

# 콜레스테릭 액정(CLC) 기술의 최신 연구 동향과 미래 전망: 기본 원리부터 투명 태양광 기술까지

## 제1장: 서론 - 콜레스테릭 액정 기술의 재조명

### 1.1 액정의 정의와 위상 분류

액정(Liquid Crystal)은 고체 결정의 규칙적인 분자 배열과 액체의 유동성을 동시에 갖는 중간 상태(mesophase)의 물질을 일컫는다. 액정은 분자의 배열 방식에 따라 여러 위상으로 분류된다. 대표적인 위상으로는 분자들이 특정 방향(director)으로 정렬되지만 위치적 질서는 없는 네마틱(nematic) 위상, 분자들이 층(layer)을 이루며 층 내에서 위치적 질서를 갖는 스멕틱(smectic) 위상, 그리고 네마틱 위상에 카이랄(chiral) 분자가 첨가되어 나선형 구조를 형성하는 콜레스테릭(cholesteric) 위상이 있다.<sup>1</sup>

### 1.2 콜레스테릭 액정(CLC)의 나선형 구조와 고유한 특성

콜레스테릭 액정(CLC)은 고유한 나선형 구조를 특징으로 한다. 이 구조에서 액정 분자의 평균 국소적 분자 배향을 나타내는 광학적 디렉터(director)는 나선 축에 수직인 평면을 따라 연속적으로 회전한다.<sup>2</sup> 이 나선이

360° 회전하는 데 필요한 거리를 나선 피치(pitch,  $p$ )라고 정의한다.<sup>2</sup>

CLC의 가장 독특한 광학적 특성은 바로 \*\*선택적 반사(selective reflection)\*\*이다. 이 현상은 입사된 빛의 특정 파장과 편광 성분만을 선택적으로 반사하고 나머지는 투과시키는 원리에 기반한다. 이러한 특성은 CLC의 나선형 구조와 빛이 상호작용하면서 발생하는 브래그(Bragg)

회절 현상의 결과이며, 이를 통해 CLC는 기존의 색소 기반 기술로는 구현하기 어려운 선명하고 풍부한 구조색을 발현할 수 있다.<sup>4</sup>

### 1.3 최근 연구의 중요성과 보고서의 목적

수십 년간 CLC 연구는 주로 저전력 디스플레이 기술인 콜레스테릭 LCD(ChLCD) 분야에 집중되어 왔다.<sup>9</sup> 그러나 최근에는 CLC의 동적 반응성 및 독특한 광학적 특성을 활용하여 에너지, 센서, 유연 전자소자 등 다양한 첨단 분야에서 혁신적인 응용 연구들이 활발히 진행되고 있다.

본 보고서는 이러한 변화의 흐름을 심층적으로 분석하기 위해, CLC의 기초 과학 원리부터 이를 활용한 최신 응용 연구 사례, 특히 난징대학의 투명 태양광 집광기(CUSC) 기술을 중심으로 다룬다. 또한 관련 시장 동향과 기술적 과제를 종합적으로 제시하여, 콜레스테릭 액정 기술의 현재와 미래에 대한 깊이 있는 통찰을 제공하는 것을 목적으로 한다.

## 제2장: 콜레스테릭 액정의 과학적 원리 및 광학적 특성

### 2.1 나선 피치와 선택적 반사: 브래그 회절

CLC의 선택적 반사 현상은 빛이 그 내부의 주기적인 나선 구조를 따라 회절하는 원리, 즉 **\*\*브래그 회절(Bragg diffraction)\*\***에 의해 발생한다. 고체 결정 격자가 X-선을 회절시키는 것처럼, CLC의 규칙적인 분자 배열은 가시광선 파장대의 빛을 회절시킨다.<sup>2</sup> 이는 분자의 나선형 배열이 나선 축을 따라 주기적인 유전율(dielectric constant) 변조를 야기하기 때문이다.<sup>2</sup> 이 주기적인 구조는 일종의 1차원 광자 결정(one-dimensional photonic crystal) 역할을 하며, 특정 파장의 빛에 대해 광자 밴드갭(Photonic Bandgap, PBG)을 형성하여 해당 파장의 빛은 반사하고 밴드갭 밖의 빛은 투과시킨다.<sup>3</sup>

나선 피치(p)는 이 주기적 구조의 핵심적인 물리량으로, 나선이 360° 회전하는 데 필요한 거리다.<sup>2</sup> CLC에서 이 피치의 길이는 일반적으로

