

중크롬산 젤라틴을 사용한 Holographic Collimating Lens의 제작

Fabrication of Holographic Collimating Lens using Dichromated Gelatin Film

김 홍조, 이 승걸

인하대학교 응용물리학과

박대운

인하대학교 물리학과

홀로그래픽 광학소자(holographic optical element)의 일종인 holographic collimating lens(HCL)를 최적 설계하였으며, 중크롬산 젤라틴 필름을 사용하여 최적 설계치에 따라 HCL을 제작하였고 그 성능을 평가하였다. off-axis 방식의 holographic zone plate (HWP) 구조를 채택하였으며, 기록광과 재생광의 파장 차이에 의한 색수차를 최소화시키기 위해 유한 광선 추적법과 감쇠 최소자승법으로 최적 설계하였다. Dipping 법으로 제작된 중크롬산 젤라틴(Dichromated Gelatin, DCG) 필름을 기록 매질로 사용하여 HCL을 제작하였으며 회절광의 집적도를 측정하여 그 성능을 평가하였다.

1. 서론

HWP를 응용한 HCL는 주로 소형이며 소비전력이 적은 반도체 레이저용으로 매우 적합하다. 일반 레이저와 달리 반도체 레이저의 출력광은 발산하는 특성을 갖고 있기 때문에 출력광을 평행광으로 바꾸어 주는 collimating lens가 필요하게 된다. 이러한 광학계에서 보통의 광학소자 대신 HWP를 응용한 HCL를 사용한다면 제품의 소형화, 광학 시스템의 간소화, 경제성등의 여러 장점을 얻을 수 있다.

HCL의 기록 매질로서 사용된 DCG는 거의 이상적인 부피 위상 홀로그래프로서 굴절률 변조 능력이 크고, 높은 분해능을 갖고 있기 때문에 100%에 가까운 높은 회절 효율을 갖는 HOE를 제작할 수 있으며, 다른 기록 매질에 비해 광의 흡수와 산란이 매우 적은 특성이 있다.[1-3]

본 논문에서는 off-axis 홀로그래픽 방식을 채택하여 유한광선 추적법(finite ray tracing method)[4]과 감쇠 최소자승법(damped least squares method)에 의해 기록광원과 재생광원의 파장차와 기록 매질의 파장 선택성의 이유로 발생하는 색수차를 최소화하는 HWP 구조의 HCL을 최적 설계하였다.[5] 또한 dip coating 법에 의해 제작한 DCG 필름을 HCL의 기록 매질로 사용하여 최적 설계 결과에 따라 He-Ne 레이저용 HCL을 제작한 후 그 특성을 조사하였다. 이 때 기록광원으로 4880 Å의 파장을 갖는 아르곤 이온 레이저를 사용하여 IZP 및 EHWP 구조를 갖는 HCL을 제작하고, 이들 각각의 회절 특성과 광 집적특성을 비교 분석하여 설계과정에서 예측한 최적 구조의 HCL을 실험적으로 확인하였다.

II. 유한광선 추적법에 의한 최적설계 및 설계 결과.

(1) 최적 설계

HZP의 구조는 기록 방식에 따라 크게 셋으로 분류할 수 있는데 구면파와 평면파간의 간섭으로 이루어진 HZP를 interferometric zone plate(IZP), 두 구면 발산파간의 간섭으로 만들어진 경우 extended holographic zone plate(EHZP), 구면 발산파와 구면 수렴파 사이의 간섭으로 인해 만들어진 경우, generalized holographic zone plate(GHZP)라 한다.

물체파와 기준파의 곡률반경이 각각 f_o , f_R 일 경우, 기록광원에 대한 HZP의 촛점거리 f_1 은 그 종류에 관계없이

$$1/f_1 = 1/f_o - 1/f_R \quad (1)$$

로 표현된다. [6] HZP의 촛점거리는 재생광원의 파장에 따라 변하게 되는데, 만일 기록광원의 파장이 λ_1 일 때 HZP의 촛점거리가 f_1 이라면 파장이 λ_2 인 재생광원에 대한 촛점거리 f_2 는

$$f_2 = f_1 \cdot \lambda_1 / \lambda_2 \quad (2)$$

로 주어진다. [6]

그림 1(a)는 HZP의 구조를 갖는 HCL의 광학적 배치로서 광속의 초기 방향이 0일 경우, 반도체 레이저로부터 출력된 광속이 중심좌표가 $(0, y_o, 0)$ 인 HCL 면에 입사한 후 평행광으로 회절된 다음 z 축을 따라 진행하는 것을 나타낸다.

