

Thema | Particle 기반의 전기영동형 E-Paper

1. 서론

이남희 박사과정
(세종대 나노공학과/
나노 신소재 공학연구소)

김중희 석사과정
(세종대 나노공학과/
나노 신소재 공학연구소)

오효진 석사과정
(세종대 나노공학과/
나노 신소재 공학연구소)

홍완식 교수
(세종대 전자공학과)

안진호 교수
(한양대 재료공학부)

김선재 교수
(세종대 나노공학과/
나노 신소재 공학연구소)

전자와 정보산업의 급속한 발달로 인하여 음극선을 이용하여 빛을 방출시켜 이미지를 구현하는 지난 20세기 대표적인 디스플레이인 CRT(Cathod Ray Tube)는 우수한 시인성, 대조비 그리고 저렴한 제조비용 등의 장점을 가지고 있음에도 불구하고 음극선에서 발생된 전자빔이 형광면에 도달하기 위한 거리 즉 화면의 크기가 증가하면 비례적으로 브라운관 자체의 두께가 두꺼워지는 단점으로 경박단소화 되어가는 소비자들의 요구를 충족시키지 못해 빠르게 사양길로 접어들고 있으며, CRT를 대체하기 위해 개발된 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel), OLED(Organic Light Emitting Diode) 등은 휴대용 디스플레이가 가져야 될 기본적인 조건 즉, 높은 시인성 및 명암대조비, 정보 표시 및 소거의 용이성, 동영상 구현을 위한 빠른 응답 속도 등과 같은 조건들은 만족하는 반면, 간편한 휴대를 위한 박형 및 경량화, 소비전력 감소를 위한 표시 정보의 기억 능력 등과 같은 조건을 만족시키지 못하는 단점을 갖는다.

전자종이의 역사는 1975년 Xerox 연구소의 Nicholas Sheridan이 두개의 투명한 플라스틱 시트 사이에 오일과 함께 서로 상대되는 전하를 갖는 반은 백색, 반은 흑색이 칠해져 있는 지름이 약 100 μm 의 수많은 작은 볼에 전하를 인가하여 전기장의 극성에 의해 볼이 회전하여 흑/백의 이미지를 구현하는 방법으로 Xerox의 "X"를 표현하여 최초의 입자회전에 의한 Gyricon(회전하는 볼이라는 의미의 그리스어) 디스플레이 개발과 함께 시작되었다. 그 후 1976년 Hediki Shirakawa, Alan MecDiarmid, Alan Heegar가 전도성 플라스틱을 개발하여 보다 얇고 가벼우며, 종이처럼 구부릴 수 있어 휴대가 가능한 차세대 디스플레이 적용에 대한 가능성을 높이는 계기가 되었다. 이와 같은 휴대용 디스플레이로 최근 각광받고 있는 전자종이는 구동방식에 따라 전기영동형, 전기습윤형, 트위스트형, 정전 흡입형, 전기침투형 등으로 구분할 수 있으나 컬러구현, Gray Level(중간 계조) 구현, 동영상 구현 등의 향후 극복되어야 할 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 다양한 전자종이에 관한 개발현황은 국내외 몇몇 연구자에 의

해 이미 소개된 바 있으며, 전자종이를 이용한 각종 광고판, 전자책 등과 같은 시제품도 해외에서는 발표되어 상용화 되고 있는 실정이다. 따라서 본 고에서는 전자종이를 처음 접하는 분들을 위해 입자의 전기영동에 의한 디스플레이 방식의 장단점을 짚어 보고 현재의 기술현황 및 향후 전망에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 전기영동의 이론적 배경

전기영동형 디스플레이는 입자의 전기적 움직임 즉, 입자표면 전하의 제어가 가장 중요하다. 이러한 전기영동 현상에 대한 최초의 보고는 1807년 Reuss가 점토와 유리관으로 시행한 전기침투 현상에 대한 연구로부터 시작되었다. 그림1에서 보는 바와 같이 점토에 2개의 유리관을 각각 설치한 후 유리관 바닥에 모래를 얇게 펼친 다음 같은 높이의 물을 유리관에 채워 각 유리관 내부에 전기를 인가할 수 있는 전극봉 삽입 후 +와 -를 인가하게 되면 -극에서 전기침투 현상에 의해 물의 수위가 상승하게 되고, +극에서 전기영동에 의해 입자들이 의한 Brown 운동을 관찰하였다. 이후 19세기가 되면서 U자관을 이용한 가시콜로이드 전기영동의 연구가 활발히 진행되어 20세기를 초부터는 단백질의 연구를 중심으로 티세리우스의 전기영동장치가 널리 이용되게 되었다. 1971년에 티세리우스 방법의 대응으로서 Ware와 Foygare가 콜로이드입자의 전기영동 측정에 Laser-Doppler 유속계를 사용한 것이 광산란법의 시초이다. 용액에 분산되어 있는 입자는 그 표면극성기의 해리와 이온의 흡착에 의해 전기적으로 음 또는 양으로 대전하고 있다. 그 때문에 입자 주변에는 계면전하를 중화하기 위해 과잉으로 존재하는 반대부호를 가진 이온과 소량의 동부호를 가지는 이온이 확산적으로 분포하고 있어 그림2와 같이 전기이중층을 형성하고 있다. 이중층은 계면에서 수화이온반경과 거의 같은 곳에 존재하는 Stern Layer)에 의해 두개의 부분으로 나뉘어져 있으며, 그 면의 내부영역은 고정층, 외부영역은 이온확산층이라고 불린다. 또한 그 외측에는 양이온과 음이온이 균형을 이룬 용액이 대부분을 차지한다.

