

## 콜레스테릭 액정의 Planar 배열 유도 메카니즘

정갑하 · 이몽룡 · 서인선 · 송기국<sup>†</sup>

경희대학교 영상정보소재기술 연구센터

(2011년 2월 16일 접수, 2011년 3월 28일 수정, 2011년 3월 30일 채택)

## Induction Mechanism of Planar Arrangement in Cholesteric Liquid Crystals

Gapha Jung, Mongryong Lee, Inseon Seo, and Kigook Song<sup>†</sup>

Materials Research Center for Information Display,

Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 446-701, Korea

(Received February 16, 2011; Revised March 28, 2011; Accepted March 30, 2011)

**초록:** 선택 반사를 보여주는 콜레스테릭 액정의(cholesteric liquid crystal: CLC) planar 배열이 유도되는 메카니즘을 CLC 셀의 선택 반사율과 FTIR C≡N 피크 세기를 측정하여 조사하였다. 배향막을 사용한 경우보다는 planar 배열 유도가 완전하지는 않았지만 shear force를 이용하거나 또는 고분자 기판을 연신하여 배향막을 사용하지 않은 상태에서 planar 배열을 유도하였다. CLC의 planar 배열이 유도되는 메카니즘은 기판 표면에 접촉하는 액정분자들이 한 방향으로 늘어서면, 그 액정분자 위에 CLC의 나선 구조들이 기판에 수직으로 형성되며 planar 배열이 유도되는 것이다.

**Abstract:** The induction mechanisms of planar arrangements in cholesteric liquid crystals (CLC) which showed selective reflections of visible light were investigated by measuring the selective reflectivity and FTIR peak intensity of C≡N stretching band. Although the planar arrangement of CLC was not as perfectly induced as the cases prepared with using alignment layers, it could be also induced by stretching polymer substrate or by applying shear forces. The planar arrangements were induced by forming CLC helical structures on top of liquid crystal molecules which were in contact with the substrate and oriented all in the same direction.

**Keywords:** cholesteric liquid crystals, planar arrangement, induction mechanism, selective reflection, FTIR spectrometer.

## 서 론

네마틱(nematic) 액정에 chiral dopant가 소량 첨가된 나선 형태의 콜레스테릭 액정(cholesteric liquid crystal, CLC)은 나선 축 방향이 배열된 상태에 따라 3가지 구조로 나누어진다. 기판 표면에 대하여 CLC 나선 축들이 수직으로 배열된 경우를 planar, 기판에 수평일 때를 homeotropic(vertical), 그리고 나선 축들이 랜덤하게 배열된 형태를 focal conic 구조라고 한다(Figure 1). 이 가운데 CLC 배열이 planar 구조를 이루었을 때 특정 파장의 빛을 선택적으로 반사하는 특성을 가지는데, CLC의 꼬인 구조와 같은 방향의 원편광 빛은 반사되고 반대 방향의 원편광 빛은 투과하는 특성을 가진다.<sup>1-4</sup> 이 때 반사되는 빛의 파장  $\lambda$ 는 액정의 평균 굴절률  $\bar{n}$  과 CLC 피치(pitch,  $p$ )의 곱으로  $\lambda = \bar{n} \times p$  표시되므로, 평균 굴절률이 다른 재료를 사용하거나 CLC의 피치를 조절하면 선택 반사되는 파장 영역을 조절할 수 있어 반사형 편광판, 반사형 컬러필터 및 tunable laser 필터 등의 광학적으로 유용한 응용분야를 갖고 있다.<sup>1-12</sup>

선택반사를 보이는 CLC의 planar 배열을 유도하려면 기판 표면에 고분자 배향막을 코팅하고 면이나 나일론 등의 천으로 일정하게 한 쪽 방향으로 문질러 주거나 광반응성 배향막에 선풍광된 빛을 조사하여 일정 방향으로 고분자 사슬이 배향하도록 하여 CLC 액정이 기판 위에서 배열하도록 한다.<sup>13</sup> 본 연구에서는 배향막을 기판에 코팅하지 않고서도 CLC의 planar 배열을 유도하는 방법을 조사하였는데, 이러한 조사는 궁극적으로 선택반사를 이용한 반사형 편광필름을 roll-to-roll 공정으로 제작할 때 필요한 연구이다. CLC planar 배열이 유도되는 메카니즘을 FTIR과 UV-vis spectroscopy를 이용하여 조사하였는데 C≡N 진동운동의 피크세기와 CLC 셀의 선택반사율을 측정하여 CLC 내에 존재하는 planar 배열의 양을 측정하였다.

