

색소첨가된 네마틱 액정에서의 Z-scan 해석

Analysis of Z-scan of Porphyrin:Zn doped nematic liquid crystal

김건엽, 김은주, 양혜리, 이상조, 박종훈
영남대학교 물리학과

osydizho@gmail.com, chkwak@yumail.ac.kr

Z-scan을 제안한 Sheik-Bahae⁽¹⁾의 논문이후에, Z-scan은 실험장치가 간단하다는 장점과 더불어 매우 높은 정밀도로 3차 비선형 계수의 크기 및 부호를 동시에 측정할 수 있는 방법으로 각광을 받아왔으나, 매질 두께가 얇다는 것과 비선형 위상 변조가 작은 매질에 대해서만 적용할 수 있다는 한계로 인해 보다 일반적인 매질에 대해서 적용하기는 힘들었다. 물론 이후 Sheik-Bahae⁽²⁾가 두꺼운 매질에 대해서 유한개의 얇은 매질로 대체하여 근사적인 해를 얻었고, 후에, C. H. Kwak⁽³⁾등이 위상변조가 크고 비대칭적인 투과도를 갖는 매질에 대하여 해석적인 해를 얻었으나 그것 역시 불행하게도 얇은 매질에만 국한된 결과였다. 이런 여러 시도들은 거의 무기 매질에만 제한된 실험이었으며, 실제 액정과 같은 유기 물질에 관련되어 Z-scan의 해를 얻은 논문이 무기매질에 비해 턱없이 부족한 현실이다. 본 논문에서는 색소가 첨가된 네마틱 액정을 큰 위상변조와 열적 렌즈 효과 및 색소 농도 효과, 외부 인가 전기장 등을 고려하여 Z-scan 방법으로 해석하겠다. 일반적으로 비선형 Kerr매질에서 빔의 진행은 Gaussian형태를 가지면서

$E(r, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega} \exp \left[-r^2 \left(\frac{1}{\omega^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)} \right) - i\phi \right]$ 로 주어지면, 여기서 $\omega^2 = \omega_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right)$ 는 z축상의

빔의 반지름이며, $R(z) = z \left(1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right)$ 는 곡률반경, $z_0 = \frac{k\omega_0^2}{2}$ 는 Rayleigh 회절 거리이다. 흔히 잘 알려진 대로 매질을 통과하는 빔은 두 가지의 변화가 가지게 되는데, 그 첫 번째가 매질 두께만큼의 굴절률 변화로 인해 발생하는 위상 변조가 그 하나이며, 두 번째가 매질 두께만큼의 흡수를 변화로 인해 발생하는 빔의 세기 변화가 그 하나이다. 문제를 간단히 하기 위해 흡수율의 변화는 입사빔의 세기만 비례하는 선형 흡수율만 있다고 가정하고, 굴절률 변화를 기술하면 앞서 언급한 열적 렌즈 효과, 색소 농도 효과,

외부 인가 전기장 효과를 다 더한 형태가 될 것이다. 열적 렌즈 효과는 $\rho_a C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \nabla \cdot (\gamma_{th} \nabla T)$ 형태

의 열확산 방정식을 원통좌표계로 변환하여 풀이하면 $\Delta T(r, z) = \frac{aP}{4\pi\gamma_{th}} \left[Ei \left(\frac{2r^2}{\omega^2} \right) + \ln \left(\frac{2r^2}{\omega^2} \right) + C_{Euler} \right]$ 이

되며, 이는 정상상태만을 고려한 것임을 밝힌다. 여기서, $a, \gamma_{th}, C_{Euler}, P$ 는 열분산계수, 열전도계수, 오일러상수, 초점에서의 빔의 파워이다. 색소 농도 효과는 Navier-Stokes 방정식을 선형화 시킨 유체역

학으로 기술되는 방정식⁽⁴⁾인 $\left(-\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\nu_s^2}{\gamma} \nabla + \frac{\eta}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \nabla \right) \Delta \rho + \frac{\nu_s^2 \beta_0}{\gamma} \nabla \cdot (\Delta T) = \frac{\gamma}{2n_0 c} \Delta I$ 로 나타나며, 색소

농도 효과는 $\Delta \rho(r, z) = \frac{\gamma C_{Euler}}{2cn_0 \nu_s^2} \left(I_0 \frac{\omega_0^2}{\omega^2} r - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} Erf \left[\frac{\sqrt{2}\omega}{r} \right] + \frac{a\beta_0 P}{4\pi\gamma_{th}} [Ei(-4r\omega^2) - 2Log(r)] \right) + Const_{\rho}$

로 주어진다. 여기서, $\nu_s, \eta, \beta, \gamma_e$ 는 음속, 액정에서의 점성, 체적확장계수, 전왜계수이다. 외부 전기장에 의한 효과는 Leslie-Erickson 방정식에서 재배열 각도가 작다는 가정과 유속이 없다는 가정, frank 탄성 계수를 단일 변수로 둔다는 가정을 통해 무한급수 대입으로 계수 비교를 통해 재배열 각도 $\theta(r, z)$ 는