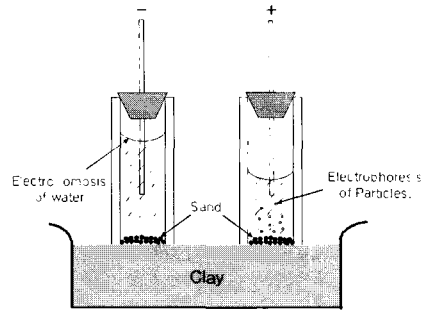


그림 1. The Reuss's discovery of the rise of the water level in the left tube (electro-osmotic flow) and the rise of particle in the right tube (electro-phoresis).

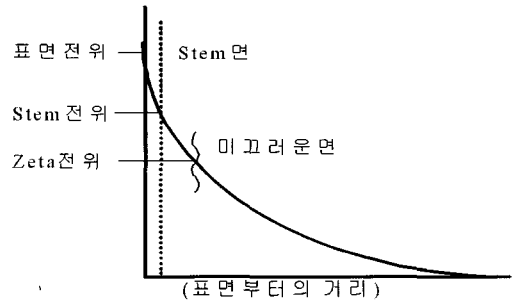
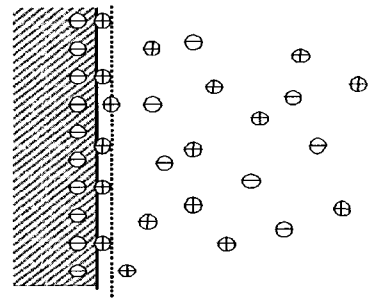


그림 2. Electrical double layer at solid-liquid interface.

그림3에서 보는 바와 같이 외부에서 전장을 걸면 콜로이드입자는 그 표면전위의 부호와 반대방향으로 영동(이동)하며, 이 영동속도 즉, 가전장의 세기와 유체역학적인 효과(용매의 점도, 유전율 등)를 고려하여 계산되는 것이 ζ -Potential이다. 통상, ζ -Potential은 고정층과 확산층의 경계면에 가까운 미

끄러운 면에서의 전위를 나타낸다. 일반적으로 콜로이드 입자 등의 표면전위는 그 자체의 측정이 어렵기 때문에 표면전위에 관한 정보로써 주로 전기영동 실험에 의해 구해진 ζ -Potential로 논의되는 케이스가 일반적이다. 그림4를 보면 미립자나 콜로이드 입자의 경우, 실험적으로 구하여진 ζ -Potential의 절대치가 증가하면 입자간의 반발력이 강해져 입자의 안정성은 높아진다. 역으로 ζ -Potential이 0에 가까워지면 입자는 응집하기 쉬워진다. 그러므로 ζ -Potential은 콜로이드 입자의 분산안정성의 지표로서 이용되고 있다. 따라서 입자를 이용한 전자종이와 같은 디스플레이의 분산안정성과 빠른 응답속도를 나타내기 위해서는 용액 내에 분포되어 있는 입자의 ζ -Potential의 제어가 필요하다.

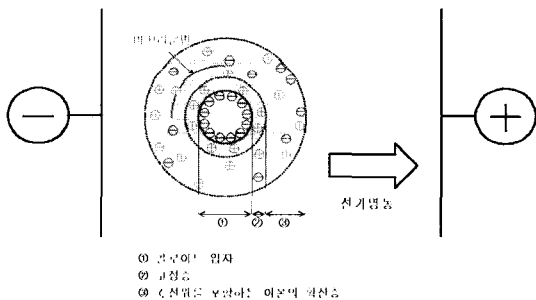


그림 3. The ion cloud and the slip plane.

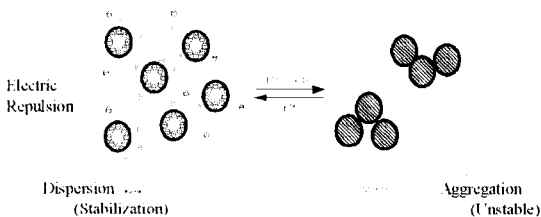


그림 4. The relationship between particle dispersion and aggregation by the charging of electrical charge.

2.1 ζ -Potential 측정 이론

대전된 콜로이드입자가 분산되어 있는 계에 외부로부터 전장을 걸면 입자는 전극을 향하여 영동하지만, 그 속도는 입자의 하전에 비례하기 때문에 그 입자의 영동속도를 측정함으로써 ζ -Potential을 구할 수 있다. 여기서 설명하는 전기영동산란측정법은 다른 이름으로 Laser-Doppler법으로 불리며, 『빛이나 음파가 움직이고 있는 물체에 부딪히거나 반사하거나 산란하면 빛이나 음파의 주파수가 물체의 속도에 비례하여 변화한다』고 하는 “Doppler 효과”를 이용하여 입자의 영동속도를 구하고 있다. 전기영동하고 있는 입자에 레이저 광을 조사하면 입자로부터의 산란광은 Doppler 효과에 의해 주파수가 Shift 한다. Shift량은 입자의 영동속도에 비례하므로 이 Shift량을 측정함으로써 입자의 영동속도를 알 수 있다.

