

광탄성프린지 위상이동법을 이용한 에지균열판의 응력 해석

Stress Analysis of an Edge-Cracked Plate by using Photoelastic Fringe Phase Shifting Method

백태현*, 김명수**, 조성호***
 Tae Hyun Baek*, Myung Soo Kim** and Sung Ho Cho***

초 록 광탄성법은 투명한 물체에 힘을 가하면 복굴절 현상이 나타나며, 편광기에 의해 등색 및 등경프린지가 나타난다. 등색프린지를 이용하여 주응력차이 또는 평면상 전단응력을 계산할 수 있으며, 등경프린지에 의해 주응력 방향을 결정할 수 있다. 재래식 광탄성법에서는 특정한 위치에서 프린지를 개별적으로 측정해야 되는 불편한 점이 있어, 디지털 영상처리에 의해 광탄성 프린지로부터 전체적인 응력장을 해석할 수 있도록 프린지이동에 의한 위상이동법이 개발되었다. 프린지 위상이동법은 원형편광기에서 검광자를 0° , 45° , 90° 및 135° 회전시켜 프린지가 이동된 4개의 영상을 얻고, 이들로부터 위상차이로 나타나는 프린지분포를 측정한다. 본 연구에서는 프린지 위상이동법에 관한 광학적인 이론을 이용하여 압축하중을 받는 원형디스크의 프린지분포를 위상이동법으로 측정한 후 이론 값과 비교하였다. 또한, 인장하중을 받는 에지균열판의 응력분포 해석에 프린지 위상이동법을 적용하였다. 실험결과, 프린지 위상이동법으로 측정한 결과는 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다. 광탄성에서 위상이동법은 등경선과 평행하거나 직교하는 선상에서 응력분포를 용이하게 측정할 수 있으나, 일반적인 프린지 해석시 프린지 위상이동법을 적용하면 오차가 포함될 수 있다.

주요용어 : 광탄성, 응력해석, 광탄성 프린지 위상이동법, 원형편광기, 실험응력해석, 디지털영상처리, 원형디스크, 에지균열판

Abstract The method of photoelasticity allows one to obtain principal stress differences and principal stress directions in a photoelastic model. In the classical approach, the photoelastic parameters are measured manually point by point. The previous methods require much time and skill in the identification and measurement of photoelastic data. Fringe phase shifting method has been recently developed and widely used to measure and analyze fringe data in photo-mechanics. This paper presents the test results of photoelastic fringe phase shifting technique for the stress analysis of a circular disk under compression and an edge-cracked plate subjected to tensile load. The technique used here requires four phase stepped photoelastic images obtained from a circular polariscope by rotating the analyzer at 0° , 45° , 90° and 135° . Experimental results are compared with those of FEM. Good agreement between the results can be observed. However, some error may be included if the technique is used to general direction which is not parallel to isoclinic fringe.

Keywords: photoelasticity, stress analysis, photoelastic fringe phase shifting method, circular polariscope, experimental stress analysis, digital image processing, circular disk, edge-cracked plate

1. 서 론

광탄성법(photoelasticity)은 응력장 또는 변형률을 측

정하기 위한 실험역학으로, 투명한 재료가 응력이나 변형률의 변화되는 정도에 따라 발생하는 복굴절(birefringence) 현상을 이용한다. 즉, 일종의 투명한 비결

경(noncrystalline) 재료는 응력을 받지 않은 상태에서는 광학적으로 등방성(isotropic)이나, 응력을 받게되면 결정체(crystal)와 유사하게 광학적으로 이방성(anisotropic)이 된다. 이러한 현상을 이중굴절(double refraction) 또는 복굴절이라 하며, 하중이 가해진 상태에서는 복굴절이 그대로 유지되지만 하중이 제거되면 복굴절 현상도 사라진다[1~3].

