

◆특집◆ 비접촉 측정

정밀응력측정을 위한 광탄성프린지 해석법

백태현*

Photoelastic Fringe Analysis for Accurate Stress Measurement

Tae Hyun Baek*

Key Words : Photoelasticity(광탄성), Fringe analysis(프린지해석), Isochromatic Fringe(등색프린지), Isoclinic Fringe(등경프린지), Fringe Multiplication(프린지 증식), Fringe Sharpening(프린지 세션처리), Fringe Phase-shifting Method(프린지 위상이동법)

1. 서론

하중을 받고 있는 구조물의 응력 상태를 해석하기 위해서는 이론에 의한 해석 방법과 실험에 의한 측정값 등을 이용한다. 최근 컴퓨터를 이용한 수치해석의 분야가 급속히 발전되어 신뢰할 만한 계산 결과를 얻을 수 있다. 그러나 수치해석 결과는 반드시 실험적인 검증이 있어야 하므로, 실험법은 기계 구조물 설계 및 해석에 필수적이고 중요한 분야이다. 응력 및 변형을 측정에 관한 실험법으로 광탄성법이 많이 사용되고 있다.

광탄성 실험법은 외력에 의해 편광물질의 복굴절이 변화되는 물리적인 현상을 이용하며, 광탄성 모델을 통해 실제 응력 상태를 관찰할 수 있으므로 공학적으로 널리 이용되고 있다. 광탄성법은 전체 응력장(full-field stress field)을 가시적으로 명확히 판별할 수 있는 장점이 있다.^{1,2}

그러나 광탄성법에서 응력에 의해 나타나는 등색프린지(isochromatic fringe) 또는 등경프린지(isoclinic fringe)는 광강도(light intensity)가 서로 다른 쪽의 프린지 밴드를 이루고

있다. 이러한 이유로 인하여 최소 또는 최대의 광강도를 갖는 위치를 육안으로 측정하여 응력으로 변환하고자 할 때 실험오차를 배제할 수 없다. 특히 광탄성 재료의 프린지 상수(material fringe constant)가 높을 경우, 즉 복굴절 현상이 둔감할 경우에는 광탄성 시편에 응력을 가한다 하더라도 프린지 차수가 낮게 되고 또한 프린지 폭이 넓게 되어 정확한 데이터 측정이 곤란하다.

본 논문에서는 위와 같은 광탄성 측정상의 난이점을 해결하고 광탄성 영상으로부터 응력해석의 정밀도를 향상시킬 수 있도록 재래식 광탄성 보간법에 의한 프린지 측정법, 디지털 영상처리 컴퓨터를 이용하여 프린지 증식 및 세션처리(fringe doubling and sharpening), 그리고 프린지 위상이동법에 대해서 기술한다.

2. 광탄성 이론 및 프린지 해석법

2.1 광탄성 이론

광탄성에서 주응력의 차이에 나타나는 등색프린지는 Fig. 1 과 같이 편광판(polarizer), 두 개의 사분파판(quarter wave plate), 그리고 검광판(analyzer)으로 구성된 원형 편광기로부터 얻을 수 있다.

주응력 성분중에서 한 성분이 0 일 경우, 즉 $\sigma_3 = 0$ 일 때는 2 차원 또는 평면응력 상태가

* 군산대학교 기계공학부

E-mail: thbaek@kunsan.ac.kr

Tel. 063-469-4714, Fax. 063-469-4727

되며, 0 이 아닌 평면 주응력(in-plane principal stress) 성분은 σ_1 및 σ_2 가 된다. 복굴절 현상에 의한 응력-광법칙(stress-optic law)에 따르면 주응력의 차이 값은 다음 식의 관계를 갖는다.^{1,2}

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{t} \quad (1)$$

위의 식에서

N : 등색프린지 차수(isochromatic fringe order)

f_σ : 재료의 프린지 상수(fringe constant)

t : 시편 두께

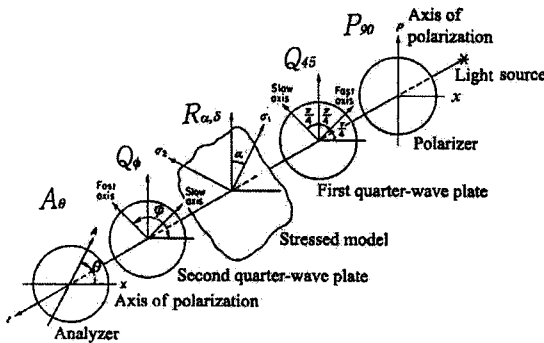


Fig. 1 Optical arrangement of a circular polariscope

즉, 식 (1)로부터 광탄성 등색 프린지 차수 N 이 정밀하게 측정되면 이에 따라 정확한 주응력 차이를 실험적으로 구할 수 있다.

