

홀로그래픽 반사형 필터의 중심파장과 대역폭의 조절방법

정만호 · 한영수

한국표준과학연구원 광학연구실

유연석

청주대학교 물리광학과

(1993년 5월 17일 받음)

홀로그래픽 감광재료인 dichromated gelatin 필름을 사용하여 반사형 간섭필터를 제작하였다. 반사형 홀로그래픽 광학소자의 경우 중요한 파라미터인 회절효율, 중심파장, 그리고 대역폭의 특성을 실험을 통하여 설명하고 이들의 값을 조절하기 위한 방법을 제시하였다.

I. 서론

홀로그래픽 광학소자(HOE)는 기계적으로 가공하여 제작하지 않고 홀로그래픽 방법을 사용하여 제작된 렌즈, 간섭필터, 회절격자 등의 광학소자로서 많은 연구가 진행되고 있다. HOE는 회절형 소자이지만 기능상 굴절형, 반사형 등의 역할을 하므로 홀로그래픽 렌즈, 거울 및 필터 등의 재래식 광학소자를 대체하고 있다. 특히 HOE는 수차가 거의 없으며 회절효율이 대단히 높아서 레이저 및 파장 대역폭이 작은 광원을 사용하는 경우 좋은 성능을 발휘한다. 따라서 레이저 프린터 또는 바코드 판독기 등의 레이저 스캐너로써 많이 사용되고 있으며 복제가 가능하여 대량생산할 경우 경제성이 대단히 높다. HOE의 응용분야는 분광광도계 또는 단색화장치 등과 같은 고정밀 광계측기기의 분광소자로 사용될 뿐 아니라 신경회로망의 광학소자, 자동차 또는 비행기용 HUD(Head Up Display)장치로 까지 그 응용 분야가 확대되고 있다.

최근에는 또한 HOE 제작에 필요한 홀로그래픽 감광재료의 개발 및 처리방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 홀로그래픽 감광재료에는 여러가지가 있으나, HOE 제작에 필요한 요건을 갖춘 감광재료를 사용해야 한다. 그 요건으로는 복제가 가능할 것, 높은 회절효율을 얻을 수 있을 것, 그리고 반영구적으로 사용할 수 있을 것

등이다. 이러한 요건을 갖춘 감광재료로 DCG(Dichromated Gelatin)가 아주 우수한 것으로 밝혀져 많이 사용되고 있다.^[1-2] DCG는 노출정도가 적당하고, 높은 회절효율을 얻을 수 있으며, grainless 재료이므로 신호 대 잡음비가 높다.

반사형 홀로그램을 HOE로 사용할 때에는 분광대역폭, 중심파장, 그리고 회절효율 등을 고려해야 하며 이들 파라미터들은 젤라틴의 두께, 노출량, 그리고 젤라틴의 경화 정도에 따라 달라진다. 원하는 대역폭은 젤라틴의 두께를 조절하면 얻을 수 있다. 그러나 중심파장은 젤라틴의 경화정도, 노출량, ammonium dichromate 용액의 농도, 그리고 처리과정에서의 온도에 따라 달라지므로 이들을 고려하여야 원하는 값을 얻을 수 있다.^[3] 일반적으로 홀로그래픽 반사형 필터의 재생된 중심파장은 정상적인 처리과정을 거친 경우 기록할 때 사용한 파장보다 약 20% 정도 긴 파장을 나타낸다.^[4] 홀로그래픽 필터의 중심파장을 짧은 쪽으로 이동시키기 위하여 제작된 홀로그램을 높은 온도에서 굽는 방법을 사용하기도 하며 서로 다른 두 종류의 젤라틴을 섞어 젤라틴 필름을 얹어 처리하는 방법도 있다.^[5]

본 논문에서는 대역폭 20 nm, 회절효율 93% 이상을 유지하며 중심파장 값을 쉽게 조절할 수 있는 DCG 처리방법을 사용하였으며 특히 중심파장을 조절하는 방법으로는 앞서 언급한 방법 중에서 감광제인 ammonium dichromate 용액의 농도를 조절하는 방법을 사용하였다.^[6]

* 본 연구는 과기처의 특정연구비로 수행되었음.

