

자체회절 진동에 의한 포토폴리머 홀로그래ムの 격자 위상측정

경천수 · 심기영 · 곽종훈 · 최옥식

영남대학교 물리학과

이윤우 · 이인원

한국표준과학연구원 양자연구부

서호형 · 이일항

전자통신연구원 기초기술연구부

(1999년 5월 7일 받음, 1999년 7월 29일 수정본 받음)

Acrylamide를 홀몸체로 하는 포토폴리머에서 두광파혼합(two-wave energy coupling)실험을 하였다. 외부의 전기장이나 비선형 매질의 이동, 또는 두 입사파 중 한 광파의 위상이동 없이 자체회절 진동(self-diffraction oscillations)이 측정되었다. 이러한 현상을 설명하기 위하여 위상격자와 흡수격자가 혼합된 격자(mixed grating)와 두 광파의 에너지 결합동안에 형성되는 강도 간섭무늬에 대해 공간 위상 이동(nonlocal response)이 있는 경우를 가정하여, 수정된 Kogelnik의 결합파동 방정식을 유도하였다. 측정된 자체회절 진동을 통하여 포토폴리머의 위상격자(phase grating)는 강도격자(intensity grating)에 대해 $\pm 50^\circ$ 의 위상 이동이 있음을 알았다.

I. 서 론

홀로그래프 기록매질에서 두 입사 광파 사이의 에너지 교환은 매질의 비국부적 응답(nonlocal response)에서 나타난다.^{11,12} 격자(grating)의 비국부적 응답은 격자형성과 관련된 여러가지 물리적 과정으로부터 일어난다. 여기에서 비국부적 응답은 격자가 가간섭적인 두 입사빔의 강도에 의해 형성된 간섭무늬에 대해 위상이 공간적으로 이동한 것을 의미한다. 이러한 격자 위상의 공간적인 이동은 LiNbO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, BaTiO_3 와 같은 무기물 광굴절결정(inorganic photorefractive crystal)이나 유기물 광굴절고분자(organic photorefractive polymer)에서 확산(diffusion), 표류(drift), 광전압 효과(photovoltaic effect) 등에 의해 발생한다.¹³⁻¹⁵ 또한, 홀로그래프 기록매질이 광굴절 매질이 아닌 비국부적 응답은 비선형 물질을 선형모터(linear motor)를 이용하여 격자 벡터 방향으로 움직이거나, 입사파 중 하나를 PZT를 이용하여 위상을 이동시키거나, 외부에서 전기장을 가하여 줌으로써 이러한 효과를 얻을 수 있다. 이와같은 방법에 의해서 결과적으로 형성된 위상격자는 일반적으로 입사강도에 의한 공간적인 분포와는 위상이 어긋나게 된다. 일반적으로 위상격자(phase grating, PG)의 분포 $\Delta n(x, t)$ 와 흡수격자(absorption grating, AG)의 분포 $\Delta \alpha(x, t)$ 는 입사강도의 간섭무늬에 의한 분포와 상대적으로 위상이 ϕ_p 와 ϕ_a 로서 다르다.

본 연구에서는 포토폴리머의 두광파 혼합 실험에서 나타나는 에너지 교환이 시간에 따라 진동하는 현상을 설명하기 위하여, 매질의 비국부적 응답과 혼합된 격자(mixed grating)를 가정한 결합파동 방정식을 유도하였다. 유도된 이론으로 실험 결과가 잘 설명되었으며, 위상 이동($\phi_{p,a}$)과 굴절률 변조값이

측정되었다. 강도 격자에 대해 측정된 굴절률 격자의 위상 이동 ϕ_p 는 $\pm 50^\circ$ 이었고, ϕ_a 는 0이었다. 그리고 노출 에너지에 따른 위상격자와 흡수격자의 진폭변화에 대해 설명하였고, 이를 통해 굴절률 변조값을 측정하였다.

II. 이 론

동적인 기록매질(dynamic recording material)의 경우에 체적홀로그래프에서 간섭하는 두 광파 S와 R을 결합하는 Kogelnik의 방정식¹⁶은 자체회절 진동현상을 설명하기 위해서 조금 수정되어야 한다.¹⁴ 자체회절 진동 특성을 설명하기 위해서 두 광파의 에너지가 결합하는 동안에 강도 간섭무늬(intensity interference pattern)에 대해 각각 공간 위상 이동(spatial phase shifts) ϕ_p 와 ϕ_a 를 가지고 형성되는 위상격자(phase grating)와 흡수격자(absorption grating)의 혼합된 회절 격자(mixed grating)를 가정하면 두 격자는 다음과 같이 표현될 수 있다.¹⁶

$$n(x, t) = n_0 + \Delta n_0(t) + \Delta n_1(t) \cos(K \cdot r - \phi_p) \quad (1a)$$

$$\alpha(x, t) = \alpha_0 + \Delta \alpha_0(t) + \Delta \alpha_1(t) \cos(K \cdot r - \phi_a) \quad (1a)$$

