

REVIEW

액정 스마트 윈도우 연구 동향

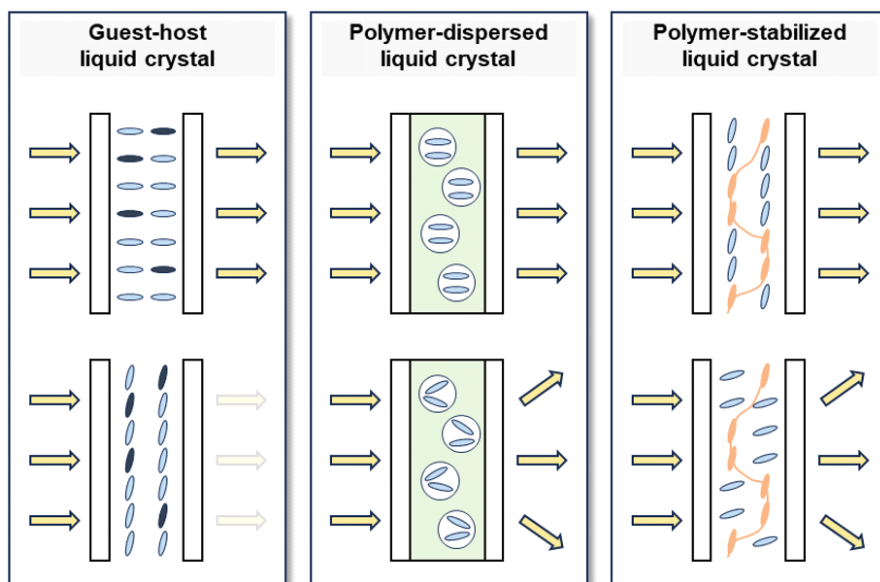
황현성, 조현목, 김세움*

서울과학기술대학교 전기정보공학과

Recent Progress in Liquid Crystal-Based Smart Windows

Hyeon Seong Hwang, Hyun Mok Cho, Se-Um Kim*

Department of Electrical and Information Engineering,
Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea



ABSTRACT

Smart windows can perform energy savings, intelligent lighting, and privacy protection within buildings and their potential applications have extended to next-generation mobility. However, the widespread adoption of smart windows is hindered by challenges related to scalability, cost-effectiveness, and performance reliability. In this context, smart windows based on liquid crystals (LCs) may offer notable advantages such as rapid driving speed and scalability. This review article aims to present the recent research trends in LC-based smart windows.

Key Words: Liquid crystals, Smart windows, Guest-host liquid crystals, Polymer dispersed liquid crystals, Polymer stabilized liquid crystals

*Correspondence: seumkim@seoultech.ac.kr



1. 서론

스마트 윈도우는 투과도를 조절할 수 있는 능동형 창문으로 에너지 절감, 스마트 조명이나 채광과 연계한 실내 조도 조절, 사용자의 사생활 보호, 그리고 능동적 공간 분리와 같은 기능을 수행할 수 있다. 2020년 기준 대한민국 전체 최종 에너지 중 건물 부문이 사용하는 에너지량은 20% 수준이고, 2019년 기준 건물 부문 온실가스 배출량은 전체 배출량의 28%를 차지하고 있다. 에너지 및 탄소배출 절감에 대한 필요가 증대하면서 2000년대 이후부터 스마트 윈도우의 상용화 보급이 진행되고 있다. Global Industry Analysts, Inc의

보고서에 따르면 관련 시장의 규모는 2020년 기준 29억 달러(약 3.6조 원) 수준이고, 매년 20% 이상 성장하여 2027년에는 62억 달러(약 7.8조 원)에 이를 것으로 전망한다. 스마트 윈도우 기술은 건물뿐만 아니라 전기차 및 에어택시와 같은 차세대 모빌리티 분야까지 확장될 수 있는 잠재력이 높다. 특히, 자율 주행 기술이 구현되는 경우 탑승자에게 시각적 편의성을 제공할 수 있는 스마트 윈도우의 중요성이 더 부각될 것이다.

스마트 윈도우는 전기변색(electrochromic, EC) 방식 (Fig. 1(a))[1-5], 분극입자(suspended particle, SP) 방식 (Fig. 1(b))[6-10], 그리고 액정(liquid crystal, LC) 방식 [11] 등으로 구분할 수 있다. 전기변색 방식이나 분극

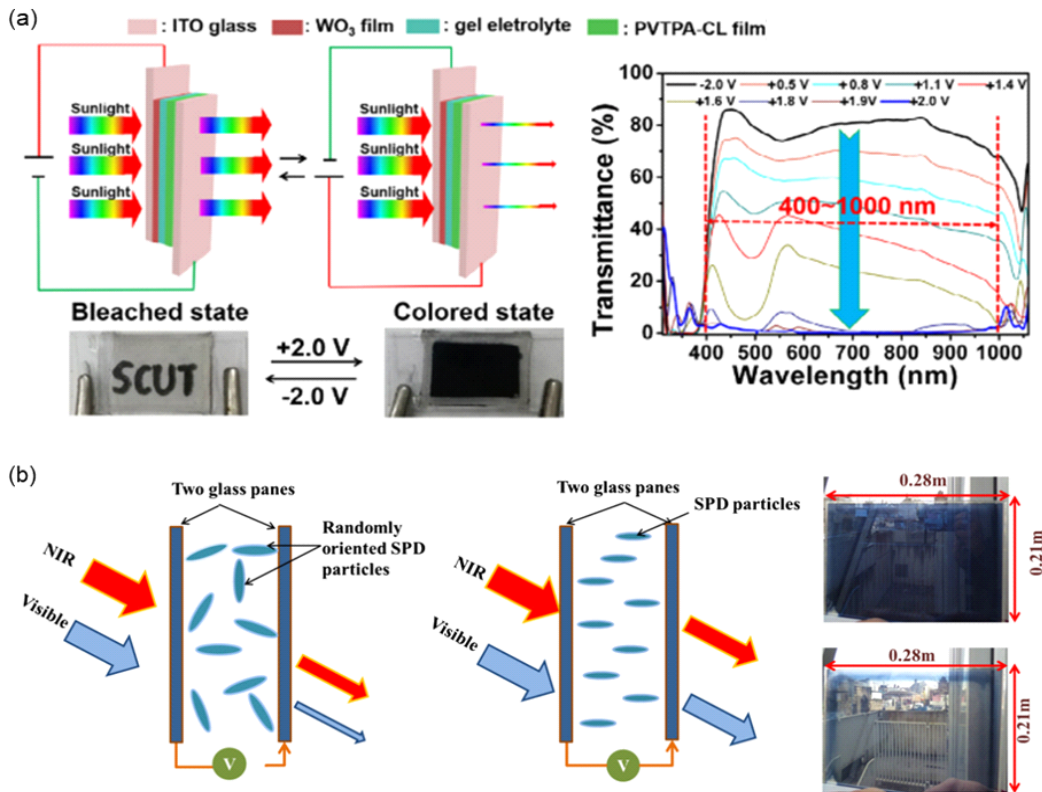


Fig. 1. Examples of smart window technologies. (a) Ambipolar EC smart window for switching between colorless and black state. Adapted with permission from [5]. Copyright 2021, Elsevier. (b) SP-based smart window and its installation in outdoor for heat removal testing under various weather conditions. Adapted with permission from [7]. Copyright 2016, Elsevier.



입사 방식은 빛의 흡수율을 조절하여 투과도를 조절한다. 액정 방식은 게스트-호스트 액정(guest-host liquid crystal, GHLC)을 이용하여 빛의 흡수율을 조절할 수 있고, 또는 입사광을 산란시키는 방식으로 구성할 수도 있다. 산란 방식은 투과하는 빛의 양은 크게 변하지 않으나 직사광의 유입을 억제하여 눈부심 방지 등의 효과를 얻을 수 있다. 상용화된 액정 스마트 윈도우는 대부분 산란 방식을 사용하며, 구동 전압이 70 V 수준으로 다른 스마트 윈도우 기술에 비해 높지만 스위칭 시간은 수십 밀리초 수준으로 매우 빠르다.

스마트 윈도우는 구동 필요 에너지, 투과도 조절 범위, 파장 범위, 구동 속도, 구동 신뢰도 등 다양한 성능을 고려해야 한다. 현재 상용화 수준의 스마트 윈도우 제품들은 대면적화에 어려움이 있고 제작비/유지비가 높은 상황이다. 스마트 윈도우를 더 대중적으로 보급하기 위해서는 현재의 난제를 해결할 수 있는 기술 혁신이 필요하다.

