

〈論 文〉

광탄성 프린지해석을 위한 영상처리기법 개발

백태현* · 이재춘**

(1994년 4월 8일 접수)

Development of Image Processing Technique for Photoelastic Fringe Analysis

Tae Hyun Baek and Jae Chun Lee

Key Words : Photoelasticity(광탄성), Fringe Multiplication(프린지증식), Fringe Sharpening(프린지 세션처리), Photoelastic Fringe Simulation(광탄성 프린지 시뮬레이션), Digital Image Processing(디지털 영상처리), Stress in Glass(유리의 응력), Residual Stress Analysis(잔류응력해석), Filon's Method(필론방법)

Abstract

A method of digital image processing technique, which can multiply and sharpen isochromatic fringes in photoelasticity on both occasions, is developed. To test the method, photoelastic fringe patterns of a disk compressed by two diametrically opposite cocentrated loads are simulated and these patterns are processed to yield sharpened lines. The method is then aplyed to measurement of residual stresses in glass bar. The procedure is proved to be capable of extraction sharpened lines accurately from photoelastic multiplied fringes, and yields good experimental results consistently and precisely.

1. 서 론

일종의 투명한 비결정(noncrystalline) 재료는 응력을 받지 않은 상태에서는 광학적으로 등방성(isotropic)이나, 응력을 받게 되면 결정체(crystal)와 유사하게 광학적으로 이방성(anisotropic)으로 변한다. 이러한 현상을 이중굴절(double refraction) 또는 복굴절(birefringence)이라 하며, 하중이 가해진 상태에서는 복굴절이 그대로 유지되지만 하중이 제거되면 복굴절현상도 사라진다. 광탄성은 투명한 재료가 응력이나 변형률의 변화되는 정도에 따라 발생하는 복굴절현상을 이용한다.

위와같은 현상을 이용하는 광탄성기법(photoelasticity)은 응력 또는 변형률을 해석하기 위한 실험

역학 중의 한 분야로서, 전체 응력장의 분포상태를 가시적으로 명확히 판별할 수 있는 유일한 장점을 지니고 있다.^(1~3) 그러나 광탄성에서 응력에 의하여 나타나는 등색프린지(isochromatic fringe) 또는 등경프린지(isoclinic fringe)는 광강도(light intensity)가 서로 다른 유한폭의 프린지 밴드를 이루고 있기 때문에 최대 혹은 최소의 광강도를 갖는 위치를 육안으로 측정하여 응력으로 변환하고자 할 때 실험오차를 배제할 수 없다. 특히 광탄성재료의 프린지상수(material fringe constant)가 높을 경우, 즉 복굴절현상이 하중에 둔감할 경우에는 광탄성 시편에 응력을 가한다 하더라도 프린지차수(fringe order)가 낮게 되고 또한 프린지의 폭이 넓게 되어 정확한 데이터 획득이 곤란하다.

본 연구에서는 위와 같은 광탄성 측정상의 난이점을 해결하고 광탄성 영상으로부터 응력해석의 정확도를 향상시킬 수 있도록 디지털 영상처리 컴퓨터

*정회원, 군산대학교 기계설계학과

**명지대학교 무기재료공학과

터를 이용하여 프린지증식 및 세션처리에 관한 연구를 하였다. 또한 직경상 반대방향에서 압축하중을 받는 디스크의 이론적인 광탄성 프린지를 시뮬레이션하여 개발된 프린지증식과 세션처리에 관한 기법을 시험하였으며, 유리봉의 잔류응력 측정에 위와 같은 기법을 실제로 적용하여 잔류응력성분을 정량적으로 계산하였다.

2. 광탄성 프린지의 증식 및 세션처리 이론

2.1 프린지증식 이론

광탄성 시편에서 프린지차수가 낮을 경우 프린지를 증식하게 되면 더욱 많은 데이터를 얻을 수 있기 때문에 정확한 응력해석이 가능하다. 프린지증식은 부분 반사경(partial mirror) 등을 이용한 광학적방법⁽⁴⁾과 사진촬영기법^(5,6) 등이 있으나, 본 연구에서는 디지털 영상처리 시스템을 이용하여 프린지를 증식시키는 기법⁽⁷⁾을 이용하였다.

