

## Dichromated Gelatin 박막을 이용한 홀로그래픽 Zone Plate 제작 및 해석\*

임용석 · 이영락 · 박종훈 · 최옥식

영남대학교 물리학과

(1996년 4월 16일 받음)

Agfa 8E75HD 사진건판에서 얻은 dichromated gelatin(DCG) 박막에 구면파와 평면파를 간섭시켜 holographic zone plate (HZP)를 만들었다. DCG 박막의 비선형적인 광학 특성들을 고려하여 HZP의 이론식을 유도하였다. 이 이론식에 의한 HZP의 초점거리는 거리는  $f, f/2, f/3, f/4, \dots$  였으며, 실험적으로도 평면파를 입사하여 6개 까지의 해당 초점들을 관측하였다. 칼날 주사 방법으로 측정한 첫 번째 재생 초점 근처에서의 빔의 모양은 Gaussian 분포를 가짐을 확인하였다.

### I. 서 론

홀로그래피의 응용 분야 중에 하나인 홀로그래픽 광학소자(holographic optical elements, HOE)는 빛의 굴절률을 이용하는 재래식 광학소자와는 달리 빛의 회절 현상을 이용하는 소자이다. 홀로그래픽 광학소자는 재래식 광학소자에 비해 가격이 저렴하고, 제작이 간단하며, 제품의 소형화, 경량화, 대량생산 등의 경제적 잇점과 여러 종류의 HOE를 동일한 기록매질에 기록할 수 있다는 장점들을 가지고 있다. HOE의 실제적 응용에서는 설계 및 분석 기술, 적당한 기록 매질 선택, 제작 공정 기술들이 고려되어야 한다. 특히 기록 매질로서는 dichromated gelatin(DCG)이 HOE에 가장 우수한 매질 가운데 하나로 알려져 있다.<sup>[1,2]</sup> DCG 박막은 HOE 제작에 있어서 많은 유용한 특성들을 가지고 있다. 그 중에서 낮은 산란광량, 큰 굴절률 변조 능력, 그리고 높은 분해능 특성들을 갖고 있는 위상형 감광 재료이다.

홀로그래픽 광학소자들 중에 가장 기본 소자가 holographic zone plate(HZP, 또는 홀로그램 렌즈라고도 함)이다. HZP는 바코드 스캐너의 회전다면경(또는 회전 프리즘)의 대응 광학소자로 사용되며,<sup>[3,5]</sup> 레이저 프린터, optical data processors, head-up display systems, night vision systems 등에 중요한 광학소자로 응용되고 있으며<sup>[6,7]</sup> HZP의 far-field는 복잡한 렌즈광학계의 정렬 소자로 사용할 수 있다.<sup>[8]</sup> 본 연구에서는 위상형 매질인 DCG 박막의 굴절률 변조와 비선형적인 효과에 대해 알아보고, 이 매질을 사용하여 holographic zone plate를 제작하였다. 기록매질의 비선형성(nonlinearity)을 고려한 기록매질의 투과함수와 Fourier-Bessel 변환식<sup>[9,10]</sup>을 이용하여 DCG-HZP에 대한 새로운 해석식을 유도하고 이 이론식으로 HZP의 특성들을 해석하였으며, 실험적으로 검증하였다. 특히 이 이론으로부터 초점 근방에서 광축상에 도넛 모양의 링패턴(ring pattern)이 존재함을 증명하였으며 또 실험적으로도 관측하였다. 이러한 현상은 높은 정밀도를 갖는 광학 정렬 시스템

에 응용 가능성을 시사하고 있다.<sup>[8]</sup> 또한 knife-edge scan 방법으로 초점에서의 상(image)의 강도 분포를 측정하였다.

### II. 이 론

HZP는 DCG 박막과 같은 기록매질에 평면파와 구면파를 간섭시켜서 만든다. 두 광파의 파면이 같은 위상일 때는 서로 보강 간섭하여 강도는 최대가 되지만, 위상이  $180^\circ (\lambda/2)$  어긋나서 두 광파의 산과 골이 겹칠 경우는 서로 상쇄되어서 영(zero)이 된다. 이러한 간섭의 패턴이 박막 위에 만들어지는데, 이를 interferometric zone plate 또는 holographic zone plate(HZP)라고 한다.

그림 1에서 구면파의 점광원에서 홀로그램 기록 매질까지의 거리를  $f$ 라고 하면,  $N$ 번째 윤대판의 반경  $r_N$ 은  $f^2 + r_N^2 = (f + N\lambda)^2$ 으로 부터

$$r_N = \sqrt{2N\lambda f + N^2\lambda^2} \approx \sqrt{2N\lambda f}, \quad f \gg N\lambda \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서  $\lambda$ 는 기록 광파의 파장이다. Zone plate의 초점거리  $f$ 는 식 (1)로 부터

$$f \approx \frac{r_N^2}{2N\lambda} \quad (2)$$

가 된다. 식 (2)로 부터 zone plate의 초점거리는 파장의 함수이므로 zone plate 역시 기존의 렌즈와 같이 색수차를 가짐을 알 수 있다. 이제 zone plate의 광학적인 분해능을 알아보기 위해 원형 개구(circular aperture)에 대한 Rayleigh's criterion  $\theta_{\min} \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$  ( $\theta_{\min}$ : 최소의 분해각,  $D$ : 개구의 직경)을 적용하면,<sup>[11]</sup> 초점에서의 최소 선분해(minimum linear resolution) 거리는  $d_{\min} = f\theta_{\min}$ 이므로 식 (2)로 부터

$$d_{\min} \approx 0.61 \frac{r_N^2}{ND} \quad (3)$$

을 얻는다.  $N$ 번째 윤대판의 직경은  $D_N = 2r_N$ 이므로 식 (1)과 (3)을 사용하면

\*본 연구는 1995년도 영남대학교 자유 공모 과제로 수행하였습  
니다.

