

제 7 장 액정을 이용한 스마트 윈도우 기술

김윤호

에너지 효율을 향상시키고 감성과 기능성을 동시에 만족시킬 수 있는 스마트 윈도우(smart window) 기술이 큰 주목을 받고 있다. 스마트 윈도우란 외부에서 유입되는 빛의 투과도를 자유롭게 조절하여 에너지 손실을 줄이고 소비자에게는 쾌적한 환경을 제공할 수 있는 능동 제어 기술을 의미하며 수송, 정보 디스플레이, 건축 등 다양한 산업 분야에 공통적으로 적용될 수 있는 기반 기술이라 할 수 있다. 간단한 조작만으로도 순간적인 상태 전환을 유도할 수 있고 다양한 고급 편의 기능을 부여할 수 있기 때문에 건물 또는 자동차의 고부가가치화를 위해 활발한 응용 전개가 이루어질 것으로 기대된다. 에너지 절감형 스마트 윈도우의 기능이 태양광 투과도의 능동적 조절을 통해 이루어진다는 점에서 태양전지와 결합 가능성이 매우 높다는 사실을 고려하면 장기적으로는 신재생 에너지 산업과 더불어 미래형 친환경 자동차 시장을 주도하는데 있어서 한 축을 담당할 것으로 기대된다. NREL(National Renewable Laboratories) 보고서에 따르면 능동 제어 방식 스마트 윈도우는 여름철 냉방 시 10~25% 정도의 에너지 절감 효과가 있고, 낮 시간 주차 시 차량 내부의 온도 상승을 억제시켜 쾌적한 운전 환경을 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 선진 완성차 업체에서는 스마트 윈도우 개발에 대한 연구를 꾸준히 진행하여 이미 일부 모델에 적용하기 시작하였고 국내에서도 2012년부터 스마트 윈도우 부품이 장착된 자동차가 시판되고 있다. 하지만 스마트 윈도우 기술은 국내외적으로 제품/서비스가 출시된 지 얼마 안 되는 단계로서 제조비용과 기술력의 한계로 인하여 여전히 사용 분야에 많은 제한을 받고 있는 상태이다. 스마트 윈도우 부품의 조기 정착과 안정적인 시장 확보를 위해서는 장착 및 구동에 따른 가격적인 문제, 소비전력, 구동 속도, 내구성 및 수명 문제 등의 현안이 우선적으로 해결돼야 할 것으로 보인다. 본 논고에서는 가까운 시일 내에 자동차의 고부가가치 제품으로 각광받을 것으로 예상되는 스마트 윈도우의 제조 기술과 구동 원리, 적용 사례에 대해 알아보고 국내외 기술 개발 동향을 파악함으로써 미래 시장 창출 가능성에 대해 예측해 보고자 한다.

스마트 윈도우는 다양한 자동차용 부품에 적용될 수 있으며 구동 방식에 따라 헤드업 디스플레이 방식(head up display, HUD), 변색 방식(chromic display, CD), 분극 입자 방식(suspended particle display, SPD), 고분자/액정 복합필름 방식 (polymer/liquid crystal composites film)으로 분류될 수 있다. 변색 방식의 경우 외부의 전압(electrochromic, EC)이나 빛의 파장(photochromic, PC), 온도(thermochromic, TC)의 변화에 따라 가역적으로 색 변화를 유도할 수 있으나 전기 방식에 기반을 둔 스마트 윈도우만이 제품화에 적합한 기술로 인식되고 있다. 본 고에서는 액정 기반의 스마트 윈도우 개발에 대한 내용만 서술하고자 한다.

고분자/액정 혼합물은 디스플레이와 셔터 재료로 오랫동안 연구되어 왔으며 최근에는 스위치 특성을 이용한 에너지 절감형 스마트 윈도우 개발에 응용되고 있다. 복합 필름의 성능은 구성물의 고유 성질과 조성에 의해 결정 되어지며 고분자 분산 액정 방식(PDLC)과 쌍안정성 콜레스테릭 액정(BiCh-LC) 방식이 가장 근접한 기술로 분류되고 있다.

•고분자 분산 액정 방식(Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC)

마이크론 크기의 액정 입자(droplets)들이 고분자 매트릭스 내에 고르게 분산되어 있는 구조를 지닌 고분자 분산 액정 복합체는 외부 전압에 의한 액정 입자와 고분자 간의 굴절률 차이에 의해 투과율이 조절된다. 보통 상태(off-state)에서 불규칙하게 정렬되어 있는 액정 입자들은 고분자 매트릭스와 굴절률 차이로 인해 흡수된 빛이 산란되지만 전기를 인가(on-state)하면 입자들이 규칙적으로 배향되고 굴절률의 일치를 유도하여 투명해진다(그림 1). 따라서 산란에 의한 빛의 불투과와 전압 인가에 따른 투과도의 차이가 윈도우의 성능을 결정하는 핵심 기술이라 할 수 있다. 스마트 윈도우 기능 이외에도 전기를 넣지 않은 불투명 상태에서 스크린으로 사용될 수 있고 센서 부착에 의해 터치스크린 기능까지 수행할 수 있다.