광탄성에서 복굴절은 편광기(polariscope)에 의해 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. 일반적으로 등색 또는 등경프린지는 광강도(light intensity)가 서로 다른 유한폭의 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. 정밀한 프린지를 측정하기 위한 보간법과 프린지 증식법 등[2]이 있으나 숙련도와 별도의 장치를 필요로 하므로 불편이 뒤따른다. 광탄성 데이터 측정상의 난이점을 해결하기 위하여 등색선의 프린지차수(fringe order)가 반 프린지 이하인 경우, 전체의 응력장으로부터 광탄성 데이터를 영상처리법으로 측정할 수 있는 반프린지 광탄성법(half fringe photoelasticity)이 개발되어 편리하게 사용되고 있다[4]. 또한, 프린지 차수가 많은 경우, 광탄성 데이터의 정밀 측정을 위하여 디지털 영상처리를 적용한 등색선 프린지 증식 및 세선처리에 관한 연구(isochromatic fringe multiplication and sharpening)[5~7]가 이루어져 정밀 응력해석에 응용되고 있다[8,9]. 한편으로, 등색프린지의 해석을 위하여 최근까지 연구·개발된 여러 가지 광탄성기법[10]중 타디보간법(Tardy compensation method)을 이용한 프린지 위상이동법(fringe phase-shifting

method)[11]은 프린지분포를 용이하게 얻을 수 있는 장점이 있어 이에 관련된 연구가 활발하다.

본 연구에서는 프린지 위상이동법에 관한 광학적인 이론을 적용하여, 압축하중을 받는 원형디스크의 중심선상에서 프린지 분포를 측정한 후, 이들 결과를 이론적인 프린지분포와 비교하였다. 또한, 위상이동법으로 에지균열판(edge cracked plate)의 균열선단에 따른 응력분포를 측정하였다.

2. 이론

2.1. 원형편광기의 광강도

원형편광기(circular polariscope)는 Fig. 1과 같이 편광자(polarizer), 두 개의 4분파판(quarter wave plate), 그리고 검광자(analyzer)로 구성되어 있으며 두 개의 4분파판 사이에 시편을 위치시켜 하중을 가할 때 나타나는 프린지로 응력을 해석한다. 편광자와 검광자가 서로 직교하고, 4분파판의 배열이 Fig. 1과 같을 때 암시아 원형편광(dark-field circular polariscope) 상태가 된다. 광원이 단색광일 경우, 밝고 어두운 프린지(fringe)가 교대로 나타나며 정차수(integral fringe)와 반차수(half order fringe)를 측정할 수 있다. 암시아배열의 원형편광 상태에서 검광자를 통하여 나타난 광강도(light intensity)는

$$I = K \sin^2\left(\frac{\Delta}{2}\right). \quad (1)$$

식(1)에서 Δ = 상대지연(relative retardation)으로 $\Delta = 2\pi N$ 이며, N 은 등색선프린지(isochromatic fringe) 차수를 의미한다. 한편으로, 광탄성의 광-응력법칙(stress optic law)에 따르면 주응력(principal stress)의 차이는 다음의 식과 같다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h}. \quad (2)$$

위의 식에서 σ_1 및 σ_2 는 평면응력(plane stress) 상태에서 주응력 성분이며, f_σ 는 재료의 프린지 상수(material fringe constant)이고, h 는 시편의 두께를 의미한다. 즉, 광강도는 식 (1)과 (2)로 나타낸 바와 같이 주응력의 차이에 비례한다.

한편으로, Fig. 1과 같은 암시아 배열의 원형편광상태에서 검광자를 임의의 각도 γ 로 회전시켰을 때 광강도

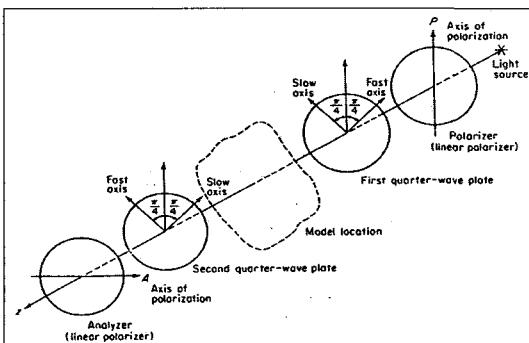


Fig. 1 Circular polariscope (dark-field setup)

(light intensity) I_γ 는

$$I_\gamma = K(1 - \cos 2\gamma \cos \Delta - \cos 2\alpha \sin 2\gamma \sin \Delta). \quad (3)$$

