

투명 디스플레이 기술

황치선, 박상희(한국전자통신연구원 산화물TFT연구팀)

I. 서 론

투명 디스플레이는 최근 기존의 HUD(Head-Up Display)만의 사용에서 벗어나 투명 LCD나 투명 OLED등 평판디스플레이의 영역으로 제품이 확대되고 있는 추세이다. 제품의 확대와 더불어 투명 디스플레이의 응용처도 기존에 평판디스플레이가 쓰이지 않았던 영역까지 확대될 것으로 기대된다.^[1] 본 원고에서는 이러한 투명 디스플레이의 기술 동향을 살펴보고 그 중에서도 최상의 화질을 제공할 것으로 예상되는 투명 AMOLED에서의 기술적 과제들에 대하여 살펴보기로 한다.

II. 투명 디스플레이 기술 동향

투명 디스플레이는 말그대로 디스플레이가 나타나는 영역이 투명하여 그 뒤편의 사물이 보이는 형태를 지니는 디스플레이로 정의할 수 있을 것이다.

이러한 투명 디스플레이는 크게 HUD와 HMD와 같은 투시형 디스플레이와 투명 LCD나 투명 OLED와 같은 직시형의 디스플레이로 나뉜다. 각각의 디스플레이는 고유의 특성 때문에 투명 디스플레이로 활용될 경우 장단점을 가지고 있어서 응용 분야에 따라 주로 사용될 투명 디스플레이가 달라질 것으로 예상된다. 몇가지 주요한 투명 디스플레이 기술에 대하여 각각의 특징과 기술적 장단점을 살펴보기로 하자.

1. HUD(Head-Up Display)

HUD는 1970년대부터 항공기용 투명 디스플레이로 사용되기 시작하였다. 항공기의 조종사에게 시야의 확보를 해주면서 동시에 정보를 전달해야할 필요에 의하여 개발된 디스플레이 형태로서 광학엔지에 의하여 만들어진 영상을 투명한 스크린에 투영하여 사용자가 투영된 영상을 보게 하는 방식으로 작동하게 된다. 이때 광학엔진에서의 조작에 의하여 사용자가 느끼는 영상의 거리가 실제 투명 스크린이 아닌 먼곳에 형성되도록 하는 것이 일반적이다. 이것은 투명 영상과 외부 배경과의 초점거리 차이를 줄임으로서 두 시각적 대상을 동시에 인지하도록 하는데 도움을 주게 된다.



[그림 1] BMW사의 자동차에 사용된 HUD



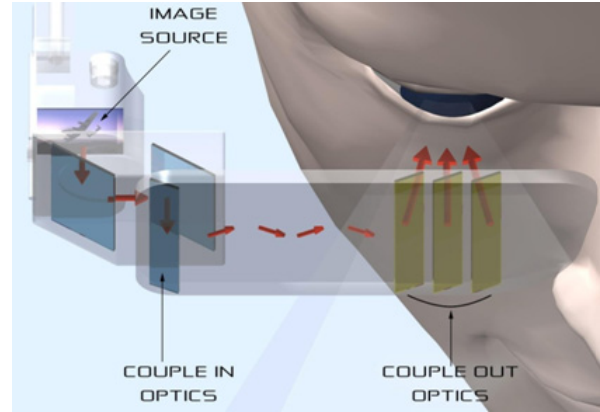
[그림 2] 항공기에 사용된 HUD

초기에 주로 항공기에 사용되었던 이 기술은 요즘은 주로 차량에 많이 이용되고 있다. 차량운전자가 시선을 변경하지 않고 외부 사물과 차량의 운전 정보를 동시에 얻을 수 있도록 자동차 앞 유리창에 HUD를 탑재하는 경우가 많아지고 있다. 이 경우에도 운전자가 느끼는 투명 디스플레이의 초점거리는 차량 앞 2-3미터가 되도록 하여 차량 전방의 물체와 동시에 인식이 되도록 하는 경우가 대부분이다.