2.2 타디 보정법

Fig. 1 에 나타낸 기호의 아래 첨자는 각 편광판의 광축과 수평축(x 축) 사이의 각도를 나타낸다. 즉, P_{90} 는 선형 편광판의 광축이 90° , Q_{45} 는 제 1 사분파판(first quarter-wave plate)의 고속축(fast axis)이 45° , $R_{\alpha, \delta}$ 는 자연 시편(stressed model)의 최대주응력 방향(등경각)이 α , Q_ϕ 는 제 2 사분파판(second quarter wave plate)의 고속축이 ϕ , 그리고 A_θ 는 검광판(analyzer)의 광축이 θ 의 각도를 이룬다. Fig. 1 에서 광축의 방향은 우로부터 좌의 방향으로 도시되어 있다.

원형 편광기의 암시야배열(dark-field setup)은 Fig. 1 에서 사용된 기호를 이용하여 P_{90} , Q_{45} , $R_{\alpha, \delta}$, Q_{135} , A_0 와 같이 나타낼 수 있다. 원형 편

광기의 배열로부터 검광판을 θ 로 회전시켰을 때, 소수의 등색 프린지 차수(fractional fringe order) N 은 다음 식으로 구할 수 있다.^{1,2}

$$N = n \pm \frac{\theta}{\pi} \quad (2)$$

위의 식(2)에서 n 은 정수의 등색 프린지 차수이고 “ \pm ”의 기호는 검광판의 회전방향에 따라 양 또는 음의 부호가 결정된다. 이러한 방법을 타디(Tardy) 보정법이라하며, 소수이하 첫 자리까지 정확히 측정할 수 있다. 이러한 보정법은 편광기를 선형 편광상태에서 특정점에 등경프린지를 일치시킨 후, 다시 원형 편광상태로 정렬한 후 검광판을 회전시켜 정수 또는 반차수의 프린지가 특정점을 지날 때 회전각도를 측정한다. 즉, 재래식 보정법은 점측정 방법(point measurement)에 속한다.

2.3 Senarmont 보정법

Senarmont 보정법은 선형편광 배열(linear polarizing arrangement)에서 한 개의 4 분파판이 추가된 형태이다. Fig. 2 는 Senarmont 보정법에 사용되는 편광판의 기본적인 배열을 나타내고 있다.²

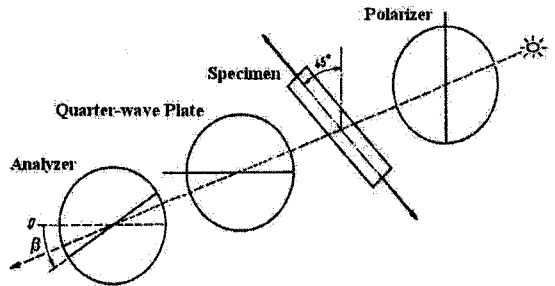


Fig. 2 Optical arrangement for Senarmont compensation method

시편의 주응력 방향이 입사광의 편광축에 45° 회전되어 있다. 이는 모든 평판판을 측정하고자 하는 위치에서 45° 만큼 회전되어야 함을 의미하기도 한다. Senarmont 보간법의 일반적인 프린지 관계식은 다음의 식 (3)과 같다.

$$N = n \pm \frac{\beta}{\pi} \quad (3)$$

일반적으로 광탄성 보간법에서 각도 β 는 3° 이내로 정확히 측정할 수 있다. 이는 곧 측정 정확도가 $3/180 \approx 0.02$ 프린지에 해당하는 것을 의미한다.

2.4 등색 프린지 증식법

원형 편광기에서 편광판과 검광판 사이에 있는 두개의 4 분파판을 편광축과 45° 교차시켰을 때 등색 프린지가 나타나며 암시야와 명시야 배열 상태에서부터 두 개의 프린지를 얻을 수 있다. 이들 두 개의 프린지 영상으로부터 증식된 프린지(multiplied fringe)를 얻을 수 있다.³

$$I_R = |I_L - I_D| = A |\cos(2\pi N)| \quad (4)$$

위의 식에서

- I_R : 증식된 프린지 광강도
- I_L : 명시야 배열의 프린지 광강도
- I_D : 암시야 배열의 프린지 광강도

위의 식 (4)에서 $I_R = 0$ 이 되기 위해서는 $\cos(2\pi N) = 0$ 이 되어야 한다. 이 조건에서 $N = (2n+1)/4$ 이고 $n = 0, 1, 2, \dots$ 이어야 한다. 즉, 원형편광기의 표준 배열상태에서는 $N = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$ 등에서 흑색프린지와 백색프린지가 번갈아 나타난다. 그러나 식 (4)에 의해 증식된 프린지에서는 $N = 0, 1/4, 2/4, 3/4, 1, 5/4, 6/4, \dots$ 등에서 4 분 차수 간격으로 교대로 나타나므로 2 배의 프린지 증식 효과가 있다.

