



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 8월

석사학위논문

Cholesteryl pelargonate를 이용한  
고분자 안정화된 콜레스테릭 액정의  
전기-광학적 특성 연구

Electro-optic properties of Polymer Stabilized Cholesteric  
Liquid Crystal with Cholesteryl pelargonate as Chiral  
dopant

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

吳 洙 庚

Cholesteryl pelargonate를 이용한  
고분자 안정화된 콜레스테릭 액정의  
전기-광학적 특성 연구

Electro-optic properties of Polymer Stabilized Cholesteric  
Liquid Crystal with Cholesteryl pelargonate as Chiral  
dopant

2015 년 8 월 25 일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

吳 洙 庚

Cholesteryl pelargonate를 이용한  
고분자 안정화된 콜레스테릭 액정의  
전기-광학적 특성 연구

지도교수 金 炫 暻

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2015 년 4 월

조선대학교대학원

첨단소재공학과

吳 洙 庚

# 吳 洙 庚의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 崔 載 坤 印

위 원 조선대학교 교수 洪 鎭 厚 印

위 원 조선대학교 교수 金 炫 暻 印

2015 년 5 월

조선대학교대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	III
LIST OF FIGURES .....	III
ABSTRACT .....	V
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이 론 .....	3
2.1 액정 .....	3
2.1.1 액정의 분류 .....	3
2.1.2 액정의 성질 .....	4
2.1.3 콜레스테릭 액정 .....	4
2.2 고분자 분산형 액정의 종류 .....	6
2.2.1 Polymer dispersed liquid crystal .....	6
2.2.2 Polymer stabilized liquid crystal .....	7
2.3 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정의 전기광학적 특성 .....	8
2.3.1 투과율 (transmittance) .....	8
2.3.2 구동전압 (operating voltage) .....	8
2.3.3 대비 비 (contrast ratio) .....	8
2.3.4 반응 시간 (response time) .....	9
제 3 장 실 험 .....	10
3.1 재료 .....	10
3.2 Cholesteric liquid crystal 제조 .....	12
3.3 PSCLC 시편 제작 .....	12
3.4 Cholesteric liquid crystal 평가 .....	13
3.4.1 열적 특성 .....	13
3.4.2 액정의 형태학적 특성 관찰 .....	13

3.4.3 콜레스테릭 액정의 피치 길이 측정 .....	14
3.5 PSCLC 평가 .....	15
3.5.1 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀의 형태학적 특성 관찰 .....	15
3.5.2 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀의 전기-광학적 특성 평가 .....	15
<b>제 4장 결과 및 고찰 .....</b>	<b>16</b>
4.1 콜레스테릭 액정 .....	16
4.1.1 콜레스테릭 액정의 열적 특성 및 형태학적 특성 평가 .....	16
4.1.2 콜레스테릭 액정의 피치 길이 측정 .....	21
4.2 PSCLC(Polymer stabilized cholesteric liquid crystal) .....	25
4.2.1 PSCLC의 형태학적 특성 관찰 .....	25
4.2.2 PSCLC의 V-T curve .....	27
4.2.2.1 PSCLC의 구동 전압 특성 .....	28
4.2.2.2 PSCLC의 전압 이력현상(Hysteresis) .....	31
4.2.2.3 PSCLC의 대비 비(Contrast ratio) .....	33
4.2.2.4 PSCLC의 반응 시간 .....	35
4.2.2.5 PSCLC의 전기-광학적 특성 .....	36
<b>제 5 장 결론 .....</b>	<b>38</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>39</b>

## LIST OF TABLES

Table 1. Physical properties of E7	10
Table 2. Formulation of Cholesteric liquid crystal	12
Table 3. Formulation of PSCLC	13
Table 4. Condition of Wedge cell and Pitch length	22
Table 5. Isotropic transition temperature and Pitch length of Cholesteric liquid crystal	24
Table 6. Optical properties from Voltage-Transmittance Curve for PSCLC samples	28
Table 7. Optical properties from Voltage-Transmittance Curve for PSCLC for variable concentration of cholesteryl pelargonate	30
Table 8. Properties of PSCLC cell	37

## LIST OF FIGURES

Figure 1. Molecular structure of liquid crystalline phase	3
Figure 2. Texture of Cholesteric liquid crystal	5
Figure 3. Switching mechanism of Cholesteric liquid crystal	6
Figure 4. Schematic illustration of (a) PDLC and (b) PSLC film	7
Figure 5. Chemical structures of (a) E7 ,(b) Cholesteryl pelargonate, (c) Ethyl methacrylate, (d) 1,6-Hexanediol diacrylate, and (e) Trimethylolpropane triacrylate	11
Figure 6. Schematic illustration of the Grandjean-Cano wedge method	14
Figure 7. DSC curves of Cholesteric liquid crystal with various cholesteryl pelargonate; (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, and (e) 25 wt%	17
Figure 8. Temperature(Cholesteric to isotropic) of Cholesteric liquid crystal for different concentration of Cholesteryl pelargonate	18



Figure 9. Polarized optical microphotograph images of Cholesteric liquid crystal with various chiral dopant at 1°C below $T_{CI}$	19
Figure 10. Polarized optical microphotograph images of Cholesteric liquid crystal with various chiral dopant at 0.5°C below $T_{CI}$	20
Figure 11. Schematic illustration of the Grandjean-Cano wedge method	21
Figure 12. Inverse pitch(1/P) versus concentration of chiral dopant	23
Figure 13. Isotropic transition temperature(solid line) and pitch length(dotted line) of Cholesteric liquid crystal with various chiral dopant concentrations	24
Figure 14. SEM images of polymer network in the cell at chiral dopant concentrations of (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 and (e) 25 wt%. Insets show enlarged images of the cell	26
Figure 15. Transmittance versus applied voltage curve of the PSCLC cell with various chiral dopant concentrations	27
Figure 16. Driving voltage(solid line) and Pitch length(dotted line) of samples	29
Figure 17. Driving voltage versus Pitch curve of the PSCLC cell	30
Figure 18. Measured transmittance versus voltage curves of cell at chiral dopant concentration of (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, and (e) 25 wt%	32
Figure 19. Electro properties(circle) and pitch length(square) of samples	33
Figure 20. Optical properties of samples	34
Figure 21. Response times from Homeotropic to Planar of PSCLC samples	36
Figure 22. Photographs of the bistable PSCLC cell with Cholesteryl pelargonate 20wt% at zero voltage; in (a) Planar, and (b) Focal-conic state	37

## ABSTRACT

Electro-optic properties of Polymer stabilized cholesteric liquid crystal with cholesteryl pelargonate as chiral dopant

Oh Su-Kyung

Advisor: Prof. Hyun-Kyoung Kim, Ph.D.

Dept. of Advanced Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Polymer-stabilized cholesteric liquid crystals (PSCLCs) with various pitch length, which was controlled by using the chiral dopant concentration have been designed and fabricated. The effect of chiral dopant concentration on the morphology and the electro-optical properties such as the driving voltage, the contrast ratio, the hysteresis width, and the field-off response time were investigated. The scanning electron microscopy shows that the polymer networks become tighter with the increase of chiral dopant concentration. It was found that the driving voltage and the hysteresis width increase, which is ascribed to the increasing elastic force between the polymer network and the LC molecules. As the chiral dopant concentration is increased, the field-off response time decreases. Through the driving-mode switching, two bistable structures between transparent and non transparent states without holding voltages developed. Especially, PSCLC cell with 20 wt% of chiral dopant showed the best electro-optical properties.

## 제 1 장 서 론

현대 사회는 고도 정보화 사회로의 급속한 발전으로 정보를 구현하고 표현하는 디스플레이의 기술적 발전이 빠르게 이루어졌다. 이러한 디스플레이는 시각적인 정보매체이자 효율적인 정보전달의 수단으로서 자리 잡게 되었으며, 대중화되고 보편화됨에 따라 새로운 기술적 진화를 해야 할 시점에 놓이게 되었다. 평판 디스플레이는 기존의 브라운관에 비해 박형, 경량, 저소비전력 이라는 장점을 가진 것으로 구동방식에 따라 액정디스플레이(Liquid Crystal Display), 플라즈마 디스플레이(Plasma Display Panel), 전계방출디스플레이(Field Emission Display) 등으로 구분된다. 이러한 디스플레이 시장은 얇고 가벼운 특성에 만족하지 않고 종이처럼 접거나 구부릴 수 있으며, 기판이 유연성을 갖고 있는 플렉시블한 디스플레이를 차세대 디스플레이로 주목하고 있으며, 특히 Kent display, Nemoptic, Binem 사에서 액정을 기반으로 하는 플렉시블 디스플레이의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 플렉시블 디스플레이는 여전히 평판 디스플레이와 마찬가지로 액정의 불균일한 두께 유지, 상하판 틀어짐의 현상 등 액정의 흐름성에 의한 결함이 생기기 쉬우며 이러한 단점을 극복하기 위해서는 액정을 안정화 시킬 수 있는 기계적인 지지력이 필요하다. 최근 이를 위한 유용한 수단으로 액정 고분자 복합 시스템을 도입한 연구가 활발히 진행 되고 있다.[1] 액정 고분자 복합 시스템 중 고분자 분산형 액정 시스템(Polymer dispersed liquid crystal, PDLC)은 외부 전압에 의한 액정과 고분자 간의 굴절률 차이에 의해 투과율이 조절되며, 이러한 특성을 이용하여 스위칭이 가능한 응용분야에 적용되고 있다. 하지만 PDLC은 고분자 함량이 20~40% 이상으로 구동하는데 있어 높은 전압이 필요하며, 상(Phase)을 유지하기 위해서는 연속적인 전압의 공급이 필요하다. 이에 반해 고분자 안정화된 액정 시스템(Polymer stabilized liquid crystal, PSLC)은 전력을 차단하여도 상(Phase)을 유지하여 메모리 모드가 가능한 에너지 절약형 기술이다. PSLC는 PDLC에 비해 고분자 함량이 10% 미만으로 적어 구동 전압이 낮으며, 안정한 액정 상이 2개 이상 존재하므로 추가적인 에너지를 가하지 않아도 상을 유지할 수 있는 쌍안정성을 가지고 있다. PSLC가 이러한 특성을 갖을 수 있는 대표적인 특징은 콜레스테릭 액정의 도입에 기인한다. 콜레스테릭 액정은 회전성을 갖는 분자 배열로 독특한 광학 현상을 보이며[2, 3],