액정 스마트 윈도우는 대면적화가 용이하고 구동 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있어 상용화 기술들의 단점을 보완할 수 있다. 그 밖에도 액정의 광학적 비등방적 특성을 활용하여 빛의 입사각에 따라 광학적 특성이 달라지는 기능을 구현할 수 있는 것은 액정 스마트 윈도우 만의 특징이다[12-13]. 이를 통해 차량의 실내와 같이 사용자의 시야각이 고정되는 환경에서 특정한 각도에서 들어오는 빛에 의한 눈부심 방지를 수행하면서 투과도도 확보할 수 있는 기능을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 액정 스마트 윈도우에 대한 최근 연구 동향을 소개하고 앞으로의 발전 방향에 대해서 기술하고자 한다.

2. 액정 스마트 윈도우 기술의 이해

2.1. 액정 물질의 특성

액정은 1900년도 후반에 사용되기 시작한 단어로 액체와 고체 사이에 존재하는 상을 지칭한다. 액정은 액체의 특성인 유동성과 고체의 특성인 결정성을 동시

에 보유하고 있으며, 결정의 형태는 네마틱(nematic) 상, 스멕틱(smectic) 상, 디스코틱(discotic) 상 등 액정 물질의 종류에 따라서 매우 다양하게 나타난다. 그 중 액정 스마트 윈도우에는 주로 네마틱 상 액정이 활용되고 있다. 네마틱 상은 막대 모양의 분자들이 일정한 방향으로 정렬하고 있는 방향 질서가 있는 형태의 상이다. 액정 물질은 복굴절성을 가져 빛의 진동 방향과 액정 물질의 정렬 방향에 따라 서로 다른 크기의 굴절률을 갖게 된다. 또한 비등방적 유전율을 갖고 있기 때문에 액정 물질에 전계가 인가되었을 때 재배열할 수 있다. 이에 따라 액정 물질의 광축 방향이 달라지면서 입사되는 빛이 느끼는 유효 굴절률이 변한다.

Fig. 2에 스마트 윈도우에 사용되는 대표적인 액정 물질이 나타나 있다. 5CB와 E7은 가장 전형적인 네마틱 액정이다. 특히 E7은 5CB의 네마틱 상 온도 범위를 증가시키기 위해 여러 물질을 혼합하여 만든 액정이다. 카이랄 네마틱 상을 만들기 위해서 네마틱 액정에 R811과 같은 카이랄 도판트를 첨가할 수 있다. RM257과 같은 반응성 메소젠(reactive mesogen)은 액정 상을 지니면서 동시에 가교가 가능한 물질로, 단분자 액정과 혼합하여 사용하며 중합을 거쳐 상안정 액정(polymer-stabilized liquid crystal, PSLC)을 구현하는데 사용할 수 있다.

2.2. 액정 스마트 윈도우의 원리

게스트-호스트 액정의 경우 분극입사 방식과 동작 원리가 유사하다. 분극입사 방식은 용액에 분산되어 있는 불투명 입자의 배열을 전계 인가를 통해 조절하여, 불투명 입자로 가려지는 면적의 크기를 조절한다. 게스트-호스트 액정은 염료가 액정 내부에 첨가되어 있다. 염료가 액정과 유사한 분자 구조를 가지고 있어 액정의 배열 방향에 따라 정렬되고, 전계 인가에 따라 액정 및 염료가 재배열되면서 빛이 도달하는 염료의 면적을 조절한다.

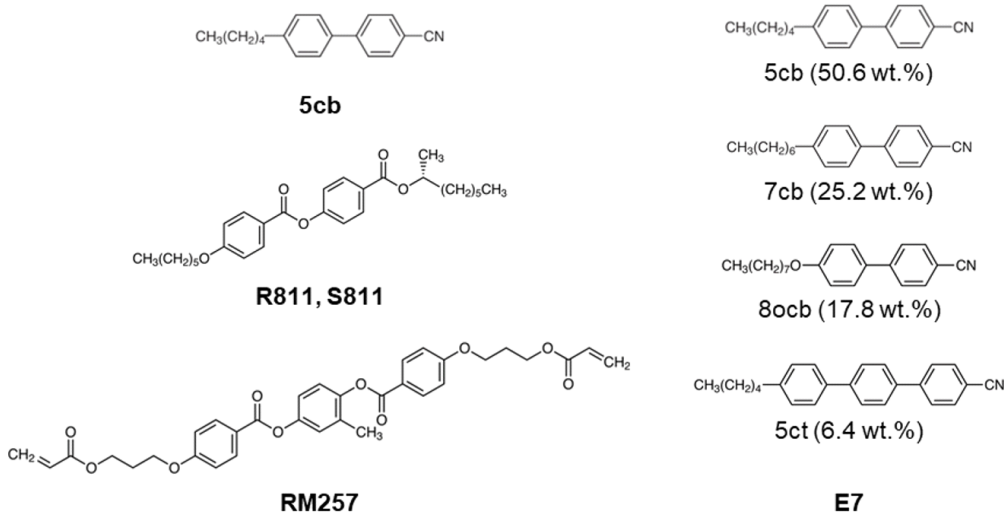


Fig. 2. Chemical structures of liquid crystalline materials for use in smart window applications; the small molecular nematic LC (5CB and E7), the chiral dopant (R811, S811), and the reactive mesogen (RM257).

액정 스마트 윈도우는 전계 인가에 따라 액정 도메인의 굴절률이 변하는 특성을 이용하여 빛을 산란시키는 방식을 사용할 수도 있다. 예를 들어, 고분자 분산 액정 (polymer dispersed liquid crystal, PDLC)은 고분자 도메인이 전계에 대해서 광학적 특성이 변하지 않고, 액정 도메인이 변하는 특성을 이용한다. 특정 전계 상태에서 고분자 도메인과 액정 도메인의 굴절률을 일치시킬 수 있으면 투명한 상태를 만들 수 있고, 전계에 의해 굴절률 분포가 달라지게 되면 빛을 산란시킬 수 있다.

또는 액정 자체의 배열을 공간적으로 다르게 하여 굴절률 차이를 유도할 수 있다. 예를 들어 카이랄 네마틱 상은 네마틱 상이 나선형으로 회전하는 형태의 상으로 주기적인 굴절률의 변화가 나타난다. 카이랄 네마틱 상은 액정의 배향을 통해 나선 축이 한방향으로 정렬되어 있는 평 상태(planar state)가 일반적인 안정 상태이나, 특정 조건의 전계를 인가하게 되면 나선 축의 방향이 무질서하게 변하는 포칼 코닉(focal conic) 상태가 된다. 포칼 코닉 상태는 카이랄 네마틱 상을 유지하고 있으나 나선축의 정렬은 장거리에서 유지되지 않는다. 광학적인 측면으로 봤을 때, 평 상태는 주기적

인 굴절률의 차이로 인해 특정 파장 성분만을 반사시키는 광 밴드갭(photonic bandgap) 구조이다. 포칼 코닉 상태는 광축의 방향이 무작위가 되어 빛의 산란이 일어나게 된다. 이 밖에도 스멕틱(Smectic) 상을 이용한 사례도 있다. 이러한 액정들에 액정성 고분자를 혼합하여 상을 안정시킬 수 있다. 이러한 액정을 상안정 액정이라고 한다. 상안정 액정은 고분자 분산 액정과 달리 액정 도메인과 고분자 도메인이 분리되어 있지 않으며 고분자의 비중이 비교적 낮다. 상안정 액정에 사용하는 액정성 고분자의 종류나 비중에 따라 스마트 윈도우의 구동 특성을 변화시킬 수 있다.

이러한 스마트 윈도우 액정 소재들이 복합적으로 구성되기도 하며, 다양한 첨가제를 함께 활용하여 빛 또는 열과 같은 외부 환경자극의 변화에 대해 자동으로 감응하여 빛을 조절하는 기능을 구현할 수 있다[14-16].

