

## 상 분리에 의한 콜레스테릭 액정의 피치 변화

박한수 · 김범경 · 김환기 · 김인선\* · 송기국<sup>†</sup>

경희대학교 영상정보소재기술 연구센터, \*아이컴포넌트  
(2006년 1월 9일 접수, 2006년 3월 13일 채택)

### Pitch Variations in Cholesteric Liquid Crystals by Phase Separation

Hansoo Park, Beomkyung Kim, Whanki Kim, Insun Kim\*, and Kigook Song<sup>†</sup>

Materials Research Center for Information Display,  
Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 449-701, Korea

\*I-components, Pyongtaek, Gyeonggi-do 451-805, Korea

(Received January 9, 2006; accepted March 13, 2006)

**초록 :** CLC는 주기적인 나선구조 때문에 빛을 선택적으로 반사하는 특성을 보이는데, 반사 파장대역이 넓은 CLC를 광 반응에 의한 상 분리 현상을 이용하여 제조하였다. CLC 액정 셀에 의하여 반사되는 빛의 파장은 노광하는 빛의 세기가 작을수록 그리고 UV 흡수 dye의 양이 증가할수록 범위가 증가하여 초기 50 nm의 반사 파장대역을 300 nm까지 넓힐 수 있었다. 광경화된 CLC 액정 셀 내에 상 분리에 의하여 형성된 다양한 CLC 피치 분포를 SEM으로 관찰하였고, ATR-IR 실험을 이용하여 CLC 피치 분포가 넓어지는 것이 상 분리에 의한 것임을 확인하였다.

**Abstract :** Due to their periodic helical structure, cholesteric liquid crystals (CLC) have a unique ability to selectively reflect light. CLC films reflecting a broad wavelength band were prepared by inducing a pitch gradient in CLC layer through a phase separation. The reflection bandwidth of the CLC cell was broaden as irradiation light intensity decrease and as the amount of the UV absorbing dye increased. Initial reflection bandwidth of 50 nm was broaden to 300 nm. Various pitch distributions in the CLC cell was observed using SEM and ATR-IR technique was used to prove that the pitch distributions are induced through the phase separation.

**Keywords :** cholesteric liquid crystal, reflective polarizer, pitch distribution, phase separation, ATR-IR.

## 서 론

정보화 시대에서 정보 표시소자의 첨단을 선도하고 있는 액정디스플레이(liquid crystal display: LCD)는 기존의 음극선관(cathode ray tube: CRT)에 비해 두께가 얇고 가벼워 노트북 컴퓨터를 비롯한 휴대용 기기에 적용되고 있으며 대형화 추세에 맞추어 TV 시장에서도 점유율을 높여가고 있다. 그러나 액정의 전기적 구동에 의해 빛의 세기를 조절하는 표시소자인 LCD는 편광판에 통과한 선편광이 액정에 의하여 편광 특성이 변화된 후 또 다른 편광판으로 통과하면서 표시특성을 구현하게 된다. 이때 사용되는 편광판은 대부분 흡수형 편광판으로, 투과되는 빛 가운데 편광판의 축과 평행한 선편광 성분은 흡수하고 수직인 편광 성분만을 투과하므로, LCD 광원인 백라이트(backlight)에서 나오는 빛의 1/2이 액정을 통과하기 전에 이미 흡수되어 사라지는 광원 사용의 문제점이 존재한다. 이러한 LCD 광원의 비효율성을 개선하고자 흡수형이 아닌 반사형 편광판을 개발하는 연구에 많은 관심이 모이고 있다. 반사형 편광판은 투과되는 특정 편광의 빛을 제외한 나머지는 흡수를 하지 않고 반사를 하는데, 이때 반사된 빛이 백라이트 내부에서 다시 반사되며 그 편광 특성이 변하여 다시 편광판으로 입사될 때 투과될 수 있어 빛의 재활용을 기대할 수 있다. 따라서 이론적으로

는 반사형 편광판을 이용하는 경우 광 효율이 100%에 달할 수 있으므로 이러한 개선을 통하여 LCD 소비 전력을 낮출 수 있는데, 이는 휴대용 기기의 필수 요소인 전지의 크기를 줄이거나 사용 시간을 높일 수 있는 등 매우 커다란 효과가 있다.