## 실 험

상전이 온도(nematic to isotropic,  $T_N$ )가 58 °C의 네마틱 혼합 액정인 Merck E7에 chiral dopant로 BASF의 R1011을 95:5 비율(wt%)로 70 °C에서 혼합하여 본 연구에서 사용된 CLC를 제조하였다. 액정을 셀에 주입할 때 수반되는 shear force가 CLC 배열에 미치는 영

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

향을 알아보기 위해 배향막이 코팅되지 않은 기판을 사용하여 4.75  $\mu\text{m}$  간격의 셀을 제작하고, 진공을 걸 수 있는 상자 안에서 셀의 한 쪽을 액정에 담근 후 진공 크기를 변화하며 액정을 주입하였다. 선택 반사율 측정을 위한 UV-vis 분광실험에서는 기판을 quartz로 사용하였으며, 액정 셀 내의 CLC 배열 형태를 조사한 FTIR 분광실험에서는 KBr을 기판으로 사용하였다. 광배향막을 사용한 경우는 [2+2] cycloaddition 광반응을 진행하는 Aldrich의 polyvinylcinnamate(PVCN)를 사용하였는데, monochlorobenzene과 1,2-dichloroethane을 1:1로 혼합한 용매에 PVCN을 2 wt% 첨가하여 용액으로 제조한 후 기판에 3000 rpm으로 스핀 코팅하였다.<sup>14-17</sup> PVCN 배향막의 광반응은 high pressure mercury lamp와 Glan-Taylor polarizer를 사용하여 선편광된 UV를 50 mW/cm<sup>2</sup>의 세기로 조사해 유도하였다.

UV 조사에 따른 셀 내 CLC의 배열 변화를 실시간으로 조사하기 위해서 Figure 2와 같은 실험장치를 이용하였다. PVCN을 코팅한 quartz 기판으로 제작한 CLC 셀을 T<sub>M</sub>(58 °C) 이상에서 30분간 유지한 후 다시 상온으로 냉각하여 액정 주입 시 shear force 영향을 제거한 랜덤

한 focal conic 구조의 CLC 셀을 준비한 후, 이 셀에 선편광 UV를 조사하면서 동시에 셀의 투과도를 633 nm laser로 측정하여 실시간 변화를 알아보았다. 기판을 poly(ethylene terephthalate) (PET) 필름으로 사용한 실험에서는 80 °C에서 필름을 각각 50, 100, 150, 200%의 비율로 11 mm/min 속도로 연신하여 기판을 제작한 후, CLC를 각각의 필름 기판에 스핀 코팅하여 CLC 내 planar 배열의 변화를 측정하였다. CLC 내 planar 배열 변화를 측정하기 위하여 Jasco V570 UV-vis spectrometer를 이용하여 CLC의 선택 반사율을 측정하였고, Perkin-Elmer System 2000 FTIR spectrometer로 액정 셀 내의 CLC 배열 형태를 조사하였다.

결과 및 토론

E7을 이루고 있는 네마틱 액정들의 분자 구조를 보면 액정의 장축 방향으로 C≡N 그룹이 붙어있어, 편광 FTIR 실험에서 C≡N 진동운동의 피크 세기를 측정하면 E7 액정의 배열에 관한 정보를 얻을 수 있다.<sup>18,19</sup> 분자 진동운동에 의한 infrared (IR) 흡수피크 세기는  $I = (M \cdot E)^2 \cdot \cos^2 \alpha$ 로 표시되는데, M은 진동운동의 transition dipole moment, E는 IR 빔의 전기장이며,  $\alpha$ 는 진동운동 transition dipole과 빔의 전기장 방향이 이루는 각을 의미한다. CLC 셀을 FTIR 투과 실험방법으로 측정할 때, Figure 1(b)에서 보듯이 IR 빔의 전기장은 항상 셀 기판에 평행하게 입사되므로 셀 내 CLC 배열 상태, 즉 homeotropic (vertical) 또는 planar(horizontal) 배열 등에 따라 IR 빔의 전기장과 액정의 C≡N 진동운동 transition dipole이 이루는 각  $\alpha$ 가 달라져 피크 세기가 변하게 된다. CLC 액정이 planar 배열을 형성하였을 때는 기판과 E7 액정의 director가 평행을 이루어  $\alpha$  값이 0에 가까워져 C≡N 피크 세기는 최대가 되며, vertical 배열 경우에는  $\alpha$ 가 90°에 근접하여 피크 세기가 최소가 되며, 랜덤한 focal conic 배열의 경우에는 이 두 배열 상태 사이의 피크 세기를 나타내게 된다.

