

# 광탄성 응력측정을 위한 투과형 원형편광기 제작 및 시험

백태현<sup>†</sup>, 고승기\*, 나의균\*, 김장섭\*\*, 차병석\*\*\*, 조성호\*\*\*

## Construction and Calibration Test of a Transmission-type Circular Polariscopes for Photoelastic Stress Measurement

T.H. Baek, S.K. Koh, E.G. Na, J.S. Kim, B.S. Cha and C.H. Cho

**Key Words:** Circular polariscopes (원형편광기), Photoelasticity (광탄성), Polarizer (편광판), Quarter wave plate (1/4 파장판), Analyzer (검광판), Sodium-vapor lamp (나트륨등), Tardy compensation test (타디 보정시험)

### Abstract

This paper describes the construction of a circular polariscopes. Generally, a circular polariscopes contains four optical elements and a light source. The first element following the light source is called the polarizer. It converts the ordinary light into plane-polarized light. The second element is a quarter wave plate which converts the plane-polarized light into circularly polarized light. Following the quarter wave plate, a specimen made of transparent photoelastic material is located in a loading device. The second quarter wave plate is set and the last element is the analyzer. These polarizing elements, two quarter wave plates and two polarizing filters, were purchased from the USA. Frames and other structures for holding polarizing filters were machined and assembled to be rotated. Light box, which include four incandescent lamps and two sodium-vapor lamps, was made. In order to proof the function of the newly built polariscopes, Tardy compensation test was applied to a rectangular shaped specimen made of poly-carbonate material (PSM1). The error of the fringe constant, which was measured by the newly built polariscopes, was within 4.4 percent compared to the standard value of this material. It is possible to make a good quality of polariscopes if accurate polarizing filters will be used.

### 1. 서 론

최근 공업기술의 급속한 발달에 따라 기계구조 및 재료가 다양한 조건하에 사용되고, 그 재료는 여러 가지 형태로 각종 구조물에 이용될 수 있다. 기계나 구조물에 대한 설계시 실제 하중을 받는 조건에 대한 응력 해석은 필수적인 과정이며, 경우에 따라서는 실험적으로 확인되어야 한다.

광탄성법(photoelasticity)은 역학에서 응력 또는 변

형률을 해석하기 위한 실험방법으로서 구조 및 기계부품의 복잡한 인 하중상태에서 접촉응력(contact stress), 응력집중(stress concentration), 응력분포 상태를 고려한 최적설계 및 균열 부의 응력강도계수(stress intensity factor) 해석 등에 광범위하게 적용되고 있으며, 특히 전체응력장(whole stress field)을 가시적으로 명확히 판별할 수 있는 장점이 있다. 이러한 시험을 위하여 현재 국내에서는 대부분의 편광기를 고가에 외국으로부터 수입하여 사용하고 있다.

본 논문에서는 원형편광기의 국내 제작 가능성을 시험하기 위해 편광기에 관한 기본 이론을 살펴보고, 미국에서 제작된 투과형편광기의 구조를 참고하여 원형편광기를 설계하였다. 편광기의 핵심부품인 선형편광판(linear polarizer)과 4분파판(quarter wave plate)은 해외에서 구입하고, 다른 부품은 설계도면에 따라 직접 가공·조립하여 투과형 원형편광기의 시제품을 제작하였다. 제작된

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : thbaek@kunsan.ac.kr

TEL : (063) 469-4714 FAX: (063) 469-4727

\* 군산대학교 기계공학부

\*\* 한백창원직업전문학교

\*\*\* 군산대학교 대학원 기계공학과

원형편광기와 해의로부터 구입한 편광기를 이용하여 단순인장을 받는 시편에 대해서 보정시험(calibration test)을 한 후, 이들 결과를 서로 비교하여 새로 제작한 원형편광기의 성능을 평가하였다.