일반적으로 PDLC 셀은 고분자 매트릭스와 액정, 기판, 투명전극으로 구성된다(그림 1). LCD 에서 필요로 하는 편광 필름(polarizer film)과 보상 필름(compensation film)을 사용하지 않으므로 제조법이 간단하고 약한 빛으로도 투과도 조절이 가능하며 반응속도도 빠르다. 태양빛의 투과도 조절을 통해 열이 실내에 들어오거나 내부의 열이 밖으로 빠져나가는 것을 조절할 수 있기 때문에 에너지 절감에 효과적이다. 하지만 보는 각도에 따라서 흐림(haze) 현상이 발생할 수 있고, 주변 온도에 따라 성능이 저하될 수 있다. 또한 투명한 상태를 유지하기 위해서는 연속적인 전압의 공급이 필요로 하기 때문에 3.5~15.5 W/m²의 전력이 소모된다.

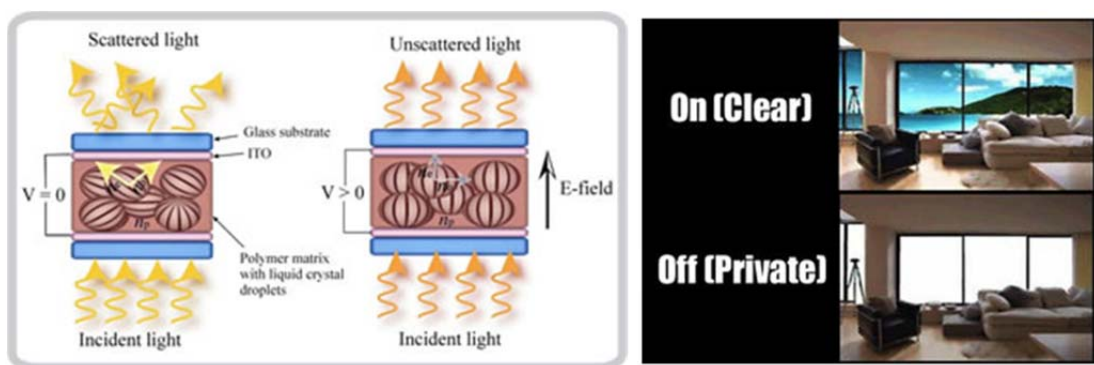


그림 1. 고분자분산 액정(PDLC)의 구조 및 구동원리, 관련기술이 적용된 사례

고분자 분산 액정 방식의 전기 광학적 특성은 액정 입자들과 고분자 매트릭스와의 친화성, 액정 입자의 크기 및 형상, 균일도에 따라 달라진다. 개발 초기에는 균일 혼합 용액을 서서히 냉각시키거나 용매를 증발시켜 복합필름을 제조하였으나 형상 및 중합 조건 제어에 따른 필름의 성능 향상이 증명되면서 단량체의 중합에 의한 상분리 유도법이 현재 널리 적용되고 있다. 필름 내에서 액정 입자의 안정성을 향상시키기 위하여 poly(methyl methacrylate), polycarbonate, branched polyacrylate, polyvinyl alcohol, polystyrene, polydimethylsiloxane, polysulfone 등 다양한 고분자를 매트릭스로 사용하여 필름을 제조하였다. 빛이나 열에 의한 고분자 네트워크 형성은 주로 에폭시 수지, 아크릴 단량체, 폴리에스터를 사용하였다. 최근에는 새로운 구조의 매트릭스, 액정, 액정 첨가물을 조합하여 복합막의 광 투과도, 응답시간, 구동전압, 안정성을 향상시키고자 시도하고 있다. 2007년에는 무기 나노 입자를 도핑 시킨 후 광투과도와 열 안정성을 향상시킨 결과를 발표하였고 2013년에는 키토산이 들어간 친환경 PDLC 가 소개된 바 있다. 반응기를 사슬 말단에 가지고 있는 반응성 액정(reactive mesogens, RM)은 중합에 따른 수축(shrinkage)이 적고 액정이 지닌 고유의 전기적 광학적 특성을 유지할 수 있기 때문에 매트릭스 소재로 주목을 받고 있다. 대면적의 이방성 네트워크 메조 구조를 쉽게 제어할 수 있기 때문에 디스플레이용 광학부품이나 유기반도체 제조에 적극적으로 활용되고 있다. 반응성 액정을 매트릭스로 사용한 PDLC 필름의 경우 회복력이 빠르고 감쇄 시간(decay time)을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 배열된 상태에서 광중합 시킨 PDLC 필름에 남아있는 액정 분자들은 수직하게 배향된 상태가 유지되므로 보통 상태에서도 높은 투명도를 보인다. 기존 PDLC 제조에 사용되었던 단량체에 반응성 액정을 일정량 첨가하면 흐림(haze) 현상을 조절할 수 있다. 그러나 액정과 고분자 매트릭스 사이에 친화도가 증가하면서 구동 전압이 올라갈 수 있다. 소재 개발 외에도 전자파(electric field)가 아닌 탄성 표면파(surface acoustic waves)에 의해 구동되는 스마트 윈도우 시스템이 개발되어 디바이스를 소형화 시킬 수 있는 기반을 마련하였다. 전극으로 쓰이는 전도체의 경우 ITO(Indium Tin Oxide)가 널리 사용되고 있지만 수요의 급증에 따른 가격 상승과 높은 제조비용, 그리고 유연하지 못한 성질 때문에 새로운 소재를 도입하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 국내 고분자/액정 복합 필름 개발에 대한 연구는 한국과학기술연구원, 한국화학연구원을 비롯한 연구기관과 학교 위주로 진행되었으나, 1999년 (주)디엠디스플레이사에서 3 차원 액정 기술을 적용시켜 대비비 (contrast)와 반응속도를 크게 향상시킨 스마트 윈도우를 개발하였다.