3. 액정 스마트 윈도우의 종류

3.1. 게스트-호스트 액정

게스트-호스트 액정 구조에 첨가되는 염료는 주로



이색성 염료(dichroic dye)로 분자가 네마틱 액정 물질과 유사한 막대 모양을 가지고 있으며, 분자의 장축 방향에 나란한 편광에 대해 높은 흡광도를 보이고 단축 방향에 대해서는 낮은 흡광도를 보인다. 이색성 염료의 배향 방향이 고르게 분포하여 입사하는 모든 편광에 대해 흡광도를 보이게 하면 암상태(black state)를 만들 수 있다. 동일 셀 두께 대비 흡광율을 올리기 위해서 염료의 농도를 높일 수 있으나, 특정 농도 이상에서는 액정과 상 분리가 되거나 액정상이 깨지게 된다. 게스트-호스트 액정에서 이색성 염료의 추출 없이 호스트 물질인 액정의 배향 방향을 따라 정렬되는 농도는 수 무게비 수준이다. 일반적으로 액정 소자에서는 배향막의 사용 없이도 액정 배향이 일정한 범위에서 질서도를 가지게 되기 때문에 이색성 염료의 배향 방향을 고르게 분포시키는 것이 어렵다. 이를 위해서 카이랄 네마틱 액정을 호스트 물질로 이용할 수 있다 (Fig. 3(a))[17-19]. 이때, 나선 주기(helical pitch)를 조절하여 이색성 염료의 분산과 구동 특성을 최적화할 수 있다[18]. 또한, 고분자 분산 액정 구조에서 마이크로 캡슐 구조를 가지는 액정 도메인 내에 액정 배향 방향이 불규칙적인 것을 활용하여 이색성 염료를 포함하는 방법이 있다(Fig. 3(b))[20]. 또한 두 개의 수평 배향 게스트-호스트 액정 셀을 배향 방향이 수직이 되도록 쌓아서 암상태를 달성한 연구도 보고되었다[21].

이색성 염료가 아조벤젠(azobenzene)기를 포함하는 감광성 재료인 경우 염료가 빛에 의해 시스-트랜스(cis-trans) 변환을 하여 투과도 조절을 할 수 있다[22-24]. 일반적인 게스트-호스트 액정이 가시광 영역의 흡광도를 조절할 수 있는 반면에 아조벤젠기의 흡광은 주로 자외선 영역의 단파장 영역에서 진행되기 때문에 가시광 영역에서의 흡광에 의한 투과도 변화는 비교적 적은 편이다. 대신에 분자구조 변환에 의한 액정 배향을 조절하여 빛의 산란을 유도한다. 트랜스 상태에서는 액정 물질과 유사한 막대 구조로 기존에 형

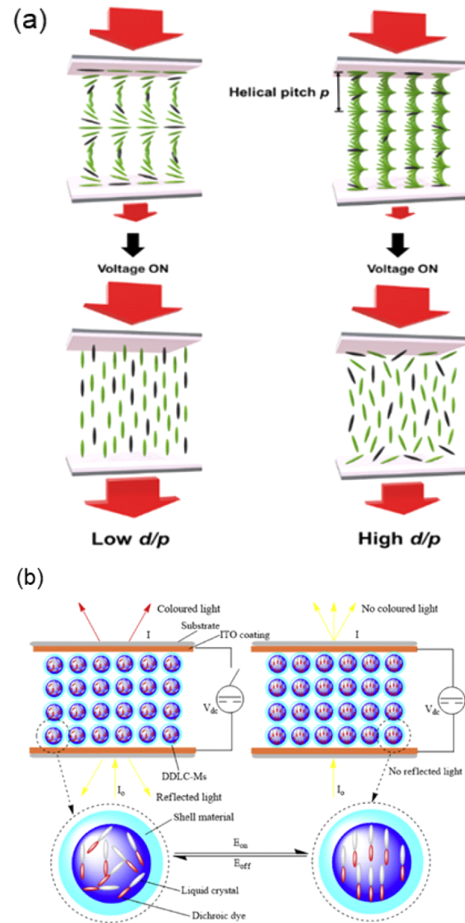


Fig. 3. Smart windows based on guest-host liquid crystals. (a) Chiral guest-host liquid crystals for studying the transmittance trend according to the helical pitch. Adapted with permission from [18]. Copyright 2022, Optica. (b) Guest-host liquid crystal in PDLC structure for stable voltage operation. Adapted with permission from [20]. Copyright 2018, Elsevier.

성된 액정 배열 방향을 유지하지만, 시스 상태에서는 아조벤젠기 근처의 액정 배향이 깨지게 된다. 이때 굴절률 분포가 생기면서 산란이 발생한다. 시스 상으로의 변환이 높은 에너지를 이용하여 빠른 속도로 진행되는 반면에 트랜스 상은 자연 감쇄되어 복원 속도가 느린 편이다.



3.2. 고분자 분산 액정

고분자 분산 액정[25-28]은 주로 광중합 또는 열중합이 가능한 단량체와 액정을 혼합하고 단량체를 중합시킬 때 유도되는 상분리를 이용해 형성된다. 단량체의 비중은 약 40~60 wt.% 내외 수준으로 매우 높으며,

에폭시, 폴리에스터, 아크릴 등 다양한 재료들이 사용되고 있다(Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)).

고분자 분산 액정은 수 마이크로 미터 직경의 액정 도메인이 고분자 도메인에 국소적으로 배치되어 있는 형태이기 때문에 고형 필름 형상을 가진다. 일반적인

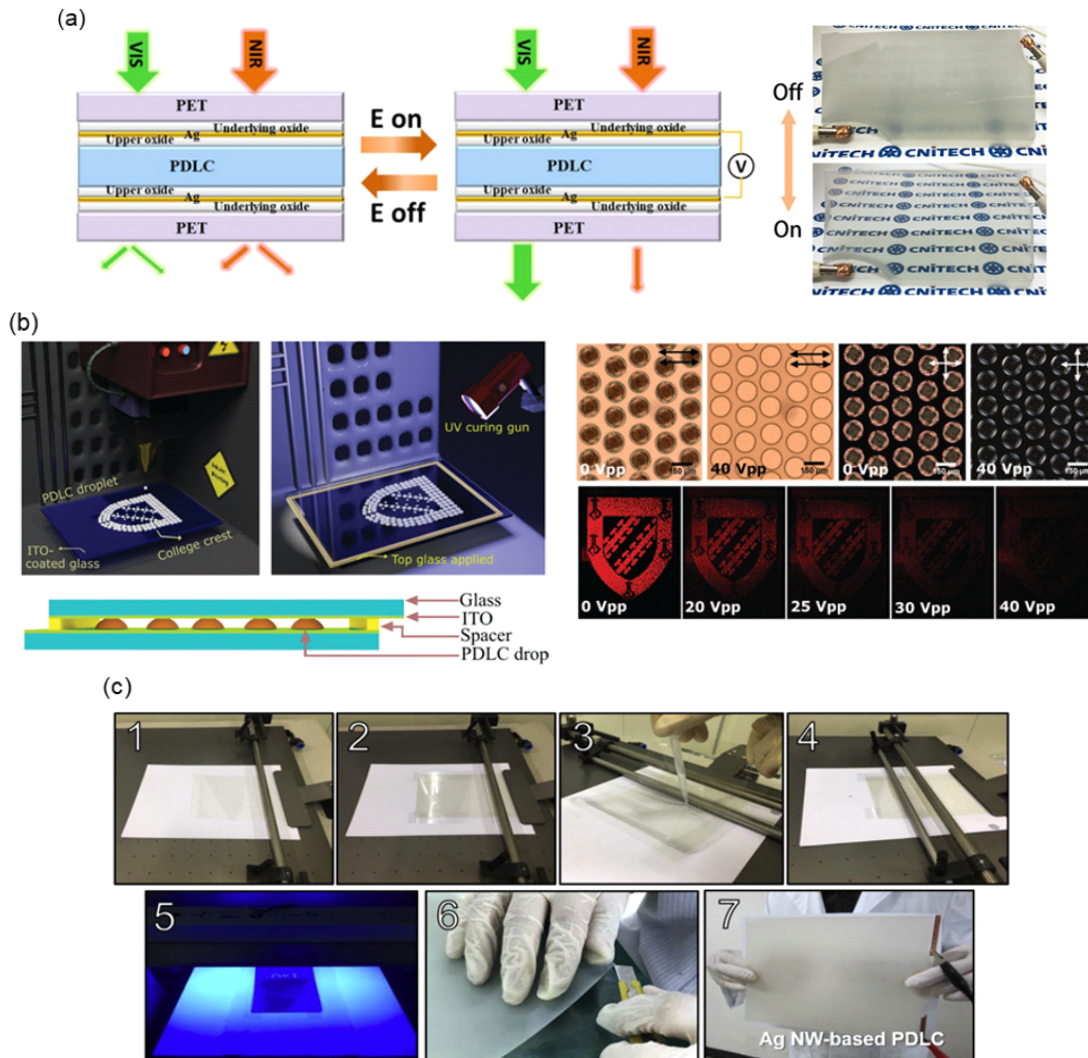


Fig. 4. Smart windows based on PDLCs. (a) Smart window based on PDLC with a high visible transmission and near-infrared heat shielding using $\text{TiO}_2/\text{Ag}(\text{Cu})/\text{TiO}_2$ electrode. Adapted with permission from [27]. Copyright 2019, Elsevier. (b) Spatially patterned PDLCs prepared from drop-on-demand inkjet printing. Adapted with permission from [28]. Copyright 2022, Wiley. (c) Fabrication process of a flexible PDLC-based smart window with slot die coating of silver nanowire and dropping of PDLC. Adapted with permission from [29]. Copyright 2018, Elsevier.