일반적으로 입자의 영동속도는 느리기 때문에 그 Doppler-Shift량(~ 100 Hz)은 입사광의 주파수 (5×10^{12})에 비해 현저하게 작아진다. 이러한 작은 주파수의 차이를 검출하는 수법으로서, 그림5의 광학계와 같이 입사광의 일부(참조광)와 산란광을 혼합시키는 Heterodain법을 이용하고 있다. 이 수법에서는 영동입자의 Doppler-Shift하고 있는 산란광과 영동하고 있지 않는 입자에 상당하는 참조광을 동시에 관측하게 되며, 즉 다른 주파수의 광을 혼합했을 때에 간섭에 의해 발생하는 Bit를 산란광강도의 변화(흔들림)로서 측정한다. 그리고 광자상관계에 의해 산란강도의 자기상관함수로서 나타난다. 이 때 관측하는 입자는 Brown 운동을 하고 있기 때문에 이 자

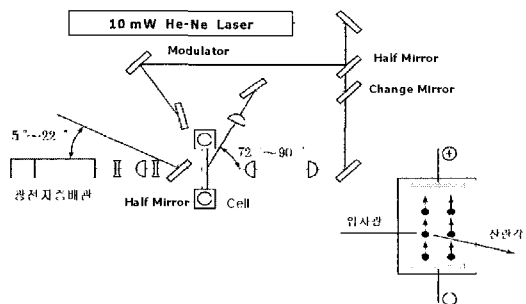


그림 5. The scheme of electro-phoretic measurement equipment.

기상관함수는 감쇄하는 코사인파가 되면 그 주파수가 Doppler-Shift량에 상당하고, 이 때, 주파수 성분을 분석할 수 있으며, 또한 영동속도의 분포를 구할 수 있다.

굴절률(n)의 용매에 분산시킨 시료에 파장(λ)의 Laser 광을 조사하고, 산란각(V)으로 검출할 때의 영동속도(θ)와 Doppler-Shift량(Δv)의 관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta v = \frac{Vn \sin(2/\theta)}{\lambda} \quad (1)$$

[n : 용매의 굴절률, θ : 검출각도]

여기서 얻어진 영동속도(V)와 전기장(E)에서 전기이동도(U)를 얻을 수 있다.

$$U = V / E \quad (2)$$

전기이동도(U)에서 ζ-Potential(ζ)은 Smoluchowski의 식과 Huckel의 식을 이용하여 대부분 구할 수 있다.

용매의 이온원자가와 이온농도로부터 구한 전기 이중층의 두께 $1/\kappa$ 과 입자반경 a가

-a > 1/κ (κa > 1) : 입자경에 비하여 전기이중층의 두께가 얇은 계(수계)이면 Smoluchowski의 식을,

-a < 1/κ (κa < 1) : 입자경에 비하여 전기이중층의 두께가 두꺼운 계(유기용매계)이면 Huckel의 식을 이용하여 ζ-Potential를 구할 수 있다.

2.2 전기영동에 의한 입자의 응답속도

앞에서 나타낸 식(2)의 전기이동도를 이용하여 일정한 공간 내에서의 입자의 이동 즉, 응답속도를 예측하기 위하여 다음과 같이 계산식을 이용할 수 있다.

마이크로캡슐 또는 마이크로 컵의 격벽 두께를 H라 하고, 캡슐 또는 격벽 내에서 걸리는 전기장 $E_w(E_w = v/H)$ 을, 흘러주는 전압을 v라 놓으면, 영동

속도 V는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V = UE_w = U_v/H$$

이 식을 기본으로 하여 응답속도(t)를 다음 식으로 유추할 수 있다.

$$t = H/V = D^2 / U_v$$

3. Particle Based Display

3.1 입자회전형 디스플레이

입자회전형 디스플레이는 서론에서 언급한 바와 같이 각기 다른 전하를 갖는 흑/백 물질을 약 100 μm의 크기를 갖는 수많은 작은 볼의 반구에 각각 코팅한 후 외부에서 가해지는 전기장의 극성 변화에 의해 흑/백의 이미지를 구현하는 방식이다. 입자회전 방식은 입자들에 인가된 전압에 의해 특정 축에 따라 회전함으로써 빛을 흡수, 산란 또는 반사하여 화상을 표시하게 된다. 입자회전형 디스플레이의 대표적인 Gyricon 볼의 전기적 움직임은 외부전장에서 가해진 정전기적 회전력에 의해 구현된다. 즉 볼의 쌍극자(Dipole) 모멘트를 P, 전장에 가해진 에너지를 E라고 하면 회전력 τ는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = P \times E$$

그러나 전장에 걸리는 에너지는 그림6에 나타낸 바와 같이 수직 방향으로 일정하기 때문에 앞식에서 벡터량으로 나타낸 회전력은 다음과 같은 스칼라 형태로 환산될 수 있다.

$$\tau = pE \sin(\alpha)$$

이와 같이 Gyricon 볼의 움직임은 전장에 걸리는 회전력을 제어함으로써 6 : 1 이상의 대조비와 20% 이상의 백생광 명암비를 나타낼 수 있으며, 볼과 볼 사이에 충전된 오일의 비중이 비슷하여 전장을 제거

하더라도 정전기력에 의해 회전된 볼이 수 일 이상 같은 상태를 유지하므로 디스플레이 된 이미지를 효과적으로 표시 할 수 있다. 2000년 제록스社에서 분리 설립된 Gyricon Media Inc.에서는 단순한 공정인 스프레이 몰트법으로 제조한 Wax-Like Plastic의 대량생산 기술을 성공시켜 저 가격 실현이 가능한 이점이 있다. 이 디스플레이는 매우 안정적이며 3백만 사이클 이상의 동작에서도 특성저하가 없는 것으로 보고되어 있으며 동작전압과 응답속도는 사용하는 재료의 전기적 특성, 볼의 크기, 오일의 특성에 의해 좌우되며, 각각 50~100 V, 80~100 ms의 영역에서 작동한다.