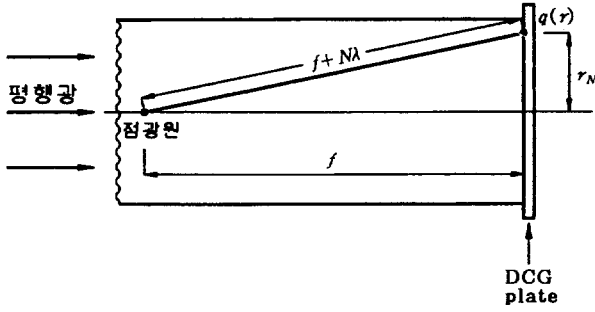


그림 1. 기록 매질에서 구면파와 평면파의 간섭 개략도.

$$d_{\min} \approx 0.3 \frac{r_N}{N} \quad (4)$$

가 된다. 식 (4)로부터 알 수 있는 것은 첫째, 파장이 비록 zone plate의 색수차를 야기시켜도 분해능에는 영향을 미치지 않으며, 둘째, 분해능을 크게 개선시키기 위해서는 zone plate의 첫 번째 반경  $r_1$  또는  $r_N$ 은 가능한 한 작을수록 좋으며 zone의 개수  $N$ 은 가능한 한 많아야 함을 알 수 있다. 즉, 보다 분해능이 좋은 zone plate를 만들기 위해서는 고분해능의 홀로그램 기록 매질이 필요하게 된다. 만약에 홀로그램 기록매질이 이상적인 매질이라면 이 매질은 선형적인 효과를 가지게 되며, 이런 기록매질에서 만들어진 zone plate는 단 하나의 실상과 허상이 맺히며 고차의 초점은 존재하지 않는 Gabor zone plate(GZP)가 된다. 그러나 보통 위상형 홀로그램 기록매질은 비선형적인 효과를 나타내며,<sup>[12-14]</sup> 이런 경우 zone plate는 여러개의 실상과 허상이 존재하는 고차의 초점을 갖는다.<sup>[15]</sup> 이러한 zone plate를 generalized zone plate라고 한다. 그림 2는 세 종류의 zone plate 반경에 대한 투과율(transmittance)를 도식화한 그림이다.<sup>[16,17]</sup>

HZP가 위상 홀로그램(phase hologram)이라면, 재생 상의 각 초점 위치와 강도는 기록매질의 굴절률 변조에 의해 결정되어진다. 일반적으로 홀로그램은 기록매질에서의 노출과 현상 처리과정에서 위상변조(phase modulation)가 일어난다.

HZP는 홀로그램 기록 매질에 입사하는 평면파와 구면파의 간섭에 의한 강도의 공간적 분포를 기록하여 만들며, 이 홀로그램의 투과 함수는 굴절률 변조로 해석할 수 있다. DCG 홀로그램의 최종 굴절률 변조는 노출 과정에서의 굴절률 변조 ( $\Delta n_e$ )와 필름 현상과정에서의 굴절률 변조( $\Delta n_w$ )와의 곱으로 주어진다. 현상과정에서의 굴절률 변조는 필름 처리 특성에 의해 결정되는 인자이며, 노출 과정에서의 굴절률 변조는 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$\Delta n_e(r, t) = \delta n (1 - e^{-\beta P(r)t}) \quad (5)$$

여기서  $\delta n$ 은 최대 굴절률 변화량이며,  $\beta$ 는 기록 매질의 감응도(sensitivity)와 관련된 물질 상수이며,  $P(r)$ 은 강도 분포로서 구면파와 평면파 사이의 간섭으로 주어지며,  $t$ 는 노출 시간이다. 그림 1에서 점  $q(r)$ 에서의 강도 분포는

$$P(r) = P_0 + \frac{P_1}{f^2} + 2 \frac{\sqrt{P_0 P_1}}{f} \cos \Psi(r) \quad (6)$$

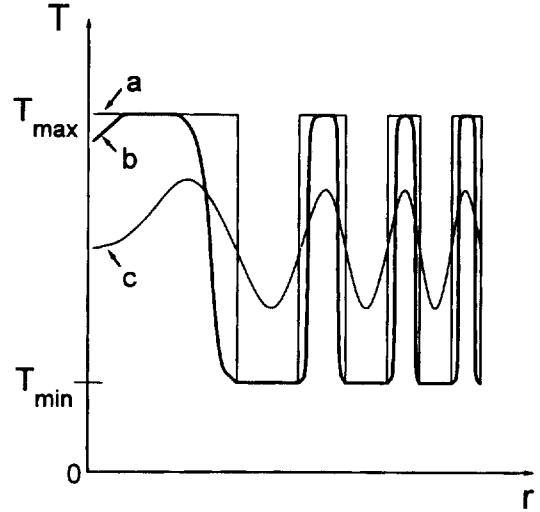


그림 2. Zone plate의 파대 반경에 대한 투과율 함수관계 모형도. a : Fresnel zone plate, b : generalized zone plate, c : Gabor zone plate.