위의 식에서 K =비례상수, γ =암시아 배열로부터 검광자의 회전각, α =등경각(isoclinic angle)이다. 편광기를 시편의 주응력 방향(direction of principal stress)과 일치시켰을 때, 즉 등경각 $\alpha=0$ 조건에서는 식 (3)으로부터

$$I_\gamma = K(1 - \cos 2\gamma \cos \Delta - \sin 2\gamma \sin \Delta). \quad (4)$$

편광자가 주응력 방향과 일치하거나 또는 평행이 되도록 검광자를 회전시켰을 때, 프린지가 이동하여 광강도는 영(zero)이 되며 이로부터 프린지차수(fringe order) N 은

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} = n \pm \frac{\gamma}{\pi}. \quad (5)$$

식 (5)에서 n 은 원형편광기가 암시아배열로 정렬된 상태에서 육안에 의하여 구분될 수 있는 정차수 프린지(integral fringe order)이다. 암시아배열의 원형편광기에서 검광자를 회전시켜 흑색프린지(dark fringe)가 측정위치에 도달할 때, 각도 γ 를 측정하여 식 (5)에 대입하면 소수의 프린지차수(decimal fraction fringe order)를 얻을 수 있다. 이와 같이 소수의 프린지를 측정하는 방법을 타디보간법(Tardy compensation method)이라 한다. 타디보간법은 수작업(manual operation)에 의존하여 각각의 점에 대해서 개별적으로 계산(pointwise process)하여야 하는 불편한 점이 있다.

한편으로, 식 (4)를 아래와 같이 정리하면

$$I_\gamma = K\{1 - \cos(\Delta - 2\gamma)\}. \quad (6)$$

2.2. 프린지 위상이동법(Fringe Phase-Shifting Method)

원형편광기의 타디보간법(Tardy compensation)에 관한 식 (6)으로부터 프린지 위상이동법에 대한 식을 얻을 수 있다.

식 (6)에서 광탄성 프린지와 관계없는 background noise I_0 를 고려하고, $\phi = 2\gamma$ 로 대체시킨 후, 광강도

에 관한 일반적인 식으로 변형하여 나타내면

$$I(x) = I_0(x) + I_f(x) \cos[\Delta(x) + \phi]. \quad (7)$$

식 (7)에서 $I_f(x)$ 는 프린지패턴(fringe pattern)의 광진폭(amplitude)를 의미한다. ϕ 는 프린지 이동에 의한 위상차(phase difference)로서 등색프린지 차수와 관계되는 $\Delta(x)$ 를 구하기 위하여 0에서 2π 사이의 값을 택할 수 있으며, 여러 가지 알고리즘이 사용되고 있다[10]. 식 (7)에서 위상차 $\phi = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 의 4단계의 각도로 변화시켜 가며 얻은 광강도로부터 다음의 4-프린지 위상이동법(four-fringe phase shifting method)[11]에 관한 식을 구할 수 있다.

$$N(x) = \frac{\Delta(x)}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (8)$$

식 (8)로부터 $N(x)$ 에 관한 위상맵(whole-field phase map)을 생성할 수 있다. 그러나 식 (8)에서 arc tangent 함수는 $-\pi$ 에서 π 범위 이내이므로 위상점프(phase jump)가 나타난다. 이를 펼치면(unwrapping) 주응력 차이에 의하여 나타나는 프린지분포 $N(x)$ 를 얻을 수 있다. 이러한 위상맵은 광탄성에서는 검광자를 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 및 135° 로 회전시킬 때 프린지 이동으로 나타나는 현상을 이용하므로 프린지 위상이동법(fringe phase shifting method)이라고도 한다. 이러한 프린지 위상이동법은 재래적으로 사용되고 있는 타디보간법의 개선된 방법으로 생각할 수 있으며, 영상처리 컴퓨터에 의하여 4개의 영상을 이용, 전체적인 프린지분포를 용이하게 측정할 수 있다.

