

은염 감광성 물질을 이용한 연속 Neutral Density(ND) 필터 제작

이혁수 · 손정영

한국과학기술 연구원

김상천 · 박승한

연세대학교

(2000년 3월 27일 받음, 2000년 7월 26일 수정본 받음)

은염 감광성 물질을 이용하여 연속적으로 광밀도가 변화하는 ND filter를 제작하였다. 이러한 filter는 레이저빔의 세기 분포를 변화시켜 원하는 세기 분포를 갖는 레이저빔을 얻을 수 있도록 한다. 광밀도가 filter의 반지름 방향으로 내부에서 외부로 증가하는 형태와 외부에서 내부로 증가하는 두 가지 형태를 만들었다. 원하는 형태의 광밀도를 갖는 filter를 제작하기 위하여 이와 반대의 광밀도를 갖는 마스크를 제작하여야 한다.

OCIS codes : 350.2450, 120.2440.

I. 서 론

광학 실험에서 빛을 제어하기 위한 목적으로 다양한 광학적 filter들이 사용되고 있다. 일정한 파장을 갖는 빛들을 통과시키는 bandpass filter, 빛의 편광을 제어하는 polarizer, 주파수 영역에서 영상을 조절할 수 있는 spatial filter, 빛의 세기를 조절할 수 있는 neutral density filter 등이 있다.

Bandpass filter는 두 개의 blocking band로 둘러 쌓인 일정한 band만의 빛이 통과할 수 있는 filter로 UV, 가시영역, IR 영역에 맞는 filter들이 있으며, 특히 색조 filter는 색 분할이나 대비 증가 등에 많이 사용된다. Polarizer는 빛의 편광 특성을 이용하여 빛의 세기와 편광을 조절하는 filter로 편광판의 방향과 입사되는 빛의 특성에 따라 빛의 세기와 편광 방향이 조절된다. Hologram과 같이 편광 방향에 따라 회절 효율이 크게 변화할 수 있는 곳에 필수적인 광학 부품이다.^[1] Spatial filter의 경우는 렌즈의 초점 면에 위치하고 있는 pinhole과 같이 laser beam의 형태를 좋게 할 수 있는 low pass filter, 주파수 면의 중심부에 불투명 점을 위치시켜 low 주파수를 막아 edge enhance를 시킬 수 있는 high pass filter등이 있다.^[2] ND filter는 회색조를 띄고 있으며 filter를 지나는 빛의 세기를 감소시킨다. 가시영역에서 투과되는 빛의 양의 변화는 매우 작은 값이므로 색의 균형에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이러한 ND filter는 렌즈에 입사되는 빛의 세기가 매우 높을 때 렌즈의 개구를 줄이지 않고 개구 전체를 사용하므로써 depth of field를 줄일 수가 있도록 한다. 또한 편광판과 달리 모든 빛에 대하여 그 세기를 조절할 수 있으므로 입사되는 빛에 대한 정보 손실이 없이 세기만 감소시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다.

연속 ND filter는 빛의 세기 분포를 원하는 만큼 부분적으로 조절하므로써 우리가 원하는 세기 분포를 갖는 레이저빔을 만들 수 있도록 해주는 filter이다. 레이저에서 나온 빛이나, spatial filter등을 통과한 대부분의 레이저빔들은 Gaussian 형

태의 세기 분포를 갖게 되는데, 광학판 제작과 같은 특수한 목적으로 레이저빔을 이용하기 위하여 원하는 형태의 세기 분포를 갖도록 레이저빔을 조절하려고 연속 ND filter를 제작하였다. 이번에 제작된 연속 ND filter는 기존에 있는 연속 ND filter와는 달리 제작이 용이하며 ND filter의 광밀도를 제작된 filter의 지름 방향으로 제작자가 원하는 값을 갖도록 연속적 제어 가능하다는 특성을 갖고 있다.

