

## 광탄성 프린지 위상이동법을 적용한 디스크의 등경 및 등색프린지 분리법에 관한 시뮬레이션

### Simulation of Separating Isoclinics and Isochromatics from Photoelastic Fringes of a Disk using 8-step Phase Shifting Methodology

백태현\*, 김명수\*\*, 조성호\*\*\*

Tae-Hyun Baek\*, Myung-Soo Kim\*\* and Sung-Ho Cho\*\*\*

**초 록** 광탄성법은 전체적인 응력장 해석을 위하여 가장 많이 사용되는 방법중의 하나이다. 광탄성법에서 주응력의 차이와 방향은 등색선과 등경선으로 나타난다. 재래식 방법으로는 주응력 방향은 평면 편광기의 편광자와 검광자를 동시에 회전시켜 수작업으로 측정하며, 이를 타디보간법이라 한다. 이러한 방법은 전체적인 응력장 해석시 매우 번거로우며 많은 시간이 걸린다. 재래식 광탄성법에서는 광탄성 프린지로부터 등경선을 분리시킬 수 없다. 본 연구에서는 광탄성이론을 Jones 행렬로 나타내고 4단계와 8단계의 위상이동법에 대해서 기술하였다. 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 압축하중을 받는 원형디스크의 광탄성 프린지로부터 등경선과 등색선을 분리시킬 수 있는 시험을 하였다. 디스크의 프린지는 응력-광 법칙에 의하여 생성하였다. 8단계 위상이동법으로 얻은 등경선과 등색선의 크기를 이론으로 계산한 값과 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 광탄성 프린지로부터 등경선과 등색선을 분리시킬 수 있는 가능성을 예시하였다.

**주요용어:** 광탄성, 등경프린지, 등색프린지, 위상이동법, 존스행렬, 광탄성 프린지 자동측정

**Abstract** Photoelasticity is one of the most widely used methods for whole field stress analysis. In photoelasticity, the difference and the directions of the principal stresses are given isochromatic and isoclinic fringe patterns. Conventionally, principal stress directions are measured manually by rotating the polarizer and analyzer of a plane polariscope at the same time. This is known to be the Tardy compensation method. This measurement can be very tedious and time consuming in whole field analysis. It is not possible to separate isoclinics from photoelastic fringes by conventional photoelastic technique. In this study, photoelastic theory is represented by Jones matrices and 4-steps and 8-steps phase shifting methods are described. A feasibility study using computer simulation is done to separate isoclinics and isochromatics from photoelastic fringes of a circular disk under diametrical compression. Fringe patterns of the disk are generated using stress optic law. The magnitudes of isoclinics and isochromatics obtained from 8-step phase shifting method are compared with those of theories. From computer simulation, it is verified to separate isoclinics and isochromatics from photoelastic fringes.

**Keywords:** photoelasticity, isoclinic fringe, isochromatic fringe, phase shifting method, Jones matrix, automatic measurement of photoelastic fringe

#### 1. 서 론

광탄성법(photoelasticity)은 응력장 또는 변형률을 측정

하기 위한 실험역학으로 복굴절(birefringence) 현상을 이용하며, 전체적인 응력장을 관찰 할 수 있는 유일한 장점을 지니고 있다[1~3]. 편광기(polariscope) 사이에 위치한 시편에

하중을 가하면 복굴절현상으로 인하여 등색(isochromatic) 및 등경프린지(isoclinic fringe)가 나타난다. 등색프린지는 주응력 차이(principal stress difference)에 의해 나타나고, 등경프린지는 주응력 방향(direction of principal stress)이 서로 같은 지점을 연결한 궤적이다. 평면편광기(plane polariscope)에서는 등색 및 등경프린지가 동시에 나타나며, 원형편광기(circular polariscope)에서는 등색프린지를 별도로 얻을 수 있다.