•쌍안정성 콜레스테릭 액정(Bistable Cholesteric Liquid Crystal, BiCh-LC)

쌍안정 콜레스테릭 액정(BiCh-LC) 방식은 전력을 차단하여도 투명, 불투명 상태가 그대로 유지될 수 있는 에너지 절약형 기술이다. 안정한 액정 상태가 2 개 이상 존재하므로 한 번 에너지를 가하고 난 후 추가적으로 에너지를 가하지 않아도 변환된 이미지는 계속 유지 될 수 있다. 그림 2 에서 보여주는 바와 같이 보통의 상태에서 콜레스테릭 액정들은 기판과 평행하게 일정한 간격의 피치(pitch)를 만들면서 나선형으로 꼬여있는 수평(planar) 상태이고 피치의 길이에 따라 선택적으로 빛을 반사하여 특정한 색을 구현하게 된다. 수평 상태에서 낮은 전압을 인가하면 Focal conic 상태로 배열이 전환되는데 피치는 유지하고 있지만 각각의 회전축들이 무질서하게 배열되어 있어 입사되는 빛은 산란, 회절을 일으키고 불투명한 상태로 바뀌게 된다. 더욱 높은 전압을 인가하면 꼬여있는 상태가 풀리면서 피치가 사라지고 액정분자들은 기판과 수직하게 배향하면서 투명한 상태로 전환된다(homeotropic state). 이후 전압을 천천히 낮추면 속도에 따라 수평(planar) 또는 Focal conic 상태로 되돌아오고 이때 각각의 안정성은 유지된다.

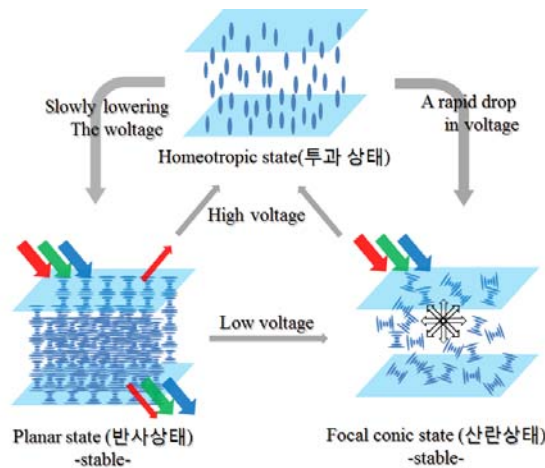


그림 2. 쌍안정성 콜레스테릭 액정(BiCh-LC) 복합필름의 기본 구조와 외부 전압에 따른 분자들의 배향 및 광학적 특성 변화.

디스플레이와 반도체 분야 위주로 개발되어 온 스마트 윈도우 기술은 건축 및 자동차 산업 분야로 확대되어 실용화 가능성을 시험해 보고 있는 단계이며, 건축 및 수송 분야에서도 에너지 절감 및 고기능성 부여를 위한 미래형 기술로 주목을 받고 있다. 넓은 glazing 을 장착하려는 추세가 가속화되고 있는 자동차 산업에서 에너지의 효율적 이용과 실내 사생활 보호, 쾌적한 환경 유지 등이 중요한 관심사로 떠오르면서 가까운 시일 내에 지능형 자동차의 핵심 부품으로 성장할 것으로 예상된다. 또한 감성이

소비자의 선택에 있어 중요한 기준으로 등장하면서 software 가 융합된 새로운 패러다임으로 시장을 형성할 것으로 보인다. 그 동안 국내 완성차업체, 전자제품 개발업체, 연구기관에서는 독자적인 기술 확보를 위해 많은 노력을 기울여 왔으나 아직은 가능성을 확인하는 수준에 머물러 있다. 장착에 따른 안전성과 경제성 확보, 제품 사양에 대한 합리적인 검토, 경량 플라스틱 대체 소재 개발, 대면적화 공정 개발 등 당면한 문제들이 해결된다면 머지않아 대중화되어 확대 적용될 수 있을 것으로 예상된다.