여기서 n_0 와 α_0 는 각각 평균 굴절률과 평균 흡수계수이고, $\Delta n_0(t)$ 와 $\Delta \alpha_0(t)$ 는 공간적으로 일정하게 변조되는 부분이고, $\Delta n_1(t)$ 와 $\Delta \alpha_1(t)$ 는 위상격자와 흡수격자의 공간적으로 변조된 진폭이다. 그리고 K 는 격자 파 벡터(grating wave vector)이다. 스칼라 파동 방정식은 $\nabla^2 E + k^2 = 0$ 이고, 이때 $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon - j\omega\mu\sigma$ 이다. E 는 전기장의 복소진폭(complex amplitude)으로 각진동수 ω 로 진동한다고 가정하였다. 전파상수 k 는 공간적으로 변조되

어 있고, 상대유전상수(relative dielectric constant) ϵ 과 매질의 전도도(conductivity) σ 와 관련된다. c 는 자유공간에서의 빛의 속도이고, μ 는 매질의 투자율(permeability)로서, 자유공간에서의 투자율과 같다고 가정한다. 전파상수의 제곱은 $k^2 \equiv \beta^2 - 2j\alpha_0\beta + 2\beta\kappa^+ e^{jk^+r} + 2\beta\kappa^- e^{jk^-r}$ 이다. 여기서 평균전파상수 β 는 $\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda}n_0$ 와 같고, 평균흡수계수 $\alpha_0 = \frac{\mu\sigma_0 c}{2\sqrt{\epsilon_0}}$ 이다. 결합상수(coupling constant)는 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa^\pm = \frac{\pi}{\lambda}\Delta n_1 e^{\pm i\phi_P} - i\frac{\Delta\alpha_1}{2} e^{\pm i\phi_A} \quad (2)$$

결합상수는 참조광파(reference wave)와 신호광파(signal wave)의 결합을 묘사하는 결합파동 방정식의 중심이 되는 변수로, $\kappa = 0$ 이면 두 광파 사이의 결합이 없고 회절이 없는 경우가 된다. n_1 또는 α_1 에 의해 표현되는 공간 변조는 두 광파 R과 S를 결합하는 회절격자를 형성하고 그들 사이의 에너지 교환을 유도한다. 격자 내에서의 전체 전기장은 두 광파들의 중첩과 같다.

$$E = R(z)e^{-j\rho_1 \cdot r} + S(z)e^{-j\rho_2 \cdot r} \quad (3)$$

이제 참고논문[7]과 비슷한 절차에 의해 Bragg 조건을 만족하는 unslanted grating에서의 수정된 Kogelnik의 결합파동방정식이 다음과 같이 된다.

$$\frac{dR}{dz} = -\frac{\alpha_0 + \Delta\alpha_0}{2\cos\theta} R - \frac{i\kappa^+}{\cos\theta} S \quad (4a)$$

$$\frac{dS}{dz} = -\frac{\alpha_0 + \Delta\alpha_0}{2\cos\theta} S - \frac{i\kappa^-}{\cos\theta} R \quad (4b)$$

여기서 θ 는 두 입사 광파들 사이의 반 각(half-angle)이다. 식 (4)의 일반해는 다음과 같이 주어진다.

$$R = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{2\cos\theta}} \left(R_0 \cos v - j \sqrt{\frac{\kappa^+}{\kappa^-}} S_0 \sin v \right) \quad (5a)$$

$$S = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{2\cos\theta}} \left(S_0 \cos v - j \sqrt{\frac{\kappa^-}{\kappa^+}} R_0 \sin v \right) \quad (5b)$$

여기서 $v = \sqrt{\frac{\kappa^+ \kappa^-}{\cos^2\theta}} d$ 이고, d 는 매질의 두께이다. R_0 와 S_0 는 $z=0$ 일때의 진폭이다. 식 (5)는 투과된 파와 회절된 파의 진폭을 포함하고 있다.

만약 S_0 가 0이면, 즉 $z=0$ 에서 한 개의 빔이 입사하면 $D = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{2\cos\theta}}$ 일 때 $R = DR_0 \cos v$, $S = DR_0 (-j \sqrt{\frac{\kappa^-}{\kappa^+}} \sin v)$ 이다. 만약 $v = \sqrt{\frac{\kappa^+ \kappa^-}{\cos^2\theta}} d = \frac{\pi}{2}$ 의 관계를 만족한다면, 입사된 파 전부가 회절된다. 회절효율은 결합거리 d 내에서 입사한 광파가 회절된 광파로 변환된 강도의 비를 의미하며, 회절효율 $\eta = \frac{I_{diffracted}}{I_{incident}} = \frac{|S(d)|^2}{|R(0)|^2} = m \sin^2 v$ 가 된다. $m = \left| \frac{\kappa^-}{\kappa^+} \right|$ 로 $m=1$ 일 때 Kogelnik의 이론을 만족한다.

