

홀로그래픽 반사형 간섭필터의 제작

정만호 · 송재봉

한국표준과학연구원 광학연구실

(1991년 10월 9일 받음)

반사형 홀로그래픽 광학소자인 간섭필터를 제작하였다. 감광재료는 dichromated gelatin (DCG) 필름을 사용하였으며, 고성능의 간섭필터를 얻기 위하여 기존의 DCG 처리 방법을 수정하여 소개하였다. 제작된 간섭필터의 중심 파장에서의 최대 회절효율은 93%, 이때 대역폭은 17 nm 였다. 노출량에 따른 간섭필터의 중심파장과 대역폭의 변화를 측정하였으며, 이에 따른 DCG 필름의 특성을 분석하였다.

I. 서 론

홀로그래픽 광학소자 (HOE)는 기계적으로 가공하여 제작하지 않고 홀로그래피 방법을 사용하여 제작된 렌즈, 간섭필터, 회절격자 등의 광학소자로서, 많은 연구가 진행되고 있다. 이는 HOE가 갖고 있는 독특한 특성 때문인데, 상용의 광학소자가 일반적으로 표면 가공이나 진공 증착 등의 과정을 통해서 얻어지므로 제작이 어려운 반면, HOE는 감광재료상에 간섭무늬를 감광시킴으로써 얻어지므로 제작이 간편하며 또한 한개의 HOE로써 다기능을 얻을 수 있기 때문이다.

최근에는 또한 HOE 제작에 필요한 감광재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 홀로그래피 감광재료에는 여러가지가 있으나, 몇년 동안의 많은 연구 결과 홀로그래픽 광학소자 제작용 감광재료로써는 dichromated gelatin (DCG)이 가장 우수한 것으로 밝혀지고 있다.^[1,2] 그 이유는 노출 정도가 적당하고, 높은 회절효율값을 얻을 수 있으며, grainless 재료이므로 신호 대 잡음비가 높으며, 환경적인 안정성이 좋다는 특징 때문이다. 또한 DCG는 원하는 특성을 얻지 못했을 경우 재처리를 함으로써 해결할 수 있다는 특징이 있다.

DCG 필름을 얻는 방법에는 여러가지가 있는데, 가장 간단한 방법은 은염 사진건판을 사용하는 것으로 은염을 젤라틴에서 제거하여 젤라틴만 남게한 후에 감광제인 ammonium dichromate 용액을 첨가하여 제작하는 방법이다. 그러나 상용되는 은염 사진건판은 원칙적으로 DCG 용으로 만들어진 것은 아니기 때문에 미세한 산

란광량, 높은 회절효율값 등, DCG 고유의 홀로그래픽 특성을 얻기 위해서는 아주 섬세한 처리 과정이 필요하다. 이러한 은염 사진건판을 사용하여 DCG 홀로그래픽을 형성하는 방법 및 형성 구조에 관한 논문이 몇편 소개되어 있다. Chang과 Leonard^[3]는 Kodak 649F 사진건판으로 DCG 필름을 제작하여 홀로그래픽 광학소자로서의 특성을 연구하였다. 그러나 이들의 방법은 DCG 필름 처리 과정이 너무 많고 약 12 시간 정도가 소비되므로 시간이 너무 많이 소비된다는 단점이 있다. 최근에는 Kodak 649F 사진건판 및 Agfa 8E75HD 사진건판을 사용하여 HOE를 제작하는 방법을 개선하여 짧은 시간에 높은 효율을 갖는 처리 방법들이 투과형 HOE 분야에서 소개되었다.^[4]

본 논문에서는 Kodak 649F 사진건판을 사용하여 DCG 필름을 얻은 후 이 필름을 감광재료로 해서 반사형 간섭필터를 제작하였으며, 짧은 처리시간과 높은 부풀림값을 얻을 수 있는 DCG 처리 방법을 고안하였다. 특히 간섭필터의 특성을 살펴보기 위하여 노출량에 따른 회절효율 및 중심 파장 그리고 대역폭의 변화를 측정하였다. 또한 이들의 결과를 간섭필터 제작을 위한 처리 과정과 비교하면서 DCG의 특성을 연구하였다.

