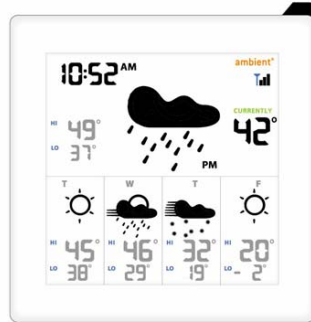


1. Introduction to Electronic Paper

우리가 사용하고 있는 종이는 식물성 섬유(cellulose pulp)를 원료로 하여 만든 얇은 물건으로 글 또는 그림을 쓰거나 인쇄하는데 사용된다. 종이는 얇으면서 가볍고, 유연하면서 쉽게 찢어지지 않으며, 태양빛 아래서도 읽을 수 있다. 이러한 종이의 특성을 전자제품에 부여하고자 시도한 것이 전자종이이다. 현재까지 전자종이의 정의(Definition)는 구체적으로 정해지지 않았다.

거의 한세기 동안 우리의 안방에서 자리잡고 있던 CRT(Cathode Ray Tube)는 빠른 속도로 평판형 디스플레이(flat panel display)로 교체되고 있다. 통신기술의 개발과 더불어 빠르게 증가한 휴대용 전자기기(portable electronics)의 작은 평판형 디스플레이는 통신과 사용자와의 매개체로서의 역할을 잘 해주고 있다. 특히, 해상도, 생산단가, 색상범위, 시야각, 소비전력 등의 문제점들이 많이 개선된 액정방식의 디스플레이가 주류를 이루고 있다.

현재 평판형 디스플레이는 액정디스플레이(LCD)와 플라즈마를 이용한 디스플레이(PDP)로 크게 나눌 수 있다. 두 방식 모두 빛을 투과시키는 방식(emissive type)으로 LCD는 백라이트(backlight)가 필요하고, PDP는 플라즈마 소스가 필요하다. 이러한 발광체로 인해서 소비전력이 높아진다. 백라이트를 없애 소비전력을 줄이고자 하는 시도로 쌍안정성(bistability)를 가진 새로운 반사형 디스플레이(reflective display)로 등장한 것이 E-Paper이다. 여기에서 쌍안정성이란 전압이 제거된 상태에서도 원래의 이미지를 장시간 동안 보존할 수 있는 특성을 말한다. 최종 화면을 장기간 유지할 수 있기 때문에 새로운 영상을 빠르게 바꿀 필요가 없는 곳에서는 긴 배터리의 수명을 가질 수 있다. 이러한 독특한 특성과 함께 전자종이가 추구하는 것은 유연성(flexibility)이다. 이 특성을 가지기 위해 LCD와 PDP에 사용되고 있는 유리기판을 훨씬 얇고 가벼운 플라스틱 소재로 대체하려고 하고 있다. 위의 두 가지 특성으로 인해 전자종이는 종이의 기능을 가질 수 있다 [1]. 또다른 주목할 만한 특성은 태양빛 아래에서도 선명하게 볼 수 있다는 장점(sunlight viewability)이다. LCD가 태양아래에서 선명도가 떨어지는 것에 반해 반사형 방식의 전자종이는 선명하기 때문에 기존의 LCD와 경쟁할 수 있는 중요한 요소이다. 주로 기업들에서 연구되어 발표된 전자종이의 예들은 많이 나타나 있지만, 그 중의 일부가 그림1에 나타나 있다. 그림 1(a)는 E-ink의 전기영동(Electrophoretic) 방식을 바탕으로 한 일기예보를 보여주고 있고, (b)는 Kent Display에서 콜레스테릭 액정(Cholesteric liquid crystal) 방식을 사용하여 플렉서블한 깃발을 구현하였고, (c)는 SiPix에서 신용카드 상단의 디스플레이를 이용하여 보안키나 현재 잔고를 알 수 알 수 있는 소자로 이용하려 하고 있으며, (d)는 Qualcomm의 광간섭 변조방식 iMOD 디스플레이이다. 최근에 Philips에서 분사된 polymer vision은 두루마리(Rollable) 방식의 전자종이를 선보였다(그림 1(e)). 전자종이의 상용화를 위해 각 방식에 맞는 장점을 살린 제품들이 기업들을 중심으로 선도되고 있다.



(a) E-Ink



(b) Kent Display



(c) SiPix



(d) Qualcomm



(e) Polymer Vision

그림 1. 다양한 E-Paper의 응용예.

전자종이가 구현하고 싶은 것은 다양한 시야조건(viewing condition)에서도 종이와 같이 작동할 수 있는 디스플레이의 구현에 있다 [1]. 하지만, 특이한 점은 LCD나 PDP와 같이 핵심되는 구동 메커니즘이 하나로 정해진 것이 아니다. 많은 연구자들이 전기영동(electrophoresis) [2], 액정(liquid crystal) [3], 유체(fluid) [4], MEMS [5]등 다양한 원리로 접근하고 있다. 현재까지의 개발상황에 대한 것이 표 1에 나타나 있는데, 비교한 주요 요소들은 인가전압(driving voltage), 명암비(contrast ratio), 응답시간(response time)과 반사도(reflectivity)이다.

가장 긴 시간동안 연구되어 것이 전기영동방식으로 색깔의 표시소자로 입자(particle)를 사용한다. 크게 4가지의 구동방법이 경쟁하고 있지만, 공통된 원리는 전압의 인가와 미인가시에 흑(black)과 백(white)의 디스플레이를 구현하는 것이다 [2]. 오일안에 분산된 전기적으로 하전된 입자들을 E-ink는 작은 캡슐 (Microcapsule)안에, SiPix는 Microcup안에, Xerox는 회전하는 공(twisting ball)안에 가둔다. 입자들이 존재하는 매개체(fluid medium)를 오일대신 공기(air)를 사용한 것이 Bridgestone이다. 이 구동방식의 장점은 대량생산이 가능하고 쌍안정성에 뛰어나지만, 응답속도가 크고 인가전압이 높다. 따라서, 동영상 구현할 수 있는 전자종이에 적용하기는 적합하지 못하다. 또한, 칼라를 구현하기 위해서는 칼라필터(color filter)가 필요하며, Gray-scale을 구현하는 것이 또한 어려운 숙제로 남아있다.

