

Volume-Phase Hologram의 고효율 해석

0 \* \*\* \*\*\* \*  
김 남, 전 석 회, 반 재 경, 박 한 규

\* 연세대학교 전자공학과 \*\* 동양전문대 통신공학과 \*\*\* 전북대학교 전기공학과

An Analysis of high Diffraction Efficiency  
of Volume-phase Hologram

0 \* \*\* \*\*\* \*  
N. Kim, S.H. Jeon, J.K. Pan, H.K. Park

\* Dept. of Electronics, Yonsei Univ.  
\*\* Dept. of Telecom., Dongyang Tech. Coll.  
\*\*\* Dept. of Electrical Eng., Jeonpook Univ.

ABSTRACT

With dichromated bleacher and alcohol drying, over effi. of 81% has been achieved for holographic gratings. It is recorded by two plane waves at 632.8 nm in Ngfa 8E75 film. Swollen emulsion and rapid dehydration make a strong modulation. The model works well close to the Bragg condition. It is suggested modified parameters of coupled-wave theory which have a good agreement with experimental results.

I. 서론

홀로그래피 감광물질에 기록되어 형성되는 부의 위상형 홀로그래프는 일반적으로 반사형보다는 투과형으로 많이 사용되고 있으며, 홀로그래피를 이용한 광학소자(Holographic Optical Element: HOE)는 기존의 광학소자(Conventional Optical Element: COE)를 대체하여 사용되고 있다. COE가 기계적 처리과정 즉, 절단, 연마, 코팅 등의 과정을 거치면서 고도의 정밀성을 요구하는 반면, HOE는 사진술에서와 같이 현상, 정착, 표백 등 간단한 화학적 처리과정만을 거치면 된다. 또한 소형, 경량이며 접촉복사(contact printing)를 통해 쉽게 복사가 가능해 대량복사가 용이하며, 낮은 F수와 수차, 복합적인 함수를 하나의 소자에 결합할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징을 갖는 HOE는 홀로렌즈, 회절격자, 홀로콘, 공간필터, 정합필터, 광도파 결합기/분파기 등 많은 잠재적 응용분야를 가지고 있다.

홀로그래프 특성은 영상특성(image quality)과 회절효율(diffraction effi.)로 대별되는데 전자는 국부적 격자간격과 격자방향, 두 파의 세기비(ratio) 등에 의해 좌우되어 쉽게 예측할 수 있으며, 실제 이론과 실험 사이의 우수한 일치됨 보이고 있다. 그러나 후자는 예측하기가 어려운데 이는 첫째 격자의 물질특성(변조율, 흡수율, 결합계수 등)에 의해 알아야 하고, 둘째 전자파 이론에 이러한 성질이 포함된 복잡한 미분 방정식을 풀어야 한다. 복잡한 함수를 갖는 소자들에 대해 미분 방정식의 해를 구하는 것은 어려우나 균일한 격자와 같은 간단한 구조에 대해서는 쉽게 해를 구할 수 있으며 기존 물질들의 알려진 성질을 이용하여 해석을 하여 다른 물질들에도 이용할 수 있을 것이다.

은염을 이용한 회절격자의 고효율 실험적으로 얻을 수 있었는데, 이에 대한 해석을 위해 결합파 이론을 기초로 하여 회절현상의 중요한 파라미터값을 수정 제시하여 고효율 해석하고자 한다.

II 결합파 이론과 파라미터들

가간섭성(coherent)이 있는 두 평면파의 간섭을 이용하여 평면 선형 격자를 제작할 수 있다. 두 평면파의 세기의 비가 K 이고, 두 파의 각도가  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 로 입사하면 각 부분의 빛의 세기 I 는 다음과 같다.

$$I = 1 + \frac{1}{K} + \frac{2}{\sqrt{K}} \cos(k(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)x) \quad (1)$$

감광물질의 투과량을 노출량에 비례하도록 하면 투과진폭

는

$$t = \alpha \left[ 1 + \frac{1}{K} + \frac{2}{\sqrt{K}} \cos(k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)x) \right] \alpha \left( 1 + \frac{1}{K} + \frac{2}{\sqrt{K}} \cos px \right) \quad \text{--- (2)}$$

가 되며, p 는 각 공간 주파수이다.

$$p = \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi}{\Lambda} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad \text{--- (3)}$$

$\Lambda$  는 격자의 간격이며 식 (3)을 정리하면 다음과 같은 격자 방정식 (grating equation)이 된다.

$$\frac{\lambda}{\Lambda} = \sin \theta_1 + \sin \theta_2 \quad \text{--- (4)}$$

이는 간섭무늬의 간격  $\Lambda$  은 입사각  $\theta_1, \theta_2$ , 레이저 파장  $\lambda$ 의 함수로서 두 입사각이 커질수록 간격이 좁아짐을 알 수 있다.