주응력 성분중에서 한 성분이 0일 경우, 즉 $\sigma_3 = 0$ 일 때는 2차원 또는 평면응력상태가 되며 0이 아닌 평면주응력(in-plane principal stress) 성분은 σ_1 및 σ_2 가 된다. 복굴절현상에 의한 응력-광법칙(stress-optic law)에 따르면 주응력의 차이값($\sigma_1 - \sigma_2$)은 다음의 식과 관계^(1, p.411)를 갖는다.

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

위의 식에서

N : 등색프린지 차수(isochromatic fringe order)

f_σ : 재료의 프린지상수(material fringe constant)

h : 시편의 두께

원형편광기(circular polariscope)에서 편광자(polarizer)와 검광자(analyzer) 사이에 있는 두개의 4분 파판(quarter-wave plate)을 편광축과 45° 교차시켰을때 등색프린지가 나타나며, 암시야(dark field) 배열에서 검광자(analyzer)를 통하여 투과된 광강도는

$$I_D = A \sin^2(\pi N) = \frac{A}{2} [1 - \cos(2\pi N)] \quad (2)$$

위의 식에서

I_D : 암시야 배열의 원형편광기에서 광강도

A : 비례상수

N : 등색프린지 차수

한편으로, 명시야(light field) 배열의 원형편광기에서 광강도에 관한 식은

$$I_L = A \cos^2(\pi N) = \frac{A}{2} [1 + \cos(2\pi N)] \quad (3)$$

위의 식에서 $I = I_L$ 명시야 배열의 원형 편광기에서 광강도 식(3)에서 식(2)를 뺀 절대값을 I_R 이라 정의⁽⁷⁾하면

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

식(4)를 이용하여 증식된 프린지를 얻을 수 있으며, $I_R = 0$ 이 되기 위해서는 식(4)로부터 $\cos(2\pi N) = 0$ 이 되어야 한다. 따라서,

$$N = \frac{2n+1}{4}, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

즉, 암시야 배열의 원형편광기에서는 식(2)에서 보인 바와 같이 $N=0, 1, 2, 3, \dots$ 등에서 $I_D=0$ 이 되어 암흑프린지(dark fringe)로 나타나지만, 식(5)에서는 $N=1/4, 3/4, 5/4, \dots$ 등에서 $I_R=0$ 이 되어 암흑프린지로 나타난다. 또한, 식(2)로부터 백색프린지(white fringe)는 $I_D=A$ 가 되는 조건에서 나타나며, 이 경우에 프린지차수는 $N=1/2, 3/2, 5/2, \dots$ 등이 된다. 즉, 프린지를 증식시키기전에 흑색과 백색프린지는 $N=0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$ 등에서 반차수마다 번갈아 나타나지만, 증식시킨 후는 흑색과 백색프린지가 $N=0, 1/4, 2/4, 3/4, 1, 5/4, 6/4, \dots$ 등에서 4분차수 간격으로 교대되어 나타나므로 2배의 프린지증식 효과가 있다.

2.2 프린지 세션처리 이론

광탄성 프린지의 세션처리과정은 영상처리에서 일반적으로 알려져 있는 가장자리 탐색(edge detection)⁽⁸⁾과 유사하다. 가장자리 탐색은 그레이디언트 연산자(gradient operator)를 사용하여 광강도의 변화량과 방향을 계산함으로써, 단지 물체형상의 경계선만을 구하는 방법이다. 그러나, 광탄성 프린지의 세션처리는 광강도가 최대 또는 최소가 되는 제적을 계산하여야 하기 때문에 가장자리 탐색의 원리를 더욱 확장시킨 방법이라 할 수 있다. 광탄성에서 광강도가 국소 극값(local extremum)일 경우에 정차수 또는 반차수 프린지가 된다. 즉, 암시야 배열의 원형편광기에서 광강도가 국소 최소값(local minimum)에서는 정차수 프린지($N=1,$

2, 3, ...)가 되고, 국소 최대값(local maximum)에서는 반차수 프린지($N=1/2, 3/2, 5/2, \dots$)가 된다. 국소 극값 사이에서는 광강도의 변화가 일정방향으로 감소 또는 증가하고, 국소 극값에서는 광강도가 증가에서 감소 또는 감소에서 증가되는 분기점이 된다. 그래디언트 벡터 (gradient vector)는 언제나 상향성(uphill)이며, 국소 극값의 양측에서는 그래디언트 벡터가 서로 반대방향이므로 그래디언트 벡터합을 취하면 국소 극값주위에서는 벡터합이 급격히 감소하게 된다. 이와같은 그래디언트 벡터합(sum of gradient vector)의 특성을 다음의 식(6)과 같이 수식화^(9,10)하여 광탄성 프린지를 세선처리할 수 있다.