## 2. 편광기 구조 및 설계제작

### 2.1 편광기 구조

광원, 편광판, 시험편 및 검광판을 Fig. 1과 같이 배열하고 편광판과 검광판의 편광축을 서로 직교하도록 하면 평면편광기(plane polariscope)의 배열을 얻을 수 있다. 이 경우에, 편광축과 주응력의 방향과 이루는 각이  $\alpha$ 가 되며 평면편광기의 광강도(light intensity)는 다음의 식 (1)과 같다(1-4).

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \pi n \quad (1)$$

위의 식 (1)에서  $\alpha$ 는 등경각(isoclinic angle),  $n$ 은 등색프린지 차수(isochromatic fringe order)이고  $I_0$ 는 광원의 광강도이다.

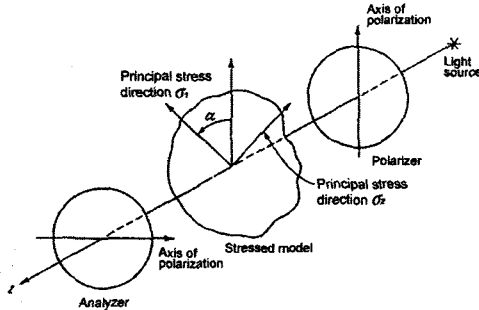


Fig. 1 Plane polariscope

위의 식 (1)에서  $I=0$  (즉, 암점)이 되려면,  $\sin 2\alpha=0$  또는  $\sin \pi n=0$  이 되어야 하며,  $\sin 2\alpha=0$  이 되려면,  $\alpha=0^\circ$  또는  $90^\circ$  즉, 편광축 방향과 주응력 방향이 일치하거나 직교할 경우이다. 이 때에 나타나는 암선을 등경선(isoclinic line)이라 하고 주응력 방향(principal stress direction)을 구하는데 이용된다.

또  $\sin \pi n=0$  이 되려면  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$  등 정수가 될 때이며 이때 나타나는 프린지를 등색선(isochromatic line)이라 하고 주응력차(principal stress difference)를 구하는데 이용된다.

평면 편광기에서 시험편을 관찰하면, 등색선과 등경선이 함께 나타나므로, 주응력 차를 구하기 위해 등색선만을 얻을 수 없다. 이를 위해 등경선을 제거하고 등색선만 나타낼 수 있도록 한 장치가 원형편광기이다. 원형편광기는 편광판과 시험편 사이, 시험편과 검광판 사이에, 각각 4분광판을 삽입한 것으로, 이 때에 검광판을 통과한 광의 강도는 다음과 같이 된다(1-4).

$$I = I_0 \sin^2 \pi n \quad (2)$$

즉 식 (2)로부터 등경선은 나타나지 않고 등색선만 나타난다.

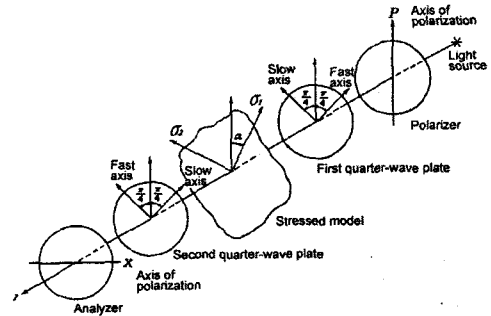


Fig. 2 Circular polariscope

### 2.2 편광기 설계제작

편광기의 설계·제작에 있어서 지지대등의 외곽부분은 냉간압연강(SS41)으로, 축 부분들과 같이 많은 강도를 요구하는 곳은 탄소공구강(STC3)를 사용하여 제작하였다. 가공방법에 있어서는 형상이 복잡한 부분은 레이저를 이용하여 정밀하게 가공하였으며, 검광자와 편광자를 부착하였을 때의 하중을 고려하여 보강판과 보강재를 Fig. 3과 같이 설계·제작하였다.

광원은 저압 나트륨등과 백열등을 사용하였다. 백열등은 프린지 값을 확인할 때 다양한 색으로 육안구별이 가능한 반면, 나트륨등은 단색광으로 영상처리를 하는데 있어서 특별한 필터링이

없이 프린지 식별이 용이하여 선명한 이미지를 얻을 수 있다. 본 원형편광기의 제작에 이용된 광원은 Fig. 4와 같다.