최근에는 수동적인 디스플레이 방식에서 무선인터넷 또는 블루투스나 연결된 능동적인 디스플레이 방식으로의 전환을 검토하고 있으며, 그림7과 같이 컴퓨터로부터 작성된 정보를 무선인터넷을 통하여 실시간으로 뉴스를 전달하거나, 광고를 할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

그러나 Gyricon 디스플레이 방식의 가장 큰 문제점은 문턱전압(Threshold Voltage)이 없어서 좋기는 하지만 이것은 전압을 가하면 입자의 크기에 관계없이 볼이 회전을 하게 되므로 실제 적용에 있어서 중간계조를 표현하는 능력이 매우 떨어질 뿐만 아니라 픽셀을 직접 구동해야 하므로 구동부가 복잡해지는 단점이 있다. 또한, 흑과 백으로 이루어지는 볼의 특성상 Subpixel Rendering 등의 기법으로 중간 레벨의 계조를 표현하기 위해서는 볼의 크기가 현재의 100 μm 에서 10~20 μm 의 크기로 작아져야 하며 픽셀을 구동하기 위한 구동부의 개선도 함께 이루어져야 하는 문제점이 있다.

3.2 전기영동형 디스플레이

전기영동법을 이용한 디스플레이는 오래 전부터 제안되어 왔다. 이는 색을 띤 유체 속에 빛을 산란하는 미소입자 즉, 잉크 미립자를 분산시켜, 이들의 Electro-Migration을 기본 동작 원리로 한다. 즉 양의 전압을 인가하여 음으로 대전 된 잉크 미립자들이 표면으로 움직여 미립자의 색을 표시할 수 있다. 또한 전압을 제거한 후에도 잉크 미립자들이 유체 속에 그대로 움직이지 않아 쌍안정한 특성을 가지고 있다. 이 경우에는 시간에 따른 분산 불안정성에 기

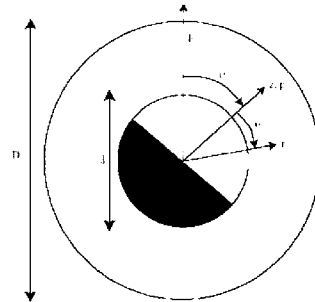
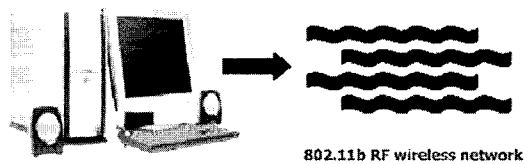
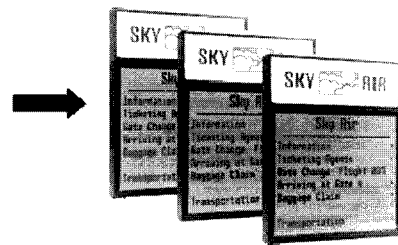


그림 6. Bichromal ball in cavity.

SyncroSign Message Board System Diagram



SignSync software integrated with customer's server



SyncoSign Message Boards

그림7. The concept of gyricon display system for next generation(*Source of figure : Gyricon company).

인한 잉크 미립자들의 클러스터화 및 응집 등의 형성이 상용화에 큰 걸림돌이 되었다. 1996년 미국 MIT Media lab에서 분리되어 설립된 E-Ink社에서는 마이크로캡슐을 사용하여 이러한 문제점을 해결하였다. 즉, 특정한 전하를 가진 특정 색의 잉크 미립자와 반대전하를 가지는 다른 색의 잉크 미립자(혹은 색을 띤 유전유체) 및 투명 유전유체를 함유한 지름 200~300 μm 의 투명한 마이크로캡슐을 제조하였다.

이들 마이크로캡슐을 바인더와 혼합하여 상,하부 투명전극사이에 전압을 인가하면 위에서 설명한 방식으로 이미지를 디스플레이 할 수 있다. E-Ink사는 초기에 백색 반사율이 우수한 TiO_2 를 이용하여 모노칼라를 구현하였으며 현재는 투명 유체에 백색 미립자와 흑색미립자를 분산시킨 Two-Particle System을 구현하고 있다. 2000년에 E-Ink社의 Soft-Lithography 방법을 이용하여 제작한 유기 트랜지스터가 결합된 능동 구동형 전자종이를 개발하여 전자종이 제조의 획기적인 전환점을 마련하였다. 이는 가볍고, 얇고, 플렉시블한 디스플레이를 제조하기 위한 필수적인 사항으로 차세대 디스플레이 제조에 크게 기여할 수 있다. 마이크로캡슐 전기영동 디스플레이는 우선 종이 질감에 가장 가까운 특성과 10:1 이상의 대비를 가져 시인성이 우수하다. 또한 구동전압의 조절에 의해 그레이스케일의 표현이 가능하다. 현재 실험적으로 약 천만번의 사이클에도 안정적인 동작을 보이고 있는 것으로 보고되고 있으나, 응답속도가 약 100 ms으로 동영상 구현에는 많은 개선이 필요하다. 또한, 현재 구현되고 있는 전기영동 디스플레이는 착색된 분산매에 한 가지 전하로 대전된 백색 입자를 사용하는 One Particle System과, 투명한 분산매에 두 가지 전하로 대전된 흑백의 입자를 사용하는 Two Particle System이 있다. 그림8에 One Particle System과 Two Particle System의 개념도를 나타내었다. 1 Particle System의 경우 착색된 액체의 투과율을, 백색 입자의 반사율을, 입사된 빛의 세기를 라고 하면, 밝은 화면에서의 반사도는, 어두운 화면에서의 반사도는 이 되므로 이론적으로 얻을 수 있는 최대의 명암 대조비(Contrast Ratio)는 이 된다. 예를 들어 착색된 액체의 투과도가 20%라 하면 최대 25:1의 대조비를 얻을 수 있다. 그러나 마이크로캡슐을 이용한 전자종이의 제조에 있어서도 개선되어야 할 몇 가지 문제점이 남아 있다. Moving Particle을 사용하는 전기영동 방식의 전자종이는 이론상 해상도가 입자의 크기 및 구동전극의 크기에만 영향을 받는다. 그러나 실제로는 입자 간의 응집이나 상하 전극 간격의 Non-Uniformity, 중력의 영향 등에 의해 넓은 면적에서 균일한 화상을 얻기 힘들고 전체 해상도에 큰 손실을 가져오게 된다. 이를 개

