

맥닐 프리즘을 이용한 넓은 가시광 영역, 큰 각 입사 편광광속분리 프리즘의 설계

Design of polarization beam splitter using MacNeille prism for broadband visible and large incident angle

박범호, 이장훈, 황보창권, 문일춘*, 강건모*
 인하대학교 물리학과, *삼성 테크윈
 g1991483@inhavision.inha.ac.kr

1946년 S M MacNeille에 의해 연구된 유전체 다층 박막을 이용한 편광광속분리기는 브르스터 각 편광광속분리기(Brewster angle polarizing beam splitter) 혹은 맥닐 프리즘(MacNeille prism)으로 알려져 있으며 지금도 많은 광학계에서 사용되고 있다. 맥닐 프리즘은 두 개의 프리즘 사이의 빔면에 높은 굴절률(n_H)을 갖는 물질과 낮은 굴절률(n_L)을 갖는 물질을 $\lambda/4$ 광학두께로 교번으로 한 고반사 다층 박막 구조를 갖는다. 각 층의 경계면에서 브르스터 각으로 입사할 경우 p-편광파는 투과하고 s-편광파는 부분적으로 반사한다. 편광광속분리 정도는 p-편광파와 s-편광파의 투과율(T_p, T_s) 혹은 반사율(R_p, R_s)의 비로 나타내며 이를 소광비(extinction ratio)라 한다.

$$\text{extinction ratio} = \frac{T_p}{T_s} \quad \text{or} \quad \frac{R_s}{R_p} \tag{1}$$

높은 굴절률 물질에서 낮은 굴절률 물질로 입사하는 p-편광파의 반사율은 매질의 굴절률(n_H, n_L) 매질 내에서의 굴절각(θ_H, θ_L)으로부터 계산할 수 있고 p-편광파의 반사율 R_p 가 0일 경우 θ_H 는 브르스터 각이 되며 분자가 0 이 되는 브르스터 조건을 구할 수 있다. 즉,

$$R_p = \left| \frac{\frac{n_H}{\cos \theta_H} - \frac{n_L}{\cos \theta_L}}{\frac{n_H}{\cos \theta_H} + \frac{n_L}{\cos \theta_L}} \right|^2 = 0, \quad \frac{n_H}{\cos \theta_H} - \frac{n_L}{\cos \theta_L} = 0 \tag{2}$$

브르스터 조건과 스넬의 법칙을 이용하면 다음 관계가 유도된다.

$$\sin^2 \theta_p = \frac{n_H^2 n_L^2}{n_p^2 (n_H^2 + n_L^2)} \tag{3}$$

(3)식으로부터 프리즘의 굴절률 n_p 와 물질의 굴절률 n_H, n_L 이 주어지면 프리즘 내에서의 입사각 θ_p 를 계산할 수 있으며 역으로 θ_p 가 주어졌을 경우 n_p, n_H, n_L 을 구할 수 있다.

맥닐 프리즘은 브르스터 조건을 만족하는 입사각일 경우 넓은 파장에서 사용할 수는 있지만 브르스터 각보다 크거나 작은 각으로 입사하게 되면 p 편광파의 투과율이 떨어지고 입사각이 커질수록 짧은

파장으로 영역대가 이동한다. n_p 가 1.73이고 n_H, n_L 이 각각 2.34, 1.46 일 경우 프리즘 내에서 45° 로 입사할 경우 외에는 편광광속분리기로 사용할 수 없다(그림 1). 맥닐 프리즘을 이용하여 420 nm 에서 680 nm 까지 넓은 가시광 영역에서 공기로부터 수직입사 $\pm 10^\circ$ 의 범위를 만족하기 위해, 기준 파장 610 nm 와 800 nm 에서 고반사 설계를 합쳐 프리즘 내에서 입사각 $45 \pm 6^\circ$ 에서 s- 편광파의 반사율이 증가하지 않도록 설계하였다. 두 고반사 설계를 합친 경우 420 nm 에서 680 nm 까지 넓은 가시광 영역에서, 프리즘 내에서 입사각이 $45^\circ \pm 4$ 일 경우 p-편광파의 평균 투과율이 91.2 %이고 소광비가 436 인 편광광속분리기가 설계되었다(그림 2).