$$T = A \left[1 - \frac{|\sum \nabla_x| + |\sum \nabla_y|}{\sum |\nabla_x| + \sum |\nabla_y|} \right] \quad (6)$$

위의 식에서

T - 세선처리된 영상에서의 광강도

A - 비례상수

$\nabla_x = x$ 방향의 그래디언트 벡터성분

$\nabla_y = y$ 방향의 그래디언트 벡터성분

그래디언트 벡터성분은 Fig. 1과 같은 마스크를 이용하여 다음의 식(7.1) ~ (7.4)와 같이 계산한다.

$$\nabla_{x1} = I_b - I_d \quad \nabla_{y1} = I_a - I_e \quad (7.1)$$

$$\nabla_{x2} = I_c - I_e \quad \nabla_{y2} = I_b - I_f \quad (7.2)$$

$$\nabla_{x3} = I_e - I_h \quad \nabla_{y3} = I_d - I_h \quad (7.3)$$

$$\nabla_{x4} = I_f - I_h \quad \nabla_{y4} = I_e - I_i \quad (7.4)$$

위의 식으로부터 각각 벡터성분에 대한 합은

$$|\sum \nabla_x| = |\nabla_{x1} + \nabla_{x2} + \nabla_{x3} + \nabla_{x4}| \quad (8.1)$$

$$|\sum \nabla_y| = |\nabla_{y1} + \nabla_{y2} + \nabla_{y3} + \nabla_{y4}| \quad (8.2)$$

$$\sum |\nabla_x| = |\nabla_{x1}| + |\nabla_{x2}| + |\nabla_{x3}| + |\nabla_{x4}| \quad (8.3)$$

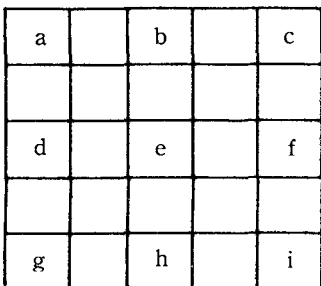


Fig. 1 Mask for computing a two-dimensional, discrete gradient

$$\sum |\nabla_y| = |\nabla_{y1}| + |\nabla_{y2}| + |\nabla_{y3}| + |\nabla_{y4}| \quad (8.4)$$

식(8.1) ~ (8.4)의 값을 식(6)에 대입하면 T 값에 계산된다. Fig. 1의 마스크를 좌우상하로 이동하여 프린지 영상에 적용할 경우 세선처리된 영상을 얻을 수 있다. 위와 같은 알고리즘을 이용하여 식(6)을 계산하면, 광강도가 일정한 방향으로 변화될 경우 $T=0$ 이 되고, 광강도가 최대 또는 최소인 레벨에서 광강도의 변화가 서로 반대방향으로 될 경우에는 $T=A$ 가 된다. 따라서 식(6)과 같은 관계식을 이용하면 광강도가 최대 또는 최소인 레벨은 광강도가 A 인 세선으로 변환시킬 수 있다.

3. 광탄성 프린지의 시뮬레이션 및 세선처리 시험

직경상 반대방향에서 압축하중을 받는 원형디스크에 대한 이론적인 광탄성 등색프린지 패턴을

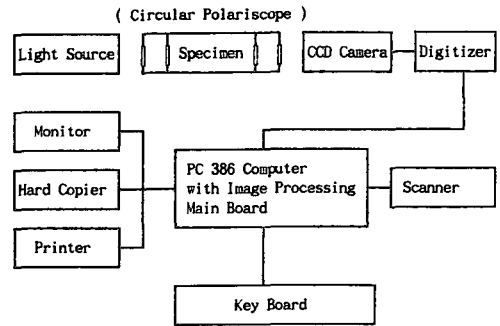


Fig. 2 Block diagram of photoelastic image processing system

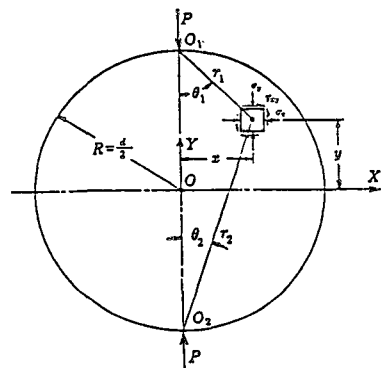


Fig. 3 Stress components in a disk under the action of two diametrically opposite concentrated loads

