

임계 혼합 용액에서의 DC Kerr 효과

강 동철, 이 재형, 장 준성
서울대학교 자연과학대학 물리학과

초 록

임계 연계 혼합용액에서의 D.C.Kerr 효과를 측정하여 임계온도 근처에서 Kerr상수가 발산하는 등의 임계현상이 나타남을 관측하고 임계지수를 측정한다. 이로부터 현상학적 모델인 방울모델(droplet model)의 타당성을 조사한다.

서 론

Kerr효과는 비선형 광학 현상 중의 하나로 1875년 J.Kerr 에 의해 실험적으로 확인된 후 분자의 구조에 관한 연구와 그 응용의 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 많은 종류의 순수한 액체의 Kerr상수는 이미 여러 사람에 의해 측정되어 그 값이 잘 알려져 있으나[1], 액체 혼합물에서의 Kerr효과는 1970년대 말부터 Pyzuk [2]등에 의해 본격적인 실험이 행하여지기 시작하였다. 특정한 두 액체의 혼합물은 어느 온도 이상에서는 서로 적당한 비율로 섞여 1개의 상으로 존재하고, 그 온도 이하에서는 섞이지 않고 2개의 상으로 분리되는데 이러한 액체혼합물을 임계 연계 혼합물이라 하고, 그 때의 온도와 섞이는 몰 수를 각각 임계온도, 임계농도라 한다. 이러한 임계 연계 혼합물은 임계점 근처에서 Kerr상수가 급격히 증가하고, 임계온도, 임계농도에서 최대의 값을 갖는다는 것이 W.Pyzuk, R.Piazza[3] 등에 의하여 관측되었다.

이론적 배경

Kerr효과를 주는 일반적인 물리적 요인은 다음과 같은 것으로 요약될 수 있다. 첫째, 국소장(local field)내에 있는 원자나 분자가 외부 전기장에 의해 편극이 생기거나, 둘째, 압축성 유체에 전기장을 가할 때 electrostriction에 의한 편극, 셋째, 비등방성 편극을 가진 매질에 전기장을 가할 때 편극축이 외부장의 방향과 나란히 배열하려는 경향 등에 의해 방향에 따른 굴절률의 차이가 나타나는데 이것이 바로 Kerr효과이다. 그러나 임계 연계 혼합물에서는 위와 같이 개개의 입자에 유도되는 비등방성에 의한 요인과 함께 임계점의 존재 때문에 생기는 collective phenomena로 Kerr효과를 설명할 수 있으며, 이를 위해 방울 모델(droplet model)이 사용될 수 있다[4]. 잘 섞여진 임계 연계 혼합물의 온도를 점점 내려 임계온도에 접근해 가면 방울(droplet)이 형성되는데 이는 평균농도 주위의 밀도 요동(density fluctuation)으로 생각되어진다. 두 물질 모두를 포함하고 있는 이 방울은 처음 수 Å의 크기로 시작하여 점점 커지고 온도가 공존곡선 아래로 떨어지면 두 액체의 상이 분리된다. 잘 알려져 있는 니트로벤젠과 사이클로헥산 혼합물의 공존곡선[5]은 아래 그림 1과 같다. 방울 모델에서는 두 개의 함수로 계가 기술되는데 하나는 단위 부피 속에 크기 l 인 방울이 얼마나 있는가를 나타내는 크기분포함수(size distribution function) $N(l, \xi)$ 이고, 다른 하나는 크기 l 인 방울 내의 농도분포함수 (concentration distribution function) $n(r, l) - n_c$ 이다. 크기분포함수와 농도분포함수는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$N(l, \xi) = Ah(l/\xi)/l^{d+1} \quad (1)$$

$$n(r, l) - n_c = \sigma Bf(r/l)/l^u \quad (2)$$

여기서 A와 B는 상수이고, $h(1/\xi)$ 와 $f(r/l)$ 은 각각 $1/\xi$ 와 r/l 이 아주 작으면 1에 가까워지고 커지면 아주 빨리 0으로 수렴하는 함수이다. n_c 는 임계농도이며, σ 는 두 액체 중 어느 것이 많은가에 따라 +1 또는 -1이 되고, d 는 차원을 나타내는 지수이다. ξ 는 상관거리(correlation length)를 나타내는 변수로

$$\xi = \xi_0 \bar{t}^\nu \quad (3)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 t 는 환산온도로 임계온도 T_c 와

$$t = (T - T_c) / T_c \quad (4)$$

의 관계가 있다. u 와 ν 는 실험에 의해 결정되어야 할 임계지수이다. 혼합물이 공존곡선을 따라 움직이면 농도와 온도와의 관계는 다음과 같이 주어진다[6].

$$n - n_c = t^\beta \quad (5)$$

여기서 β 는 $\beta = \nu u$ 인 임계지수이다.