II. 레이저 빔 Modulation

주로 입체영상 디스플레이에 사용되고 있는 렌티큘라 판이나 Integral Photography용 렌즈 열은 각각 실린더형 렌즈를 늘어놓은 형태와 볼록렌즈의 배열 형태를 띠고 있다. 이러한 광학판을 제작하는 방식 중에 DCG와 같은 감광층 내부에 레이저 빔 세기 분포를 그대로 기록하여 제작하는 방식이 있다. 레이저빔의 세기 분포를 그대로 기록하므로 렌즈 형태를 기록하기 위해서는 레이저빔 세기 분포의 단면을 Gaussian에서 호 형태로 바꿔줘야 한다. 그림 1에 이러한 광학판 제작을 위한 광학적 구성을 나타내었다. 그림 1에서와 같이 레이저에서 나온 빔은 빔 확대기와 spatial filter와 렌즈를 거쳐 Gaussian 형태의 세기 분포를 갖는 수준된 레이저 빔으로 바뀐다. 수준된 레이저빔을 빔세기 분포를 바꾸어 주는 마스크를 통과시켜 세기 분포 단면이 호의 세기 분포가 되도록 한다.^[3] 이러한 마스크는 그 광밀도가 연속적으로 변화하여야 하며 마스크의 흡수분포를 아래와 같이 구할 수 있다.

Filtering된 레이저빔이 수준 렌즈와 제작된 mask를 지나 DCG 판에 기록되는 빔 세기 분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$F(K_x, K_y) = I_0 \iint e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{d^2}\right)} \cdot A(x, y) \cdot e^{-i(K_x x + K_y y)} dx dy \quad (1)$$

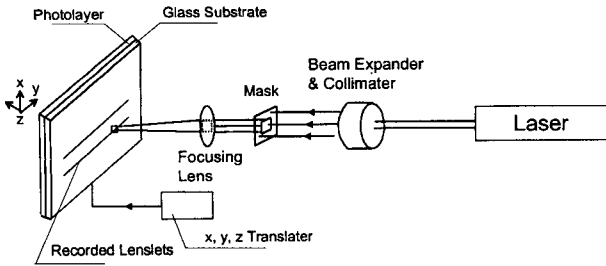


그림 1. 감광판을 이용한 광학소자 제작 시스템.

여기서, K_x, K_y 는 x, y 축으로의 Wavenumber, d 는 초점 지워지는 빔의 크기와 관련된 값이고, $A(x,y)$ 는 마스크의 흡수분포를 나타낸다. 빔의 세기 분포는 x, y 축에 대해 대칭이므로 계산의 편의를 위해 식을 극좌표로 바꾸면

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \rho = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K_x^2 + K_y^2}, \Phi = \arctan\left(\frac{K_y}{K_x}\right)$$

이고, $F(K_x, K_y)$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\rho, \Phi) = I_0 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\infty dr \cdot r \cdot A'(r) \exp[-ir\rho(\cos\theta\cos\Phi + \sin\theta\sin\Phi)] \\ = I_0 \int_0^\infty dr \cdot r \cdot A'(r) I_0 \int_0^{2\pi} d\theta \exp[-ir\rho\cos(\theta - \Phi)] \quad (2)$$

여기서 $A'(r) = e^{-\left(\frac{r^2}{d^2}\right)} \cdot A(r)$ 이다.

식 (2)에 Bessel Function

$J_0(a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[-ia \cos(\theta - \Phi)] d\theta$ 를 도입하면 식 (3)을 얻을 수 있으며

$$F_0(\rho, \Phi) = 2\pi I_0 \int_0^\infty r A'(r) J_0(2\pi r \rho) dr \quad (3)$$

$F_0(\rho, \Phi)$ 에 우리가 원하는 호 형태의 식 $\sqrt{\rho_0^2 - \rho^2}$ 를 대입하고 inverse Fourier transform을 하면 우리가 원하는 마스크의 흡수 분포 $A(r)$ 과 Gaussian 함수가 섞여있는 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$A'(r) = \frac{2\pi}{I_0} \int_0^d \rho \sqrt{\rho_0^2 - \rho^2} J_0(2\pi r \rho) d\rho \quad (4)$$

여기서 d 는 우리가 원하는 마스크의 반지름이다.

그림 2에서 $A'(r)$ 을 볼 수 있다. $A'(r)$ 을 Gaussian 함수로 나누면 정확한 함수를 얻을 수 없지만 $A(r)$ 에 대한 그림 3의 (a)와 같은 numerical한 결과를 얻을 수 있다. 실제적으로 렌티큘라나 IP용 렌즈 배열을 제작하는 경우 spatial filter를 이용하여 zeroth order만을 사용하므로 zeroth order 이후의 값은 무의미하다고 볼 수 있으며, zeroth order 까지 마스크에 대한 numerical 한 결과를 얻으면 그림 3의 (b)와 같다. 그림 3의 (b)와 같은 흡수분포를 갖는 연속 ND filter를 제작 함으로써 Gaussian 분포를 갖는 레이저빔을 구형의 분포를 갖도록 조절할 수 있다.