로 주어진다. 여기서  $\Psi(r) = \frac{\pi r^2}{\lambda f}$  이며,  $r$ 은 기록 매질면에서 구면파와 평면파가 만나 간섭을 일으키는 임의의 점  $q(r)$ 의 반경이다. 위의 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 Fourier 급수 전개 하면<sup>[18]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta n_e(r, t) &= \delta n \left[ 1 - e^{-\beta P_0 + \frac{P_1}{f^2} t} \left( I_0(a) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m I_m(a) \cos(m \frac{\pi r^2}{\lambda f}) \right) \right] \\ &= \Delta n_0(t) + \sum_{m=1}^{\infty} \Delta n_m(t) \cos(m \frac{\pi r^2}{\lambda f}) \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 표현되며,  $a = 2\beta \frac{\sqrt{P_0 P_1}}{f} t$ ,  $I_m(a)$ 는 1종의 modified

Bessel 함수이다.<sup>[9]</sup> 여기서,  $\Delta n_0(t) = \delta n \left( 1 - e^{-\beta P_0 + \frac{P_1}{f^2} t} \right) I_0(a)$ ,  $\Delta n_m(t) = (-1)^{m+1} 2\delta n e^{-\beta P_0 + \frac{P_1}{f^2} t} I_m(a)$  이며,  $\Delta n_0(t)$ 와  $\Delta n_m(t)$ 는 시간의 함수이며 공간에 대해서는 상수이다. 식 (7)은 마치 초점이  $\frac{f}{m}$  ( $m=1,2,3,\dots$ )인 이상적인 Gabor zone plate가 각각의 진폭  $\Delta n_m(t)$ 를 가지고 무한히 중첩되어 있음을 뜻한다. 위상 홀로그램인 HZP의 위상 투과 함수(phase transmission function)  $t(r)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$t(r) = e^{i\phi(r,t)} = e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_f(r,t)} \quad (8)$$

여기서  $g = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_f(t)$  이며,  $\Delta n_f(t) = \Delta n_w \Delta n_e(t)$  는 홀로그램의 기록 및 현상처리가 끝난 최종 굴절률 변조이며,  $l$ 은 HZP의 두께를 나타낸다. HZP의 위상 변조를  $g(r,t) \ll 1$  로 가정하고, 식 (7)을 사용하면 위상 투과 함수는

$$t(r) \simeq 1 + ig(r, t) \\ = (1 + ig_0(t)) + i \sum_{m=0}^{\infty} g_m(t) \cos(m \frac{\pi r^2}{\lambda f}) \quad (9)$$

가 된다. 여기서  $g_0(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n_0(t)$ 이며,  $g_m(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n_m(t)$ 이다. 홀로그램 기록매질에 구면파와 평면파를 간섭하여 제작된 HZP는 원 대칭(circular symmetry)이므로 이 HZP에 수직으로 입사하는 평면파에 의해 회절되는 광파는 위상 투과 함수의 Fourier-Bessel 변환으로 표현할 수 있다. 따라서 HZP의 원형 개구(circular aperture) 형태인 각 파대(zone)에서 회절된 광파는 far-field에서 Fraunhofer 회절식으로부터 다음과 같이 표현된다.<sup>[10]</sup>

$$T_m(\rho) = \frac{ie^{ikz} e^{i\pi\lambda z \rho^2}}{\lambda z} F_m(\rho) \quad (10)$$

여기서  $z$ 는 HZP에서 관측점까지의 거리,  $\rho = \frac{r_o}{\lambda z}$ 이고  $r_o$ 는 관측 평면에서의 광파의 반경이며,  $F_m(\rho)$ 는

$$F_m(\rho \cos \psi, \rho \sin \psi) = \int_{r=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} U(r) e^{-i2\pi r \rho \cos(\theta - \psi)} r dr d\theta \quad (12)$$

로 주어진다. 여기서  $U(r) = i g_m(t) \cos(m \frac{\pi r^2}{\lambda f})$ 이다.

위 식의 우변 항에 Bessel 함수 관계식

$$\int_{\theta=0}^{2\pi} e^{-i a \cos(\theta - \psi)} d\theta = 2\pi J_0(a) \quad (J_0 \text{는 제 1종 0차 Bessel 함수})$$

를 도입하여 계산하면

$$F_m(\rho \cos \psi, \rho \sin \psi) = 2\pi \int_0^{\infty} U(r) J_0(2\pi r \rho) r dr \\ = g_m(t) \frac{\lambda f}{m} \sin(\frac{\pi \lambda f \rho^2}{m}) \quad (13)$$

을 얻을 수 있다. 따라서 평행빔을 HZP에서 조사하였을 때, HZP에 의해 회절되는 수 많은 광파 가운데 초점거리가  $\frac{f}{m}$ 인  $m$ 번째 회절 광파의 far-field에서 진폭  $T_m(r_o)$ 는

$$T_m(r_o) = g_m(t) \frac{f}{mz} e^{ikz} \cdot e^{\frac{i\pi r_o^2}{\lambda z}} \cdot \sin(\frac{\pi f r_o^2}{m \lambda z^2}) \quad (14)$$

와 같이 주어지며 그때의 강도는

$$\eta_m(r_o) \propto |T_m(r_o)|^2 \quad (15)$$

가 된다. 만약에 관측 평면  $(\xi, \eta)$ 에서의 동경 좌표(radial coordinate)  $r_o$ 가 관측 거리  $z$ 에 비해 매우 작은 값을 가지는 경우  $\sin(\frac{\pi f r_o^2}{m \lambda z^2}) \approx \frac{\pi f r_o^2}{m \lambda z^2}$ 로 들 수 있고 식 (14)는 보다 간단하게

$$\eta_m(r_o) \propto |g_m(t)|^2 \cdot \frac{\pi^2 f^4 r_o^4}{m^4 \lambda^2 z^6} \quad (16)$$

와 같이 표현된다. 또한 전체 회절 광파의 far-field에서 강도는  $\eta(r_o) = \sum_{m=0}^{\infty} \eta_m(r_o)$ 이다.

