

# 네마틱 액정의 Splay 변형에 대한 동역학적 연구

## Dynamics of Splay Deformation in Nematic Liquid Crystal

고준수\*, 윤선현, 고도경, 이재형, 장준성

서울대학교 물리학과

### 초 목

네마틱 액정셀에 시각전압펄스를 가하여 액정의 splay 변형시간을 조사하였다. 광학적 방법으로 복굴절 신호의 오름시간과 내림시간을 측정하였으며 외부전압과 두께를 변화시키면서 신호 형태와 반응시간의 변화를 관찰하였다. 그 결과는 Leslie - Ericksen 의 식으로 근사적으로 분석할 수 있으며 이로부터 점성 계수를 구할 수 있다.

### I. 서 문

액정은 방향에 따라 굴절율과 흡수율 등의 여러 가지 물리적 성질이 다른 비등방성의 액체로서 전기장 또는 자기장에 의해 재배열이 가능하므로 여러가지 시각장치에 응용이 가능하다. 네마틱 액정은 단축결정에 해당하는데 이러한 액정분자가 셀의 평면에 평행하게 배열된 homogeneous 셀(그림 1)에 수직 방향으로 전기장을 가해주면 평행한 방향의 유전상수가 수직 방향의 그것보다 클 때 액정분자가 회전력을 받게 되고 가해진 전압이 문턱값을 넘으면 분자가 회전하여 재배열되는 Freedericksz 상전이를 한다. 이때 문턱값(threshold voltage)  $V_{th}$ 는

$$V_{th} = 2\pi(\pi k_{11}/\epsilon_a)^{1/2}, \quad \epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$$

이고  $k_{11}$ 는 Frank의 탄성이론에서의 탄성계수,  $\epsilon_{\parallel}$ ,  $\epsilon_{\perp}$ 는 각각 액정분자와 평행한 방향과 수직인 방향의 유전상수이다. 이러한 상전이는 시각장치에 많이 이용되기 때문에 그 반응시간이 중요한 요소가 된다. 반응시간은 물질의 탄성계수와 점성계수, 전기적(또는 자기적) 비등방성과 외부에서 가해지는 전기장(또는 자기장)에 의해 결정된다.

### II. Freedericksz 상전이의 Dynamics

homogeneous 셀에 외부전압을 가할 때의 액정의 재배열을 생각하자. 정적인 경우를 고려하면 주어진 전기장에서의 액정의 변형은 Frank의 탄성이론과 자유에너지 최소화 조건을 이용하여 다음의 식과 같

이 주어진다.

$$(d/dz)[(k_{11}\cos^2\theta+k_{33}\sin^2\theta)(d\theta/dz)]-(k_{33}-k_{11})\sin\theta\cos\theta(d\theta/dz)^2 = -(\epsilon_a/4\pi)E^2\sin\theta\cos\theta \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는 역정분자의 회전각도이고  $k_{ii}$ 는 탄성계수,  $E$ 는 전기장의 세기이고  $z$ 축은 셀과 수직방향이 다. 셀의 양 벽면에서는 본자가 회전하지 않고 또 셀의 중심( $z=d/2$ ,  $d$ 는 셀의 두께)에서 볼 때 대칭성을 갖는다는 경계조건을 이용하여 정리하면 근사적으로 문턱값 근처에서

$$V/V_{th} = 1 + (1/4)(k+\epsilon_a/\epsilon_a+1)\theta_m^2 + \dots$$

으로 주어진다. 여기서  $k=(k_{33}/k_{11})-1$  이고  $\theta_m$ 은 셀의 중심( $z=d/2$ )에서의 역정분자의 회전각도이다.