일반적으로 등색 또는 등경프린지는 광강도(light intensity)가 서로 다른 유향축의 프린지밴드(fringe band)를 이루고 있기 때문에 최대 또는 최소의 광강도를 갖는 위치에서 육안으로 측정하여 응력으로 변환하고자 할 때 많은 시간이 소요되며 실험오차를 배제할 수 없다. 등색프린지 패턴을 얻을 수 있는 경우에도 프린지 차수는 관찰자가 판단하여 식별하여야 하며, 정밀한 프린지를 측정하기 위한 보간법과 프린지 증식법 등[2]이 있으나 속도도와 별도의 장치를 필요로 하므로 불편이 뒤따른다. 이에, 광탄성 데이터의 정밀 측정을 위하여 디지털 영상 처리를 적용한 등색선 프린지 증식 및 세선처리에 관한 연구(isochromatic fringe multiplication and sharpening)가 이루어져 정밀 응력해석에 응용되고 있다[4-7]. 한편으로, 원형편광기에서 편광판 요소들을 서로 다른 각도로 회전하면 프린지의 위상(fringe phase-shifting)이 이동된 영상을 얻을 수 있으며, 이들을 이용하여 전체적인 프린지 분포를 용이하게 얻을 수 있는 장점이 있어 이에 관련된 연구가 활발하다[8-10].

본 연구에서는 프린지 위상이동법에 관한 광학적인 이론을 적용하여, 4단계와 8단계의 위상이동법(4-steps and 8-steps phase shifting method)에 관한 이론을 Jones Matrix[11]로 나타낸 후 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 압축 하중을 받는 원형디스크의 중심선과 중심으로부터 떨어진 위치의 수평선상에서 위상이동법에 의한 프린지 분포를 계산하였으며, 이들 결과를 이론 응력분포로부터 얻은 이론 프린지 분포와 비교하였다. 특히, 8단계 위상이동법으로부터 등경 및 등색프린지 패턴을 별도로 얻을 수 있는 방법을 제시하였다.

## 2. 광학이론

편광기에서 광강도는 Jones Matrix를 이용하여 편리하게 계산될 수 있다. 원형편광기는 Fig. 1과 같이 2개의 선형편광판(linear polarizer)과 2개의 4분파판(quarter-wave plate)으로 구성되어 있다. 선형편광판을  $P$ 와  $R$ ,

4분파판을  $Q$ , 그리고 시편을  $R$ 이라 하면, 광원으로부터 원형편광판의 배열은  $PQRQA$ 로 나타낼 수 있다.

선형편광판의 광축이 수평축과 이루는 각도를  $\theta_1$  및  $\theta_2$ , 4분파판의 고속축(fast axis)이 수평축과 이루는 각도를  $\phi_1$  및  $\phi_2$ , 그리고 시편은 지연판(retarder)으로 등경 및 등색프린지와 관계되는  $\alpha$  및  $\delta$ 를 이용하여 표시하면  $P_{\theta_1} Q_{\phi_1} R_{\alpha, \delta} Q_{\phi_2} A_{\theta_2}$ 가 된다. 임의의 각도로 배열된 원형편광기에서 검광자  $A$ 로부터 얻게되는 수평 및 수직성분의 광벡터,  $E_x$  및  $E_y$ 는 다음의 식 (1)과 같이 Jones Matrix로 나타낼 수 있다[11].

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_2 & \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_2 & \sin^2 \theta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \cos^2 \phi_2 + \sin^2 \phi_2 & (i-1) \sin \phi_2 \cos \phi_2 \\ (i-1) \sin \phi_2 \cos \phi_2 & i \sin^2 \phi_2 + \cos^2 \phi_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha & (e^{i\delta} - 1) \sin \alpha \cos \alpha \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \alpha \cos \alpha & e^{i\delta} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \cos^2 \phi_1 + \sin^2 \phi_1 & (i-1) \sin \phi_1 \cos \phi_1 \\ (i-1) \sin \phi_1 \cos \phi_1 & i \sin^2 \phi_1 + \cos^2 \phi_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} k e^{i\omega t} \quad (1)$$

만일  $\theta_1 = 90^\circ$ ,  $\phi_1 = 45^\circ$ 라 하고,  $\theta_2 = \theta$  및  $\phi_2 = \phi$ 로 대치하면 식 (1)은

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \cos^2 \phi + \sin^2 \phi & (i-1) \sin \phi \cos \phi \\ (i-1) \sin \phi \cos \phi & i \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha & (e^{i\delta} - 1) \sin \alpha \cos \alpha \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \alpha \cos \alpha & e^{i\delta} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \times \frac{i+1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} k e^{i\omega t} \quad (2)$$

식 (2)의 광벡터를 이용하여 다음의 식 (3)과 같은 절차 [11]를 거쳐 광강도(light intensity)를 얻을 수 있다.

$$I = \overline{E_x} \cdot E_x + \overline{E_y} \cdot E_y \quad (3)$$

식 (3)에서  $\overline{E_x}$ ,  $\overline{E_y}$ 는  $E_x$  및  $E_y$ 의 공액복소수(complex conjugate)를 나타낸다. 식 (2)는 식 (3)의 절차