액정 소자와 달리 유리기판을 상/하부에 배치시킬 필요 없이 고분자 분산 액정 필름 표면에 전극을 형성시켜 유연 스마트 윈도우를 구성할 수 있다. 롤-투-롤(roll-to-roll) 공정 및 라미네이팅(lamination)[29]으로 다양한 외부 표면 및 장치에 부착될 수 있는 장점을 가지고 있다(Fig. 4(c)). 유연 소자를 구현하는데 있어 고분자 분산 액정 필름은 유연성 개선이 비교적 용이하다.

고분자 분산 액정에서의 가장 중요한 기술적 이슈는 백상태(white state)의 품질이 고분자 도메인과 액정 도메인 사이의 굴절률 일치에 의해 결정된다는 것이다. 단물질의 혼합으로는 굴절률을 일치시키기 어려워서 여러 종류의 고분자를 혼합하여 사용하거나 첨가제를 추가한다[30]. 그럼에도 불구하고 보는 각도에 따라 액정의 유효 굴절률이 달라지기 때문에 특정 시야각 범위를 벗어나면 백상태에서도 빛의 산란이 발생할 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 특정 각도에서 들어오는 빛만 산란시켜 눈부심 방지 기능을 수행할 수도 있다.

고분자 분산 액정은 반응속도가 일반적인 액정 기반 장치와 비슷한 수십 밀리 초 수준으로 빠른 반면에, 높은 고분자 비중으로 인해 구동 전압이 매우 크다는 단점을 가지고 있다. 전극 및 재료 개선, 새로운 구동법을 활용하여 구동 특성을 개선하기 위한 연구가 수행되고 있다[31-35].

3.3. 상안정 액정

고분자 분산 액정과 달리 상안정 액정은 소량 첨가되어있는 액정성 단량체들이 단분자 액정을 따라 정렬되어있고, 가교를 통해 정렬된 상태로 고분자화 된다[36-40]. 액정성 단량체의 농도가 낮은 경우 뚜렷한 상분리가 나타나지 않고, 따라서 액정 도메인의 형상은 마이크로 캡슐과 같은 형태가 아닌 비정형으로 형성되고 연속적일 수 있다. 고분자 분산 액정에서는 완전히 구별되는 각 도메인 사이의 굴절률 차이를 통해 빛을 산란시킨다면 상안정 액정에서는 고분자 구조가 액정

의 재배열을 방해하여 액정의 불규칙적인 배열을 유도하는 방식으로 산란을 일으킨다. 따라서 액정 모드 및 배향 상태를 다양하게 변조할 수 있으며 이에 따른 다중 모드 구현이 용이해진다[41]. 예를 들어, 카이랄 네마틱 상의 경우, 포칼코닉 상태를 유도하기 위해 패턴된 전극을 사용하거나 구동 주파수를 다르게 하는 등 복잡한 전기 구동 방식을 이용해야 한다[42-45]. 그러나 상안정 상태에서는 단순한 인가 전압 상승을 통해 포칼코닉 상태를 유도할 수 있다[46-47]. 또한 고분자 구조를 이용하여 액정의 표면 배향을 조절할 수 있다[39]. 이를 통해 기존의 고온공정($\sim 200^{\circ}\text{C}$)이 필요한 폴리이미드(polyimide) 기반 배향막 공정을 대체하여 저온 공정이 가능하고 투과도를 더 향상시킬 수 있다.

상안정 액정의 또다른 장점은 기존의 단분자 액정만으로 구성된 소자에서는 특정 상태를 유지하기 위해 전압 인가를 유지해야 하는 반면에, 해당 상태에서 상안정이 되면 인가 전압을 제거하여도 그 상태를 유지할 수 있다는 점이다. 일반적인 고분자 분산 액정에서 전압이 인가되지 않은 상태에서 산란 상태가 되지만 상안정 액정에서는 투명 상태가 되도록 구성할 수 있다. 이러한 경우를 역모드 액정 스마트 윈도우라고 칭하기도 한다. 또한, 고분자의 농도를 매우 낮출 수 있기 때문에(~ 2 wt.%) 구동 전압이 고분자 분산 액정(> 70 V)에 비해 매우 낮아진다($20\sim 30$ V). 그러나 전기변색 스마트 윈도우에 비하면 높은 수준이다(~ 3 V). 낮은 고분자로 인해 겔 형상을 가지고 형태가 고정되어 있지 않다. 따라서 유연 스마트 윈도우를 구성하기가 고분자 분산 액정에 비해 비교적 어려우며, 동일한 이유로 외부 충격에 취약한 문제점을 가지고 있다.

상안정 액정 기반 스마트 윈도우는 주로 네마틱 상과 카이랄 네마틱 상 액정을 이용한다(Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)). 카이랄 네마틱 상의 경우 평 상태에서 액정 방향자가 회전하는 구조로 네마틱 상에 비해 시야각 대비 균일한 특성을 가진다[48]. 단분자, 액정 재료 특