다음엔 역확적인 면을 고려하자. 역정분자에 작용하는 힘은 탄성과 점성에 의한 힘, 그리고 외부 전기장에 의한 힘이 있다. 이들에 의한 운동방정식은

$$(1+k\sin^2\theta)\partial^2\theta/\partial z^2 + k\sin\theta\cos\theta(\partial\theta/\partial z)^2 \dots (2) + (\pi/d)^2(E/E_0)^2\sin\theta\cos\theta - t_0\partial\theta/\partial t - \lambda t_0\partial v_y/\partial z = 0$$

이다. 여기서 처음의 두 항은 탄성력을 나타내고 셋째 항은 외부전기장에 의한 힘, 그리고 넷째 항은 점성에 의해 가해진 힘, 마지막 항은 backflow 효과에 의한 힘이다. 또한  $E_0=V_{th}/d$ ,  $t_0=4\pi(\gamma_1/\epsilon_a)E_0^{-2}$ ,  $\lambda=(\gamma_1+\gamma_2)/(2\gamma_1)$ ,  $\gamma_1, \gamma_2$ 는 점성계수이다.  $v_y$ 는  $y$  방향 속도로서  $z$ 와  $t$ 의 함수이다. Leslie-Ericksen의 유체역학이론에 의해 속도는 액정의 방향벡터  $n$ 과 연결되는데 관성효과를 무시하면

$$\partial(\eta_1\partial v_y/\partial z + \alpha_3\partial\theta/\partial t)/\partial z \dots (3)$$

$$\eta_1=(\alpha_4+\alpha_6+\alpha_3)/4$$

이다. 여기서  $\alpha_i$ 는 Leslie 계수들로  $\eta_1$ 들을 측정하여 알아낼 수 있다. 작은 변형에 대해 식 (2), (3)을 선형화하여 풀 수 있고 Brochard 등에 의하면

$$\theta(z,t)=\theta_0[\cos(qz)-\cos(qd/2)]\exp(st) \dots (4)$$

$$v_y(z,t)=v_0[\sin(qz)-(2z/d)\sin(qd/2)]\exp(st)$$

이다. 여기서  $q$ 는 파수벡터이고  $s^{-1}$ 는 시간상수이다.

위의 식들을 조합하면  $q$ 와  $s$ 를  $E/E_0$ 의 함수로 나타낼 수 있다.  $\lambda\alpha_3/\eta_1$ 이 작을 때  $s=(\omega^{-1}[(E/E_0)^2-1])$ 이고 이는 backflow 효과를 무시했을 때와 같은 결과로 된다. 따라서 작은 변형에 대해 시간상수와 전기장의 세기의 관계식을 알면 점성계수를 구할 수 있다.

## II. 실험 및 결과

편광자와 검광자를 교차시키고 그 사이에 homogeneous 액정셀을 광축이 편광자와  $45^\circ$ 가 되도록 놓았다(그림 1). 레이저는 He-Ne 레이저를 사용하였고 함수발생기에서 나오는 사각파를 정류하여 전압펄스로 사용하였다. 내림시간이 매우 길 때에는 직류전압을 사용하였다. photodiode 를 digital oscilloscope 에 연결하였고 함수발생기로부터 triggering하여 신호를 관측하였다. 액정은 Merck의 ZLI 2419 를 사용하였고 셀은 indium tin oxide(ITO) 투명전극이 코팅된 위에 poly vinyl alcohol을 다시 코팅하고 일정한 방향으로 문지른 후 spacer로 두께를 조정하고 에폭시로 붙여 만들었다.  $9\mu m$  셀은 poly imide 가 코팅된 셀을 사용하였다.

$85\mu m$ 와  $9\mu m$ 의 셀에 대해 관측한 신호가 그림 3에 나타나 있다. 전압이 오를 때와 내릴 때 신호가 진동하는데 이는 다음과 같이 이해할 수 있다. 액정이 회전하면서 복굴절이 변화하고 따라서 두 방향의 빛간에 위상차가 생기는데 이 위상차를  $\Delta\phi$ 라고 하면 검광자를 투과한 빛의 세기는  $\sin^2(\Delta\phi/2)$ 에 비례하고 전압이 걸렸을 때 액정이 회전하면서 위상차가 줄어들고  $2\pi$ 만큼씩 줄어들 때마다 진동을 하게 된다. 따라서 위상차가  $2\pi$ 보다 매우 크면 여러번의 진동이 가능하게 되고 셀이 두꺼울수록 많은 진동