선하기 위하여 E-ink社에서는 Moving Particle 및 분산매가 혼합된 슬러리를 약 100 μm 정도 지름을 갖는 구형 Capsule에 넣어 입자와 입자 사이의 Inter-Action에 의한 화상 저하를 최소화하였다. 그런데, 전자종이가 지향하는 즉, 저원가 대면적의 표시소자라는 측면에서 Micro-Capsule은 몇 가지 단점을 안고 있다. 첫째, 그림9에서 보는 바와 같이 균일한 크기의 Micro-Capsule을 대량 제작하고 그 안에 일정한 양의 입자 및 분산매를 넣는 일은 상당히 복잡하고 어려운 공정이다. 이는 그림9와 같이 크기가 서로 상이한 마이크로캡슐 들을 전극 사이에 넣는 과정에서 큰 캡슐 사이에 존재하는 작은 캡슐은 전극과 접촉되지 않아 전압 인가 시 캡슐 내부에 존재하는 입자들의 전기영동 거리가 달라져 정확한 계조 표시가 어려워 디스플레이 작동시 보다 좋은 대조비를 확보할 수 없다는 문제점이 발생할 수 있다. 둘째, 이러한 캡슐들을 디스플레이 표면에 단일 층으로 빈틈없이 분포시키기 위해서는 적당한 결합재의 개발 및 도포 공정의 개발이 필수적이다. 마지막으로 마이크로캡슐 제조 공정에 있어서 그림10과 같이 캡슐 내에 들어 있는 입자들이 폴리머로 이루어진 캡슐이 형성될 때 폴리머 막에 트랩 되어 대조비(Contrast Ratio)의 저하를 유발시킨다.

3.3 Micro-Cup(Micro-Wall)

따라서 최근 들어 리소그래피 기술이 발전함에 따라 그림11의 (a), (b)처럼 Encapsulation 대신 기판 위에 직접 격막(Micro-Cup, Micro-Wall 또는 Micro-Rib)을 형성하고, 슬러리를 주입한 후 Sealing하는

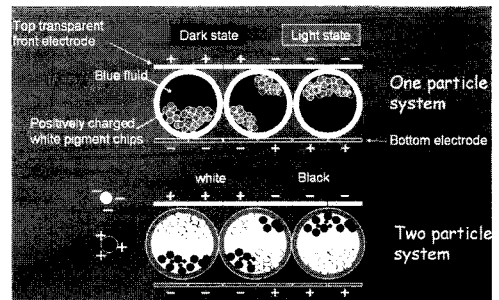


그림 8. The operation principles of micro-capsules.

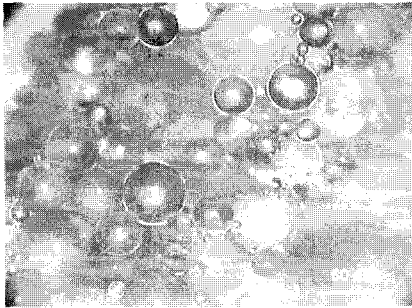


그림 9. OM image for micro-capsule with different size distribution(*Source of photo : Kamy group in Japan).

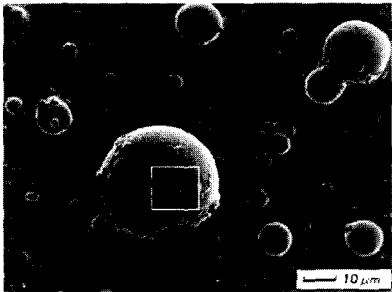


그림 10. SEM images for trapped particles on the surface of micro-capsule(*Source of photo : Kamy group in Japan).

방법이 개발되어 상용화 되고 있다. 이는 고정밀도의 리소그래피 장비를 사용하므로 균일한 크기의 Container 공간을 형성할 수 있고, 추가적인 Binder 개발이나 Monolayer Control 등의 공정이 필요 없게 된다. 또한 기계적 충격에 대해 보다 잘 견딜 수 있으며 대면적 저원가를 실현할 수 있는 Roll-To-Roll Process에 적합하기 때문에, 많은 연구가 진행되고 있다. Sipix社에서는 이러한 격벽을 이용한 전자종

이의 대량 생산 체계를 갖추고 있으며, 각 격벽의 넓이 60~180 μm, 높이 5~30 μm에 저유전용매에 분산된 입자를 충전하여 각각의 격벽에 전기적 신호를 줄 수 있는 회로를 적용함으로써 원하는 정보를 표현할 수 있도록 하였다. 그러나 컬러를 구현하는 형태로 정렬하기가 매우 어려우나, 격벽 구조를 사용하면 이미 잘 정렬된 화소들이 격벽에 의해 디스플레이 될 수 있으므로 훨씬 유리하다.