2.5 프린지 세선처리

광탄성 프린지의 세선처리(fringe sharpening) 과정은 영상처리에서 일반적으로 알려져 있는 가장자리 탐색(edge detection)과 유사하다. 가장자리 탐색은 그래디언트 연산자(gradient operator)를 사용하여 광강도의 변화량과 방향을 계산함으로써, 단지 물체 형상의 경계선만을 구하는 방법이다. 그러나, 광탄성 프린지의 세선처리는 광강도가 최대 또는 최소가 되는 궤적을 계산하기 때문에 가장자리 탐색의 원리를 더욱 확장시킨 방법이라 할 수 있다. 즉, 그래디언트 벡터합(sum of gradient vector)의 특성을 다음의 식 (5)와 같이 수식화하여 광탄성 프린지를 세선처리할 수 있다.³

식 (5)로부터 암시야 배열의 원형 편광기에서 광강도가 국소 최대값 (local minimum)에서는 정차수 프린지 ($N = 1, 2, 3, \dots$)가 되고, 국소 최대값 (local maximum)에서는 반차수 프린지 ($N = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$)가 된다. 따라서 세선처리된 프린지 영상으로부터 반차수의 프린지 궤적을 정확히 판별할 수 있다.

$$T = A \left\{ 1 - \frac{|\sum \nabla_x| + |\sum \nabla_y|}{\sum |\nabla_x| + \sum |\nabla_y|} \right\} \quad (5)$$

위의 식에서

- T : 세선처리된 영상에서의 광강도
- A : 비례상수
- ∇_x : x 방향의 그래디언트 벡터성분
- ∇_y : y 방향의 그래디언트 벡터성분

2.6 4-단계 위상이동법

프린지 위상이동법은 Fig. 1 과 같이 편광판의 광축을 수직축 (P_{90})에, 제 1 사분파판의 고속축을 수평축으로부터 45° (Q_{45}), 시편의 등경각이 수직축으로부터 α 각도 ($R_{\alpha, \delta}$), 제 2 사분파판의 고속축을 수평축으로부터 ϕ 의 각도(Q_ϕ), 그리고 검광판의 광축이 수직축으로부터 θ 의 각도(A_θ) 위치에 정렬되어 있을 때, 검광판으로부터 나온 빛의 세기, 즉 광 강도 I 는 다음의 식과 같다.⁴

$$I = K [1 - \sin 2(\theta - \phi) \cos \delta - \sin 2(\phi - \alpha) \cos 2(\theta - \phi) \sin \delta] \quad (6)$$

Table 1 Optical arrangements and their intensity equations for 4-step phase measuring method

No.	Arrangement	Output Intensity
1	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_0$	$I_1 = K(1 - \cos \delta)$
2	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_{45}$	$I_2 = K(1 - \cos 2\alpha \sin \delta)$
3	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_{90}$	$I_3 = K(1 + \cos \delta)$
4	$P_{90} Q_{45} R_{\alpha, \delta} Q_{-45} A_{135}$	$I_4 = K(1 + \cos 2\alpha \sin \delta)$

4 단계 위상이동법은 각각의 편광판의 위치를 Table 1 과 같이 정렬시킨 조건으로부터 얻을 수 있다. 검광판으로부터 출력된 광강도(output intensity)는 식 (6)를 이용하여 구할 수 있으며, 그

결과는 Table 1 과 같다. Table 1 에 나타낸 광강도에 관한 식으로부터 다음 식 (7)을 얻는다.

$$\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} = \frac{\cos 2\alpha \sin \delta}{\cos \delta} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\alpha = 0$, 또는 $\alpha = \pm\pi$ 일 경우, 상대지면 $\delta = 2\pi N$ 의 관계로부터 등색프린지 차수 N 에 관한 식은 아래와 같다.⁴

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

만일 등경각 $\alpha = 0$, 또는 $\alpha = \pm\pi$ 일 경우에 식 (8)를 이용하면 특정한 선에서 프린지분포를 연속적으로 구할 수 있으므로 선측정(line measurement)이 가능하다.

2.7 8-단계 위상이동법

식 (8)은 측정하고자 하는 지점에서 등경각이 $\alpha = 0$, 또는 $\alpha = \pm\pi$ 일 경우에 유효하나, 그렇지 않을 경우 적용할 수 없다. 등경각이 일정하지 않은 일반적인 경우에 등경각 α 와 등색프린지 차수 N 을 구하기 위하여 8-단계 위상이동법을 이용한다.^{4,5} Fig. 1로부터 각각의 편광관을 Table 2 와 같은 방법²으로 정렬시킨 조건으로부터 식 (6)를 이용하여 광강도를 구한다. Table 2 의 광강도에 관한 식으로부터 등경각 α 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{I_5 - I_6}{I_1 - I_2} \right) \quad (9)$$

위의 식 (9)와 같이 4 개의 영상을 이용하여 등경각 α 를 구하고, 계산된 등경각 및 Table 2 에 나타낸 광강도에 관한 8 개의 식으로부터 등색프린지 차수 N 을 구한다.

$$N = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{(I_1 - I_2) \cos 2\alpha + (I_5 - I_6) \sin 2\alpha}{\frac{1}{2} [(I_4 - I_3) + (I_8 - I_7)]} \right\} \quad (10)$$

아래의 Table 2 로부터 정렬 조건을 살펴보면

$I_3 = I_7$, 그리고 $I_4 = I_8$ 이므로 $I_4 - I_3 = I_8 - I_7$ 의 관계가 성립된다. 따라서 식 (10)의 분모 항에 나타낸 바와 같이 평균값을 이용한다.