그림 1(a)와는 반대로, 그림 1(b)처럼 왼쪽으로 부터 입사된 평행광이 HCL을 투과한 후 z축상의 한점 $(0, 0, z_o)$ 에 집속되도록 설계하는 경우를 생각하는 것이 최적설계과정에서 훨씬 편리하며, 이때 평행광속의 단면 분포는 반도체 레이저로부터의 발산광속과 $z=0$ 평면에 위치한 HCL 면과의 교평면 (cross section)으로 정의된다. 이러한 교평면을 x축과 y축 방향으로 각각 13, 9등분하여 각 면적요소를 대표하는 73개 광선의 입사점 좌표 $(x^i, y^i, 0)$ 를 요소 광원으로 간주하였다.

HCL 상의 각 입사점 $(x^i, y^i, 0)$ 으로 평행광선이 입사될 때, HCL에 의해 회절되는 광선의 방향 여현은 다음식으

로 유도되며 그 표현식을 구하면 HCL이 IZP 구조를 갖는 경우

$$\ell_{OUT} = \ell_{IN} - (\lambda_2/\lambda_1) \frac{x}{\sqrt{r^2 + f_o^2}} \quad (3)$$

$$m_{OUT} = m_{IN} - (\lambda_2/\lambda_1) \frac{y}{\sqrt{r^2 + f_o^2}} \quad (4)$$

$$n_{OUT} = \sqrt{1 - \ell_{OUT}^2 - m_{OUT}^2} \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, EHZP 및 GHZP 구조를 갖는 경우

$$\ell_{OUT} = \ell_{IN} - (\lambda_2/\lambda_1) \left\{ \frac{x}{\sqrt{r^2 + f_o^2}} \pm \frac{x}{\sqrt{r^2 + f_R^2}} \right\} \quad (6)$$

$$m_{OUT} = m_{IN} - (\lambda_2/\lambda_1) \left\{ \frac{y}{\sqrt{r^2 + f_o^2}} \pm \frac{y}{\sqrt{r^2 + f_R^2}} \right\} \quad (7)$$

$$n_{OUT} = \sqrt{1 - \ell_{OUT}^2 - m_{OUT}^2} \quad (8)$$

이 된다. [6] 여기서 λ_1 , λ_2 은 각각 기록 광원과 재생광원의 파장이고 r 은 원점으로 부터 HCL상의 입사점까지의 거리, ℓ_{OUT} , m_{OUT} , n_{OUT} , ℓ_{IN} , m_{IN} , n_{IN} 은 회절광선과 입사광선의 방향 여현을 각각 의미하며 식(6), (7), (8)의 중괄호안의 부호가 + 이면 GHZP, - 이면 EHZP 구조에 대한 표현식이 된다. 또 평행광이 z축과 나란하게 입사된다고 가정하므로 $\ell_{IN} = 0$, $m_{IN} = 0$ 이 되며 x , y 는 HCL($z=0$ 평면)상의 입사점 좌표로서 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이다.

이상적인 경우 HCL에 의한 회절광선과 초평면과의 교점 (x_f^i, y_f^i, z_o) 은 모두 촛점 $(0, 0, z_o)$ 으로 수렴되어야 하므로 촛점 $(0, 0, z_o)$ 과 교점 (x_f^i, y_f^i, z_o) 둘과의 거리로서 merit function $G(f_o)$ 를 정의하였다. 감쇠 최소자승법으로 이 함수를 최소화시키므로서 최적의 HCL 구조를 찾을 수 있는데 이때 merit function $G(f_o)$ 의 표현식은

$$G(f_o) = \sum_{i=1}^M \{ (0 - x_f^i)^2 + (0 - y_f^i)^2 \} \quad (9)$$

($M = 73$: number of incident rays)

와 같다.