콜레스테릭 액정(cholesteric liquid crystal: CLC)은 네마틱 액정(nematic liquid crystal: NLC)에 주기적인 나선구조를 유도하는 키랄(chiral) 성분의 물질이 더해진 액정혼합물로, 네마틱 액정이 꼬여서 돌아가는 나선 구조의 회전 방향 그리고 액정의 director가 나선 축 방향으로 360° 회전한 거리인 피치(pitch)에 따라 구분된다. CLC의 나선 축 방향이 기판 표면에 수직으로 균일하게 배열된 planar 구조일 때, CLC는 나선의 회전방향과 동일하며 피치에 상응하는 빛은 반사하고 나머지 빛들은 투과하게 된다.<sup>1,6</sup> CLC에 의하여 반사되는 빛의 파장은 네마틱 액정의 굴절률과 피치 값의 곱으로  $\lambda = \bar{n} \times p$  표시되므로 피치를 다양하게 가지는 CLC를 제조하면 반사되는 빛의 파장 영역( $\Delta\lambda$ )을 넓힐 수가 있다. 가시광 영역을 포함하며 반사파장 영역이 넓은 CLC 편광판은 빛의 재활용을 통하여 LCD의 휘도를 향상시킬 수 있어 CLC를 이용한 편광필름 제조에 많은 관심이 모이고 있다.<sup>7,15</sup> 본 연구에서는 광경화성 CLC를 사용하여 제조한 필름 내에 다양한 길이의 피치를 가지는 CLC들을 형성하여 반사 파장 영역을 넓히는 방법에 대하여 조사하였다. 서로 피치가 다른 CLC들이 열에 의하여 섞이며 피치의 분포가 넓어지는 현상과 CLC 필름 내에 styrene 등을 첨

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed. E-mail: ksong@khu.ac.kr

투시된 후 경화하는 방법 등에 대하여서는 이미 설명을 하였고,<sup>13</sup> 본 논문에서는 단일 피치의 CLC를 상 분리 현상을 이용하여 피치 분포를 넓히는 현상에 대하여 조사하였다. 광 경화성 CLC와 경화를 하지 않는 네마틱 액정을 섞어 단일 피치의 CLC 층을 형성한 후 광 경화과정에서 발생하는 액정들의 상 분리를 이용하여 다양한 피치를 갖는 CLC로 이루어진 필름을 제조하고 이를 UV/Vis, ATR-IR spectrometer와 전자현미경을 이용하여 조사하였다.