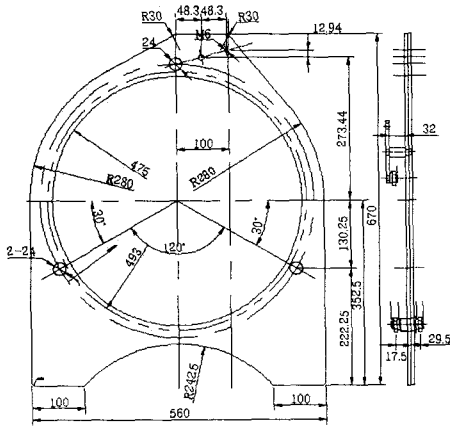


Fig. 3 Supporter for analyzer plate and polarizer plate

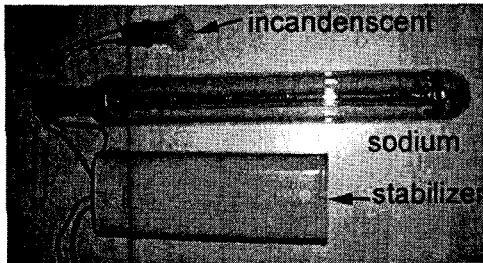


Fig. 4 Light source (sodium-vapor and incandescent lamps and stabilizer)

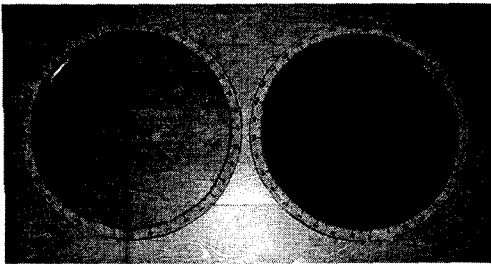


Fig. 5 Polarizer and quarter wave plates

Fig. 5는 편광판(polarizer)과 4분파판(quarter

wave plate)이 조립된 부품이다. 편광판과 4분파판은 각각 2개씩 동일 형상으로 제작하였다. 편광판과 4분파판의 필터를 고정하기 위하여 사용한 환형철판은 두께가 3mm인 SS41 철판을 사용하였으며, 검광판과 편광판의 앞뒤에 각각 두께 3mm의 강화유리를 사용하여 부착하였다. 각도를 표시하기 위해 사용된 눈금판은 컴퓨터를 이용하여 정밀하게 가공하였다.

각각의 부품을 가공 및 제작하여 원형편광기를 조립하였다. 광원을 내장한 빛상자와 검광자 및 편광자가 조립된 원형편광기는 Fig. 6과 같다.

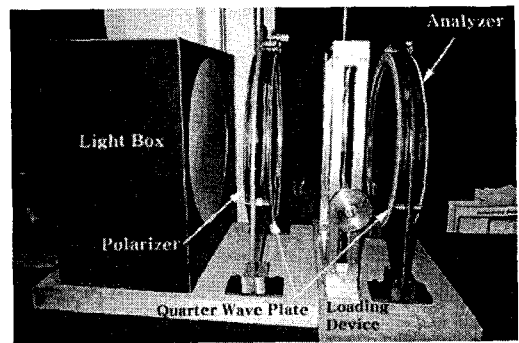


Fig. 6 Assembled transmission-type circular polariscope

### 3. 편광기 교정시험

#### 3.1 편광기 교정방법

편광기의 성능을 시험하기 위해, 광탄성 시편을 제작하여 교정시험을 하였다. 교정시험과 관련된 광탄성 이론은 다음과 같다.