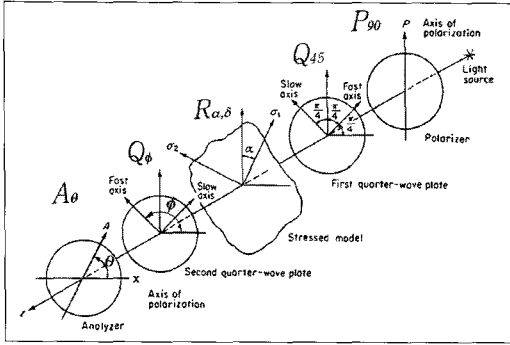


Fig. 1 Schematic diagram of a circular polariscope

에 따라 다음의 식 (4)와 같이 간단히 정리될 수 있다.

$$I = K \{ 1 - \sin 2(\theta - \phi) \cos \delta - \sin 2(\phi - \alpha) \cos 2(\theta - \phi) \sin \delta \} \quad (4)$$

식 (4)에서  $R$ 는 비례상수이며, 등색프린지 파라미터  $\delta$ 는 프린지 차수  $N$ 과  $\delta = 2\pi N$ 의 관계를 갖는다.

### 2.1. 4-단계 위상이동법

4-단계 위상이동법(4-step phase shift method)은 원형 편광기의 암시아배열(dark field arrangement)로부터 검광자를  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  및  $135^\circ$  회전시켜 각각에 해당되는 광탄성 영상을 얻은 후, 이들로부터 등색선 분포에 대한 위상맵을 얻는다[9]. 4-단계 위상이동법에서 각각의 광강도에 관한 식은 Table 1과 같다.

Table 1에서 검광자로부터 출력된 광강도에 관한 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} = \frac{\cos 2\alpha \sin \delta}{\cos \delta} \quad (5)$$

식 (5)에서  $\alpha = 0^\circ$  또는  $\alpha = \pm\pi$ 인 경우에 등색프린지 차수는

$$N = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \right) \quad (6)$$

따라서 4-단계 위상이동법은 오로지 등경선  $\alpha = 0^\circ$  또는  $\alpha = \pm\pi$ 인 경우에 유효하며, 그렇지 않은 경우에 등색프린지 차수  $N$ 은 등경선의 각도에 따른 오차가 포함된다.

### 2.2. 8-단계 위상이동법

8-단계 위상이동법(8-step phase shift method)은 선형 편광자와 4분과편을 4-단계 위상이동법과 같은 각도로 배열한 후, 검광자와 4분과편을 Table 2와 같은 각도로 회전하여 프린지패턴을 얻는다[12]. 8-단계 위상이동법에서 각각의 편광판배열에 따른 광강도는 Table 2에 나타난 식과 같다. Table 2의 No. 5~8의 배열은 본 논문에서 제안된 방법으로 2개의 편광판 요소만 회전하여 프린지패턴을 얻을 수 있다.

Table 2에 나타난 광강도에 관한 식으로부터 등경선의 각, 즉 주응력 방향에 대한 각도는

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{I_5 - I_6}{I_1 - I_2} \right) \quad (7)$$

또한, 등색프린지 차수는

$$N = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{(I_1 - I_2) \cos 2\alpha + (I_5 - I_6) \sin 2\alpha}{\frac{1}{2} [(I_4 - I_3) + (I_8 - I_7)]} \right\} \quad (8)$$

8-단계 위상이동법은 식 (7)과 같이 4개의 프린지패턴으로부터 얻은 등경각  $\alpha$ 와 Table 2에 나타난 8개의 프린지패턴을 이용하여 식 (8)과 같이 등색프린지 차수에

Table 1 Polariscope configuration and output intensities of 4-step phase shift method

No.	Configuration	Output Intensity	Fringe Pattern
1	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_0$	$I_1 = \frac{K}{2} (1 - \cos \delta)$	Circular Polariscope Dark Field
2	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_{45}$	$I_2 = \frac{K}{2} (1 - \cos 2\alpha \sin \delta)$	None
3	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_{90}$	$I_3 = \frac{K}{2} (1 + \cos \delta)$	Circular Polariscope Light Field
4	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_{135}$	$I_4 = \frac{K}{2} (1 + \cos 2\alpha \sin \delta)$	None

Table 2 Polariscopes configuration and output intensities of 8-step phase shift method