HUD는 이렇게 야외용으로 사용되는 디스플레이기 때문에 밝은 외광에서도 인식이 되기 위하여 밝은 광원을 필요로 한다. 그런데, 투명한 디스플레이를 형성하는 스크린의 반사율이 클 수 없기 때문에 더욱 밝은 광원에 대한 필요성이 커지게 된다. 또한 차량등에 사용되기 위해서는 사용 온도 범위등 신뢰성에 대한 요구사항 또한 높은 편이다. 이러한 이유로 HUD의 광원에 사용될 수 있는 디스플레이는 제한적이고 디스플레이에서 보여주는 정보의 양(해상도, 컬러)도 제한적이다.

2. HMD(Head Mount Display)

HMD 또한 투사형의 디스플레이지만, HUD와는 달리 투명한 스크린에 투사하는 형태가 아니라 사용자의 눈동자 내부에 직접 투사하는 방식의 디스플레이이다. 통상의 HMD 경우에는 눈동자 앞에 직접 광학엔진을 설치하게 되는데, 투명 디스플레이 형태로 사용되기 위해서는 광학엔진은 별도의 장소에 설치하고 광학엔진에서 제공되는 빛이 투명한 형태의 반사판을 통하여 눈동자 내부에 투사되도록 하는 형태를 취하고 있다.



[그림 3] LUMUS사에서 개발한 투명 HMD

기존의 HMD는 사용자의 시야를 완전히 인공적인 환경으로 채우기 때문에 안전상의 문제가 우려되어 일반적인 사용이나 장기간의 사용은 제한되어 왔다. 투명 HMD의 경우에는 인공적인 이미지이외에 외부의 통상적인 사물 또한 노출되기 때문에 이러한 문제점에서 벗어나 있다고 보아진다. 최근 언론에 보도된 구글 안경의 경우에는 이러한 투명 HMD를 시야의 일부분에 위치하도록 개발한 것으로 보인다.

투명 HMD의 경우 광학계의 설계에 따라 사용자가 느끼는 스크린의 크기등의 조절이 용이하며 비교적 양질의 화질을 구현할 수 있기 때문에 개인용도의 투명 디스플레이로는 사용 가능성이 높다고 할 수 있다. 다만, 안경과 같은 형태의 장치를 휴대해야 하므로 화질의 저하없이 이러한 휴대장치의 소형화 경량화를 이루는 것이 기술적인 과제가 될 것이다.

3. 투명 LCD

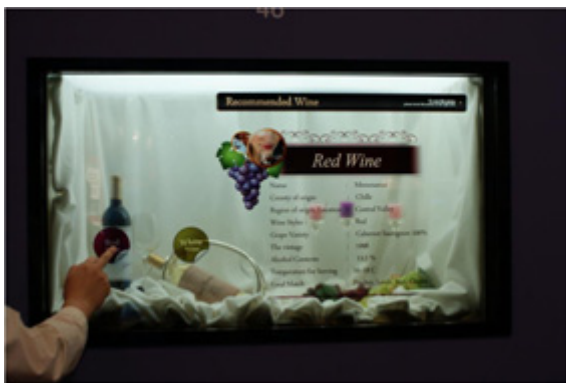
LCD는 백라이트의 투과를 LC의 작용을 이용하여 조절하는 원리를 이용하는 디스플레이 형태이므로 백라이트를 제거한 패널의 형태로서 투과형의 디스플레이로 사용할 수 있다. 즉, 원리적으로 투명 디스플레이로 사용이 가능한 형태를 띄고 있다.

그런데 실제 LCD 패널의 경우 LC의 작용을 이용하기 위하여 편광판을 사용하게 되고 또한 백색 백라이트에서 3원색을 구현하기 위하여 컬러필터를 사용해야 하며, 각각의 픽셀을 구동하기 위한 백플레인도 사용해야 한다.

이러한 각각의 구성요소에서 백라이트의 일부만 투과하는 작용을 하게 되는데, 편광판의 투과율은 ~40%, 컬러필터의 투과율은 ~30%, 백플레인의 투과율은 ~70%로 결국 전체적으로 10%이하의 낮은 투과도를 갖게 된다. 따라서 투과형의 디스플레이가 되지만 너무 낮은 투과도를 갖기 때문에 밝은 배경이 아니라면 뒷 배경을 볼 수 없게 된다. 그러므로 투과도를 증가시키는 것이 투명 LCD를 구현하기 위한 핵심 기술이 된다.