기판사이 간격을 4.75  $\mu\text{m}$ 로 제작한 CLC 셀의 C≡N 피크세기를 측정하였을 때, 기판에 폴리이미드 배향막을 사용하여 CLC 배열을 planar 상태로 유도한 셀과 랜덤 배열인 focal conic 상태로 제작한 셀의 C≡N 피크 세기는 각각 0.42와 0.25로 측정되었다. E7 분자들의 액정 축이 기판에 평행하게 배열되는 planar 구조는 랜덤 배열 경우보다 이론적으로 C≡N 피크세기가 3.2배 커야 하는데, C≡N 그룹이 액정분자의 장축 방향과 정확하게 일치하지 않고 20° 정도 틀어져 액정의 mesogen 부분에 붙어있기 때문에 예상보다 작은 1.7배 크게 나타난 것으로 여겨진다.<sup>20,21</sup> C≡N 피크 세기는 0.42인 폴리이미드 배향막을 사용한 CLC 셀의 선택 반사율이 50%인 실험 결과로부터 셀 내의 모든 CLC가 planar 구조를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다.<sup>22</sup> 그러므로 셀 간격 4.75  $\mu\text{m}$  CLC 셀의 경우 C≡N 피크세기가 0.42일 때 셀 내 모든 CLC는 planar 구조를 형성하고 있는 상태이며 0.25일 때는 planar 구조가 전혀 존재하지 않는 것이므로, IR 피크세기 값과 선택 반사율 값을 이용하면 셀 내에 존재하는 planar 구조의 양을 정량적으로 계산할 수 있다.

폴리이미드 배향막을 사용하지 않고 셀 내에 CLC planar 배열을 유도하기 위하여, 4.75  $\mu\text{m}$  셀 간격 기판사이로 capillary force에 의하여 액정을 주입하였다. 셀 내부로 주입되는 액정의 흐름에 의하여 형성되는 shear force 영향만으로도 CLC의 planar 배열이 유도될 수 있었는데, shear force의 크기에 따라 유도되는 planar 배열 정도가 달라졌다.

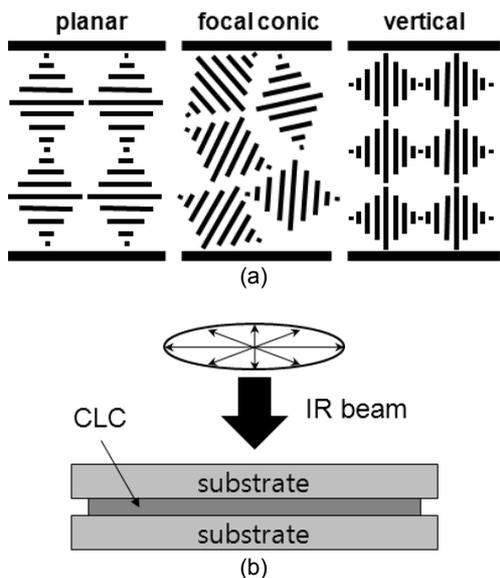


Figure 1. (a) Schematic figures of three arrangements of cholesteric liquid crystals; (b) incoming FTIR beam onto a CLC cell.