250 내지 600 nm 또는 수백에서 수천 옹스트롬(Å) 수준으로, 이는 가시광선 파장 영역과 유사한 규모다.<sup>2</sup> 바로 이 스케일의 차이가 CLC와 고체 결정의 근본적인 차이점을 만들어낸다. 고체 결정의 격자 주기는 수 옹스트롬 수준으로 X-선 파장대와 일치하는 반면,<sup>6</sup> CLC는 나선

피치가 가시광선 영역에 해당하기 때문에 X-선이 아닌 가시광선을 선택적으로 회절시킨다. 이처럼 나노 스케일의 주기적 구조를 통해 빛을 제어하는 능력은 CLC를 포토닉스(photonics) 분야의 핵심 소재로 만든다.<sup>3</sup>

선택적 반사되는 빛의 파장( $\lambda$ )은 나선 피치( $p$ )와 액정의 평균 굴절률( $n_{av}$ )에 의해 결정된다. 이는 드 브리스(de Vries) 방정식( $\lambda = n_{av} \cdot p \cdot \cos\theta$ , 여기서  $\theta$ 는 입사각)으로 정량화될 수 있으며, 이를 통해 CLC의 구조적 특성이 광학적 특성에 직접적으로 연결됨을 알 수 있다.<sup>12</sup>

## 2.2 콜레스테릭 액정의 복굴절과 원형 편광 필터 특성

콜레스테릭 액정은 복굴절(birefringence) 특성을 갖는 광학적 이방성(anisotropic) 물질이다. 이는 빛의 편광 방향에 따라 다른 굴절률을 가지기 때문에 나타나는 현상이다.<sup>1</sup> 이러한 복굴절 특성과 나선 구조가 결합되어 CLC는 빛의 편광 상태를 정교하게 조작하는 능력을 갖게 된다.

CLC의 나선 구조는 오른손잡이(right-handed) 또는 왼손잡이(left-handed)로 정의할 수 있다.<sup>2</sup> CLC는 입사된 빛 중 나선과 동일한 손잡이의 원형 편광(circularly polarized) 성분만 선택적으로 반사하고, 반대 손잡이의 원형 편광 성분은 그대로 투과시키는 독특한 특성을 보인다.<sup>3</sup> 이는 CLC가 단순히 특정 색을 반사하는 필터를 넘어, 빛의 편광 상태를 분리하고 제어하는 역할을 수행할 수 있음을 의미한다.<sup>14</sup>

이러한 원형 편광 필터 특성은 난징대학의 투명 태양광 집광기(CUSC) 기술의 핵심 원리로 작용한다. CUSC는 태양광의 원형 편광 성분 중 특정 손잡이의 빛만 선택적으로 회절시켜 이를 유리 도파관으로 유도함으로써, 투명성을 유지하면서도 태양 에너지를 효율적으로 집광할 수 있다.<sup>13</sup> 이처럼 CLC의 기초적인 광학 원리가 첨단 응용 기술의 성공에 직접적으로 기여하는 것이다.

## 2.3 외부 자극(온도, 전기장)에 의한 광학 특성 제어 메커니즘

CLC의 나선 피치( $p$ )는 고정된 값이 아니며, 외부 환경 변화에 따라 동적으로 변할 수 있다. 이는 곧 선택적 반사 파장의 변화로 이어진다. CLC의 이러한 반응성(reactivity)은 디스플레이뿐만 아니라 다양한 지능형 응용 분야로의 확장을 가능하게 하는 근본적인 동인이다.<sup>1</sup>

- 온도 제어: 온도가 변하면 액정 분자 간의 상호작용이 변하거나, 액정에 첨가된 카이랄 도펀트의 용해도가 달라져 나선 피치가 변화한다.<sup>2</sup> 이로 인해 반사되는 색상이 변하게 되는데, 이러한 특성은 온도 센서나 변색성 필름 등에 활용될 수 있다.<sup>1</sup>
- 전기장 제어: 액정 분자는 전기장에 반응하여 재배열된다. 콜레스테릭 액정은 전기장을 인가하면 분자 배열이 변화하여 광학적 특성이 제어될 수 있으며, 이를 이용해 투명 상태와

확산(translucent) 상태를 오가는 스마트 윈도우 기술을 구현할 수 있다.<sup>3</sup> 이는 적외선을 효과적으로 필터링하는 기능과 함께 건물의 에너지 효율을 향상시키는 데 기여한다.