2010년 이후로 삼성전자, LGD와 같은 국내의 디스플레이 업체에서 투명 LCD 시제품을 선보이고 있다. 이러한 제품은 기존의 LCD 공정에서 투명도를 올리기 위하여 한두가지 부분을 개선한 형태를 가지고 있다. 예를 들어 컬러필터의 투과도를 높이거나 혹은 컬러필터를 제거하여 흑백의 형태로 사용하는 등의 조치를 취한 것이다. 이러한 경우에도 투과도는 최대 25%정도에 이르는 정도이다. 이렇게 투과도는 비교적 낮은 편이지만, LCD의 경우 대면적 디스플레이 제조 공정이 이미 확립되어 있고, 쇼윈도우와 같이 투명 디스플레이를 통하여 보는 사물을 밝게 할 수 있는 경우에는 배경을 충분히 볼 수 있는 수준이 되므로 광고용 쇼윈도우의 창문형 투명 디스플레이로는 충분히 활용이 가능한 상황이 된다. 실제로 2011년에 삼성전자에서는 투명 디스플레이용 LCD의 양산을 시작한다. 이러한 용도 이외에도 주변 광을 백라이트로 이용하는 투명 LCD를 사용하여 에너지 절약형 디스플레이를 구현할 수도 있다.

앞으로 좀더 투과도를 높이기 위해서는 편광을 사용하



[그림 4] 삼성전자의 투명 LCD 시제품(2010년)

지 않는 방식의 LCD를 이용하여 편광판을 제거하거나 컬러필터를 제거하기 위한 방안이 필요하다고 생각된다.

또한 LCD와 같은 투과형 디스플레이는 배경이 어두운 경우에는 보이지 않는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해서는 투명한 백라이트가 도입되어야 한다. 이것을 구현하기 위해서는 외곽부에 백라이트용 광원을 배치하고 이를 투명한 도광판을 이용하여 확산을 시키거나 혹은 작은 면적을 차지하는 광원을 전면에 설치하고 이를 투명한 도광판으로 확산시키는 경우, 혹은 투명한 면광원을 이용하는 경우를 생각해 볼 수 있다.

4. 투명 OLED

OLED는 LCD와 달리 발광형 디스플레이이다. 그리고 그 구조는 전자와 홀을 공급하는 두 전극(음극과 양극) 사이에 발광층이 놓여있는 형태이다. 그런데, 발광층에 사용되는 유기물질의 경우 대부분 밴드갭의 에너지가 가시광의 에너지보다 큰 영역에 있기 때문에 실제로 투명한 경우가 많다. 따라서 두 전극만 투명하다면 전체적으로 투명한 OLED를 구현하는 것이 가능하다. 통상의 OLED의 경우 양극으로는 투명전극은 ITO가 사용되며 음극의 경우는 Al과 같은 금속이 사용된다. 그런데, 이때 Ag와 같은 금속을 사용하면서 얇게 사용하게 되면, 투과도를 확보하면서도 전극 역할을 수행할 수 있도록 할 수 있다. 그런데 일반적으로 전극의 투과도와 저항이 서로 반비례 관계에 있기 때문에 높은 투과도를 갖게 하기 위해서는 저항이 높아질 수 밖에 없다.

OLED는 구동 방식에 따라 PMOLED와 AMOLED의 형태로 나뉜다. PMOLED의 경우에는 픽셀내에 박막트랜지스터와 같은 구동소자 없이 발광층 양측에 가해지는 전압으로 픽셀을 켜고 끄게 된다. 이에 비하여 AMOLED의 경우에는 박막트랜지스터와 같은 구동소자가 도입되어 픽셀을 켜게 된다. 이때 PMOLED의 경우에는 음극이 한쪽 전극이 되어 패턴이 되므로 낮은 면저항을 유지해야 할 필요가 있으나 AMOLED의 경우 통상 디스플레이 전체 면적이 음극이 되어 따로 패턴이 되지 않기 때문에 저항을 낮게 유지하기 쉽다. 따라서 높은 투과도의 투명 디스플레이를 구현하기 위해서는 음극이 패턴이 되는



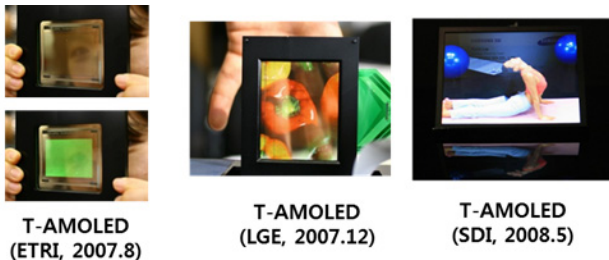
[그림 5] 네오뷰코오롱사의 직접구동 방식 투명 OLED

PMOLED보다는 음극이 패턴이 되지 않는 AMOLED가 투과도의 관점에서 좀더 유리하게 된다.