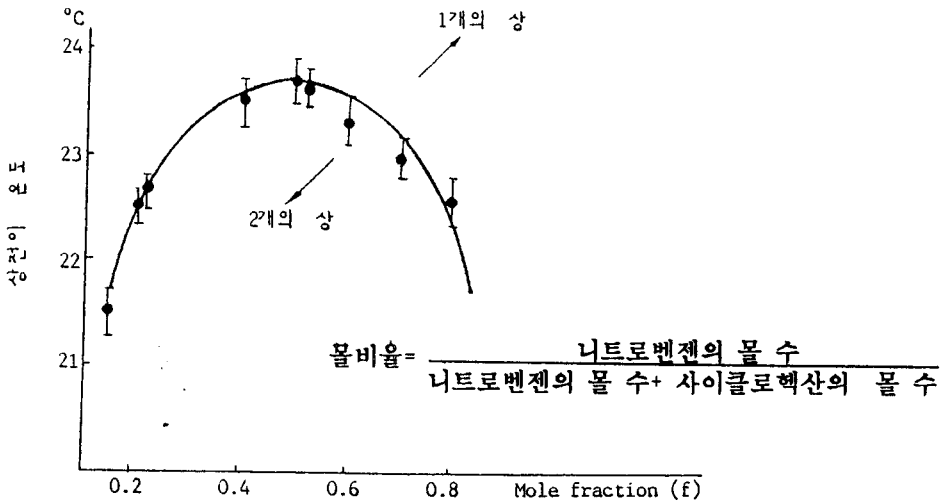


그림 1. 몰비율에 대한 상전이 공존곡선

이제 반지름 R 인 이러한 방울에 외부에서 강한 d.c. 전기장을 가해 주면 이심률 e 인 회전타원체로 찌그러진다고 생각할 수 있는데, 이 계의 자유에너지를 고려함으로써 주어진 전기장에 대해 가장 안정된 e 의 값이 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\zeta = -\frac{2}{15} e^2 - \frac{2}{35} e^4$$

$$\cong -\frac{9}{10d} \epsilon_0 \epsilon_F \frac{(\epsilon_D - \epsilon_B)^2 R}{(2\epsilon_F + \epsilon_P)^2 \gamma_0} E^2 \quad (6)$$

여기서 ϵ_D 는 방울의 유전율, ϵ_B 는 방울을 둘러싸고 있는 주위 물질의 유전율, ϵ_F 는 전기장의 영향을 받고 있는 전체 액체의 유전율을 나타낸다. 그리고 γ_D 는 방울과 주위 액체 사이에 작용하는 표면장력이다.

이러한 방울의 비등방성은 액체 혼합물의 정유전율(static permittivity)에 영향을 미치게 되는데 이것은 Grosse-Grefe 방정식으로 주어진다.

$$\frac{\epsilon_E - \epsilon_B}{(\epsilon_D - \epsilon_B)\phi} = \frac{\epsilon_E + 2\epsilon_B}{\epsilon_D + 2\epsilon_B} Q \quad (7)$$

여기에서 ϕ 는 전체 부피에 대해 크기 1인 방울이 차지하고 있는 부피의 비율, ϵ_E 는 정유전율을 나타낸다. 또한 Q 는 방울의 형상인자로 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \frac{1}{1 + 3\zeta \frac{\epsilon_D - \epsilon_B}{2\epsilon_F + \epsilon_D}} \cong 1 - 3\zeta \frac{\epsilon_D - \epsilon_B}{2\epsilon_F + \epsilon_D} \quad (8)$$

식(6)와 (7)로부터 전기장에 의해 변화된 비선형 유전율은 다음과 같이 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$\epsilon_E = \epsilon_B + \Delta\epsilon_E^I(E^2) + \Delta\epsilon_E^{II}(E^2) \quad (9)$$

여기에서 $\Delta\epsilon_E^I$ 는 임계현상이 없을 때에도 나타나는 전기장에 의한 비선형 유전율이고, $\Delta\epsilon_E^{II}$ 는 임계현상에 의해 나타나는 항으로 앞의 식들로부터 아래와 같이 쓸 수 있음을 알 수 있다.