전계의 인가 상태에 따라 Planar, Focal-conic 그리고 Homeotropic 상으로 분리된다. Planar 상은 콜레스테릭 액정들이 기판과 평행하게 일정한 간격의 피치(Pitch)를 만들면서 나선형으로 꼬여있는 수평 상태이고, 피치의 길이에 따라 선택적으로 빛을 반사하는 Bragg 반사 특성을 갖고 있다. 초기 Planar 상태로 배열된 콜레스테릭 액정에 전압을 인가하면 Focal conic 상으로 전이 되며 이때 각각의 회전축들이 무질서하게 배열되어 입사되는 빛이 산란 또는 회절을 일으킨다. 더욱 높은 전압을 인가하게 되면 콜레스테릭 액정의 회전성이 풀리면서 액정 분자들이 기판과 수직하게 배향하게 되어 빛의 투과가 일어나는 Homeotropic으로 상이 변화한다. 이때, Homeotropic 상에서 전압을 빠르게 제거한다면 Planar 상으로, 천천히 제거하면 Focal conic 상으로 돌아가게 되며 각각의 안정성은 유지된다. 즉 추가적인 에너지를 가하지 않아도 변환된 상을 계속 유지할 수 있다.[4-10] 하지만 Planar 상태에서 Homeotropic으로 전이하기 위해 50V 이상의 높은 구동전압을 필요로 하며[11, 12] Homeotropic에서 Planar로 되돌아가기 위해서는 전기장이 제거되고 나서 대략 400ms 이상의 시간이 필요하다.[13]

본 연구에서는 기존의 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 시스템(Polymer stabilized cholesteric liquid crystal, PSCLC)의 단점인 높은 구동 전압과 느린 반응시간을 개선하기 위해 Cholesteric pelargonate(CP)를 카이랄 도판트로 이용하여 함량에 따른 열적 특성, 형태학적 특성, 물리적 특성과 전기 광학적 특성을 관찰하여 뛰어난 특성을 갖는 PSCLC를 제안함에 있다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 액 정

액정은 액체와 고체의 중간상으로 액체 결정(liquid crystal)의 줄인 말이다. 이러한 액정은 고체 결정과 같이 분자가 비교적 규칙성을 갖고 있으며, 액체와 같은 유동성을 지닌다.[14]

#### 2.1.1 액정의 분류

액정은 온도가 변하면서 고체 액체 기체의 순으로 변해갈 때 고체와 액체의 중간에서 액정상이 나타나는 온도 전이형 액정(Thermotropic liquid crystal)과 다른 물질과 섞여 있는 상태에서 분자들의 농도가 증가하면서 나타나는 농도 전이형 액정(Lyotropic liquid crystal)이 있다.[14] 액정은 분자들의 정렬방법에 따라 네마틱 액정, 스멕틱 액정, 콜레스테릭 액정으로 나눌 수 있다. Figure 1은 액정의 정렬방법에 따라 분류된 액정을 나타낸 것이다.

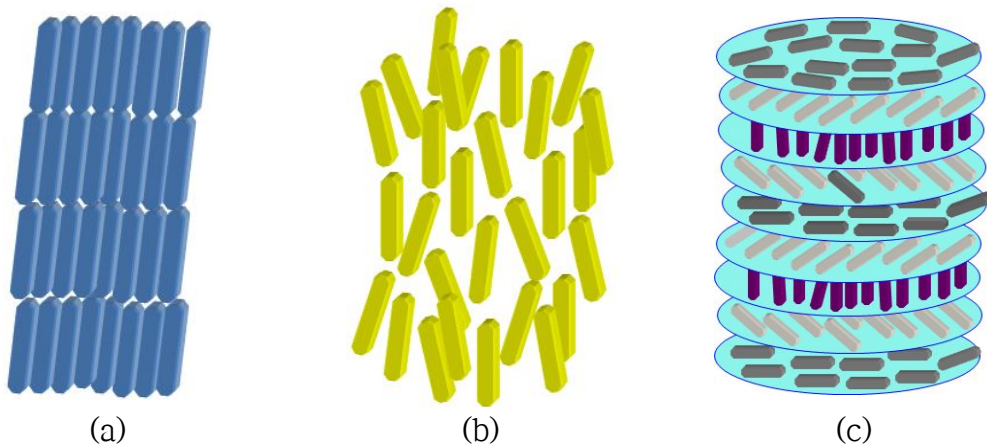


Figure 1. Molecular structure of liquid crystalline phase: (a) smectic (b) nematic (c) cholesteric

Figure 1의 (a)는 스메틱 액정으로, 가늘고 긴 분자가 일정 방향으로 배열되어 층상 구조를 이루고 있으며 층 사이의 결합력이 약해서 유동성을 갖는다. 그러나 분자 옆면에서의 강한 상호작용으로 점성이 크고, 분자 배열의 규칙성이 액정 중에서 가장 높으며 고체 결정에 가까운 성질을 갖는다. (b)는 네마틱 액정으로 분자가 일정 방향으로 배열되어 거시적으로 한 방향을 향하고 있는 구조를 갖는다. 각 분자들이 장축 방향으로 자유롭게 움직일 수 있어 스메틱 액정에 비해 점성이 작아 유동성은 높다. (c)는 콜레스테릭 액정으로, 카이랄 네마틱 액정이라고도 불린다. 콜레스테릭 액정은 네마틱 액정과 같이 정렬되어 있지만, 카이랄 도판트에 의해 네마틱 액정 층들이 회전을 이루는 나선구조를 갖는 액정이다.

### 2.1.2 액정의 성질

대부분의 액정 분자는 긴 막대 모양이며, 전형적인 액정구조는 두 개 이상의 core ring(R)과 이들을 연결하는 linking group(L), 그리고 말단의 terminal group(T)으로 이루어져 있다. Core ring부분은 benzene, alicyclic, hetero cyclic ring들이 있으며, Linking group은 core의 길이를 확장시키기 위해 core ring 사이에 위치한다. 이는 넓은 온도 범위의 네마틱 상의 안정성에 결정적인 역할을 하며, 극성의 Linking group이 높은 점도를 유도한다고 알려져 있다. Terminal group은 core의 강도 및 유연성에 관련되고, 분자 사슬의 길이가 길어질수록 점성이 높아진다. 또한 terminal group은 점성뿐만 아니라, dielectric constant( $\epsilon$ )와 그 이방성인  $\Delta\epsilon$ 를 결정하는 중요한 요인이다.

### 2.1.3 콜레스테릭 액정

콜레스테릭 액정은 네마틱 액정에 카이랄 도판트(Chiral dopant)를 첨가하여 액정 분자들끼리 층 구조를 갖고 꼬임 상태가 되며, 나선형 구조를 가지게 된다. 콜레스테릭 액정의 한층은 네마틱 액정과 유사하지만, 층을 옮길 때 따라 카이랄성을 갖는 특징에 의해 회전하는 모양이 된다. 이 때 층의 중심이 연결된 축을 나선축(Helical axis)이라고 하고, 이 축에서 방향자가 한 바퀴 돌아 다시 제자리로 위치 할 때까지의 층간 거리를

피치(Pitch)라고 한다. Figure 2는 이러한 콜레스테릭 구조에 의해 나타나는 3가지 대표적인 상을 나타낸 것이다.

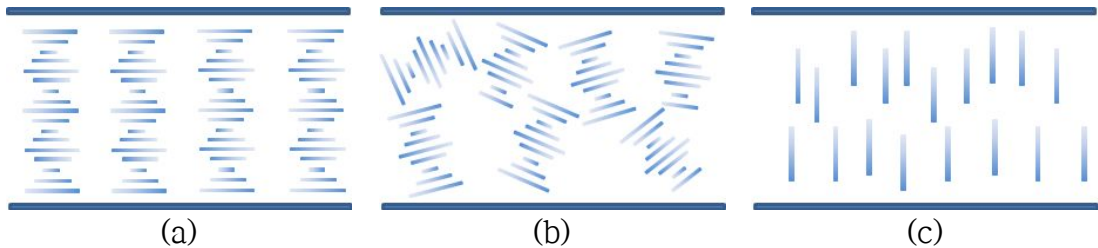


Figure 2. Texture of Cholesteric liquid crystal: (a) Planar (b) Focal conic (c) Homeotropic

Figure 2의 (a)는 콜레스테릭 액정의 Planar 상으로 나선축이 기판에 수직인 상태이다. 이 때, 액정의 카이랄성에 의하여 입사광에 대한 특정 파장의 빛을 선택적으로 반사하게 되는데, 이를 Bragg 반사라 하며, (식 1)과 같이 콜레스테릭 액정의 평균 굴절률( $\bar{n}$ )과 피치( $p$ )의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \bar{n}p \quad (\text{식 1})$$

(b)는 Focal conic 상을 표현한 것으로 콜레스테릭 액정 도메인이 임의의 방향으로 분포되어 있다. 이 상태에서는 빛의 산란이 일어나며, 투과율이 감소하게 된다. (c)의 Homeotropic 상은 콜레스테릭 액정에 임계전압보다 큰 전압을 가하여 액정이 기판에 수직된 배열 모습을 보이게 되며, 모든 입사광은 반사나 산란을 일으키지 않고 투과하게 된다. [15]

Figure 3은 콜레스테릭 액정에 전압을 인가하여 스위칭 되는 메커니즘을 나타낸 것이다. 이를 보면, 초기 Planar 상태로 배열된 콜레스테릭 액정에 전압을 인가함에 따라 Focal conic 상으로 전이 되며 더 높은 전압을 인가하게 되면 Homeotropic 상으로 전이하게 된다. 이 때, Homeotropic 상에서 전압을 빠르게 제거한다면 Planar 상태로, 천

천히 제거한다면 Focal conic 상으로 돌아가게 된다. 여기서 Planar와 Focal conic 상은 외부의 전압이나 압력이 가해지지 않는다면 이 상을 유지하려는 특성을 가지며, 이러한 특성을 쌍안정성(Bistability)이라 한다.