3. 실험

3.1. 원형디스크 실험

프린지 위상이동법의 유효성을 입증하기 위하여 Fig. 2 와 같이 상·하 직경방향으로 압축하중을 받는 원형디스크 중심의 수평선상에서 프린지분포를 측정하였다. 원형디스크의 재질은 광탄성에서 응력 동결(stress freezing) 용으로 사용되는 3DMU-050 epoxy resin[12]을 사용하였다. 이 재료의 프린지 상수는 응력동결온도(critical temperature)에서 $381.4N/m$ ($2.178 \text{ lb/in-fringe}$)이다. 디스크의 직경은 $44.70mm$ (1.76 in.) 이고 두께는 $3.18mm$

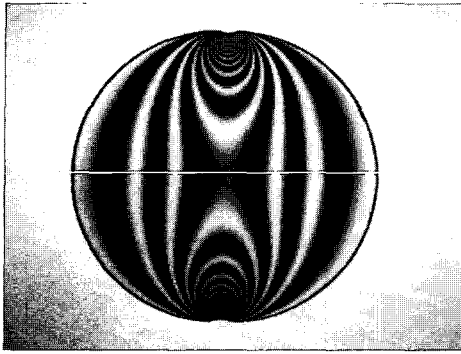


Fig. 2 Isochromatic fringe pattern in a disk under diametrically opposite concentrated loads

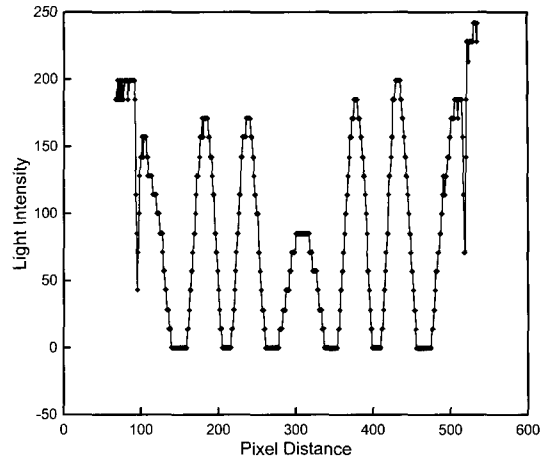
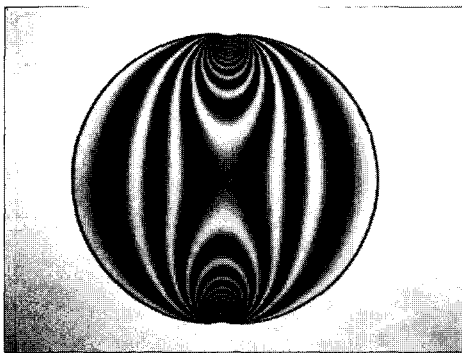
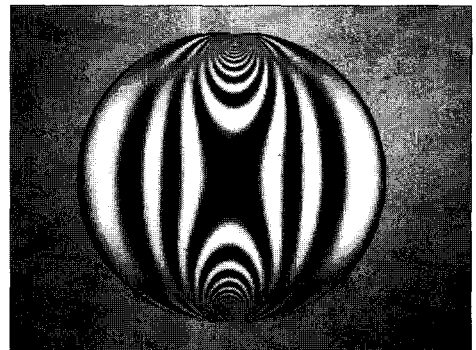


Fig. 3 Light intensity distribution along the horizontal line indicated in Fig. 2

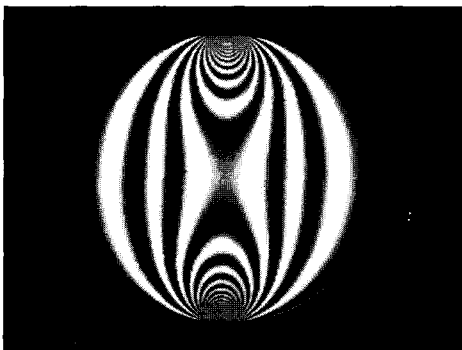
(0.125 in.) 이다. 18.7N (4.2 lb)의 하중을 가한 상태에서 응력을 동결한 프린지패턴은 평시야배열의 원형편광기에서 Fig. 2와 같이 나타났다. Fig. 2에서 수평선으로 나타