을 하게 된다. 이는 강한 레이저 빔이 네마틱 액정 셀에 입사할 때 생기는 자기위상변조에 의한 원형간섭무늬로도 확인할 수 있었는데  $9\mu\text{m}$  셀의 경우에는 무늬가 형성되지 않았으므로 위상차가 2보다 작다고 볼 수 있고  $85\mu\text{m}$  셀의 경우에는 11개이상의 원무늬가 생겼으므로 전압을 더욱 높이면 더 많은 진동을 하게 된다. 문턱전압 근처에서 전압에 따라 신호가 진동하는 것도 관측할 수 있었는데 이것도 위와 같이 이해할 수 있다.  $85\mu\text{m}$  셀의 경우에 전압을 내렸을 때 안정되기 전에 매우 큰 진동을 볼 수 있는데 이는 van Doorn이 계산으로 보인 바 있다.<sup>(6)</sup>

전압에 따른 오름시간과 내림시간의 변화가 그림 4에 나타나 있다. 이론에 의하면 오름시간은 문턱값 근처에서 전기장이 전압에 비례한다고 하면  $[(V/V_{th})^2 - 1]$  에 반비례하는데 그림을 보면 결과가 비교적 근사하게 나왔음을 알 수 있다. 이 기울기로부터 점성계수를 구할 수 있다. 실험에서 구한  $V_{th}$  는  $9\mu\text{m}$  셀의 경우에는 2.6V  $85\mu\text{m}$  셀의 경우에는 4.0V 였다. Merck의 자료로부터  $\epsilon_a=12.9$  이므로  $k_{11}=7.8 \text{ e-}6(\text{dyn})$  이고 따라서 점성계수  $\gamma_1 = 7.2(\text{cgs 단위}; \text{g/cm}\cdot\text{s})$ 이다. backflow 효과는 결과적으로 점성계수를 감소시키는 역할을 하는데 이를 고려하여 근사적으로  $\gamma_1^*=\gamma_1(1-a)$  으로 표시하면 bend 변형에서는 a가 매우 크지만 ( $\sim 0.5$ ) splay 변형에서는  $a \sim 0(10^{-3})$ 으로 무시할만하다.

Fredericksz 상전이에 있어서 아주 작은 변형의 경우를 제외하고는 일반적으로 순수한 splay 변형이나 순수한 bend 변형은 없으므로 DC나 낮은 진동수 (conducting regime)에서 전압이 10V 이상 걸리면 대부분 유체의 흐름이 생기고 Williams domain 을 형성하게 된다. 이 때 유체의 흐름과 밀도변화에 의해 빛의 약한 산란이 있게 되고 더욱 큰 전압이 걸렸을 때에는 빛의 강한 산란 즉 dynamic scattering 이 일어난다.  $85\mu\text{m}$  셀에 대해 전압을 가하며 현미경으로 관찰한 결과 약 10V에서 Williams domain을 형

성하는 것을 확인할 수 있었는데 검광기를 광로에서 제거하고 산란이 일어날 때와 일어나지 않을 때를 비교해 본 결과 특징적인 파형을 변화시키지는 않고 전체적인 투과율에 약간의 영향을 미치는 것이 관찰되었으므로 dynamic scattering은 일어나지 않았으며 또한 오름시간에 큰 영향을 주지는 않은 것으로 생각된다.

## V. 결 론

네마틱 액정의 homogeneous 셀에 전기장을 가하며 그 반응시간을 조사하였다. 오름시간은 문턱전압의 약 5배까지도 제곱의 규칙을 근사적으로 따랐으며 내림시간은 문턱전압 근처에서 증가하다가 곧 포화되었다. 셀의 두께와의 관계는 거의 제곱에 비례하는 모습을 보였다. 이에 대해서는 계속 연구가 진행 중이다.