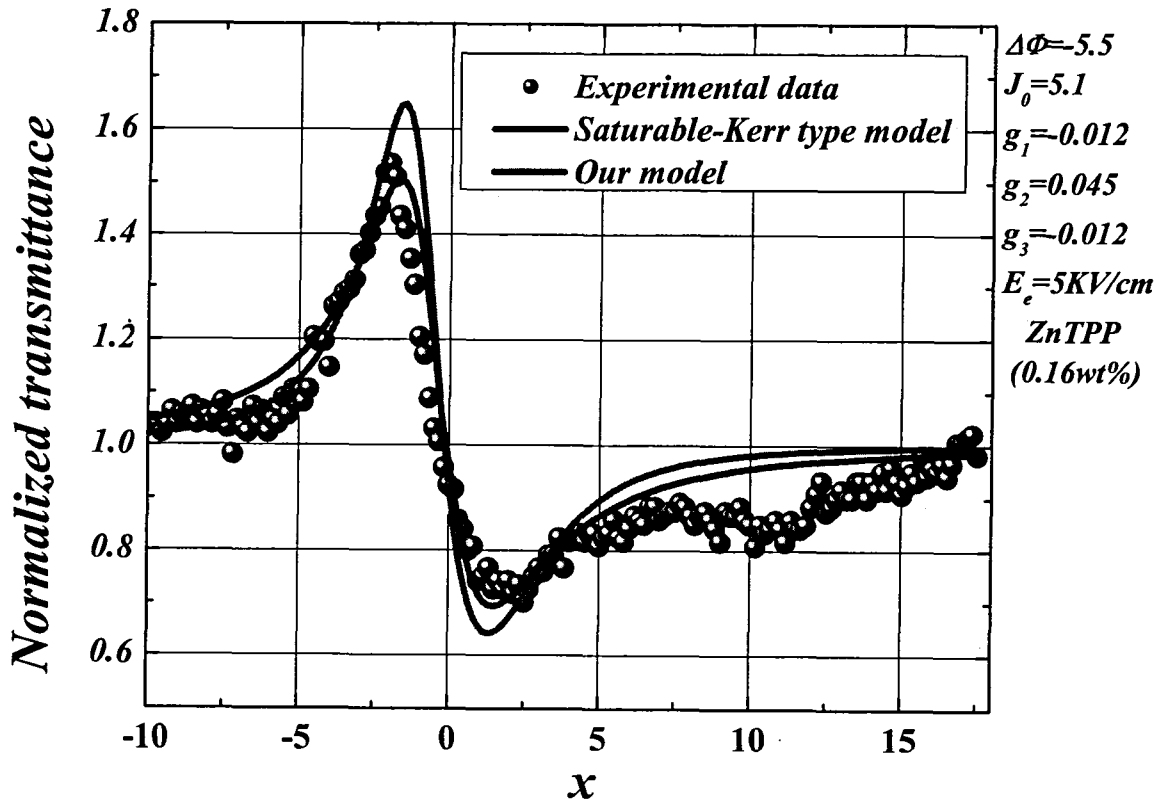
$\theta(r, z) = \frac{1}{32\pi K} \left[\frac{E_E^4 + E_0^4 \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}{E_0 E_E} r^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]$ 와 같이 얻을 수 있다. 여기서, E_E , E_0 는 인가전기장과 입사빔의 전기장의 크기이다. 언급한 이 세가지의 형태를 결합하면 닫힌 개구에서의 투과율은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$T(z) = \frac{1}{1 - \frac{4J_0 \alpha x}{(1+x^2)(1+x^2+J_0)} \Delta\Phi_0 + \frac{4J_0^2 \sigma^2}{(1+x^2)(1+x^2+J_0)^2} \Delta\Phi_0^2}$$

여기서, $\sigma = g_1 + g_2 \sqrt{1+x^2} + \frac{g_3}{\sqrt{1+x^2}}$ 로 g_1, g_2, g_3 는 $g_1 = \frac{n_{\perp}}{n_{\parallel}(n_{\parallel} - n_{\perp})} \frac{\alpha P}{2\pi\gamma_{th}} \left[\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\rho} - \left(\frac{\partial n}{\partial \rho} \right)_{T} \frac{\beta_0}{2} \right]$

, $g_2 = \frac{\Delta\epsilon}{16\pi K} \frac{z_0}{k} \frac{E_E^3}{E_0}$, $g_3 = \frac{\Delta\epsilon}{32\pi K} \frac{z_0}{k} \frac{E_0^3}{E_E}$ 로 주어진다. 다음 그림은 Saturable-kerr 모델과 본 논문에서 유도한 모델의 비교이다. 기존 모델에 비해 잘 맞음을 알 수 있고, 이때 사용된 계수들은 그림 우측에 표기했다.

1. M. Sheik-Bahae et. al., "Sensitive Measurement of Optical Nonlinearities Using a Single Beam", IEEE 760-769 (1990).
2. M. Sheik-Bahae, et. al., "Nonlinear Refraction and Optical Limiting in "Thick" Media", Opt. Eng. 30, 1228-1235 (1990).
3. C. H. Kwak, et. al., "Analysis of "Analysis of Asymmetric Z-Scan Measurement for Large Optical Nonlinearities in Amorphous As2S3 Thin Film", J. Opt. Soc. Am. B16, 600-604 (1999).



T
P