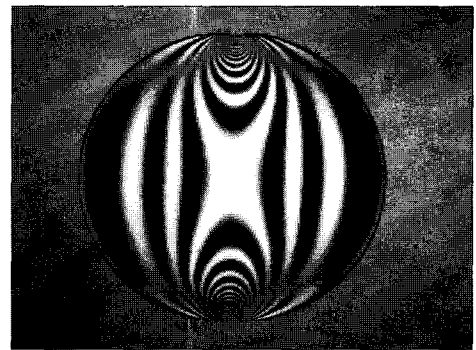
(a) 0°



(b) 45°



(c) 90°



(d) 135°

Fig. 4 Fringe shifted patterns by rotating analyzer

낸 선상의 광강도 분포는 Fig. 3과 같다. 제레식 광탄성법에서는 광강도가 최대 또는 최소인 지점에서 프린지를 측정한다. 그러나 Fig. 3에서 보인 바와 같이 흑색 또는 백색프린지(dark or white fringe)는 위치에 따라 광강도가 서로 다르므로 육안에 의한 측정시 정확한 위치를 판별하기가 어려우므로 측정 오차가 포함될 수 있다.

본 연구에서는 프린지이동에 의한 위상차로부터 프린지 분포를 결정하기 위하여 검광자를 0°, 45°, 90° 및 135° 회전시켜, Fig. 4와 같이 4개의 광탄성 영상을 얻었으며 이들을 영상처리 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 영상으로부터 식 (8)에 의하여 계산된 프린지 위상맵(fringe phase map)은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에 나타난 중심부의 수평선상에서 Fig. 6과 같은 최대 또는 최소의 광강도가 위치에 관계없이 균일하게 분포되어 상당량

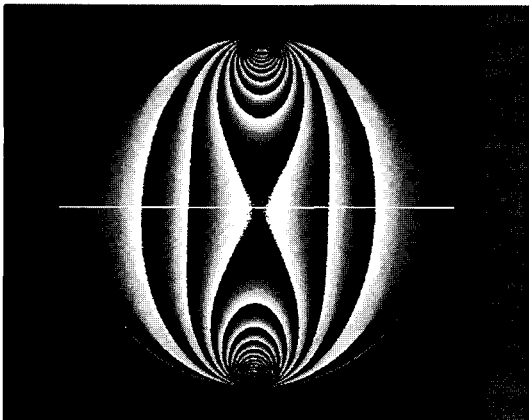


Fig. 5 Isochromatic fringe phase map calculated by Eq. (8)

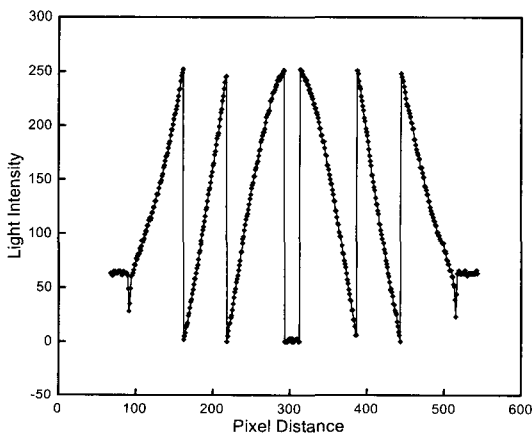


Fig. 6 Light intensities of fringe phase map along the horizontal line of Fig. 5

의 background noise가 제거되었음을 알 수 있다.

Fig. 2에 나타난 수평선상에서는 등경선의 각도가 $\alpha = 0^\circ$ 이므로 프린지 위상이동법을 적용할 수 있다. 프린지 위상맵은 식 (8)에서와 같이 arc tangent범위가 $-\pi$ 에서 π 이므로 Fig. 6과 같이 위상점프(phase jump)가 나타나며, 이러한 지점에서 2π 를 순차적으로 누적시키면 위상이동에 의한 광강도(phase intensity)를 펼칠 (unwrapping) 수 있다. 이러한 절차를 거쳐 Fig. 5의 수평선상에서 Fig. 7과 같은 전체적(whole field)인 프린지 분포를 얻을 수 있다.