주응력 성분중에서 한 성분이 0일 경우, 즉  $\sigma_3=0$  일 때는 2차원 또는 평면응력상태가 되며 0이 아닌 평면주응력(plane principal stress)성분은  $\sigma_1$  및  $\sigma_2$  가 된다. 복굴절현상에 의한 응력-광법칙(stress-optic law)에 따르면 주응력의 차이값 ( $\sigma_1 - \sigma_2$ )은 다음의 식과 같은 관계를 갖는다<sup>(2)</sup>.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (3)$$

위의 식에서  $N$ 은 등색프린지차수(isochromatic

fringe order),  $f_o$  는 재료의 프린지상수(material fringe constant)이고  $h$  는 시편의 두께를 나타낸다.

등색프린지 차수  $N$  은 타디보정법으로부터 얻을 수 있다. 타디보정법은 암시야배열의 원형편광 상태에서 시편에 하중을 가한 후 편광자가 주 응력 방향과 일치하거나 또는 평행이 되도록 검광자를 회전 ( $\beta$ ) 시킨다. 이때 프린지가 이동하여 광강도는 영(zero)이 되며 이로부터 등색프린지 차수  $N$  을 얻을 수 있다<sup>(2,3)</sup>.

$$N = n \pm \frac{\beta}{\pi} \quad (4)$$

그리고 두께가  $h$  이고 폭이  $w$  인 인장시편을 고려할 때, 축 방향 응력은 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$\sigma_1 = \frac{P}{wh} \text{ and } \sigma_2 = 0 \quad (5)$$

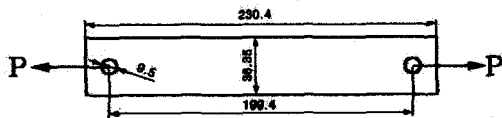
식 (5)를 식 (3)에 대입하면 다음의 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{P}{wh} = \frac{Nf_o}{h} \text{ 또는 } f_o = \frac{P}{wN} \quad (6)$$

위의 식 (6)에서 프린지상수  $f_o$  는 인장시편으로부터 시편의 두께와 무관하게 얻어짐을 알 수 있다. 다음은 시험편에  $P=48.0N, 73.9N, 95.1N$  및  $117.0N$  의 하중을 가한 후, 각각에 대하여 프린지 값을 측정하였으며, 이로부터 식 (6)을 이용하여 프린지 상수( $f_o$ )를 결정하였다.

### 3.2 시편

본 실험에서는 인장 하중을 받는 직사각형 시편을 표준시험편으로 사용하였으며 시험편의 형상은 Fig. 7과 같다.



unit: mm

Fig. 7 Dimensions of rectangular plate specimen

시험편 재질은 기계가공성이 우수한 폴리카보네이트 계열인 PSM1<sup>(5)</sup>이고 두께( $t$ )는 3mm이다. 재료의 표준 프린지 상수( $f_o$ )는 7005 N/m, 영탄성 계수( $E$ )는 2482 MPa, 포와송비( $\nu$ )는 0.38이다<sup>(5)</sup>.

### 3.2 시험결과

프린지 상수를 결정하기 위한 교정시험은 Fig. 6과 같이 새로 제작한 편광기와 실험실에서 보유하고 있는 060series(제작사 : Measurement group, USA) 원형편광기<sup>(6)</sup>를 이용하였다. 하중은 동일한 하중장치(loadng device)에 1kg중(9.8N) 간격으로 증가시켜 4회까지 증가시켰다.