한편으로 4-단계 위상이동법에 관한 Table 1 과 8-단계 위상이동법에 관한 Table 2 를 비교하여 보면, Table 1 의 정렬번호 1, 2, 3, 및 4 는 Table 2 의 정렬번호 3, 2, 4, 및 1 과 동일하다. 즉, 8-단계 위상이동법에 관한 영상으로부터 4-단계 위상이동법 시험을 할 수도 있다.

Table 2 Optical arrangements and their intensity equations for 8-step phase measuring method

No.	Arrangement	Output Intensity
1	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_{45}A_{-45}$	$I_1 = K(1 + \cos 2\alpha \sin \delta)$
2	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_{-45}A_{45}$	$I_2 = K(1 - \cos 2\alpha \sin \delta)$
3	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_{45}A_0$	$I_3 = K(1 - \cos \delta)$
4	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_{45}A_0$	$I_4 = K(1 + \cos \delta)$
5	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_0A_0$	$I_5 = K(1 + \sin 2\alpha \sin \delta)$
6	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_0A_{90}$	$I_6 = K(1 - \sin 2\alpha \sin \delta)$
7	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_0A_{45}$	$I_7 = K(1 - \cos \delta)$
8	$P_{90}Q_{45}R_{\alpha,\delta}Q_{90}A_{45}$	$I_8 = K(1 + \cos \delta)$

위의 식 (9)와 (10)를 이용하면 어느 지점에서나 등경각과 등색프린지 차수의 측정이 가능하므로 전응력장 측정(full-field stress measurement)이 가능하다.

3. 실험 및 결과

3.1 TV 유리패널의 등색 프린지 분포

본 실험에서는 TV 유리패널(TV glass panel)에서 잔류응력(residual stress)에 의해 나타나는 등색프린지(isochromatics) 분포를 측정하였다. 일반적으로 유리제품은 유리 원료를 용융하고 성형하는 제조 과정에서 갑자기 가열시키거나 냉각시킬 경우가 있다. 이 경우에 유리의 점탄성(viscoelastic property)으로 인하여 냉각과정에서 온도구배가 발생되며, 이로 인하여 재료내부에 잔류응력이 발생된다. 유리의 표면에 인장력을 제거하여 내부적으로 강도를 높이기 위하여 만든 것이 강화유리(tempered glass)이다. 잔류응력 해석은 강화유리를 제조하는데 있어서 중요한 일이다. 따라서, 잔류응력을 제거하기 위해서는 유리내에 분포되어 있는

간류응력에 의한 프린지를 정확히 측정해야 한다.⁶

프린지 분포를 정밀하게 측정하기 위해 사용된 기법은 광탄성기법중 4 단계 위상이동법(4-step phase shifting method), Tardy 및 Senarmont 보정법(compensation method)을 이용하였다. 위상이동법으로부터 얻은 이미지를 이용하여 TV 유리패널의 프린지 형태를 확인하기 위하여 프린지의 증식(doubling) 및 세션처리(sharpening) 기법을 적용하였다.³ 본 실험에서는 TV 유리패널에 대해서 열처리 전·후에 수직선상의 등색프린지 분포를 4 단계 위상 이동법을 이용하여 열처리 효과에 따른 프린지 분포의 정량적 자료를 측정하였다.

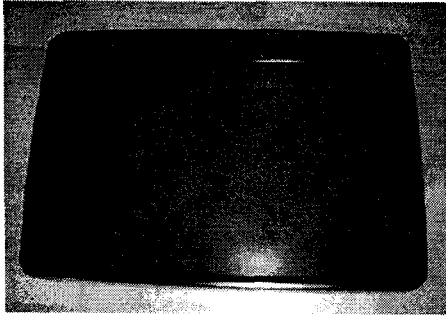


Fig. 3 TV glass panel after heat treatment (23 inch)