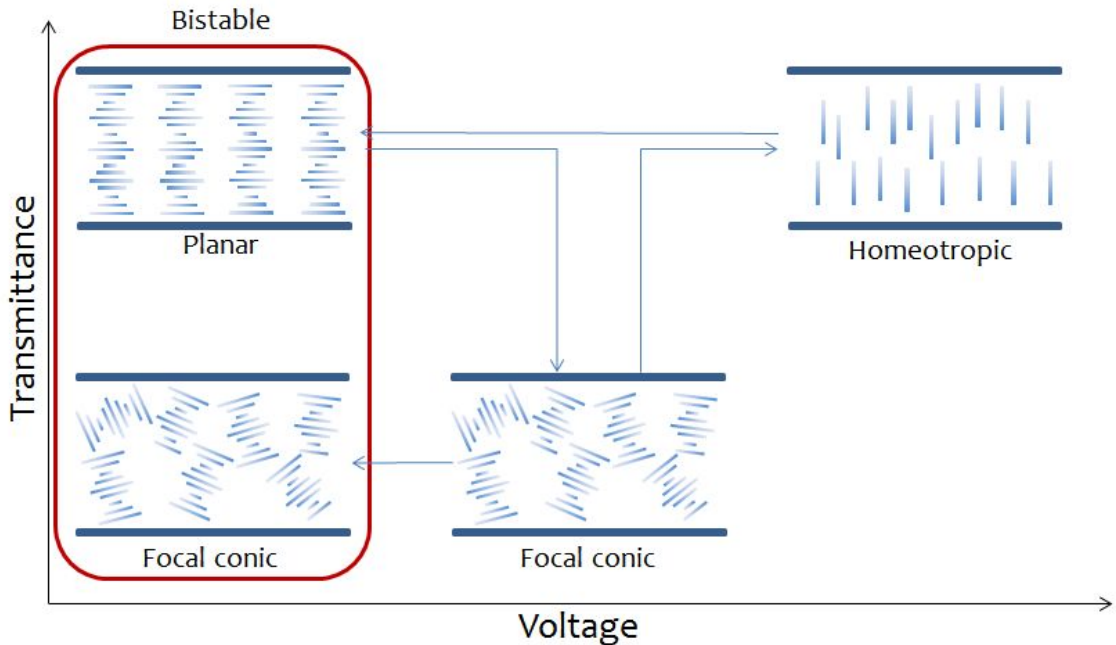


Figure 3. Switching mechanism of Cholesteric liquid crystal

## 2.2 고분자 분산형 액정의 종류

### 2.2.1 PDLC (Polymer dispersed liquid crystal)

PDLC(Polymer dispersed liquid crystal)의 원리는 액정의 이방성을 이용하여 투명-불투명 상태를 이용함에 있다. 액정의 경우 장축 굴절률과 단축 굴절률이 이방성을 보이는 것과 달리 일반적인 고분자는 등방성을 보인다. 전기장이 없는 경우에 분산된 액정은 배향 방향이 일정하지 않아 고분자와 액정과 굴절률이 차이가



나게 되며 이로 인해 고분자와 액정 사이에서 산란이 일어나게 된다. 이 상태에서 고분자 분산형 액정 필름은 불투명하게 보인다. 그러나 전기장을 가했을 때 액정은 전기장과 평행한 방향으로 배향되며, 고분자의 굴절률과 액정의 굴절률이 일치되며 필름이 투명하게 된다.[16] PDLC는 Figure 4의 (a)와 같이 고분자 매트릭스와 액정이 상분리 되어 droplet을 형성하며, 이 고분자 매트릭스에 의해 액정이 고정되므로 추가적인 배향 과정이 필요하지 않다. 이러한 특징으로 인해 제작공정을 단순화 할 수 있으며, 대형화 할 수 있는 큰 장점을 얻는다. 하지만, 고분자의 비율이 액정 대비 20~40%로 디스플레이로서 높은 구동 전압을 갖는다는 단점이 있다.

### 2.2.2 PSLC (Polymer stabilized liquid crystal)

PSLC(Polymer stabilized liquid crystal)는 액정과 혼합된 광반응성 모노머의 비율이 10% 이하로 이루어진 디스플레이이다. PSLC는 기존의 PDLC보다 낮은 고분자 함량으로 인해 droplet 형상이 아닌 고분자 네트워크 구조를 갖게 된다. 이러한 구조를 갖는 PSLC는 PDLC에 비해 고분자 비율이 적어 구동전압이 낮은 특성을 갖는다. Figure 4의 (b)는 PSLC의 구조를 도식화한 그림이다. PSLC는 PDLC와 같은 고분자/액정 복합 시스템으로 광중합을 통해 네트워크 형상의 고분자 매트릭스를 형성하여 기판이 굽혀지거나 변형이 일어났을 때 액정분자들의 배향성을 유지 시킬 수 있으며, 낮은 고분자 함량으로 구동전압이 낮아 차세대 디스플레이로 각광받고 있다. [17]

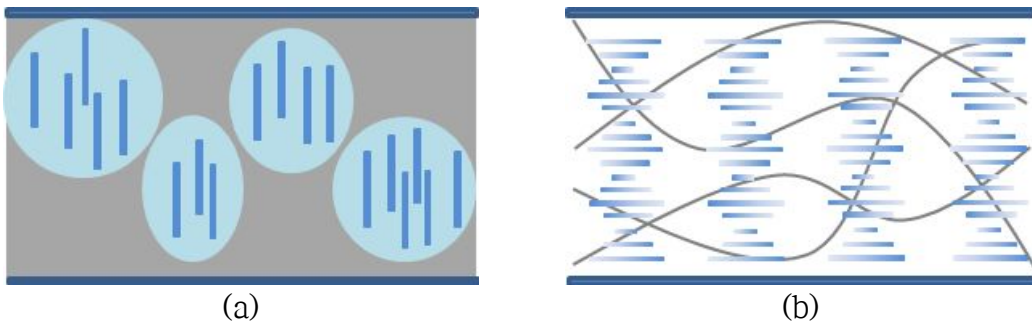


Figure 4. Schematic illustration of (a) PDLC and (b) PSLC film

## 2.3 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정의 전기광학적 특성

### 2.3.1 투과율 (transmittance)

고분자 분산형 액정 셀에서의 빛의 투과율은 평면의 경계면에 수직으로 평행광선이 입사했을 때, 그 빛의 입사강도를  $I_0$ , 경계면을 투과한 후의 빛의 강도를  $I_t$ 로 하여 (식 2)와 같이 나타낸다.

$$Transmittance (\%) = \frac{I_t}{I_0} \times 100 \quad (\text{식 2})$$

### 2.3.2 구동전압 (operating voltage)

콜레스테릭 액정의 helical 구조는 전기장이 가해짐에 의해 꼬임이 풀리게 된다. 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀의 전기-광학적 특성은 액정 셀의 투과도를 측정함으로써 해석이 가능하다. 콜레스테릭 액정의 Focal conic 상에서 Homeotropic 상으로 가는 전압-투과 곡선에서 상대투과율이 90%일 때의 전압( $V_{90}$ )을 구동 전압(operating voltage, driving voltage)이라고 한다.[18]

### 2.3.3 대비 비 (contrast ratio)

디스플레이의 중요한 특성 중 하나는 최고 투과율과 최저 투과율의 밝기 차이를 나타내는 대비 비(contrast ratio)이다. 이는 두 밝기의 차이를 최고 투과율로 나눈 값으로 정의되며, 산란하는 빛의 강도에 크게 의존한다. 최고 투과율을  $T_h$ , 최저 투과율을  $T_l$ 로 하여 (식 3)과 같이 대비 비를 나타낼 수 있다.

$$Contrast\ ratio = \frac{T_h - T_l}{T_h} \quad (\text{식 3})$$

### 2.3.4 반응 시간 (response time)

콜레스테릭 액정의 전압에 의한 반응 시간은 (1) Focal conic - Homeotropic 상으로 전압을 인가하였을 때( $\tau_{on}$ )와 (2) Homeotropic - Planar로 전압을 제거 하였을 때( $\tau_{off}$ )로 분류된다. 콜레스테릭 액정의 반응 시간은 (식 4), (식 5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{on} = \frac{\gamma_1}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon| E^2 - k_{22} \pi^2 / p^2} \quad (\text{식 4})$$

$$\tau_{off} = \frac{\gamma_1 p^2}{k_{22} \pi^2} \quad (\text{식 5})$$

위 식에서  $\gamma_1$ 은 액정의 rotational viscosity,  $\epsilon_0$ 는 유전율 상수,  $\Delta\epsilon$ 은 유전율 이방성, 그리고  $k_{22}$ 는 액정의 twist elastic constant를 의미한다.

## 제 3 장 실험

### 3.1 재료

본 연구에서는 콜레스테릭 액정을 제조하기 위해, 네마틱 액정 E7(Merck)과 카이랄 도판트 Cholesteryl pelargonate(Sigma aldrich)를 사용하였다. Table 1은 사용된 네마틱 액정의 물리적 특성을 나타낸 표이다.

Ethyl methacrylate(EMA, Sigma aldrich), 1,6-Hexanediol diacrylate(HDDA, Sigma aldrich)와 Trimethylolpropane triacrylate(TMPTA, Sigma aldrich)로 구성되어 있으며, 광개시제는 Irgacure 651을 사용하였다. Figure 5는 사용된 액정과 카이랄 도판트 및 광반응성 모노머의 구조이다.

Table 1. Physical properties of E7

Property	E7
$n_e$	1.7472
$n_o$	1.5217
$\Delta n$	0.2255
$\epsilon_{//}$	19.3
$\epsilon_{\perp}$	5.2
$\Delta\epsilon$	14.1
$T_{NI}$	58°C