## 참 고 문 헌

1. D.W.Berreman, J. Appl. Phys. 46, 3746(1975)
2. R.A. Soref, M.J. Rafuse, J. Appl. Phys. 43, 2029(1972)
3. C.Z. van Doorn, J. Appl. Phys. 46, 3738(1975)
5. F. Brochard, P. Pieranski, E. Guyon, Phys. Rev. Lett. 28, 1681(1972)
6. Labrunie et. al., J. Appl. Phys. 44, 4869(1973)
7. F. Sagues et. al., Phys. Rev. A38, 5367(1988)
8. S. Chandrasekhar, Liquid Crystals, Cambridge Univ. Press(1977)
9. L. Liebert, Liquid Crystals, Academic Press(1978)
10. L.M. Blinov, Electrooptical, John Wiley (1983)
11. S. Meiboom, R.C. Hewitt, Phys. Rev. Lett. 30, 261 (1973)

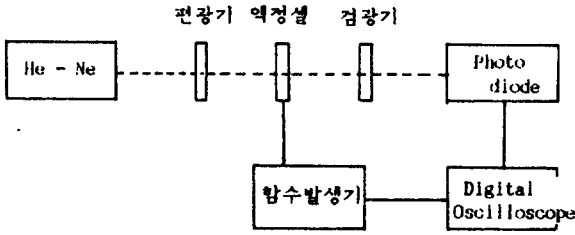


그림 1 실험 장치도

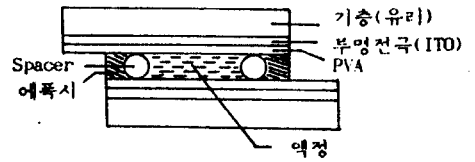


그림 2 homogeneous 액정 셀; 액정분자가 셀의 평면과 평행하게 배열되어 있다.