No.	Configuration	Output Intensity	Fringe Pattern
1	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{45} A_{-45}$	$I_1 = \frac{K}{2} (1 + \cos 2\alpha \sin \delta)$	None
2	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_0$	$I_2 = \frac{K}{2} (1 - \cos 2\alpha \sin \delta)$	None
3	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_0$	$I_3 = \frac{K}{2} (1 - \cos \delta)$	Circular Polariscopes Dark Field
4	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{45} A_0$	$I_4 = \frac{K}{2} (1 + \cos \delta)$	Circular Polariscopes Light Field
5	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_0 A_0$	$I_5 = \frac{K}{2} (1 + \sin 2\alpha \sin \delta)$	None
6	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{90} A_{90}$	$I_6 = \frac{K}{2} (1 - \sin 2\alpha \sin \delta)$	None
7	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_0 A_{45}$	$I_7 = \frac{K}{2} (1 - \cos \delta)$	Circular Polariscopes Dark Field
8	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{90} A_{45}$	$I_8 = \frac{K}{2} (1 + \cos \delta)$	Circular Polariscopes Light Field

관한 위상값을 계산할 수 있다. 따라서, 8-단계의 위상 이동법을 이용하면 각각의 지점에서 주응력각( $\alpha$ )과 주응력차이( $\sigma_1 - \sigma_2$ )에 관한 데이터를 분리하여 측정할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

#### 3.1. 원형디스크 이론 응력 분포

위상 이동법의 프린지패턴에 대한 컴퓨터 시뮬레이션은 압축하중을 받는 디스크를 택하였다. 원형디스크의 프린

지 시뮬레이션은 다음의 절차에 따른다. Fig. 2에서 디스크에 가한 압축하중을  $P$ , 디스크의 반지름을  $R$ , 두께를  $t$ 라하고, 하중지점  $O_1$  위치로부터 응력요소까지의 거리를  $r_1$ ,  $O_2$ 로부터 응력요소까지의 거리를  $r_2$ 로 나타내면  $X-Y$ 좌표계에서 평면응력성분은 다음의 관계식과 같다[1]. 식 (9)를 이용하면 디스크내의 각각의 지점에서 응력성분을 계산할 수 있다.

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi t} \left[ \frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{2R} \right] \quad (9a)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left[ \frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{2R} \right] \quad (9b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left[ \frac{(R-y)^2 x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2 x}{r_2^4} \right] \quad (9c)$$

식 (9)와 같이 주어진 응력성분으로부터 주응력은 다음의 식에 의하여 계산한다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (10)$$

프린지차수( $R$ )는 응력-광법칙(stress-optic law)으로부터 평면주응력 성분  $\sigma_1$  및  $\sigma_2$ 와 다음의 관계를 갖는다[2].

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{t} \quad (11)$$

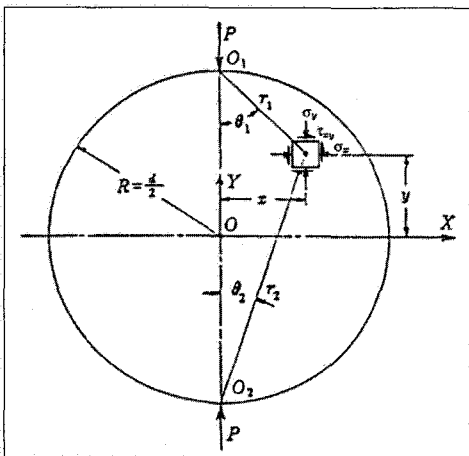


Fig. 2 Stress components in a disk under diametric compression

식 (11)에서  $f_\sigma$ 는 재료의 광탄성계수(photoelastic

coefficient)이며, 주응력 차이에 의해 나타나는 상대지연 (relative retardation)  $\delta$ 는 등색프린지 차수  $N$ 과  $\delta=2\pi N$ 의 관계를 갖는다. 한편으로, 등경선은 주응력 방향의 각도에 따라 나타나며 다음의 식과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\tau_{xy}}{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)} \right\} \quad (12)$$