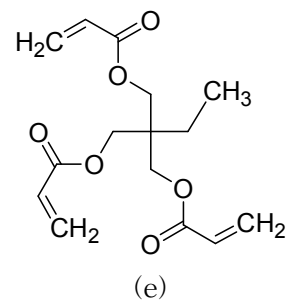
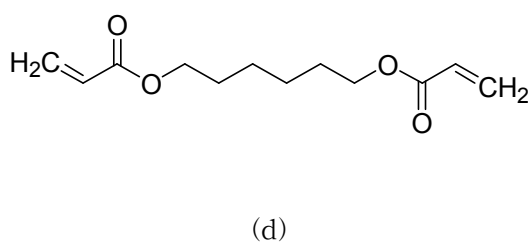
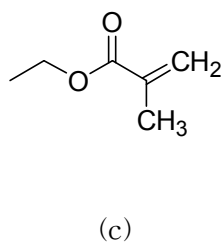
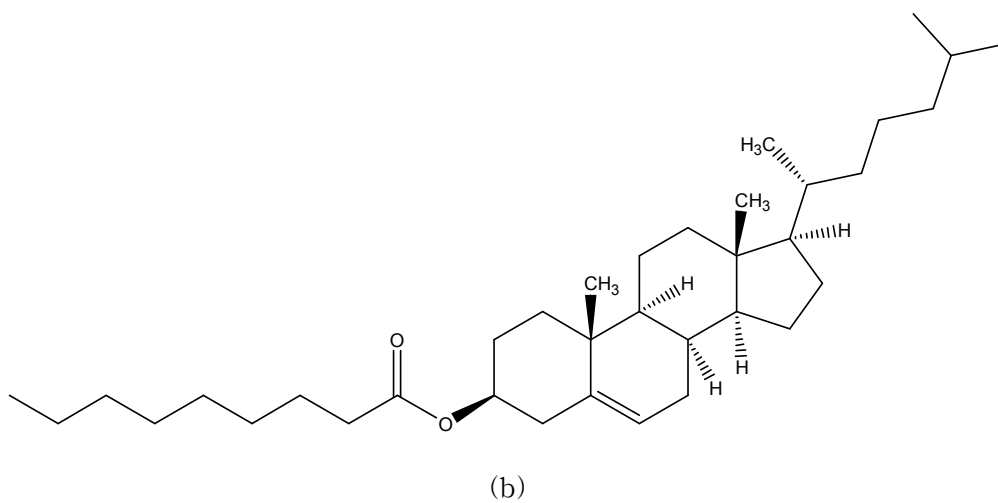
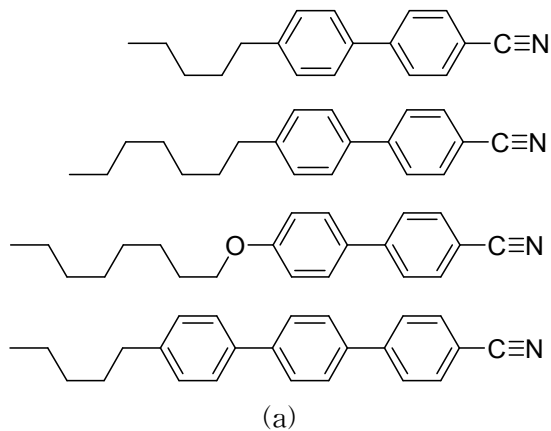


Figure 5. Chemical structures of (a) E7 , (b) Cholesteryl pelargonate, (c) Ethyl methacrylate, (d) 1,6-Hexanediol diacrylate, and (e) Trimethylolpropane triacrylate

### 3.2 Cholesteric liquid crystal 제조

콜레스테릭 액정은 네마틱 액정 E7에 카이랄 도판트 Cholesteryl pelargonate를 첨가하여 액정의 등방성 전이온도 부근에서 48시간 동안 교반시켜 제조하였다. 선정된 콜레스테릭 액정의 배합비는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Formulation of Cholesteric liquid crystal

Sample	Nematic LC	Chiral dopant*
	E7	Cholesteryl pelargonate
CP5	100	5
CP10	100	10
CP15	100	15
CP20	100	20
CP25	100	25

\* Cholesteryl pelargonate는 네마틱 액정 대비 중량 퍼센트로 첨가하였다.

### 3.3 PSCLC 시편 제작

고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀을 제작하기 위해, Cholesteryl pelargonate를 도입한 콜레스테릭 액정을 사용하였으며 Polymer matrix를 형성하기 위해 광반응성 모노머인 EMA, TMPTA, HDDA와 광 개시제 Irgacure 651을 사용하였다. Table 3은 카이랄 도판트 함량에 따른 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀을 제조하기 위한 배합비이다. Table 3과 같이 배합된 혼합액에 일정한 셀 두께를 유지하기 위해 4 $\mu$ m의 PET Spacer를 소량 첨가하였으며, 이 혼합액을 상온에서 24시간동안 균일하게 교반하였다. 이를 ITO(Indium Tin Oxide)가 코팅된 글라스 기판 위에 도포하고, 또 다른 ITO가 코팅된 Glass 기판을 엇갈려 덮은 후 일정하게 가압하였다. 이를 365, 395nm 파장의 UV-LED lamp를 이용하여 20분간 4mW/cm<sup>2</sup>의 세기로 UV를 조사하여 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀(PSCLC)을 제작하였다.

Table 3. Formulation of PSCLC

Sample	Cholesteric LC (90 wt%)		Monomer (10 wt%)			Initiator (5 wt%)
	E7	Chiral dopant	EMA	HDDA	TMPTA	Irgacure 651*
A	100	5	80	10	10	5
B	100	10	80	10	10	5
C	100	15	80	10	10	5
D	100	20	80	10	10	5
E	100	25	80	10	10	5

\* Irgacure 651은 광반응성 모노머인 EMA, HDDA, TMPTA 대비 5wt% 첨가하였다.

### 3.4 Cholesteric liquid crystal 평가

#### 3.4.1 열적 특성

DSC(Differential Scanning Calorimeter)는 시료와 불활성 기준물질에 동일한 승온, 냉각 및 유지하는 온도 프로그램을 이용하여 시료로부터 발생하는 열유속 차이를 측정하는 기기이다. 본 연구에서 사용된 기기는 TA instruments / DSC 2010 모델이며, 액정의 등방성 전이온도의 피크를 관찰하기 위해 질소 분위기 하에서 승온속도 4°C/min으로 하여 25°C에서 80°C까지 측정하였다.

#### 3.4.2 액정의 형태학적 특성 관찰

액정의 형태학적 특성을 연구하기 위해 편광현미경을 사용하였다. 편광현미경은 시료에 선편광된 빛을 입사시키면 각 물질마다 반사되는 빛의 진동방향이 다름을 이용하여 시료의 상태를 관찰하는 광학기기이다. 본 연구에서는 콜레스테릭 액정의 등방성온도에서 1°C/min의 속도로 온도를 낮추었을 때, 형성되는 콜레스테릭 액정의 형태를 관찰하였다. 이 상을 편광현미경(Zeiss Co.)를 통해 관찰하였으며, 온도 제어를 위해 가열판(hot stage, Linkam TP-92)을 부착하였다.

### 3.4.3 콜레스테릭 액정의 피치 길이 측정

제조된 콜레스테릭 액정의 피치를 측정하기 위해 Grandjean-Cano Wedge method를 이용하였다. Figure 6은 Grandjean-Cano wedge 방법을 모식화한 그림이다. 이 방법의 원리는 일정한 각도의 Wedge 셀 내에 모세관 현상을 이용하여 콜레스테릭 액정을 주입하면, 액정이 셀의 간격이 좁은 Wedge부분부터 배열됨을 이용한 것이다. 이 때, Wedge 셀 내에 배열된 액정은 나선 구조가 반 피치씩 증가할 때마다 defect line이 생긴다. 이를 편광현미경(Zeiss Co.)을 통해 관찰하였으며, 이 선의 간격을 알 수 있었다. 이 방법을 통해 콜레스테릭 액정의 피치 길이는 (식 6)을 이용하여 측정 할 수 있다.

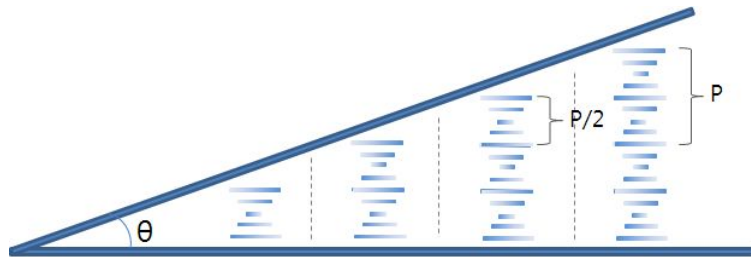


Figure 6. Schematic illustration of the Grandjean-Cano wedge method

$$p = 2d \times \tan\theta \quad (\text{식 6})$$

식을 참고하면, wedge 셀의 각도( $\theta$ )에 따른  $\tan\theta$ 와 defect line의 간격( $d$ )의 곱은  $p/2$ 를 나타내며, 이 값의 2배가 콜레스테릭 액정의 피치 길이임을 알 수 있다.



## 3.5 PSCLC 평가

### 3.5.1 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀의 형태학적 특성 관찰

실험에서 제작한 고분자 안정화된 액정 셀의 형태학적 특성을 관찰하기 위해 FE-SEM(Field Emission-Scanning Electron Microscope)을 이용하였다. PSCLC 셀 내의 고분자 네트워크를 관찰하기 위해, 제작된 PSCLC 셀을 n-hexane에 2시간 동안 침적하여 고분자 네트워크 내의 액정을 제거하였고, 이를 상온에서 2시간 동안 건조하여 샘플을 준비하였다. 본 실험에서는 HITACHI 사의 주사전자현미경(FE-SEM)을 사용하여 준비된 샘플의 표면 morphology를 관찰하였다.

### 3.5.2 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀의 전기-광학적 특성 평가

Visible Spectrometer(Avantes. Crop., Avaspec-2048)를 사용하여 1volt씩 전압을 가하면서  $\lambda=650\text{nm}$ 에서 고분자 안정화된 액정 셀의 투과율 변화를 측정하였다. Light source로는 Halogen lamp(Avantes. Crop., Avalight-HAL)를 사용하였다.