또한 최종 처리과정 후에 원하는 중심파장 값과 다른 값을 얻게 되는데 이때 중심파장 값을 교정하는 방법을 제시하였다.

II. 실험

본 연구에서는 실험을 위하여 Kodak 649F 사진건판을 사용하는 방법과 젤라틴을 유리판에 직접 코팅한 두 가지 종류의 DCG 필름을 사용하였다. Kodak 649F 사진건판을 사용하여 DCG 필름을 얻는 방법으로는 먼저 코다크 사진건판을 경화제가 3.5% 포함된 정착액 속에 담가 은염을 완전히 제거하였다. 젤라틴 필름을 온도가 20°C인 물에 10분간 담근 후에 젤라틴의 부풀림 정도를 크게하기 위해서 온도가 50°C인 뜨거운 물에 10분간 처리하였다. 감광제는 젤라틴에 ammonium dichromate를 첨가하였으며 실험을 위하여 3%, 5%, 그리고 10%의 감광제를 섞은 필름을 각각 준비하였다. 감광제를 첨가한 젤라틴 필름들은 70°C에서 10분간 baking하였다.^[7] DCG 필름을 얻는 또 다른 과정은 먼저 젤라틴을 깨끗한 유리판에 코팅하여 얻게 되는데 본 실험에서 사용한 젤라틴은 bloom strength가 200인 Rousselot 젤라틴으로 3%의 젤라틴 용액을 중력법을 사용하여 코팅하였다. 젤라틴의 두께는 Kodak 649F 필름과 동일한 15 μm로 하였다. 젤라틴을 코팅하여 12시간 정도 자연건조시킨 후 이들 필름을 3.5%의 경화제가 포함된 정착액 속에 담가 젤라틴을 경화시켰다. 이들 필름을 실험을 위하여 역시 온도가 각각 다른 감광제에 담근 후에 70°C에서 10분간 baking 하였다. 이제 DCG 필름을 노출시킴으로써 HOE를 제작하게 되는데, 평면거울에 젤라틴 필름면을 부착시킨 후 DCG 필름에 아르곤 레이저($\lambda=488\text{ nm}$)를 입사시켜서 반사형 간섭필터를 형성할 수 있다. 이때 젤라틴을 통과한 빛과 뒷면에 부착시킨 거울면에서 반사되어 나온 빛이 DCG 필름 면에서 만나게 되어 간섭을 일으켜 필름면과 평행한 간섭무늬를 형성하게 된다. 표 1에 Kodak 649F 필름을 사용한 DCG 처리 과정을 나타내었다.

III. 결과 및 논의

그림 1은 DCG 필름 형성시에 첨가한 감광제인 ammonium dichromate의 농도에 따라 얻어진 반사형 필터의 재생된 중심파장을 나타낸다. 실선은 Kodak 649F 사진건판을 사용하여 얻은 DCG 반사형 필터이며 점선은 Rousselot 젤라틴을 사용하여 얻은 DCG 반사형 필터의

표 1. Modified fabrication procedures of DCG reflection HOEs with Kodak 649F plates.

1. Soak in Kodak hardening fixer for 10 min.
2. Soak in distilled water at 20°C for 10 min.
3. Soak in hot water at 50°C for 10 min.
4. Soak in X% ammonium dichromate solution (with 1% of Kodak Photo-Flo 200) for 5 min.
5. Bake at 70°C for 10 min.
6. Exposure (Ar-ion laser)
7. Soak in 0.5% ammonium dichromate solution for 5 min.
8. Soak in Kodak hardening fixer for 5 min.
9. Wash in running water at 20°C 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.