3.2. 프린지분포 비교

Fig. 2 또는 Fig. 5에 표시된 수평선상에서의 이론적인 프린지분포[2]는 아래의 식 (9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$N(x) = \left(\frac{8P}{\pi D f_\sigma} \right) \left[\frac{D^4 - 4D^2 x^2}{(D^2 + 4x^2)^2} \right] \quad (9)$$

식 (9)에서 h 는 시편의 두께, D 는 디스크의 직경, P 는 작용하중이고, x 는 디스크의 중심으로부터 거리를 의미한다. 프린지이동에 의해 나타난 위상맵으로 측정된 실험 결과를 식 (9)에 나타난 이론 프린지 분포와 비교하면 Fig. 7과 같다. 단, Fig. 7에서 $R = D/2$ 이다. 디스크 중심의 수평선상에서 위상이동법에 의해 측정된 프린지

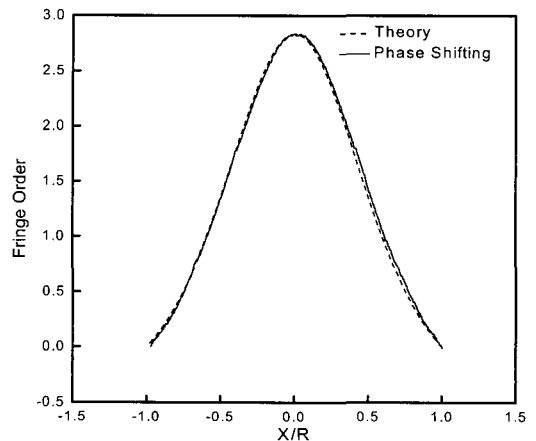


Fig. 7 Comparison of fringe distribution obtained from fringe phase shifting method and theory along the horizontal line of Fig. 2

분포는 이론 프린지와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 에지균열판 응력분포

프린지 위상이동법을 이용하여 응력집중이 극심한 에지균열판(edge-cracked plate)의 균열선단에 따른 응력분포를 측정하였다. 측정에 사용된 시편 형상은 Fig. 8과 같다. 시편의 재료는 폴리카보이트 계열인 PSM-1[13]이고, 두께는 3.18 mm, 재료의 프린지상수(f_o)는 7,005N/m이며 영탄성계수(E)는 2,482 MPa이다. 시편의 폭(W)은 20 mm이고, 균열은 직경 1 mm의 엔드밀로 균열깊이(a)가 6.7mm되도록 가공하였다. 이 경우 시편의 폭과 균열깊이의 비율은 $a/W=0.33$ 정도이다. 시편을 명시야 배열의 원형편광기에 위치시키고 63N의 하중을 가하였을 때 나타난 광탄성프린지 패턴은 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 균열선단 상반부의 수직선상에서 광강도 분포는 Fig. 10과 같으며, 균열선단 근방에서는 응력집중이 극심하여 프린지가 조밀하게 나타났다. 또한, 조밀하게 나타난 프린지의 광강도는 프린지 위치에 따라 최대 및 최소 광강도가 서로 다르게 나타났다.

Fig. 9의 에지균열 상단의 수직선상에서 프린지 분포를 측정하기 위하여 원형편광기의 명시야 배열로부터 0°, 45°, 90° 및 135° 회전시켰을 때 각각의 프린지가 이동된