**실 험**

본 연구에서는 독일 Wacker사의 광반응성 CLC인 cyclic polysiloxane, CC4039와 CC4070을 사용하였다(Figure 1). Polysiloxane CLC는 주사슬에 광반응성 아크릴 그룹이 부착된 네마틱 mesogen과 콜레스테릭 mesogen이 결사슬로 붙어 있으며, CC4039와 CC4070에는 콜레스테릭 mesogen이 각각 50 mol%와 31 mol%씩 포함되어 있다. 광반응에 참여하지 않는 네마틱 액정으로 Merck사의 cyano와 biphenyl 구조의 액정혼합물인 E7을 사용하였다. 365 nm bandpass 필터를 부착한 UV lamp를 이용한 광반응의 개시제는 Ciba-Geigy사의 IG184를 사용하였고, UV 빛을 흡수하여 액정 셀 내에서 빛의 세기를 조절하기 위한 dye로 disperse yellow 9를 사용하였다. CLC 액정 셀은 polyimide(PI)가 코팅된 유리기판 위에 cyclic polysiloxane 79%(CC4039:CC4070=2:1), 네마틱 액정인 E7 20%, 광개시제 IG184를 1%, 그리고 0.5% 이하의 dye를 섞은 toluene 용액(20 wt%)을 casting한 후 하루 동안 상온에서 건조하고, 13.3 μm의 원형 스페이서로 셀 간격을 유지한 후 120 °C에서 PI가 코팅된 다른 유리기판을 덮어 제조하였다. 기판 위의 한 방향으로 rubbing된 PI가 액정 셀 내 CLC와 접촉하게 되면, CLC 분자의 배향을 planar 구조로 유도하여 셀이 투명하게 된다. 광경화는 70 °C에서 365 nm UV 빛을 이용하여 액정 셀에 노광하여 유도하였다. Dye(disperse yellow 9)를 사용하였을 때 지연되는 경화 시간을 알아보기 위하여 photo-DSC(TA model Q-100)를 이용하여 반응 시간을 조사하였다. 70 °C에서 dye가 섞인 CLC/E7/IG184 시료의 경화 완료 시간을 측정하였는데, dye가 없을 때에 비하여 dye의 농도가 높을수록 경화 시간이 증가하여 0.3% 포함된 경우는 45배, 그리고 0.5% dye를 포함한 경우는 150배의 시간이 더 증가하는 것을 알 수 있었다. CLC

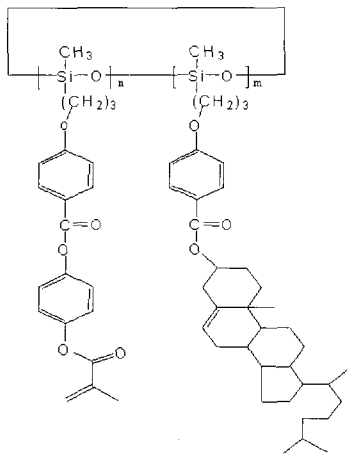


Figure 1. Structure of polysiloxane cholesteric liquid crystal.

**결과 및 토론**

CLC는 나선의 꼬인 방향과 반복 구조의 피치에 따라 빛을 선택적으로 반사하는 특성을 가지고 있는데, 선택 반사되는 빛의 파장은 CLC 피치에 비례하므로 피치의 분포를 넓혀서 반사 파장대역을 넓힐 수 있다.<sup>49</sup> CC4039와 CC4070의 가시광선 영역에서의 투과 스펙트럼을 UV/Vis spectrometer로 관찰한 결과를 Figure 2에 나타내었다. CLC 피치와 다른 파장의 빛들은 반사하지 않고 투과하여 100%의 투과율을 보여주고 있으나, CLC 피치와 동일한 파장의 빛은 두 원편광 중 한쪽 원편광이 선택 반사되어 50%의 투과율을 보이고 있다. 피치가 700 nm인 CC4070의 선택 반사파장은 700 nm를 중심으로 50 nm 넓이에서 나타나고, CC4039는 400 nm 중심으로 빛을 반사하는 것을 볼 수 있는데, 카이랄 특성의 콜레스테릭 mesogen의 양이 CC4039가 CC4070보다 많아 액정을 꼬이게 하는 힘이 커서 액정 층간의 피치가 짧아진 것이다. 본 실험에서는 CC4039와 CC4070을 2:1로 섞어 선택 반사파장이 600 nm 부근에서 나타나도록 제조한 polysiloxane CLC 혼합물을 사용하여 반사 파장대역을 넓히는 실험을 수행하였다.