(2) 최적 설계 결과 [7]

HCL을 제작하기 위한 기록광원으로 재생광원과 동일한 레이저를 사용하는 경우($\lambda_2 = \lambda_1$, $f_1 = f_2$), 최적설계된 f_0 값은 off-axis angle에 관계없이 항상 $f_0 = f_1 = f_2$ 의 관계를 만족한다. 이때 f_R 은 식(1)로부터 무한대가 되므로 기록광원과 재생광원의 파장이 일치할 경우에 최적설계된 HCL은 평행광속과 발산광속의 간섭결과로 만들어지는 IZP 구조를 가져야 할 것이다.

그림 2는 파장비(λ_2/λ_1)가 0.5에서 2.0로 변화할 때 최적설계된 HCL의 f_0/f_1 과 f_0/f_2 값의 변화를 각각 나타낸 것이다. 우선 $\lambda_2/\lambda_1 > 1$ 인 경우에는 f_0/f_1 값이 항상 1보다 작으므로 식(1)로부터 계산되는 f_R 은 양의 값을 갖게 되며, $\lambda_2/\lambda_1 < 1$ 인 경우에는 f_0/f_1 이 항상 1보다 큰 값을 가지므로 f_R 은 음의 값을 갖게 된다. 그러므로 $\lambda_2/\lambda_1 > 1$ 인 경우에는 두 발산광속의 간섭결과를 주어지는 EHFP 구조가 색수차를 보정하는데 적합하며, $\lambda_2/\lambda_1 < 1$ 인 경우에는 발산광속과 수렴광속($f_R < 0$)의 간섭결과를 주어지는 GHFP 구조가 더 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 결과는 off-axis angle에 무관한 것도 알 수 있다.

Ⅲ. holographic collimating lens의 제작 및 광 집적도 측정

HCL의 제작에 사용할 기록 매질로서 DCG 필름의 제작은 젤라틴 건판의 준비 과정과 감광화 과정의 두가지 과정으로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 12% 젤라틴 용액에 기관을 담금 속도 40cm/min으로 2회 담구어 코팅하는 dip coating법^[8]에 의해 젤라틴 건판을 제작하였으며 제작된 젤라틴 건판을 12% 중크롬산 암모늄 수용액에 담구어 감광화하므로써 DCG 필름을 제작하였다. [1-3]

제작된 DCG 필름을 기록 매질로 사용하여 앞의 이론으로부터 최적 설계한 HCL을 He-Ne 레이저에 적합하게 제작하였다. 그림 3과 그림 4는 각각 IZP와 EHFP 구조를 갖는 HCL을 제작하기 위한 실험 장치도로서 제작된 HCL의 초점거리 f_2 는 모두 10 cm 이다. Ar⁺ 레이저의 4880 Å의 파장을 갖는 출력광을 기록 광원으로 사용하였다.

현상 과정에서는 먼저 DCG 필름을 물에 의해 현상한 후 다시 isopropanol에 담구어 급격히 탈수시켰다. 제작된 HCL의 성능을 평가하기 위해서는 HCL에 의한 광의 집적도를 알아보면 된다. HCL에 의한 광의 집적도를 알아보기 위한 측정 원리도와 장치도는 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 측정원리를 일반 렌즈에 비유해서 나타낸 것으로 입사 광선의 진행 방향과 위치, 입사각은 일정하고 렌즈의 위치만 상하 좌우로 이동할 경우 초평면 상에서 집속점의 위치는 렌즈와 동일한 이동 방향과 거리에 위치할 것이다. 이와 같은 원리에서 그림 5(b)처럼 He-Ne 레이저에 의해 출력된 광원이 HCL을 투과한 후 회절되어 HCL로부터 10 cm 떨어진 초평면에 위치한 필름에 집속된다. 이때 HCL을 좌우 상하로 동간격씩 이동시키면 이상적으로 제작된 HCL일 경우 회절파는 HCL의 이동간격과 같은 간격만큼씩 떨어진 각각의 위치에서 집속되어질 것이다. 이 실험에서는 세가지 off-axis각을 갖는 IZP 및 EHFP 구조의 HCL에 대해서 그림 5(b)의 화살표 방향으로 HCL을 1mm씩 이동시켜 HCL에 의해 회절되어 집속된 광을 필름에 기록하여 두 구조에 대해 비교하였으며 EHFP 구조에 대해서는 상하로 3mm씩 이동된 상태에서 화살표 방향으로 좌우 1mm씩 이동시켜 그 집속도를 평가하였다.

