

자동차용 스마트 윈도우 기술 개발 동향 및 액정 소재의 응용

Technological Advances and Applications of Liquid Crystalline
Materials for Automotive Smart Window

김희수¹ · 김대윤¹ · 오미혜² · 강신웅³ · 김남일² · 정광운¹

Huisu Kim¹ · Dae-Yoon Kim¹ · Mee-Hye Oh² · Shin-Woong Kang³ · Namil Kim² · Kwang-Un Jeong¹

¹Department of Polymer-Nano Science and Technology, Chonbuk National University,
567 Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea

²Smart Materials R&D Center, Korea Automotive Technology Institute,
Pungse-Myeon, Cheonan, Chungnam 330-912, Korea

³Department of BIN Fusion Technology, Chonbuk National University,
567 Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea
E-mail: swkang@jbnu.ac.kr, nikim@katech.re.kr, kujeong@jbnu.ac.kr

1. 서론

자동차 산업은 첨단 기술의 총 집합체로서 기계 분야뿐만 아니라 전자, 화학, 에너지, 환경, 레저 시장에도 영향력이 큰 산업이다. 최근에는 자원 고갈 문제와 환경 규제 강화, 사생활 보호 및 삶의 질에 대한 관심이 증가하면서 고효율, 안전성, 편의성이 중요한 화두로 등장하고 있으며 완성차 업체에서는 부품 제조 기술의 향상을 통해 이를 충족시키고자 시도하고 있다. 그 일례로 에너지 효율을 향상시키고 감성과 기능성을 동시에 만족시킬 수 있는 스마트 윈도우(smart window) 기술이 큰 주목을 받고 있다. 스마트 윈도우란 외부에서 유입되는 빛의 투

Author



김희수

2013 전북대학교 고분자나노공학과 (학사)
2013-현재 전북대학교 고분자나노공학과 (석사과정)



오미혜

1992 홍익대학교 화학공학과 (학사)
1994 홍익대학교 화학공학과 (석사)
2008 충북대학교 화학과 (박사)
1994-현재 자동차부품연구원 스마트소재 연구센터 센터장



강신웅

1990 부산대학교 화학과 (학사)
1992 한국과학기술원 화학과 석사
1992-1997 삼성중합기술원/삼성전자 연구원
2002 Kent State Univ. (LCI)
화학물리학 박사
2002-2005 Kent State Univ. (LCI/Physics) (박사후연구원)
2005-2009 Kent State Univ. (LCI/Physics), Senior Research Scientist
2009-2011 Kent State Univ. (Physics Department), Adjunct Professor
2011-현재 전북대학교 BIN 융합공학과 부교수



김대윤

2010 전북대학교 고분자나노공학과 (학사)
2012 전북대학교 고분자나노공학과 (석사)
2013-현재 전북대학교 고분자나노공학과 (박사과정)



김남일

2001 한남대학교 화학공학과 (학사)
2003 광주과학기술원 신소재공학과 (석사)
2010 Univ. of Akron 고분자공학과 (박사)
2010-2011 Vanderbilt Univ. (박사후연구원)
2011-현재 자동차부품연구원 선임연구원



정광운

1998 전남대학교 정밀화학공학과 (학사)
2000 광주과학기술원 신소재공학과 (석사)
2005 Univ. of Akron, Polymer Science (박사)
2005-2006 Maurice Morton Institute of Polymer Science (박사후연구원)
2006-2007 MIT 재료공학과 (박사후연구원)
2007-현재 전북대학교 고분자나노공학과 부교수

과도를 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 자동차의 고부가가치화를 위해 활발한 응용 전개가 이루어질 것으로 기대된다.

자동차용 스마트 윈도우는 운전석 및 조수석 유리, 선루프, 선바이저 이외에도 광학적 변조 효과가 요구되는 부품에 적용될 수 있다(그림 1). 에너지 절감형 스마트 윈도우의 기능이 태양광 투과도의 능동적 조절을 통해 이루어진다는 점과 태양전지와와의 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 energy laboratory) 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 있다.¹⁻⁵ 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 특집에서는 가까운 시일내에 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.