광경화성 CLC인 cyclic polysiloxane 79%(CC4039:CC4070=2:1), 광반응을 하지 않는 NLC인 E7 20%, 광개시제 IG184를 1%, 그리고 0.5% 이하의 UV 흡수 dye인 disperse yellow 9를 섞은 용액을 PI가 코팅된 유리기판 위에 casting하여 planar 구조로 배향한 CLC 액정 셀을 제조한 후, 셀의 위쪽에서 365 nm UV 빛을 노광하여 CLC를 경화시켰다. 광경화 시간에 따른 CLC 셀의 선택 반사 영역 변화를 Figure 3에 나타냈는데, 광경화전 50 nm 넓이의 반사 파장대역이 광경화 시간이 따라 증가하다가 120분 후 150 nm로 넓어진 것을 볼 수 있다. 이는 위쪽에서 노광되는 UV 빛이 액정 셀의 아래쪽으로 투과하여 내려감에 따라 dye에 의해 점차 흡수가 되어 결국 셀의 윗부분과 아랫부분에서 노광 빛의 세기가 서로 다르기 때문에 나타난 결과이다. 셀에 위쪽에서 노광된 빛에 의해 유도되는 광경화 반응은 빛의 세기가 큰 셀의 윗부분에

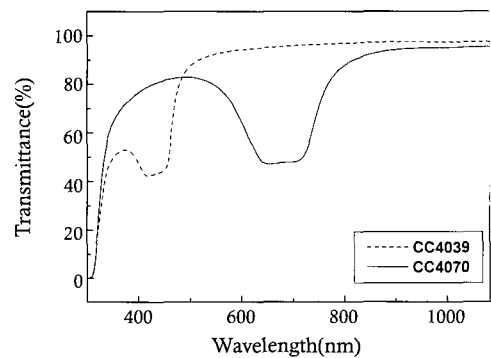


Figure 2. Transmittance spectra of CC4039 and CC4070 films.

서는 반응이 빨리 일어나는 반면 아랫부분에서는 빛의 세기가 약하여 광반응이 느리게 진행될 것으로 예상된다. 그리고 광경화 반응이 진행되면 polysiloxane CLC는 중합을 하여 고체상으로 변하는 반면 반응에 참여하지 못하는 E7은 상 분리가 일어나 경화된 CLC 층의 바깥으로 밀려나게 된다. 액정 셀 내에서 경화 반응 속도가 윗부분이 아랫부분에 비하여 빠르게 진행되므로 셀의 윗부분에 있던 E7이 먼저 상 분리가 되어 아직 광반응이 진행되지 않은 아래쪽으로 밀려나 CLC 층에 섞이며 서서히 경화가 진행되면 셀 아랫부분의 CLC들은 다양하게 넓어진 피치를 가지게 되므로 반사파장 영역이 넓어지는 것이다. 그러므로 광경화가 시작되면 액정 셀 윗부분에서는 CLC 층 사이의 E7이 상 분리되어 빠져 나오며 경화가 이루어져 초기 CLC 피치에 비교하여 약간 작아진 피치를 가지는 CLC들이 형성되어 반사 파장이 약간 blue shift하는 반면 셀 아랫부분에서는 위에서 밀려 내려오는 E7들이 CLC 층 사이로 섞이며 피치가 넓어진 후 경화가 천천히 진행되므로 액정 셀 내에는 다양하게 넓어진 피치를 가지는 CLC들이 형성되어 반사파장 영역이 red shift 하는 것이다(Figure 3).

위와 같은 설명을 증명하기 위하여 표면에서부터 깊이에 따라 IR 스펙트럼을 얻을 수 있는 ATR-IR 실험을 이용하여 광경화에 의하여 액정 셀 아랫부분으로 밀려 내려오는 E7 양의 변화를 셀의 밑 부분에서 측정하였다. Figure 4는 polysiloxane CLC, cyano 그룹을 포함하는 NLC인 E7, 그리고 광경화제 등이 섞여있는 용액을 직접 ATR plate 위에 casting한 후, 위쪽에서 UV를 노광하며 경화시켰을 때 형성되는 액정 필름의 IR 스펙트럼 변화를 측정한 결과이다. ATR-IR 실험에서 IR 빔이 ATR plate 위의 CLC 필름 1.5  $\mu\text{m}$  깊이로 침투하게 입사각을 조절