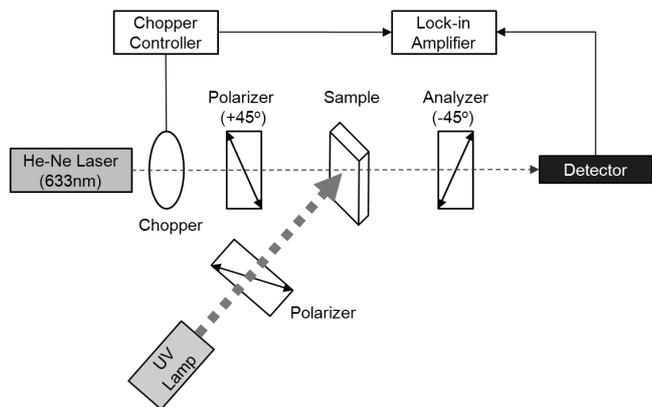
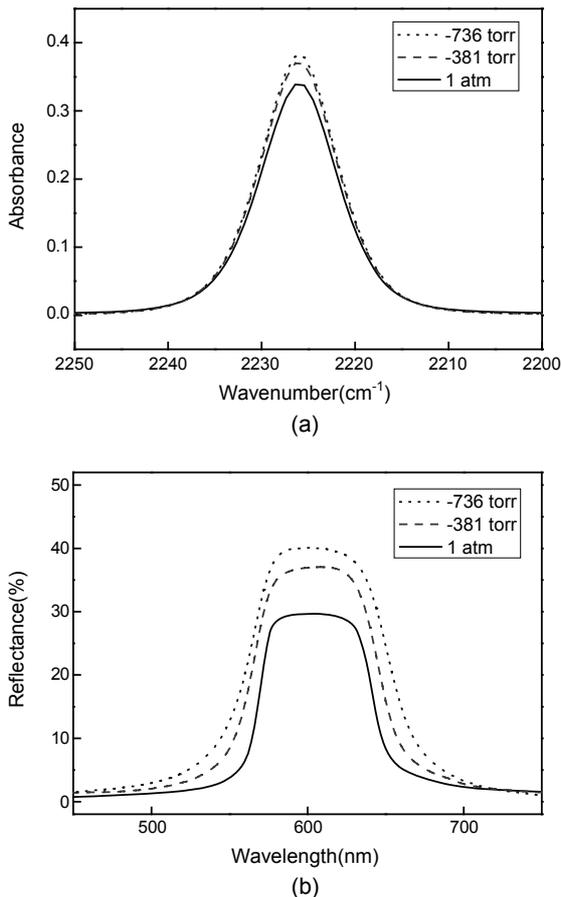


Figure 2. Optic setting of *in situ* measurements of 633 nm laser transmission for a CLC cell with UV exposure.

액정이 기판사이로 주입될 때 shear force가 가해지면서 기판 표면에 접촉하게 되는 액정분자들은 shear force의 방향으로 모두 늘어지게 된다. 이렇게 한 방향으로 배열된 기판 표면의 액정분자 위에 각 CLC의 꼬인 구조들이 형성되며 planar 배열이 유도되는 것이다. CLC의 planar 배열이 유도되는 메커니즘에 관한 이와 같은 관찰은 기판에 접촉하는 네마틱 액정들이 한 방향으로 배열하지 못한 경우에는 planar 배열이 유도되지 못하는 실험결과에서 확인할 수 있다.

액정을 셀에 주입할 때 대기 중이 아닌 진공을 걸어준 상태에서 주입하면 진공을 걸어준 크기에 따라 액정이 주입되는 속도가 달라져 액정에 가해지는 shear force의 세기가 변하게 된다. 배향막을 사용하지 않은 셀에 진공을 사용하지 않고 대기 중에서 모세관 현상에 의해서만 액정이 주입되는 경우에는 E7 액정분자의  $C\equiv N$  흡수피크의 세기가 Figure 3(a)에서 보듯이 0.33으로 작게 나타났지만, 진공을 가한 상태에서 액정을 주입하면 피크 세기가 증가하는 것을 알 수 있는데 -736 torr로 진공을 높인 경우 0.39로 나타났다. 이는 앞에서 설명한 것과 같이 진공을 가한 상태에서 액정이 주입되면 shear force가 커져 CLC의 planar 배열이 더 잘 유도되기 때문에  $C\equiv N$  피크 세기가 커지는 것이다. Figure 3(b)의 CLC 선택 반사율을 보면 대기 중에서 액정을 주입한 경우에는 30%를 미치지 못한 반사율이 액정 주입시 진공을 걸어줌에 따라서 40%까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 배향막을 사용하지 않은 유리기판에 capillary force 만을 이용하여 CLC의 planar 배열을 유도한 경우에는



