

회절된 빛의 파장 의존도에 관한 연구

김호욱^o 이혁

서울대학교 전기공학과

A study on the wavelength dependence of the diffracted light

Ho wook Kim Hyuk Lee

Dep. of Electrical Eng. Seoul National Univ.

ABSTRACT

The wavelength dependence of the diffracted light in volume hologram is important in application of volume hologram, because the wavelength dependence of the diffracted light can be used to select a certain wavelength from white-light which is composed of a lot of wavelengths. Some experiments are done to analyze the wavelength dependence of diffracted lights. The coupled wave theory is used to make a theoretical approach to this model. Compared with the theoretical result, the experimental result makes a good agreement with it.

1. 서론

본 논문에서는 초기에 체적 홀로그램을 크리스탈에 기록할 때의 조건과 기록된 내용을 읽어낼때의 조건을 다르게 하면서 그 변화를 관찰하였다. 그리고 이것이 이론적으로 광굴절을 해석하였을때와 비교해 볼 때 어떤 차이가 있는지를 살펴보았다. 본 논문에서는 파장의 변화에 따른 결과를 분석하여 보았다. 먼저 기록할 때는 입사되는 빛이 λ_1 의 파장을 갖는 빛으로 홀로그램을 형성한 후, λ_1 으로 형성된 홀로그램을 λ_2 의 파장을 갖는 빛으로 읽어낼때 결과가 어떻게 나오는지 살펴보았다.

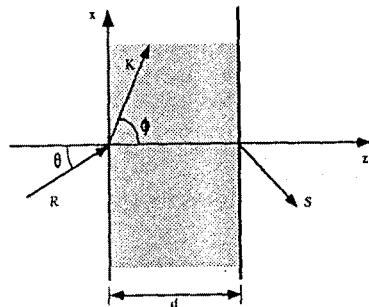
위의 변화 - 입사파장(λ) -를 주고나서 입사된 빛은 모두 홀로그램 형성시 생성되는 Bragg 조건을 만족시키지 못하기 때문에 읽어낼수 있는 값이 매우 작다. 이론적으로는 반사되는 빛이 없으나 실제로는 crosstalk의 영향으로 조금의 빛을 읽어 낼 수 있다. 따라서, 만약 여러 파장의 빛이 다 포함되어 있는 백색광(white-light)을 재생 광원으로 사용한다면 광굴절 효율이 가장 높은 파장 하나만 선택되어서 재생되게 된다. 비록 기록시에는 단일 파장광(monochromatic wave)으로 하였다 하더라도 백색광으로 재생을 할 수 있게 된다. [1], [2]

이론적으로 계산에 의해서 광굴절 효율(η)을 빛의 파장(λ)와 입사각도(θ)의 함수로 구할 수 있다. 본 논문에서는 이론치로 구할때 입사파장(λ)의 함수로 표시되는 광굴절 효율(η)과 실제 실험해 보았을때 광굴절 효율을 비교해 보았다.

2. Coupled-Wave Theory를 이용한 홀로그래픽 회절격자의 분석

Coupled-wave theory에서는 홀로그램 회절격자에 투사되는 빛은 단색광이고 이 빛이 Bragg각 부근으로 투사되고 TE 모드라고 생각한다. 또, 회절격자에는, 회절격자로 들어오는 "기준(reference)"파 R과 회절격자에서 나오는 "신호(signal)"파 S, 단 2개의 광파(optical wave)만 존재한다고 가정한다.

여기서 이들 두 광파만이 Bragg조건을 근사적으로 만족하고 다른 회절된 빛들은 Bragg조건을 벗어나기 때문에 광파 S와 R사이에서의 에너지 교환(energy interchange)에 영향을 거의 주지 못함으로 무시한다. 분석할 홀로그램 회절격자의 모델은 [그림.1]과 같다.



[그림.1] 회절격자 분석 모델

z축은 매질의 표면에 수직이고 y축은 지면에 수직이 되게 한다. Fringe면은 z축에 대해 각도 ϕ 로 기울어져 있다. 회절격자 벡터 \vec{K} 는 fringe면에 대해 수직이고 크기는 $K = 2\pi/\Lambda$ (Λ 는 회절격자의 주기)가 된다.

평균 유전 상수(average dielectric constant)는 회절격자 경계의 안쪽과 바깥쪽에서 같다고 가정한다. 회절격자 내에서 파가 진행하는 것은 scalar wave equation으로 기술할 수 있다.

