

홀로그래픽 고분자 분산 액정을 이용한 홀로그램 이중 초점 렌즈 제작

이정훈 · 성기영 · 이상조 · 김기현 · 조영걸 · 곽종훈[†]

영남대학교 물리학과

☎ 712-160 경북 경산시 대동 214-1번지

송재봉 · 이윤우

한국표준과학연구원

☎ 305-600 대전시 유성우체국 사서함 102호

(2002년 7월 2일 받음, 2003년 3월 7일 수정본 받음)

다기능성 아크릴레이트 단량체와 네마틱 액정 등을 혼합한 홀로그래픽 고분자 분산 액정 박막을 제작하고 액정의 농도와 외부에서 인가한 교류 전기장 등에 대한 실시간 회절효율을 측정하였다. HPDLC 박막에 기록된 홀로그램은 적절한 교류 전기장의 on/off에 의해 가역적으로 소거와 재생이 가능함을 보였다. 이러한 전기광학 특성을 이용하여 30 cm와 40 cm의 이중 초점을 갖는 홀로그램 렌즈를 제작하였다.

주제어 : polymer dispersed liquid crystal, switchable hologram, electro-optic effect, two beam coupling, bifocal holographic lenses.

I. 서 론

액정은 다양한 물리적, 광학적, 전기광학 특성 등으로 인하여 여러 분야에서 관심을 끌어 왔다. 특히 네마틱 액정은 외부 전기장의 세기에 따른 산란의 증감을 조절할 수 있어 디스플레이 소자로 응용된 이후로 높은 복굴절 특성, 외부 전기장에 의한 방향자 배열 등의 편광 현상을 이용한 디스플레이, 변조기 등의 다양한 응용이 연구되고 있다. 이와 같은 액정의 특성을 이용한 것 중의 하나가 폴리머 분산 액정(polymer-dispersed liquid crystal: PDLC)으로, PDLC는 포토폴리머와 액정을 혼합하여 굴절을 변조를 전기적 또는 광학적으로 임의로 조절할 수 있어서 전기광학·회절광학(electro optics-diffractive optics) 분야로의 응용이 기대되고 있다. PDLC에 외부에서 가간섭적인 두 광을 입사시키면 간섭무늬에 의해 고분자와 액정의 상 분리(phase separation)가 일어나고 그 결과, 고분자와 액정의 주기적인 배열을 만들어 홀로그램 격자를 형성한 것을 HPDLC(Holographic Polymer-Dispersed Liquid Crystal)라고 한다. 주기적인 고분자 사이에 위치한 액정은 외부에서 인가한 전기장에 의해 굴절률의 크기를 임의로 조절이 가능함으로서 전기적으로 홀로그램의 회절효율을 조절할 수 있는 홀로그램 소자를 구현할 수 있다. 이것의 원리는 주기적인 폴리머 matrix 사이에 놓여있는 액정방울들이 외부에서 전기장을 인가하지 않을 때에는 폴리머의 굴절률과 액정방울들의 굴절률에 차이가 있기 때문에 입사한 빛을 회절시키지만, 적절한 세기의 전기장을 인가시켜 주면 폴리머의 굴절률과 액정방울들의 굴절률이 서로 같게 되어 매질은 마치 투명한 상태처럼 되어 회절효율이 영이 된다. HPDLC는 회절효율이 높고, 현상과 정착

의 화학처리과정이 필요 없이 간편히 사용할 수 있는 포토폴리머의 장점과 온도, 편광, 전기장 등의 여러 물리적 변수들에 의존하는 액정의 성질을 이용하여 광반응 메커니즘 분석, 광 변조기, 디스플레이, HOE(holographic optical element) 등의 응용에 대한 연구가 활발하다.^[1-7]

본 논문에서는 CD/DVD와 같은 정보저장/기록 매체에 응용 가능한 이중 초점 렌즈(bifocal lenses)를 위에서 언급한 HPDLC의 원리를 이용하여 실험적으로 구현하여 보았다. 최근 CD/DVD는 상업용으로부터 가정용까지 광범위한 기록 매체로서 널리 이용되고 있는데 이 둘의 상호 호환을 위해 대물 렌즈에 직접 홀로그램을 형성하여 CD용과 DVD용의 두 초점을 만들어 양자를 재생하고 있다.^[8] 보다 높은 정보저장 밀도를 구현하기 위해서는 높은 NA(Numerical Aperture)의 대물 렌즈 사용, 재생/기록용 LD(laser diode)의 단파장화 등이 필요하나, 자기 디스크의 경우처럼 다층구조를 통해서도 대용량화를 이룰 수 있으므로 이러한 다층구조를 구현하기 위해서는 각각의 층에 대한 초점 가변 다 초점 렌즈가 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 먼저 액정과 폴리머의 혼합물인 PDLC 박막을 제작한 다음에 공간적으로 주기적인 레이저 광을 조사하여 액정과 폴리머를 상분리시켜 주기적인 홀로그램 격자를 형성한 후 AC 전기장의 세기에 따른 회절효율을 측정한다. 이어서 초점거리가 각각 30 cm와 40 cm인 두개의 구면파형 CGH(Computer Generated Hologram)를 제작하고 HPDLC 박막에 접촉 복사(contact print) 방식으로 이중 초점 홀로그램 렌즈를 제작하고 성능을 분석한다. 이것은 AC전기장의 ON/OFF에 따라 재생된 두개의 홀로그램 렌즈의 초점거리가 각각 ON/OFF가 가능함을 실험적으로 보인 것이며, 이는 다른 홀로그램 광학매질에서는 구현할 수 없는 HPDLC만의 독특한 특성으로 홀로그램 스윙칭 분야 등의 응용성을 제시하고 있다.