결합상수가 다른 경우($\kappa^+ \neq \kappa^-$)에는 R로부터 S로 회절된 파

의 진폭과 S로부터 R로 회절된 파의 진폭의 크기가 같지 않은데, 이러한 현상은 결정의 X-선 회절 연구 분야에서 이상흡수(anomalous absorption)현상 혹은 Borrmann 효과로 알려져 있다.^[8] 논의를 간단히 하기 위해 $S_0 = R_0$ 를 가정하고, 위상격자의 진폭(P)가 흡수격자의 진폭(A) 보다 크다고 가정하면(즉, $P > A$), (5)식으로부터 두 광파 혼합에 의한 두 광파의 강도는 다음과 같이 주어진다.

$$I_1 = |R|^2 = \frac{I_0}{2} e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} \left[\cosh 2y \left(1 - \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \right) + \sinh 2y \left(1 - \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \right) \cos \phi_P + \frac{A}{P} \cdot \cos 2x \cdot \sin(\phi_P - \phi_A) + \sin 2x \left(1 - \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \right) \sin \phi_P \right] \quad (6a)$$

$$I_2 = |S|^2 = \frac{I_0}{2} e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} \left[\cosh 2y \left(1 + \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \right) + \sinh 2y \left(1 + \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \right) \cos \phi_P - \frac{A}{P} \cdot \cos 2x \cdot \sin(\phi_P - \phi_A) - \sin 2x \left(1 + \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \right) \sin \phi_P \right] \quad (6b)$$

여기서 I_0 는 입사빔의 강도이고, $x = P(t) = \frac{\pi d \Delta n_1}{\lambda \cos\theta}$ 는 위상격자의 진폭이며, $y = -A(t) \cos(\phi_P - \phi_A)$, 그리고 $A(t) = \frac{\Delta\alpha_1 d}{2\cos\theta}$ 는 흡수격자의 진폭을 나타낸다. 해석을 간단히 하기 위해 두 빔의 강도 합(I_1+I_2)과 강도 차(I_1-I_2)로 표현하는 것이 유용한데, 위의 식(6)의 합과 차는 아래와 같다.

$$I_1 + I_2 = I_0 e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} \left[\cosh 2y + \sinh 2y \cos \phi_P - \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \sin \phi_P \sin 2P \right] \quad (7a)$$

$$I_1 - I_2 = I_0 e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} \left[\sin 2P \sin \phi_P + \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \cdot \cos 2P - \frac{A}{P} \sin(\phi_P - \phi_A) \cdot \cosh 2y - \frac{A}{P} \sinh 2y \sin(\phi_P - \phi_A) \cdot \cos \phi_P \right] \quad (7b)$$

입사빔의 강도가 같고 순수한 위상 격자 ($\Delta\alpha_1 = 0$ 혹은 $A = 0$)를 가정하면, 두빔의 강도합과 강도차는 아래와 같이 간단하게 주어진다.

$$I_1 + I_2 = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} I_0 \quad (8a)$$

$$I_1 - I_2 = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} 2I_0 \sin\left(\frac{2\pi \Delta n_1 d}{\lambda \cos\theta}\right) \sin \phi_P \quad (8b)$$

또한, 위상격자(P)와 흡수격자(A)의 진폭이 1 보다 매우 작다면, 식(7)은 아래와 같이 된다.

$$I_1 + I_2 = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} I_0 [1 - 2A \cos\phi_P] \quad (9a)$$

$$I_1 - I_2 = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} I_0 2P \sin\phi_P \quad (9b)$$

이 식은 Shutter와 Gunter의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.^[5]

Bragg 조건을 만족하는 반사형 unslanted 홀로그래프의 경우에도 위와 비슷한 계산에 의해서 강도합과 강도차를 식 (10)과 같이 유도할 수 있다.

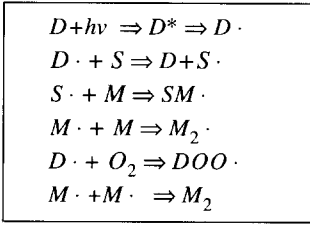
$$I_1 + I_2 = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} \frac{2I_0 \cosh^2 \xi}{\cosh^2 \xi + \frac{A_0}{P} \sinh 2\xi} \quad (10a)$$

$$I_1 - I_2 = e^{-\frac{(\alpha_0 + \Delta\alpha_0)d}{\cos\theta}} \frac{4I_0 \left(\frac{A}{P} \sinh^2 \xi \sin(\phi_P - \phi_A) + \sinh \xi \sin \phi_P \right)}{\cosh^2 \xi + \frac{A_0}{P} \sinh 2\xi} \quad (10b)$$

여기서 $A_0 = \frac{\alpha_0 + \Delta\alpha_0}{\cos\theta} d$, $\xi = P \left(1 + \frac{A_0^2}{2P^2} \right)$ 이다. 식(10)에서 알 수 있듯이 반사형 홀로그래프의 경우는 이론적으로 시간에 따라 진동하는 항이 없다.

III. 실험 및 결과

본 실험에서 제작된 포토폴리머는 Polyvinyl Alcohol(PVA) 10%와 acrylamide(CH₂:CHCONH₂=71.08) 6%, Triethanolamine (TEA, (CH₂CH₂OH)₃N=149.19) 4%, Methylene Blue(MB, C₁₆H₁₈N₃ SCl₂·H₂O) 1.4×10⁻³ mole/liter 로 구성된다. 포토폴리머의 홀로그래프 형성 과정은 광표백 과정, 광중합 과정, 종결과정으로 구분될 수 있고, MB를 D, TEA를 S, acrylamide를 M, Poly-acrylamide를 P라 하면 다음과 같이 표현될 수 있다.