투명한 음극을 구현하는 기술은 전면 발광(Top Emission) 방식의 OLED에서 이미 많이 개발된 기술이기 때문에 기존의 기술의 조합만으로도 충분히 투명 OLED를 구현하는 것이 가능하다.

직접 구동방식이나 PM 구동방식을 이용한 OLED 시제품이 우리나라 기업인 네오뷰코오롱에 의하여 시연된 바 있다. 특히 전극의 패턴에 따라 디스플레이를 구현하는 직접 구동방식의 경우에는 80%정도의 투과도를 보이므로 여러개의 투명 OLED 패널을 중첩하는 사용하는 것도 가능하다.

투명 AMOLED 방식의 투명 OLED는 ETRI에서 산화물 TFT와 투명 전극을 사용한 투명 백플레인을 이용한 기술로 선보인바 있으며, LG전자에서도 같은 방식으로 시제품을 개발한 바 있다. 그리고 2008년 SDI에서는 폴리실리콘 TFT 백플레인과 금속 전극을 사용한 백플레인을 이용한 투명 AMOLED를 시연한 바 있다. 그 이후에 ETRI에서는 양면터치를 실장한 투명 AMOLED 패널, 투명 RFID 회로를 실장한 투명 AMOLED 패널, 투과도가



[그림 6] 투명 AMOLED 시제품



[그림 7] ETRI에서 개발한 양면터치 투명 AMOLED패널

변형 투명 AMOLED 패널을 개발하는 등 투명 AMOLED 패널이 상용화되기 위하여 필요한 여러 가지 기술을 접합한 패널을 시연하였다.

5. 기타 투명 디스플레이

(1) PSCT(Polymer Stabilized Cholesteric Texture)

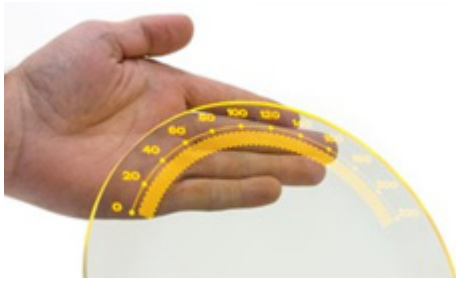
편광판을 사용하지 않는 투명 LCD 기술중 하나인 PSCT는 콜레스테릭 LC를 사용하는 기술이다. 콜레스테릭 LC는 가해지는 전압에 따라서 focal conic 상태와 homeotropic 상태를 전이하게 되는데 이때 focal conic 상태에서는 난반사가 이루어지기 때문에 뿌옇게 되고 homeotropic 상태의 경우에는 투명한 상태가 된다. 주로 영국의 Kent Optics사가 이 기술을 많이 개발해왔다.



[그림 8] Kent사의 PSCT를 이용한 투명 디스플레이

(2) TFEL(Thin-Film Electro-Luminescence)

TFEL은 가해지는 전압에 의하여 발광이 되는 EL소자 중 박막형태를 가지는 것이다. TFEL의 소자구조는 투명 전극과 그 내부에 투명 절연막, 발광층의 적층으로 이루어지는데, 모든 구성요소가 투명하기 때문에 매우 투명한 특성을 가지고 있다. 그러나 통상 구동 전압이 100V이상



[그림 9] Planar사의 투명 TFEL 시제품

의 고전압 AC가 가해지고 천연색을 표현하기 위한 발광 물질이 개발되지 못하고 있기 때문에 본격적인 투명 디스플레이 패널로는 사용되지 못하고 있으나, 투명 계기판 등에는 이미 많이 사용되고 있다.