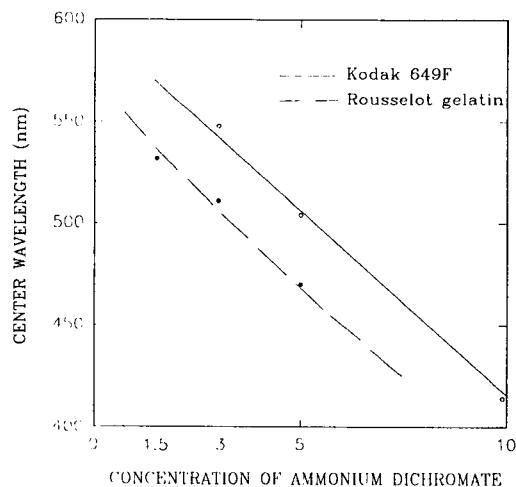


그림 1. Reconstructed center wavelength of DCG reflection filters derived from Kodak 649F plates (solid line) and from Rousselot gelatin (dashed line).

값이다. 이 경우 노출량은 모두 100 mJ/cm²로 통일 하였으며 회절효율 값은 모두 90% 이상이었다. 그림 1에서 알 수 있듯이 감광제의 농도가 낮은 경우에는 재생된 중심파장이 기록에 사용한 파장 ($\lambda=488\text{ nm}$) 보다 긴 파장으로 이동하였으며 감광제의 농도가 증가함에 따라 중심파장이 짧은 파장 영역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이것은 감광제의 농도가 증가함수록 젤라틴의 경화정도를 크게 만들어 결과적으로 젤라틴의 수축을 초래한 결과이다. 이러한 설명을 뒷받침하기 위해서 홀로

그래픽 반사형 필터에 관한 식을 살펴보기로 한다.

홀로그램의 특성은 젤라틴의 두께 t , 간섭무늬의 간격 d , bulk 굴절율 N_o , 굴절율 변조율 ΔN 으로 나타낼 수 있다. 젤라틴 표면에서 깊이 x 되는 지점에서의 굴절율 $N(x)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

홀로그래픽 HUD에서 중요한 파라미터는 중심파장이므로 이에 관한 식을 유도하기로 한다. 반사형 홀로그래픽 필터에서 중심파장 $\lambda_c(0)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_c(0) = 2N_o d \quad (2)$$

홀로그래픽 필터는 다른 multilayer 필터와 같이 입사각이 증가하면 중심파장이 짧은 쪽으로 이동한다.

$$\lambda_c(\theta) = \lambda_c(0) \frac{\sqrt{N_o^2 - \sin^2 \theta}}{N_o} \quad (3)$$

이때 $\lambda_c(\theta)$ 는 입사각이 θ 일 때의 중심파장이며, $\lambda_c(0)$ 는 입사각이 0인 경우의 중심파장, 또한 N_o 는 홀로그램의 평균 굴절율이다.

화학처리 과정을 거친 후의 홀로그램의 공간주파수는 식 (4)와 같다.

$$f_s = \frac{1}{d} = \frac{2N_c \cos \theta_e}{S \lambda_o} \quad (4)$$

여기서 N_c 는 홀로그램을 처리하기 이전의 평균굴절율, λ_o 는 기록하는 레이저의 파장, θ_e 는 젤라틴 내에서의 기록각도이며 S 는 처리과정 후의 젤라틴의 두께와 처리하기 전의 젤라틴의 두께의 비를 나타낸다.

식 (2)와 식 (4)에서

$$\frac{\lambda_c(0)}{\lambda_o} = \frac{SN_o}{N_c \cos \theta_e} \quad (5)$$

이 된다. 식 (5)에서 반사형 홀로그래픽 필터의 재생 중심파장은 기록각도 θ_e 가 0° 인 경우, 또한 처리 후의 굴절율 변조 값이 거의 같은 경우 젤라틴의 두께비 S 에 의해 많이 좌우되는 것을 알 수 있다. 그림 1에서 Kodak 649F 전판을 사용하여 DCG 홀로그래픽 필터를 제작한 경우 중심파장은 감광제의 농도가 3%, 5%, 그리고 10%인 경우에 각각 548 nm, 504 nm, 414 nm였다. 이 값을 식 (5)에 대입하면 젤라틴의 두께비 S 는 감광제의 농도가 3%, 5%, 그리고 10%인 경우에 각각 1.123, 1.033, 0.848의 값을 나타냈다. 또한 Rousselot 젤라틴을 사용하여 제