이와 같이 기록된 격자내에 파가 입사하면 격자 내부구조에 의해 회절(diffraction)이 일어나는데 Kogelnik의 결합파 이론으로부터 해석을 할 수 있다.

그림 1과 같이  $0 < z < d$  영역내에 유전율과 흡수율이 다음과 같이 변조되어 있다고 가정한다.

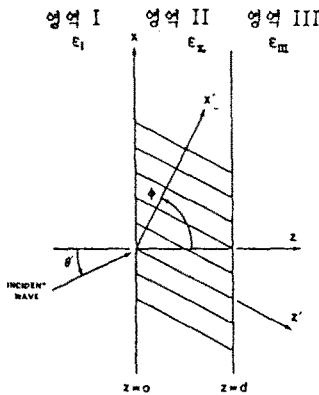


그림 1 평면 경사 격자의 구조

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cos K \cdot x,$$

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cos K \cdot x,$$

$\epsilon_0$  는 평균 유전율,  $\epsilon_1$  은 유전율 변조크기,  $\alpha_0$  는 평균 흡수율,  $\alpha_1$  은 흡수율 변조크기,  $K$  는 격자의 벡터이다. 입사파가 매질내에서 스칼라 파동 방정식을 만족하며 격자방향에 의해 회절파의 차수가 결정되는데, 특히 Bragg 조건에서 입사파가 전부 1차 회절파로 에너지가 교환된다. 손실이 없는 매질에서 이상적인 회절파의 크기  $S(d)$ 는 다음과 같다.

$$S(d) = \frac{-i \exp(-ix) \sin(\Phi^2 + \chi^2)^{1/2}}{(1 + \chi^2/\Phi^2)^{1/2}}, \quad \text{--- (5)}$$

이때  $\Phi = 2\pi \epsilon_0 d / \lambda \sqrt{\epsilon_0} \cos \theta$ ,  $\chi = kd / 2 \cos \theta$  이며  $\chi$  (dephasing parameter)는 입사각이 Bragg 각을 벗어남에 따른 영향을 나타내는 파라미터이다. Bragg 각으로 입사할 때, 즉  $\chi=0$  이면  $\chi=0$  이며

$$S(d) = -i \sin \Phi. \quad \text{--- (6)}$$

가 되며 입사파의 크기가 1 일때 회절효율  $\eta$  는

$$\eta = |S(d)|^2 = \sin^2 \Phi \quad \text{--- (7)}$$

이다. Bragg 조건을 벗어남에 따른 회절효율은

$$\eta = \frac{\sin^2(\Phi^2 + \chi^2)^{1/2}}{(1 + \chi^2/\Phi^2)}. \quad \text{--- (8)}$$

이며, 손실이 있는 즉, 매질내의 흡수를 고려한 실제적인 위상형 격자의 회절효율은

$$\eta_s = \left[ \exp(-\alpha_0 d / \cos \theta) \sin \Phi \right]^2 \quad \text{--- (9)}$$

이다.

### III. 회절격자의 파라미터값 결정

기록된 홀로그래피 격자의 구조를 알기위한 방법으로 임의의 공간 주파수에서 입사각에 대한 회절효율만 측정하므로써, 내부구조에 대한 필요한 정보를 추출하기가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 이론적 예측과 실험적 결과를 비교 분석하므로써 모델의 주 파라미터값을 결정하여 실험치에 근사시키는 것이다. 전의 모델들은 이상적인 모델에 제한을 두었기 때문에 충분한 정보를 얻어내기 어려웠고 실제적인 모델이 될 수 없었다.

부피형 위상격자에 대한 앞서의 연구들 중에서 이 분야의 고전이며 현재도 광범위하게 이용되고 있는 Kogelnik의 이론으로부터 시작한다. 그의 결합파 이론(coupled-wave theory)은 두 파에 의해 기록된 위상형 홀로그래피의 이상적인 경우 Bragg 조건에서 100% 회절효율을 얻을 수 있다. 그 후 여러 연구중 R. Syms 등은 결합파 이론을 확장시켜 2차 편미방 방정식을 풀어서 다음 파라미터값들에 의해 회절효율을 예측하였다.

R. Syms 등의 실험은 He-Ne 레이저를 사용하여 두께 5 $\mu$ m 인 Agfa 8E56 에 격자를 기록하여 얻은 실험 결과로부터 해석을 하였다. 일반적인 화학적 처리과정을 거치면

홀로그래프 감광유체에 8-15% 정도 수축이 일어나 두께를 4.7 $\mu\text{m}$ 로 고정하고 각 파라미터값을 추정하여 회절효율을 나타낸 것이다.

