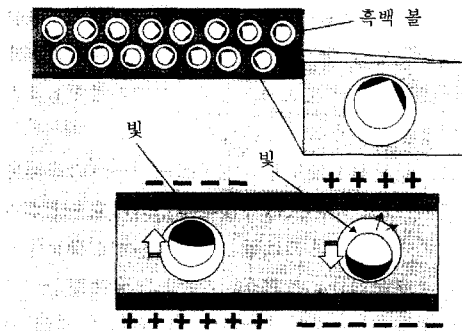


그림 1. Twist ball display (Gyricon)의 구동원리.

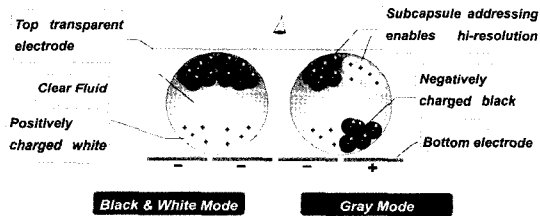


그림 2. Electrophoretic display (e-Ink)의 구동원리.

색 (플러스) 입자가 여러 개 존재하고 전압을 가하여 백색 입자가 위로 끌어당겨져 위에서 보면 하얗게 보인다. 한편 반대 전압을 통해 흑색 입자가 위로 끌어당겨져 검게 보인다.

백색 입자에는 TiO, 흑색 입자에는 카본블랙을 사용했고 두 재료는 종이를 하얗게 하는 재료와 잉크를 검게 하는 재료다. 또 메모리성이 있으므로 저소비전력화를 실현할 수 있다. 현재의 응답 속도는 150 msec로, 현단계에서는 동영상 대응으로 기술 개선의 여지가 남는다.

당사에서는 페이퍼-라이크 디스플레이의 초기단계로 **그림 3**과 같이 5.7" monochrome의 electrophoretic display를 개발하였다. a-Si:H TFT가 적층된 glass 위에 e-Ink 사의 electrophoretic flim을 lamination하여 제작되었고, 해상도 320×480, pixel size 250 um×250 um의 panel 사양으로 반사율 41.3%, contrast ratio 11.5 : 1의 특성을 확보하였다. **그림 3**은 e-Ink를 이용한 e-Book display의 개발 sample사진이다. 향후 plastic substrate 위에 저온 a-Si:H TFT 또는 organic TFT를 적용한 e-Book을 개발할 예정이다.

Philips는 e-Ink와 공동으로 2003년 5월에 열린 정보디스플레이학회 EXPO에서 내년 상품화를 목표로 **그림 4**와 같이 e-Book prototype을 제작하여 발표하였다.⁸

그러나 재료 및 set 메이커의 기술적인 문제가 해결된다 하더라도 소프트 웨어, 인프라 장비, 사업비

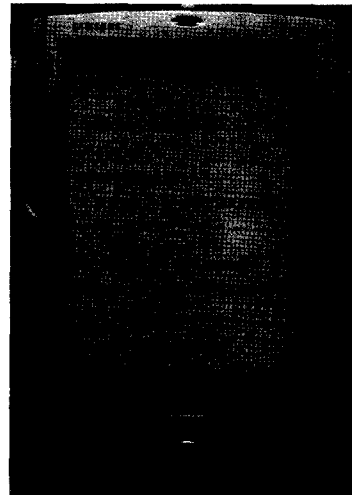


그림 3. 삼성전자의 5.7" e-Book용 electrophoretic display Prototype.



그림 4. Philips의 e-Book용 electrophoretic display prototype.

용문제, application 선정 문제 등에서 공동으로 해결해야 할 기업과의 제휴가 조속한 전자페이퍼의 상품화에 대한 중요한 열쇠이다.

4. 전자페이퍼 구동소자에 대한 기술개발

전자페이퍼의 해상도, 표시품위의 성능, 종이와 같은 유연성, 대형화, 저가격화 등의 다양한 요구사항을 만족하기 위해서는 표시소자를 구동하기 위한 우수한 back plane의 개발이 매우 중요하다. 예를 들어 electrophoretic, twisting ball, interferometric 등의 표시소자에 active addressing을 하기 위해서 각 화소마다 TFT와 같은 스위칭 소자를 설치해 액티브 매트릭스 구동을 실시해야 하는데, 기존의 LCD, 유기 EL 등의 평판 디스플레이를 포함한 대부분의 active matrix형 전자페이퍼의 back pane은 비정질 실리콘 또는 다결정 실리콘 TFT array를 사용한다. 실리콘 TFT는 디스플레이의 active 구동소자로서 가장 널리 사용되고 있으며, 전자페이퍼의 back plane으로 적용하는 경우, rigid한 e-Book 등의 전자페이퍼의 상품군에서 LCD 등과 경합관계 또는 틈새 영역에서 소규모의 시장을 형성할 것으로 보고 있다.