Ⅳ. 결과 및 논의

제작된 IZP 및 EHFP 구조의 HCL의 회절 효율은 그림 6와 같으며, 전반적으로 EHFP 구조의 HCL보다 IZP 구조의 HCL이 회절 효율이 더 높음을 알 수 있다. 이것은 두 구조 모두 제작시에 똑같은 노출량을 주었지만 EHFP 구조의 HCL의 제작시에는 더 노출 시간이 요구되었으므로 외부의 진동으로 인해 회절 효율이 감소된 것으로 판단된다. 최대 회절 효율을 갖게 하는 노출량은 IZP 구조와 EHFP 구조 모두에서 32 mJ/cm² 이다.

그림 7, 8은 각각 IZP 구조와 EHFP 구조에 대해 최적 설계치로 계산한 집적도로서 그림 5의 화살표 방향으로 HCL을 1mm씩 동간격으로 움직여 나간다고 가정했을 때 집속점을 계산하여 그린 그림이다. 그림 7에서 IZP 구조

를 갖는 HCL은 이동 거리가 증가함에 따라 집속점들의 간격은 점점 넓어짐을 볼 수 있고, off-axis 각이 증가함에 따라 더욱 심해지는 경향을 보이지만 그림 8처럼 EHZP 구조를 갖는 HCL는 각각의 off-axis 각에 대해 집속점들의 간격이 HCL의 이동 거리에 관계없이 일정하게 유지되었다.

그림 9,10은 그림 5와 같은 방법으로 각각 IZP 구조와 EHZP 구조를 갖는 HCL에 의해 실제 측정된 집속점들이다. 이때 그림 9의 점들은 아랫쪽의 집속점들과 비교하기 위해 1mm의 등 간격으로 필름을 움직여 노출한 것이다. 그림 9에서 집속점들의 간격은 그림 10의 결과와 달리 등간격을 유지하지 못하며 off-axis 각도가 커질수록 그 차이는 더욱 커짐을 볼 수 있다. 하지만 그림 10의 경우, off-axis 각도에 관계없이 그림 8에서 예측된 것처럼 각 집속점들의 간격이 일정하게 유지됨을 알 수 있고 이로서 제작된 HCL의 성능을 간접적으로 확인할 수 있다.

V. 결론

홀로그래픽 광학 소자인 holographic collimating lens를 최적 설계하였고, 기록 매질로 DCG 필름을 사용하여 holographic collimating lens를 제작하였다.

HCL의 최적 설계에는 기록 파장과 재생 파장의 차이에서 오는 색수차와 off-axis 각도를 고려하면서 반도체 레이저용 HCL과 He-Ne 레이저용 HCL을 설계하였다. 기록 광원과 재생 광원의 파장비 및 off-axis 각도에 따른 HCL의 구조변화를 조사하여 최적 구조를 예측한 결과, 파장비가 1 이면 IZP 구조의 HZP가, 파장비가 1보다 크면 EHZP구조, 파장비가 1보다 적으면 GHZP구조가 적합하였다.

DCG 필름을 기록 매질로 하여 최적 설계치에 의해 IZP 및 EHZP의 구조를 갖는 He-Ne 레이저용의 HCL을 제작하여 각각의 구조에서 광의 집적도를 측정하였으며, IZP 구조의 HCL에서 보정되지 못한 색수차를 EHZP 구조에서는 제거할 수 있음을 볼 수 있었다. 이 결과로서 HCL의

설계과정에서 예측하였던 기록 광원과 재생 광원의 파장비의 변화에 따른 최적구조의 변화를 실험적으로 확인할 수 있었다.

REFERENCE.

1. T. A. Shankoff, Appl. Opt. 7(10), 2101(1968).
2. B. J. Chang and C. D. Leonard, Appl. Opt. 18(14), 2407(1979).
3. D. Meyerhofer, Appl. Opt. 8, 963(1969).
4. J. N. Latta, Appl. Opt. 10, 2698(1971).
5. M. Assenheimer, Y. Amitai and A. A. Friesem, Appl. Opt. 27, 4747(1988).
6. Yuzo Ono and Nobuo Nishida, Appl. Opt. 21, 4542(1982).
7. 이승걸, 김홍조, 새물리, 30(6), 639(1990).
8. R. G. Brandes, E. E. Francis, and T. A. Shankoff, Appl. Opt. 8(11), 2346(1969).