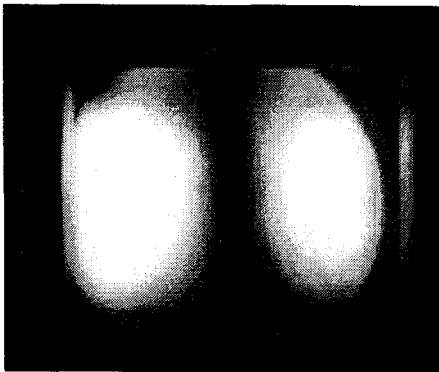


Fig. 4 Isoclinic fringe distribution at $\alpha = 0^\circ$

Fig. 3 는 열처리된 TV 유리패널이며, Fig. 3 은 암시야 배열에서 등경각이 0° 일 때 등경프린지를 나타낸다. 등경프린지가 수직방향으로 일정하므로 수직방향으로 등색프린지 차수를 결정하기 위하여 4-단계 위상이동법을 적용할 수 있다. Fig. 5 는 4-

단계 위상이동법에 의해 암시야 배열의 원형 편광광상태의 배열로부터 검광자를 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 및 135° 회전시켜 얻은 영상들이다. 이러한 4 개의 영상을 이용, 식 (8)을 적용한 등색프린지 위상맵(phase map)은 Fig. 6 과 같다.

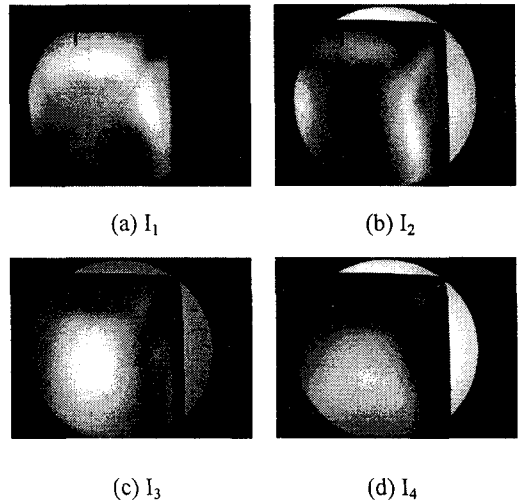


Fig. 5 Isochromatic fringe sharpened obtained by rotating analyzer

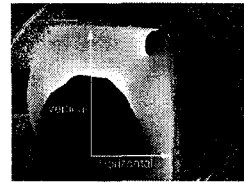


Fig. 6 Isochromatic phase map obtained from four images in Fig. 5

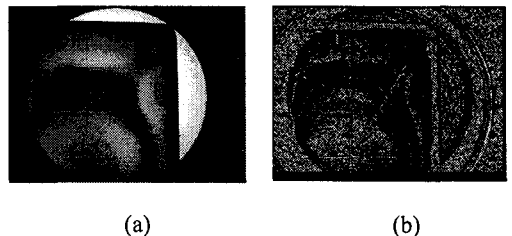


Fig. 7 (a) Two times multiplied isochromatic fringes
(b) Fringe sharpened lines

한편으로 TV 유리패널에 나타난 등색프린지 차수는 육안으로 측정하였을 때 1 미만이므로 등색프린지 형태를 시각적으로 가시화하기 위하여

식 (4) 및 (5)에 의해 프린지 증식과 세션 처리하였으며, 처리된 프린지 영상은 Fig. 7 (a) 및 (b) 와 같다. Fig. 5 (c)와 Fig. 7 (a)를 비교해보면 프린지가 두 배로 증식된 결과를 명백히 관찰할 수 있다. Fig. 7 (b)에서와 같이 세션처리된 프린지로부터 4 분차수 프린지와 위치를 정확히 판별할 수 있다.

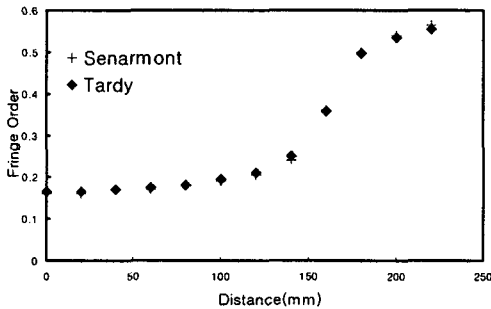


Fig. 8 Comparison of isochromatic fringe distribution along vertical line of Fig. 5 measured by Tardy and Senarmont compensation methods

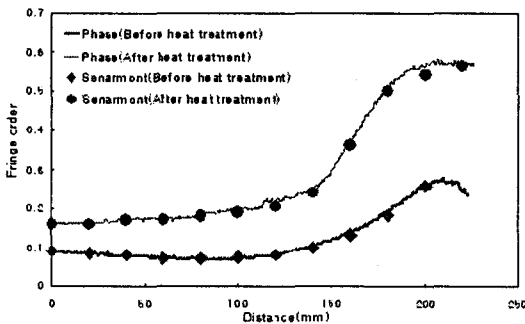


Fig. 9 Comparison of isochromatic fringe distribution along vertical line of Fig. 5 in TV glass panel before and after heat treatment

Fig. 8 은 Fig. 6 에 나타난 수직선상에서 Tardy 및 Senarmont 보정법에 의해 측정된 결과를 나타낸다. Fig. 8 에서 두 보정 방법은 육안에 의해 수작업으로 측정하였으며, 두 측정결과는 실험오차 이내에서 서로 잘 일치하였다. Senarmont 보정법은 Fig. 2 와 같이 이방성 광학소자(anisotropic optics)인 4 분파판의 수가

2 개에서 1 개로 감소되므로 프린지 차수가 적을 경우 측정이 용이하다.