이와 같이 캡슐 구조에 비하여 격벽 구조가 갖는 여러 가지 장점들 때문에, 미국, 일본 등에서는 격벽 구조에 대한 연구 성과가 활발히 발표되고 있다. 특히 격벽의 Geometry에 대해서는 많은 자유도가 주어져 있으므로, 표시 품질 및 제조 공정을 최적화 할 수 있는 격벽 Geometry 개발에 초점을 맞추면 큰 성과를 거둘 수 있으리라 예상된다. 그러나 Cup 형태의 격벽의 경우 잉크 주입 후 상판 접합시 모세관 현상에 의한 공기방울이 발생되는 문제점이 있어 최근에는 그림11(c), (d), (e)와 같이 격벽의 형태를 십자형으로 제조하여, 이러한 문제점들을 해결하고자 하는 연구가 수행 중에 있다.

4. 전자종이의 향후전망 및 당면과제

전자종이는 현재 옥외 간판이나 대형 유통 마켓에서 POP(Point Of Purchase)의 용도로 시범적으로 테스트 되고 있다. 그러나 종래의 디스플레이로부터의 접근 방식과 종이로부터의 접근방식 모두가 종이와 같이 얇고 동영상 구현이 가능한 꿈의 디스플레이 개발에 궁극적인 목표를 가지고 있다. Economist 지(2000년12월호)의 분석을 보면 전자종이가 옥·내외 광고판으로 사용되고 있지만 다양한 형태의 인터넷 기기 및 전자책의 정보표시매체 등으로 이용될 것이 분명하다고 전망하고 있다. 또한 미국의 Gartner Group에서는 2003년 말 경 전자종이의 상용화 제품이 PDA를 비롯한 이동 통신기기에 응용되었으며, 2004년에는 6월에 일본의 소니와 미츠비시에서 전자종이를 이용한 전자책을 출시하였다. 전 세계적으로 인터넷 사용자는 2000년 현재 3억7천만 명, 국내 인터넷 사용자는 약 1천480만 명으로 추정되며, 2005년에는 약 6억 명 정도로 전세계의 인터넷

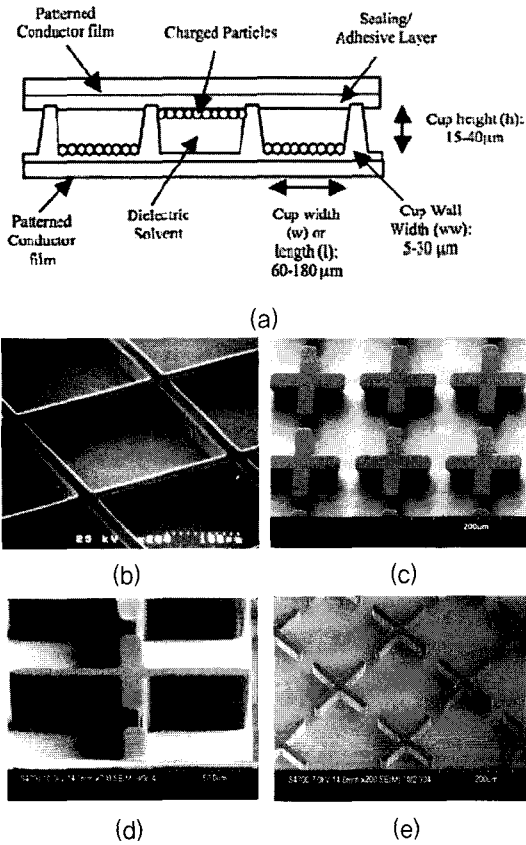


그림 11. The structure of micro-cup(micro-wall)(*Source : Korean patent pending No.2004-66900).

사용자가 늘어날 것으로 전망하고 있다. 이에 따라 이동통신 기기인 PDA, Mobile PC, Mobile Phone 등의 사용자도 급격히 늘어날 것으로 예상되어 진다. 전자종이의 개당 가격은 8.5 × 11인치를 기준으로 약 10불 정도로 예상되어지고 있고 인터넷과 이동통신 사용자의 약 10% 정도가 이를 사용할 것으로 내다보고 있고, 상용화될 경우 약 11억불의 시장이 형성되리라 예상되어진다. 또한 Nikkei Electronics(2001년9월)에 의하면 2005년에는 전자종이의 잠재시장이 약 300억불 이상이 될 것으로 추정하고 있다. 이러한 거대 잠재 시장을 가지고 있는 전자종이는 현재 초기 단계의 신기술로, 미국, 일본을

중심으로 급속히 연구, 개발이 진행되고 있다. 따라서 전자종이의 아래 나열한 문제점 극복을 위한 원천 기술 확보와 보다 빠른 상용화가 요구된다.