그림 1. 스마트 윈도우가 적용된 자동차 부품의 예.⁶⁻¹⁰

2. 본론

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 절에서는 전기 변색 방식에 기반을 둔 스마트 윈도우 개발에 대한 내용만 언급하였다. 헤드업 디스플레이 방식은 운전자의 시야를 방해하지 않으면서 주행에 필요한 정보를 제공할 수 있도록 전면 유리에 적용되고 있으며, 외부 전기장에 대한 응답속도가 빠르고 투과율 조절이 우수한 고분자/액정 복합필름 방식과 분극 입자 방식은 에너지 절감 및 사생활 보호를 목적으로 개발이 진행 중이다. 전기 변색 방식의 경우 다른 방식에 비해 내구성 측면에서는 유리하지만 응답속도가 느리고 제조비용이 높아 소형 눈부심 방지용 후사경(rear-view mirror)에 한정되어 활용되고 있다. 스마트 윈도우에 적용되고 있는 기술의 특징을 표 1에 정리하였다.^{11,12} 2012년 Nanomarkets에서 발행된 'Smart Windows Market 2010' 보고서에 의하면 스마트 윈도우 시스템에서 제기되고 있는 문제점들을 해결할 수 있는 진보된 기술의 등장과 브릭스(브라질, 러시아, 인도, 중국) 주도의 자동차 시장 성장으로 인하여 관련 산업은 빠르게 성장할 것으로 보이며 2017년에는 약 60억 달러 이상의 매출을 창출할 것으로 예상되고 있다.¹³⁻¹⁸

2.1 헤드업 디스플레이(Head Up Display, HUD)

헤드업 디스플레이 기술은 자동차의 전면 유리에 주행 정

표 1. 스마트 윈도우 개발에 적용되는 기술 및 특성^{11,12}

	HUD	고분자/액정 복합필름		EC	SPD
		PDLC	BiCh-LC		
원리	이미지 투사	광산란	광산란, 선택적 파장반사	광흡수	광산란
주요 소재	-	nematic LC	cholesteric LC	WO ₃ /EL/PB 유기물	분극입자
구동전압 (V)	-	AC 30-100	AC 30-70	DC 1-3	AC 20-150
응답속도	-	~10 msec	1-30 msec	~1 min	~100 msec
시계	-	우수	우수	양호	양호
태양광 평균 투과율 (%)	-	70~80	10~80	5~80	5~70

보나 주변 상황에 대한 정보를 표시하여 안전성과 성능을 동시에 향상시킨 시스템을 말한다. 1960년대 항공기 조종사의 시계 확보와 고속 비행 중 필요한 정보를 전달해 줄 목적으로 개발이 시작되었으나 최근에는 자동차 사고 방지와 운전 효율 향상을 위한 목적으로 그 활동영역이 넓어지고 있다. 운전자의 시각적 방해를 최소화 하면서 계기판(속도, 주행거리, 연료 잔량, RPM 등)과 주변 장애물에 대한 정보를 쉽게 파악할 수 있기 때문에 운전자의 주의 분산에 따른 교통사고를 미연에 방지할 수 있다.

HUD 장치는 크게 LCD 패널, 백라이트 유닛, 반사 렌즈로 구성되어 있다(그림 2).^{19,23} 내부 시스템에서 전달되는 주행 정보를 디스플레이가 가능한 데이터로 변환되는 과정을 거친 후, 생성된 이미지를 광원을 통해 투사시키면 반사와 오목거울을 거치면서 상이 확대되고 시야에 들어오게 된다. 이때 앞쪽으로 기울어진 유리창 표면에 이미지가 나타나는 것이 아니라 운전자의 눈과 거의 수직 상태로 비쳐 마치 영상이 떠있는 것처럼 느껴진다. 디스플레이 소자로 개발 초기에는 CRT가 주로 사용되었으나 1990년대 이후부터 트랜지스터 액정(TFT-LCD)을 사용하여 영상을 표시하고 있다. 가까운 미래에는 이보다 광효율이 우수한 아몰레드(AMOLED) 방식으로 대체될 것으로 보인다. 전면 유리 전 영역에 걸쳐 다양한 정보를 표시할 수 있는 디스플레이 개발이 최종적인 목표지만 이를 위해서는 곡률에 대한 광학적 설계와 이중상 생성으로 인한 흐릿함(초점), 낮은 해상도와 시야각의 협소함 문제 등이 우선 해결돼야 한다.