### III. 실험 및 토의

#### 3.1 Dichromated gelatin 박막 특성

기록 매질은 Agfa 8E75HD plates로 부터 얻은 두께 약 7  $\mu m$ 인 젤라틴으로 DCG 박막을 제작하여 실험에 사용하였으며, DCG 박막의 제작 과정을 표 1에 제시하였다.<sup>[19,20]</sup>

HZP 제작에 앞서 사용하는 DCG 기록 매질의 특성이 선형적인가 비선형적인가를 알아보기 위한 실험을 하였다. DCG 박막이 노출 과정에서의 굴절률 변조와 현상처리 후의 최종 굴절률 변조 관계를 알아보기 위해 그림 3과 같은 홀로그램 회절 실험 장치를 구성하였다.<sup>[21]</sup> 홀로그램 기록 광원은 488 nm 파장인 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 측정 광원으로는 He-Ne 레이저 광원(633 nm 파장)을 사용하였다. DCG 박막이 blue-green 파장 영역(약 540 nm 파장 미만)에서만 감광이 되므로<sup>[22]</sup> 기록광원으로 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, DCG에 기록된 홀로그램에 영향을 미치지 않기 위해 He-Ne 레이저를 사용하여 DCG 박막의 굴절률 변조값들을 측정하였다. 기록 광원인 Ar-ion 레이저의 두 평면파는 매질에 40°의 각도로 입사(공간 주파수  $\simeq 1,400$  lines/mm)하며, He-Ne 레이저는 Bragg 조건으로 빔을 입사시켰다. 매질에 입사되는 두 Ar-ion 레이저 빔의 세기 비는 1:1이며, 총 강도는  $1mW/cm^2$ 였다. A/D converter로부터 컴퓨터로 전송된 실시간 data는 Kogelnik<sup>[23]</sup>의 부피 홀로그램에 대한 회절효율 식을  $\Delta n_e = \frac{\lambda \cos \theta}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{DE}$  굴절률 변조로 변환하였다. 여기서

표 1. Simplified Fabrication Procedures of DCG film with Agfa 8E75HD Plates

- (1) Soak in non-hardener fixer for 15 min.
- (2) Wash in running water for 15 min.
- (3) Soak in methyl alcohol for 10 min
- (4) Soak in clean methyl alcohol for 10 min.
- (5) Soak in hot water (80°C) for 10 min.
- (6) Soak 5% ammonium dichromate solution (with 1% of Kodak photo-flo 200) for 5 min.
- (7) Bake for 10 min at  $85 \pm 5^\circ C$ .
- (8) Exposure (Ar<sup>+</sup> laser,  $\lambda=488$  nm).
- (9) Soak in 0.5% ammonium dichromate solution for 5 min.
- (10) Wash in running water for 10 min.

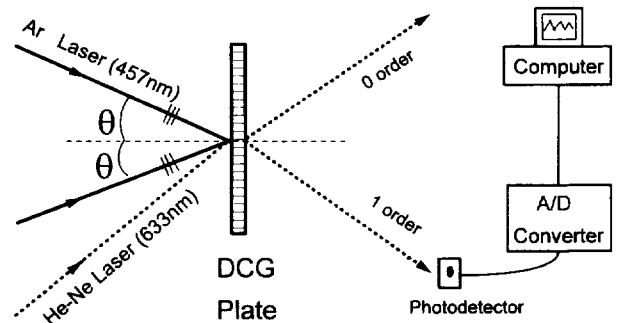


그림 3. 노출 과정동안 DCG 박막의 굴절률 변조 측정 장치도.

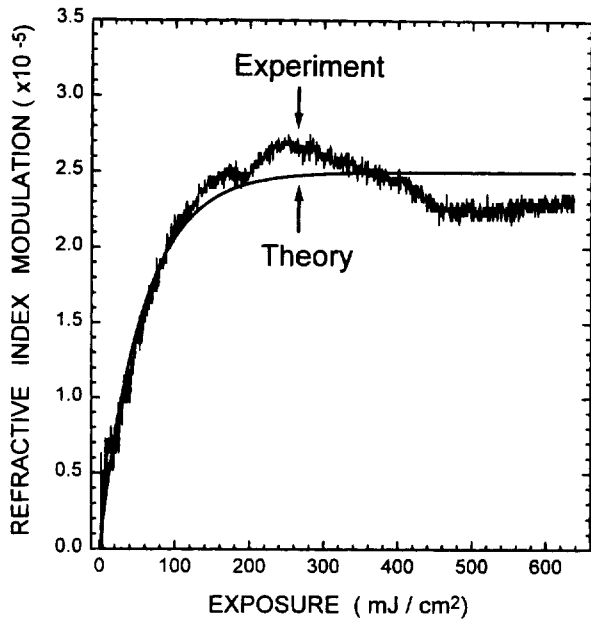


그림 4. 그림 4의 장치도에 의한 노출량 대 DCG 박막의 굴절률 변조.

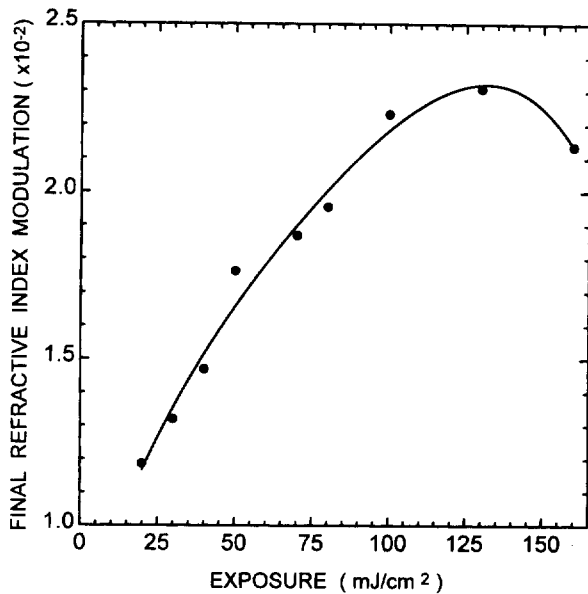


그림 5. DCG 홀로그래프의 최종 굴절률 변조 대 노출량.