그러나 한정된 단말기 사이즈에서는 실현할 수 없었던 부가기능을 디스플레이를 플렉시블하게 함으로써 지금까지 존재하지 않았던 breakthrough를 창출할 수 있는 killer application을 확보하면 LCD 등 기존 평판 디스플레이와 직접 경합하지 않는 상품군을 창출할 수 있다. 이러한 노력은 플렉시블한 대형기판에 저온에서 TFT 공정을 이용하여 값싼 구동소자를 만들기 위한 기술이 최근에 급격히 진

행되고 있다. 이와 같이 substrate가 flexible 할지라도 무기물인 Si 및 Si계 절연막을 이용한 TFT array는 실제 구부리기가 매우 어렵고 유기물인 plastic 기판상에서 공정을 진행할 때 열팽창계수의 차이에 따른 변형문제로부터 완전히 자유롭기가 어려워 진정한 flexible display를 구현하기 위해서는 부드러운 유기 반도체를 사용하는 organic TFT에 주목하기 시작했다. Plastic sheet 위에 공정온도 150 °C 이하의 a-Si TFT array 시제품 등이 개발되고 있으나, PET나 PES 등과 같은 plastic 기판과 Si계열 막들 사이의 열팽창계수 차이 등 여러가지 문제점 발생하여 궁극적으로는 TFT 및 배선 재료 전부가 유기물질로 대체될 전망이다. 현재 유기반도체는 pentacene, oligothiophene, perylene, phthalocyanine 유도체 등의 저분자 유기반도체와 polythiophene, polythienylenevinylene (PTV) 등의 고분자 유기반도체 등의 많은 새로운 재료가 개발되고 있으며,⁹ 이동도는 일반적으로 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 수준이며 on/off current 비는 $10^3 \sim 10^5$ 정도로 보고되고 있지만 최근에는 a-Si TFT 수준 또는 그 이상의 TFT 특성을 가지는 저분자 및 고분자 유기반도체 소자기술이 확보되고 있다.¹⁰ 여기서 고분자계 재료는 저분자계 재료만큼 캐리어 이동도는 높지 않지만 양산성을 높이기 쉽지 않을까 기대되고 있다. 고분자계의 유기 반도체 재료는 저분자계에 비해 고농도의 용액을 만들기 쉽기 때문이다.

Organic transistor 개발은 고분자 반도체의 발전과 함께 소프트 리소그래피라는 방법과 잉크젯 프린팅 기술을 응용하는 방법으로 TFT를 제작에 대한 연구가 진행되고 있다. 소프트 리소그래피는 Lucent사의 Bell Laboratories나 미 Massachusetts Institute of Technology 등이 개발중인 기술이다. 미세한 패턴을 새겨 넣은 웨이퍼의 불록부분에 유기 재료를 부착시키고 이것을 플라스틱 기판에 도장을 찍듯 인쇄한다. 이미 Lucent사는 이 방법으로 채널 길이 1 μm의 유기 트랜지스터를 시험 제작했다. 잉크젯 프린터 기술을 응용하는 방법에서는 채널 길이 5 μm의 유기 트랜지스터가 등장했다. 이 기술은 용매에 녹인 도전성 고분자 재료를 잉크젯 프린터의 헤드 원리를 이용해 분사하고, 미세 영역에 소스나 드레인, 게이트라는 전극을 형성하는 것. 단 「번지는 현상」이 생기는 소스 전극과 드레인 전극이 단락될 가능성이 높아진다. 그래서 세이코엡손과 영국 Cambridge 대학은 두 전극 사

이에 채널 길이의 폭을 가진 폴리이미드계 분리용 패턴을 만들었다. 폴리이미드는 도전성 고분자의 용액을 칠하므로 채널 부분에는 부착되지 않고 전극의 단락을 막는다. 이후 Cambridge 대학의 Cavendish Lab에서 spin-out된 벤처 기업인 Plastic Logic은 P3HT나 F8T2라는 폴리티오펜계 재료를 채용한 고분자계 유기 트랜지스터를 시험제작하고 있다. 캐리어 이동도는 크게 해도 $0.02 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 펜타센에 비해 분명히 뒤떨어진다. 그러나 높은 동작주파수는 요구하지 않지만 대량으로 저렴하게 TFT를 제조하고자 하는 저가격 디스플레이 용도를 중심으로 응용범위는 넓다고 한다. Plastic Logic은 **그림 5와 6**에서와 같이 inkjet printing 기술을 이용해 채널길이 $5 \mu\text{m}$ 의 유기트랜지스터 back plane을 제작하였고, 그위에 PDLC 또는 Gyricon Media의 트위스트볼 필름을 적층하여 플라스틱 active matrix display를 시험 제작하였다.¹¹