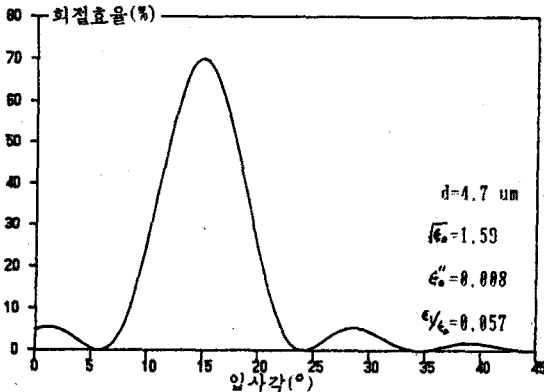


그림 2 결함과 모델에 의한 회절효율 예측

본 연구에서 밝혀지듯이 두께가 부풀어 올라 같은 노출량에 의한 유전율 변조에 대해 높은 회절효율을 얻을 수 있었다. 특히 두께가 7 $\mu\text{m}$  일때 파라미터값들을

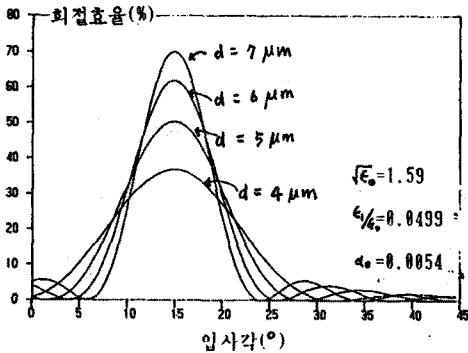


그림 3 두께의 변화에 따른 회절효율 예측

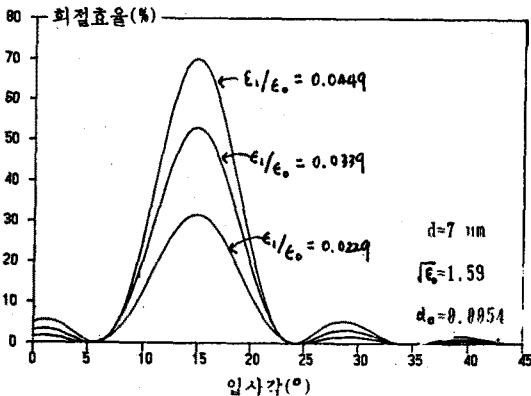


그림 4 유전율 변조값에 따른 회절효율 예측

결정하여 수정된 파라미터값에 의한 회절효율과 실험 결과를 비교하고자 한다. 그림 3은 두께가 변함에 따라 회절효율의 변화이며, 그림 4는 두께가 7 $\mu\text{m}$  일때 유전율 변조의 변화에 따른 회절효율이다.

IV. 실험 및 결과 고찰

두 평면파의 간섭을 이용하여 회절격자를 생성시키기 위한 장치도이다.

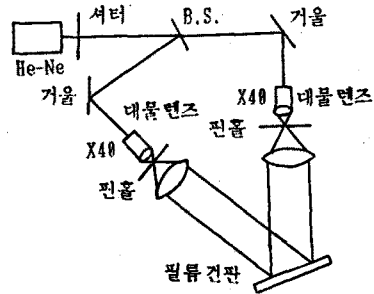


그림 5 홀로그래피 회절격자의 생성 장치도

노출 광원은 25mW인 편광된 He-Ne 레이저를 사용하였으며 두 파의 각도를 25 $^{\circ}$ 로 하였다. 이때 공간 주파수는 f는 식 (4)에 의해 1335 lines/mm 이다. 또한 고효율이 되기 위하여 부피 위상형이 되어야 하는데 다음 Q 값이 10 보다 커야 한다.

$$Q = 2\pi\lambda_0 d / n_0 \Lambda^2 \quad (10)$$

식(10)에 대입하여 Q 값을 구하면 10 보다 큼으로 부피 위상형이 됨을 알 수 있다.

회절효율  $\eta_0$ 는 입사 광량에 대한 회절 광량의 비로서 정의되며, 재생시 은염전판의 두 경계면에서 반사가 일어나 엄밀한 의미의 입사광량은 반사 광량  $I_r$ 을 뺀  $I_1 - I_r$  이므로 고유 효율(intrinsic effi.)  $\eta_0$ 는  $I_1 - I_r$  이다. 또한 경계면에서의 반사 광량과 절라된 내부에서의 흡수량을 뺀 순수한 부피 광량에 대한 1차 회절 광량의 비를 전환 효율(conversion effi.)  $\eta_c$ 이라 한다.