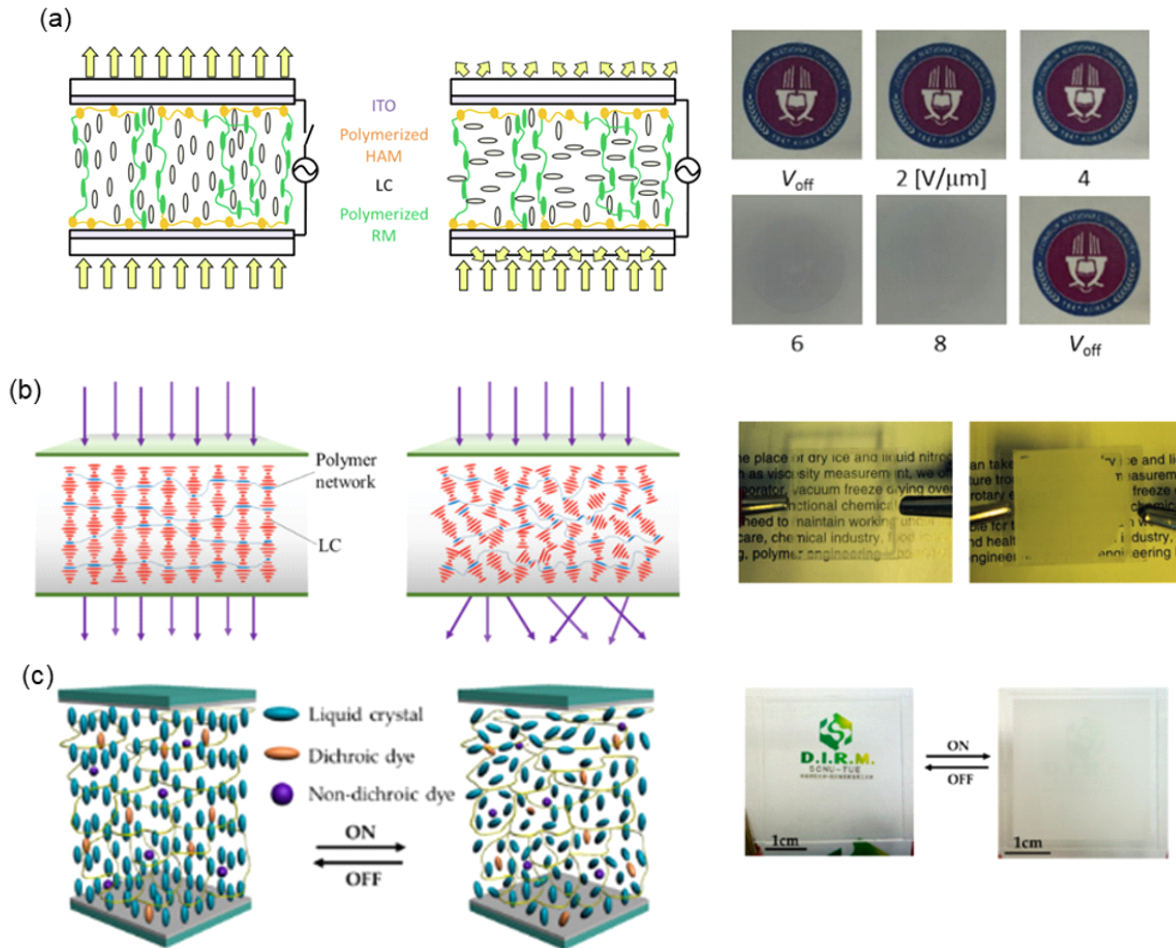


Fig. 5. Smart windows based on PSLCs. (a) Vertical mode nematic liquid crystals prepared using polymerized homeotropic alignment material and reactive mesogen and the demonstration of the haze control. Adapted with permission from [39]. Copyright 2022, Elsevier. (c) Polymer stabilized chiral nematic liquid crystals showing planar state and focal conic state and corresponding optical images. Adapted with permission from [46]. Copyright 2020, Elsevier. (e) Polymer stabilized nematic liquid crystal doped with dichroic and non-dichroic dyes for enhancing the on/off contrast and the demonstration of the haze control. Adapted with permission from [54]. Copyright 2019, MDPI.

성을 조절하거나 첨가제를 활용하여 열 반응성, 광 반응성 등을 구현하거나 전기적 특성을 향상시킬 수 있다[49-52]. 상안정 액정이 고분자 분산 액정과 게스트-호스트 액정에 복합적으로 도입되는 연구들도 수행되고 있다(Fig. 5(c))[53-54]. 이러한 복합 구조에서는 염료의 빛 흡수를 이용하여 투명 상태와 산란 상태의 대비를 증가시킬 수 있다.

4. 액정 스마트 윈도우의 발전 방향

태양광의 총 에너지 중 근적외선 대역의 에너지가 절반정도의 비중을 차지하고 있기 때문에 적외선 투과도를 제어하는 기술이 에너지 조절에 매우 중요하다. 현재 상용화 개발이 이루어진 대부분의 액정 스마트 윈도우 제품들은 고분자 분산 액정을 기반으로 사생활



보호 목적의 가시광 대역 산란 기능을 수행한다. 적외선 대역의 빛을 제어하기 위해서는 적외선 흡수가 가능한 첨가제를 활용한 게스트-호스트 액정이나, 적외선 반사가 가능한 카이랄 네마틱 액정을 이용할 수 있다[52,55-56].

스마트 윈도우를 유연 필름 형태로 구현하면 평판 형태의 유리 기판을 사용하는 일반적인 건물의 외창 뿐만 아니라 다양한 형태의 표면에 적용시킬 수 있다. 이를 위해서는 폴리카보네이트(polycarbonate) 또는 폴리에틸렌(polyethylene) 등의 유연 기판을 활용하고 기존의 인듐산화주석(indium-tin-oxide)을 대체할 수 있

는 유연 투명 전극 개발이 필요하다. 특히 유연 기판을 사용하는 경우 기판과 전극의 접착력이 확보되는 소재를 개발하는 것이 중요하다. 고분자 분산 액정 기반 스마트 윈도우에서 그래핀 또는 탄소 나노튜브(carbon nano tube)같은 탄소 소재나 다양한 금속 나노 입자를 도입하여 유연 스마트 윈도우를 개발하고 있다[34, 57-60]. 고분자 분산 액정뿐만 아니라 일반적인 단분자 액정, 상안정 액정, 그리고 게스트-호스트 액정을 기반으로 한 유연 스마트 윈도우를 개발한 사례들이 보고되었다(Fig. 6)[61-64].

액정 스마트 윈도우 자체의 성능 및 신뢰도 향상에

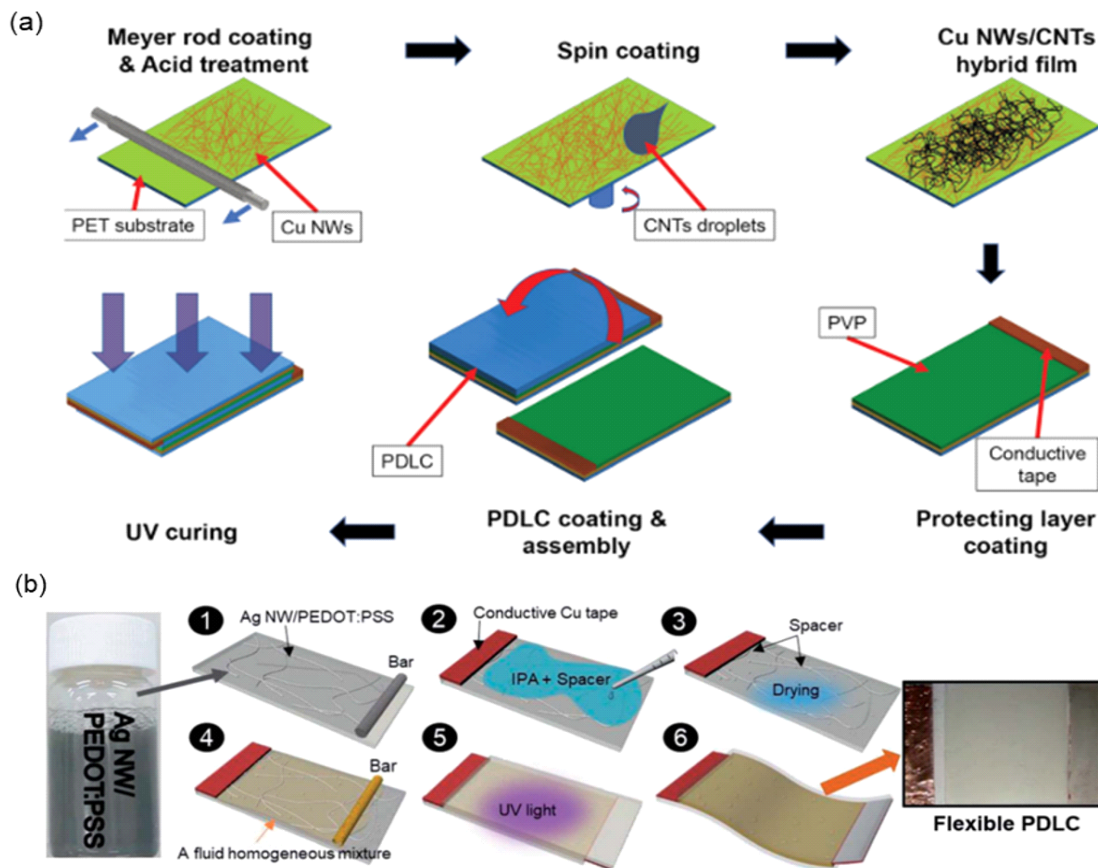


Fig. 6. Fabrication of flexible smart windows. (a) Flexible PDLC smart window with the composite of copper nanowire and carbon nanotube as the electrode. Adapted with permission from [60]. Copyright 2023, Springer. (b) Flexible PDLC smart window with the composite of silver nanowire and conductive polymer. Adapted with permission from [61]. Copyright 2018, The Royal Society of Chemistry.



대한 연구와 더불어 이를 구동하기 위한 주변 장치에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 스마트 윈도우에 전력을 전달하기 위한 전극 배선이 필요하기 때문에 기존에 구축이 완료된 공간에 스마트 윈도우를 추가하기가 용이하지 않고 비용이 높다. 이러한 문제를 해결하기 위해 태양전지나 압전에너지 소자를 일체화 시킨 스마트 윈도우에 대한 연구가 진행되고 있다(Fig. 7)[65-67]. 이와 같은 전력 소자들이 스마트 윈도우의

표면에 일체형으로 부착되는 경우 전력 생산량뿐만 아니라 재실자의 시감 저하 방지를 위한 광 투과도 확보가 필수적이고, 더 나아가 유연 스마트 윈도우 적용을 위한 유연성 확보도 필요할 것이다.