이처럼 콜레스테릭 액정은 단순히 고정된 광학 필터가 아니라, 다양한 외부 자극에 반응하여 광학적 특성을 동적으로 조절할 수 있는 지능형 소재로서 무한한 잠재력을 지니고 있다.<sup>8</sup>

## 제3장: 콜레스테릭 액정 기반 최신 응용 연구 사례

### 3.1 투명 태양광 기술: 난징대학의 혁신적 접근

#### 3.1.1 무색 단일 방향성 태양열 집광기(CUSC)의 구조와 원리

중국 난징대학 연구진이 개발한 무색 단일 방향성 태양열 집광기(Colorless Unidirectional Solar Concentrator, CUSC)는 건물 일체형 태양광 발전(BIPV) 분야의 혁신적인 기술로 주목받고 있다.<sup>13</sup> 이 기술은 일반 유리창에 직접 코팅하여 창문의 외관을 바꾸지 않고도 태양 에너지를 수확할 수 있는 투명한 시스템이다.

기존의 발광형(luminescent) 또는 산란형(scattering-based) 집광기가 시각적 왜곡이나 흐릿함을 유발하고 확장성에 한계가 있었던 것과 달리<sup>13</sup>, CUSC는 콜레스테릭 액정(CLC) 다층 필름을 사용하여 독창적인 방식으로 빛을 제어한다. 연구진은 CLC 필름의 구조를 정밀하게 설계하여 특정 원형 편광을 선택적으로 회절시키고, 이를 가파른 각도로 유리 도파관 내부로 유도한다.<sup>13</sup> 이렇게 유리 가장자리로 모인 빛은 그곳에 설치된 소형 태양전지로 전달되어 전기로 변환된다.

이러한 작동 방식 덕분에, CUSC는 시각적 선명도를 온전히 유지하면서도 에너지를 효율적으로 수집할 수 있다. 이는 CLC의 선택적 회절 및 편광 제어 능력이 건물 외관의 심미성과 에너지 효율이라는 두 가지 상충되는 목표를 동시에 달성하는 데 어떻게 기여하는지 보여주는 대표적인 사례다.<sup>13</sup>

#### 3.1.2 CUSC의 성능 지표: 가시광 투과율, 색 재현성, 집광 효율

난징대학 연구진은 CUSC의 성능을 여러 지표를 통해 입증하였다.

- 가시광 투과율(**Average Visible Transmittance, AVT**): CUSC 장치는 평균 64.2%의 높은 가시광 투과율을 보여, 일반 창문처럼 실내를 밝고 자연스럽게 유지한다.<sup>13</sup>
- 색 재현 지수(**Color Rendering Index, CRI**): 91.3의 높은 CRI를 달성하여 유리창을 통해 보이는 사물의 색상을 정확하게 보존한다.<sup>13</sup>
- 에너지 집광 효율: 인간의 눈이 가장 민감하게 반응하는 녹색광(532nm)의 경우, 입사된 에너지의 최대 38.1%를 가장자리에서 수집할 수 있었다.<sup>13</sup>
- 집광 배율: 2m 너비의 CUSC 창문을 시뮬레이션한 결과, 태양광을 최대 50배까지 집중시키는 것이 가능하며, 이는 필요한 태양전지(PV) 면적을 최대 75%까지 줄여 재료 비용을 크게 절감할 수 있음을 시사한다.<sup>13</sup>

### 3.1.3 콜레스테릭 액정 기반 집광 기술과 기존 투명 태양광 기술(OPV, QD) 성능 비교

난징대학의 CUSC 기술은 투명 태양광 분야의 기존 기술인 투명 유기 태양전지(Organic Photovoltaics, OPV)나 투명 양자점(Quantum Dot, QD) 태양전지와는 근본적으로 다른 접근법을 취한다. CUSC가 빛을 모으는 집광기인 반면, OPV와 QD는 빛을 직접 전기로 변환하는 태양전지다. 다음 표는 두 기술 유형의 주요 특성을 비교하여 CLC 기반 기술의 독창적인 위치를 보여준다.