$DE$ 는 실험적으로 측정된 회절효율이며  $2\theta$ 는 두 기록 광파 사이의 입사각이다. 그림 4는 그림 3으로부터 측정된 굴절률 변조값의 실시간 실험 곡선과 이론 곡선을 보여주고 있다. 그림 3의 실험 장치도에서 A/D converter는 0.5 초 간격으로 data를 처리하였으며, 그림 4의 실험 곡선에는 약 1200개의 data point가 있다. 이 실험치와 이론식 (5)와의 best curve fitting에 의해  $\delta n = 2.726 \times 10^{-5}$ ,  $\beta = 1.75 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{mJ}$ 을 얻었다. 노출 과정에서의 최대 굴절률 변조  $\Delta n_e$ 는  $2.5 \times 10^{-5}$ 이었으며, 이 때의 노출량은 약  $253 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 이었다. 한편, DCG 홀로그래프의 굴절률 변조는 젤라틴의 경화 정도에 의존하므로 노출과정에서의 굴절률 변조는 현상 처리과정의 파라미터들

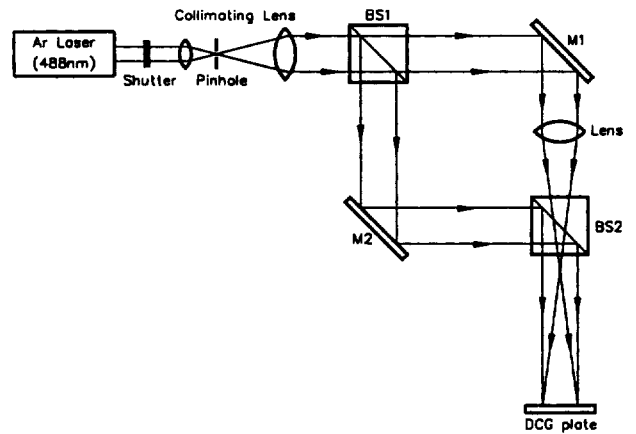


그림 6. On-axis holographic zone plate(HZP)를 만들기 위한 Mach-Zehnder 간섭계의 실험 장치도. M1-2: 거울, BS1-2: 광분할기.

을 변화시켜 최종적인 굴절률 변조를 조정할 수 있으나, 노출과정에서 젤라틴이 너무 많은 에너지를 받으면 수세 현상 과정에서 젤라틴의 부풀림에 의한 굴절률 변조와 알코올 현상과정에서 탈수에 의한 굴절률 변조가 큰 폭으로 일어나지 않아 결국 최종 굴절률 변조 능력은 감소하는 경향을 보였다.<sup>[1,20,21]</sup> 따라서 DCG 홀로그래프의 최대 굴절률 변조를 얻기 위해서는 Agfa 8E75HD plates 필름으로부터 DCG 박막의 준비과정과 노출과정에서 젤라틴의 경화 정도를 조절하여야 한다.

그림 5는 노출된 DCG 박막을 현상처리 한 후 얻은 굴절률 변조값(point 점)이며, 곡선 그래프는 실험값을 interpolation에 의해 curve fitting한 것이다. 이 실험값은 DCG 홀로그래프의 최종 굴절률 변조값으로서 노출 과정에서의 굴절률 변조 ( $\Delta n_e$ )와 현상 처리과정에서의 굴절률 변조 ( $\Delta n_w$ )를 포함하고 있다. 그림 4와 5에서 알 수 있듯이, DCG 박막은 노출 과정에서보다 현상과정에서 더 큰 굴절률 변조값을 가짐을 알 수 있었다. DCG 홀로그래프의 최종 굴절률 변조 ( $\Delta n_f$ )의 최대값은 약  $2.3 \times 10^{-2}$ 이었으며, 이 때의 노출량은  $130 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 이었다. 그림 4와 5의 곡선들은 노출량에 대해 비선형적인 특성 곡선을 나타내고 있다. 만약에 이 특성 곡선이 완전한 직선이라면 매질은 선형적이며, 이런 매질에서 zone plate는 Gabor zone plate가 된다. HZP 제작시 구면파와 평면파가 DCG 박막에 기록될 때 여현적인 노출 분포를 가지므로, zone plate는 Gabor zone plate 형태가 아닌 비선형적인 특성을 가진 generalized zone plate가 된다(그림 2 참조).

### 3.2 Holographic zone plate 제작 및 특성

On-axis HZP를 만들기 위해 그림 6과 같이 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 기준파는 평면파로 하고, 물체파는 초점거리가 220 mm인 볼록 렌즈를 사용하여 구면파로 하였다.

이때 최적의 회절효율을 갖는 HZP를 제작하기 위해 노출량은 약  $130 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 로 하였다. 제작된 HZP에 평면파를 조사하였을 때, 실초점이 만들어지는 위치를 그림 7에 나타내었다. 실험에서 6개의 초점을 확인하였으며, Ar-ion 레이저(488 nm)

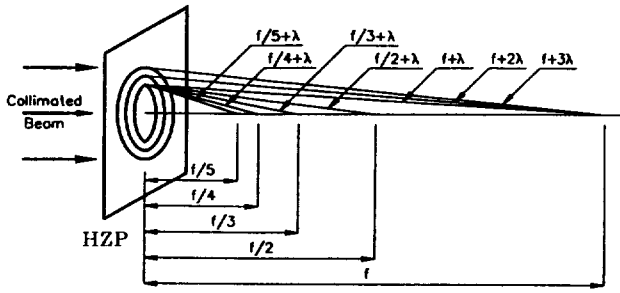


그림 7. HZP에 평면파를 조사하였을 때 초점이 만들어지는 위치.