5. 결론 및 전망

본 논문에서는 액정 기반 스마트 윈도우 분야의 기

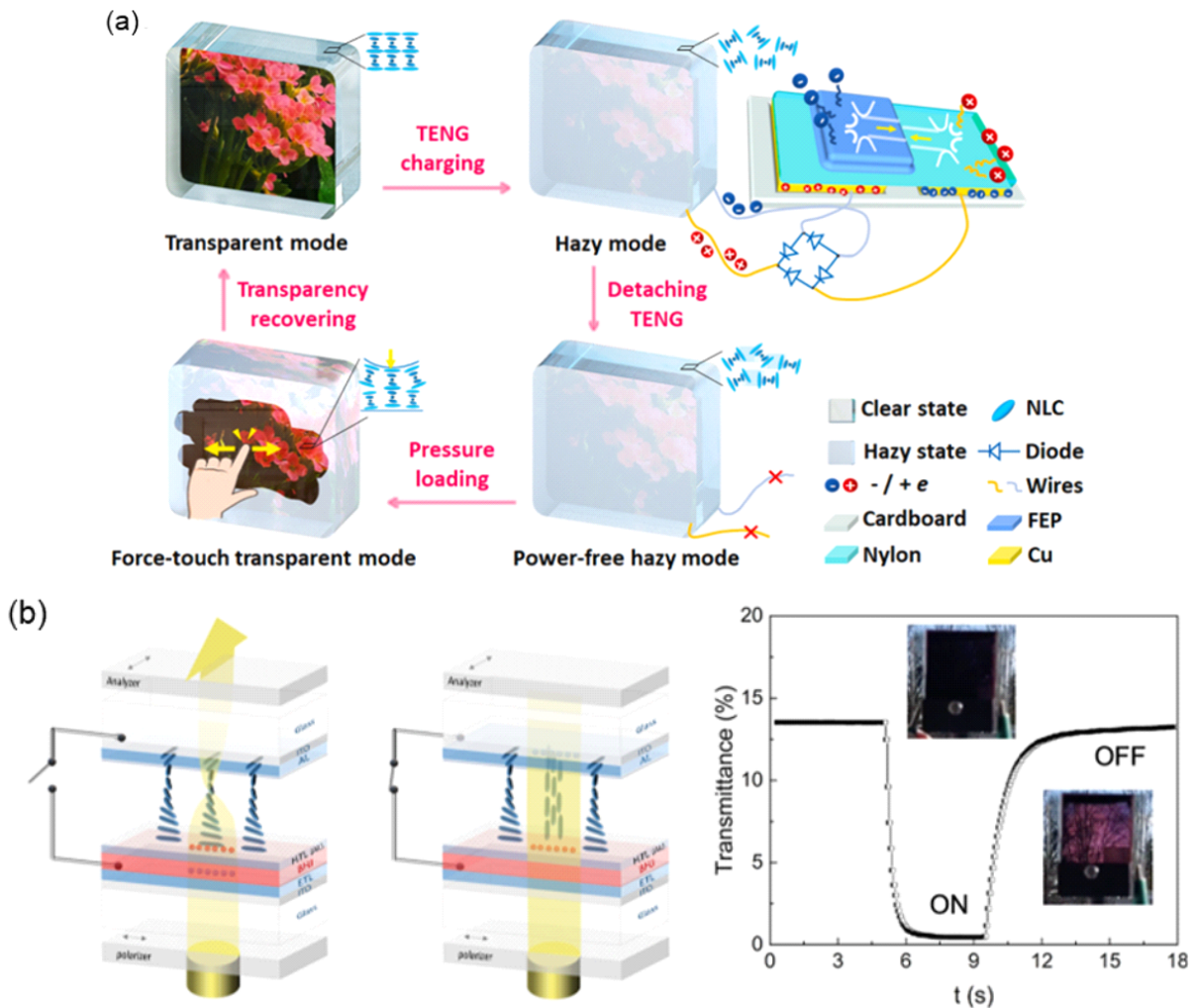


Fig. 7. Self-powered LC-based smart windows. (a) LC-based smart window using triboelectric nanogenerator. Adapted with permission from [66]. Copyright 2021, Elsevier. (b) LC-based smart window using organic photovoltaic. Adapted with permission from [67]. Copyright 2023, ACS Publications.



술 종류와 특징에 대해서 알아보았다. 국제적인 에너지 절감 흐름과 차세대 모빌리티 기술의 대두로 스마트 윈도우 기술의 중요성이 커지고 있다. 액정 스마트 윈도우는 가장 대중적으로 보급이 된 전기변색 기술의 한정된 면적 및 느린 응답속도와 같은 단점들을 보완할 수 있다. 최근 연구를 통해 구동전압, 투과도 변화율 등의 성능이 향상되고 있으며, 다중모드, 편광, 시야각 특성 등을 활용한 특수 기능의 스마트 윈도우에 대한 연구도 진행되고 있다. 액정 스마트 윈도우는 기존의 액정 디스플레이 장치를 개발하기 위한 설비들을 활용할 수 있기 때문에 투자비를 절감할 수 있으며, 이에 따라 제품 가격 경쟁력을 확보할 수 있다. 다양한 수요 발굴과 함께 제품 연구 개발을 지속한다면 액정 스마트 윈도우 시장이 크게 확장될 수 있을 것으로 기대한다.

기호설명

- EC: Electrochromic
- SP: Suspended particle
- LC: Liquid crystal
- GHLC: Guest-host liquid crystal
- PDLC: Polymer-dispersed liquid crystal
- PSLC: Polymer-stabilized liquid crystal

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

HSH, HMC were involved in investigation of previous research. HSH, SUK drafted the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This work was supported by the National Research

Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2022R1F1A1075140).

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS



황현성

2019년~현재: 서울과학기술대학교 전 기정보공학과 학사
[관심분야] 전기광학 소자, 광학 필터, 태양전지



조현목

2019년~현재: 서울과학기술대학교 전 기정보공학과 학사
[관심분야] 스마트 윈도우, 액정 탄성체, 전기변색 소자



김세운

2006~2010년: 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 학사
2010~2016년: 서울대학교 전기공학부 박사
2016~2016년: 서울대학교 반도체공동 연구소 박사후연구원

2016~2018년: 서울대학교 창의정보기술 인재양성사업단 박사후연구원

2018~2019년: 펜실베이니아대학교 재료공학과 박사후연구원

2019~2022년: 삼성전자 종합기술원, 책임연구원

2022년~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수



REFERENCES

- [1] Amasawa, E.; Sasagawa, N.; Kimura, M.; Taya, M. Design of a New Energy-Harvesting Electrochromic Window Based on an Organic Polymeric Dye, a Cobalt Couple, and PProDOT-Me 2. *Adv. Energy Mater.* 2014, 4 (14), 1400379.
- [2] Jennings, J. R.; Lim, W. Y.; Zakeeruddin, S. M.; Grätzel, M.; Wang, Q. A Redox-Flow Electrochromic Window. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015, 7 (4), 2827-2832.
- [3] Barawi, M.; Veramonti, G.; Epifani, M.; Giannuzzi, R.; Sibillano, T.; Giannini, C. et al. A Dual Band Electrochromic Device Switchable across Four Distinct Optical Modes. *J. Mater. Chem. A.* 2018, 6 (22), 10201-10205.
- [4] Zeng, J.; Li, H.; Wan, Z.; Ai, L.; Liu, P.; Deng, W. Colorless-to-Black Electrochromic Materials and Solid-State Devices with High Optical Contrast Based on Cross-Linked Poly(4-Vinyltriphenylamine). *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2019, 195, 89-98.
- [5] Zeng, J.; Yang, H.; Zhong, C.; Rajan, K.; Sagar, R. U. R.; Qi, X. et al. Colorless-to-Black Electrochromic Devices Based on Ambipolar Electrochromic System Consisting of Cross-Linked Poly(4-Vinyltriphenylamine) and Tungsten Trioxide with High Optical Contrast in Visible and near-Infrared Regions. *Chem. Eng. J.* 2021, 404, 126402.
- [6] Ghosh, A.; Norton, B.; Duffy, A. First Outdoor Characterisation of a PV Powered Suspended Particle Device Switchable Glazing. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2016, 157, 1-9.
- [7] Ghosh, A.; Norton, B.; Duffy, A. Behaviour of a SPD Switchable Glazing in an Outdoor Test Cell with Heat Removal under Varying Weather Conditions. *Appl. Energy.* 2016, 180, 695-706.
- [8] Huang, S.; Zhang, Q.; Li, P.; Ren, F.; Yurtsever, A.; Ma, D. High-Performance Suspended Particle Devices Based on Copper-Reduced Graphene Oxide Core-Shell Nanowire Electrodes. *Adv. Energy Mater.* 2018, 8 (18), 1-10.
- [9] Ghosh, A.; Norton, B. Optimization of PV Powered SPD Switchable Glazing to Minimise Probability of Loss of Power Supply. *Renew. Energy.* 2019, 131, 993-1001.
- [10] Soares, I. T.; De Araújo, J. R.; Monteiro, S. N.; Marques, M. D. F. V. Novel System Using Hydrogel with Reduced Graphite Oxide Particles as Active Layer for Potential Application in Smart Window. *J. Mater. Res. Technol.* 2023, 22, 1924-1934.
- [11] Khandelwal, H.; Schenning, A. P. H. J. H. J.; Debijs, M. G. Infrared Regulating Smart Window Based on Organic Materials. *Adv. Energy Mater.* 2017, 7 (14), 1602209.
- [12] Yamaguchi, R.; Takasu, T. Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal Smart Glass with Asymmetrical Daylight Controls. *J. Soc. Inf. Disp.* 2015, 23 (8), 365-370.
- [13] Ji, S. M.; Oh, S. W.; Yoon, T. H. Smart Window Based on Angular-Selective Absorption of Solar Radiation with Guest-Host Liquid Crystals. *Crystals.* 2021, 11 (2), 131.
- [14] Cupelli, D.; Pasquale Nicoletta, F.; Manfredi, S.; Vivacqua, M.; Formoso, P.; De Filipo, G. et al. Self-Adjusting Smart Windows Based on Poly-