한 후 필름 밑 표면에서부터 1.5  $\mu\text{m}$  내부에 위치한 부분의 E7 농도 변화를 관찰하였다. UV 노광이 진행됨에 따라 E7에 포함된 cyano 그룹 특성 피크인 2222  $\text{cm}^{-1}$ 의 세기가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 앞에서 설명하였듯이 필름 윗부분에서 먼저 CLC 광경화 반응이 진행되며 E7의 상분리가 일어나 노광 전 CLC 필름 내에 고루 분포되어 있던 E7이 아랫부분으로 밀려 내려와 농도가 높아지기 때문이다. 1713과 1736  $\text{cm}^{-1}$ 에서 나오는 피크는 polysiloxane CLC 내 두 개의 C=O 그룹에 의한 것으로 광조사가 진행됨에 따라 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 상 분리된 E7이 CLC 층 사이로 섞여 들어가며 polysiloxane의 농도가 상대적으로 낮아지기 때문이다.

NLC인 E7의 농도와 dye 농도 등은 균일하게 유지하며 UV 광량만을 변화하여 노광하였을 때 CLC 액정 셀의 반사파장 영역의 변화를 Figure 5에 표시하였다. 액정 셀 위쪽에서 노광하는 UV의 세기가 강하면 노광되는 빛의 세기를 조절하기 위하여 첨가한 dye의 영향이 미미하여 셀의 아랫부분에서도 광반응이 윗부분과 동시에 진행이 된다. 그러므로 광반응에 참여하지 않는 E7의 이동 및 확산에 의한 CLC 피치 변화가 형성되지 않아 반사 파장대의 넓이가 상분리가 없는 경우와 비슷하게 나타나는 것을 UV 세기가 제일 큰 28 mW 경우에서 볼 수 있다. 하지만 노광 UV 세기가 16, 6.4, 2.3 mW로 점점 약해짐에 따라 셀의 위쪽과 아래쪽에 도달하는 빛의 세기가 UV 흡수 dye에 의하여 차이가 나게 되므로 상 분리된 E7이 아래로 확산되어 CLC 피치 분포가 점점 증가하여 반사 파장대의 넓이가 각각 100, 160, 200nm로 넓어지는 것을 알 수 있다.

ATR-IR을 이용하여 상 분리된 E7이 아랫부분으로 확산되어 내려오는 것을 노광 UV 세기에 따라 측정한 결과를 Figure 6에 나타내었

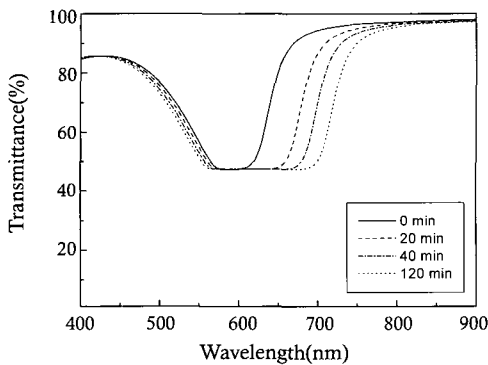


Figure 3. Transmittance spectra changes of CLC/E7 cell with curing time.

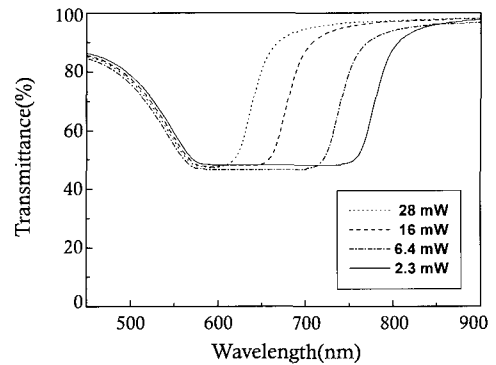


Figure 5. Transmittance spectra of CLC/E7 cells with different UV light intensity.