표 1. 다양한 방식의 전자종이 비교

Core Technology	Display type (Company)	Driving Voltage(V)	Contrast Ratio	Response Time(μs)	Reflectivity (%)
	Paper	-	15	-	70
Particle	Microcapsule (E-ink)	15~90	10	100	40
	Microcup (SiPix)	30	~10	200	40
	Gyricon (Xerox)	50~150	~8	80~100	20
	QR-LPD (Bridgestone)	100	~9	0.2	40
Liquid crystal	ChLCD (Kent Display)	40	20~30	30~100	40
	STN (ZBD)	5	5	20	<5
Fluid	Electrowetting (Philips)	20~30	15	<10	60
MEMS	iMoD (Qualcomm)	5	10	10	50

Kent State University에서 출발한 Kent Display는 콜레스테릭 액정디스플레이 (Cholesteric liquid crystal displays)의 선두주자이다 [3]. 콜레스테릭액정은 액정의 방향자가 회전축을 따라 꼬이게 되는데(twist), 이때 방향자가 360도 회전할 때까지의 거리를 피치(pitch)라고 정의한다. 주목할 만한 것은 이 피치에 따라 콜레스테릭 액정은 반사하는 빛의 파장대가 결정된다는 것이다. 전압이 인가될 때, planar state와 focal conic state로 이동되는데, planar state에서는 반사가 일어나고, focal conic state에서는 투과가 일어난다. 칼라를 구현하기 위해서 칼라필터는 필요하지 않지만, 빨강(red), 녹색(green), 파랑(blue)의 세 층을 차례로 쌓아 올려야 하기에 모듈의 두께가 두꺼워진다. 전기영동 방식과 같이 응답속도가 동영상의 구현에는 적합한 수준까지는 이르지 못하고 있다. 하지만, 군사용의 야간촬상장치 (night vision device)나 지도 등에 적용하기에 충분한 장점을 가지고 있다.

전기습윤(electrowetting)방식의 전자종이는 처음 Philips에서 시도되어 주목받았다 [4]. 전기장하에서 색깔있는 오일이 스위칭을 담당하여 동영상을 구현할 만큼 응답속도를 크게 향상시켰다. 표1에서 보듯이 낮은 인가전압과 종이에 가까운 높은 반사도를 보여주고 있다. 최근에는 LED(light emitting diodes)를 사용하여 자외선에 가까운 빛을 발광할 수 있는 형광체를 오일안에 넣어 빛을 내는 디스플레이도 등장하였다 [6,7].

생체모방기술(Biomimetics)을 바탕으로 Qualcomm의 iMOD 디스플레이는 나비의 날개 또는 공장의 깃털이 색깔을 구현하는 광간섭변조방식을 이용하고 있다 [5]. 날개와 깃털 안에 주지적인 미세구조로 인해 빛이 간섭하고 회절하여 특정파장만을 반사시키는 원리를 이용하는 것이다. MEMS(micro-electro-mechanical system) 방식에 의해 제작된 셀(cell)은 얇은 박막을 가지는 유리기판과 반사 멤브레인(reflective membrane)으로 구성되는데, 이 사이에 있는 공기의 간격(air gap)을 전압으로 조절함으로써 빛의 파장대를 선택하게 된다. 이 구동방식은 소비전력이나 응답속도 면에서 큰 장점을 가지고 있지만, 유리기판로 인한 유연성이 부족한 것이 단점이다.

전자종이에서 유체역학적인 문제들은 주로 스위칭 메커니즘(*switching mechanism*)과 제조공정에서 발생한다. 전기영동방식에서는 입자들이 인가된 전압하에서 셀공간(*cell gap*)을 얼마나 신속하게 움직일 수 있는냐와 입자간의 응집(*flocculation*)을 얼마나 방지할 수 있는가 하는 방법이 논의되고 있다. 전기습윤방식에서는 오일과 물 그리고 소수성막에 존재하는 *contact line*의 거동이 중요한 연구주제이다. 제조공정에서는 캡슐화(*encapsulation*)와 캡슐을 플렉서블한 물질(*flexible substrate*)에 코팅하는 공정이 중요하다. 이 부분에 대해서 앞으로 다루고자 한다.

참고문헌

- [1] Drzaic P (2006) Reflective displays: the guest for electronic paper. *Journal of the Society for Information Display*, Seminar M-8.
- [2] Comiskey B, Albert JD, Yoshizawa H, Jacobson J (1998) An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays. *Nature* 394:253-255.
- [3] Yang DK, Doane JW (1992) Cholesteric liquid crystal/polymer gel dispersion: Reflective display application. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 23:759-761.
- [4] Hayes RA, Feenstra BJ (2003) Video-speed electronic paper based on electrowetting. *Nature* 425:383-385.
- [5] Gally BJ (2004) Wide-Gamut Color Reflective Displays Using iMoDTM Interference Technology. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 35:654-657.
- [6] Heikenfeld J, Steckl AJ (2005a) High-transmission electrowetting light valves. *Applied Physics Letters* 86:151121.
- [7] Heikenfeld J, Steckl AJ (2005) Intense switchable fluorescence in light wave coupled electrowetting devices. *Applied Physics Letters* 86:011105.