따라서, 주어진 하중조건에 따라 각각의 지점에서 이론적인 등색프린지 차수와 등경각을 식 (11)과 (12)에 의해 계산할 수 있으며, 이들을 Table 1 및 Table 2의 각각의 식에 대입하여 프린지패턴을 시뮬레이션할 수 있다. 시뮬레이션은 하중  $P=26.7 \text{ N}$  (6 lb), 디스크의 반지름  $R=381\text{cm}$  (15 in), 디스크의 두께  $t=0.476\text{cm}$  (3/16 in) 및 프린지 상수  $f_o=5.254 \text{ N/cm}$  (3.0 lb/in.)의 조건이 사용되었다. 식 (11)을 이용하여 주응력의 차이에 의한 프린지 차수를 계산할 수 있고, 프린지 차수로부터 상대지연은  $\delta=2\pi N$ 의 관계를 이용하여 구한다. 또한, 등경각  $\alpha$ 는 식 (12)에 의하여 구할 수 있다. 디스크의 각각의 지점에서 계산된  $\delta$ 와  $\alpha$ 를 Table 1의 식에 대입하면 해당되는 4개의 프린지패턴을 시뮬레이션할 수 있다.

### 3.2. 4단계 위상이동법

4-단계 위상이동법에 사용된 프린지패턴은 Table 1의 식을 사용하여 얻었으며, 각각의 프린지패턴은 Fig. 3와 같다. Fig. 3에서 (a)와 (c)는 각각 원형편광기의 암시야 (dark field)와 명시야(light field)배열의 프린지패턴과 동일하나, (b)와 (d)는 표준원형편광 상태가 아니다. Fig. 3와 같은 4개의 프린지 패턴을 식 (6)에 적용하여 Fig. 4과 같은 위상맵을 얻었다.

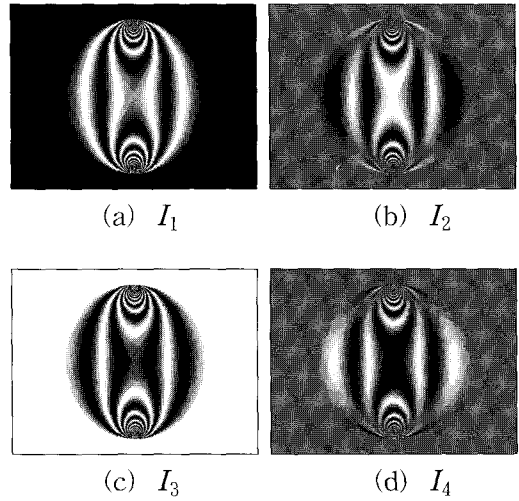


Fig. 3 Fringe patterns obtained by 4-step phase shifting method

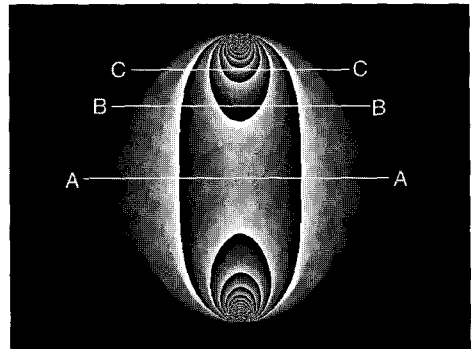


Fig. 4 Fringe phase map calculated by Eq (6)

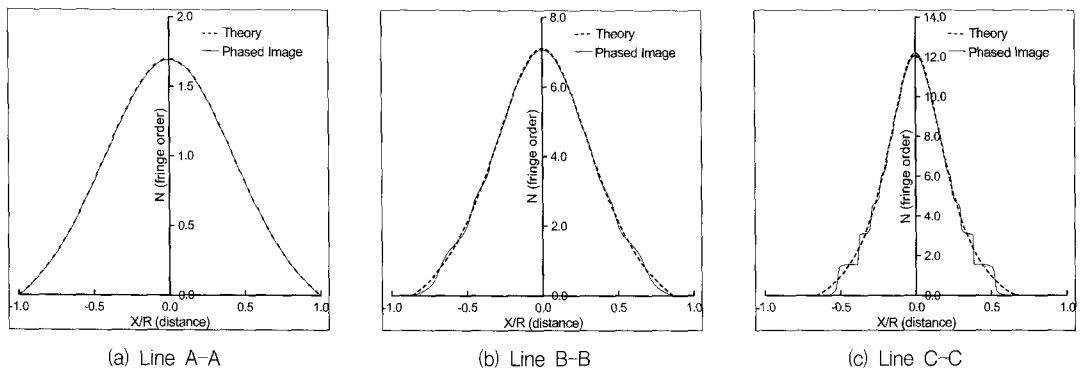


Fig. 5 Comparison of isochromatic fringe value distribution along different horizontal lines