II. 홀로그래픽 간섭필터의 기본 이론

홀로그래픽 필터는 여러 응용 분야가 있는데 그 대표적인 것으로는 레이저에 의한 눈 보호용 필터, 라만 산란광 측정용을 위한 필터, 그리고 간섭필터 등이 있다. 이들 용도에 따라 홀로그래픽 필터를 제작하는 방법도

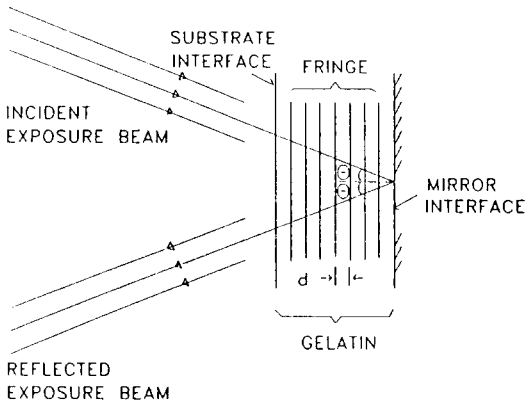


Fig. 1. Schematic diagram of recording reflection hologram.

여러가지가 있는데, 10-20 nm의 대역폭을 갖는 간섭필터의 제작에는 일반적으로 간섭무늬가 감광재료면에 평행하게 기록되는 surface-conformal fringe 홀로그래프를 형성하는 방법이 사용되고 있다. 이 홀로그래프는 Fig.1 과 같이 입사파와 거울에서 반사되어 나온 반사파가 간섭하여 만들어지며 이때 간섭무늬는 젤라틴 표면에 평행한 방향으로 형성되며 홀로그래프의 공간주파수는 입사파의 파장과 입사각에 따라 결정된다.

이러한 홀로그래프의 특성은 젤라틴의 간섭무늬 간격 d , 홀로그래프의 평균 굴절율 N_o , 홀로그래프의 굴절율 변조율 Δn 으로 나타낼 수 있다. 젤라틴 표면으로부터 깊이 x 되는 지점의 굴절율 $N(x)$ 는 식 (1)과 같다.

$$N(x) = N_o + \Delta n \cos \frac{2\pi x}{d} \tag{1}$$

홀로그래픽 간섭필터의 주요 변수로는 입사각이 θ 일 때 필터의 중심파장 $\lambda(\theta)$ 와 대역폭 $\Delta\lambda$ 이다. 입사각이 0° 일 때 필터의 중심파장 $\lambda(0)$ 는

$$\lambda(0) = 2N_o d \tag{2}$$

이며, 입사각 θ 가 증가하면 중심파장은 식 (3)과 같이 짧은 파장으로 이동한다.

$$\lambda(\theta) = \lambda(0) \frac{N_o^2 - \sin^2 \theta}{N_o} \tag{3}$$

Fig.1의 구조로 얻어진 홀로그래프의 공간주파수 f_s 는 식 (4)와 같이 표현되며

$$f_s = \frac{1}{d} = \frac{2N_o \cos \theta}{S\lambda_o} \tag{4}$$

이때 N_o 는 노출하기 전의 DCG 필름의 평균 굴절율, λ_o 는 입사파의 파장, S 는 처리 과정 후와 노출시의 젤라틴의 두께 비를 나타낸다.

식 (3)과 식 (4)로부터 홀로그래프 기록 과정과 재생시 필터의 중심파장 사이에는 식 (5)와 같은 관계가 성립한다.^[5]

$$\frac{\lambda(0)}{\lambda_r} = \frac{SN_o}{N_r \cos \theta} \tag{5}$$

협대역 간섭필터를 제작하는 경우 재생시의 필터의 중심파장과 기록 파장 사이의 차이는 결국 두께의 비인 S 에 좌우되는 것을 알 수 있다. 협대역 간섭필터의 경우 일반적으로 노출시의 평균 굴절율과 처리과정 후의 평균 굴절율의 차이는 무시할 정도로 대단히 작지만 대역폭이 큰 경우에는 둘 사이에 굴절율 차이가 있으므로 다음과 같은 관계식을 사용하여야 한다.

$$N_o = N_r - \Delta N \tag{6}$$

III. 실험

본 연구에서는 Kodak 649F 사진건판을 사용하여 DCG 필름을 얻은 후 이 필름을 사용하여 반사형 간섭필터를 제작하였으며, 이때 새로운 DCG 필름 처리 방법을 개발하였다.