## 제 4 장 결과 및 고찰

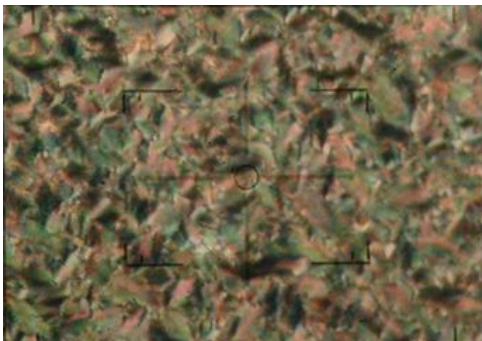
### 4.1 콜레스테릭 액정

#### 4.1.1 콜레스테릭 액정의 열적 특성 및 형태학적 특성 평가

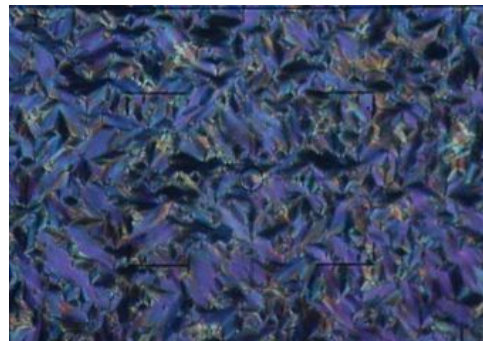
네마틱 액정 E7에 카이랄 도판트 Cholesteryl pelargonate를 5~25wt% 첨가하여 제조된 콜레스테릭의 열적 특성을 Differential Scanning Calorimeter(DSC)를 이용하여 비교하였다. Figure 7은 Cholesteryl pelargonate의 함량에 따른 DSC 곡선을 나타냈으며, Figure 8은 DSC 결과로부터 얻은 카이랄 도판트 함량과 관찰된  $T_{CI}$ (Cholesteric→isotropic)의 관계를 나타낸 것이다. 실험 결과, 카이랄 도판트의 함량에 따라  $T_{CI}$ 값이 증가하는 추세이기는 하나, 61.09~62.33°C 사이로 큰 차이가 없음 알 수 있었다. Cholesteryl pelargonate를 도입하여 제조된 콜레스테릭 액정의  $T_{CI}$ 변화 폭이 1°C 정도로 좁은 것으로 보아, Cholesteryl pelargonate를 이용해 제조된 콜레스테릭 액정은 열안정성을 갖고 있음을 판단할 수 있다. 이러한 열적 특성을 갖는 콜레스테릭 액정의 형태학적 특성은 편광현미경을 이용하여 관찰하였다. 콜레스테릭 액정은  $T_{CI}$ 이상의 온도에서는 용융 상으로 변하며, 그 이하의 온도에서는 콜레스테릭 액정이 형성된다. 각 샘플은 DSC 결과에 따라 나타난 등방성 전이온도( $T_{CI}$ )에서 1°C/min의 속도로 온도를 낮추면서 카이랄 도판트 함량에 따른 콜레스테릭 액정의 형태를 관찰하였다. Figure 9는  $T_{CI}$ 보다 1°C 낮은 온도에서 관찰된 콜레스테릭 액정의 편광현미경 사진이다. 이 상은 smectic-A상과 유사하여 구분이 어렵지만, fan 모양의 focal-conic 상을 나타내고 있다. 그러나 Figure 9의 편광현미경 결과로부터는 콜레스테릭 액정의 형태학적 특성 변화를 정확히 판단하는데 어려움이 있었다. Figure 10은  $T_{CI}$ 보다 0.5°C 낮은 온도에서 관찰된 액정의 편광현미경 결과이다. 이는 focal-conic 상이 형성되기 직전으로, 등방상에서 focal-conic상태(Figure 9)로 전이되는 사진이다. 그 결과, 카이랄 도판트의 함량이 높아질수록 focal-conic 상이 형성되기 시작할 때의 크기가 작아지는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 이 결과를 바탕으로 제조된 콜레스테릭 액정은 도판트의 함량이 증가함에 따라 피치의 길이가 작아짐을 예측할 수 있었다. 이를 보다 정확히 알아보기 위해 콜레스테릭 액정의 피치 길이를 측정하였다.

Figure 7. DSC curves of Cholesteric liquid crystal with various cholesteryl pelargonate; (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, and (e) 25 wt%

Figure 8. Temperature(Cholesteric to isotropic) of Cholesteric liquid crystal for different concentration of Cholesteryl pelargonate



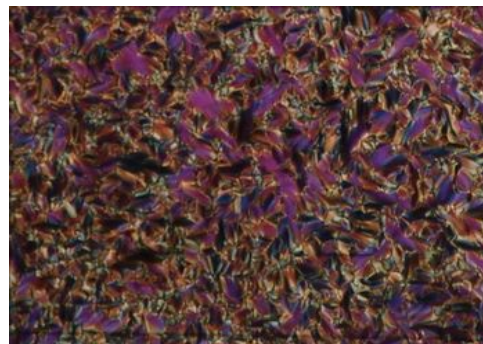
CP5



CP10



CP15

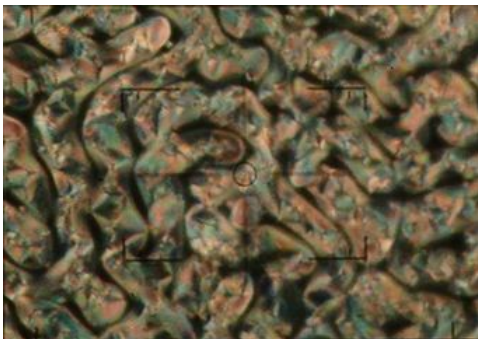


CP20

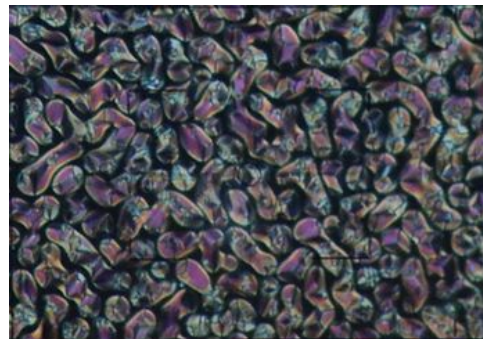


CP25

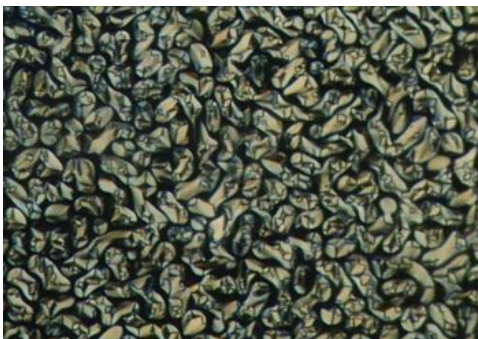
Figure 9. Polarized optical microphotograph images of Cholesteric liquid crystal with various chiral dopant at  $1^\circ\text{C}$  below  $T_{CI}$



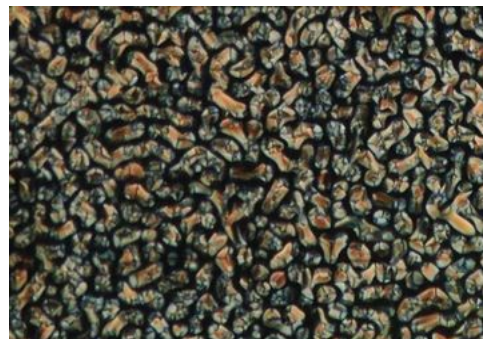
CP5



CP10



CP15



CP20



CP25

Figure 10. Polarized optical microphotograph images of Cholesteric liquid crystal with various chiral dopant at  $0.5^\circ\text{C}$  below  $T_{\text{CI}}$

#### 4.1.2 콜레스테릭 액정의 피치 길이 측정

콜레스테릭 액정은 네마틱 액정에 카이랄 도판트를 첨가하여 회전성을 갖게 된 액정으로, 방향자가 한 바퀴 돌아 다시 제자리로 위치 할 때까지의 층간 거리를 피치(Pitch)라고 한다. 본 실험에서는 피치의 길이를 측정하는 방법으로 Grandjean-Cano Wedge method를 이용하였다. 이는 Figure 11과 같이 기판을 Wedge 셀 형식으로 제작하여 콜레스테릭 액정을 주입하였을 때, 액정이 셀 갭이 작은 쪽에서부터 꼬이기 시작하여 정렬됨을 이용한 것이다. 이 때, 액정이 셀의 기울기에 따라 꼬아짐이 반 피치씩 증가하며, 새로 배열된 콜레스테릭 액정과 반 피치차이가 나서 배열된 콜레스테릭 액정 사이에 defect line이 생긴다. 이 defect line의 간격을 측정하여 다음 수식을 통해 피치의 길이를 측정 할 수 있다. wedge 셀의 각도( $\theta$ )에 따른  $\tan\theta$ 와 defect line간의 간격( $d$ )의 곱은  $p/2$ 를 나타내며, 이의 2배가 콜레스테릭 액정의 피치 길이가 된다.

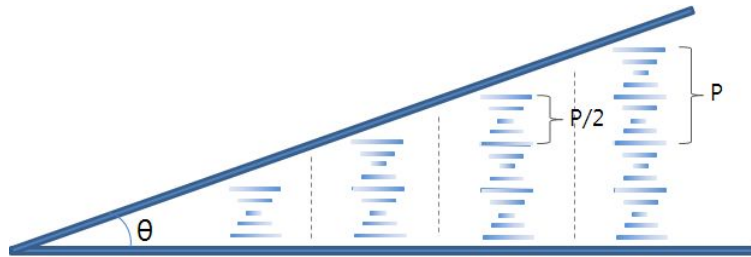


Figure 11. Schematic illustration of the Grandjean-Cano wedge method

$$p = 2d \times \tan\theta \quad (\text{식 7})$$

Table 4는 Cholesteryl pelargonate의 함량에 따라 관찰된 defect line의 길이와 그에 상응하는 피치 길이를 측정한 결과이다. 본 실험을 통하여 Cholesteryl pelargonate의 함량이 10~20wt%인 콜레스테릭 액정은 확실한 defect line이 관찰되었다. 그러나 CP5와 CP25의 경우에는 defect line이 편광현미경을 통해 관찰할 수 있는 범위를 벗어나,

정확한 defect line이 나타나지 않았다. 따라서 CP5와 CP25의 피치 길이는 CP10~CP20의 HTP값을 (식 8)을 통해 구한 후 그 경향성을 이용하여 계산 추정되었다. (식 8)에서 피치의 길이는 카이랄 도판트의 고유 나선 꼬임력(Helical twisting power; HTP)과 카이랄 도판트의 농도(C)의 곱의 역수로 계산할 수 있다. Figure 12는  $1/p$ 과 농도의 관계를 나타낸 그래프이다. 그 결과 측정된 CP10~CP20의 HTP 값이  $2.48\mu\text{m}^{-1}$ 이며  $R^2=0.9977$ 로 신뢰 범위 내에 있음을 알 수 있다. 이와 같은 HTP 값을 이용하여 실험상 편광현미경의 측정 범위를 넘어간 5wt%와 25wt%의 도판트를 사용한 콜레스테릭 액정의 피치 길이를 추정할 수 있었다. 결과적으로 제조된 콜레스테릭 액정의 피치 길이는 카이랄 도판트의 함량이 증가함에 따라  $8\mu\text{m}$ 에서  $1.6\mu\text{m}$ 로 감소하는 것으로 나타났다.

Table 4. Condition of Wedge cell and Pitch length

Sample	$\tan\theta$	$d(\mu\text{m})$	Pitch( $\mu\text{m}$ )
CP5	-	-	8.064
CP10	0.0155	125	3.875
CP15	0.0164	83.33	2.733
CP20	0.0158	62.5	1.975
CP25	-	-	1.600

$$p = \frac{1}{HTP \times C} \quad (\text{식 } 8)$$



Figure 12. Inverse pitch( $1/P$ ) versus concentration of chiral dopant

Table 5와 Figure 13은 측정 및 추정된 피치 길이와 등방성 전이온도를 나타낸 결과이다. 카이랄 도판트의 농도가 높아질수록, 등방성 전이온도는 높아지는 경향은 보이지만, 변화 온도 범위가 좁은 것으로 보아 콜레스테릭 액정은 열적 안정성이 있다고 판단할 수 있다. 또한, 카이랄 도판트의 농도가 높아짐에 있어 피치의 길이가 짧아짐을 알 수 있다.