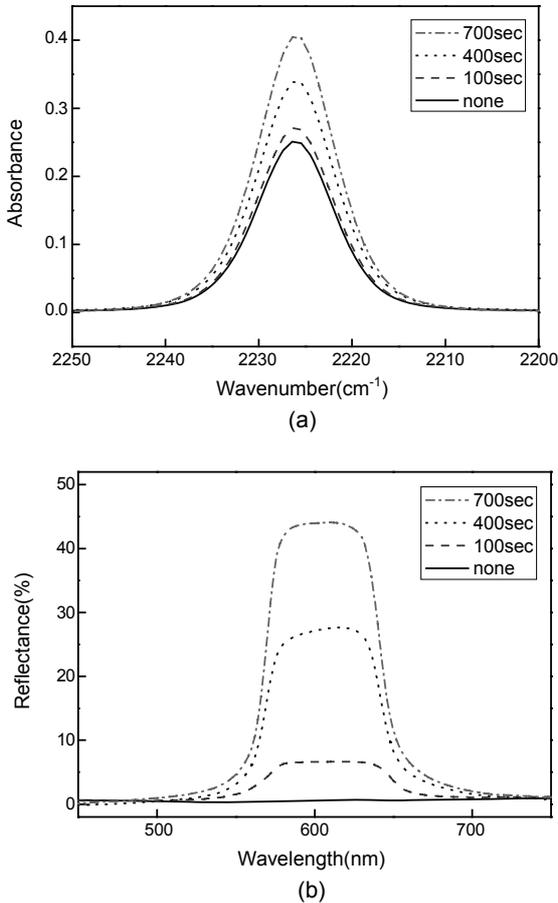
**Figure 3.** CLC cells with different vacuum levels: (a) FTIR spectra of  $C\equiv N$  stretching region; (b) selective reflection spectra.

폴리이미드 배향막을 사용하여 완전하게 planar 배열을 유도한 경우의 50% 선택반사에 못 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 Figure 3에서 보듯이 액정 주입시 shear force만으로도 CLC의 planar 배열을 유도할 수 있으며, 그 크기에 따라 planar 배열의 정도가 달라져 그 결과 CLC 셀의 선택 반사율이 변화하는 것을 볼 수 있다.

러빙(rubbing)에 의하여 액정의 배향을 유도하는 폴리이미드 배향막과는 달리 광반응기를 포함한 PVCN 등을 이용한 광배향막은 선풍광 빛을 조사하여 형성되는 필름 내 이방성에 의하여 액정 배향을 유도한다. 선풍광 UV를 PVCN 필름에 조사하면 UV 조사 방향과 평행하게 늘어선 필름 내 cinnamate 반응기들은 [2+2] cycloaddition 광반응을 진행하는 반면 조사 방향에 수직인 cinnamate 그룹들은 광반응이 일어나지 않아 선택적 광반응이 필름 내에서 일어나게 된다.<sup>19-22</sup> 이와 같은 PVCN 광배향막을 폴리이미드 배향막 대신 이용해 CLC 셀을 제작하여 planar 배열이 유도되는 메커니즘에 대하여 연구하였다. PVCN 광배향막을 사용한 셀에 액정을 주입하면 선풍광된 UV의 조사 방향과 수직인 방향으로 네마틱 액정들의 배향이 이루어진다. 광배향막을 사용한 셀에서 배향막 표면에 접촉한 액정분자들이 UV 조사 방향과 수직으로 우선 배향이 되고, 그 뒤 액정들이 나선 구조를 형성하며 기판에 수직인 방향으로 CLC planar 구조를 이루는 것이다. 광배향막을 사용한 경우 러빙한 폴리이미드 배향막을 사용한 경우보다는 조금 불완전하게 planar 배열이 유도되는 것을  $C\equiv N$  피크세기가 0.41 그리고 선택반사율이 45%인 것으로부터 알 수 있다. 이러한 결과는 일반적으로 PVCN 광배향막이 폴리이미드보다 약한 배향력과 anchoring energy를 가지기 때문에 배향막 표면 분자들의 배향이 완전하지 못하기 때문으로 생각된다.<sup>14,23</sup>