기술 유형	작동 원리	최대 발전 효율	시각적 특성	주요 과제
<b>CLC CUSC</b>	선택적 회절 및 집광 <sup>13</sup>	직접적인 발전 효율 대신 집광 효율 38.1% 및 50배 집광 <sup>13</sup>	고투명(64.2% AVT) 및 고색 재현성(91.3 CRI) <sup>13</sup>	광대역 효율 개선 및 편광 제어 기술 향상 <sup>13</sup>
투명 유기 태양전지(OPV)	선택적 흡수 및 직접 변환 <sup>19</sup>	최대 15.8% <sup>20</sup>	불투명 전극 사용 시 효율 저하 <sup>19</sup>	낮은 효율, 짧은 수명, 투명도와 효율의 상충 관계 <sup>8</sup>
투명 양자점(QD) 태양전지	선택적 흡수 및 직접 변환 <sup>21</sup>	최대 9% 또는 7.6% <sup>21</sup>	투명도 구현에 난제 존재 <sup>21</sup>	낮은 효율, 고온에서 불안정 <sup>21</sup>

위 표에서 볼 수 있듯이, 기존 OPV나 QD 태양전지는 투명성을 확보하기 위해 발전 효율을 일부 희생해야 하는 구조적인 한계를 갖는다.<sup>19</sup> 반면, CUSC는 에너지를 직접 변환하는 것이 아니라 유리창 가장자리로 '조용히' 유도하는 방식을 통해 미학과 효율을 동시에 확보함으로써 BIPV 시장의 오랜 과제를 해결하는 새로운 가능성을 제시한다.<sup>13</sup>

### 3.2 스마트 윈도우 및 건물 일체형 태양광 발전(BIPV)

CLC는 투명 태양광 기술 외에도 스마트 윈도우 분야에서 중요한 역할을 한다. CLC 기반 스마트 윈도우는 전기장을 인가하여 투명한 상태와 반투명한 확산 상태를 전환할 수 있다.<sup>16</sup> 이는

적외선 필터링 기능과 결합하여 건물의 내부 환경을 최적화하고 에너지 효율을 높이는 데 기여한다.<sup>16</sup>

최근에는 세 개의 기판과 세 개의 전극을 사용하는 이중 셀(dual-cell) 액정 창문 기술이 개발되었다.<sup>25</sup> 이 기술은 한 셀은 염료가 주입된 수직 정렬 슈퍼 트윈스트 네마틱(DD-VA-STN) 액정으로 투명 또는 착색 상태를 제어하고, 다른 셀은 고분자 안정화 콜레스테릭 질감(PSCT)을 사용하여 투명 또는 프라이버시 상태(반투명)를 제어한다.<sup>25</sup> 선택적으로 전압을 인가하여 투명, 착색, 프라이버시, 착색된 프라이버시 등 네 가지 상태로 전환할 수 있어 투과율과 헤이즈(haze)를 모두 제어할 수 있다.<sup>25</sup>

난징대학의 CUSC 기술은 이러한 스마트 윈도우와 건물 일체형 태양광 발전(BIPV) 시장의 교차점에 위치한다. BIPV 시장은 건물의 외관에 태양광 발전 모듈을 통합하여 전력을 생산하는 시스템으로, 기존 태양광 패널의 미적 한계를 극복하는 것이 중요한 과제였다.<sup>19</sup> CLC 기반 스마트 윈도우와 CUSC 기술은 에너지 절감, 지속 가능성, 그리고 미학적 가치라는 스마트 건축 시장의 핵심 성장 동인을 모두 충족시킬 수 있는 잠재력을 갖고 있다.<sup>23</sup> 이는 CLC 기술이 기존 디스플레이 시장의 보완재를 넘어 새로운 고부가가치 시장을 창출하는 핵심 기술로 자리매김할 수 있음을 시사한다.

### 3.3 유연 전자소자 및 센서: 메카노크로믹 및 소프트 액추에이터

CLC의 동적 반응성은 유연 전자소자 및 센서 분야에서도 혁신적인 응용 가능성을 열어준다. 메카노크로믹(mechanochromic) 특성을 활용하면 외부의 기계적 변형(장력 또는 압력)에 따라 나선 피치가 변화하고, 이에 따라 반사되는 빛의 색상이 변하는 센서를 제작할 수 있다.<sup>12</sup> 예를 들어, 생체친화적 고분자인 히드록시프로필 셀룰로오스(HPC)를 사용하여 신축성 있는 섬유 형태의 메카노크로믹 센서를 개발하는 연구가 진행되고 있다.<sup>12</sup> 이 소프트 광학 시스템은

웨어러블 센서나 소프트 로봇공학 등 다양한 분야에 적용될 수 있다.<sup>12</sup>

또한, 콜레스테릭 액정 탄성체(CLCE)는 광학적 특성과 기계적 변형이 연동되는 선택적 반사/변형성 물질로, 가시광선부터 중적외선(MWIR)까지의 빛을 선택적으로 반사할 수 있다.<sup>26</sup> 이러한 CLCE의 동적이고 가역적인 광학 특성은 적응형 광학 장치, 센서, 튜너블 반사기, 재구성 가능한 포토닉스 장치 분야에서 유망한 후보로 평가받고 있다.<sup>26</sup>