Table 5. Isotropic transition temperature and Pitch length of Cholesteric liquid crystal

	$T_{CI}(^{\circ}C)$	Pitch( $\mu m$ )
CP5	61.09	8.064
CP10	61.41	3.875
CP15	61.68	2.733
CP20	62.27	1.975
CP25	62.33	1.600

Figure 13. Isotropic transition temperature(solid line) and pitch length(dotted line) of Cholesteric liquid crystal with various chiral dopant concentrations

## 4.2 PSCLC (Polymer Stabilized Cholesteric Liquid Crystal)

Cholesteryl pelargonate의 함량에 따라 피치가 다른 콜레스테릭 액정을 제조하였으며, 이를 이용하여 고분자 안정화된 콜레스테릭 액정 셀을 제작하였다. 피치가 다른 콜레스테릭 액정에 동일한 고분자를 사용하였을 때, PSCLC 셀 내에 형성되는 고분자 네트워크 형태와 전기-광학적 특성을 관찰하였다.

### 4.2.1 PSCLC의 형태학적 특성 관찰

제작된 PSCLC 셀의 형태학적 특성을 관찰하기 위해 FE-SEM을 통해 셀의 표면을 관찰하였다. 제작된 셀을 n-hexane에 2시간동안 담가 액정을 제거하고, 용매를 건조시켜 샘플을 준비하였다. 일반적으로 PSCLC 내에서 콜레스테릭 액정과 고분자의 혼용성이 높다면, fiber 형상의 네트워크가 형성된다.[19] 그러나 SEM을 통해 관찰한 결과, 본 실험의 배합을 기반으로 제작된 PSCLC 셀은 콜레스테릭 액정과 고분자가 혼용성이 떨어져 서로 상분리 되어 고분자 네트워크가 형성됨을 볼 수 있다. Figure 14는 Cholesteryl pelargonate의 함량에 따라 제작된 PSCLC 셀의 표면을 100배율로 관찰한 SEM 이미지이며, 각 샘플에 대해 오른쪽에 삽입된 사진은 이를 300배율로 확대하여 찍은 SEM 결과이다. 그 결과 PSCLC 셀 내에 고분자 네트워크가 형성되었으며, 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 고분자 네트워크의 간격이 좁아짐을 관찰할 수 있다. 이는 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 콜레스테릭 액정 피치 길이가 작아지기 때문으로 설명될 수 있다. 즉, 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 액정 피치 길이가 짧아지고, 그에 따라 콜레스테릭 액정 도메인 사이즈가 작아진 것으로 판단된다. 이렇게 형성된 고분자 네트워크는 카이랄 도판트 함량이 많아질수록 간격이 좁아지고 더욱 촘촘하게 연결됨을 관찰 할 수 있었다. 이러한 PSCLC 셀의 형태학적 구조 변화에 따라 PSCLC 셀의 전기-광학적 특성도 다를 것이라 예측하였으며 그 특성을 관찰하였다.

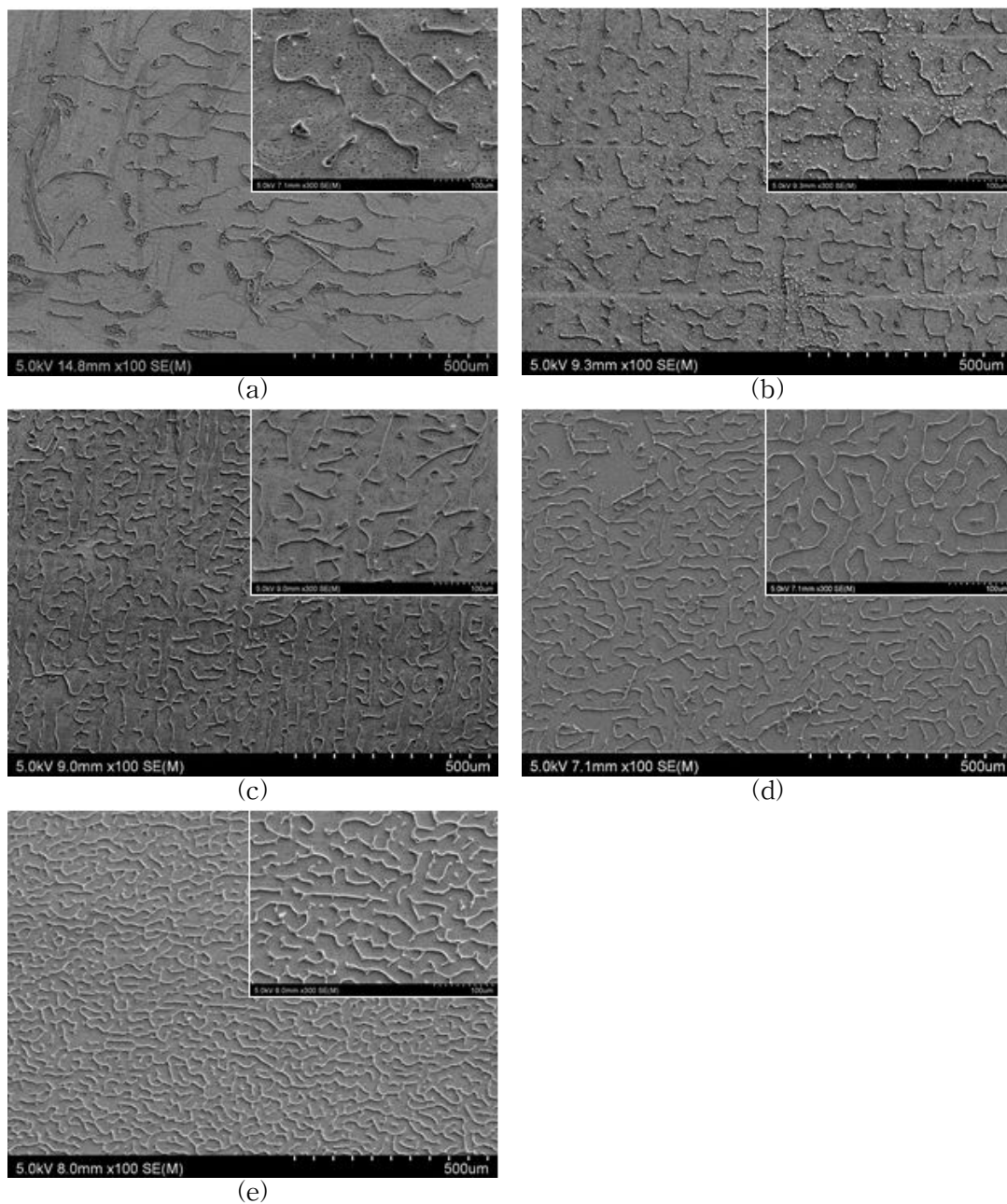


Figure 14. SEM images of polymer network in the cell at chiral dopant concentrations of (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 and (e) 25 wt%. Insets show enlarged images of the cell

#### 4.2.2 PSCLC의 V-T curve

제조된 Polymer stabilized cholesteric liquid crystal(PSCLC) 셀을 이용하여 전기-광학적 특성을 관찰하였다. Figure 15는 PSCLC 셀의 전압 구동에 따른 투과율을 측정된 그래프이며, Table 6은 전압-투과 곡선에서 나타난 투과율 정보를 나타낸 표이다. 앞서 Cholesteryl pelargonate를 이용한 콜레스테릭 액정이 카이랄 도판트의 함량에 따라 콜레스테릭 액정 도메인 사이즈가 작아지며 그에 따른 고분자 네트워크 간격이 좁아짐을 확인하였다. 이 콜레스테릭 액정의 피치 변화와 고분자 네트워크 형상의 형태학적 특성이 달라지는 것으로 보아, 각 샘플의 전기-광학적 특성에도 영향을 미칠 것이라 예상하여 이를 관찰하였다. 주로 관찰한 전기-광학적 특성으로는, 셀을 구동하기 위한 구동전압과 대비 비, 그리고 Homeotropic에서 Planar 상으로 전이되는 반응 시간이다.

Figure 15. Transmittance versus applied voltage curve of the PSCLC cell with various chiral dopant concentrations

Table 6. Optical properties from Voltage-Transmittance Curve for PSCLC samples

Sample	T (V=0)	T (minimum)	T (maximum)
A	49.63	23.55	81.74
B	57.41	19.14	83.07
C	61.61	12.21	84.45
D	63.08	7.32	83.37
E	60.14	10.88	83.80

#### 4.2.2.1 PSCLC의 구동 전압 특성

구동전압( $V_{90}$ )은 V-T 곡선에서 Focal-conic에서 Homeotropic으로 전압이 증가할 때, 최소-최대 투과율의 상대 투과율이 90%로 도달할 때의 전압이다. Table 7은 그 때의 Focal-conic, Homeotropic 상의 투과율과 이에 따른 구동전압을 구하여 나타낸 표이며, Figure 16은 카이랄 도판트 함량에 따른 구동전압과 피치의 길이를 나타낸 그래프이다. 그 결과, 제작된 PSCLC 셀은 전체적으로 30V 이하의 낮은 구동전압을 나타내었고, 카이랄 도판트 함량이 증가함에 따라 구동전압이 높아짐을 알 수 있다. 이는 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 콜레스테릭 액정의 피치 길이가 짧아지기 때문으로 설명 될 수 있다. 콜레스테릭 액정의 피치 길이와 구동 전압의 관계는 다음과 같은 물리적 수식으로 표현할 수 있다.

$$E_d = \frac{2\pi}{p} \sqrt{\frac{\pi k_{22}}{\Delta\epsilon}} \quad (\text{식 9})$$

위 식에서  $p$ 는 콜레스테릭 액정의 피치,  $k_{22}$ 는 액정의 twist elastic constant,  $\Delta\epsilon$ 은 유전율 이방성을 의미한다. 위 수식을 통해 구동전압이 피치에 반비례 하며, 콜레스테릭 액정의 피치가 짧아질수록 구동전압이 높아지는 것을 알 수 있다.[20] Figure 17은 위 식을 토대로 피치와 구동전압과의 관계를 나타낸 그래프이다. 이에 대한 회귀분석 결과, 구동 전압이  $\frac{1}{p}$ 의 그래프를 따르는 경향이 있음을 보이지만, 완전히 일치하지는 않음을 보인다. 이를 보면 위 식은 순수한 콜레스테릭 액정에서