TV 유리패널의 열처리에 대한 영향을 평가하기 위하여 Senarmont 보정법과 4-단계 위상이동법으로 Fig. 6 에 나타난 수직선상에서 등색프린지를 측정한 결과는 Fig. 9 와 같다. Fig. 9 에서 보인 바와 같이 열처리 후의 TV 유리패널의 프린지 차수는 정상적으로 서냉된 열처리 전의 프린지 차수에 비해 약 2 배이상 증가된 값으로 측정되었다.

3.2 압축하중을 받는 원형 디스크시험

두 번째 실험에서는 상·하 지름방향으로 압축 하중을 받는 상태에서 응력동결(stress freezing)된 원형디스크를 이용하였다. 원형디스크의 재질은 광탄성에서 응력 동결용으로 사용되는 에폭시수지 계열(3DMU-050 epoxy resin)⁴이다. 이 재료의 프린지 상수는 응력동결온도(critical temperature)에서 490 N/m (2.8 lb/in-fringe) 이다. 원형디스크의 지름은 44.70 mm (1.76 in.) 이고 두께는 3.18 mm (0.125 in.) 이다.

Table 2 에 나타난 8 개의 영상들과 식 (9)에 의해 얻은 등경프린지 위상맵 영상은 Fig. 10 (a)와 같고, 식 (10)에 의해 계산된 등색프린지 위상맵은 Fig. 10 (b)와 같다. Fig. 10 (a) 및 (b)에 나타난 수평선 A-A 는 디스크 중심으로부터 디스크 반지름 R 의 1/2 지점, 즉 $y=R/2$ 의 거리에 있는 선이다.

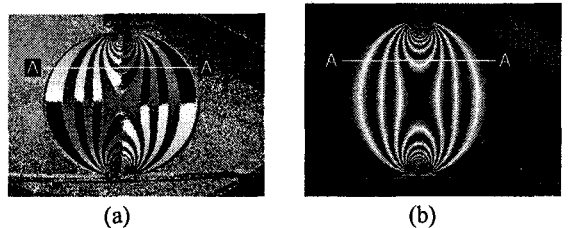


Fig. 10 Wrapped phases of (a) isoclinics and (b) isochromatics

Fig. 10 (a)의 등경프린지 위상맵 영상에 표시된 A-A 선상의 광각도로부터 등경각을 계산하면 Fig. 11 과 같으며, 등색프린지의 영향으로 위상점프가 일어난다. 이러한 위상점프를 위상펼침(phase unwrapping)에 따라 제거하면 Fig. 12 와 같은 분포를 얻을 수 있다. 또한, Fig. 10 (a)의 A-A 선상에서

등경프린지를 수작업으로 측정(manual measurement)하여 Fig. 12 에 나타냈으며, 이들은 서로 잘 일치하였다.^{4,5}

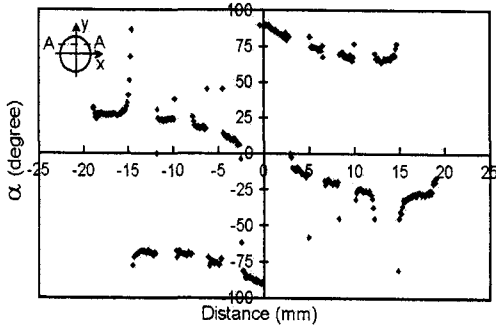


Fig. 11 Wrapped isochromatic phase distributions along line A-A indicated in Fig. 10(a)

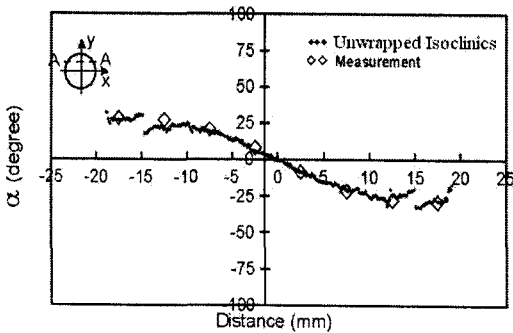


Fig. 12 Comparisons of digitally determined isochromatics and manual measurements along line A-A indicated in Fig. 10(a)