표 2. HZP에 Ar laser와 He-Ne laser의 평면파를 입사시킬 때 초점이 맺힌 위치를 측정한 거리.

참조광(평면파) 파장	488 nm	633 nm
	220.0 mm	169.8 mm
	110.1 mm	85.0 mm
초점거리	73.2 mm	56.6 mm
	55.2 mm	42.7 mm
	44.1 mm	34.1 mm
	36.5 mm	28.0 mm

(오차범위 : ±1.0 mm)

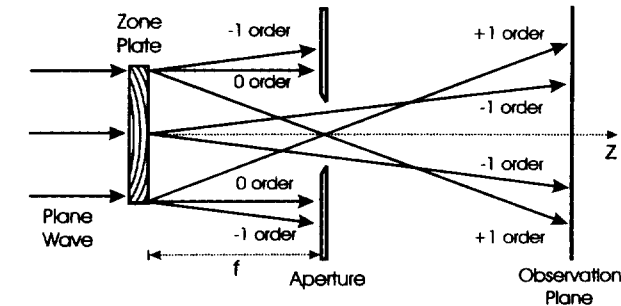
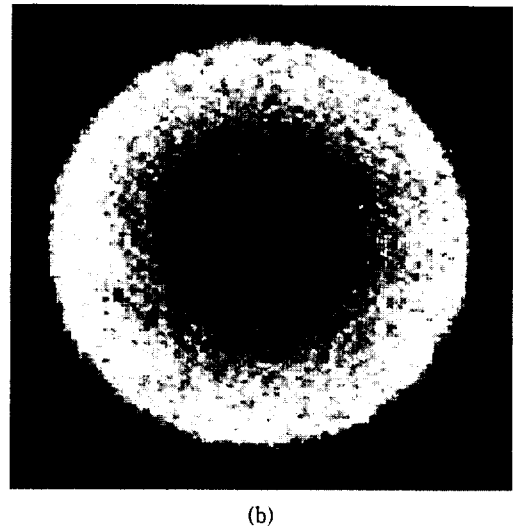
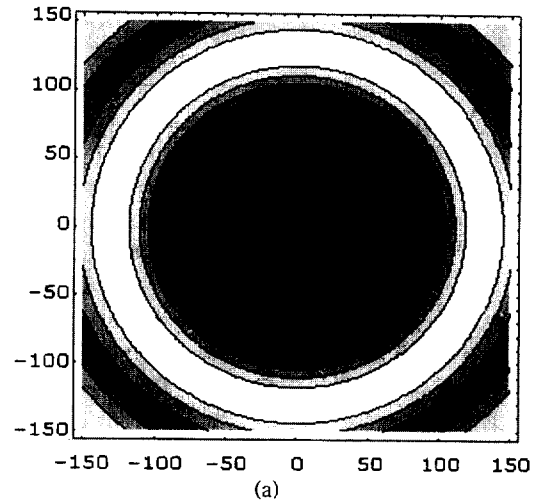


그림 8. HZP에 의한 회절 패턴을 “far-field”에서 관찰하기 위한 장치도.

그림 9. “far-field”에서 관찰된 HZP의 회절 패턴.  
(a) 이론에 의한 이차원적인 평면 강도 패턴.  
(b) 실험적으로 관찰된 회절 패턴.

와 He-Ne 레이저(633 nm)로 조사할 때 (2)식과 같이 초점거리는 파장에 따라 달라지며, 각각의 초점 거리는 표 2와 같이 관측되었다. 즉 HZP의 초점거리는  $f=Z$ ,  $f/2$ ,  $f/3$ ,  $f/4 \dots$  임을 알 수 있었다. HZP는 실초점과 허초점이 관찰되었는데, 허초점은 실초점의 반대편 (그림 7에서 입사파와 HZP 사이 영역)에 생겼으며 실초점 거리와 동일하였다.  $f$ ,  $f/2$ ,  $f/3$  초점에서 측정한 실험적인 상대적인 강도 비율은  $1, \frac{1}{(1.93)^4}, \frac{1}{(3.16)^4}$  이었으며 이론치  $1, \frac{1}{(2)^4}, \frac{1}{(3)^4}$ 와 거의 일치함을 보였다.

그림 8은 평면파를 HZP에 입사시켰을 때 투과되는 회절 패턴을 far-field에서 측정하는 실험장치도이다. 그림 9 (a)는 이론식 (14)에 의해 시뮬레이션한 far-field에서의 2차원 상의 세기 분포를 나타낸다. 그림 9 (b)는 그림 8의 장치에 의해 far-field에서 실험적으로 관측한 그림이다. 즉 초점 거리  $f$ 에 기여하는 회절성분만 공간 필터(그림 8의 aperture)를 통과하게끔 하여 far-field에서 CCD 카메라로 잡은 것이 그림 9 (b)



그림 10. HZP를 광학 현미경으로 100 배 확대한 사진.

이다. 그림 9 (a)와 (b)에서 나타나 있듯이 그림 중앙에 어두운 원이 형성됨을 알 수 있다.<sup>[24]</sup>

그림 10은 제작된 HZP를 광학 현미경으로 100배 확대한 사진이다. 윤대판(zone plate)의 형성은 FZP와 같은 불연속적 강도 분포로 이루어진 것이 아니라 연속적인 굴절률 변조에 의한 것임을 알 수 있다. HZP의 중심에서 첫 번째 동심원, 두 번째 동심원, 세 번째 동심원, ...  $m$ 번째 동심원 폭까지 반경비는

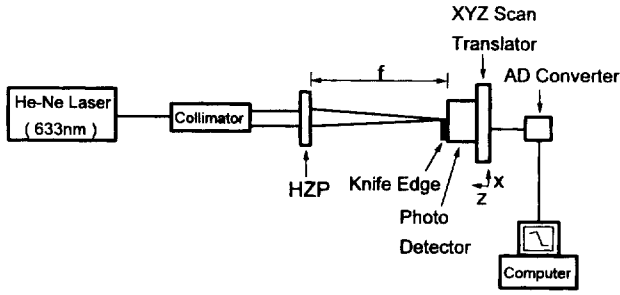


그림 11. 633  $\mu\text{m}$  파장의 평행광을 HZP에 입사시켜 첫 번째 초점거리  $f$ 에 focusing 되는 빔의 크기 (beam spot size)를 면도날 주사 방법으로 측정하는 장치도.