광반응을 유도하지 않은 PVCN 필름이 코팅된 quartz 기판으로 제작한 셀에 액정을 주입하여 랜덤 배열의 focal conic 상태 CLC 셀을 제작한 후, 이 셀에 선풍광 UV를 셀 바깥에서 조사하여 기판표면에 코팅되어 있는 PVCN의 광반응을 유도하였다. 광조사에 따른 PVCN 필름의 배향력 변화가 CLC의 planar 배열 유도에 미치는 영향을 알아보기 위해  $C\equiv N$  피크세기와 선택 반사율을 셀에 선풍광 UV를 쬐어준 시간에 따라 측정하여 Figure 4(a)와 (b)에 나타내었다. CLC 셀에 선풍광 UV를 조사하기 전에는  $C\equiv N$  피크의 세기가 랜덤 배열의 0.25를 나타냈고, 선택 반사율도 0%로 planar 배열이 전혀 존재하지 않는 것을 Figure 4에서 알 수 있다. 하지만 CLC 셀에 선풍광 UV를 조사하면 PVCN 배향막의 광반응이 진행되면서 PVCN 필름 표면에 접촉하고 있는 액정분자들이 점점 같은 방향으로, 즉 편광 방향과 수직으로 늘어지게 되고, 이 액정분자들이 랜덤 배열의 focal conic CLC를 planar 배열로 변화시키는 것이다. 선풍광 UV 조사에 따른 CLC 셀의  $C\equiv N$  피크 세기는 시간에 따라 점점 증가해 700 초를 조사한 후에는 초기 랜덤 배열의 CLC가 거의 모두 planar 구조로 배열이 바뀐 상태에서의  $C\equiv N$  피크세기 값인 0.42에 이르렀으며, 선택 반사율도 planar 배열이 증가함에 따라 45% 이상 커지는 것을 볼 수 있다. UV를 쬐어줌에 따라 셀 내 PVCN의 광반응이 진행되어 PVCN 필름의 액정 배향력이 증가하게 되므로 초기 랜덤 배열로 존재하던 액정들이 필름 표면에서 같은 방향으로 늘어지게 되고, 그 다음에 액정들이 기판에 접촉한 액정분자에서 시작하여 기판에 수직인 방향으로 나선 형태의 CLC를 형성하며 planar 구조가 유도되는 것이다.

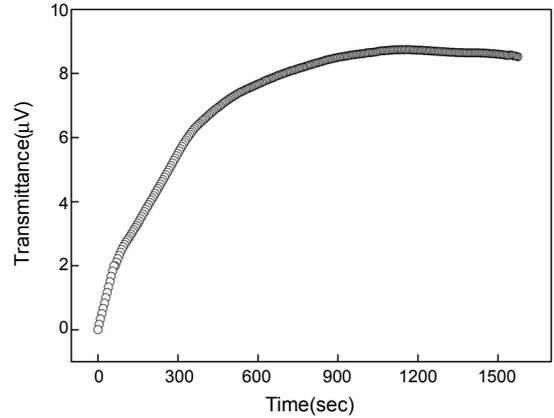
초기에 랜덤한 focal conic 구조의 CLC 배열이 외부에서 셀에 선풍광 빛을 쬐어줌에 따라 서서히 planar 구조로 변화하는 위 실험은



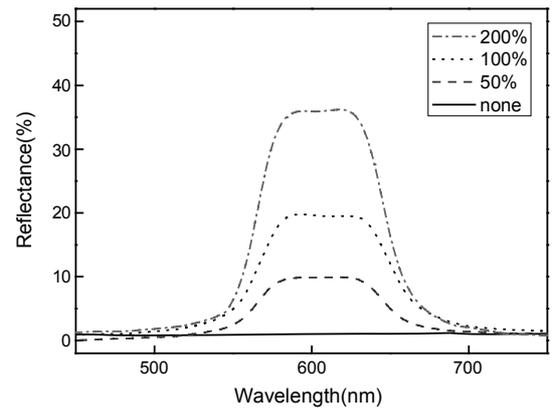
**Figure 4.** CLC cells with different UV exposure time: (a) FTIR spectra of C≡N stretching region; (b) selective reflection spectra.