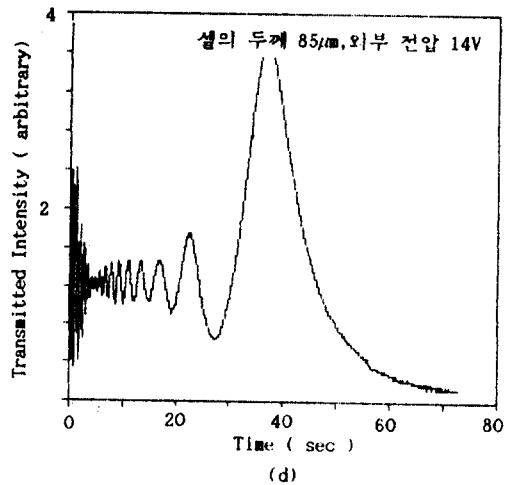
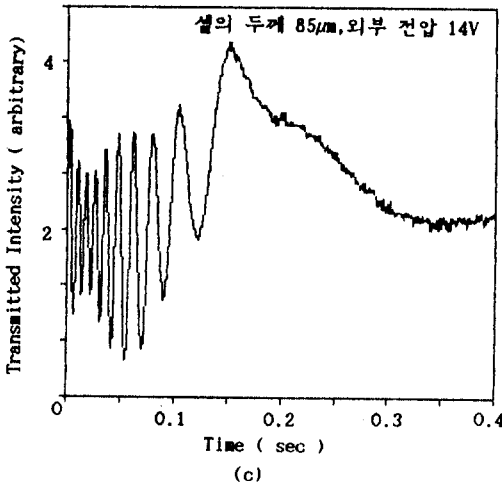
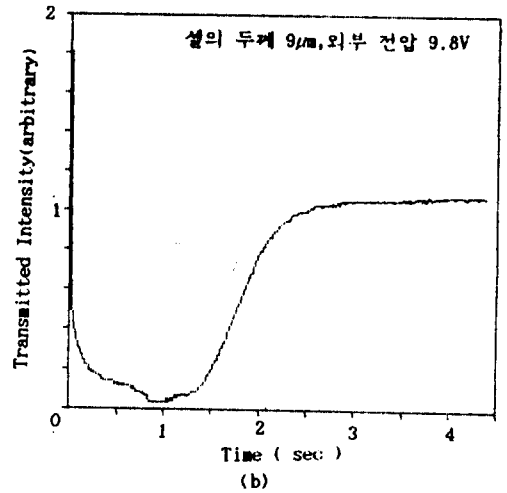
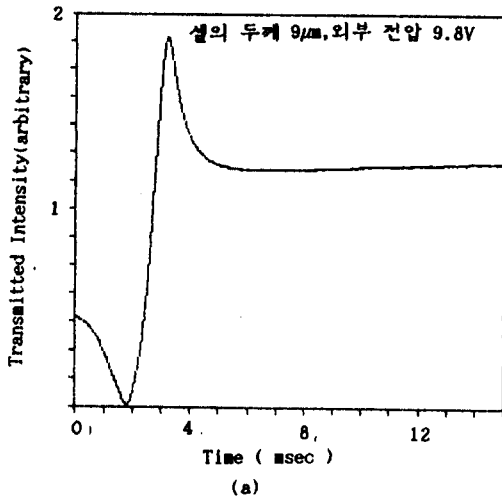
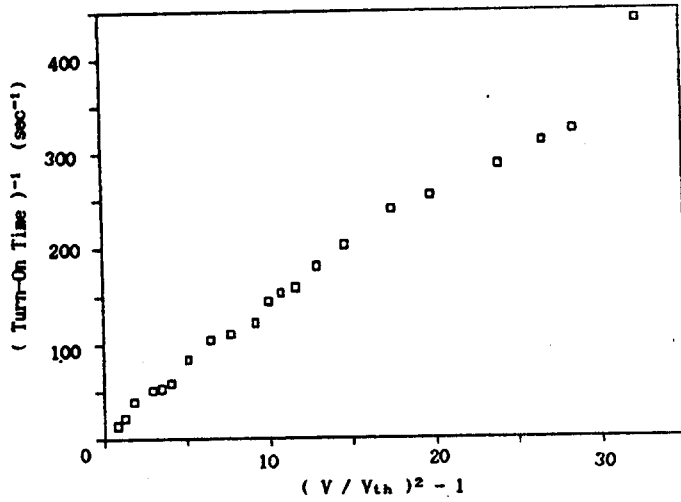
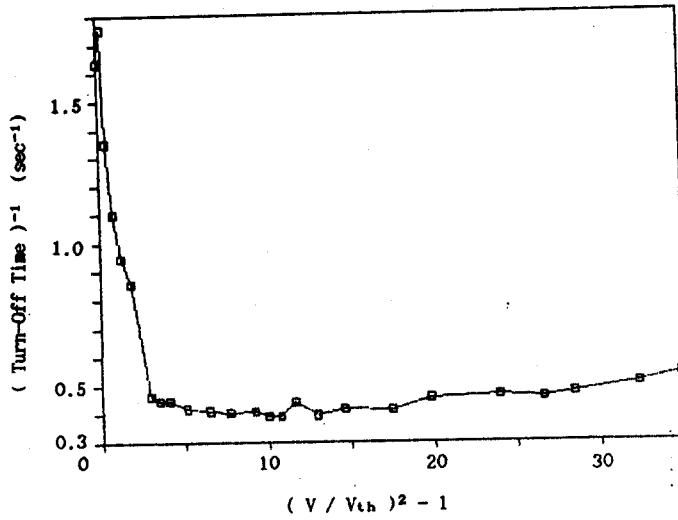


그림 3 전압을 인가했을 때((a),(c))와 단절했을 때((b),(d))의 동작 신호



(a) 오름시간



(b) 내림시간

그림 4 외부 전압과 오름시간 및 내림시간과의 관계 그래프  
(셀의 두께 9 $\mu$ m)