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (1)$$

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon - j\omega\mu\sigma \quad (2)$$

홀로그래프 회절격자의 fringe는 ε 와 σ 의 공간 변조(spatial modulation)형태로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos(\vec{K} \cdot \vec{x}) \\ \sigma &= \sigma_0 + \sigma_1 \cos(\vec{K} \cdot \vec{x}) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하면

$$k^2 = \beta^2 - 2j\alpha\beta + 2\kappa\beta (e^{j\vec{K} \cdot \vec{x}} + e^{-j\vec{K} \cdot \vec{x}}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{1}{4} \left(-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_1}{(\varepsilon_0)^{1/2}} - j \frac{\mu\sigma_1}{(\varepsilon_0)^{1/2}} \right) \\ &= \frac{\pi n_1}{\lambda} - j \frac{\alpha_1}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

로 나타내어진다.

회절격자 내에서 전체 electric field는 두 빛의 중첩으로 주어진다.

$$E = R(z)e^{-j\vec{p} \cdot \vec{x}} + S(z)e^{-j\vec{p}' \cdot \vec{x}} \quad (6)$$

\vec{p} 는 coupling이 없을 때 자유공간에서 진행하는 기준파의 전파상수와 같다고 하면 \vec{p} 는 회절격자 벡터에 의해 다음과 같이 관계지어진다.

$$\vec{p} = \vec{p}' - \vec{K} \quad (7)$$

여기서 S와 R간의 에너지 교환이 느리고 에너지가 느린 속도로 흡수된다고 하면 R'과 S'을 무시할 수 있으므로

$$c_R R' + \alpha R = -j\kappa S \quad (8)$$

$$c_S S' + (\alpha + j\beta) S = -j\kappa R \quad (9)$$

$$c_R = \cos\theta, \quad c_S = \cos\theta - \frac{K}{\beta} \cos\phi$$

과 같은 coupled wave 동식을 구할 수 있다. 이 동식의 일반해를 다음과 같이 두고

$$R(z) = r_1 \exp(\gamma_1 z) + r_2 \exp(\gamma_2 z) \quad (10)$$

$$S(z) = s_1 \exp(\gamma_1 z) + s_2 \exp(\gamma_2 z) \quad (11)$$

식(8),(9)에 대입하고 경계조건 $R(0)=1, S(0)=0$ 을 적용시켜 상호의 크기 S를 구한 다음 간단한 모형에 대해 적용시켜 보자. 손실이 없는 회절격자의 경우를 생각할 경우 coupling 상수 $\kappa = \pi n_1 / \lambda$ 가 되고 흡입상수 $\alpha = \alpha_1 = 0$ 가 된다. 이때

회절효율 η 는

$$\eta = \sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2} / (1 + \xi^2 / \nu^2)$$

$$\nu = \pi n_1 d / \lambda (c_{RCs})$$

$$\xi = (K \cos(\phi - \theta) - \frac{K^2}{4\pi} \lambda) d / (2cs) \quad (12)$$

로 나타내어진다.

따라서, $\Delta\theta$ 또는 $\Delta\lambda$ 에 대한 미소변화에 있어서

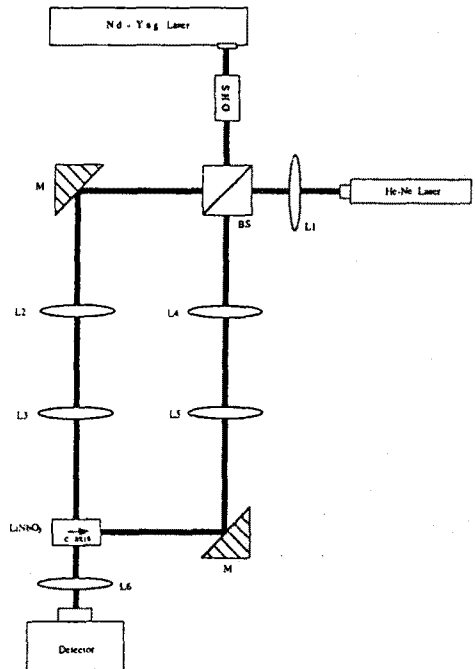
$$\begin{aligned} \Delta\xi &= \Delta\theta K d \sin(\phi - \theta) / 2cs \\ &= -\Delta\lambda K^2 d / 8\pi c s \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다.

식(12)에서 미소변화 $\Delta\xi$ 에 대해 효율 η 이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. [3],[4],[5]

3. 실험 및 결과분석

A. 실험장치그림



[그림. 2] 실험장치배치도

B. 실험장비 소개

a. 사용 광원

Nd-Yag 레이저 : 출력파장 532.0 [nm]