Figure 2의 복굴절 측정 장치를 이용하여 빛을 조사함과 동시에 셀 내에 형성되는 이방성의 변화를 측정할 수 있다. 두 개의 편광판을 수직으로 배치한 실험에서 첫번째 편광판을 통과한 레이저 빔은 랜덤한 focal conic 구조의 CLC 셀을 지나면서 빛의 편광 방향이 변화하지 않아 첫 번째 편광판과 수직인 검광판을 통과할 수 없게 된다. 하지만 CLC 셀에 선편광 UV를 쬐어주면 셀 내에 planar 구조가 유도되면서 이방성이 형성되어, 투과하는 레이저 빔의 편광이 바뀌게 되므로 검광판을 통과하는 빛의 양이 증가하게 된다. 선편광 UV를 CLC 셀에 쬐어주며 동시에 레이저 빔의 투과 정도를 측정할 실험에서 선편광 UV 조사 초기에 투과도가 증가하는 것을 Figure 5에서 볼 수 있고, 750초를 지나서부터는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이 결과는 앞에서 설명한 바와 같이 초기 랜덤 배열의 CLC 셀에 선편광 UV를 조사하면 PVCN 필름에서 선택적 광반응이 진행되어 필름 표면에서 액정 배향이 유도되어 CLC 배열이 planar 구조로 변하기 때문이다.

셀의 기판을 유리 대신 고분자 필름으로 사용할 경우 배향막을 사용할 필요없이 기판 내 고분자 사슬들의 배향을 변화시켜 CLC planar 배열을 유도하였다. 고분자 사슬이 랜덤하게 배열된 무정형 poly(ethylene terephthalate) (PET) 필름을 연신하여 고분자 사슬들의 배향을 유도하면서 그 위에 코팅된 CLC의 배열이 변화하는 현상을 조사하였다. 연신하지 않은 무정형 PET 필름 위에 코팅된 CLC의 배열 상태와 PET 필름을 다양한 비율로, 즉 50, 100, 150, 200%로 연신한 후 연신한



**Figure 5.** *In situ* measurement of 633 nm laser transmission of PVCN coated CLC cell with linearly polarized UV irradiation.



**Figure 6.** Selective reflection spectra of CLC films on PET substrate with different stretch ratios.

필름 위에 코팅된 CLC의 planar 배열이 유도된 결과를 C≡N 피크 세기로 측정하였다. 연신하지 않은 PET 필름 위에 코팅된 CLC 흡수피크의 세기는 0.25로, 랜덤 배열 CLC 셀의 피크 세기와 동일하게 나타났다. 필름의 연신 비율을 점차적으로 늘리게 되면 C≡N 피크 세기도 함께 증가하는데, 연신비율이 200%인 PET 필름 위에 유도된 CLC의 C≡N 피크 세기가 0.37까지 증가하여 CLC의 planar 배열이 많이 유도된 것을 알 수 있다. Figure 6에 나타낸 CLC의 선택 반사율 변화를 보면, 역시 연신하지 않은 PET 필름 위의 CLC에서는 선택 반사가 일어나지 않았으며 연신비율을 늘릴수록 선택 반사율도 증가하여 200% 연신된 필름 기판 위에서는 36%의 선택 반사율을 나타내었다. 연신하지 않은 무정형 PET 필름은 고분자 사슬이 랜덤하게 배향되어 있어 등방성을 나타내지만, 필름을 연신하면 랜덤 배열의 고분자 사슬이 연신 방향으로 늘어서며 배향되어 필름 내에 이방성이 나타나게 된다. 이방성을 가지는 고분자 필름 표면에서 액정분자들은 분자 사이의 상호작용에 의해서 고분자 사슬의 연신 방향을 따라서 한 방향으로 모두 늘어서게 되며, 이와 같이 한 방향으로 배열된 액정분자들에 의하여 CLC의 planar 구조가 유도되는 것이다. 비록 배향막을 사용하여 CLC의 planar 배열을 유도한 효과보다 기판 필름의 연신에 의한 planar 유도 효과가 작게 나타나지만, 배향막을 사용하지 않고 고분자 필름을 단순히 연신하는 방법에 의해서도 그 위에 코팅된 CLC의 planar 배열을 유도할 수 있는 것을 보여주었다.