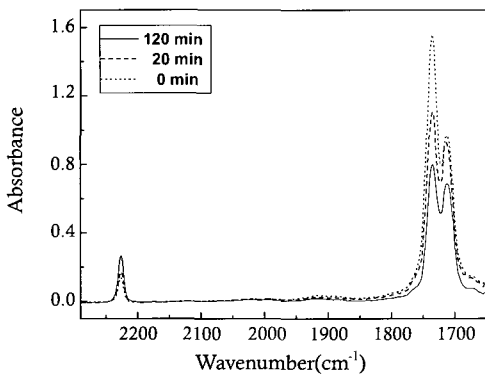


Figure 4. ATR-IR spectra changes of CLC/E7 film with curing time.

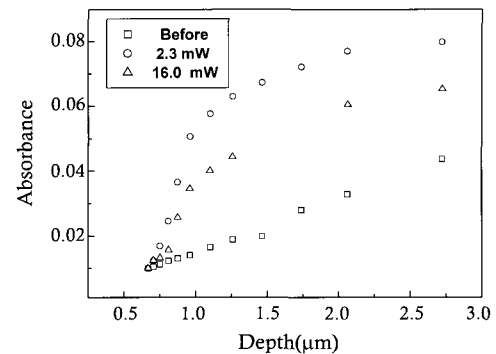


Figure 6. IR intensity changes of 2222  $\text{cm}^{-1}$  band of E7 in CLC/E7 film at various penetration depth.

다. ATR plate 입사각을 변화시킴으로써 IR 빔의 액정 필름 표면에서부터 침투 깊이를 조절하여 얻은 스펙트럼에서 IR 빔이 필름에 더 깊이 침투함에 따라 E7 분자의 cyano 그룹 신축운동 2222  $\text{cm}^{-1}$  피크가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 피크의 세기를 침투 깊이에 따라 표시한 Figure 6에서 노광 전에는 피크 세기가 침투 깊이에 따라 선형으로 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 E7 분자가 필름 내에서 위와 아랫부분에 균일하게 분포되어 있기 때문이다. 그러나 필름 위쪽에서 노광을 시작하게 되면 광반응이 빠르게 진행되는 윗부분에서 상 분리된 E7이 밀려 내려와 필름 아랫부분으로 갈수록 E7의 양이 증가하게 된다. 그러므로 광조사한 시료의 경우는 필름 밑에서부터 깊이에 따른 2222  $\text{cm}^{-1}$  피크 세기 변화가 필름의 제일 아랫부분에서 갑자기 많이 증가하다가 침투 깊이가 깊어짐에 따라 서서히 증가하는 것을 볼 수 있는 것이다. 조사된 빛의 세기가 더 작은 2.3 mW 경우에 피크 세기가 더 급격하게 변화하는데, 빛의 세기가 작을수록 경화 반응이 더 천천히 일어나 E7 분자의 확산 및 CLC 층으로의 이동이 더 용이하기 때문이다.

액정 셀 내에 깊이에 따라 광량의 분포를 유도하는 UV 흡수 dye의 양을 변화시켜 넓힐 수 있는 반사 파장대의 범위를 조사하였다. Cyclic polysiloxane 79%, E7 20%, IG184 1%의 액정 혼합물에 disperse yellow 9 양을 0.1, 0.3, 0.5%, 또는 섞지 않고 광경화를 유도한 액정 셀의 반사파장 측정 실험결과를 Figure 7에 나타내었다. UV 흡수 dye가 없으면 액정 셀의 윗부분과 아랫부분에서 동시에 광반응이 진행되어 E7의 이동 및 확산에 의한 CLC 피치 변화가 형성되지 않아 50 nm 넓이의 반사 파장대를 가지게 된다. 하지만 dye를 포함한 경우 위쪽에서 노광된 UV 빛의 세기가 깊이에 따라 달라져 상 분리에 의한 CLC 피치 분포가 일어나므로, dye의 농도가 0.1, 0.3, 0.5%로 증가함에 따라 선택반사 파장대의 넓이가 80, 200, 300 nm로 각각 증가하는 것을 Figure 7에서 볼 수 있다. 이와 같이 광경화된 CLC 액정 셀 내에 상 분리에 의하여 다양한 CLC 피치 분포가 형성되는 것을 SEM으로 직접 확인할 수 있었다(Figure 8). CLC 액정 셀의 단면을 SEM으로 관찰하면 셀 단면에서 흰 면과 검은 면의 주기가 반복적으로 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 반복적인 형태의 구조는 경화가 이루어진 후 배열되어 있는 CLC 각 층에 해당하는데, 셀의 윗부분에서는 구조의 반복 주기가 짧은 반면 아래쪽으로 내려갈수록 주기가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 설명하였듯이 광경화 속도 차이에 의하여 상 분리된 E7이 아래로 확산되어 내려가 CLC 층 사이에 들어감으로써 윗부분의 CLC에 비하여 피치가 길어져서 나타난 것이다.