(3) Electronic Skin

이 방식은 HP사에서 개발한 기술로서 Electro Kinetic 이라고도 불리우는 방식이다.^[2] Electrowetting 방식과 비슷하게 이 방식에서는 전압에 의하여 잉크를 이동시켜 투명성과 색을 구현하는 방식의 디스플레이이다. 이 방식은 투과형 디스플레이에서 LCD와는 달리 컬러필터와 편광판을 사용하지 않는 방식이기 때문에 투명도를 60%이상으로 높게 유지할 수 있는 장점이 존재한다.

이 이외에도 투명 전극을 이용한 투명 PDP등도 연구되고 있으며 편광판을 사용하지 않는 LCD, 전하의 주입에 따른 산화/환원 반응을 이용한 전기변색(Electro Chromic) 기술등 여러 가지 기술이 개발되고 있다.



[그림 10] HP사의 electronic skin 투명 디스플레이

Ⅲ. 투명 AMOLED의 기술적 과제

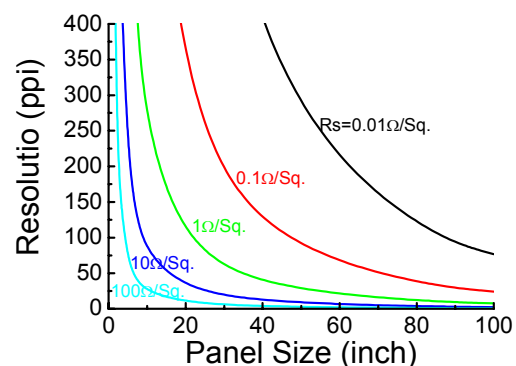
앞에서 살펴본 바와 같이 투명 AMOLED 패널이 시연된 바 있지만, 향후 본격적인 투명 AMOLED의 상용화를 위해서는 기술적으로 해결해야할 과제들이 남아 있다. 특히 최근 AMOLED가 TV시장의 진입을 앞두고 기술 개발이 활발히 이루어지고 있는 현재, 투명 AMOLED의 개발을 위해서는 어떤 기술적 과제가 필요한지를 알아보는 것은 중요한 의미를 가질 것이다.

1. 투과도 향상을 위한 기술

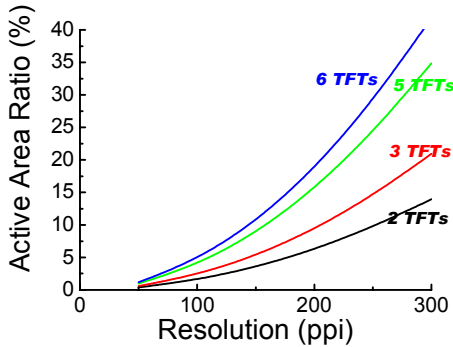
OLED에서 투과도를 낮추는 부분은 투명 음극과 백플레인, 그리고 백색을 이용하여 컬러를 만드는 경우(color by white)의 컬러 필터등이다.

투명 음극기술은 전면 발광(top emission) 방식에서 사용되는 투명 음극 기술을 이용할 수 있지만, 전면 발광의 경우에는 색순도를 위하여 반사되는 빛의 양을 조절하기도 하는 등 요구사항이 다르기 때문에 투과도를 증가시키기 위한 추가적인 연구개발이 필요하다. 이러한 기술로는 금속 전극의 최적화만으로는 충분하지 않아서 금속 전극 아래 혹은 위층에 투명 절연막을 적절히 형성함으로써 투명 음극에서 반사되는 빛의 양을 최소화하기 위한 기술이 개발중에 있다.

투명 AMOLED에서의 백플레인은 TFT와 배선용 전극, 그리고 커패시터를 형성하기 위한 전극으로 구성된다. 따라서 투과도를 높이기 위해서는 투명 전극과 투명 TFT를 적용하는 것이 백플레인의 투과도를 가장 높게 하는



[그림 11] 패널크기 및 해상도에 따른 배선의 요구 면저항



[그림 12] 해상도와 TFT의 개수에 따른 TFT내 액티브층이 차지하는 면적의 비율

방법이 될 것이다. 그러나 패널의 면적이 커지고 해상도가 높아질 경우 면저항이 큰 투명 전극의 적용은 한계에 부딪히게 된다.