Fig. 4에 나타난 A-A는 디스크의 중심을 통과하는 수평선이며, B-B는 중심으로부터  $y=R/2$ , C-C는 의 위치에서 수평선을 나타낸다. Fig. 4에 나타난 각각의 선상에서 4-단계 위상이동법에 의한 프린지분포와 이론적인 프린지분포를 비교하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)에서 보인 바와 같이 A-A선상에서는 등경각이  $R$ 이므로 4-단계 위상이동법이 유효하며 이론적인 프린지분포와 잘 일치한다. 그러나 Fig. 5(b) 및 (c)에서와 같이 4-단계 위상이동법에 의한 프린지분포는 이론적인 분포와 서로 다르며, 그 이유는 B-B 및 C-C선상에서 등경각은 중심에서 벗어나면 영이 아닌 값을 갖기 때문이다.

3.3. 8-단계 위상이동법

8-단계 위상이동법에 사용된 8개의 프린지패턴은 Table 2의 식을 사용하여 얻었다. 각각의 프린지패턴은

Fig. 6와 같다. Fig. 6에서 (c), (g) 및 (d), (h)는 각각 원형편광기의 암시야(dark field)와 명시야(light field)배열의 프린지패턴과 동일하다. 그러나, 동일한 암시야 또는 명시야 배열의 원형편광일 경우에도 4분과관과 검광자의 수평축으로부터 회전된 각도가 서로 다르다. Fig. 6의 (a), (b), (e) 및 (f)는 표준원형편광 상태가 아니다. 8-단계 위상이동법에서는 식 (7)을 이용하여 등경선의 각도를 계산한 후, 계산된 등경각과 식 (8)에 나타난 각각의 프린지패턴을 이용하여 등색프린지에 관한 위상맵을 얻는다. 주어진 조건에서 이론적인 등경각은 Fig 7(a)와 같으며, 식 (7)에 의한 등경각은 Fig. 7(b)과 같다.

Fig. 7의 (c)에 나타난 각각의 선상에서 이론과 위상이동맵으로부터 얻은 등경프린지 분포를 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에 보인바와 같이 디스크의 중심을 지나는 수평선상에서는 등경각이  $0^\circ$  이나 중심에서 벗어나 위로 올라갈수록 등경각이 점점 증가하게 된다. 모든 선상에서