여기서 레이저빔 세기 분포 조절 시 세기분포와 흡수분포의

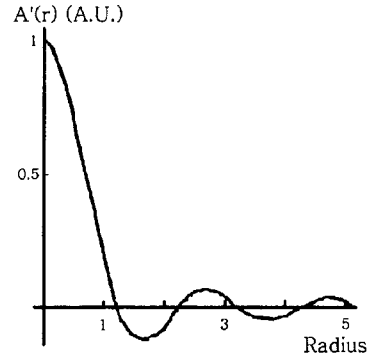
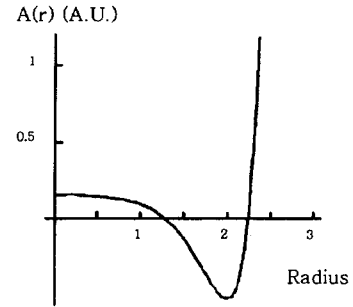
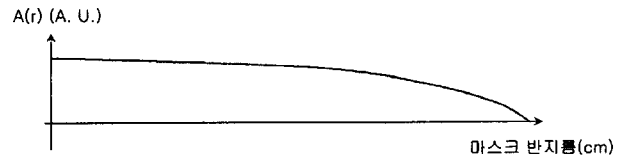


그림 2. 마스크의 흡수분포와 Gaussian 함수가 섞여있는 함수.



(a) $A'(r)$ 을 Gaussian 함수로 나눈 그래프



(b) $A(r)$ 의 Zeroth Order 함수

그림 3. 마스크의 반지름에 대한 Numerical Absorbance Function.

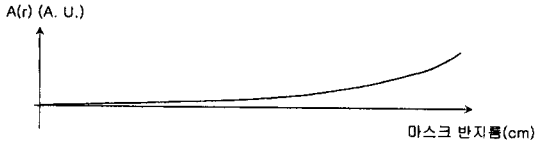
상대적인 관계가 중요하며 흡수되는 빔의 절대량은 중요하지 않으므로 연속 ND filter의 흡수분포와 광밀도 분포의 비를 같다고 볼 수 있다.

III. 은염 건판을 이용한 연속 ND Filter 제작

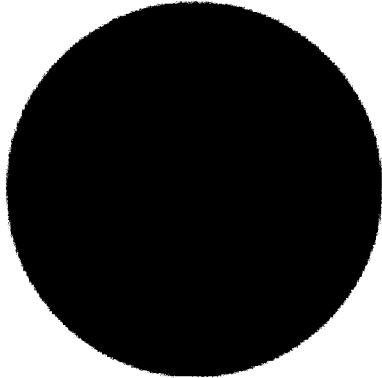
연속적인 광밀도 함수 분포를 갖는 ND filter를 제작하기 위해서는 우리가 원하는 광밀도 함수 분포와 반대의 광밀도 함수 분포를 갖는 마스크를 제작하여야 한다. 그림 3의 (b)가 우리가 원하는 광밀도 함수 분포라고 할 때 그림 4의 (a)는 그와 반대의 광밀도 함수 분포이며, 그림 4의 (b), (c)는 각각에 해당하는 광밀도 함수로 제작된 mask이다.

그림 5에 이렇게 제작된 마스크와 은염 건판을 이용하여 ND filter를 제작하는 과정을 나타내었다.

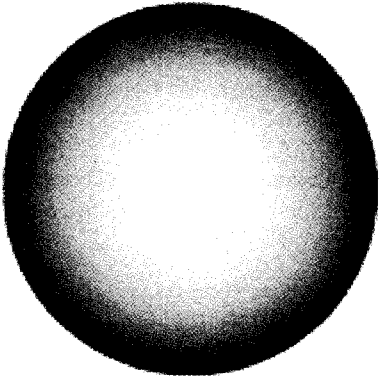
광원으로는 He-Ne gas 레이저를 이용하였으며, 마스크는 잉크젯 전용 용지를 사용하여 제작하였다. 은염 건판은 Agfa 8E75HD-1과 Russia PFG-1을 사용하여 제작하였으며, 연속적으로 변화하는 mask 제작용으로는 grain 크기가 작아 감광도는 다소 낮지만 해상도가 좋은 PFG-1이 유리함을 알 수 있었



(a) 마스크 제작을 위한 역 A(r) 함수



(b) A(r) 함수에 따른 마스크



(c) 역 A(r) 함수에 따른 마스크

그림 4. Filter 제작용 투과함수 및 마스크.