여기서 D·, M·는 각각 MB 라디칼과 acrylamide 라디칼을 나타낸다. 광표백 과정은 물에 녹은 양이온 상태의 MB가 photon을 흡수하면, 여기된 1가의 상태로 되었다가 곧바로 준안정 상태(metastable state)인 3가의 상태(triplet state)로 되며 이어서 TEA로 부터 전자를 받아 leuco MB(무색의 MB)를 형성하는 과정으로 이루어 진다. 포토폴리머의 광표백 과정은 노출에너지에 따른 광학밀도의 감소를 나타낸다. 그림 1(a)는 spectrophotometer로 측정된 포토폴리머의 파장별 흡수 스펙트럼이다. 감광되는 파장영역은 적색 파장영역이며, 633 nm에서 광학밀도가 1.03이다. 그림 1(b)는 He-Ne 레이저(633 nm)광을 사용하여 광학 밀도를 log(노출에너지)에 따라 측정된 그림인

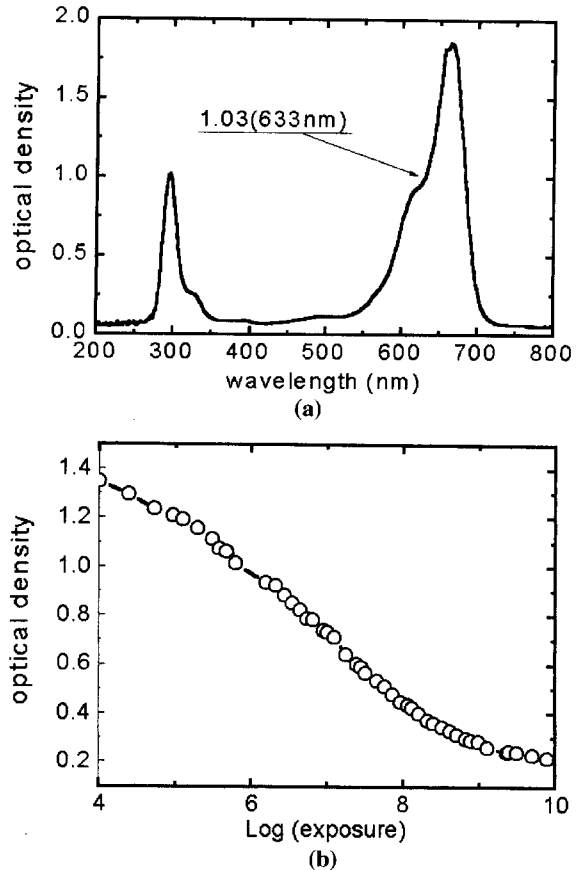


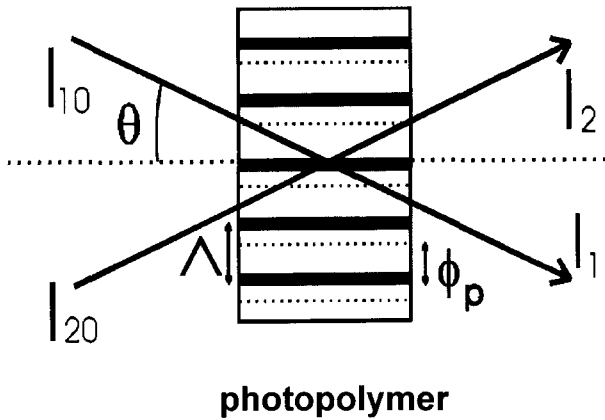
그림 1. (a) Spectrophotometer 측정에 의한 포토폴리머의 파장별 흡수 스펙트럼, (b) log(노출에너지)에 따른 광학밀도.

데, 노출에너지가 증가함에 따라 광학밀도가 감소한다.

TEA는 물에 녹아 음이온의 상태로 존재하는데, 여기된 3가 상태의 MB에게 전자를 주고, 중성인 라디칼(radical)을 형성하게 된다. 그리고 acrylamide와 라디칼 중합을 해서 고분자(poly-acrylamide)를 형성한다. 이 중합과 홀몸체의 diffusion이 결과적으로 굴절률의 공간적 변조를 발생시킨다. 포토폴리머의 라디칼 반응은 두 라디칼끼리의 결합에 의해 정지하게 된다. 광중합 과정은 빛에 의한 가교반응(crosslinking)에 의해 겔화(gelation)가 일어나는 과정으로 반응시간이 길어짐에 따라 가교반응한 중합체(gel)들이 점차 증가하여 중합이 될 수 있는 홀몸체들의 수가 줄어든다. 그 결과 광중합 반응은 서서히 멈추게 되는데, 이러한 효과를 겔 효과(gel effect)라고 한다.

TEA는 유화제(emulsifiers), 습윤제(wetting agents), 계면활성제(surfactant), 세정제(detergents), 제초제, 직물, 약품 등 일상 생활에 널리 사용되는 물질로, 홀로그래프 분야에서는 표백과 수축작용을 이용해서 전시용 홀로그래프(display hologram)의 회절 파장을 짧게하기 위해서 사용되어 왔다. 은염(silverhalide) 홀로그래프 매질에 TEA 농도를 달리하여 젤라틴의 수축 정도를 결정하는데, 이때 TEA의 양은 젤라틴의 종류에 따라 다르며, 이렇게 TEA의 양에 따라 재생파장을 선택하는 방법을 TEA법(TEA method)라 한다.^[9]