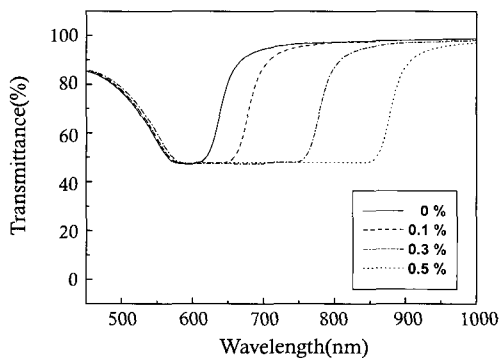


Figure 7. Transmittance spectra changes of CLC/E7 cell with dye concentrations.

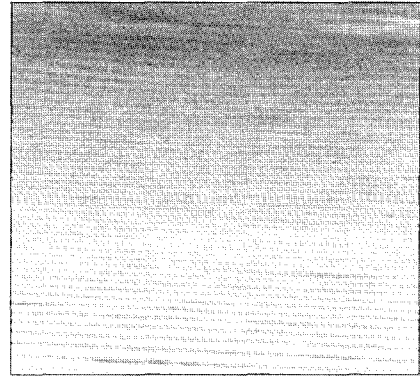


Figure 8. SEM image of cross-section of CLC/E7 cell after phase separation.

## 결론

CLC는 나선의 꼬인 방향과 반복 구조의 피치에 따라 빛을 선택적으로 반사하는 특성을 가지고 있는데, 선택 반사되는 빛의 파장은 CLC 피치에 비례하므로 피치의 분포를 넓혀서 반사 파장대역을 넓힐 수 있다. 본 연구에서는 광경화성 CLC인 cyclic polysiloxane과 광반응에 참여하지 않는 E7 액정 혼합물의 상 분리 현상을 이용하여 CLC 피치를 다양하게 하였다. 광경화 전 초기 50 nm 넓이의 반사 파장대역을 가지는 CLC가 광경화가 진행됨에 따라 넓어지는 것을 가시광 영역 투과 스펙트럼에서 볼 수 있었다. 이는 액정 셀의 위쪽에서 노광되는 UV 빛이 셀의 아래쪽으로 투과하여 내려감에 따라 점차 약해져, 빛의 세기가 셀의 윗부분과 아랫부분에서 서로 달라 CLC 광경화 반응의 속도가 달라지기 때문이다. 광경화 반응이 진행되면 polysiloxane CLC는 중합을 하여 고체상으로 변하는 반면 반응에 참여하지 못하는 E7은 상 분리가 되어 경화된 CLC 층의 바깥으로 밀려나게 된다. 셀 내에서 경화 반응 속도가 윗부분이 아랫부분에 비하여 빠르므로 셀의 윗부분에 있던 E7이 먼저 상 분리가 되어 아직 광반응이 진행되지 않은 아래쪽으로 밀려나 CLC 층에 섞이면 셀 아랫부분의 CLC들은 다양하게 넓어진 피치를 가지게 되므로 반사파장 영역이 넓어지는 것이다.