4.1 컬러 구현

전자종이에서의 컬러 구현은 여러 가지 방법 시도되고는 있으나 매우 초보적인 단계이다. E-ink社에서는 Color Filter를 사용하여 그림12에 나타낸 바와 같이 16가지 색을 표현한 시제품을 발표하였으며, Sipix사에서는 Micro-Cup 구조를 사용하여 각각의 Cup에 삼원색의 각각 다른 안료를 첨가하는 아이디어를 제안하였으나 아직 실현되지는 못했다. 이외에 Moving Particle 자체에 색을 넣어 입자들을 선택적으로 움직이게 하는 방법도 제안되고 있으며, Gyricon사에서는 Rotating Ball의 한 쪽에 색을 넣어 색상을 구현하는 방법을 제안하고 있다. 한편, Iridigm사에서는 멤브레인을 2차원적으로 배열하고, 멤브레인의 간격을 조절하여 외부광원으로부터 반사되는 빛의 간섭 경로를 조절함으로써, 컬러를 구현하는 I-mod라는 디스플레이를 개발하였다. 그러나 이는 아직 플렉시블 기판에는 적용이 어려워 진정한 의미의 전자종이와는 거리가 있다.

4.2 Gray level(중간 계조) 구현

지금까지 개발된 전자종이용 잉크는 흑과 백, 두가지의 계조밖에는 표현하지 못하므로, 사진 등의 중간 Tone을 표시하기 위해서는 Sub-Pixel Rendering이나 Dithering 등 Software 적 기법으로 사전에 화상을 처리하여야 하며, 이 과정에서 해상도를 비롯한 표시품질이 크게 저하될 수 있다. 사진이나 그림을 나타내는 데 있어 중간 회색을 표시할 수 없다는 사실은 컬러를 표시할 수 없다는 사실보다도 더 치명적인데, 컬러화면을 회색이 포함된 흑백화면으로 바꾸었을 때는 화상의 식별도가 그다지 떨어지지 않으나, 이를 흑과 백으로만 된 화면으로 바꾸었을 때는 원래 형상을 거의 알아보기 힘들 정도가 되기 때문이다.

인가된 전압의 절대적 크기에 의해 표시상태가 결정되는(Voltage Driving) 액정과는 달리, 전자종이용 잉크는 전압과 시간의 곱인 Impulse에 의해 표시상태가 결정되므로, Pulse Width Modulation 등의 기법을 통해 입자가 전극을 향해 움직인 거리를

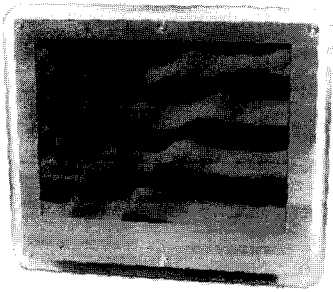


그림 12. 16 color electronic display embodied by electro-phoresis(*Source of photo : E-ink company).

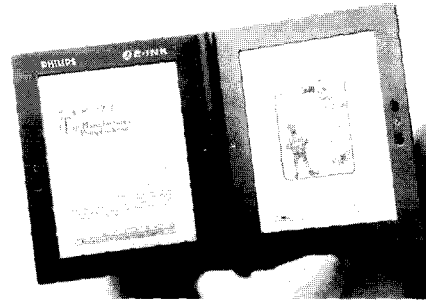


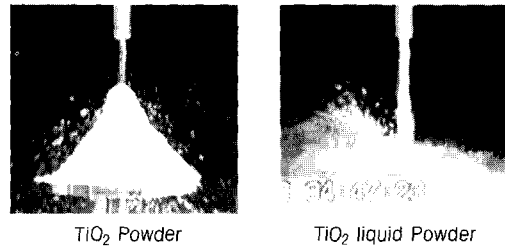
그림 13. E-ink company's prototype e-book using 4-level gray scale.

조절함으로써 중간 계조를 표시할 수 있다. 그런데, 이때 입자의 최종 위치는 출발지점이 어디냐에 따라 달라지므로, 표시되는 계조는 이전까지의 이력(Previous History)에 의해 영향을 받게 된다. 이를 해결하기 위해서는 신호 Pulse를 인가하기 이전에 입자들을 일정한 기준위치에 정렬하는 Refreshing Pulse를 인가하여야 하는데, 이로 인해 화면에 Flashing(깜박임) 현상이 일어날 수 있다. 어쨌든 현재로서는 Pulsewidth Modulation에 의한 중간계조 표현이 최선의 방법이며, 이처럼 입자의 움직임 거리를 정밀하게 조정하기 위해서는 입자의 크기 및 표면 전위를 매우 정밀하고 균일하게 조절하여야 한다. 참고로 E-ink社에서는 4 Level의 중간계조를 표현할 수 있는 전자종이를 Philips社와 공동으로 개발하여 시제품을 출시하였다(그림13).

4.3 동영상 구현

전자종이 개발에 있어서 또 하나의 큰 과제는 응답속도의 개선이다. 현재 전자종이용 잉크의 경우 응답속도가 수 백 Millisecond에 달하므로 동영상 구현은 불가능하다. 이를 개선하기 위하여 Moving Particle의 Mobility를 높이고, 이동거리를 짧게 하며, 인가된 외부 전기장에 대한 응답특성을 개선하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 일본의 규슈 대학에서는 응집되지 않도록 표면층을 처리하여 마치 액체와 같은 성질을 갖는 Liquid Powder를 개발하여 전자종이에 응용하였다.



TiO₂ Powder

TiO₂ liquid Powder

그림 14. Liquid powder relationship rheology conduct for air-gap electro-phoretic display embodiment(*Source : Kyusyu Univ. in Japan).

일반적인 Powder는, 다음 그림14에 보인 바와 같이 노즐을 통해 분사되었을 때, Gaussian 분포와 유사한 형태로 Pile-Up 되는데 비해, Liquid Powder는 그림14 오른쪽에 보인 바와 같이 마치 액체처럼 퍼지게 된다. 이는 각각의 입자들이 서로 응집되지 않고 독립적으로 행동하는 것을 의미하며, 외부 전기장에 대해 역시 독립적으로 반응하므로 응답속도를 높일 수 있음을 의미한다. 실제로 이러한 분말을 사용해서 전자종이로 1/100 초까지 나타낼 수 있는 Stop Watch를 표현한 바 있다.