코닥 사진건판의 젤라틴 두께는 처리과정중 변하게 된다. 이러한 두께의 변화는 젤라틴의 부풀림 정도에 따라 결정되는데 이를 부풀림값 k 라 하며 식 (7)과 같이 표시 할 수 있다.

$$k = (W - W_o) / W_o (\%) \tag{7}$$

여기서 W_o 는 건조상태의 젤라틴 필름의 무게이며, W 는 부풀어 오른 젤라틴 필름의 무게이다. 이 부풀림 값 k 는 젤라틴 필름의 경화 정도를 나타내며 이 값이 HOE의 굴절율 변조 값을 결정하는 중요한 요소가 된다.

실험 과정으로 먼저 코닥 사진건판을 정착액 속에 담가 은염을 제거하였다. 젤라틴 필름을 얻는 전처리 과정을 거친 젤라틴의 부풀림 값은 200 이었다. 전처리 과정에서 형성된 젤라틴 필름 속의 감광제 첨가는 젤라틴 필름을 농도가 10%인 $(NH_4)_2Cr_2O_7$ 에 담금으로써 얻어진다. 이제 DCG 필름을 노출 시킴으로써 HOE를 형성하게 되는데, 평면 거울에 젤라틴 필름 면을 부착 시킨 후 DCG 필름에 아르곤 레이저 ($\lambda = 488 \text{ nm}$)를 입사시켜서 반사형 간섭필터를 형성할 수 있다. 이때 젤라틴을 통과한 빛과 뒤

Table 1. Simplified fabrication procedures of DCG reflection HOE with Kodak 649F plates.

1. Soak in hardening fixer for 10 min
2. Wash in running water for 10 min
3. Soak in hot water at 50°C
4. Soak in 10% ammonium dichromate solution (with 1% of Kodak Photo-Flo 200 for 5 min)
5. Bake at 70°C for 10 min
6. Exposure (Ar ⁺ laser)
7. Soak in 0.5% ammonium dichromate solution for 5 min
8. Soak in hardening fixer for 5 min
9. Wash in running water for 10 min
10. Dehydrate in 50% isopropyl alcohol for 5 min
11. Dehydrate in 100% isopropyl alcohol for 5 min
12. Bake at 100°C for 10 min

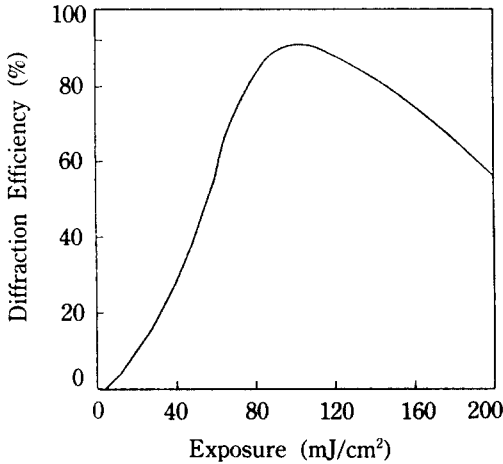


Fig. 2. Diffraction efficiencies of the DCG reflection filters with different exposure.

면에 부착시킨 거울면에서 반사되어 나오는 빛이 DCG 필름 면에서 만나게 되어 간섭을 일으켜 필름면과 평행한 간섭무늬를 형성한다. Table 1에 처리과정을 나타내었다.

IV. 결과 및 논의

Fig. 2는 노출량에 따른 반사형 간섭필터의 회절효율을 나타내고 있다. 최대 회절효율은 노출이 100 mJ/cm² 일 때 93% 정도였다. Fig. 3은 노출이 100 mJ/cm² 일 때 얻어진 간섭필터의 파장 특성을 나타내는데, 이 값은 Cary 17D 분광광도계를 사용하여 분광투과율을 측정하였다. 중심파장은 443 nm 였으며 half-power 대역폭은

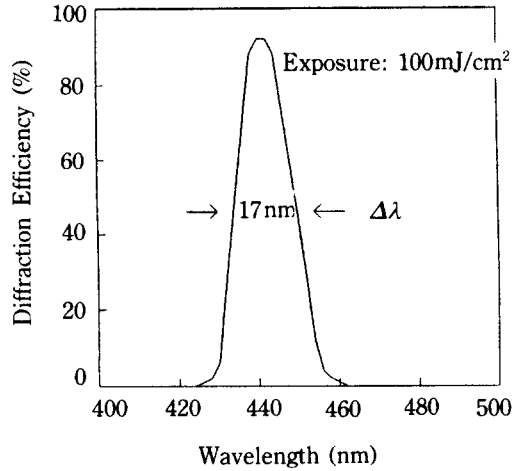


Fig. 3. Spectral response of DCG reflection filter.