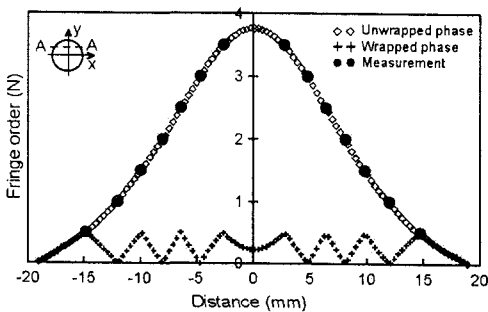


Fig. 13 Unwrapped and wrapped isochromatic phase distributions along line A-A indicated in Fig. 10(b)

Fig. 10 (b)의 A-A 선상에서 등색프린지 분포를 구하기 위하여 등색프린지에 관한 위상맵으로부터

위상을 펼친 후, 등색프린지 프린지 차수로 환산하여 나타내면 Fig. 13 과 같다. 응력동결된 디스크의 세션처리된 등색프린지로부터 수작업에 의해 측정된 값도 Fig. 13 에 표시하였으며, 이들은 8-단계 위상이동법에 의해 얻은 분포에 정확히 일치하였다.⁵

3.3 곡선보 평판의 등경프린지 측정

곡선보 평판 시험편은 투명한 플라스틱 판재로서, 광탄성 효과가 우수한 폴리카보나이트(poly-carbonate) 계열인 PSM-1 을 사용하였다. 시편의 형상과 치수는 Fig. 14 (a)와 같다. 시편 판재의 두께는 5.55 mm(7/32 in.), 재료의 프린지 상수는 $f_{\sigma} = 7005 \text{ N/m}$ (40 lb/in.), 영탄성계수는 $E = 2482 \text{ MPa}$ (360 psi)이다.

8 단계 위상이동법을 적용하여 광탄성 실험을 하였으며, 유한요소 상용 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 Fig. 14 (b)와 같이 모델링하였다. 해석에 사용된 물성치로서 영탄성 계수는 $E = 2482 \text{ MPa}$, 푸와송비는 $\nu = 0.38$ 이며, 8 노드 사변형요소(8 node quadrilateral element)가 사용되었다.

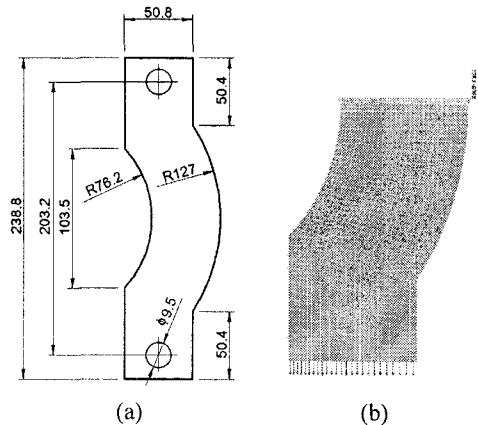


Fig. 14 (a) Dimensions of curved beam plate (unit: mm)
(b) ANSYS modeling of a lower half of curved beam plate

Fig. 15 는 Table 2 와 식 (9)로부터 얻은 등경프린지에 관한 위상맵이다. Fig. 15 에서 선 A-A 는 곡선보 평판의 중심을 지나는 수평선이며, 선 B-B 와 선 C-C 는 선 A-A 로부터 아래 방향으로 각각 10 mm, 20 mm 에서 수평방향으로 표시한 선이다.

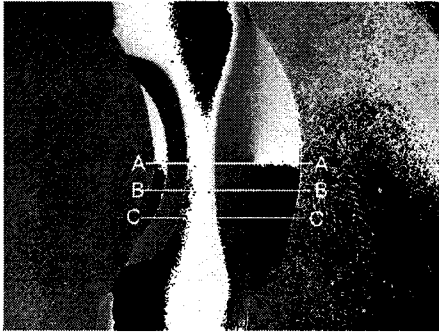


Fig. 15 Wrapped phase of isoclinics of curved beam plate obtained from 8 fringe patterns

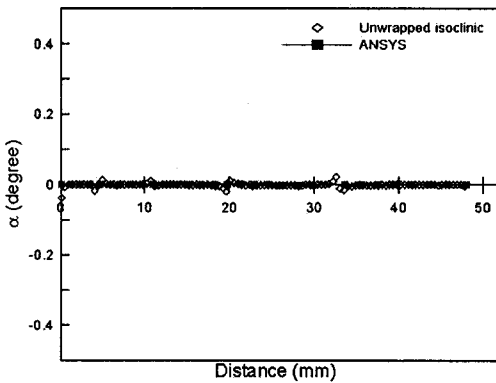


Fig. 16 Comparison of isoclinic angle distribution of curved beam plate along line A-A indicated in Fig. 15