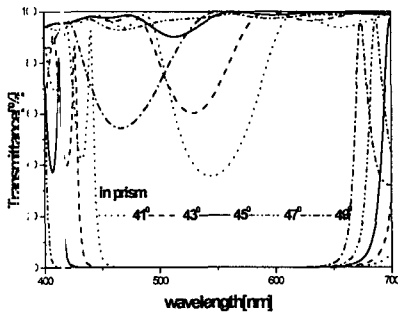


그림 1 입사각에 따른 투과율 변화

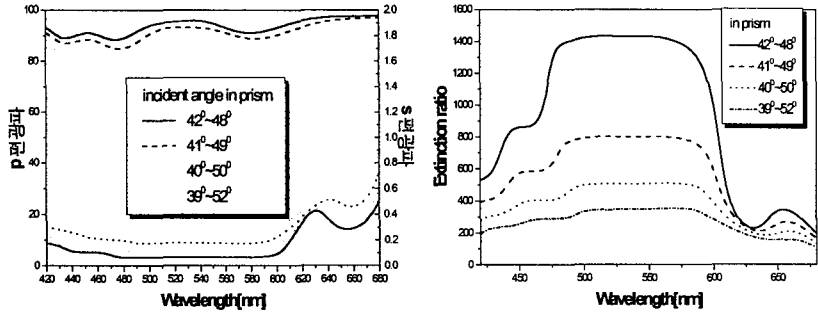


그림 2 평균 투과율과 소광비

프리즘 내에서의 입사각 $45^\circ \pm 6$ 를 만족하기 위해 전산시능을 통하여 420 nm 에서 680 nm 까지 소광비가 400 이 되도록 다층 박막의 두께를 최적화 하였다. 그 결과 공기 중에서 F-수 2.8, 즉 프리즘 내에서 $45^\circ \pm 6$ 의 콘앵글에서 p-편광파의 평균 투과율이 88.5 % 이고 소광비가 413 인 편광광속분리기가 설계되었다(그림 3).

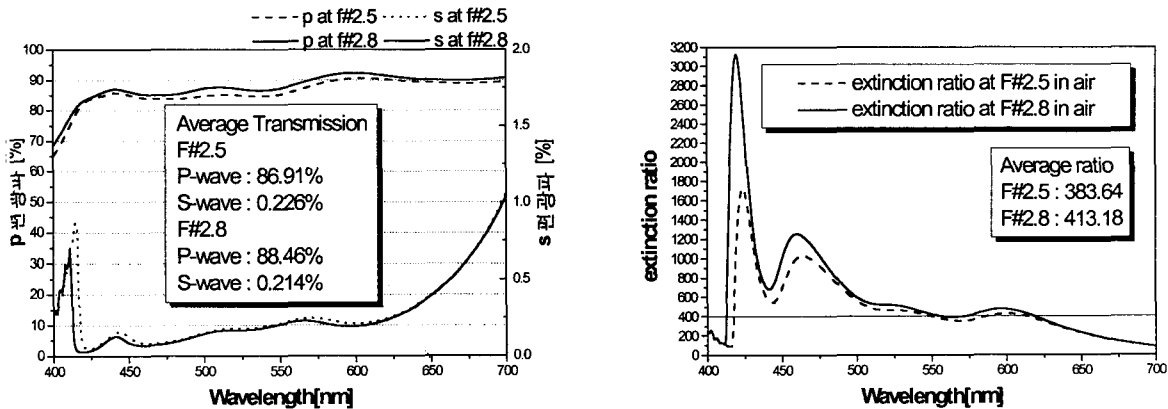


그림 3 공기 중 F-number 2.8 과 2.5 에서 평균 투과율과 소광비

참고 문헌

[1] J. Mouchart, J. Begel and E. Duda, "Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field", Applied Optics. 28. No. 14., 2847-2853 (1989)
 [2] H. A. Macleod "Thin Film Optical filters", Macmillan, (1986)