작된 필터의 경우 중심파장은 감광제의 농도가 1.5%, 3%, 그리고 5%인 경우에 각각 532 nm, 511 nm, 470 nm였다. 따라서 젤라틴의 두께비 S 는 각각 1.090, 1.047, 그리고 0.963인 것을 알 수 있다. 이제 젤라틴의 두께비 S 를 구한 후 실제로 원하는 중심파장을 얻기 위해서는 식 (5)에 젤라틴의 두께비 S 를 대입하여 기록각도 θ_e 를 구하고, 이때 얻어진 각도로 기록하면 된다. 그러나 일반적으로 홀로그래픽 반사형 간섭필터의 경우에는 홀로그램 면에 수직으로 빛이 입사하도록 하여 사용하는 경우가 많으므로 감광제의 농도를 조절하여 정확한 중심파장을 얻는 것이 바람직하며 Head Up Display 등은 50° 이상의 입사각이 필요하므로 기록각도를 변화시켜서 제작하는 것이 바람직하다. 그럼 2는 Kodak 649F 전판을 사용한 경우 노출량에 대한 DCG 필름의 감도 특성을 실험한 것이다. 제작된 홀로그래픽 반사형 필터는 감광제의 농도가 낮을수록 다소 노출량이 높은 값에서 최대 회절효율 값을 나타냄을 알 수 있다. 감광제의 농도가 5%, 10%인 경우에는 노출량이 100 mJ/cm^2 근처에서 최대 회절효율 값을 보였으며 노출곡선도 비슷한 모양을 나타내고 있다. 그러나 감광제의 농도를 3%로 낮추게 되면 최대 회절효율 값을 얻기 위한 노출량이 150 mJ/cm^2 정도로 높아졌으며 노출곡선도 다소 형태가 변한 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 감광제의 농도에 따라 기록재료의 감도가 달라지기 때문이다. 실제로 감광제의 농도가 낮은 경우 처리 과정에서 얻을 수 있는 젤라틴의 경화 정도가 작으므로 높은 회절효율을 얻기 위해서는 노출량을 증가

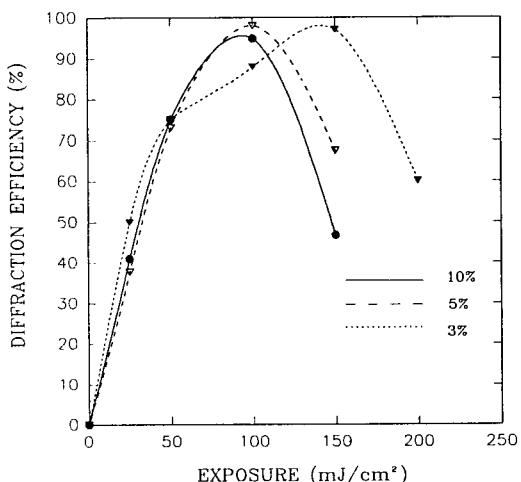


그림 2. Diffraction efficiency of DCG holographic reflection filters vs exposure for various concentration of ammonium dichromate.

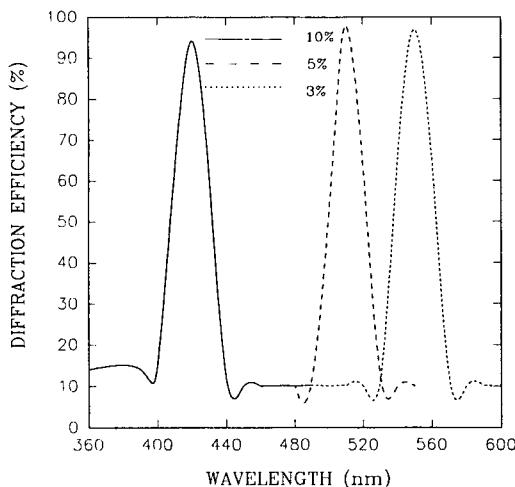


그림 3. Spectral response of DCG holographic reflection filters for various concentration of ammonium dichromate.