He-Ne 이온 레이저 : 출력파장 632.8 [nm]

b. 사용 크리스탈

Fe:LiNbO₃ (1.0 x 0.8 x 1.0 cm)

c. 사용렌즈

L1, L2, L3, L4, L5, L6 : 볼록 렌즈

d. 사용 감지장치

PM - Tube : 빛의 세기를 감지하여 출력을 전압으로 측정

e. 기타

BS : Beam Splitter

M : Mirror

C. 실험결과

He-Ne 레이저를 LiNbO₃ 크리스탈에 5분간 입사시켜 크리스탈 내부에 회절격자를 형성하였다. 이때 크리스탈에 비추기 전에 He-Ne 레이저 출력을 PM tube로 측정해 본 결과 21.6[V]의 값을 얻었다. 이 빛으로 크리스탈에 회절격자를 새긴 후 한쪽 방향의 빛은 가리개로 차단하고 나머지 한쪽 방향의 빛으로만 크리스탈에 비추어서 이미 크리스탈 내부에 새겨진 회절격자에 의해 반사되어 나오는 빛을 측정해본 결과 0.064[V]의 값을 얻었다. 이번에는 He-Ne 레이저 빛을 양쪽 방향 모두 차단하고 Nd-Yag 레이저 빛을 크리스탈에 비추어서 이미 He-Ne 레이저로 새겨진 회절격자에 의해 반사되는 양을 측정해본 결과 2.8×10^{-5} [V]의 값을 얻었다. 이때 크리스탈에 비추어지기 전의 Nd-Yag 레이저의 출력값은 14.4[V]이었다. 또, Nd-Yag 레이저와 He-Ne 레이저 빛을 모두 차단하고 기본 배경 밝기를 측정해본 결과 1.6×10^{-5} [v]의 값을 얻었다. 따라서, 크리스탈 내의 회절격자에 의해 반사되는 값에서 이 값을 빼주어야 한다. 이것을 고려하여 각각의 효율을 계산해본 결과 He-Ne 레이저로 새긴 회절격자에 He-Ne 레이저를 비추었을때 반사된 효율은 2.96×10^{-9} 이고 Nd-Yag 레이저로 비추어 크리스탈에 의해 반사된 효율은 8.33×10^{-7} 이었다. 따라서, He-Ne 레이저 ($\lambda_1=632.8\text{nm}$)로 새긴 회절격자에 대해 Nd-Yag 레이저($\lambda_2=532.0\text{nm}$)로 읽어내면 He-Ne 레이저로 읽어낼 때의 2.81×10^{-4} 에 해당하는 빛이 나왔다. 이론치로 계산한 결과, 파장 λ_1 에서 출력 신호파의 크기와 파장 λ_2 에서 출력 신호파의 크기, 또 이들 두가지 출력 신호파의 크기 비율을 [표.1]과 [표.2]에 나타내었다.

PARAMETER	K	C _n	ϑ	ξ
READING WAVELENGTH				
He-Ne(λ=632.8nm)	0.031	0.5	-7.64×10^{-5}	-6.11×10^2
Nd-Yag(λ=532nm)		0.55	3.43×10^{-3}	2.457×10^4

[표.1] 각각의 파장에 따른 상수값 계산

v	ξ	-6.11x10 ²	2.457x10 ⁴	Nd-Yag output power
				He-Ne output power
π / 4	1.61x10 ⁻⁶	7.79x10 ⁻¹⁰		4.84x10 ⁻⁴
π / 2	6.43x10 ⁻⁶	3.12x10 ⁻⁹		4.85x10 ⁻⁴
3π / 4	1.45x10 ⁻⁵	7.01x10 ⁻⁹		4.83x10 ⁻⁴

[표.2] v와 ξ값에 따른 출력 신호파의 크기 및 그 비율

4. 결론

체적 홀로그래프를 연구하고 응용하기 위한 실험가운데 한가지인 크리스탈내에 새겨진 회절격자의 반사율이 파장에 따라 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 크리스탈에 회절격자를 파장 λ_1 으로 먼저 새긴다음 파장 λ_1 과 파장 λ_2 로 각각 조사시켜서 반사되어 나오는 빛의 양을 측정하여 각 파장에 대한 회절효율을 알아보았다.

그 결과 회절격자를 새길때와 다른 파장으로 크리스탈에 조사시켜 반사율을 측정해본 결과가 회절격자를 새길때와 동일한 파장으로 반사율을 측정했을때의 2.81×10^{-4} 에 해당하는 값이 측정되었다. 이론적으로 회절격자의 반사율을 분석해보면 새겨진 회절격자에 의해 반사되는 양은 그 회절격자를 새길때와 조건이 다르게 되면 그 조건이 다른 정도에 따라 SINC 함수의 형태로 떨어짐을 알 수 있다. 따라서, 실험치로 얻어진 값이 이 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

REFERENCE

- [1]W. S. Baek and H. Lee, J. Appl. Phys. 67, 1194(1990)
- [2]B. E. A. Saleh & M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley, New York(1991)
- [3]H. Kogelnik, "Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings", Bell syst. Tech. J. 48, 2909 (1969)
- [4]J. M. Heaton and L. Solymar, "Wavelength and angular ..." Appl. Opt. 24, 2931(1985)
- [5]R. R. A. Syms and L. Solymar, "Planar volume phase..." Appl. Opt. 22, 1479(1983)