[†]E-mail: chkwak@yumail.ac.kr

II. 실험 결과 및 논의

2.1. HPDLC 박막의 제작과 액정의 농도에 따른 홀로그래프 회절효율

실험에 사용한 HPDLC의 구성으로는, 단량체(monomer)로 dipentaerythrol hydroxy penta acrylate(DPHPA), 교차결합 단량체(cross-linking monomer)로 N-vinylpyrrolidone(NVP), 개시제(initiator)로 N-phenylglycine(NPG), 색소로는 Rose Bengal(RB)을 사용하여 전폴리머(prepolymer)를 제작하였으며, 여기에 복굴절률이 큰 액정인 E7(Merck BL001)을 혼합하여 전폴리머 시럽(prepolymer syrup)을 준비하였다. 제작 순서는 먼저 DPHPA와 NVP를 섞는데, DPHPA는 점도가 높은 액체 상태이며 NVP가 DPHPA를 녹이면서 점도가 낮아진다. 혼합 비율은 DPHPA:NVP를 5:1로 하였다. 이 혼합 용액에 RB 0.3 wt%와 NPG 2 wt%를 섞은 다음 교반기(stirrer) 위에서 약 24시간동안 잘 저어준 후 액정E7을 혼합하였다. 실험에 사용한 HPDLC 박막에서 액정 E7의 복굴절율은 598 nm 파장에서 $\Delta n = n_e - n_o = 0.2246(n_e = 1.762, n_o = 1.5216)$ 으로 매우 크기 때문에 전기장에 의한 홀로그래프 회절효율의 동적 특성이 매우 크다는 것을 예측할 수 있다. 준비된 샘플은 투명전극(ITO: indium-tin oxide)이 코팅된 유리판 사이에 모세관 현상을 이용하여 균일하게 분포시킨다. 원하는 매질의 두께를 조절하기 위하여 ITO 사이에 공간자(spacer, bead)를 사용하였으며 제작된 샘플의 두께는 20 μm 이다. 그림 1은 UV-Visible spectrophotometer를 사용하여 측정된 HPDLC 박막의 흡수도를 보여주고 있다. 500 nm에서 530 nm의 파장 영역에서 높은 흡수도를 보여 주고 있다. 550 nm 이상의 긴 파장 영역에서는 HPDLC와 양쪽의 기판으로 사용한 투명전극 기판과의 다중 간섭에 의한 흡수도의 주기적인 변화를 보여 주고 있다.

본 실험에서 사용한 색소(RB)는 514 nm 부근에서 가장 흡수가 크기 때문에 홀로그래프의 기록빔(writing beam)으로 녹색의 514 nm 파장을 사용하면 가간섭적인 두 레이저 빔에 의해 회절격자가 형성된다. 빛을 흡수한 색소는 결과적으로 singlet 상태를 거쳐 빠르게 triplet 상태로 천이하게 된다. RB triplet 상태는 전자전이반응(electron-transfer reaction)을 하고, NPG는 electron donor로서의 역할을 하게 되어 NPG 라디칼(radical)을 형성하게 된다. 즉, 자유 라디칼 폴리머화가 NPG 라디칼에 의해 초기화 되고 이때 NVP는 폴리머 chain의 교차결합을 촉진 시킨다. 이와 같은 메카니즘에 의해 밝은 간섭무늬 영역에서는 폴리머가 지배적인 영역이 형성되고 어두운 무늬 영역에서는 액정이 지배적인 영역이 형성되어 폴리머와 액정의 주기적인 패턴이 발생하게 된다. HPDLC를 제작할 경우 액정의 농도, 빛의 세기 등에 따라 중합 속도와 액정방울의 크기를 결정할 수 있다.^[2] 액정의 농도가 높아지면 상대적으로 고분자의 농도가 낮아져 중합 속도가 느려지게 되기 때문에 액정방울의 크기는 커지게 된다. 액정방울의 크기와 형태는 회절효율에 큰 영향을 끼치기 때문에 적절한 액정의 농도는 매우 중요하다.

그림 1에서 알 수 있듯이 HPDLC는 514 nm 파장 영역에서 가장 흡수가 크고, 633 nm 영역에서는 거의 흡수를 하지

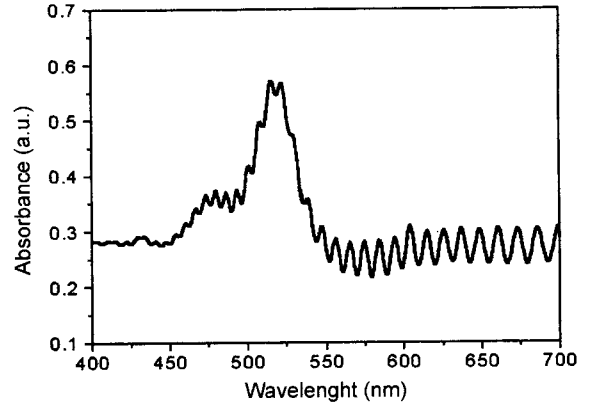


그림 1. 제작한 HPDLC 박막의 흡수도.