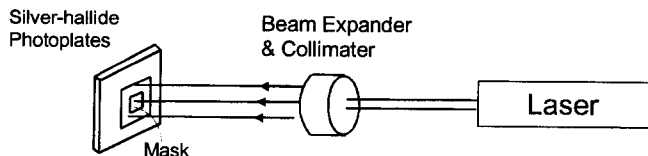
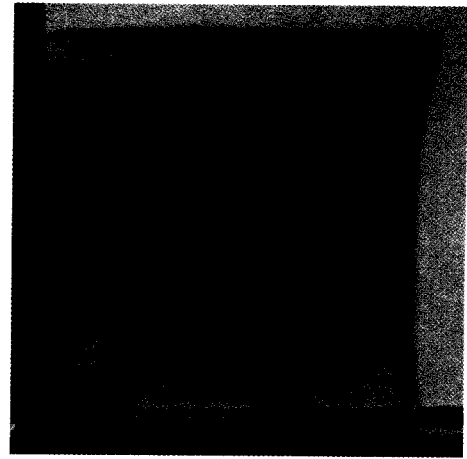


그림 5. 은염 건판을 이용한 ND Filter 제작.

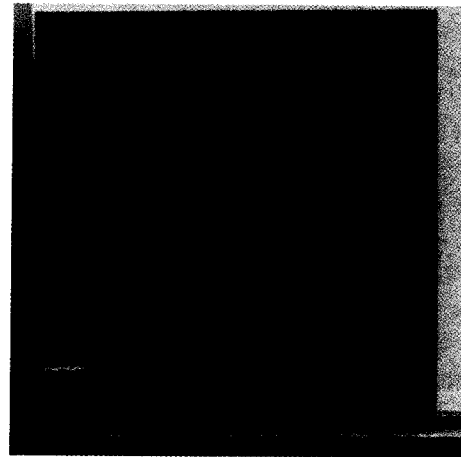
다. 오차를 최소화하기 위하여 마스크 pattern이 그려져 있는 쪽이 감광판 쪽으로 향하도록 하였으며 -마스크의 뒤쪽에서 레이저를 조사-, 입사되는 빛의 양을 균일하게 하기 위해 가능한 최대로 레이저 빔을 확대시켜 사용하여야 하고, 마스크를 감광층에 최대한 밀착시켰다. 은염 감광층은 D-19으로 5분간 현상하였으며, 2분간 20°C의 물에서 세척한 후, KODAK Rapid Fixer를 이용하여 3분간 정착 시켰다.

그림 6(a)에 중심에서 외부로 광밀도가 감소하도록 제작된 연속 ND filter를 볼 수 있으며, 그림 6(b)에 외부에서 중심으로 광밀도가 증가하도록 제작된 연속 ND filter를 볼 수 있다.

각 filter의 위치에 따른 광밀도와 계산 값과의 최대치(a.u. = 1)를 일치시켰을 때 위치에 따른 분포를 그림 7에 나타내었다.



(a) 역 A(r)마스크를 이용하여 제작된 Filter



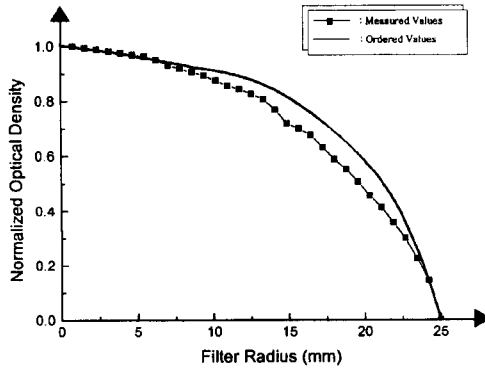
(b) A(r)마스크를 이용하여 제작된 Filter

그림 6. 은염 건판에 제작된 연속 ND Filter.