헤드업 디스플레이(HUD) 기술이 탑재된 차종이 이미 출시되어 있으며 대표적인 완성차 업체로는 GM, BMW, Toyota, PSA Peugeot 등을 들 수 있다. GM사는 1988년 세계 최초로 Cultclass Supreme 모델에 HUD 기술을 적용하였고, 1998년에는 Chevrolet Corvette C5에 TFT-LCD 기술을 도입하면서 선명한 컬러 디스플레이를 구현하였다. Cadillac의 간판 모델인 De Ville은 어둠 속에서도 물체를 식별할 수 있

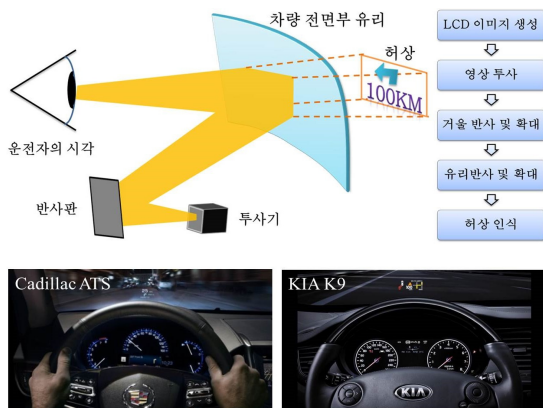


그림 2. 헤드업 디스플레이(HUD) 방식의 구성 및 동작 원리, 관련 기술이 적용된 사례.²³⁻²⁵

는 나이트 비전(night vision) 장치를 2000년형 모델부터 도입함으로써 야간 운전 시 발생할 수 있는 사고를 방지할 수 있도록 설계하였다(그림 2). 비록 GM에 비해 4년 늦게 개발에 착수하였으나 BMW사는 HUD 부분에서 가장 앞선 기술력을 보유한 것으로 알려져 있다. 2003년 유럽의 완성차 업체 중 최초로 '5시리즈'에 HUD를 탑재한 이후, '3시리즈'와 '6시리즈'로 적용을 확대하고 있다. 2011년 말에는 전면 유리 대부분을 활용한 차세대 HUD 기술을 시연한 바 있다. Toyota Lexus사에서는 운전대에 장착된 버튼을 이용하여 전면 유리에 비치는 영상의 위치와 밝기를 자유롭게 조절할 수 있도록 설계하였고, PSA Peugeot사에서는 차량 속도, 내비게이션 등 주행 정보를 전면 유리에 투영시킨 장치를 탑재해 판매하고 있다. Mercedes-Benz사에서는 2015년에 출시되는 'S클래스'와 'C클래스' 모델에 HUD를 장착할 예정이다. 해외 완성차 업체에서는 HUD를 장착한 차량의 비중이 점차 증가하는 추세이나 국내에서는 여러 가지 요인으로 인하여 보급화가 아직은 미진한 상황이다. 2012년부터 기아자동차의 K9 모델에 HUD 장치가 탑재되어 차량 속도, 도로 주행 시 경계 사항, 내비게이션 방향 표시, 차선이탈 정보 안내와 같은 정보를 제공하고 있다(그림 2).

2.2 전기 변색 방식(Electrochromic, EC)

전기 변색은 전기화학적 외부 자극에 의해 착색(coloring)과 탈색(bleaching)이 가역적으로 일어나는 현상을 말한다. 자연광의 흡수를 이용하기 때문에 눈을 부시게 하거나 어색함을 느끼는 것이 없고 시야각 의존성이 적으며 소비전력이 낮은 장점이 있다. 현재 대형 건물의 에너지 절감이나 자동차의 눈부심 방지 목적으로 응용되고 있으나 정보 제공용 디스플레이로도 활용이 기대되고 있다. 자동차용 변색 거울은 하절기에는 고온 다습하고 동절기에는 저온의 환경에서 구동해야 하므로 넓은 동작 온도 범위를 가져야 하고 고온 다습한 하절기 환경에서 열화 없이 유지될 수 있어야 한다.