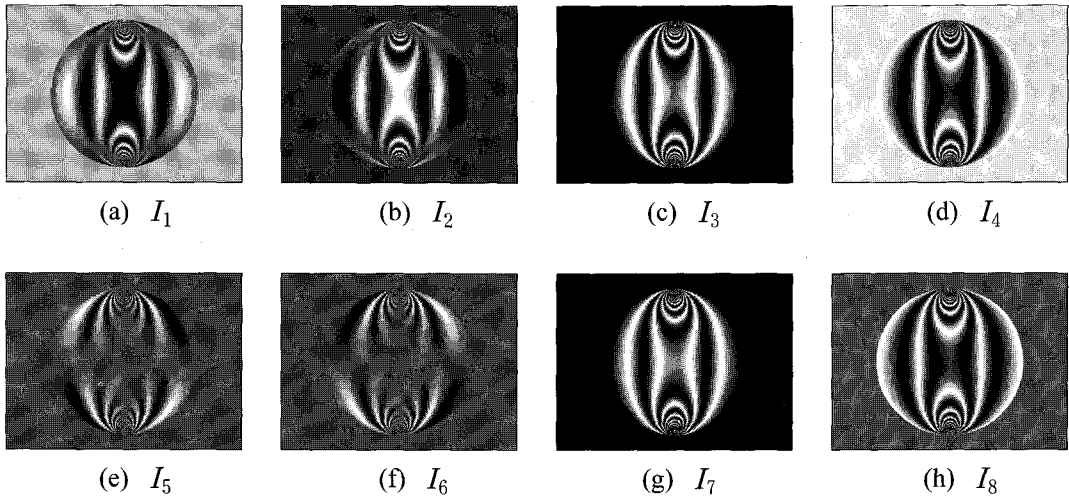


Fig. 6 Fringe patterns obtained by 8-step phase shifting method

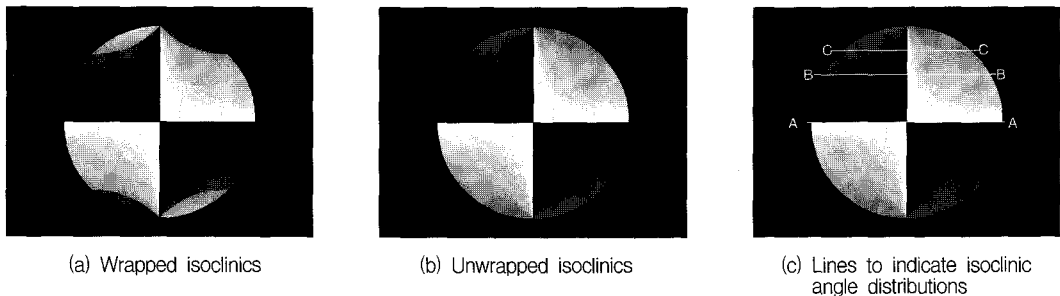


Fig. 7 Isoclinic fringe distribution of a disk under diametric compression

위상이동법에 의한 등경각은 이론과 정확히 일치하였다. 각각의 데이터로부터 0°에서 15° 간격으로 등경선에 대한 윤곽곡선(contour line)을 나타내면 Fig. 9과 같으며, 위상

이동법으로부터 얻은 값들은 역시 이론과 일치하였다.

이론식과 8-단계 위상이동법을 이용하여 계산된 등색 프린지 위상맵은 Fig. 10의 (a) 및 (b)와 같다.

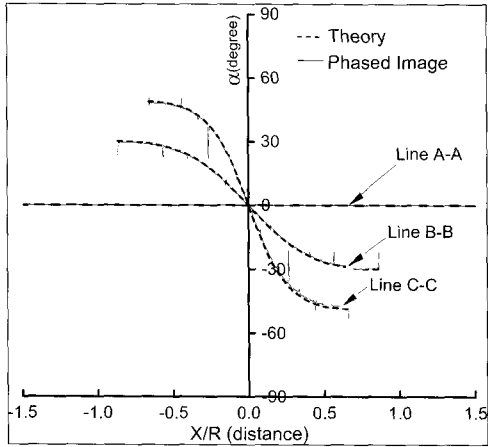


Fig. 8 Comparison of isoclinic angle distributions along different lines

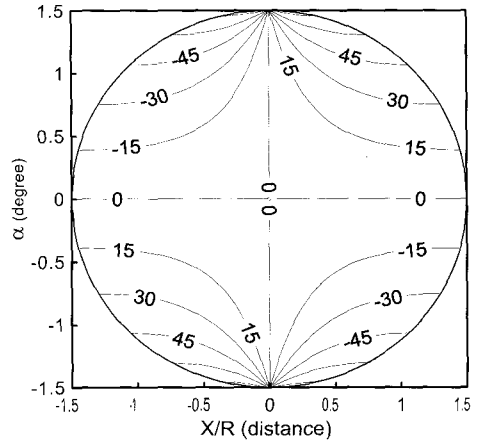
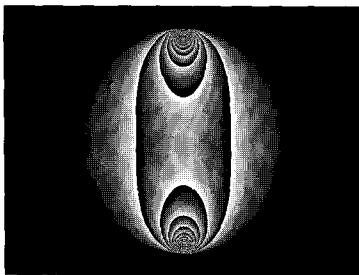
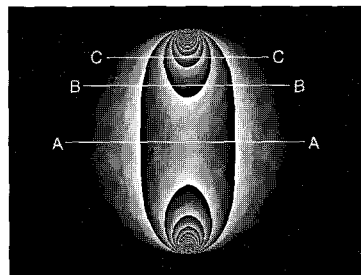


Fig. 9 Contour lines of isoclinic fringe distribution

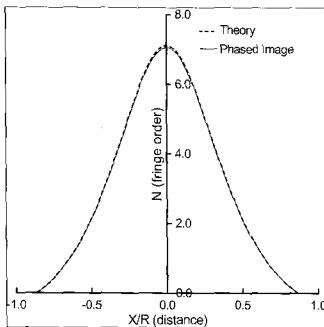


(a) Theory

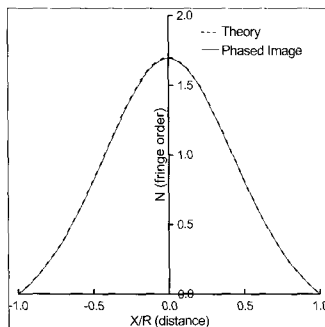


(b) 8-step phase shift method

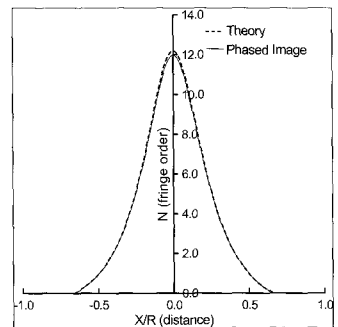
Fig. 10 Isochromatic fringe phase map



(a) Line A-A



(b) Line B-B



(c) Line C-C

Fig. 11 Comparison of isochromatic fringe value distribution along different lines