않기 때문에 격자 형성에 영향을 끼치지 않는다. 따라서 홀로그래프의 기록 빔으로는 각각 s-편광된 514 nm 파장의 Ar-ion 레이저를 사용하고 동시에 홀로그래프의 재생 빔으로는 p-파로 편광된 633 nm인 He-Ne 레이저를 사용하여 실시간으로 HPDLC 박막의 회절효율을 측정하였다. 박막에 입사하는 Ar-ion 레이저 광의 두 빔의 입사 각도는 40°로 하였으며 두 빔의 강도는 각각 10 mW/cm²이다. 회절 빔의 강도를 포토다이오드로 측정하여 이를 A/D 변환기로 신호를 변환하여 컴퓨터에 저장하였다. 그림 2는 액정의 농도에 따라 HPDLC 홀로그래프의 실시간 회절효율을 측정된 그래프이다. 액정이 약 30 wt% 일 때 최대 70% 정도의 회절효율을 얻었으며, 30 wt% 보다 약간 크거나(그림 2(c): 35.54 wt%), 약간 작을 때(그림 2(d): 27 wt%)는 회절효율이 감소하는 경향을 보이고 있으므로 30 wt% 근방이 가장 적절한 액정의 농도임을 알 수 있다. 대체적으로 HPDLC 홀로그래프의 회절효율은 25초 정도까지는 급격히 성장하고 25초 이후부터는 포화되어 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 액정 방울의 크기와 형태는 회절효율에 큰 영향을 끼치기 때문에 적절한 액정의 농도는 매우 중요하다. LC의 농도가 폴리머의 농도에 비해 작을 때에는 액정이 지배적인 영역에 순수한 액정만 존재하는 것이 아니라 폴리머에 액

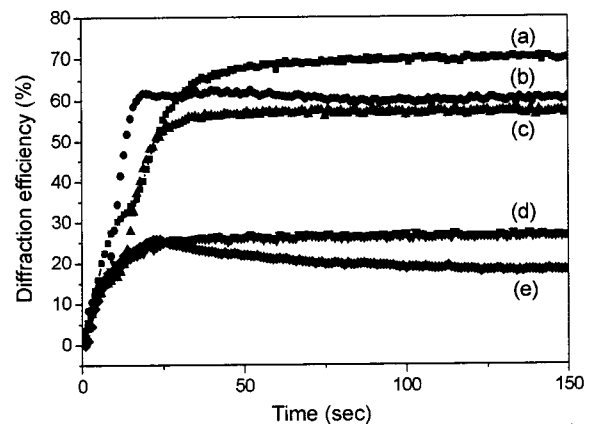


그림 2. 액정의 농도에 따른 HPDLC 박막의 실시간 회절효율. (a) LC 30 wt%, (b) LC 40 wt%, (c) LC 35.54 wt%, (d) LC 27 wt%, (e) LC 20 wt%.

정이 원형 또는 타원의 형태로 간혀진 액정방울이 형성된다. 만약 액정의 농도가 폴리머의 농도에 비해 매우 클 경우에는 거의 액정만 어두운 간섭무늬 영역에 존재하게 된다.

2.2. HPDLC 홀로그램의 전기광학 특성

그림 2에서는 외부의 전기장을 인가하지 않은 상태에서 액정의 농도에 따른 회절효율을 측정하였다. 이제 회절효율이 정상상태에 도달한 다음 외부에서 정현파의 전기장을 HPDLC 박막에 on/off 하였을 때의 전형적인 회절효율의 변화를 그림 3에 나타내었다. 실험에는, $V_{p-p} = 180$ V, 주파수가 3 KHz인 정현파를 사용하였다. HPDLC 홀로그램에 전기장을 가하면 기록된 홀로그램의 회절효율이 급격히 지워지며, 외부 전기장을 끄면 다시 홀로그램이 재생되는 것을 확인할 수 있었다. 이 과정은 수 십 번의 반복적인 전기장의 on/off에도 같은 결과를 보여 주었다.

그림 4는 HPDLC 홀로그램의 전기장의 세기에 따른 회절효율 특성을 나타내고 있다. 사용한 액정의 농도는 63.7 wt%, 전

기장의 세기는 $0 \sim 21$ V/ μm 이며 주파수는 500 Hz의 교류 전압을 사용하였다. 액정 밀도에 따른 회절효율 실험에서 액정의 농도가 30 wt%일 때 가장 적절한 용량이었으나, 전기장에 따른 회절효율 실험에서는 액정의 농도가 적을수록 외부에서 가해 주어야 하는 문턱 전기장(threshold electric field)의 세기가 커지고 전기광학 효과도 작아지므로 본 실험에서는 63.7 wt%의 액정농도를 사용하였다. 전기장을 인가하지 않았을 때에는 고분자와 액정의 상분리 현상과 큰 굴절률 변조 값으로 인해 높은 회절효율을 얻을 수 있으나 전기장의 세기가 증가하게 되면 액정 방향자(LC director)가 전기장의 방향으로 배열되면서 회절효율이 감소한다. 즉, Ar-ion 레이저를 이용하여 s-편광으로 홀로그램을 기록하면서 전기장을 가하면 액정은 전기장의 세기가 클수록 큰 토크(torque)를 받아서 전기장의 방향으로 배열하려고 하며, 이때 p-편광된 He-Ne 레이저를 이용하여 회절효율을 측정하게 되면 Bragg각으로 입사하는 홀로그램 재생 빔은 액정의 이상 굴절률($n_{LC,e}$)과 정상 굴절률($n_{LC,o}$)의 유효 굴절률을 보게 된다. 이 경우 액정의 유효 굴절률은

$$n_{LC,eff} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_c^2 \cos^2[\theta(E) - \theta_B] + n_o^2 \cos^2[\theta(E) - \theta_B]}} \quad (1)$$