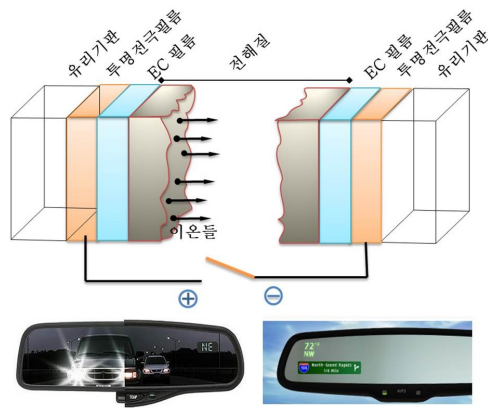


그림 3. 전기 변색 방식(EC)의 구동 원리 및 관련 기술이 적용된 자동차용 후사경.^{9,15}

용 대형 창호 개발에는 성공하였으나 경제성이 떨어져 대중들에게 보급화하는 데에는 실패하였다.

2.4 고분자/액정 복합필름

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

2.4.1 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 매트릭스와의 굴절률 차이로 인해 흡수된 빛이 산란되지만 전기를 인가(on-state)하면 입자들이 규칙적으로 배향되고 굴절률의 일치를 유도하여 투명해진다(그림 6).^{16,30-33} 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 있으며 센서 부착에 의해 터치스크린 기능까지 수행할 수 있다.

일반적으로 PDLC 셀은 고분자 매트릭스와 액정, 기판, 투명전극으로 구성된다(그림 6). LCD에서 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.

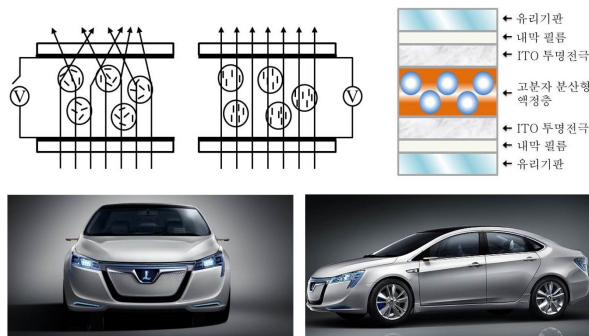


그림 6. 고분자분산 액정(PDLC)의 구조 및 구동원리, 관련기술이 적용된 사례.^{16,34}

하지만 보는 각도에 따라서 흐림(haze) 현상이 발생할 수 있고 주변 온도에 따라 성능이 저하될 수 있다. 또한 투명한 상태를 유지하기 위해서는 연속적인 전압의 공급을 필요로 하기 때문에 3.5~15.5 W/m²의 전력이 소모된다.

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.^{30,31,35-40} 2007년에는 무기 나노 입자를 도핑시킨 후 광투과도와 열 안정성을 향상시킨 결과를 발표하였고 2013년에는 키토산이 들어간 친환경 PDLC가 소개된 바 있다.^{41,42}

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.⁴³⁻⁴⁵ 대면적의 이방성 네트워크 메조 구조를 쉽게 제어할 수 있기 때문에 디스플레이용 광학 부품이나 유기 반도체 제조에 적극적으로 활용되고 있다. 반응성 액정을 매트릭스로 사용한 PDLC 필름의 경우 회복력이 빠르고 감쇄 시간(decay time)을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.⁴⁶⁻⁴⁸ 배열된 상태에서 광중합 시킨 PDLC 필름에 남아있는 액정 분자들은 수직으로 배향된 상태가 유지되므로 보통 상태에서도 높은 투명도를 보인다.^{46,49} 기존 PDLC 제조에 사용되었던 단량체에 반응성 액정을 일정량 첨가하면 흐림(haze) 현상을 조절할 수 있다.⁵⁰⁻⁵² 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.⁵³ 전극으로는 ITO(indium tin oxide)가 널리 사용되고 있으나 수요의 급증에 따른 가격 상승과 높은 제조비용, 그리고 유연하지 못한 성질 때문에 새로운 소재를 도입하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다.^{54,55} 국내 고분자/액정 복합 필름 개발에 대한 연구는 한국과학기술연구원, 한국화학

연구원을 비롯한 연구기관과 학교 위주로 진행되었으나, 1999년 ㈜디엠티스플레이사에서 3차원 액정 기술을 적용시켜 대비비(contrast)와 반응속도를 크게 향상시킨 스마트 윈도우를 개발하였다.