UV 광량을 변화하여 노광하였을 때 CLC 액정 셀의 반사파장 영역은 빛의 세기가 작을수록 넓어지는 것을 알 수 있었다. 액정 셀 위쪽에서 노광하는 UV의 세기가 충분히 강하면 노광되는 빛의 세기를 조절하기 위하여 첨가한 dye의 영향이 미미하여 셀의 아랫부분에서도 광반응이 윗부분과 동시에 진행이 되어 광반응에 참여하지 않는 E7의 이동 및 확산에 의한 CLC 피치 변화가 형성되지 않기 때문이다. 하지만 노광 UV 세기가 약해짐에 따라 셀의 위쪽과 아래쪽에서의 빛의 세기가 UV 흡수 dye에 의하여 차이가 나게 되므로 상 분리된 E7이 아래로 확산되어 CLC 피치 분포가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. UV 흡수 dye의 양을 변화시키며 경화한 액정 셀에서의 반사 파장변화는 dye의 농도가 증가함에 따라 선택반사 파장대가 넓어지는 것을 알 수 있었는데, 0.5%의 disperse yellow 9을 UV 흡수 dye로 사용했을 때 반사 파장대역이 300 nm까지 증가하였다.

이와 같이 광경화된 CLC 액정 셀 내에 상 분리에 의하여 다양한 CLC 피치 분포가 형성되는 것을 경화된 CLC 액정 셀의 단면을 SEM으로 관찰하여 직접 확인할 수 있었으며, CLC 피치 분포가 넓어지는 것이 상 분리에 의하여 일어난다는 것을 ATR-IR 실험을 이용하여 증명하였다. 표면에서부터 깊이에 따라 IR 스펙트럼을 얻을 수 있는 ATR-

IR 실험을 이용하여 광경화에 의하여 액정 셀 아랫부분으로 밀려 내려오는 E7 양의 변화를 측정하였다. UV 노광이 진행됨에 따라 E7의 cyano 그룹 특성 피크인 2222  $\text{cm}^{-1}$ 의 세기가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 필름 윗부분에서 CLC 광경화 반응이 먼저 진행되며 E7의 상 분리가 일어나 노광 전 CLC 필름 내에 고루 분포되어 있던 E7이 아랫부분으로 밀려 내려와 농도가 높아지기 때문으로 앞에서 설명한 결과와 일치하는 것이다.

**감사의 글 :** 본 연구는 경기도에서 지원한 지역협력연구센터(GRRC) 사업에 의하여 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. P. Palfy-Muhoray, *Nature*, **391**, 745 (1998).
2. D. J. Broer, J. Lub, and G. N. Mol, *Nature*, **378**, 467 (1995).
3. S. V. Belayen, M. Schadt, M. I. Barnik, and K. Schmitt, *Jap. J. Appl. Phys.*, **29**, 634 (1990).
4. F. H. Kreuzer, D. Andrejewski, W. Haas, N. Haberle, and P. Spes, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **199**, 345 (1991).
5. M. L. Tsai and S. H. Chen, *Macromol.*, **23**, 1908 (1990).
6. L. Li and M. Faris, *SPIE*, **2873**, 202 (1996).
7. C. Binet, M. Mitov, and A. Bouet, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **339**, 111 (2000).
8. T. J. Bunning and P. T. Mather, *Liq. Cryst.*, **26**, 557 (1999).
9. M. Mitov, A. Boudet, and P. Sopena, *Eur. Phys. J. B*, **8**, 327 (1999).
10. L. Li and S. M. Faris, *SID 96 Digest*, 111 (1996).
11. P. J. Shannon, *Macromol.*, **17**, 1873 (1984).
12. D. J. Broer, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **261**, 513 (1995).
13. Y. J. Kwon, W. J. Lee, S. H. Paek, I. Kim, and K. Song, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **377**, 325 (2002).
14. R. Hikmet and H. Kemperman, *Nature*, **392**, 476 (1998).
15. C. Binet and M. Mitov, *J. Appl. Phys.*, **90**, 1730 (2001).