5. 결론

위에 예시한 연구 사례에서도 알 수 있듯이 입자의 전기영동을 기본으로 하는 전자종이는 차세대 휴대용 디스플레이로서, 또 환경보호 측면에서 종이를

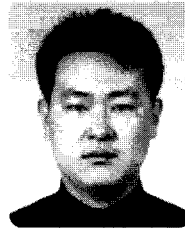
대신할 대체재로서 매우 각광받고 있다. 그러나 전자종이와 관련된 대부분의 원천기술은 일부 선진국에만 제한되고 있다. 따라서 우리나라에서도 고성능의 무기소재 입자 개발 및 표면 전하제어 기술의 연구 개발은 앞에서 언급한 현재 전자종이의 문제점들을 해결함과 동시에, 향후 전개될 플렉시블 디스플레이 시장에 있어 원천 기술을 확보한다는 면에서 매우 중요하다. 또한 우리나라가 강점을 갖고 있는 반도체 분야의 미세공정기술을 접목시키면, 입자의 움직임을 잘 제어할 수 있는 여러 가지 Geometry의 Microstructure를 개발함으로써 현 수준의 전자종이가 갖고 있는 제반 문제점들에 대한 해결책을 제공할 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

[1] M. Kleper, Advanced Display Technologies, Printing Industry Center at RIT(PICRM), 2003.
 [2] H. L. Guo, X. P. Zhao, Preparation of a kind of red encapsulated electrophoretic ink, Optical Materials, Vol. 26 p.297, 2004.
 [3] J. Crowley, N. K. Sheridon, L. Romano, Dipole moments of gyricon balls, Journal of Electrostatics, Vol. 55, p. 247, 2002.
 [4] 박이순, 한윤수, 권영한, 전자종이 기술 및 개발 현황, 공업화학전망, 제7권, 제3호, p.54, 2004.
 [5] 서경수, 이용의, 강승열, 안성덕, 정명주, 김철암, 김미경, 전자 종이(Electronic Paper) 최근 기술 동향, 전기전자재료학회지, 제15권, 제9호, p. 16, 2002.
 [6] 한정인, 김영훈, Microparticle 기반의 E-paper 기술개발, 전기전자재료학회지, 제15권, 제9호, p. 37, 2002.
 [7] 김선재, 안진호, 홍완식, 이남희, 황두선, 이강, 김중희, E-paper용 무기소재 기술개발, 산업자원부, 2004.
 [8] 전기영동 디스플레이 장치용 격벽구조 및 그 구조를 이용한 전기영동 디스플레이 장치, 특허 2004-66900.

[9] 전기영동 디스플레이용 잉크 제조 방법, 특허 2004-65409.

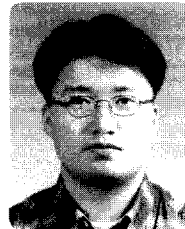
저|자|약|력



성 명 : 이 남희

◆ 학 력

- 2000년 조선대 재료공학과 공학사
- 2002년 조선대 대학원 재료공학과 공학석사
- 현 재 세종대 대학원 나노공학과 박사과정



성 명 : 김 중희

◆ 학 력

- 2003년 서울산업대 신소재공학과 공학사
- 현 재 세종대 대학원 나노공학과 석사과정



성 명 : 오 효진

◆ 학 력

- 2004년 영동대 전자공학과 공학사
- 현 재 세종대 대학원 나노공학과 석사과정



성 명 : 홍 완식

◆ 학 력

- 1988년 서울대 무기재료공학과 공학사
- 1991년 Univ. of California at Berkely, Materials Science & Engineering 공학석사
- 1995년 Univ. of California at Berkely, Materials Science & Engineering 공학박사

◆ 경 력

- 1995년 ~ 1998년 Post-doctoral Fellow Physicist Amorphous Silicon Group Physics Division Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S.A.
- 1998년 ~ 1999년 Staff Scientist Semiconductor Detector Group Engineering

Division Lawrence Berkeley
National Laboratory, U.S.A.

- 1999년 ~ 2002년 삼성전자 선임연구원
- 2002년 ~ 현재 세종대 전자공학과 교수



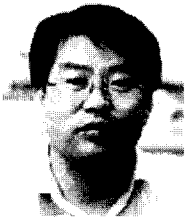
성명: 안 진호

◆ 학력

- 1986년 서울대 금속공학과 공학사
- 1986년 서울대 금속공학과 공학석사
- 1992년 The Univ. of Texas at Austin, Materials Science & Engineering 공학박사

◆ 경력

- 1989년 ~ 1992년 Microelectronics Research Center(UT, Austin)
- 1992년 ~ 1995년 NEC Microelectronics연구소
- 1996년 ~ 현재 한양대 신소재공학과 교수



성명: 김 선재

◆ 학력

- 1986년 서울대 금속공학과 공학사
- 1986년 한국과학기술원 재료공학과 공학석사
- 1992년 한국과학기술원 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 1995년 ~ 1998년 충남대 강사
- 1992년 ~ 2001년 한국원자력연구소 선임연구원
- 2001년 ~ 현재 세종대 나노 신소재 공학연구소 소장
- 2001년 ~ 현재 세종대 나노공학과 교수