그림 2는 두광파 혼합 실험 장치도이다. 빔나누개(beam



photopolymer

그림 2. 두광파 혼합 실험 개념도.

splitter)에 의해 나누어진 s-편광된 He-Ne 레이저 광파는 두 입사파의 강도를 같게 하였고(1 mW/cm^2), 포토폴리머 홀로그래프 매질에 공기중에서의 입사각을 각각 20° 로 입사시켰다. 매질을 통과한 두 빔의 강도 변화는 포토다이오드로 측정되고, 그 데이터는 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장되었다. 그림 3(a), 3(b)는 각각 두광파 혼합에 의해 측정된 출력강도 I_1 과

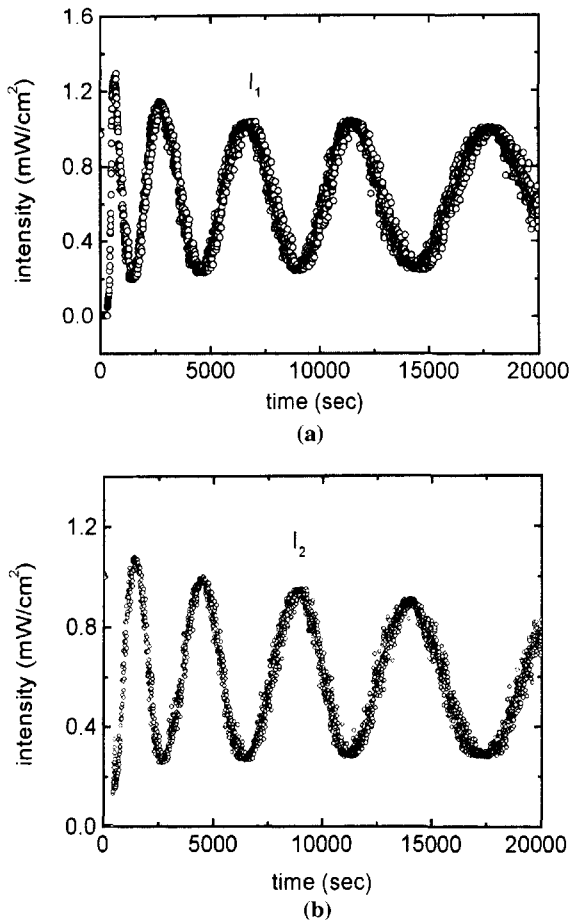


그림 3. (a) 두광파 혼합에 의한 출력강도 I_1 , (b) I_2 .

I_2 이다.

두빔들 사이의 진동하는 에너지 교환이 매질내에서 발생하고, $I_1(t)$ 와 $I_2(t)$ 가 시간적으로 변조됨을 알 수 있다. 에너지 교환에 의해서 한쪽 포토다이오드에서 빔이 밝아지고 있는 사이에 다른쪽 포토다이오드에서의 빔이 어두워지는 것을 관측할 수 있다. 위상격자와 흡수격자의 결합된 회절효과를 보기 위하여 측정된 강도들의 합(I_1+I_2)과 차(I_1-I_2)를 그림 4에 나타내었다. 강도합(sum intensity)과 강도차(difference intensity)는 모두 느리게 진폭이 감소하는 주기적인 진동을 보이는데, 이것은 홀로그래프 기록이 혼합된 격자(mixed grating)임을 의미한다. 시간이 진행함에 따라 점차적으로 길어지는 주기는 겔 효과에 의해 설명이 될 수 있다. 이것은 시간이 지남에 따라 점차 반응이 끝난 고분자의 밀도가 높아지기 때문에 광중합 반응이 멈춰지는 효과이다.

실험 데이터는 매질에 전기장을 가하거나, 입사파중 하나의 위상을 변조시키거나, 매질을 격자 파 벡터(K) 방향으로 이동시키는 등의 외부 수단을 가하지 않고 측정되었다. 그러므로 위상이동 ϕ_p 와 ϕ_A 는 시간에 대해 상수로 고려할 수 있다. 이론과의 curve fitting에 의해서 $\phi_p = 50^\circ$, $\phi_A = 0$ 을 얻었다. 사용된 물리적 변수는 $d = 70 \mu\text{m}$, $\lambda = 633 \text{ nm}$, $I_0 = 2 \text{ mW/cm}^2$ 이고, $\Delta n_1(t) = n_{1,\text{max}}(1 - e^{-\beta I_1 t})$ 이며, $n_{1,\text{max}} = 1 \times 10^{-1}$, $\alpha_{1,\text{max}} = 5 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$, $\beta = 1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{mJ}$ 이다.