잉크젯 분사기술을 응용해 PEDOT 라는 고분자 재료를 뽑아 부착시켜, 게이트전극과 소스전극, 드레인전극을 형성하였다. 소스전극과 드레인전극 사이에 PEDOT가 잘 붙지 않는 폴리이미드로 형성한 패턴을 설치한다. 이것으로 소스전극과 드레인전극이 끊기지 않도록 한다. 유기반도체에는 F8T2를 이용하였다. TFT array의 이동도는 $0.02 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, On 전류는 $4.5 \times 10^{-7} \text{ A}$, on-off 비율은 1,000 수

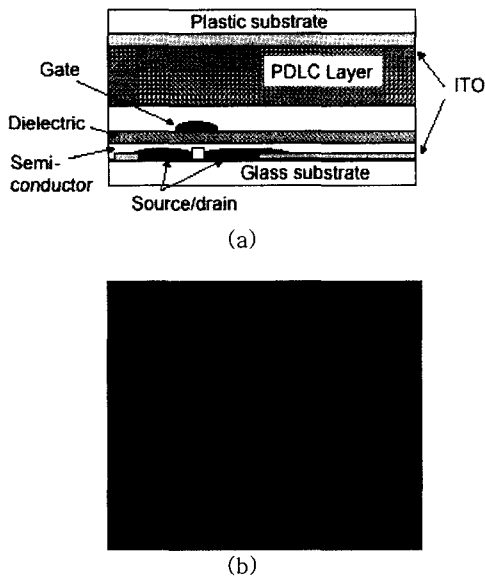


그림 5. Active matrix PDLC display. (a) Pixel의 단면그림, (b) 4Hz 구동그림.



그림 6. Plastic logic의 printed polymer TFT e-Paper prototype.

준이다.

이러한 기술은 향후 생산기술 측면에서는 대규모 투자가 불필요한 roll-to-roll 공정을 실현하여 저가의 대량양산을 목표로 한다.

5. 결론

종이의 장점과 디스플레이의 장점을 동시에 실현할 수 있는 차세대 디스플레이로서 전자페이퍼에 대한 연구와 다양한 proto-type sample의 개발이 진행되고, 소재, 부품, 장비 업체가 공동으로 device의 상품화를 위해 적극적으로 나서고 있다. 그러나 전자페이퍼가 단순히 표시품위 뿐만 아니라 박형 및 굴곡성, 휴대성, 정보입출력 및 처리, 정보보관방법, 부가기능 등 기타 영역에서 종이와 가진 편리성을 모두 달성하는 것은 매우 커다란 기술과 제라고 할 수 있다. 소프트웨어나 상품화 시스템, 및 인프라 구축 등도 해결되어야 할 과제이다. 이러한 문제점은 기술적인 과제와는 달리 한 메이커의 힘으로는 어떻게 할 수 없는 부분이다. 즉 소프트웨어나 메이커나 기타 다양한 기업과의 제휴가 디지털 페이퍼 보급의 성패에 커다란 열쇠가 된다고 할 수 있다. 전자페이퍼가 LCD 등의 기존 평판 디스플레이와 경쟁을 하기 위해서나 또는 새로운 시장 즉 e-Book, 전자신문, 사무실용 페이퍼 등의 다양한 application에서 시장을 창출하기 위해서는 종이보다 편리하다는 것을 강조함과 동시에, 이 새로운 매체를 사용하여 시스템 전체적으로 편리성을 제공 가능하다는 것을 부각시키는 것이 향후 시장 개척의 주요 이슈일 것이다.

참고문헌

1. Overviews, *12th FPD Manufacturing Technology Expo & Conference*, 2002.
2. *Semiconductor FPD World*, 30~40, August (2002).
3. J. L. West, The challenge of new application to liquid crystal displays in Liquid Crystal in complex Geometry, p. 255-264 (1996).
4. K. Okoshi, K. Yuasa, F. Moriwaki, and T. Kofuji, *SID 98 Digest*, 1135-1138 (1998).
5. G. Duthaler, K. Suzuki, and T. Nakamura, *SID 02 Digest*, 1374-1377 (2002).
6. K. Shinozaki, *SID 02 Digest*, 39-41 (2002).
7. A. Hagfeldt et al., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Engn.*, 2531, 60 (1995).
8. A. Henzen et al., *SID 03 Digest*, 176-179 (2003).
9. C. E. Dimitrakopoulos and D. J. Mascaro, *IBM J. Res. & Dev.*, **45**, 11 (2001).
10. H. E. A. Huitema et al, *Nature*, 599-600 (2001).
11. H. Sirringhaus et al., *SID 03 Digest*, 1084-1087 (2003).