CLC는 카멜레온의 구조색 변화를 모방한 소프트 액추에이터로도 활용될 수 있다.<sup>8</sup> 이는 기계적, 열적, 전기적, 습도, 광학적 자극 등 여러 자극에 복합적으로 반응하여 동적으로 색상을 변화시키는 장치를 가능하게 한다. 이러한 기술은 위장 기술이나 실시간으로 외부 환경을 감지하고 반응하는 지능형 시스템 구축에 중요한 역할을 할 수 있다.<sup>8</sup> 이처럼 CLC는 유연성과 반응성을 바탕으로 디스플레이나 창문과 같은 고정된 응용 분야에 국한되지 않고, 기존 액정 기술이 접근하기 어려웠던 새로운 시장을 개척하고 있다.<sup>8</sup>

## 제4장: 시장 동향 및 상용화 분석

### 4.1 콜레스테릭 액정 관련 시장 규모 및 성장 동인

콜레스테릭 액정 기술은 여러 시장에서 성장세를 보이고 있다. 콜레스테릭 액정 디스플레이(ChLCD) 시장은 2024년 기준 약 9.11억 달러 규모이며, 2031년까지 연평균 성장률(CAGR) 14.5%로 성장할 것으로 전망된다.<sup>11</sup> 이 시장의 주요 동인으로는 전자책, 디지털 사이니지, 스마트 라벨링과 같은 저전력 및 직사광선 가시성(visibility)이 중요한 응용 분야에 대한 수요 증가가 꼽힌다.<sup>9</sup>

한편, 스마트 윈도우 시장은 2022년 50.9억 달러 규모에서 2032년까지 CAGR 11.1%로 성장할 것으로 예측된다.<sup>24</sup> 이 시장은 에너지 효율 및 지속 가능성에 대한 관심 증가, 스마트 건축에 대한 수요 상승, 그리고 정부의 에너지 절감 규제 및 인센티브 정책 등에 힘입어 빠르게 성장하고 있다.<sup>23</sup>

이 두 시장의 성장은 CLC 기술의 전략적 이점 시장 가능성을 보여준다. CLC는 비교적 작은 규모의 전용 디스플레이 시장에서 꾸준히 성장하면서도, 훨씬 큰 규모의 스마트 건축 시장에서 핵심 솔루션으로서 새로운 고부가가치를 창출하고 있다. 특히 후자는 에너지 절감이라는 거대한 시대적 요구에 부응하며 CLC 기술의 가치를 높이고 있다.

## 4.2 난징대학 CUSC 기술의 상용화 과제 및 전망

난징대학의 CUSC 기술은 상용화를 위한 여러 긍정적 요인을 갖추고 있다. 롤투롤(roll-to-roll) 제조 공정을 통해 대량 생산 및 확장성(scalability)을 확보할 수 있으며, 기존 창문에 부착하는 방식으로 설치가 용이하다는 점은 상업적 매력을 높인다.<sup>13</sup>

그러나 상용화까지는 몇 가지 기술적 과제들을 해결해야 한다.<sup>13</sup>

- 광대역 효율 개선: 현재 기술은 녹색광에 대한 에너지 수집 효율이 높지만, 태양광의 전체 스펙트럼에 대한 광대역 효율을 높이는 연구가 필요하다.<sup>13</sup>
- 편광 제어 기술 향상: 편광 선택적 회절을 더욱 정교하게 제어하여 수확 효율을 극대화해야 한다.<sup>13</sup>
- 응용 분야 확장: 농업용 온실, 자동차 유리, 투명 태양광 디스플레이 등 다양한 응용 분야에 맞춰 기술을 최적화하는 연구가 필요하다.<sup>13</sup>

## 4.3 기술적 도전과 향후 연구 방향

향후 CLC 기술 연구는 소재 과학과 구조 공학의 융합을 통해 위에서 언급된 과제들을 극복하는 방향으로 진행될 것으로 예상된다. 더 넓은 스펙트럼에서 높은 효율을 구현할 수 있는 새로운 액정 또는 카이랄 도펀트 소재를 개발하고, CLC 다층 필름의 구조를 최적화하여 광대역 회절 및 단일 방향성을 극대화하는 연구가 활발히 이루어질 것이다. 또한, CLC 집광 기술을 갈륨 비소(GaAs)와 같은 고효율 태양전지와 통합하여 전체 시스템의 에너지 변환 효율을 끌어올리는 하이브리드 시스템 연구도 중요한 방향이 될 것이다.<sup>13</sup>

## 제5장: 최신 학술 동향: 2025 SID Symposium을 중심으로

최근 Society for Information Display (SID) 심포지엄을 비롯한 주요 학술대회에서는 콜레스테릭 액정 기술의 다양한 응용 가능성을 탐구하는 연구들이 발표되었다. 이는 CLC 기술이 단순한 디스플레이를 넘어 새로운 시장으로 확장하고 있음을 시사한다.