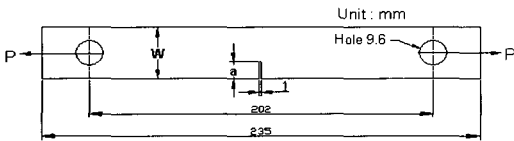


Fig. 8 Geometry of an edge-cracked plate

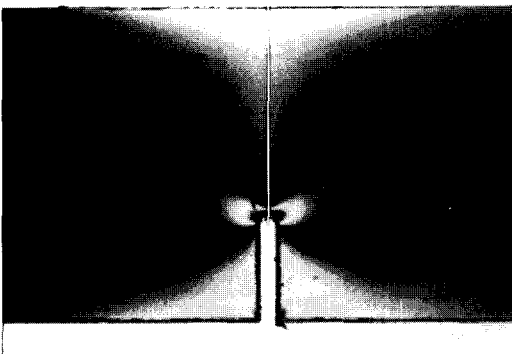


Fig. 9 Isochromatic fringe patterns of the edge-cracked specimen

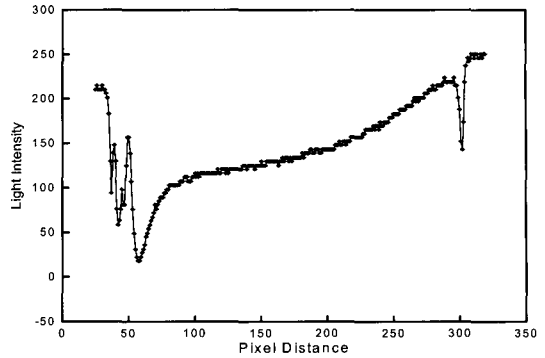


Fig. 10 Light intensity distribution along the vertical line indicated in Fig. 9

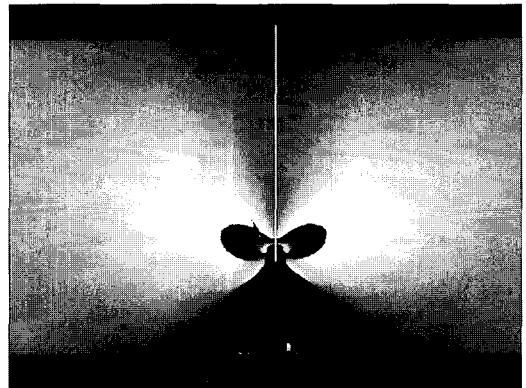


Fig. 11 Fringe phase map of the edge-cracked specimen

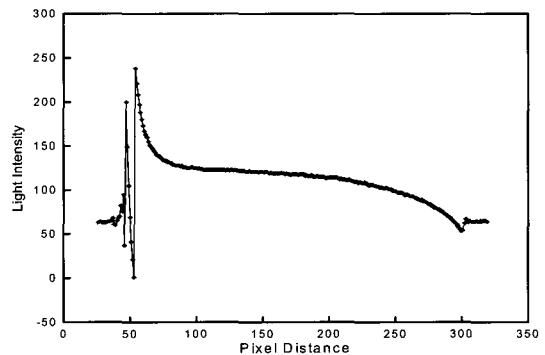


Fig. 12 Light intensity distribution along the vertical line indicated in Fig. 11

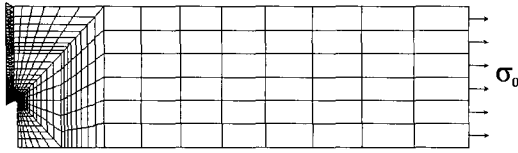


Fig. 13 ANSYS discretization of the edge-cracked specimen

영상을 얻었으며, 이들로부터 식 (8)에 의하여 계산된 프린지이동에 의한 위상맵은 Fig. 11과 같다. 위상맵으로부터 균열선단 상단의 수직선상에서 측정된 광강도분포는 Fig. 12와 같다. 프린지차수가 변화되는 위치에서 점프가 일어나 프린지 측정시 식별이 용이하며, 위상변화가 일어나는 지점에서 이들을 서로 연결하여 unwrapping하면 임의의 선상에서 연속적으로 분포된 프린지차수를 측정할 수 있다.

에지균열 상단의 수직선상에 분포된 응력을 프린지 위상이동법으로 측정한 후, 이들 결과를 유한요소 계산값과 비교하였다. 유한요소해석에는 상용프로그램인 ANSYS[14]를 이용하였으며, 광탄성시험편인 PSM-1과 동일한 물성치($E=2,482\text{MPa}$, $\nu=0.38$)를 사용하였다. 균열선단에서 정밀한 응력분포를 얻기 위하여 Fig. 13과 같이 8노드 사변형요소(8 node quadrilateral element)로 조밀하게 분할하였으며, 작용되는 응력은 광탄성 시험에 작용되는 하중 조건과 동일하게 $\sigma_0 = 990 \text{ kPa}$ 을 가하였다. ANSYS에 의해 해석된 결과를 프린지 위상이동법에 의한 측정값과