PDLC 방식이 자동차 부품으로 적용된 사례는 거의 없지만 에너지 효율 및 사생활 보호 기능이 중요시되면서 관련 기술에 대한 관심은 꾸준히 증가하고 있다. 대만의 완성차 업체인 Luxgen사에서는 2011년 상하이 모터쇼에서 'Neora 컨셉카'를 공개하였는데 PDLC 기술을 파노라마 선루프에 적용시켜 빛의 투과도를 자유롭게 조절할 수 있도록 설계하였다(그림 6).

2.4.2 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 2개 이상 존재하므로 한번 에너지를 가하고 난 후 추가적으로 에너지를 가하지 않아도 변환된 이미지는 계속 유지될 수 있다. 그림 7에서 보여주는 바와 같이 보통의 상태에서 콜레스테릭 액정들은 기관과 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.^{12,56,57} 더욱 높은 전압을 인가하면 꼬여있는 상태가 풀리면서 피치가 사라지고 액정분자들은 기관과 수직하게 배향하면서 투명한 상태로 전환된다(homeotropic state). 이후 전압을 천천히 낮추면 속도에 따라 수평(planar) 또는 focal conic 상태로 되돌아오고 이때 각각의 안정성은 유지된다.

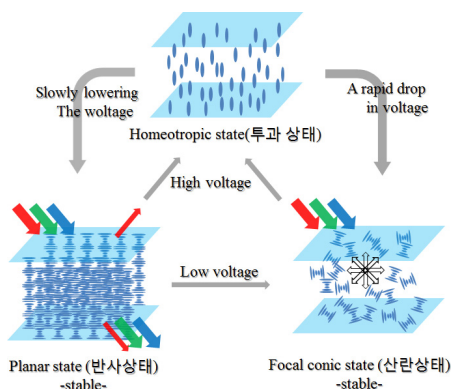


그림 7. 쌍안정성 콜레스테릭 액정(BiCh-LC) 복합필름의 기본 구조와 외부 전압에 따른 분자들의 배향 및 광학적 특성 변화.^{12,56,57}

일반적으로 focal conic 상태에서는 빛의 산란이 일어나지만 도메인의 크기에 따라 입사 파장파가 모두 투과하는 투명 상태를 유도할 수 있다. 즉, 특정 색을 나타내는 투과도 조절이 가능한 반투과 상태와 투명 상태를 쌍안정 특성으로 조절할 수 있다. Homeotropic 상태에서 콜레스테릭 필름은 투명 상태를 나타내지만 무전계 상태에서 안정성이 없으므로 쌍안정 상태에 응용되지 못하며 단지 투과/차단 상태의 스위칭 단계에서 중간 상태로 이용된다. 따라서 상기 수평(planar) 및 focal conic 상태를 안정화시켜 반사/투과 모드 또는 투과/산란 모드의 에너지 절감형 스마트 윈도우 실현이 가능하다. 그림 8은 쌍안정성 콜레스테릭 윈도우의 스위칭 사이클을 보여주며 사이클상 각 포인트는 메모리 상태를 나타낸다. 현재 쌍안정성 액정은 플렉서블 디스플레이 개발을 위해 주로 응용되고 있으나 전력소모를 최소화하면서 태양빛의 흡수(absorption), 반사(reflection), 산란(scattering)을 조절할 수 있는 특징을 이용한다면 전기자동차 및 연료전지 자동차의 에너지 효율 향상에도 적합한 기술로 판단된다.