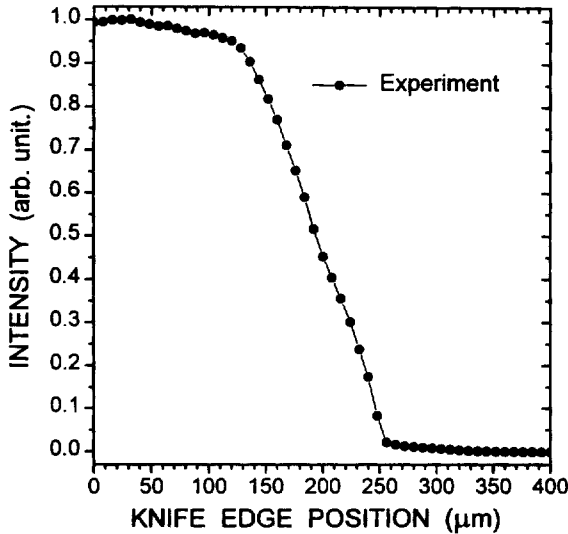


그림 12. 그림 9와 같이 linear motor로 스테이지를 X축 방향으로 움직여 HZP의 초점거리  $f$ 에 focusing 되는 빔의 면적 반경을 측정된 그래프.

1,  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{3}$ , ... 만큼 증가함을 알 수 있었다. 광학 현미경으로 측정된 HZP의 첫 번째 동심환의 반경은 약  $465 \pm 5 \mu\text{m}$ 이었다. 그림 10에서 HZP의 zone 반경에 대한 굴절을 변조 함수 형태로 도식화하면 그림 2 (b)의 곡선 형태가 됨을 알 수 있었다.

그림 11은 평행광을 HZP에 입사시켜 초점  $f$  근처에서의 빔의 크기 (beam spot size)를 면도날 주사방법(knife scanning)으로 측정하는 장치도이다.<sup>[25]</sup> 이 장치도에서 광 검출기를 XYZ 스테이지에 부착시킨 뒤, linear motor (Encorder Mike motor driver)로 스테이지를 Z축 방향으로 움직여 한 점에 focusing 되는 정도와 각 초점 거리 및 각 초점의 상대적인 강도등을 측정하였다. 그림 12는 그림 11과 같이 linear motor로 스테이지를 Z축 방향으로 움직여 HZP의 첫 번째 초점 근처에 맞춘 후, linear motor에 부착된 면도날을 X축 방향으로 scan 하면서 측정된 강도를 나타낸다. 이때 HZP의 위치는 초점에서 약  $68 \mu\text{m}$  떨어진 곳에 위치하였다. 그림 13의 점선은 그림 12의 데이터를 X축에 대해 미분한 데이터이며, 실선은 미분한 데이터를 Gaussian 형태로 curve fitting한 그림이다. 여기서 HZP의 첫 번째 초점 근처에서 Gaussian beam의 반치폭

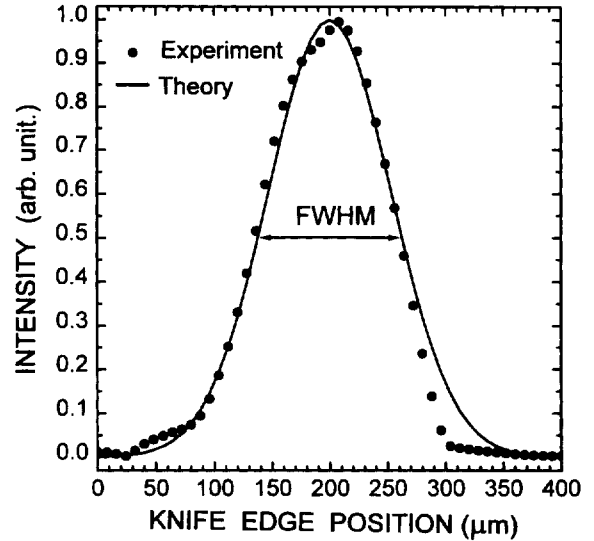


그림 13. HZP의 초점거리  $f$ 에서 그림 10의 면도날 위치(X)에 따른 미분 데이터.

(FWHM)은 약  $120 \mu\text{m}$ 였다. 제작된 HZP의 구경은  $D=10 \text{ mm}$ 였으며, 초점에서의 회절한계 이론값은  $\frac{1.22\lambda f}{D} \approx 13 \mu\text{m}$

로 주어진다. 보다 정확하게 초점거리  $f$ 에서의 빔의 크기를 측정하기 위해 CCD 카메라(PULNIX America, Inc., Model: TM-7x, CELL SIZE:  $8.4 \mu\text{m} \times 9.8 \mu\text{m}$ )로 초점에서의 상점의 직경을 측정하였다. CCD 카메라로 초점에서의 상점을 측정한 결과 Gaussian 빔 profile을 가짐을 알 수 있었으며, 빔의 직경은 약  $25 \mu\text{m}$ 를 얻었다. 이론적인 회절한계와 측정된 빔의 직경이 다른 이유는 HZP 제작과정(DCG박막 제작과정, 노출 및 현상처리 과정)에서 일어나는 위상함수의 왜곡과 빔의 직경을 측정할 때 입사되는 광파의 세기 등에 기인한 것으로 생각된다.  $f$ ,  $f/2$ ,  $f/3$ 의 각 초점에서 얻은 총 회절효율은 약 12%였다.