와 같이 표현된다.^[9] 여기서 θ_B 는 재생 빔의 Bragg 입사각이며, $\theta(E)$ 는 전기장 E 와 액정의 광축과의 사이 각이며 전기장의 함수로서

$$\theta(E) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sin 2\theta_o}{\sin 2\theta_o + E/E_c} \right) \quad (2)$$

와 같이 주어지며, θ_o 는 외부 전기장이 존재하지 않을 때 액정 방울 내에 있는 액정 방향자의 방향각을 나타내고, E_c 는 임계 전기장을 나타낸다. 따라서 폴리머와 액정의 상분리에 의해 형성된 홀로그램의 굴절률 변조는 액정의 유효 굴절률과 폴리머의 굴절률 차, 즉 $\Delta n = n_{LC,eff} - n_{polymer}$ 로 주어지며, Bragg 회절조건을 만족하는 경우, 흡수가 없는 투과형 홀로그램의 회절효율은

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta_B} \right) \quad (3)$$

와 같이 주어진다.^[10] 여기서 d 는 HPDLC 박막의 두께이며 λ 는 재생 빔의 파장이다. 그림 4의 실선은 (1)~(3)식으로부터 주어지는 이론 곡선으로, $\theta^0 = 82^\circ$, $E_c = 13$ V/ μm , $n_e = 1.7462$, $n_o = 1.5216$, $\theta_B = 20^\circ$ 의 값들을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션 하였으며 이론 곡선과 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 전기장을 인가하지 않은 경우에는 폴리머의 굴절률과 액정의 유효 굴절률과의 차이에 의해 높은 회절효율을 나타내지만, 전기장의 세기를 점차로 크게 인가하여 액정의 분자 방향이 재생 빔의 Bragg 각과 일치하게 되면(즉, $\theta(E) = \theta_B$) 재생 빔은 액정의 정상 굴절률($n_{LC,o}$)만을 읽게 된다. 폴리머의 굴절률을 액정의 정상 굴절률과 같은 폴리머를 사용하게 되면, 홀로그램의 회절효율은 영이 된다. 본 실험에서 제작한 HPDLC 홀로그램의 경우, 그림 4에서 보는 것처럼, 전기장의 세기가 약 18 V/ μm 이상에서 회절효율이 거의 영이 되는

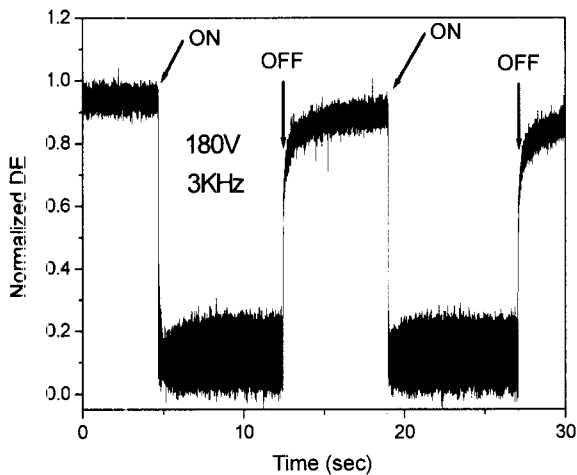


그림 3. AC 전기장의 on-off에 따른 HPDLC 홀로그램의 소거 및 재생 특성.

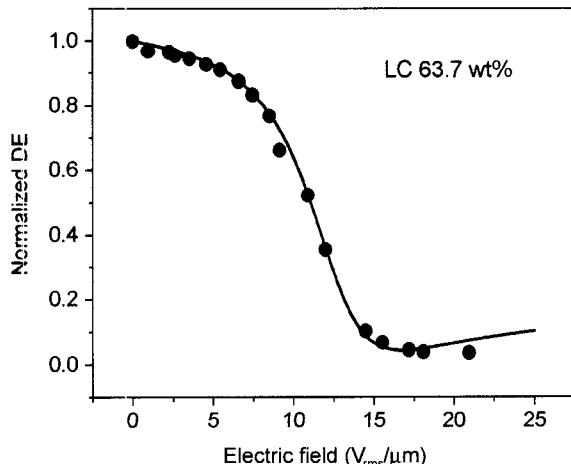


그림 4. 외부전기장의 세기에 따른 HPDLC 홀로그램의 회절효율 특성(점: 실험, 실선: 이론).

것을 확인할 수 있었다. 그러나 이보다 더 큰 전기장이 인가 되어 액정의 광축이 두 ITO 셀에 수직하게 배열되면 굴절을 변조값은 다시 커져 회절 효율은 증가하게 된다.