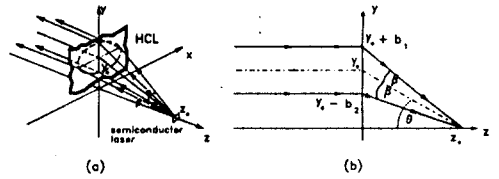


Fig. 1. (a) Reconstruction geometry of holographic collimating lens. (b) Focusing of plane wave incident on holographic collimating lens. α and β are divergence angles of semiconductor laser beam with respect to x and y axis, respectively. θ is off-axis angle of HCL.

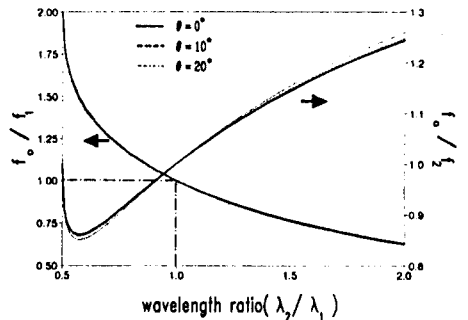


Fig. 2. Variation of f_o/f_1 and f_o/f_2 vs wavelength ratio (λ_2/λ_1) at three off-axis angles ($\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$).

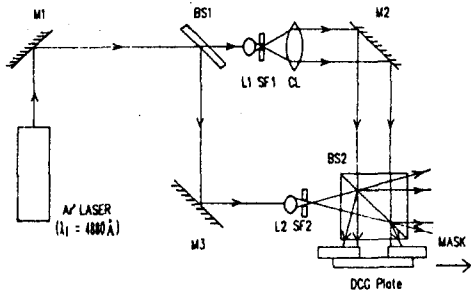


Fig. 3. Recording geometry of HCL with IZP structure.

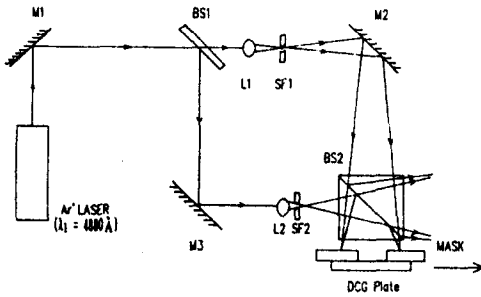


Fig. 4. Recording geometry of HCL with EHZP structure.

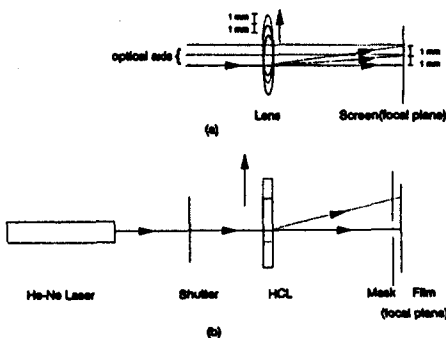


Fig. 5. (a) Refraction of parallel rays by a lens. Location of rays incident on screen is shifted by the same distance due to the lateral movement of lens.(Horizontal lines represent optical axes of the shifted lens.) (b) Evaluation of the performance of HCL by measuring the movement of focusing points.

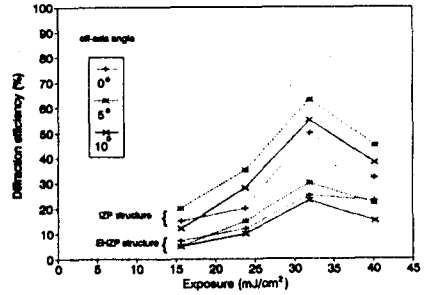


Fig. 6. Diffraction efficiency of two fabricated HCL's with the structure of IZP and EHZP.