## 결 론

선택 반사를 일으키는 CLC의 특성은 CLC가 planar 배열을 이루고 있을 때 나타나게 되는데, 셀 내에 형성되는 planar 배열의 양을 FTIR 실험을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 기판 위에 배향막을 따로 사용하지 않고서도 CLC의 planar 배열을 유도할 수 있었다. 셀의 두 유리 기판 사이로 액정이 모세관 힘에 의하여 주입될 때 형성되는 shear force 영향으로 CLC planar 배열이 유도되었으며, 액정 주입 시 걸어진 진공의 크기에 따라 planar 배열이 CLC 셀 내에서 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 유리 대신 고분자 필름을 기판으로 사용하여 CLC를 코팅할 경우에는 고분자 필름을 연신하여 CLC의 planar 배열을 유도하였다. 연신하지 않은 필름 위에 코팅한 CLC는 planar 배열을 형성하지 못하였으나, 연신한 필름 위의 CLC는 연신 비율이 커짐에 따라 planar 배열의 양이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

광 배향막을 사용하여 CLC 셀 내에 planar 배열을 유도하였을 때, 선 편광 UV를 셀에 쬐어주면 초기에 랜덤한 배열을 형성하던 CLC들이 planar 배열로 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 CLC의 planar 배열이 유도되는 메커니즘은, 배향막과 접촉한 액정분자들이 광 반응이 진행되면서 우선 배향막이 유도하는 방향으로 늘어지게 되고, 이렇게 한 방향으로 배열된 배향막 표면의 액정분자 위에 각 CLC의 꼬인 구조들이 형성되며 planar 배열이 유도되는 것이다.

**감사의 글:** 본 연구는 경기도에서 지원한 지역협력연구센터 사업 [GRRC 경희대 2010-B01]과 2010년도 경희대학교 연구년 지원 사업으로 수행하였음.

## 참 고 문 헌

- P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, 2nd ed., Oxford Clarendon Press, Oxford, 1993.
- N. Boiko and V. Shibaev, *Inter. J. Polym. Mater.*, **45**, 533 (2000).
- M. Schadt and P. Gerber, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **65**, 241 (1981).
- D. A. Dunmur, K. Toriyama, D. Demus, J. W. Goodby, G. W. Gray, H.-W. Spiess, and V. Vill, Editors, *Physical Properties of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- M. Lee, H. Jang, S.-W. Choi, and K. Song, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **30**, 7 (2009).
- T. Manabe, K. Sonoyama, Y. Takahashi, K. Ishikawa, and H. Takezoe, *J. Mater. Chem.*, **18**, 3040 (2008).
- B. Fan, S. Vartak, J. N. Eakin, and S. M. Faris, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 061101 (2008).
- D. J. Broer, G. N. Mol, and J. A. M. M. van Haaren, *J. Adv. Mater.*, **11**, 573 (1999).
- Y. J. Kwon, W. J. Lee, S. J. Paek, I. Kim, and K. Song, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **377**, 325 (2002).
- Y. Kwon, W. Lee, B. Kim, I. Kim, and K. Song, *Polymer (Korea)*, **30**, 422 (2006).
- D. C. Zografopoulos, E. E. Kriezis, M. Mitov, and C. Binet, *Phys. Rev. E*, **73**, 061701 (2006).
- J. Park, B. Kim, W. Kim, I. Kim, and K. Song, *Polymer (Korea)*, **30**, 182 (2006).
- B. Chae, S. B. Kim, S. W. Lee, S. I. Kim, W. Choi, B. Lee, M. Ree, K. H. Lee, and J. C. Jung, *Macromolecules*, **35**, 10119 (2002).
- M. Obi, S. Morino, and K. Ichimura, *Chem. Mater.*, **11**, 656 (1999).
- K. Ichimura, Y. Akita, H. Akiyama, K. Kudo, and Y. Hayashi, *Macromolecules*, **30**, 903 (1997).
- H. Tomita, K. Kudo, and K. Ichimura, *Liq. Cryst.*, **20**, 171 (1996).
- J. Lim, S. Choi, W. Kim, S. S. Kim, and K. Song, *Polymer (Korea)*, **Vol. 29**, No. 4, 413 (2005).
- K. Ha, H. Ahn, and C. Son, *Liq. Cryst.*, **33**, 8, 935 (2006).
- R. Bhargava, B. G. Wall, and J. L. Koenig, *Appl. Spect.*, **54**, 4 (2000).
- A. Hatta, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **72**, 195 (1981).
- A. Kazunori, I. Atsuko, and K. Shunsuke, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 6482, part1, 12A (1998).
- G. Jung, I. Seo, M. Lee, S. Choi, and K. Song, *Polymer(Korea)*, **34**, 242 (2010).
- A. Dyadyusha, A. Khizhnyak, T. Marusii, V. Reshetnyak, Y. Reznikov, and W. Park, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 1000 (1995).