2.3. 홀로그램 이중 초점 렌즈의 설계

본 절에서는 Computer Generated Hologram(CGH)를 이용하여 홀로그램 렌즈를 설계한다. CGH는 진폭과 위상 분포를 가지는 물체파와(평면파인) 기준파와의 간섭무늬를 컴퓨터로 계산하여 만들어지는 홀로그램으로, 실험적으로 구현하기 어려운 어떠한 파형도 수식으로 표현한 후 재생 가능하고, 기존의 방법으로 만들 수 없는 광학소자를 만들 수 있다는 점과 광학계의 수차에 영향을 받지 않으며, 임의의 복잡한 파면도 재생이 용이하다는 장점을 가지고 있다.^[11,12] CGH를 설계한다는 것은 얻고자 하는 파면과 이를 재생하기 위하여 사용되는 파면이 정의될 때 이 두 파면의 CGH면에서의 위상 차이인 CGH 함수를 구하는 것을 의미한다. 위상만이 변하는 파면과 반송 진동수(carrier frequency)가 인 비축 기준파(off-axis reference beam)가 만드는 홀로그램의 진폭 투과율(amplitude transmittance)은

$$t(x, y) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi\alpha x - \phi(x, y))] \tag{4}$$

와 같이 주어진다.^[13] 여기서, $\alpha = \sin\theta/\lambda$, λ 는 사용 광원의 파장, θ 는 입사각도이다. $t(x, y)$ 는 $2\pi\alpha x - \phi(x, y) = 2n\pi$ (n : 정수)를 만족하는 위치에서 최대와 최소 값을 갖는 fringe를 만든다. 이를 만족하는 값을 (x, y) 평면에 나타내면 최대치가 선으로 나타나게 되나, 이 선이라고 하는 것은 두께가 없는 것으로 이 fringe를 이진 부호화하기 위해 fringe의 폭을 조절할 수 있는 bias 함수를 가해야 한다.

본 실험에서는 축 상(on-axis)의 구면파를 발생하는 CGH를 제작하기 위해 $\alpha = 0$ 으로 두고 구면파의 위상 함수를 구하였다. 구면 파면을 발생시키는 홀로그램 면의 중심에서 초점거리를 F 라고 하고, 홀로그램 면의 임의의 점 (x, y) 에서 초점까지의 거리를 r 이라고 하면,

$$r = \sqrt{F^2 + (x^2 + y^2)} \cong F + \frac{x^2 + y^2}{2F} \tag{5}$$

이 된다. 여기서 $F^2 \gg x^2 + y^2$ 의 근사를 사용하였다. 따라서 홀로그램 면의 한 점 (x, y) 로부터 구면파면을 발생시키기 위한 위상 변환함수 $\phi(x, y)$ 는

$$\phi = \frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda F} \tag{6}$$

와 같이 주어진다. 위의 위상함수를 Mathematica로 프로그래밍하여 구하였다. 원하는 초점거리 F 의 값을 대입하여 나타내고 나머지 연산을 수행한 후 fringe를 이진 부호화 하기 위해 fringe의 폭을 조절할 수 있는 상수의 bias 값을 취한 후 이 값보다 크면 1, 아니면 0을 취한다. 상수 bias 값에 따라 fringe의 폭을 조절할 수 있으며 흑, 백의 폭 비율에 따라 회절효율은 달라지게 된다. 각 좌표는 1과 0으로 나타내게 되며, 1은 검정색으로 0을 흰색으로 나타내면 구면 파면 발생을 위한 CGH를

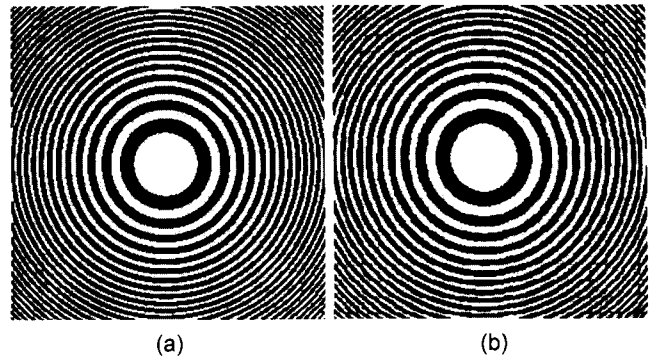


그림 5. 구면파 발생을 위한 CGH 패턴. 초점거리: (a) 30 cm, (b) 40 cm.

얻을 수 있다. Mathematica에서 지원하는 raster 함수를 취하여 간섭무늬를 표현할수록 섬세한 간섭무늬를 표현할 수 있다. 그림 5(a)와 (b)는 A4용지에 프린트한 초점거리가 각각 30 cm와 40 cm인 구면파 형태의 CGH를 나타내고 있다. 이 간섭무늬 패턴을 마이크로 필름(Fuji Film, HR-20)에 10×10 mm² 정도의 크기로 축소하여 초점거리가 각각 30 cm와 40 cm인 진폭형 홀로그램 렌즈를 제작하였다.

2.4. 홀로그램 이중 초점 렌즈의 제작

본 실험에서는 HPDLC를 이용하여 전기적 스위칭으로 초점거리(focal length)를 가변할 수 있는 이중 초점 렌즈를 제작한다. 이 원리는, 2-2절에서 언급한 바와 같이, 홀로그램이 형성된 후 폴리머의 굴절률은 더 이상 외부의 환경 변화에 영향을 받지 않으나, 액정이 지배적인 영역은 외부 전기장에 의해 액정 분자의 방향을 쉽게 조절할 수 있으므로 적절한 세기의 전기장의 on-off에 의해 회절효율의 조절(on/off)이 가능하다는 사실을 이용한 것이다. 마이크로 필름으로 만든 진폭형 CGH는 회절효율이 매우 낮으므로 회절효율이 높은 위상형 홀로그램으로 만들어야 한다. 이를 위해 접촉 복사 방식으로 HPDLC 박막에 기록하여 위상형 CGH로 변환하였다. 광원은 514 nm의 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 시준기(collimator)로 평행 광을 만든 다음 노광하였으며 광의 세기는 약 10 mW/cm²이며 노출 시간은 30초로 하였다.