비슷한 식이므로, PSCLC 셀의 정확한 구동전압을 나타내지는 않음을 관찰할 수 있다. 이는 PSCLC 셀 내의 고분자 네트워크와 액정의 상호작용에 의한 것으로 판단할 수 있었다. 하지만, 위 식과 관련하여 PSCLC의 전기-광학적 특성이 콜레스테릭 액정의 피치 길이에 따라 경향성을 갖는 것을 알 수 있다.[21] 이는 필름의 두께가 일정할 때, 피치 길이가 작은 콜레스테릭 액정의 작은 helical 구조는 더 많은 에너지(전기장)에 의해 꼬임이 풀리게 되며, 구동전압이 더 높아짐을 의미한다. 즉, 카이랄 도판트의 함량이 많아질수록, 콜레스테릭 상의 helical 구조가 작아지며 Focal-conic에서 Homeotropic으로 helical 구조가 풀리는데 필요한 힘이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 16. Driving voltage(solid line) and Pitch length(dotted line) of samples

Table 7. Optical properties from Voltage-Transmittance Curve for PSCLC for variable concentration of cholesteryl pelargonate

Sample	T (focal-conic)	T (homeotropic)	$V_{90}$
A	23.55	81.74	9
B	19.14	83.07	15
C	12.21	84.45	22
D	7.32	83.37	23
E	10.88	83.80	28

Figure 17. Driving voltage versus Pitch curve of the PSCLC cell



#### 4.2.2.2 PSCLC의 전압 이력현상(Hysteresis)

카이랄 도판트의 함량에 따라 전압 이력현상을 비교하였다. 이력 폭(hysteresis width,  $\Delta V$ )은 전압 증가-감소 곡선에서 최대-최소 투과율 사이 중점의 전압 차이로 정의된다. Figure 18은 각 샘플이 갖는 이력현상을 관찰한 전압-투과 곡선이다. 안정한 Focal-conic상에서 Homeotropic으로 전압을 인가한 후, 분당 10V의 속도로 전압을 제거하여 다시 안정한 Focal-conic 상으로 돌아오는 과정을 관찰하였다. 그 결과 Cholesteryl pelargonate를 이용하여 제조된 PSCLC가 전압을 증가, 감소하는 과정에서 투과율의 이력 차이가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 구동전압이 9V에서 28V로 증가하는 것을 확인하였으며, 전압이 감소하는 과정에서 Homeotropic에서 Focal-conic 상으로 전이되는 전압 또한 5V에서 18V로 높아짐을 관찰할 수 있었다. 그 결과 전압이 증가, 감소하는 과정에서 발생한 이력 차이는 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 넓어지는 것을 관찰하였다. 이는 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 액정의 도메인이 작아지며, 고분자 네트워크의 간격이 좁아져 액정과 고분자 사이의 상호작용이 커지기 때문인 것으로 생각된다.

Figure 19는 카이랄 도판트의 함량에 따라 전압 특성을 나타낸 그래프이다. 그 결과 제작된 PSCLC 셀이 전체적으로 30V 미만의 낮은 구동 전압을 갖으며, 5V 미만의 좁은 이력 차이를 나타내었고, 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 구동전압과 이력 차이가 증가하였다. 이는 Cholesteryl pelargonate의 함량이 높아질수록 콜레스테릭 액정의 피치가 짧아져 helical 구조가 풀리는데 에너지를 많이 필요로 하며, 고분자 네트워크 간격이 좁아져 고분자와 액정의 상호작용이 높아지기 때문인 것으로 판단된다.

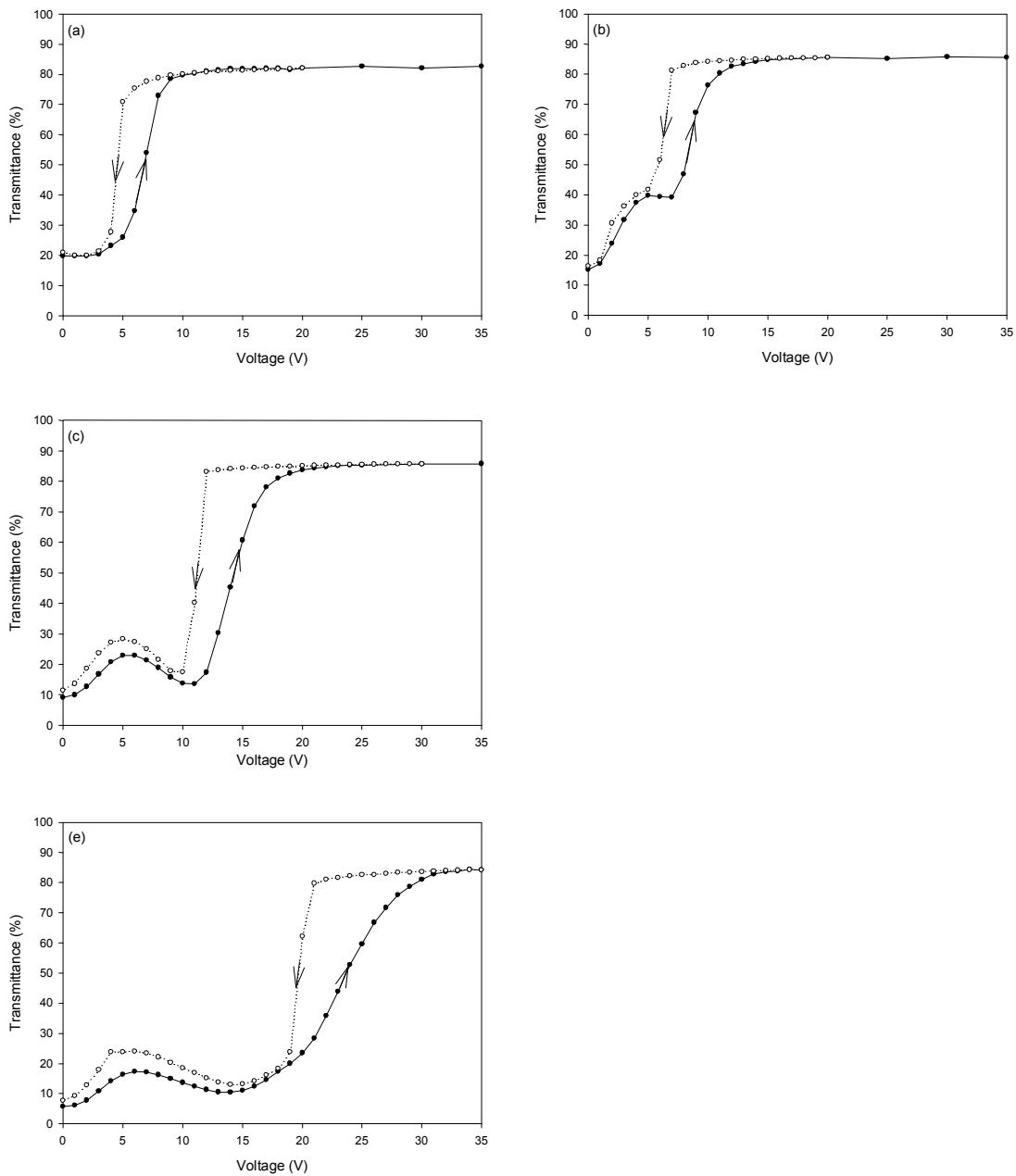


Figure 18. Measured transmittance versus voltage curves of cell at chiral dopant concentration of (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, and (e) 25 wt%

Figure 19. Electro properties(circle) and pitch length(square) of samples

#### 4.2.2.3 PSCLC의 대비 비(Contrast ratio)

PSCLC의 광학적 특징 중 대비 비는 최소-최고 투과율의 차이를 최고 투과율로 나눈 값으로 나타낸다. 특히, 쌍안정 특성을 갖는 PSCLC의 경우, Bright state와 Dark state 사이의 대비 비가 중요한 평가 지표가 된다. 대비 비의 값을 계산하기 위해, 전압을 인가하지 않는 안정한 상태의 Planar와 Focal-conic 상의 투과율을 이용하였다. Figure 20은 Bright state의 Stable Planar 상의 투과율과 Dark state의 Stable Focal-conic 상의 투과율, 그에 따른 대비 비를 나타낸 그래프이다. 그 결과 Cholesteryl pelargonate의 함량이 증가할수록 PSCLC 셀의 대비 비가 증가하는 경향을 보이며, 대비 비의 기울기는 상대적으로 Planar상의 투과율보다 Focal-conic 상의 투과율에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 콜레스테릭 액정의 도메

인이 작아지며, 액정 셀의 산란이 강하게 일어나 Focal-conic 상의 투과율이 낮아지기  
 때문에 설명될 수 있다.[19] 그러나 카이랄 도판트의 함량이 20wt% 이상에서는  
 Focal-conic 상의 투과율이 증가하며, PSCLC 셀의 대비 비가 낮아지는 것으로 나타났  
 는데, 이는 일정 크기 이상으로 도메인이 너무 크거나 작을 때에는 산란 상태가 약해  
 질 수 있기 때문인 것으로 판단된다.[20] 따라서, Cholesteryl pelargonate가 20wt%인  
 샘플 D가 가장 효율적인 산란 구조의 Focal-conic 상을 갖고 있으며, 대비 비 1에 가  
 장 가까우며 광학적 특성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

Figure 20. Optical properties of samples

#### 4.2.2.4 PSCLC의 반응 시간

콜레스테릭 액정은 Planar 상태와 Focal-conic 상이 전압의 인가 없이 유지가 가능하다. 각 상태 전이를 위해서는 Homeotropic 상을 거쳐 되돌아와야 하는데, 이 때 Homeotropic에서 Planar로 전이되는 시간이 수백 ms로 긴 것이 단점이다. 본 연구에서는 Cholesteryl pelargonate를 카이랄 도판트로 사용하여 H-P 전이시간을 단축하고자 한다. 전압이 인가된 Homeotropic 상태의 PSCLC 셀에 전압을 0V로 빠르게 제거하였을 때 Planar로 돌아오는 시간을 측정하였다. 이는 다음과 같은 물리적인 수식을 통해 H-P 반응시간과 액정의 피치 길이 사이의 관계를 파악할 수 있다.

$$\tau_{off} = \frac{\gamma_1 P^2}{k_{22} \pi^2} \quad (\text{식 } 10)$$

위 식에서  $\gamma_1$ 은 액정의 rotational viscosity, 그리고  $k_{22}$ 는 액정의 twist elastic constant를 의미한다. 이 식에도 볼 수 있듯이, 콜레스테릭 액정의 피치가 전기장을 off 하는데 걸리는 반응시간과 제곱비례 하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 카이랄 도판트의 함량이 5~25wt%로 증가하면, 피치 길이는 8.06~1.60 $\mu\text{m}$ 로 짧아진다. Figure 21은 콜레스테릭 액정의 피치 길이에 따른 반응 시간을 나타낸 그래프이다. 그 결과 액정의 피치 길이가 길어질수록 Homeotropic 상에서 Planar 상으로 돌아오는 전이시간이 느려지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 이는 카이랄 도판트의 함량이 많아질수록 피치의 길이가 짧아지며, H-P 전이시간이 빨라지는 것을 의미한다. 그 결과 피치 길이와 H-P 전이시간의 관계가 서로 제곱비례 함을 알 수 있다. 하지만 포물선이 위로 볼록한 형태로 나타났는데, 이는 위 식이 순수한 콜레스테릭 액정에서 비롯한 식이며, 피치 길이 외에 다른 요인에 기인한 것으로 생각된다. 이는 카이랄 도판트의 함량이 증가할수록 피치의 길이는 짧아지고, 농도가 진해져 점도는 높아지기 때문으로 설명될 수 있다.