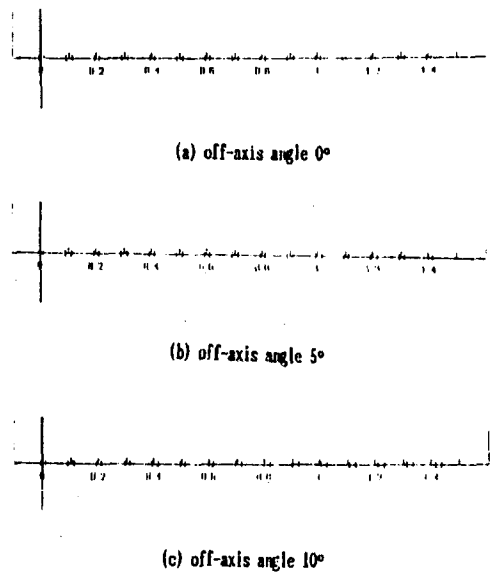


Fig. 7. Calculated location of focal points on the focal plane due to lateral translation ($\Delta x = 1$ mm) of HCL with the structure of IZP.

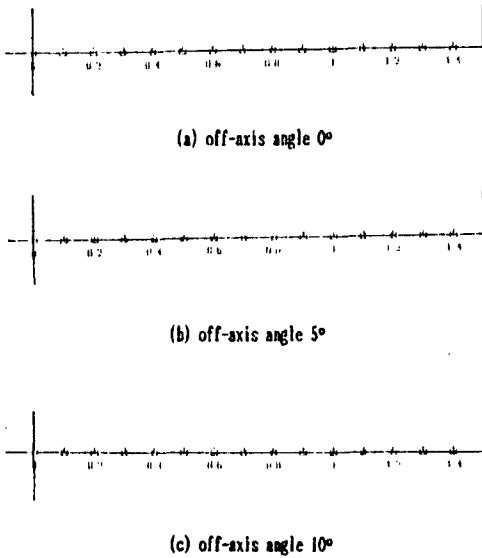


Fig. 8. Calculated location of focal points on the focal plane due to lateral translation ($\Delta x = 1$ mm) of HCL with the structure of EHZP.

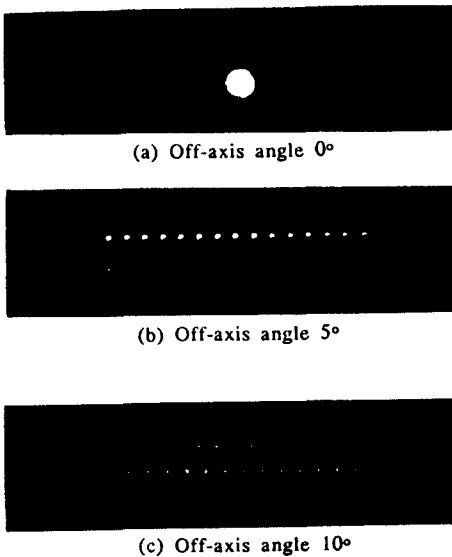


Fig. 9. (Top) Movement of focal points on the screen due to lateral translation ($\Delta x = 1$ mm) of HCL when He-Ne laser beam is incident on HCL. HCL has the structure of IZP. (Bottom) Impinging points of laser beam on screen due to lateral translation of screen in the absence of HCL.

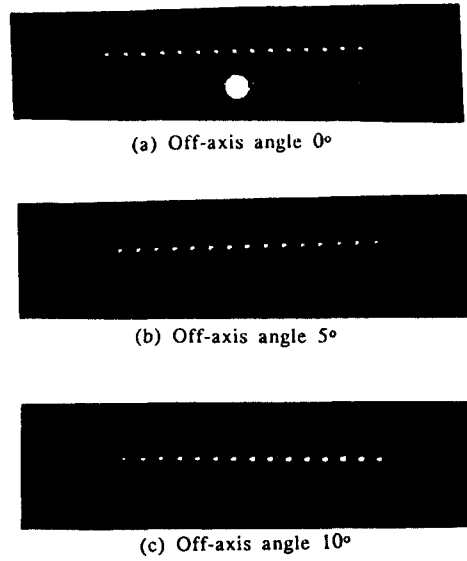


Fig. 10. (Top) Movement of focal points on the screen due to lateral translation ($\Delta x = 1$ mm) of HCL when He-Ne laser beam is incident on HCL. HCL has the structure of EHZP. (Bottom) Impinging points of laser beam on screen due to lateral translation of screen in the absence of HCL.