### 5.1 최신 디스플레이 기술 개발



2025년 8월 SID 심포지엄에서 발표된 한 논문은 광학적으로 활성화된 콜레스테릭 액정을 사용한 반사형 컬러 디스플레이 연구를 소개했다.<sup>27</sup> 이 기술은 액정에 노출되는 빛을 통해 액정의 피치를 변경하여 반사 파장을 조절하고 다양한 색상을 구현한다.<sup>27</sup> 특히, 단일층 컬러 반사형 디스플레이는 저렴한 비용으로 열악한 실외 환경에서도 사용될 수 있어 경쟁력을 높인다.<sup>27</sup>

또한, 고휘도와 512가지 색상 구현이 가능한 적층형 반사 컬러 디스플레이와 광주소(photo-addressable) 전자 종이에 대한 연구도 발표되었다.<sup>27</sup> 이 전자 종이 기술은 청록색과 적색 이미지를 표시하는 두 개의 광주소 소자를 적층하여 독립적으로 제어함으로써 풀컬러를 구현한다.<sup>27</sup> 이러한 기술들은 저전력 특성을 유지하면서도 색상 표현 능력을 크게 향상시켜 새로운 전자책 및 디지털 사이니지 시장을 개척할 잠재력을 보여준다.<sup>27</sup>

## 5.2 광학 및 센서 분야의 발전

2025년 7월 SID 심포지엄의 다른 연구는 콜레스테릭 액정에서 빛의 전파 및 편광 현상에 대한 새로운 이론적 접근법을 제시했다.<sup>28</sup> 이 연구는 포토닉 밴드갭(photonic band gap)에 대한 심층적인 분석을 제공하며, 이를 통해 근점 디스플레이(near-eye displays), 고정밀 광학 센서, 스마트 윈도우, 대각 회절 격자(large angle diffraction gratings) 및 증강현실(augmented reality) 등 다양한 응용 분야를 위한 CLC 설계를 가능하게 할 것으로 기대된다.<sup>28</sup>

더불어, 강유체(ferrofluid)를 액정 환경에 통합하여 구조적 정렬 및 자기 반응성을 제어하는 연구도 진행되고 있으며, 이는 바이오 센싱, 표적 전달 및 자기 반응성 재료 분야의 가능성을 열어준다.<sup>27</sup>

# 제6장: 결론 및 세미나 요약

## 6.1 핵심 연구 결과 요약 및 시사점

본 보고서의 분석은 콜레스테릭 액정(CLC)이 단순히 빛을 반사하는 물질이 아니라, 나노 스케일의 주기적 구조를 통해 빛의 파장과 편광을 정교하게 제어하는 동적 포토닉스 소재임을 명확히 보여준다. 난장대학의 CUSC 기술은 CLC의 선택적 반사와 편광 필터 특성을 BIPV라는 거대 시장의 문제 해결에 독창적으로 적용한 사례이며, 이는 기술이 기존의 한계를 넘어설 때

어떤 혁신을 가져올 수 있는지 보여주는 모범적인 예시이다.

CLC 기술은 디스플레이, 스마트 윈도우, 유연 센서 등 다양한 분야에서 혁신을 주도할 잠재력을 갖고 있으며, 특히 에너지 효율과 지속 가능성이라는 시대적 요구에 부응하는 핵심 기술로 자리 잡을 것이다.