시켜 굴절율 변조값을 크게 해야 한다. 그림 3은 노출량의 변화에 따른 중심파장의 이동을 측정한 것이다. 곡선의 추이를 살펴보면 전체적으로 노출량이 증가하면서 중심파장이 짧은 쪽으로 이동하고 있으며 감광제의 농도를 변화시켜도 같은 경향을 나타내고 있다. 이는 노출량이 증가 할수록 젤라틴의 굴절율 변조 값의 크기가 조금씩 증가하면서 회절효율을 증가시킴과 동시에 중심파장에도 영향을 미침을 나타낸다. 이러한 사실을 뒷받침하기 위해서 Kogelnik의 coupled-wave 이론을 살펴보기로 한다.^[8]

반사형 홀로그램의 경우 회절효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = 1 / \{ (1 + (1 - \xi^2/V^2) \sinh^2(V^2 - \xi^2)^{1/2} \} \quad (6)$$

여기서, $V = \pi \Delta N d / \lambda_c(0) (C_R C_S)^{1/2}$

$$\xi = K [\cos(\phi - \theta) - (K/4\pi\Delta N) \lambda_c(0)] d / 2C_s$$

$$C_R = \cos \theta$$

$$C_S = \cos \theta - (K/\beta) \cos \phi$$

$$K = 2\pi/d$$

$$\beta = 2\pi N_o/d$$

이여 $\lambda_c(0)$ =재생파장, N_o =홀로그램 기록재료의 bulk 굴절율, ΔN =굴절율 변조의 크기, d =회절격자의 간격, K =회절격자 백터, β =전파상수이다. 여기서 $\theta = \theta_e + \Delta\theta$ $\lambda = \lambda_o + \Delta\lambda$ 으로 나타낼 수 있는데, θ_e 는 브래그 기록각도, λ_o 는 브래그 각도에서 기록하는 레이저 파장이다.

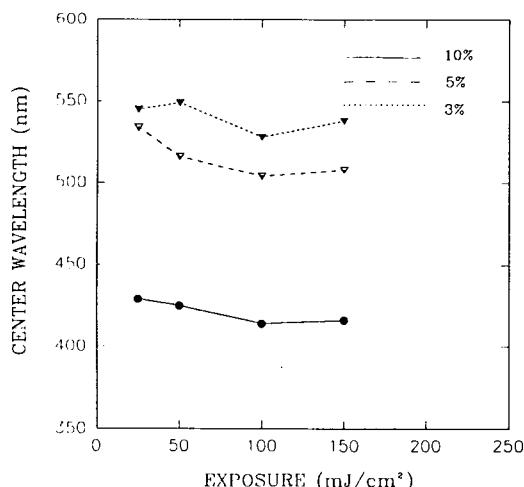


그림 4. Reconstructed center wavelength of DCG holographic reflection filters vs exposure for various concentration of ammonium dichromate.

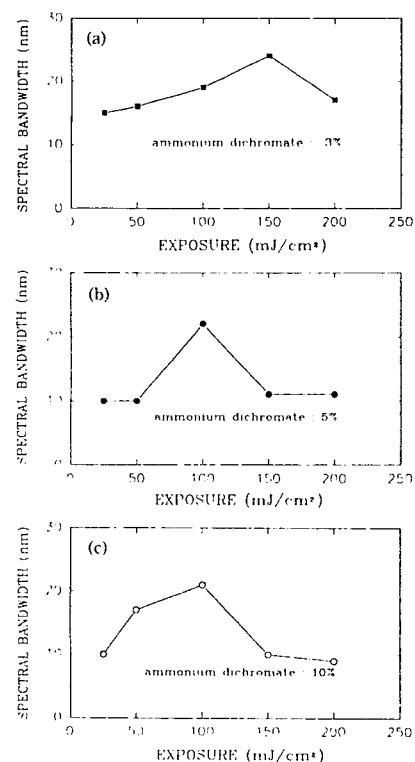


그림 5. Spectral bandwidth of DCG holographic reflection filters vs exposure for various concentration of ammonium dichromate. (a) 3%, (b) 5%, and (c) 10%.