그러므로 저항이 낮은 투명전극의 개발이 필수적인 요건이 된다. 단일층으로 이루어진 투명전극은 물질적인 한계로 더 이상 저항을 낮추기 힘든 상황이기 때문에 투명전극을 다층구조로 바꾸어 적용하는 방법이 제안되고 있다. 실제 패널의 제작에서는 이러한 다층 투명 전극과 금속 전극, 단일층 투명 전극의 적절한 조합으로 이루어지게 될 것이다.

또한 TFT가 차지하는 면적은 전극에 비하여 상대적으로 작은 부분이 되지만, 보상회로의 도입에 따라 픽셀내에 존재하는 TFT의 개수가 늘어남에 따라 TFT가 차지하는 면적도 무시할 수 없게 된다. 따라서 TFT를 투명한 형태로 만들 수 있는 산화물 TFT를 사용하는 것이 투과도를 개선할 수 있는 한가지 방법이 된다.

2. 투명도를 향상시키기 위한 기술

투명 기판을 평가하는 항목중 기판의 헤이즈(Haze)를 검사하는 항목이 있다. 투명 기판이 광학적으로 균일하지 않을 경우에 투명 기판내에 존재하는 서로 다른 굴절율을 가진 물질 때문에 발생하는 광선의 굴절을 평가하는 항목이다. 이 항목은 투명 기판을 통해 보이는 사물의 선명도와 연결된다. 즉 투과도가 높지만 헤이즈가 큰 기판의 경우에는 기판을 통해 보이는 사물이 뿌옇게 보이게 된다.

이러한 평가항목을 투명 디스플레이에도 적용하여 평가해야 할 필요성이 있다. 투명 디스플레이에는 불투명한

부분 때문에 투과도를 저하시키는 부분도 있지만 투과도는 높으면서 굴절율이 다른 여러 가지 소재가 사용되기 때문에 헤이즈를 발생시키게 된다.

실제로 투명 전극과 투명 TFT를 사용한 투명 AMOLED 패널의 경우에 헤이즈를 평가해 보면 상당히 큰 헤이즈 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이때 TFT 공정까지만 진행된 백플레인을 평가해보면 그 값은 상당히 작아진다. 따라서 TFT 공정위에 형성되는 구조가 헤이즈를 유발하는 것으로 추정된다. 이러한 헤이즈를 줄이기 위해서는 굴절율에 대한 엔지니어링이 필요하다고 생각된다.

3. 대조비 향상을 위한 기술

투명 OLED와 같이 발광형의 투명 디스플레이의 경우 투명 LCD와 같은 투과형의 투명 디스플레이에 비하여 가지는 단점은 밝은 배경하에서 대조비가 급격히 떨어진다는 것이다. 이것은 검정색을 투명 OLED가 표현할 수 없다는 점과 연결되는 현상이다. 통상의 OLED에서 검정색은 발광되지 않는 영역에서의 반사가 최소화되도록 만들어서 표현하게 되는데, 투명 OLED의 경우에는 배경의 빛이 투과되므로 검정이 표현되어야 할 픽셀에서 투과되는 패널 뒤편의 빛에 따라 검정의 정도가 달라지게 된다. 그러므로 패널의 밝기에 거의 상응하는 배경이 있는 경우에는 대조비를 확보할 수가 없게 된다.

이러한 현상은 발광형 투명 디스플레이가 가지는 고유한 문제이므로 자체의 기술만을 가지고는 해결할 수 있는 방법이 없다. 따라서 투과형 투명 디스플레이와의 조합으로 해결하는 것이 가장 쉬운 방법이 된다. 즉, 투과도가 가변이 되는 패널을 투명 OLED와 복합적으로 사용하여



[그림 13] 투과도 가변 투명 AMOLED 패널에서 투과도 가변 패널의 On/Off에 따른 대조비의 변화

배경을 차단해주는 방법을 도입해야 한다. 이때 배경의 차단이 전체 패널에서 동일하게 이루어지도록 할 수도 있고, 픽셀별로 동기화하여 검정표현이 필요한 픽셀에만 배경의 차단이 이루어지도록 하는 경우도 있을 것이다.