- mer-Dispersed Liquid Crystals. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2009, 93 (11), 2008-2012.
- [15] Kragt, A. J. J.; Loonen, R. C. G. M.; Broer, D. J.; Debije, M. G.; Schenning, A. P. H. J. "Smart" Light-Reflective Windows Based on Temperature Responsive Twisted Nematic Liquid Crystal Polymers. *J. Polym. Sci.* 2021, 59 (12), 1278-1284.
- [16] Yu, P.; Liu, J.; Zhang, W.; Zhao, Y.; He, Z.; Ma, C. et al. Ionic Liquid-Doped Liquid Crystal/Polymer Composite for Multifunctional Smart Windows. *Dye. Pigment.* 2023, 208, 110817.
- [17] Yu, B. H.; Huh, J. W.; Kim, K. H.; Yoon, T. H. Light Shutter Using Dichroic-Dye-Doped Long-Pitch Cholesteric Liquid Crystals. *Opt. Express.* 2013, 21 (24), 29332.
- [18] Lee, J.; Nam, S.; Choi, S. S. Design of Chiral Guest-Host Liquid Crystals for a Transmittance-Tunable Smart Window. *Opt. Mater. Express.* 2022, 12 (7), 2568.
- [19] Lu, H.; Zhu, M.; Cao, Y.; Ma, C.; Qiu, L.; Zhu, J. et al. Fast-Relaxation, Dye-Doped Cholesteric Liquid-Crystal Smart Window with a Perfect Planar State. *Dye. Pigment.* 2023, 208, 110795.
- [20] Sheng, M.; Zhang, L.; Wang, D.; Li, M.; Li, L.; West, J. L. et al. Fabrication of Dye-Doped Liquid Crystal Microcapsules for Electro-Stimulated Responsive Smart Textiles. *Dye. Pigment.* 2018, 158, 1-11.
- [21] Zhou, B.; Che, C.; Li, Y.; Wang, C.; Wu, Y.; Chang, W. et al. Dielectric Reorientation and Electrohydrodynamic Instabilities in Dichroic-Dye-Doped Dual-Cell Liquid Crystal Smart Window. *Liq. Cryst.* 2022, 49 (1), 111-122.
- [22] Oh, S. W.; Kim, S. H.; Baek, J. M.; Yoon, T. H. Optical and Thermal Switching of Liquid Crystals for Self-Shading Windows. *Adv. Sustain. Syst.* 2018, 2 (5), 1700164.
- [23] Kuang, Z. Y.; Deng, Y.; Hu, J.; Tao, L.; Wang, P.; Chen, J. et al. Responsive Smart Windows Enabled by the Azobenzene Copolymer Brush with Photothermal Effect. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2019, 11 (40), 37026-37034.
- [24] Talukder, J. R.; Lee, Y. H.; Wu, S. T. Photo-Responsive Dye-Doped Liquid Crystals for Smart Windows. *Opt. Express.* 2019, 27 (4), 4480.
- [25] Drzaic, P. S. Polymer Dispersed Nematic Liquid Crystal for Large Area Displays and Light Valves. *J. Appl. Phys.* 1986, 60 (6), 2142-2148.
- [26] Kim, E. M.; Choi, I. S.; Oh, J.; Kim, Y. B.; Lee, J.; Choi, Y. S. et al. Transparent Conductive ZnInSnO-Ag-ZnInSnO Multilayer Films for Polymer Dispersed Liquid-Crystal Based Smart Windows. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014, 53 (9), 095505.
- [27] Huang, J.; Li, J.; Xu, J.; Wang, Z.; Sheng, W.; Li, H. et al. Simultaneous Achievement of High Visible Transmission and Near-Infrared Heat Shielding in Flexible Liquid Crystal-Based Smart Windows via Electrode Design. *Sol. Energy.* 2019, 188, 857-864.
- [28] Kamal, W.; Li, M.; Lin, J. De; Parry, E.; Jin, Y.; Elston, S. J. et al. Spatially Patterned Polymer Dispersed Liquid Crystals for Image-Integrated Smart Windows. *Adv. Opt. Mater.* 2022, 10 (3), 2101748.
- [29] Kim, D. J.; Hwang, D. Y.; Park, J. Y.; Kim, H. K. Liquid Crystal-Based Flexible Smart Windows on Roll-to-Roll Slot Die-Coated Ag Nanowire



- Network Films. *J. Alloys Compd.* 2018, 765, 1090-1098.
- [30] Jinqian, L.; Zhao, Y.; Gao, H.; Wang, D.; Miao, Z.; Cao, H. et al. Polymer Dispersed Liquid Crystals Doped with CeO₂ Nanoparticles for the Smart Window. *Liq. Cryst.* 2022, 49 (1), 29-38.
- [31] Bhargavi, R.; Nair, G. G.; Prasad, S. K.; Prabhu, R.; Yelamaggad, C. V. Anomalous Large Bend Elastic Constant and Faster Electro-Optic Response in Anisotropic Gels Formed by a Dipeptide. *J. Appl. Phys.* 2011, 109 (8), 083537.
- [32] Jung, D.; Choi, W.; Park, J. Y.; Kim, K. B.; Lee, N.; Seo, Y. et al. Inorganic Gel and Liquid Crystal Based Smart Window Using Silica Sol-Gel Process. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2017, 159, 488-495.
- [33] Liang, X.; Chen, M.; Wang, Q.; Guo, S.; Zhang, L.; Yang, H. Active and Passive Modulation of Solar Light Transmittance in a Hybrid Thermochromic Soft-Matter System for Energy-Saving Smart Window Applications. *J. Mater. Chem. C* 2018, 6 (26), 7054-7062.
- [34] He, Z.; Yu, P.; Gao, J.; Ma, C.; Xu, J.; Duan, W. et al. An Energy-Efficient and Low-Driving-Voltage Flexible Smart Window Enhanced by POSS and Cs_xWO₃. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2023, 250, 112096.
- [35] Malik, P.; Singh, A. K. Metal Oxide Alumina Nanowire-Induced Polymer-Dispersed Liquid Crystal Composites for Low Power Consumption Smart Windows. *J. Mol. Liq.* 2023, 378, 121573.
- [36] Kakiuchida, H.; Ogiwara, A. Reverse-Mode Thermoresponsive Light Attenuators Produced by Optical Anisotropic Composites of Nematic Liquid Crystals and Reactive Mesogens. *Opt. Mater.* 2018, 78, 273-278.
- [37] Fuh, A. Y. G.; Chih, S. Y.; Wu, S. T. Advanced Electro-Optical Smart Window Based on PSLC Using a Photoconductive TiOPc Electrode. *Liq. Cryst.* 2018, 45 (6), 864-871.
- [38] Hu, X.; Zhang, X.; Yang, W.; Jiang, X.; Jiang, X.; Haan, L. T. et al. Stable and Scalable Smart Window Based on Polymer Stabilized Liquid Crystals. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020, 137 (30), 48917.
- [39] Lim, Y. J.; Kang, M.; Jeon, H. S.; Kim, M.; Lee, S. H. Low-Temperature Processable Transparent Liquid Crystal Light Shutter. *J. Mol. Liq.* 2022, 368, 120823.
- [40] Chen, G.; Hu, J.; Xu, J.; Sun, J.; Xiao, J.; Zhang, L. et al. Liquid Crystalline Composite Stabilized by Epoxy Polymer with Boscage-Like Morphology for Energy-Efficient Smart Windows with High Stability. *Macromol. Mater. Eng.* 2022, 307 (8), 2100991.
- [41] Mo, L.; Sun, H.; Liang, A.; Jiang, X.; Shui, L.; Zhou, G. et al. Multi-Stable Cholesteric Liquid Crystal Windows with Four Optical States. *Liq. Cryst.* 2022, 49 (3), 289-296.
- [42] Li, C. C.; Tseng, H. Y.; Chen, C. W.; Wang, C. T.; Jau, H. C.; Wu, Y. C. et al. Tri-Stable Cholesteric Liquid Crystal Smart Window. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2018, 49 (1), 543-545.
- [43] Tseng, H. Y.; Chang, L. M.; Lin, K. W.; Li, C. C.; Lin, W. H.; Wang, C. T. et al. Smart Window with Active-Passive Hybrid Control. *Materials.* 2020, 13 (18), 4137.
- [44] Li, C. C.; Tseng, H. Y.; Chen, C. W.; Wang, C.