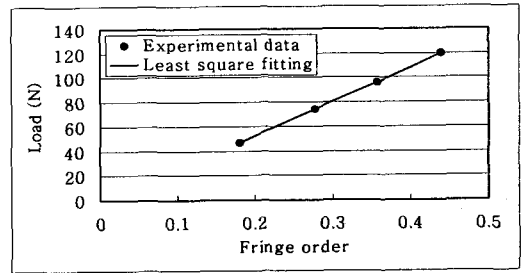


Fig. 8 Data obtained from new circular polariscope

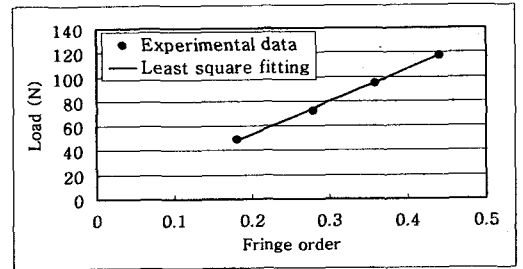


Fig. 9 Data obtained from 060series circular polariscope

새로 제작한 편광기와 060series 원형편광기를 이용하여 시험한 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. Fig. 10에서는 이들을 한 그래프에 표시하여 서로 다른 편광기로 측정된 값을 비교하였다. Table 1에서는 Fig. 8 및 Fig. 9로부터 계산하여 얻은 시험편의 프린지상수값을 나타냈다.

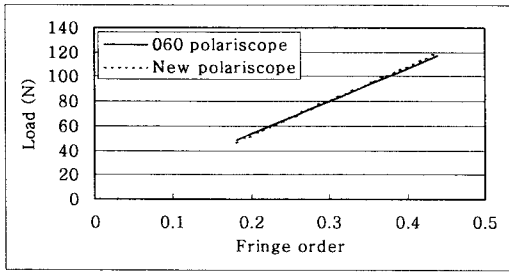


Fig. 10 Comparison of load vs. fringe order obtained from 060series and new polariscope

Table 1 Fringe constant obtained from new and 060series polariscope.

Fringe Constant	Standard Specimen	060 Circular Polariscope <sup>(5)</sup>	New Circular Polariscope
$f_{\sigma}^{(5)}$ (N/m)	7005	6945	7310

#### 4. 결론

편광기를 제작하여 교정시험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 새로 설계·제작된 편광기를 이용하여 타 디 보정법으로 측정된 프린지 상수( $f_{\sigma}$ )값은 시편의 표준프린지 상수( $f_{\sigma}$ )값과 약 4.4% 이내로 잘 일치하였다.

(2) 본 실험에서 나타난 오차는 편광판의 정밀도에 관계되며, 정확한 측정을 위해서는 편광특성이 정밀한 편광판 재질이 사용되어야 한다.

새로 제작된 편광기는 편광판의 정밀도를 제외하고는 기존의 편광기에 비해 4분파판과 검광판을 별도로 회전시킬 수 있으므로 다단계 위상 이동법등의 다양한 방법<sup>(6-8)</sup>으로 광탄성 프린지 차수 측정이 가능하다. 또한, 본 연구를 위해 제작된 편광기는 사용자의 목적에 따라 여러 가지 시험을 할 수 있도록 설계·제작되었으며 국내 제작 가능성을 제시하여, 해외에서 고가로 수입하는 것 보다 비용절감 측면에서 효과를 얻을 수

있을 것으로 기대된다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호: 2000-1-30400-001-2)의 일부 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- (1) Frocht, M. M., 1967, *Photoelasticity*, Vol. 1 and 2, John Wiley and Sons.
- (2) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1991, *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, Inc.
- (3) Cloud, G. L., 1995, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press.
- (4) Theocaris, P. S. and Gdoutos, E. E., 1979, *Matrix Theory of Photoelasticity*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- (5) Photoelastic Division, Measurement Group, Inc., Raleigh, NC. 27611, USA.
- (6) 백태현, 김명수, 조성호, 2000, "위상이동법을 이용한 등경 및 등색프린지 분리법의 컴퓨터 시뮬레이션", 2000년 춘계학술발표회 논문집, 한국 비파괴 검사학회, pp. 296~309
- (7) 백태현, 김명수, 조성호, 2001, "광탄성 프린지 위상이동법을 적용한 디스크의 등경 및 등색 프린지 분리법에 관한 시뮬레이션", *비파괴 검사학회지*, Vol. 21, No. 2, pp. 65-70.
- (8) Baek, T. H., Kim, M. S., Cho, S. H., Morimoto, Y. and Fujigaki M., 2001, "Digital Measurement of Isochromatics and Isoclinics in Photoelastic Fringes through a Circular Polariscope", *Proceedings of the SEM Annual Conference on Experimental Mechanics and Applied Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 125-128.