## V. 결 론

성능이 우수한 HOE를 제작하기 위해서는 높은 회절효율 및 고분해능 홀로그램 기록매질이 필요하다. 홀로그래픽 광학소자의 기록 매질로 가장 적당한 dichromated gelatin 박막을 사용하여 홀로그래픽 광학소자들 중에 가장 기본이 되고 응용성이 넓은 holographic zone plate(HZP)를 제작하였다. Dichromated gelatin 매질의 비선형성(nonlinearity)을 고려한 기록매질의 투과함수와 Fourier-Bessel 변환식을 이용하여 HZP에 대한 이론식을 유도하였다. 특히, 이 이론식으로부터 초점 근방에서 광축상에 도우넛 모양의 링패턴이 존재함을 증명하였으며 또 실험적으로도 관측하였다. 이러한 현상은 높은 정밀도를 갖는 광학 정렬 시스템에 응용 가능성을 시사하고 있다. 홀로그래픽 zone plate의 재생 초점거리는 이론적으로  $f$ ,  $f/2$ ,  $f/3$ , ...이며, 실험값은 488 nm 파장에서 220 nm, 110 mm, 73 mm, 55 mm, 44 mm, 36 mm이었다. 칼날주사

방법으로 측정된 첫 번째 재생 초점 근처에서의 빔의 모양은 Gaussian 분포를 가짐을 확인하였다. CCD 카메라로 초점에 서의 상점을 측정된 결과 Gaussian 빔 profile을 가짐을 알 수 있었다.  $f, f/2, f/3$ 의 각 초점에서 얻은 총 회절효율은 약 12%였다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. J. Chang and C. D. Leonard, *Appl. Opt.* **18**, 2407 (1979).
- [2] 정만호, 송재봉, 이인원, *새물리*, **30**, 565 (1990).
- [3] 송강철, *응용레이저 가이드*, (기전연구소, 서울, 1985), 5장.
- [4] L. D. Dickson and G. T. Sincerbox, *SPIE* **378**, 470 (1985).
- [5] G. F. Marshall, *Optical Scanning*, (Marcel Dekker, New York, 1991), Chap. 4.
- [6] P. C. Mehta, K. Syam Sunder Rao, and R. Hradaynath, *Appl. Opt.* **21**, 4553 (1982).
- [7] J. Jahns and S. H. Lee, *Optical Computing Hardware*, (Academic, Boston, 1994), Chap. 4-7.
- [8] G. T. Olaru and T. Asakura, *Optics Commun.* **54**, 327 (1985), Z. Jaroszewicz and A. Kolodziejczyk, *Optics Commun.* **102**, 391 (1993), and *ibid. idem.* **114**, 1 (1995).
- [9] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, (McGraw Hill, 1968), Chap. 4-8.
- [10] J. D. Gaskill, *Linear Systems, Fourier Transforms and Optics*, (John Wiley & Sons, New York, 1978).
- [11] J. R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*, (Englewood Cliffs, New Jersey, 1984), Chap. 2
- [12] L. Solymar and D. J. Cooke, *Volume Holography and Volume Gratings*, (Academic, London, 1981), Chap. 10.
- [13] R. R. A. Syms, *Practical Volume Holography*, (Clarendon, New York, 1990), Chap. 5.
- [14] P. Hariharan, *Optical Holography*, (Cambridge University, London, 1984), Chap. 6.
- [15] M. H. Horman and H. H. M. Chau, *Appl. Opt.* **6**, 317 (1967).
- [16] H. H. M. Chau, *Appl. Opt.* **8**, 1209 (1969).
- [17] G. S. Waldman, *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 215 (1966).
- [18] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, (Dover Publications, New York, 1972), P. 376.
- [19] 임용석, 최옥식, 김상철, *새물리*, **35**, 446 (1995).
- [20] Y. S. Im, Y. L. Lee, C. H. Kwak, O. S. Choe and S. C. Kim, in *Holography*, Vol. 4, 1996 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington DC, 1996), pp. 170-173.
- [21] D. Meyerhofer, *RCA Rev.* **33**, 110 (1972).
- [22] 임용석, 김상철, 최옥식, 박기현, *새물리*, **35**, 26 (1995).
- [23] H. Kogelnik, *Bell System Technical Journal*, **48**, 2909 (1969).
- [24] E. Tejnil, K. A. Goldberg, E. H. Anderson and J. Bokor, *OSA Trends in Optics and Photonics* Vol. 4, Extreme Ultraviolet Lithography, Glenn D. Kubiak and Don R. Kania. eds. (Optical Society of America, Washington DC, 1996), pp. 138-142.
- [25] 조현모, 이윤우, 이인원, 이상태, 이종웅, *한국광학회지*, **6**, 173 (1995).

## Fabrication of Holographic Zone Plate Using Dichromated Gelatin Hologram

Yong Seok Im, Young Lak Lee, Chong Hoon Kwak and Ok Shik Choe  
 Department of Physics, Yeungnam University,  
 Kyongsan, 712-749, Korea

(Received: April 16, 1996)

Holographic zone plate (HWP) is fabricated by interfering a plane wave and a spherical wave in a dichromated gelatin (DCG) film obtained from Agfa 8E75HD plates. We have developed a simple theory for HWP considering optical nonlinearity of DCG material. Analysis of our theory for HWP shows that it has infinite focal points at distances  $f, f/2, f/3, \dots$ . In experiment, we observed the corresponding focal points of up to  $f/6$  when illuminating HWP by a plane wave. It is also shown that the beam profile around the first focal point measured by using a knife-edge scanning method has a Gaussian shape.