## 6.2 세미나 발표 요약

- **CLC의 본질:** 결정과 액체의 중간 상태인 액정 중, 나선형 구조를 갖는 물질입니다. 이 나노 스케일의 나선 피치가 빛의 특정 파장을 선택적으로 반사합니다.
- **CLC의 과학:** 이 선택적 반사는 고체 결정이 X-선을 회절시키는 것과 동일한 원리인 브래그 회절에 의해 발생합니다. CLC의 피치는 가시광선 파장대와 유사하여 독특한 구조색을 만듭니다. 또한, 나선 구조의 손잡이(handedness)에 따라 원형 편광을 정교하게 분리할 수 있습니다.
- **혁신적 응용:**
  - 투명 태양광: 난징대학의 CUSC는 CLC의 편광 선택적 회절을 이용해 창문의 투명성을 유지하면서도 태양광을 효율적으로 가장자리로 집광합니다. 이는 기존의 투명 태양전지가 가진 효율과 투명도 상충 문제를 해결하는 새로운 접근법입니다.
  - 스마트 윈도우: 외부 전기장에 반응하여 투명/반투명 상태를 전환하고 적외선을 필터링함으로써 건물의 에너지 효율을 높입니다. 최근에는 투과율과 헤이즈를 모두 제어하는 이중 셀 액정 창문 기술도 개발되었습니다.<sup>25</sup>
  - 유연 센서: 기계적 변형, 온도 등 다양한 자극에 따라 색이 변하는 메카노크로믹 특성을 활용하여 웨어러블 및 소프트 로봇 분야에서 활용됩니다. 또한, CLC 탄성체는 적응형 광학 및 튜너블 반사기에도 사용됩니다.<sup>26</sup>
- **최신 학술 동향:** 2025년 SID 심포지엄에서는 단일층 및 적층형 반사 디스플레이, 광주소 전자 종이 등 CLC의 새로운 디스플레이 응용 기술이 소개되었습니다.<sup>27</sup> 또한, 증강현실(AR) 디스플레이 등 첨단 광학 분야를 위한 새로운 이론적 모델도 제시되었습니다.<sup>28</sup>
- **미래 전망:** CLC 기술은 저전력 디스플레이 시장뿐만 아니라, 에너지 절감과 지속 가능성을 요구하는 스마트 건축 및 다양한 첨단 센서 시장에서 핵심적인 역할을 수행하며 혁신을 주도할 것으로 기대됩니다.

## 참고 자료

1. 당신이 알아야 할 액정의 구조 - Daken Chemical, 9월 7, 2025에 액세스, <https://www.dakenchem.com/ko/%EB%8B%B9%EC%8B%A0%EC%9D%B4-%EC%95%8C%EC%95%84%EC%95%BC-%ED%95%A0-%EC%95%A1%EC%A0%95%EC%9D%98-%EA%B5%AC%EC%A1%B0/>
2. Optics of cholesteric liquid crystals, 9월 7, 2025에 액세스, [https://ufn.ru/ufn79/ufn79\\_2/ufn792a.pdf](https://ufn.ru/ufn79/ufn79_2/ufn792a.pdf)
3. Tuning the photonic band gap in cholesteric liquid crystals by ..., 9월 7, 2025에 액세스, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=oe-14-3-1236>

4. top.jbnu.ac.kr, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://top.jbnu.ac.kr/CrossEditor/binary/files/000004/88.pdf>
5. KR101177941B1 - 콜레스테릭 액정 건조 공정 및 용매 - Google Patents, 9월 7, 2025에 액세스, <https://patents.google.com/patent/KR101177941B1/ko>
6. Optical Properties of Cholesteric Liquid Crystals - Physical Review Link Manager, 9월 7, 2025에 액세스, <https://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevA.8.1616>
7. [논문]분자 확산에 의한 콜레스테릭 액정 필름의 피치 변화 - 한국과학기술정보연구원, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200634741681160>
8. Beyond Color Boundaries: Pioneering Developments in Cholesteric Liquid Crystal Photonic Actuators - MDPI, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://www.mdpi.com/2072-666X/15/6/808>
9. 콜레스틱 LCD 시장 규모, 트렌드, 2033 | 글로벌 보고서 - Business Research Insights, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://www.businessresearchinsights.com/ko/market-reports/cholesteric-lcd-market-115644>
10. Cholesteric Liquid Crystal Film Market - IndustryARC, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://www.industryarc.com/Research/cholesteric-liquid-crystal-film-market-research-800663>
11. Cholesteric Liquid Crystal Display (ChLCD) Market Size & Competitive Dynamics: Global Forecast 2025-2031 - openPR.com, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://www.openpr.com/news/4156068/cholesteric-liquid-crystal-display-chlcd-market-size>
12. Stretchable Cellulosic Cholesteric Liquid Crystal Filaments with Color Response, 9월 7, 2025에 액세스, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsapm.4c02719>
13. Colorless solar windows: Transforming architecture into clean power plants - EurekAlert!, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://www.eurekalert.org/news-releases/1096811>
14. (PDF) Colorless and unidirectional diffractive-type solar ..., 9월 7, 2025에 액세스,  
[https://www.researchgate.net/publication/394069243\\_Colorless\\_and\\_unidirectional\\_diffractive-type\\_solar\\_concentrators\\_compatible\\_with\\_existing\\_windows](https://www.researchgate.net/publication/394069243_Colorless_and_unidirectional_diffractive-type_solar_concentrators_compatible_with_existing_windows)
15. 유리창이 태양광 발전기로 변신...마법의 투명 코팅 개발 - 지디넷코리아, 9월 7, 2025에 액세스, <https://zdnet.co.kr/view/?no=20250906072238>
16. Normally transparent smart window based on electrically induced instability in dielectrically negative cholesteric liquid crystal - Optica Publishing Group, 9월 7, 2025에 액세스, <https://opg.optica.org/ome/fulltext.cfm?uri=ome-8-3-691>
17. Turing architecture into clean energy power plants - Open Access Government, 9월 7, 2025에 액세스,  
<https://www.openaccessgovernment.org/turing-architecture-into-clean-energy-power-plants/197759/>
18. 유리창이 태양광 발전기로 변신...마법의 투명 코팅 개발 - Daum, 9월 7, 2025에 액세스, <https://v.daum.net/v/20250907070612970>
19. [논문]반사층을 이용한 반투명 유기태양전지의 효율 향상 - 한국과학기술정보연구원, 9월 7, 2025에 액세스,