3. 결론

디스플레이와 반도체 분야 위주로 개발되어 온 스마트 윈도우 기술은 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 glazing을 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 software가 융합된 새로운 패러다임으로 시장을 형성할 것으로 보인다. 그동안 국내 완성차업체, 전장품 개발업체, 연구기관에서는 독자적인 기술 확보를 위해 많은 노력을 기울여 왔으나 아직은 가능성을 확인하는 수준에 머물러 있다. 장착에 따른 안전성과 경제성 확보, 제품 사양에 대한

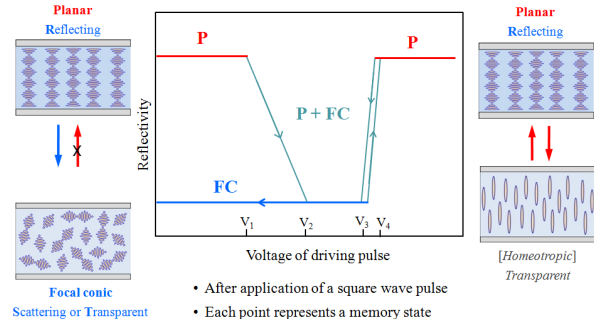


그림 8. 쌍안정성 콜레스테릭 스마트 윈도우의 인가전압에 따른 반사도 변화 및 스위칭 특성.^{58,59}

합리적인 검토, 경량 플라스틱 대체 소재 개발, 대면적화 공정 개발 등 당면한 문제들이 해결된다면 머지않아 대중화되어 소형차에도 확대 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. S. C. Sekhar and K. L. C. Toon, *Energ. Buildings*, **28**, 307 (1998).
2. C. M. Lampert, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **52**, 207 (1998).
3. S. K. Deb, *National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-590-28116* (2000).
4. R. C. G. M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, and J. L. M. Hensen, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **25**, 483 (2013).
5. J. Ebisawa and E. Ando, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **3**, 386 (1998).
6. <http://www.gm.com>.
7. <http://www.dmdisplay.com>.
8. <http://www.ferrari.com>.
9. <http://www.gentex.com>.
10. <http://www.bmw.com>.
11. 유병석, *설비저널*, **8**, 23 (2002).
12. D.-K. Yang, X.-Y. Huang, and Y.-M. Zhu, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **27**, 117 (1997).
13. NanoMarkets, *Smart Windows Markets 2012*, Report: **Nano-515** (2012).
14. P. Tinker, R. Azuma, C. Hein, and M. Daily, *Diagnosis and Virtual Reality in the Automotive Industry*, **29**, 367 (1996).
15. C. G. Granqvist, A. Azens, A. Hjelm, L. Kullman, G. A. Niklasson, D. Rönnow, M. S. Mattsson, M. Veszelei, and G. Vaivars, *Sol. Energy*, **63**, 199 (1998).
16. G. Spruce and R. D. Pringle, *Electr. Commun. Eng.*, **4**, 91 (1992).
17. C. Bechinger, S. Ferrere, A. Zaban, J. Sprague, and B. A. Gregg, *Nature*, **383**, 608 (1996).
18. C. G. Granqvist, P. C. Lansaker, N. R. Mlyuka, G. A. Niklasson, and E. Avendano, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 2032 (2009).
19. 김경호, 조성익, 박종현, *전자통신동향분석*, **23**, 153 (2008).
20. M. M. Trivedi and S. Cheng, *Computer*, **40**, 60 (2007).
21. Y.-C. Liu and M.-H. Wen, *Int. J. Hum.-Comput. St.*, **61**, 679 (2004).
22. S. Smith and S.-H. Fu, *Displays*, **32**, 58 (2011).
23. Y.-C. Liu, *Displays*, **24**, 157 (2003).
24. <http://www.cadillac.com>.
25. <http://www.kia.com>.
26. G. Gunbas and L. Toppare, *Chem. Comm.*, **48**, 1083 (2012).
27. D. Barrios, R. Vergaz, J. M. Sanchez-Pena, C. G. Granqvist, and G. A. Niklasson, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **111**, 115 (2013).
28. R. Vergaz, J. M. Sánchez-Pena, D. Barrios, C. Vázquez, and P. Contreras-Lallana, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 1483 (2008).
29. C. M. Lampert, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **76**, 489 (2003).
30. 김병규, 홍은영, 김선희, *고분자과학과 기술*, **7**, 738 (1996).
31. M. Mucha, *Polym. Sci.*, **28**, 837 (2003).