그림 5는 광중합과정의 종결반응(terminal reaction)을 보이는 강도차(difference intensity)의 실험 곡선이다. 반응을 빨리

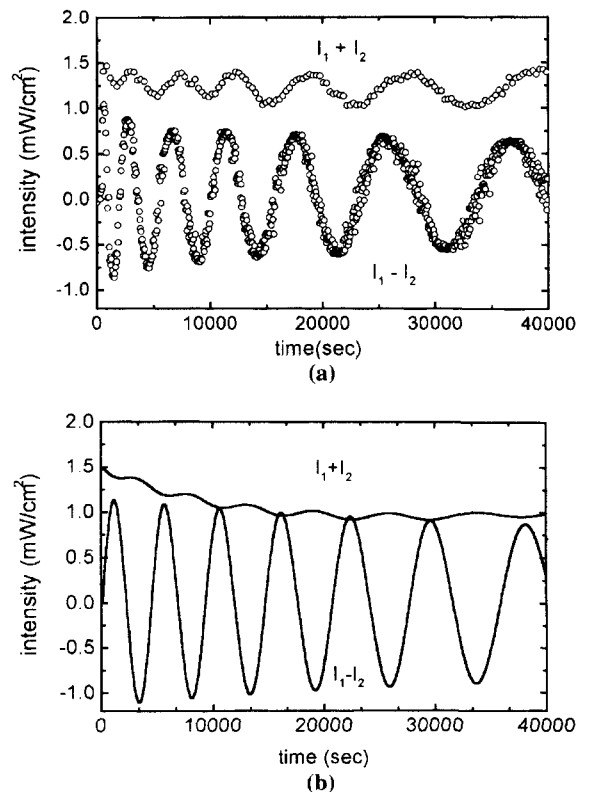


그림 4. (a) 강도합(sum intensity)과 강도차(difference intensity)의 실험곡선, (b) 이론곡선.

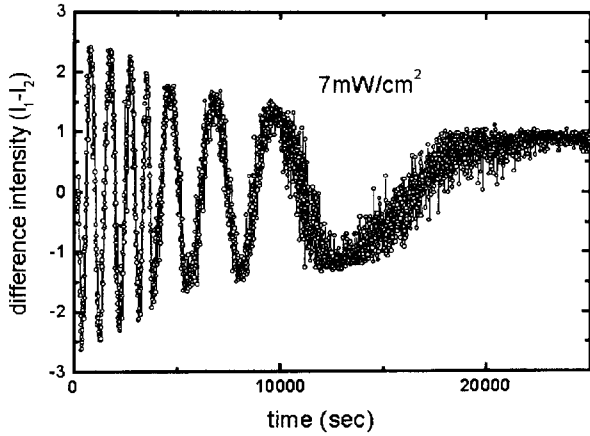
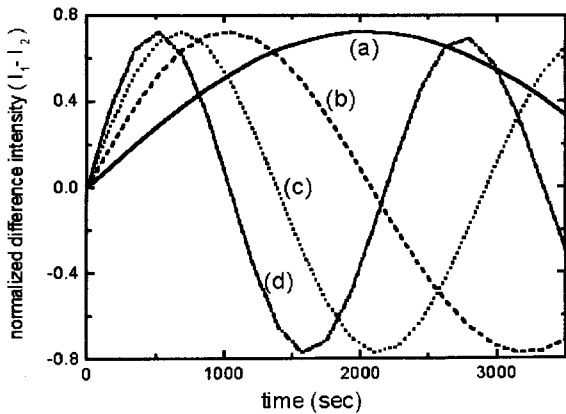
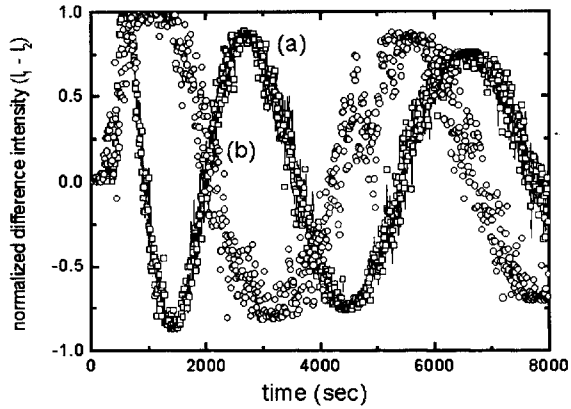


그림 5. 광중합 과정의 종결반응.



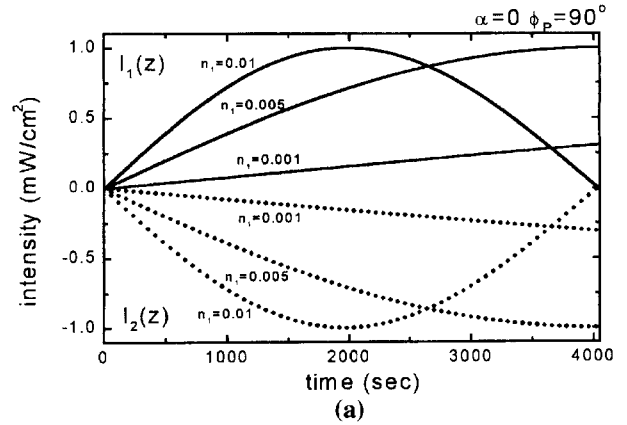
(a)



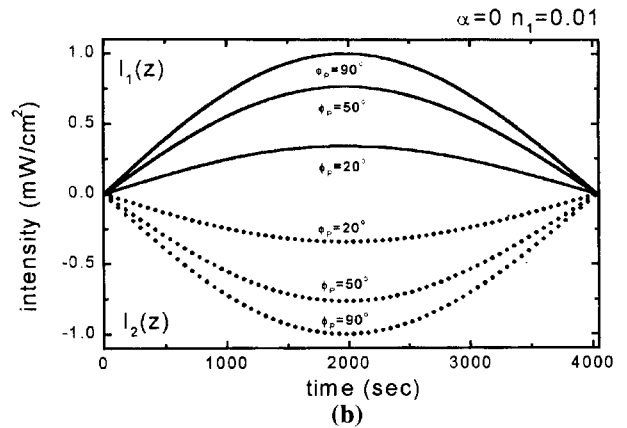
(b)

그림 6. (a) 입사 강도에 대한 강도차의 이론곡선, (b) 실험곡선.