- <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=DIKO0014699001>
20. 1cm<sup>2</sup> 유기태양전지 효율 15.8%로 세계 신기록 달성 - 지식, 9월 7, 2025에 액세스, <https://ko.solarmoo.com/info/world-record-efficiency-of-15-8-achieved-for-87812990.html>
  21. 양자점 이용해 투명 태양전지 개발 - 사이언스타임즈, 9월 7, 2025에 액세스, <https://www.sciencetimes.co.kr/nscvrg/view/menu/250?searchCategory=222&nscvrgSn=117786>
  22. “발전효율 2배 향상” KETI, 양자점 기술 적용 투명 태양전지 개발 - 전자신문, 9월 7, 2025에 액세스, <https://m.etnews.com/20240118000114?obj=Tzo4OiJzdGRDbGFzcyl6Mjp7czo3OiJyZWZlcmVyljtOO3M6NzoiZm9yd2FyZCI7czoXMzoid2VilHRvIG1vYmlsZSI7fQ%3D%3D>
  23. Smart Window Market Size & Share Analysis | Report {2033} - IMARC Group, 9월 7, 2025에 액세스, <https://www.imarcgroup.com/smart-windows-market>
  24. Smart Window Market Size, Share, Trend and Growth Report 2032, 9월 7, 2025에 액세스, <https://www.marketresearchfuture.com/reports/smart-window-market-9595>
  25. Dual-cell liquid crystal window with three substrates and three electrodes - SPIE Digital Library, 9월 7, 2025에 액세스, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13387/1338708/Dual-cell-liquid-crystal-window-with-three-substrates-and-three/10.1117/12.3045803.full>
  26. Helical pitch and thickness-dependent opto-mechanical response in cholesteric liquid crystal elastomers - Soft Matter (RSC Publishing), 9월 7, 2025에 액세스, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/sm/d5sm00059a>
  27. P-251: Late-News Poster: Application and Research of Optically Cholesteric Liquid Crystals in Reflective Displays - ResearchGate, 9월 7, 2025에 액세스, [https://www.researchgate.net/publication/394905456\\_P-251\\_Late-News\\_Poster\\_Application\\_and\\_Research\\_of\\_Optically\\_Cholesteric\\_Liquid\\_Crystals\\_in\\_Reflective\\_Displays](https://www.researchgate.net/publication/394905456_P-251_Late-News_Poster_Application_and_Research_of_Optically_Cholesteric_Liquid_Crystals_in_Reflective_Displays)
  28. (PDF) 45-3: Light Propagation and Polarization in Bulk Cholesteric Liquid Crystal, 9월 7, 2025에 액세스, [https://www.researchgate.net/publication/393951682\\_45-3\\_Light\\_Propagation\\_and\\_Polarization\\_in\\_Bulk\\_Cholesteric\\_Liquid\\_Crystal](https://www.researchgate.net/publication/393951682_45-3_Light_Propagation_and_Polarization_in_Bulk_Cholesteric_Liquid_Crystal)