이렇게 해서 제작된 두 개의 HPDLC 홀로그램 렌즈에 각각 전원을 연결하여 초점 가변형 이중 렌즈를 제작하였다. 그림 6은 전기장의 on/off에 따른 초점 위치의 스위칭과 초점 크기 등을 조사하기 위한 실험 장치도이다. 홀로그램 렌즈는 HPDLC 박막의 전기장 특성에 의해 전기장을 인가하지 않으면 홀로

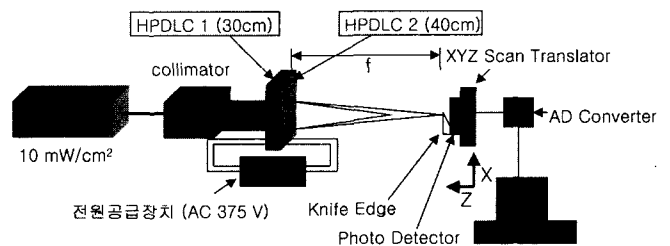
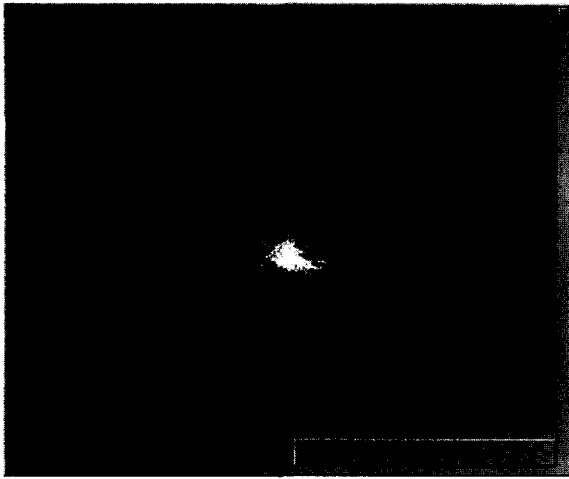
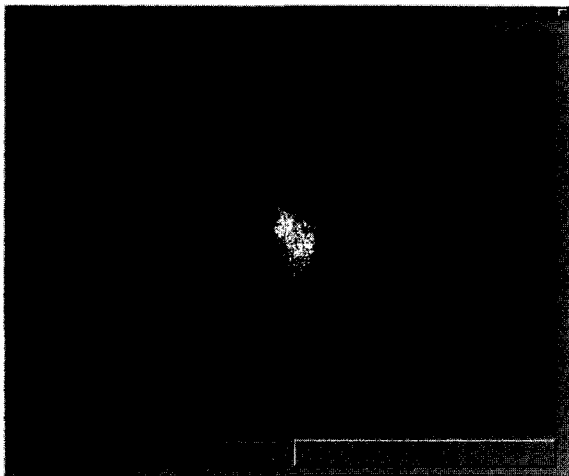


그림 6. 홀로그램 이중 초점 렌즈의 성능 측정을 위한 실험 장치도.



(a) 30cm



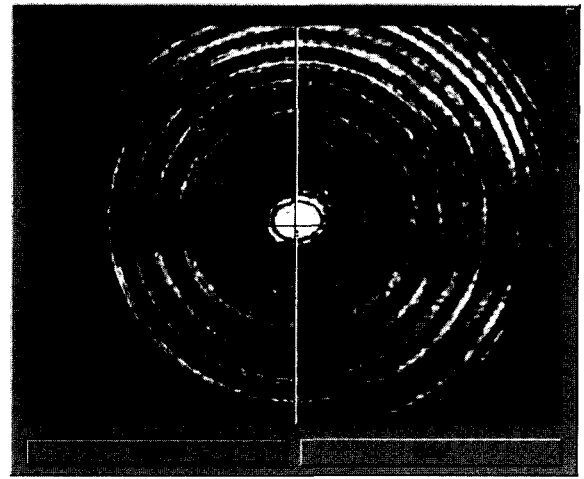
(b) 40cm

그림 7. 각 초점에서 촬영한 홀로그래프 렌즈의 영상. 초점거리 (a) 30 cm, (b) 40 cm.

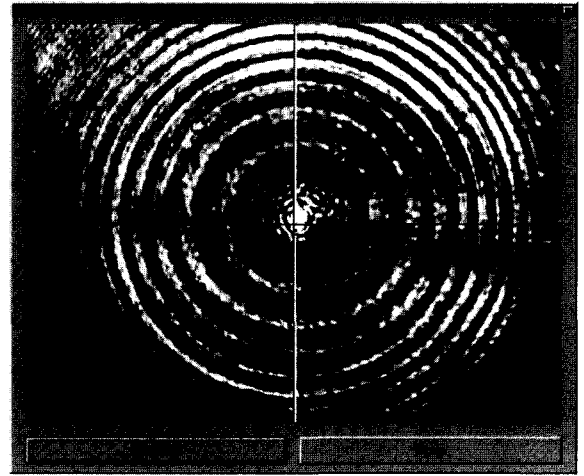
렌즈 역할을 하여 입사 광선을 회절 시키지만 적절한 크기의 전기장을 인가하면 액정의 유효 굴절률이 폴리머의 굴절률과 같아져서 굴절을 변조가 없으므로 홀로그래프 회절 소자로서의 역할을 하지 못해 입사 빔은 그대로 통과하게 된다.