$$\Delta\epsilon_E^{II} \sim |t|^{-(\gamma-2\beta)} E^2 \quad (10)$$

여기에서 γ 와 β 는 각각 압축률 및 농도의 임계지수이다. 이로부터 임계연계 혼합물에서의 강한 d.c. 전기장에 의한 굴절율의 변화는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$n_E^{2II} - n_E^{2I} \sim |t|^{-(\gamma-2\beta)} \quad (11)$$

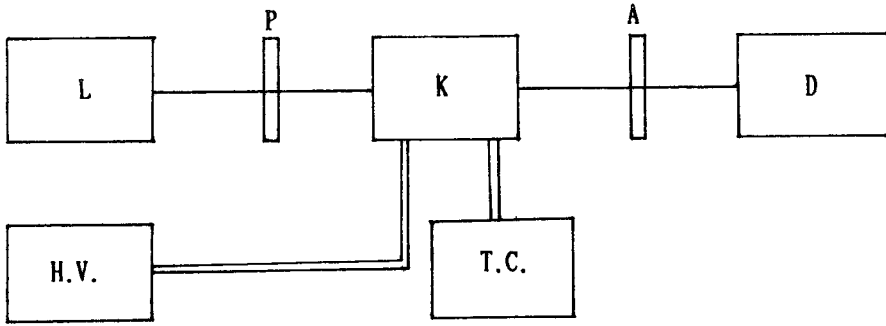
실 험

실험장치는 아래 그림 2와 같다.

laser에서 나온 빛은 편광자 P를 통과하면서 시료에 걸린 전기장의 방향에 대해 45°로 편광되고, 검광자 A는 편광자에 대하여 90°가 되도록 설치하였다. 시료에 고전압 펄스를 가해주고 온도 조절기로 시료의 온도를 변화시켜가며 Photodetector로 검광자를 통과하여 나온 빛의 세기를 측정하면 다음 식으로 Kerr상수를 알아낼 수 있다.

$$I = I_0 \sin^2(\delta/2) = I_0 \sin^2(\pi l B E^2) \quad (12)$$

여기에서 I_0 는 입사광의 세기, I 는 출력광의 세기, l 은 optical path length, B 는 Kerr상수, E 는 시료에 걸어준 전기장의 세기를 나타낸다.



L ; Ar⁺ laser P ; 편광자
 A ; 검광자 K ; Kerr Cell
 H.V. ; 고전압 펄스 발생기 T.C. ; 온도 조절기
 D ; Photodetector

그림 2. 실험 장치도

광원으로는 비교적 출력요동이 적은 Ar⁺ laser를 사용하였으며, detector로는 10 μ W까지 측정할 수 있는 United Detector Technology Inc.의 10 A Photomete 를 사용하였다.

고전압 펄스 발생기는 두 개의 krytron과 시간지연 펄스 발생기를 이용하여 제작하였으며, 펄스폭이 $\sim 100 \mu$ s까지 조정가능한 2Kv 의 펄스를 얻었다. 전극은 스테인레스 판을 사용하였으며, 전극간의 거리가 1.5 mm ,optical path length가 2cm 가 되도록 제작하였다.

이렇게 만들어진 광학계의 소광계수(extinction ratio)는 시료를 넣지 않았을 때 10⁻³, 시료를 넣었을 때 약 5 $\times 10^3$ 정도였다.

이러한 실험을 토대로 임계 연계 혼합용액에서는 임계농도, 임계온도 근처에서 Kerr 상수가 임계 현상을 나타내며, 이러한 임계현상은 방울모델에 의해 설명할 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] C.T.O'konski,ed., Molecular Electro-Optics (Dekker, New York, 1976)
- [2] W.Pyzuk, Chem. Phys.,Vol.50,281(1980)
- [3] R.Piazza,V.Degiorrio,and T.Bellini, Opt.Soc.Am.B,Vol.3,1642(1976)
- [4] J.Goulon, J.L.Grefe,andD.W.Oxtoby, J.Chem.Phys.,70,4742(1979)
- [5] 조 창호, 자기유도 광 Kerr효과에 의한 비선형 광학 감수율에 관한 연구,(서울대학교 박사학위 논문,1988)
- [6] D.W.Oxtoby,H.Metiu, Phys.Rev.Lett.,36.1092(1976)