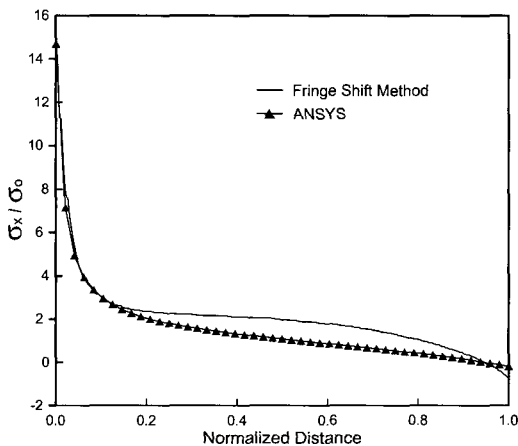


Fig. 14 Comparison of axial stress distribution along the vertical line between the measurements by fringe phase shifting method and those of ANSYS

비교하면 Fig. 14와 같으며, 균열선단 부근에서는 서로 잘 일치하였다. 그러나, 균열선단 상단의 중간부근에서는 위상이동법에 의한 광탄성 실험결과는 유한요소법과 약간의 차이가 나타났으며, 이는 균열에 의한 시험편의 굽힘과 뒤틀림 등 복합적인 원인에 기인된 것으로 추정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 타디보간법으로부터 유도된 프린지 위상이동법을 이용하여 압축하중을 받는 원형디스크 중심선상에 프린지분포를 측정한 후 이론값과 비교하였으며, 에지균열판의 응력해석에 적용하여 다음의 실험 결과를 얻었다.

- (1) 압축하중을 받는 원형디스크의 중심선상에서 프린지 위상이동에 의한 위상맵으로 측정된 프린지는 이론 프린지와 잘 일치하였다.
- (2) 프린지 위상이동법을 이용하여 인장하중을 받는 에지 균열판의 균열선상에서 응력분포를 측정된 결과, 실험에 의한 응력분포는 유한요소해석에 의한 결과와 약간의 차이를 나타냈으나, 실험시 포함될 수 있는 오차 이내로 추정된다.

본 연구에서 사용된 프린지 위상이동법은 원형편광기를 주응력의 방향, 즉 등경프린지(isoclinic fringe) 선상에 일치시켰을 때 응력분포를 정밀하게 해석할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 편광기가 주응력 방향에 일치하지 않았을 때($\alpha \neq 0^\circ$)는 식 (3)으로부터 식 (4) 또는 식 (6)을 얻을 수 없으므로 프린지 위상이동법에 관한 식 (8)이 유효하지 않으며, 일반적인 광탄성 프린지 해석에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

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] A. S. Voloshin and C. P. Burger, "Half Fringe Photoelasticity," *Experimental Mechanics*, Vol. 23, pp. 304-314, (1983)
- [5] T. H. Baek and M. S. Kim, "The Study of Accuracy Improvement Technique for Stress Analysis in Photoelasticity through Digital Image Processing," *Proceedings of the 1993 SEM 50th Anniversary Spring Conference on Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, pp. 674-681, (1993)
- [6] 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)
- [7] 백태현, "광탄성 프린지 해석을 위한 영상처리 기법 개발", *대한기계학회 논문집*, 제 18권, 제 10호, pp. 2577-2584, (1994)
- [8] T. H. Baek, M. S. Kim, J. Rhee and R. E. Rowlands, "Hybrid Full-field 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)
- [9] 백태현, 김명수, 김수일, "광탄성법을 이용한 곡선보 평판의 응력분포 해석", *비파괴검사학회지*, 19권, 3호, pp. 200-206, (1999. 6)
- [10] 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)
- [11] A. Asundi, "Phase Shifting in Photoelasticity", *Experimental Techniques*, Vol. 7, No. 1, pp. 19-23, (1993)
- [12] J. Cemosek, "Three Dimensional Photoelasticity by Stress Freezing", *Experimental Mechanics*, Vol. 20, No. 12, pp. 417-426, (1980)
- [13] Photoelastic Division, Measurement Group, Inc., Raleigh, NC. 27611, USA
- [14] ANSYS Program and User's Manual, Version 5.3, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, USA