그림 7(a)는 HPDLC 1(초점거리 30 cm)은 전기장을 인가하지 않고 HPDLC 2(초점거리 40 cm)에는 약 375V의 AC 전기장을 인가하여 초점거리가 30 cm인 점에 맞힌 영상을 CCD 카메라로 찍은 것이며, 그림 7(b)는 그림 7(a)와 반대로 전기장을 인가하여 얻은 초점거리 40 cm에서의 영상을 나타내고 있다. 그림 7(a)와 (b)는 CCD 카메라 앞에 반투명의 얇은 종이를 두어 초점 부분만을 명확히 관측하여 촬영하였다.

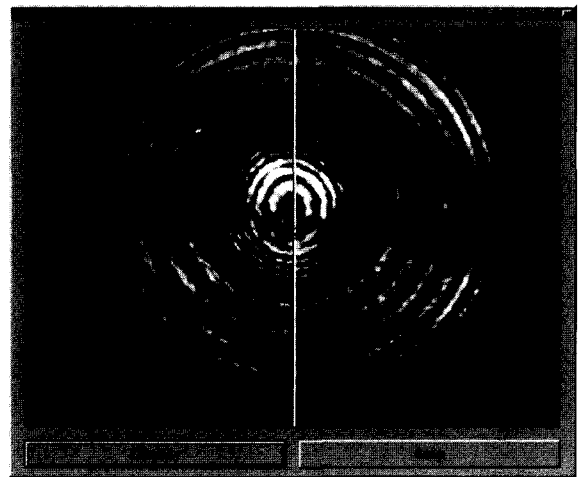
그림 8은 초점거리 30 cm인 CGH로 제작한 HPDLC 홀로그래프 렌즈에 평행광을 입사시킨 후 거리에 따라 CCD 카메라로 찍은 영상이다. 이때 CCD 영상은 CCD 카메라에 부착된 렌즈를 제거하고 그 앞쪽에 ND 필터(Neutral Density Filter)를 두어 빔의 강도를 줄여서 얻은 것이다. 초점거리 30 cm에 근접할수록 spot의 크기가 작아져서 30 cm에서 가장 작은 spot size를 얻었으며, 이는 초점거리가 정확히 30 cm임을 보여주고



(a) 25cm



(b) 30cm



(c) 35cm

그림 8. 초점거리가 30 cm인 홀로그래프 렌즈의 초점 근처에서의 영상.

있다. 초점거리 40 cm의 HPDLC 홀로그래프 렌즈에서도 같은 결과를 보였다.

제작한 홀로그래프 렌즈의 성능을 분석하기 위하여 초점에서의 빔 패턴을 관측하였다. 그림 6의 실험장치도와 같은 면도

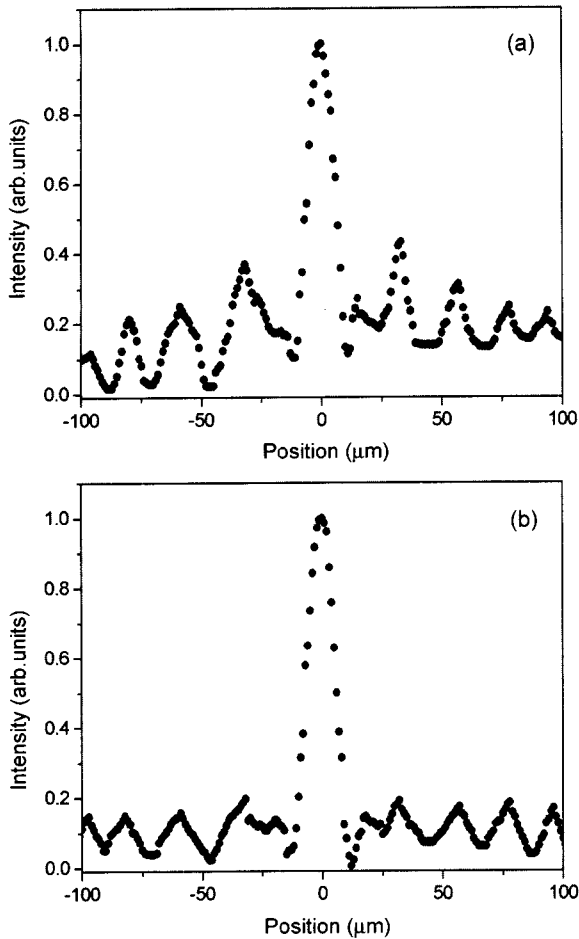


그림 9. 면도날 주사 방법으로 측정된 초점에서의 빔 세기 분포. 초점거리: (a) 30 cm, (b) 40 cm.

날 주사(knife edge scan) 방법을 사용하였다.^[14] 광 검출기를 XYZ 스테이지에 부착시킨 뒤, linear motor로 스테이지를 Z 축 방향으로 움직여, 가장 높은 강도 분포를 가지는 지점, 즉 초점의 위치를 찾은 다음, 부착된 면도날을 초점의 횡단면인 X축 방향으로 scan하면서 강도 분포를 측정하였다. 그림 9는 이렇게 얻은 강도 분포를 X축에 대해 미분한 값으로서 초점에서의 횡단면의 강도 분포를 나타낸다. 실험으로부터 초점에서의 반치 폭(FWHM)은 약 20 μm 정도였다.