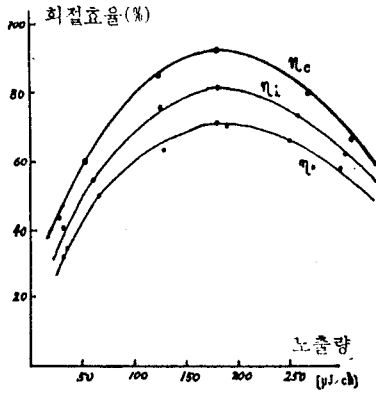


그림 6. 노출량에 대한 최적효율

그림 6은 노출량에 대한 각각 정의된 최적효율을 나타낸 것이다. 노출량 180  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 최적효율은 71%이며, 고유 효율은 81% 이고, 전환 효율은 92% 이상이다.

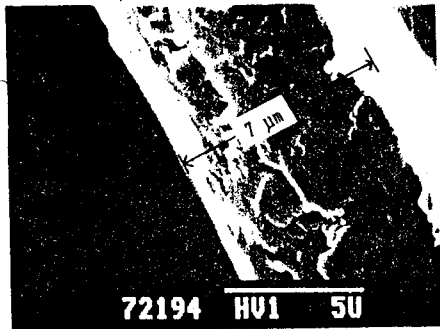


그림 7. 물에 부풀은 젤라틴의 단면모습

이는 담금질 인자가 적은 현상액, 경화제가 없는 정착액에 의해 부풀어 올랐으며, 중크롬산 표백액의 연계결합과 알코올에 의한 급속 건조가 강한 변조를 일으켜 고최적 효율을 얻을 수 있었다.

그림 7은 화학적 처리과정에서 다 끝난 최종 홀로그램을 전자 현미경(SEM)으로 촬영한 단면도로서 두께가 7 $\mu\text{m}$ 인데

그림 8은 결합과 이론의 수정된 파라미터값들에 의한 이론치와 실험치를 비교한 것으로서 잘 일치함을 알 수 있다. 25°로 입사한 파는 젤라틴의 굴절율이 1.59 이므로 Snell의 법칙에 의해 15°로 굴절되어 입사되어 매질내의 bragg 각은 15°이다.

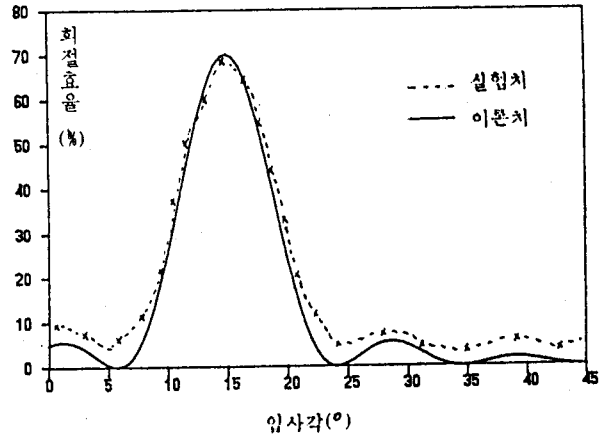


그림 8. 최적효율 이론치와 실험치의 비교

### V. 결론

은염에 기록된 부피형 홀로그램이 화학적 처리과정을 통해 두께의 증가와 급속 건조에 의한 공기 간격이 강한 변조를 일으켜 고 최적효율을 얻었다. 이상적인 결합과 모델에서 고효율 최적격자의 주 파라미터값들의 수정을 하였으며 실험치와 잘 일치함을 보였다. 이 해석 방법은 다른 감광물질 해석에도 적용될 수 있다.

### 참고문헌

1. B.J. Chang and C.D. Leonard, Appl. Opt., vol.18, pp.2407-2417, July, 1979
2. P. Hariharan, Optical Holography, Cambridge Univ. Press, London, 1986
3. H. Kogelnik, Bell Sys. J., vol.48, no.9, pp.2989-2947, Nov., 1968
4. T.K. Gaylord and M.G. Moharam, IEEE Proc., vol.73, no.5, pp894-937, 1985
5. R.R. Syms and Solymar, Appl. Opt., vol.22, pp.1479-1496, May, 1983
6. D.J. Cooke and A.A. Ward, Appl. Opt., vol.23, pp.934-941, March, 1984
7. P. Hariharan, "Bleached Photographic Phase Holograms", Opt. Comm., vol.56, pp.318-320, Jan., 1986
8. W.R. Graver, J. Q. Gladden and J. W. Eastes, Appl. Opt., vol.19, pp.1529-1535, May, 1980
9. J.M. Heaton and L. Solymar, Appl. Opt., vol.24, pp.2931-2936, Sep., 1985