기 위하여 입사 광파의 강도(I_0)를 7 mW/cm^2 로 하였고, 이러한 현상을 이론적으로도 예측할 수 있었다. 포토폴리머의 비선형광학특성은 입사광파의 강도가 다를 때 다른 굴절률과 흡수계수의 변화를 보이는데, 이론적인 예측은 실험치와 일치하였다. 그림 6(a)는 입사강도에 대한 강도차의 이론 곡선이다. 곡선 (a)는 입사강도가 1 mW/cm^2 일 때이고, 곡선 (b)는 2 mW/cm^2 , (c)는 3 mW/cm^2 , (d)는 7.06 mW/cm^2 일 때의



(a)



(b)

그림 7. (a) 흡수가 없고 굴절률격자의 위상이동이 90° 일 때, 최대굴절률변조값에 따른 자체회절진동특성. (b) 굴절률격자의 위상이동에 따른 두 광파의 진폭 변화.

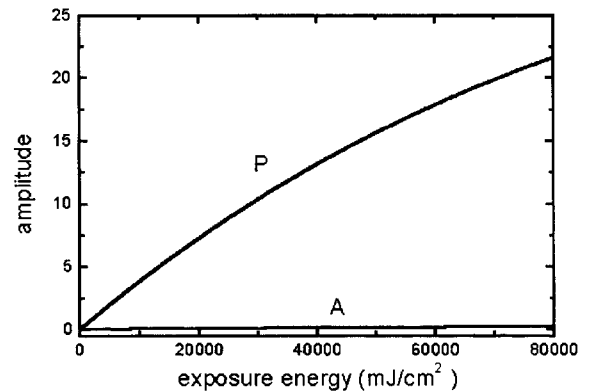


그림 8. 노출에너지에 대한 굴절률 격자 P와 흡수격자 A의 진폭.

강도차의 변화를 나타낸다. 그림 6(b)는 실험곡선으로 (a)는 입사강도가 7.06 mW/cm^2 일때이고, (b)는 2 mW/cm^2 일 때의 강도차의 변화를 나타낸다.

흡수격자(AG)로 부터 회절된 진폭은 위상이동이 없는 반면, 위상격자(PG)로부터 회절된 진폭은 위상이동($\phi_p = \pm 50^\circ$)이 있으며 위상이동의 부호는 Borrmann 효과에 의해 출력광파의 방향으로 부터 결정된다. 왼쪽에서 오른쪽으로 회절되면 그 값이 양수(positive)이고, 그 반대일 때에는 음수(negative)이다.

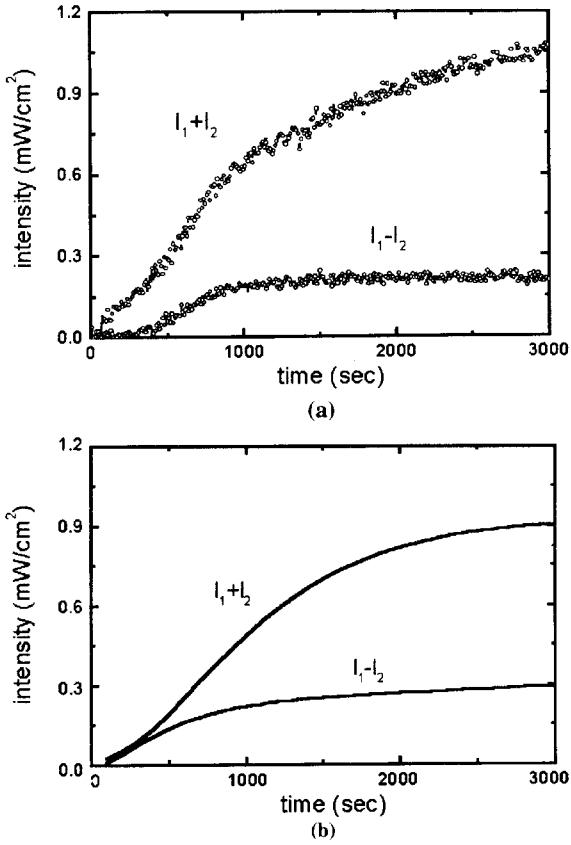


그림 9. 반사형 홀로그래프에서의 강도합(sum intensity)과 강도차(difference intensity) (a) 실험 곡선, (b) 이론곡선.

두 기록광과 사이의 에너지 교환은 강도격자(intensity grating)와 위상격자(index grating) 사이의 위상불일치에 의존한다. 식 (8)과 식 (9)로부터 최대 에너지 전달은 위상 이동이 격자주기(L)의 1/4과 같거나 $\phi_p = \pi/2$ 일 때 발생한다.