III. 결 론

전기-광학적으로 비선형 광학 특성을 조절할 수 있는 홀로그램 기록 매질인 홀로그래픽 고분자 분산형 액정(Holographic Polymer-Dispersed Liquid Crystal: HPDLC) 박막을 제작하여 액정의 농도에 따른 실시간 홀로그램 회절효율 특성을 조사하였으며 액정의 농도가 30 wt%일 때 최대 70%의 회절효율을 얻었다. HPDLC 박막에 정현파의 AC 전기장을 가하면 기록된 홀로그램의 회절효율이 급격히 지워지는 것을 확인할 수 있었으며 외부 전기장을 끄면 다시 홀로그램이 재생되었으며, 이 과정은 수 십 번의 반복적인 전기장의 on/off에도 같은 결

과를 보여 주었다. 전기장의 세기에 따른 회절효율의 변화를 측정하여 약 18 $V_{rms}/\mu m$ 정도의 전기장의 on/off에 의해 홀로그램을 완전히 소거/재생이 가능함을 알았다. 이 원리를 이용하여 이중 초점을 가지는 CGH를 설계 제작하여 접촉 복사 방식으로 HPDLC 박막에 홀로그램 렌즈를 기록한 다음 외부 전기장으로 초점을 가변 할 수 있음을 실험적으로 보였다. 제작된 HPDLC 홀로그램 렌즈의 초점 크기는 약 20 μm 정도였다.

실제적으로 사용되고 있는 CD/DVD의 초점크기인 수 μm 또는 그 이하의 수준에 도달하기 위해서는 높은 NA(Numerical Aperture)를 갖는 재래식 렌즈와 단파장의 재생 레이저 등을 결합하여 광학계를 구성한다면 보다 유용할 것이라 생각되며 추후 이에 대한 연구도 기대된다. 또한 HPDLC 박막은 전기-광학적으로 능동형 매질로서 전기장에 의해 투과율과 굴절률 변조 값 등을 조절할 수 있으므로 다양한 전기광학 소자로서의 응용도 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 2001년도 목적기초연구(지역대학 우수과학자 육성사업: R05-2001-000-00103-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] R. L. Sutherland, V. P. Tondiglia, and L. V. Natarajan, "Electrically switchable volume gratings in polymer-dispersed liquid crystals," *Appl. Phys. Lett.* vol. 64, pp. 1074 1994.
- [2] Bunning, T. J. "Morphology of Anisotropic Polymer-Dispersed Liquid Crystals and the Effect of Monomer Functionality," *Journal of polymer science. Part B, Polymer physics*, vol. 35, pp. 2825, 1997.
- [3] P. Mormile, L. Petti, M. Abbate, P. Musto, G. Ragosta, and P. Villano, "Temperature switch and thermally induced optical bistability in a PDLC," *Opt. Commun.* vol. 147, pp. 269, 1998.
- [4] Andy Y.-G. Fuh, T.-C. Ko, M.-S. Ysai, C.-Y. Huang, and L.-C. Chien, "Dynamical studies of gratings formed in polymer-dispersed liquid crystal films," *J. Appl. Phys.* vol. 83, no. 2, pp. 679, 1998.
- [5] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.* vol. 32, pp. 647, 1978.
- [6] C. C. Bowley, G. P. Crawford, and H. Yuan, "Reflection from dual-domains in a holographically-formed polymer-dispersed liquid crystal material," *Appl. Phys. Lett.* vol. 74, pp. 3096, 1999.
- [7] A. Riede, "Structure of polymer networks in liquid crystals," *Liquid Crystals*, vol. 22, pp. 157, 1997.
- [8] 남상엽, DVD와 CD/R/CD-RW 기술(우신출판사, 서울, 1999).

- [9] P. Simoni, *Nonlinear Optical Properties of Liquid Crystals and Polymer Dispersed Liquid Crystals* (World Scientific, Singapore, 1997).
- [10] H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. Journal*. vol. 48, pp. 2909, 1969.
- [11] B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Complex spatial filtering with binary masks," *Appl. Opt.* vol. 5, pp. 967, 1966.
- [12] A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.* vol. 6, pp. 1739, 1967.
- [13] J. J. Burch, "A Computer Algorithm for the Synthesis of Spatial Frequency Filters," *Proc. IEEE*. vol. 55, pp. 599, 1967.
- [14] 조현모, 이윤우, 이인원, 이상태, 이종용, "칼날 주사방법에 의한 일차원 CCD의 MTF 측정," *한국광학회지*, vol. 6, pp. 173, 1995.

Fabrication of bifocal holographic lenses by holographic polymer dispersed liquid crystal film

Jung Hoon Lee, Gee Young Sung, Sang Jo Lee, Ki Hyun Kim,
Young Gul Joh and Chong Hoon Kwak[†]

Department of Physics, Yeungnam University Kyung San, 709-711, KOREA

[†]*E-mail: chkwak@ynucc.yeungnam.ac.kr*

Jae Bong Song and Yun Woo Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, KOREA

(Received July 2, 2002, Revised manuscript March 7, 2003)

We have fabricated a holographic polymer-dispersed liquid crystal (HPDLC) thin film, which is composed of multifunctional acrylate monomer blended with the nematic liquid crystal mixture, and then investigated the real-time diffraction efficiencies for various amounts of liquid crystals and applied AC electric fields. It is experimentally shown that the holographic gratings recorded in the HPDLC film can be reversibly erased and reconstructed by switching on and off an appropriate applied AC electric field. By use of these electro-optic properties we have developed bifocal holographic lenses having two different focal lengths of 30cm and 40 cm.

OCIS Codes : 190.4710, 210.2860, 220.3630, 230.1950, 230.3720.