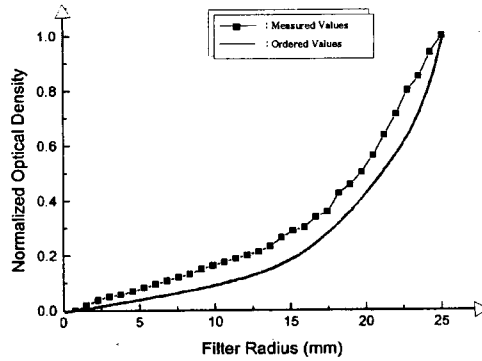
그림 7에서 볼 수 있듯이 연속 ND filter의 광밀도가 filter의 지름 방향으로 연속적으로 변화됨을 알 수 있다. 그림 7의 경우 우리가 원하는 값(계산 값)과 실제로 제작된 filter의 광밀도 분포 값은 약간의 차이가 있기는 하지만 렌티큘라나, 렌즈 배열과 같은 광학 소자 제작 시 허용오차(±20%) 내에 충분히 들어가므로 제작된 연속 ND filter를 빔 세기 변형에 사용하는 데는 큰 문제가 없다. 그림 (b)는 광밀도의 분포가 역으로 제작된 마스크를 이용하여 제작된 filter 이다. 두 경우 모두 filter를 제작하기 위한 마스크와는 약간의 차이가 생기는데 이러한 차이는 마스크를 제작한 종이의 두께나, 종이의 산란, 마스크 제작 시 프린터의 해상도 등에 의한 오차에 기인한다.

IV. 결 론

은염 건판을 이용하여 지름 방향으로 광밀도가 연속적으로 변화하는 ND filter를 제작하여 레이저빔의 세기 분포를 조절할 수 있었다. 원하는 분포의 광밀도를 갖도록 하기 위하여 원하는 광밀도 분포와는 반대가 되는 광밀도 분포를 갖는 마스크를 제작하여 그 광밀도 분포 역의 값을 은염 건판에 기록



(a) 역 $A(r)$ 함수로 제작된 Filter의 위치에 따른 Normalized Optical Density



(b) $A(r)$ 함수로 제작된 Filter의 위치에 따른 Normalized Optical Density

그림 7. 연속 ND Filter의 Optical Density 분포.

하는 방식이다. 은염 건판은 Russia의 PFG-01을 사용하였으며, 현상, 정착과정을 거쳐 filter를 제작하였다. 본 기술의 장점은 원하는 광밀도 분포를 갖는 연속적인 ND filter를 손쉽게 제작할 수 있다는 것이며, 광밀도 분포의 오차가 그리 크지 않기 때문에 범용 연속ND filter로 사용 가능하다. Filter 제작을 위한 마스크의 재질을 필름과 같이 균일한 분포를 갖는 물질을 이용하고, 노광하는 레이저의 세기 분포를 전체적으로 일정하게 할 수 있다면 좀 더 나은 성질의 filter를 제작할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Edmund Industrial Optics, *2000 Optics and Optical Instruments Catalog*, pp. 70-82.
- [2] Springer-Verlag, *Optics and Lasers Including Fibers and Integrated Optics*, 2nd edition, pp. 134-136, 1984.
- [3] H. S. Lee, D. H. Cho, Y. J. Choi, J. Y. Son, and S. H. Park, *Japanese J. Appl. Phys.* **38(4A)**, 1979-1983 (1999).
- [4] McGraw-Hill Company, *Introduction to Fourier Transform*, 2nd edition, pp. 4-19.

Fabrication of neutral density (ND) filter using silver halide photo film

Hyuk-Soo Lee and Jung-Young Son

Image Media Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

Sang-Chun Kim and Seung-Han Park

Dept. of Physics, Yon-Sei Univ., Seoul 120-749, Korea

(Received March 27, 2000, Revised manuscript received July 26, 2000)

Continuous ND filters are fabricated on the silver halide photoplates. These filters enable us to get intensity modulated laser beam. Two kinds of continuous ND filters are fabricated. Optical density of one filter is increased radically and that of the other is decreased. In order to get a filter having desirable optical density, a mask which has reversed optical density has to be made.

OCIS codes : 350.2450, 120.2440.