브래그 조건 ($\Delta\theta=0$) 및 간섭무늬 면이 홀로그램 면에 평행일 경우 ($\phi=0$) 식 (6)은 식 (7)과 같은 회절효율식으로 표현된다.

$$\eta = \tanh^2 (\pi \Delta N d / \lambda_c(0) \cos \theta_i) \quad (7)$$

식 (7)에서 우리는 회절효율 값이 노출량을 증가시킴에 따라 높아지는 이유가 굴절율 변조의 크기가 증가하기 때문임을 알 수 있으며, 이때 중심파장은 반대로 감소하게 되어 그림 3과 같은 결과를 나타내게 된다. 식 (7)에서 회절효율 값을 알고 재생 중심파장의 값을 알고 있다면 입사각 θ_i 가 0° 인 경우 굴절율 변조 값 ΔN 을 구할 수 있다. 그림 4는 노출량에 따른 분광대역폭 값의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 대역폭은 노출량이 증가하면서 증가하다가 최대 회절효율 값을 나타내는 노출량 지점에서 가장 큰 대역폭을 갖게 되며, 이 지점을 지나면서 대역폭은 다시 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 감광제의 농도를 변화시킴에 따라서 같게 나타나고 있으며 이러한 사실은 Kogelnik의 coupled-wave 이론 및 Kubota의 설명과도 잘 일치하고 있다.^[4]

IV. 결 론

성능이 우수한 HOE를 제작하기 위해서는 먼저 회절효율 특성이 좋은 처리 방법을 개발해야 한다. 그 다음으로 해결해야 할 문제는 높은 회절효율을 얻도록 개발된

처리 방법을 고정시킨 후에 중심파장을 조절하는 것이다. 처리과정이 다 끝난 후에 baking의 온도를 변화시키면서 중심파장을 조절하는 방식이나 서로 다른 두 가지의 젤라틴을 섞어서 경화정도를 바꾸어 중심파장을 조절하는 방법은 대단히 까다롭다. 따라서 감광제의 농도를 조절하여 중심파장을 조절하고 더욱 정확한 중심파장의 조절은 노출량을 다소 변화시킴으로 해결 가능함을 보였다. 그러나 이때 대역폭도 함께 변화하므로 회절효율, 중심파장, 및 대역폭의 값을 최적화하여 DCG 감광제로 처리방법을 정하여야 한다. 본 연구에서 제시된 반사형 HOE 제작 방법은 협대역 간섭필터, 레이저 파장 필터, 거울, 그리고 HUD의 개발에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] L. H. Lin, *Appl. Opt.* **8**, 963 (1969).
- [2] B. J. Chang and C. D. Leonard, *Appl. Opt.* **18**, 2407 (1979).
- [3] S. P. McGrew, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **215**, 24 (1980).
- [4] T. Kubota, *Appl. Opt.* **25**, 4141 (1986).
- [5] T. Kubota, *Appl. Opt.* **28**, 1845 (1989).
- [6] D. G. McCauley, C. E. Simpson, and W. J. Murbach, *Appl. Opt.* **12**, 232 (1973).
- [7] M. H. Jeong and J. B. Song, *Appl. Opt.* **31**, 161 (1992).
- [8] H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.* **48**, 2909 (1969).

Control of Center Wavelength and Bandwidth of Holographic Reflection Filter

Man Ho Jeong and Yeong Soo Han

Optics Laboratory, Korea Research Institute of Standards & Science, Taejon 305-606, Korea

Yeon-Serk Yu

Department of Physics and Optical Engineering, Chonju University, Chonju 360-764 Korea

(Received: May 17, 1993)

Holographic reflection filters are fabricated by using the dichromated gelatin film. The characteristics of diffraction efficiency, center wavelength, and bandwidth which are important parameters of reflection-type holographic optical elements is explained from the experimental results, and control method of these parameters is presented.