Figure 21. Response times from Homeotropic to Planar of PSCLC samples

#### 4.2.2.5 PSCLC의 전기-광학적 특성

Table 8은 Cholesteryl pelargonate를 이용하여 제작된 PSCLC의 전기-광학적 특성을 요약한 것이다. 그 결과 Cholesteryl pelargonate의 함량이 증가할수록, 구동전압은 높아지고 반응시간은 짧아진다. 이는 Cholesteryl pelargonate의 함량에 따라 피치가 작아짐에 기인한 것으로 판단된다. 또한 피치 길이가 작아질수록 콜레스테릭 액정의 도메인도 작아지며 PSCLC 셀의 산란이 강하게 일어나서, PSCLC 셀의 대비 비가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 카이랄 도판트의 함량이 20wt% 이상에서는 대비 비가 낮아지는 것으로 나타났는데, 이는 일정 크기 이상으로 도메인이 너무 크거나 작을 때에는 산란 상태가 약해지기 때문인 것으로 판단된다. Figure 22는 본 연구에서 가장 뛰어난 광학적 특성을 나타낸 Cholesteryl pelargonate의 함량이 20wt%인 샘플 D의

Bistable 특성을 보여주는 사진이다. Figure 22의 (a)는 PSCLC 셀의 안정한 Planar 상태의 투명한 셀이며, (b)는 안정한 Focal-conic 상태의 불투명한 셀이다. 결과적으로 Cholesteryl pelargonate를 사용한 PSCLC 셀이 차세대 디스플레이로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 8. Properties of PSCLC cell

Sample	Driving voltage(V)	Hysteresis width ( $\Delta V$ )	Contrast ratio	Response time(ms)
A	9	2.29	0.5761	210
B	15	2.37	0.7154	200
C	22	2.96	0.8143	170
D	23	3.29	0.9523	130
E	28	3.49	0.8706	110



(a)



(b)

Figure 22. Photographs of the bistable PSCLC cell with Cholesteryl pelargonate 20wt% at zero voltage; in (a) Planar, and (b) Focal-conic state

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 Cholesteryl pelargonate를 이용하여 PSCLC(Polymer stabilized cholesteric liquid crystal) 셀을 제조하였다. 제조된 PSCLC 셀의 전기 광학적 특성을 평가해 본 결과 30V 미만의 낮은 구동전압과 200ms 이하의 빠른 반응 시간을 나타내었다. 또한 Cholesteryl pelargonate의 함량이 20 wt%인 콜레스테릭 액정을 이용한 PSCLC셀이 대비 비가 1에 가까운 0.9523으로 광학적 특성이 뛰어난 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제조된 Cholesteryl pelargonate를 이용한 PSCLC 셀은 전기-광학적 특성뿐만 아니라 반응 시간도 빨라 차세대 디스플레이로도 충분한 응용가능성을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 Cholesteryl pelargonate를 도입한 콜레스테릭 액정을 고분자와 혼용하여 사용하기에는 상용성이 부족한 문제점이 있으나, 이는 차후에 고분자 매트릭스와 광중합조건을 설계하여 충분히 해결할 수 있는 사항으로 사료된다.



## 참고문헌

- [1] I. Dierking, L. L. Kosbar, A. C. Lowe, and G. A. Held, *Liquid Crystals*, 24, 3, 387 (1998)
- [2] D. K. Yang, J. W. Doane, Z. Yaniv, and J. Glasser, *Appl. Phys. Lett*, 64, 15, 1905 (1994)
- [3] K. H. Kim, D. H. Song, Z. G. Shen, B. W. Park, K. H. Park, J. H. Lee, and T. H. Yoon, *Opt. Express*, 19, 11, 10174 (2011)
- [4] G. Pan, H. Cao, R. Guo, W. Li, J. Guo, Z. Yang, W. Huang, W. He, X. Liang, D. Zhang, and H. Yang, *Optical Materials*, 31, 8, 1163 (2009)
- [5] K. S. Sathaye, L. Dupont, and J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, *Opt. Eng*, 51, 3, 034001, (2012)
- [6] H. Guillard, P. Sixou, L. Reboul, and A. Perichaud, *Polymer*, 42, 24, 9753 (2001)
- [7] C. Y. Lo, and M. S. Tsai, *Opt. Express*, 11, 6, 560 (2003)
- [8] J. Guo, J. Sun, L. Zhang, K. Li, H. Cao, H. Yang, and S. Zhu, *Polym. Adv. Technol*, 19, 11, 1504 (2008)
- [9] F. Li, L. Wang, W. Sun, H. Liu, X. Liu, Y. Liu, and H. Yang, *Polym. Adv. Technol*, 23, 2, 143 (2012)
- [10] H. H. Liang, C. C. Wu, P. H. Wang, and J. Y. Lee, *Opt. Materials*, 33, 8, 1195 (2011)
- [11] P. Kumar, S. W. Kang, and S. H. Lee, *Opt. Materials Express*, 2, 8, 1121 (2012)
- [12] C. Y. Huang, S. W. Ke, Y. S. Chih, *Optics Communications*, 266, 198 (2006)
- [13] K. H. Kim, D. H. Song, Z. G. Shen, B. W. Park, K. H. Park, J. H. Lee, and T. H. Yoon, *Opt. Express*, 19, 11, 10174 (2011)
- [14] S. Chandrasekhar, "Liquid Crystals", Cambridge University Press; 2 edition(1992)
- [15] P. G. de Gennes, and Prost, "The Physics of Liquid Crystals", Oxford University Press (1993)
- [16] J. J. Wu and C. M. Wang, *Physics Letter A*, 149, 232 (1997)

- [17] Paul. S. Drzaic, "Liquid Crystal Dispersion", World Scientific (1995)
- [18] J. Ma, Z. G. Zheng, Y. G. Liu, and L. Xuan, Chin. Phys. B., 20, 2, 024212 (2011)
- [19] H. Lu, J. Zhang, M. Wang, Z. Song, X. Xiong, G. Lin, G. Zhang, X. Wang, and L. Qiu, Mol. Cryst. Liq. Crst., 588, 1, 9 (2014)
- [20] H. H. Liang, P. H. Wang, C. C. Wu, S. C. Hsu, and J. Y. Lee, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 552, 1, 111-122 (2012)
- [21] C. Y. Huang, Y. S. Chih and S. W. Ke, Appl. Phys. B., 86, 123-127 (2007)

## 감사의 글

대학원을 입학한 것이 엿그제 같은데 벌써 마무리 하는 시점이 되었습니다. 이 시간동안 많은 것을 배우고 여러 사람들을 만나 공부하고 새로운 것을 배우면서 열의, 좌절, 그리고 성취감으로 가득했던 시간이었습니다. 지금의 제가 있기까지 관심과 격려로 저에게 큰 힘이 되어주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

먼저 이 논문이 완성되기까지 지도는 물론 깊은 관심과 배려로 때로는 질책으로 진정한 학문의 길을 몸소 보여주신 김현경 교수님, 홍진후 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 대학원 생활하는 동안 격려, 응원해주시며 많은 가르침을 주신 최재곤 교수님, 유지강 교수님, 김준섭 교수님, 조훈 교수님, 이창훈 교수님께도 감사드립니다.

우선 가장 오랜 시간동안 같이 지내며 언제나 가까이에서 저의 많은 부분을 공유해주고 큰 힘이 되어준 아람 언니, 너무나 감사드립니다. 덕분에 많이 발전하고 실험실 생활을 즐겁게 보낼 수 있었습니다. 그리고 실험실에 들어온 첫 날부터 선배 이상의 언니로 대해주신 희영언니, 덕분에 이 실험실 생활에 빨리 적응하고 재밌게 보낼 수 있었음에 감사드립니다. 항상 유쾌하고 즐거운 종수오빠, 묵묵히 맡은 바 하던 성윤오빠, 초기 생활을 즐겁게 보내게 해주셔서 감사드립니다. 그리고 언제나 성실하고 든직한 홍곤이오빠, 가끔은 장난스러운 모습으로 웃음을 준 용태오빠, 활발하고 재치 있는 규근이에게도 정말 감사의 마음을 드립니다. 그리고 잠깐이나마 같이 생활했던, 진지한 모습으로 나에게 많은 것을 깨닫게 해준 민수오빠, 즐겁고 낙살 좋은 하와이언 상진이 오빠에게도, 같이 생활했던 모든 랩원들에게도 깊이 감사드립니다.

힘들고 지칠 때 큰 힘이 되어준 란희 언니, 은정이, 슬비, 소은이, 수향이. 덕분에 학, 석사 과정을 즐겁게 보냈습니다. 그리고 나의 오랜 친구들 다은이, 수정이, 겨운이. 힘들 때 전화하면 항상 제 이야기를 들어준 의지할 수 있는 소중한 친구들이 있었기에 힘들 수 있었습니다.

마지막으로 늘 한결같은 마음으로 사랑을 주시는 아빠와 엄마. 딸은 항상 잘할 거라며 믿음을 주시고 응원해주셨기에 여기까지 왔습니다. 앞으로도 항상 정진하는 딸이 되겠습니다. 그리고, 엄마 아빠 못지 않게 사랑을 주시는 고모와 고숙. 매번 걱정해주시고 응원해주시며 누구보다도 저를 생각해주신 그 사랑에 보답하도록 노력하겠습니다. 그리고 오자매. 언니와 동생이 있었기에 의지하고 힘내서 마무리 할 수 있었습니다. 이 논문을 마치며, 모든 가족분들께서 주신 큰 사랑에 깊은 존경과 감사를 드립니다.

2015년 졸업을 앞두고,  
 오 수 경 올림