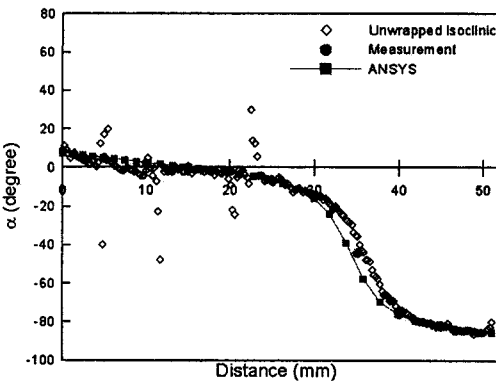


Fig. 17 Comparison of isoclinic angle distribution of curved beam plate along line B-B indicated in Fig. 15

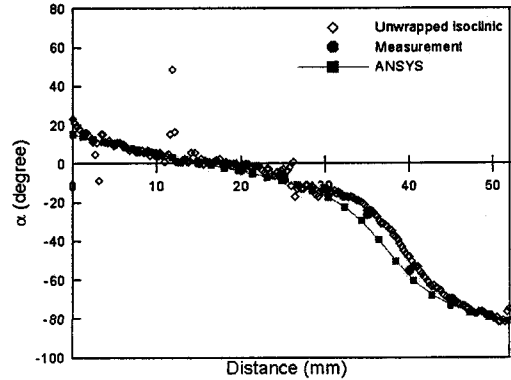


Fig. 18 Comparison of isoclinic angle distribution of curved beam plate along line C-C indicated in Fig. 15

Fig. 15의 각각의 선상(A-A, B-B, C-C)에서 8 단계 위상이동법과 유한요소법으로부터 얻은 등경프린지 분포를 나타내면 Figs. 16, 17, 18과 같으며, 8 단계 위상이동법에 의한 등경각 분포는 유한요소법에 의한 결과와 육안과 수작업 측정을 통해 얻은 값(manual measurement)에 대체로 비슷한 분포를 나타냈다.

그러나 Figs. 17 및 18에서 보인 바와 같이 중심으로부터 우측방향으로 30~40 mm 떨어진 위치에서는 위상이동법과 유한요소 해석 결과가 약간의 차이가 발생하였다. 이러한 원인은 유한요소 모델링 조건은 2-D, 평면응력상태이나 실제의 실험에서는 약간의 면외변위 (out-of-plane displacement)가 발생하여 나타나는 현상으로 추정한다.⁷

4. 결론

본 논문에서는 정밀응력 측정을 위한 Tardy 및 Senarmont 보정법, 프린지 증식 및 세션처리법, 4-단계 및 8-단계 위상이동법에 대한 사항을 살펴보았다. 또한 이들 기법을 이용하여 실제 시편으로부터 등색 및 등경 프린지 분포를 측정하였다.

(1) 열처리 전·후에 TV 유리패널의 수직선상에서 박막응력에 의한 등색프린지 차수를 측정한 결과 잔류 응력이 2 배 이상 변화되었음을 알 수 있었다. 4-단계 프린지 위상이동법을 이용하면 재래식 방법에 비하여 특정 선상에서

연속적인 프린지분포 측정이 가능하다.

(2) 8-단계 위상이동법에 의해 디스크 중심으로부터 디스크 반지름 R 의 1/2 지점 거리에 있는 수평선상에서 등경각과 등색프린지 차수를 구했으며, 재래식 보정법에 의한 측정값에 근접하였다.

(3) 8-단계 위상이동법을 적용하여 얻은 곡선보 평판의 등경각 분포는 유한요소법에 의한 결과와 수작업 측정 결과에 유사하게 분포하였다.

위의 결론으로부터 프린지 증식 및 세션처리법, 위상이동법을 적절히 이용하면 광탄성 프린지를 정밀하게 측정할 수 있다.

참고문헌

1. Dally, J. W. and Riley, W. F., "Experimental Stress Analysis," Second Ed., McGraw-Hill, Inc., 1991.
2. Cloud, G. L., "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, pp. 343-407, 1995.
3. Baek, T. H. and Lee, J. C., "Development Image Processing Technique for Photoelastic Fringe Analysis," Transactions of the KSME, Vol. 18, No. 10, pp. 2577-2584, 1994.
4. Baek, T. H., Kim, M. S., Lee, C. T., Kim, W. and Park, T. G., "Test and Evaluation of a Newly Built Multi-purpose Transmission Type Polariscope," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 1, pp. 73-81, 2005.
5. Baek, T. H. and Kim, M. S., "Computer Simulation of Photoelastic Fringe Patterns for Stress Analysis," Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Vol. 3398/2005, pp. 214-221, 2005.
6. Baek, T. H., Kim, M. S. and Cho, S. H., "Measurement of Isochromatic Fringe Distribution of a TV Glass Panel by Use of Photoelastic 4-step Phase Shifting Method," J. of the KSNT, Vol. 25, No. 1, pp. 1-8, 2005.
7. Baek, T. H., Kim, M. S. and Kim, W., "Measurement of Principal Stress Direction by Photoelastic Phase Shifting Method," Transactions of the KSME, Series A, Vol. 28, No. 12, pp. 1982-1989, 2004.