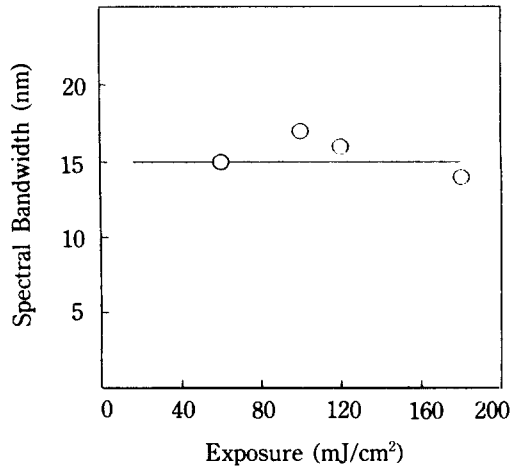


Fig. 4. Effect of exposure on the spectral bandwidth of the DCG reflection filter.

17 nm 였다. 중심 파장이 홀로그래프의 기록파장 보다 짧은 파장 쪽으로 이동한 이유는 식 (5)에 나타나 있는 것처럼 홀로그래프 처리 후와 처리 전의 젤라틴의 두께 비인 S 가 1 보다 작아졌기 때문이다. 실제로 처리과정에 따라 젤라틴의 두께 변화를 살펴 본 결과 노출이 끝난 후 물에 의한 현상 후에는 필름이 부풀어 올라 재생 파장이 초록색 파장쪽으로 이동하였으나 알콜에 의한 현상 후에는 원래의 필름 두께로 복원되었으며, 온도 100°C 에서 홀로그래프를 구운 후에는 최종적으로 젤라틴의 두께가 줄어들어 파장이 아래쪽으로 이동하게 되었다. Fig.

4는 노출량에 따른 필터의 대역폭 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 대역폭은 최대 회절효율 값을 갖는 지점에서 가장 넓어지고 있다. 이러한 사실은 Kogelnik의 coupled-wave 이론에 잘 나타나 있으며 실제로 Kubota의 설명과도 잘 일치하고 있다.^[6] 이상의 결과를 분석해 볼때 원하는 중심파장과 대역폭을 얻기 위해서는 노출과정에서 노출량을 조절하여야 하며, 또한 최종적으로 baking 하는 과정을 포함한 DCG 처리 과정에서 세심한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

결 론

홀로그래픽 광학 소자 개발에 있어 가장 중요한 점은 반 영구적으로 쓸 수 있는 감광재료의 개발과 그 처리 방법의 연구에 있다. DCG는 홀로그래픽 광학 소자의 제작에 있어 가장 좋은 감광재료로 알려져 있으나 아직 까지도 그 처리 방법에 있어서 미진한 가운데 있다. 본

연구에서는 DCG 감광재료를 형성하여 반사형 홀로그래픽 광학 소자인 간섭필터를 제작하였는데, 새로운 DCG 처리방법을 개발하여 사용한 결과 회절효율이 93%, 대역폭은 17 nm 였다. 본 연구에서 개발된 간섭필터는 기존의 간섭필터에 대응될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. H. Lin, Appl. Opt. **8**, 963 (1969).
- [2] R. K. Curran and T. A. Shankoff, Appl. Opt. **9**, 1651 (1970).
- [3] B. J. Chang and C. D. Leonard, Appl. Opt. **18**, 2407 (1979).
- [4] J. Oliva, P. G. Boj and M. Pardo, Appl. Opt. **23**, 196 (1984).
- [5] J. M. Tedesco, Optical Engineering, **28**, 609 (1989).
- [6] T. Kubota, Appl. Opt. **25**, 4141 (1986).

Development of Holographic Reflection Filters

Man Ho Jeong and Jae Bong Song

*Optics Laboratory, Korea Research Institute of Standards & Science
P.O.Box 3, Taedok Science Town, Taejon 305-606, Korea*

(Received: October 9, 1991)

Reflection holographic filters are developed. Dichromated gelatin films are used for the recording material, and a modified processing method of obtaining high-quality filters is developed. The diffraction efficiency and bandwidth of the fabricated holographic filter is 93% and 17 nm, respectively. The effect of exposure on the spectral bandwidth and center wavelength of the developed filters are measured, and the characteristics of the dichromated gelatin film are investigated from these results.