Fig. 10의 (b)에 나타낸 각각의 선상에서 이론과 위상 맵으로부터 얻은 등색프린지 분포를 나타내면 Fig. 11과 같다. Fig. 11의 (a), (b) 및 (c)에서 보인바와 같이 8-단계 위상이동법을 이용하면 임의의 등경각에서도 프린지 분포를 정확히 얻을 수 있다.

#### 4. 결 론

광탄성법에서 등경 및 등색프린지 패턴을 별도로 얻기 위하여 위상이동법을 이용하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 4-단계 위상이동법을 이용한 등색프린지 분포는 등경각이  $0^\circ$  인 선상, 즉 디스크의 중심을 지나는 수평 선상에서는 이론과 일치한다. 그러나, 디스크 중심이 아닌 수평선상에서는 하중 축으로부터 벗어나게 되면 등경각이 증가하게 되며 이로 인하여 이론분포와 차이가 많아지게 된다.
- (2) 재래식 방법과 4단계 위상이동법으로는 편광기로부터 등경 및 등색프린지 분포를 별도로 얻을 수 없으나, 8-단계 위상이동법으로부터 이론분포에 일치하는 등경 및 등색프린지 분포를 별도로 얻을 수 있다.

광탄성법에서 현재까지 발표된 다단계 위상이동법은 원형편광기를 구성하고 있는 4개의 모든 편광판을 특정 각도로 회전시켜 얻은 프린지패턴을 이용한다. 그러나, 본 논문에서 제안된 편광기의 배열은 Table 2에서 보인 바와 같이 단지 4분파판과 검광자, 2개의 편광판 회전에 의하여 얻은 프린지패턴을 이용하므로 프린지해석에 소요되는 작업이 간편하다. 특히, 등색 및 등경프린지를 별도로 얻을 수 있으므로 이를 이용하여 응력성분을 구할 수 있다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- [1] M. M. Frocht, *Photoelasticity*, Vol. 1 and 2, John Wiley and Sons (1967)
- [2] J. W. Dally and W. F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, pp. 441-450 McGraw-Hill, Inc. (1991)
- [3] C. P. Burger, "Chapter 5. Photoelasticity," in *Handbook on Experimental Mechanics*, 2nd Ed, Edited by Kobayashi, A. S., Society for Experimental Mechanics, VCH Publishers, pp. 165-266 (1993)
- [4] T. H. Baek and C. P. Burger, "Accuracy Improvement Technique for Measuring Stress Intensity Factors in Photoelastic Experiment," *KSME Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 22-27 (1991)
- [5] 백태현, "광탄성 프린지 해석을 위한 영상처리 기법 개발", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제10호, pp. 2577-2584 (1994)
- [6] T. H. Baek, M. S. Kim, J. Rhee and R. E. Rowlands, "Hybrid Full-filed Stress Analysis of Perforated Plate by Photoelasticity and conformal Mapping," *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics '99 (ATEM'99)*, JSME-MMD, Vol. 2, pp. 642-646 (1999)
- [7] 백태현, 김명수, 김수일, "광탄성법을 이용한 곡선보 평판의 응력분포 해석", 비파괴검사학회지, 제19권, 제3호, pp. 200-206 (1999)
- [8] A. Ajovalasit, S. Barone and G. Petrucci, "A Review of Automated Methods for the Collection and Analysis of Photoelastic Data," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 33, No. 2, pp. 75-91 (1998)
- [9] A. Asundi, "Phase Shifting in Photoelasticity," *Experimental Techniques*, Vol. 7, No. 1, pp. 19-23 (1993)
- [10] K. Ramesh and V. Ganapathy, "Phase-shifting Methodologies in Photoelastic Analysis - The Application of Jones Calculus," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 31, No. 1, pp. 423-432 (1996)
- [11] P. S. Theocaris and E. E. Gdoutos, *Matrix Theory of Photoelasticity*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1979)
- [12] J. A. Quiroga and A. Gonzalez-Cano, "Phase Measuring Algorithm for Extraction of Isochromatics of Photoelastic Fringe Patterns," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 32, pp. 8397-8402 (1997)