투과도 가변 기술은 광차단효과가 크고 투과도의 가변 폭이 클수록 유리하게 된다. 또한 투명 OLED와의 접합을 어떻게 형성할 수 있을가 하는 것도 고려해야 할 문제가 된다. 가장 널리 사용되는 투과도 가변 기술은 LC 기술이다. 그런데 이 기술의 경우에는 최대의 광투과도가 편광판의 존재 때문에 42%정도로 제한되게 된다. 그러므로 투과도의 가변폭이 큰 새로운 기술의 개발이 필요하다. 이러한 기술의 후보로는 전기 습윤 방식(electrowetting), 전기 색변 방식(electrochromic)의 일종으로 금속-절연체의 전이를 이용하는 스위처블 미러(switchable mirror) 방식, 그리고 LC 기술에서도 편광판을 사용하지 않는 GH-LC 방식이나 Dye-doped LC 기술등이 존재한다.

4. 응용 분야와 관련된 기술적 과제

이상과 같은 기술적인 문제 이외에도 투명 OLED의 사용이 외광의 투과가 이루어지는 환경하에서 이루어지게 되므로 외광(특히 UV)에 대한 안정성을 확보하는 것도 중요한 과제중의 하나가 되게 된다. 이때 발광층인 유기물 뿐만 아니라 구동소자로 사용되고 있는 TFT의 안정성 또한 고려해야 한다. 특히 산화물 TFT를 사용하는 경우에는 음의 전압이 인가되게 되면 가시광선의 영향만으로도 상당한 불안정성이 발생하는 것이 알려져 있다.

또한 투명 디스플레이의 특성상 창문형 디스플레이로 사용될 가능성이 많은데 이 경우 대면적 디스플레이로 사용되면서 동시에 저가격화가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 따라서 투명 OLED 패널을 저가격으로 대면적에 형성할 수 있는 저가격화 기술 또한 투명 OLED의 상용화를 위하여 반드시 개발해야 할 기술중의 하나이다.

IV. 결 론

투명 디스플레이는 기존의 평판 디스플레이를 대체하는 용도보다는 새로운 디스플레이 시장의 창출을 통하여

성장세가 둔화된 평판디스플레이 시장을 확대할 수 있는 제품으로 기대를 받고 있다.^[3]

기존의 여러 가지 평판 디스플레이가 투명 디스플레이 형태로 활용될 수 있지만, 투명 OLED가 투과도의 측면에서 가장 적합한 투명 디스플레이 기술의 후보로 생각된다. 그러나 이러한 투명 OLED가 상용화가 되기 위해서는 해결해야 할 기술적 과제들이 산재해 있다. 이러한 기술적 과제들의 해결을 위해서는 지금까지 개발된 기술들의 조합뿐만 아니라 투과도 가변 소재등과 같은 신기술의 개발이 필수적이다.

그러므로 투명 디스플레이 분야는 산업적인 측면뿐만 아니라 기술적으로도 매력적인 연구분야라고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 황치선, 박상희, 조경익, 전자통신동향분석 제25권 제5호 20 (2010).
- [2] Tim Koch, Don Hill, Mike Delos-Reyes, Jeff Mabeck, Jong-Souk Yeo, Joe Stellbrink, Dick Henze, Zhang-Lin Zhou, SID 2009 Proceeding 738 (2009).
- [3] "투명디스플레이 시장 전망" 유비산업리서치 (2010).

저 자 약 력

황 치 선



- 1987년 3월~1991년 2월 서울대학교 물리학과 학사
- 1991년 3월~1993년 2월 KAIST 물리학과 석사
- 1993년 3월~1996년 2월 KAIST 물리학과 박사
- 1996년 3월~2000년 5월 현대전자 메모리 연구소
- 2000년 6월~ 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문
- 관심분야: 산화물 반도체 및 산화물 TFT, 투명 디스플레이, AMOLED

박 상 희



- 1983년 3월~1987년 2월 : 서울대학교 화학교육과 학사
- 1987년 3월~1989년 2월 : 서울대학교 과학교육과 석사
- 1992년 9월~1997년 12월 : University of Pittsburgh 화학과 박사
- 1998년 5월~1999년 6월 : Pst Doc. 한국전자통신연구원
- 1999년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문
- 관심분야 : 산화물 TFT 및 이를 이용한 투명디스플레이, flexible AMOED