32. J. W. Doane, A. Golemmé, J. L. West, J. B. Whitehead Jr., and B.-G. Wu, *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Inc. Nonlinear Opt.*, **165**, 511 (1988).
33. Y. S. No and C. W. Jeon, *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**, 938 (2008).
34. <http://www.luxgen-motor.com>.
35. J. Zhou, D. M. Collard, J. O. Park, and M. Srinivasarao, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 9980 (2002).
36. O. V. Yaroshchuk and L. O. Dolgov, *Opt. Mater.*, **29**, 1097 (2007).
37. P. Formentin, R. Palacios, J. Ferre-Borrull, J. Pallares, and L. F. Marsal, *Synthetic Met.*, **158**, 1004 (2008).
38. J.-P. Bédard-arcand and T. Galstian, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **560**, 170 (2012).
39. F. Z. Elouali, M. Elouali, and U. Maschke, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **561**, 115 (2012).
40. D. Cupelli, F. P. Nicoletta, S. Manfredi, M. Vivacqua, P. Formoso, G. D. Filpo, and G. Chidichimo, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 2008 (2009).
41. M. Jamil, F. Ahmad, J. T. Rhee, and Y. J. Jeon, *Curr. Sci.*, **101**, 1544 (2011).
42. L. Marin, M. Popescu, A. Zabulica, H. Uji-I, and E. Fron, *Carbohydr. Polym.*, **95**, 16 (2013).
43. D. J. Broer, J. Boven, G. N. Mol, and G. Challa, *Makromol. Chem.*, **190**, 2255 (1989).
44. D. R. Cairns, M. Sibulkin, and G. P. Crawford, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2643 (2001).
45. I. Amimori, J. N. Eakin, G. P. Crawford, N. V. Priezjev, and R. A. Pelcovits, *SID Symp. Dig. Tec.*, **33**, 834 (2002).
46. J. W. Lee, S. D. Baek, J. K. Kim, S. J. Choi, F. Ahmad, M. Jamil, and Y. J. Jeon, *Liq. Cryst.*, **41**, 621 (2014).
47. G. D. Filpo, N. Picci, R. Muzzalupo, F. Iemma, F. P. Nicoletta, and G. Chidichimo, *Liq. Cryst.*, **29**, 295 (2002).
48. M. Macchione, D. Cupelli, G. D. Filpo, F. P. Nicoletta, and G. Chidichimo, *Liq. Cryst.*, **27**, 917 (2000).
49. G. D. Filpo, S. Siprova, G. Chidichimo, A. I. Mashin, F. P. Nicoletta, and D. Cupelli, *Liq. Cryst.*, **39**, 359 (2012).
50. S. Pane, M. Caporusso, and H. Hakemi, *Liq. Cryst.*, **23**, 861 (1997).
51. L. C. Chien, C. Lin, D. S. Fredley, and J. W. McCargar, *Macromolecules*, **25**, 133 (1992).
52. N. H. Park, S. A. Cho, J. Y. Kim, and K. D. Suh, *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**, 3178 (2000).
53. Y. J. Liu, X. Ding, S.-C. S. Lin, J. Shi, I. Chiang, and T. J. Huang, *Adv. Mater.*, **23**, 1656 (2011).
54. 황치선, 추혜용, 전황수, 조경익, *전자통신동향분석*, **22**, 46 (2007).
55. F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, *Nat. Photonics*, **4**, 611 (2010).
56. H. H. Liang, C. C. Wu, P. H. Wang, and J. Y. Lee, *Opt. Mater.*, **33**, 1195 (2011).
57. J. W. Doane and A. Khan, *Flexible Flat Panel Displays*, **3**, 331 (2005).
58. Y.-C. Hsiao, C.-T. Hou, V. Y. Zyryanov, and W. Lee, *Opt. Express*, **19**, 23952 (2011).
59. K. Hashimoto, M. Okada, K. Nishiguchi, N. Masazumi, E. Yamakawa, and T. Taniguchi, *SID Symp. Dig. Tec.*, **29**, 897 (1998).