식 (6)의 이론식에서 입사빔의 강도가 같고 순수한 위상 격자($\Delta\alpha_1 = 0$)를 가정하면, I_1, I_2 는 다음과 같이 간단히 유도된다.

$$I_1 = \frac{I_0}{2} e^{\frac{\alpha_0 + \Delta\alpha_0}{\cos\theta}} (1 + \sin 2P \sin \phi_p) \quad (11a)$$

$$I_2 = \frac{I_0}{2} e^{\frac{\alpha_0 + \Delta\alpha_0}{\cos\theta}} (1 - \sin 2P \sin \phi_p) \quad (11b)$$

위의 식으로 부터, 굴절률 변조값이 클때는 자체회절(self-diffraction)이 진동하는 특성이 있지만, 굴절률 변조값이 작아서 $\sin 2P \approx 2P$ 일때는 자체회절(self-diffraction) 특성이 관측됨을 예측할 수 있다. 위의 식 11로부터 시간에 따른 두 광파 혼합특성은 그림 7(a)와 같다. 그림 7(a)는 흡수가 없고 굴절률 격자의 위상이동이 90°일 때, 최대 굴절률 변조값에 따른 자체회절 진동 특성을 나타낸다. 그림 7(b)는 굴절률 격자의 위상이동에 따른 두 광파의 진폭 변화를 나타낸다.

그림 8은 위의 두광파 혼합실험에서 얻어진 값들을 사용하

여 이론적으로 그린 노출에너지에 대한 굴절률 격자 P와 흡수격자 A의 진폭이다. 흡수격자의 진폭은 노출에너지에 대해 거의 변화하지 않고, 위상격자의 진폭은 노출에너지에 크게 의존된다. 노출에너지가 적을 때는 위상격자의 진폭이 흡수격자의 진폭과 비교될 정도이나, 에너지가 커질수록 위상격자의 진폭이 지배적이며 흡수격자의 진폭보다 20배 이상 크다.

반사형 홀로그래프의 경우, 실험 결과는 그림 9(a)와 같다. 이론식 (10)에서 예측하였듯이 진동하는 특성이 없음을 알 수 있다. 그림 9(b)는 식(10)의 이론 곡선이다. $n_{1,max} = 0.01, \alpha_{1,max} = 100 \text{ cm}^{-1}$ 이고 다른 물리량은 투과형의 경우와 동일하다.

IV. 결 론

Acrylamide를 홀몸체로 하는 포토폴리머를 제작하여 두 광파 혼합실험을 하였다. 다른 실험들과 달리 외부에서 전기장을 가하거나, 입사광파 중에서 한 광파의 위상을 변조시키거나, 비선형 매질을 격자 파 벡터의 방향으로 이동시키지 않고 자체회절 진동을 측정하였다. 이론적으로 위상격자와 흡수격자의 혼합된 격자와 두 광파의 에너지 결합 동안 형성되는 강도 간섭무늬에 대해 위상이동이 있는 경우의 결합파동 방정식으로 이러한 현상을 설명하였다. 강도격자에 대해 측정된 굴절률 격자의 위상이동 ϕ_p 는 $\pm 50^\circ$ 이었다. 그리고 노출에너지의 함수로써 위상격자의 진폭(P)와 흡수격자의 진폭(A)을 설명하였다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 과학기술정책관리연구소의 미래원천기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] P. Yeh, *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics*, (John Wiley & Sons, New York, 1993).
- [2] H. J. Eichler, P. Gunter and D. W. Pohl, in *Laser-Induced Dynamic Gratings*, Springer Series in Optical Sciences, vol. 50, Springer, Berlin, 1986, Chap. 4, pp. 110-114.
- [3] C. A. Walsh and W. E. Moerner, *J. Opt. Soc. Am.* **B8**, 1642 (1992).
- [4] A. A. Freschi and J. Frejlich, *J. Opt. Soc. Am.* **B11**, 1837 (1994).
- [5] K. Sutter and P. Gunter, *J. Opt. Soc. Am.* **B7**, 2274 (1990).
- [6] H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.* 48, 2909 (1969).
- [7] C. H. Kwak, S. Y. Park, H. K. Lee and E.-H. Lee, *Opt. Commun.* 79, 349 (1990).
- [8] L. Solymar and D. J. Cooke, *Volume Holography and volume Gratings*, (Academic Press, London, 1981).
- [9] G. Saxby, *Practical Holography* (University Press, Cambridge, 1994).

Grating phase measurement of photopolymer hologram by self-diffraction oscillations

Chon Su Kyong, Gee Young Sung, Chong Hoon Kwak and Ok Shik Choe
Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea

Yun Woo Lee and In Won Lee
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

Ho Hyung Suh and El-Hang Lee
Electronic and Telecommunication Research Institute, Taejon 305-350, Korea

(Received May 7, 1999, Revised manuscript received July 29, 1999)

Methylene blue-sensitized photopolymerizable material based on acrylamide is investigated with two-wave energy coupling experiments. Differently from other studies, self-diffraction oscillations are observed and the grating phase is determined without applying external electric fields, moving nonlinear materials, and phase shifting one of two writing beams. The phase grating showed a phase shift of $\pm 50^\circ$ with respect to the intensity grating. Modified Kogelnik's coupled wave equation considering the mixed gratings of phase and absorption gratings and nonzero spatial phase shifts of the gratings with respect to the intensity interference patterns formed during the two-wave energy coupling is discussed in detail to understand these phenomenon.