- T.; Jau, H. C.; Wu, Y. C. et al. Versatile Energy-Saving Smart Glass Based on Tristable Cholesteric Liquid Crystals. *ACS Appl. Energy Mater.* 2020, 3 (8), 7601-7609.
- [45] Jin, X.; Hao, Y.; Su, Z.; Li, M.; Zhou, G.; Hu, X. Dual-Function Smart Windows Using Polymer Stabilized Cholesteric Liquid Crystal Driven with Interdigitated Electrodes. *Polymers.* 2023, 15 (7), 1734.
- [46] Li, X.; Guo, Y.; Huai, H.; Yang, Y.; Sun, Y.; Zhang, C. et al. The Effect of Monomer and Chiral Dopant Content on Reverse-Mode Polymer Stabilized Cholesteric Liquid Crystal Display. *J. Mol. Liq.* 2020, 309, 113112.
- [47] Zhang, Y.; Chen, J.; Hu, X.; Zhao, W.; Broer, D. J.; Zhou, G. Reverse Mode Polymer Dispersed Liquid Crystal-Based Smart Windows: A Progress Report. *Recent Prog. Mater.* 2021, 3 (4), 1-1.
- [48] Yang, D. K.; Chien, L. C.; Doane, J. W. Cholesteric Liquid Crystal/Polymer Dispersion for Haze-free Light Shutters. *Appl. Phys. Lett.* 1992, 60 (25), 3102-3104.
- [49] Jiang, Y.; Zhou, Y.; Wang, M.; Yang, D. K. Smart Thermally Switchable Liquid Crystal Window. *Adv. Photonics Res.* 2021, 2 (6), 2000156.
- [50] Zhang, Y.; Yang, X.; Zhan, Y.; Zhang, Y.; He, J.; Lv, P. et al. Electroconvection in Zwitterion-Doped Nematic Liquid Crystals and Application as Smart Windows. *Adv. Opt. Mater.* 2021, 9 (3), 1-8.
- [51] Zhao, Y.; Ji, H.; Lu, M.; Tao, J.; Ou, Y.; Wang, Y. et al. Thermochromic Smart Windows Assisted by Photothermal Nanomaterials. *Nanomaterials.* 2022, 12 (21), 3865.
- [52] Zhang, H.; Liu, J.; Zhao, X.; Gao, J.; Ma, C.; Zhao, Y. et al. Electrically Induced Coloration of Polymer-Stabilized Cholesteric Liquid Crystal Films with Broadband Reflection Capability for Smart Windows. *Dye. Pigment.* 2022, 203, 110316.
- [53] Guo, S. M.; Liang, X.; Zhang, C. H.; Chen, M.; Shen, C.; Zhang, L. Y. et al. Preparation of a Thermally Light-Transmittance-Controllable Film from a Coexistent System of Polymer-Dispersed and Polymer-Stabilized Liquid Crystals. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017, 9 (3), 2942-2947.
- [54] Sun, H.; Xie, Z.; Ju, C.; Hu, X.; Yuan, D.; Zhao, W. et al. Dye-Doped Electrically Smart Windows Based on Polymer-Stabilized Liquid Crystal. *Polymers.* 2019, 11 (4), 694.
- [55] Zhang, Z.; Zhang, R.; Xu, L.; Li, J.; Yang, L.; Yang, Y. et al. Visible and Infrared Optical Modulation of PSLC Smart Films Doped with ATO Nanoparticles. *Dalt. Trans.* 2021, 50 (29), 10033-10040.
- [56] Meng, W.; Gao, Y.; Hu, X.; Tan, L.; Li, L.; Zhou, G. et al. Photothermal Dual Passively Driven Liquid Crystal Smart Window. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2022, 14 (24), 28301-28309.
- [57] Hosseinzadeh Khaligh, H.; Liew, K.; Han, Y.; Abukhdeir, N. M.; Goldthorpe, I. A. Silver Nanowire Transparent Electrodes for Liquid Crystal-Based Smart Windows. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2015, 132, 337-341.
- [58] Kim, Y.; Kim, K.; Kim, K. B.; Park, J. Y.; Lee, N.; Seo, Y. Flexible Polymer Dispersed Liquid Crystal Film with Graphene Transparent Ele-



- ctrodes. *Curr. Appl. Phys.* 2016, 16 (3), 409-414.
- [59] Kumar, S.; Kang, D.; Nguyen, V. H.; Nasir, N.; Hong, H.; Kim, M. et al. Application of Titanium-Carbide MXene-Based Transparent Conducting Electrodes in Flexible Smart Windows. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2021, 13 (34), 40976-40985.
- [60] Tran, N. H.; Nguyen, V. C.; Lee, J. H.; Song, J. I.; Kim, H. C. High-Performance Flexible Smart Window Based on Copper Nanowire/Multi-Walled Carbon Nanotube Transparent Conducting Film. *J. Mater. Sci.* 2023, 58 (13), 5678-5692.
- [61] Park, J. Y.; Kim, H. K. Highly Stretchable Polymer-Dispersed Liquid Crystal-Based Smart Windows with Transparent and Stretchable Hybrid Electrodes. *RSC Adv.* 2018, 8 (64), 36549-36557.
- [62] Zhang, Y.; Wang, C.; Zhao, W.; Li, M.; Wang, X.; Yang, X. et al. Polymer Stabilized Liquid Crystal Smart Window with Flexible Substrates Based on Low-Temperature Treatment of Polyamide Acid Technology. *Polymers* 2019, 11 (11), 1869.
- [63] Yoon, W.; Choi, Y.; Lim, S.; Koo, J.; Yang, S.; Jung, D. et al. A Single-Step Dual Stabilization of Smart Window by the Formation of Liquid Crystal Physical Gels and the Construction of Liquid Crystal Chambers. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30 (4), 1906780.
- [64] Ishinabe, T.; Isa, H.; Shibata, Y.; Fujikake, H. Flexible Polymer Network Liquid Crystals Using Imprinted Spacers Bonded by UV-Curable Reactive Mesogen for Smart Window Applications. *J. Inf. Disp.* 2022, 23 (1), 69-75.
- [65] Wang, J.; Meng, C.; Gu, Q.; Tseng, M. C.; Tang, S. T.; Kwok, H. S. et al. Normally Transparent Tribo-Induced Smart Window. *ACS Nano.* 2020, 14 (3), 3630-3639.
- [66] Wang, J.; Meng, C.; Wang, C. T.; Liu, C. H.; Chang, Y. H.; Li, C. C. et al. A Fully Self-Powered, Ultra-Stable Cholesteric Smart Window Triggered by Instantaneous Mechanical Stimuli. *Nano Energy*, 2021, 85, 105976.
- [67] Fall, S.; Wang, J.; Regrettier, T.; Brouckaert, N.; Ibraikulov, O. A.; Leclerc, N. et al. Self-Powered Dynamic Glazing Based on Nematic Liquid Crystals and Organic Photovoltaic Layers for Smart Window Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2023, 15 (3), 4267-4274.