Fig. 2와 같은 영상처리 시스템을 이용하여 시물레이션한 후 프린지증식과 세션처리에 관한 기법을 시험하였다. 본 연구에 사용된 영상처리 시스템은 Fig. 2에서와 같이 광탄성 영상을 얻기 위한 광원 (light source) 및 원형편광기(circular polariscope), CCD(charge-coupled device) 카메라, 영상처리보드(image processing board)가 내장된 PC386 컴퓨터, 비디오모니터(video monitor)와 프린터 등의 주변장치로 구성되어 있다. 영상화시킬 수 있는 픽셀(pixel)수는 512×480이고 명암도(grey level)는 0에서 255범위이다.

압축하중을 받는 원형디스크의 프린지 시물레이션은 다음과 같은 절차에 따랐다. Fig. 3에서 디스크에 가한 압축하중을 P , 디스크의 반지름을 R , 두께를 t 라 하고, 하중지점 O_1 위치로부터 응력요소까지의 거리를 r_1 , O_2 로 부터 응력요소까지의 거리를 r_2 로 나타내면 X - Y 좌표계에서 평면응력 성분 σ_x , σ_y 및 τ_{xy} 는 다음의 관계식⁽¹¹⁾과 같다.

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{2R} \right] \quad (9.1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{2R} \right] \quad (9.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)^2x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2x}{r_2^4} \right] \quad (9.3)$$

하중 P 와 디스크의 반지름 R 및 두께 t 가 주어진 조건에서 임의위치의 응력요소는 식(9.1)~(9.3)으



Fig. 4 Computer simulated photoelastic isochromatic fringe pattern of a disk compressed by two diametrically opposite concentrated loads in a dark-field circular polariscope arrangement (simulation data : $P=8.90$ N, $R=2.286$ cm, $t=0.476$ cm, $f_\sigma=3.503$ N/cm)

로 계산되며, 이에 대한 결과를 아래의 식(10)에 대입하여 주응력을 계산한다.

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

위의 식(10)에서 계산된 주응력을 식(1)에 대입하면 각각의 위치에서 해당되는 광탄성 등색프린지의 차수(N)를 얻을 수 있다. 이를 다시 식(2) 및 (3)에 대입함으로써 원형편광기의 암시야 또는 명시야 배열상태에 대한 광강도를 얻을 수 있다. 식(9.1)~(9.3)에서 하중 $P=8.90$ N, 디스크의 반지름 $R=2.286$ cm, 디스크의 두께 $t=0.476$ cm 및 식(1)에서 프린지 재료상수 $f_\sigma=3.503$ N/cm의 조건을 대입하여 암시야 배열의 원형편광기 상태에서 시물레이션된 광탄성 등색프린지는 Fig. 4와 같다. Fig. 5의 상반부는 식(2)에 의해서 계산된 프린지영상이



Fig. 5 Dark-field fringes (upper half) and light-field fringes (lower half) generated by Eqs. (2) and (3) from the computer simulated of Fig. 4



Fig. 6 Dark-field fringes(upper half) and two times fringe-multiplied pattern(lower half) generated by Eq. (4) from the computer simulated fringes of Fig. 4

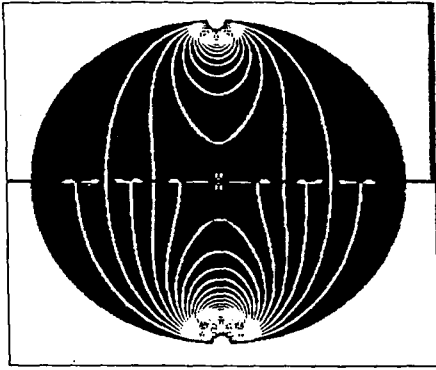


Fig. 7 Fringe-sharpened lines extracted from the fringe pattern using Eq. (6) from the computer simulated fringes of Fig. 6

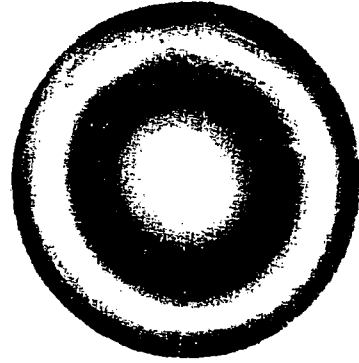


Fig. 8 Experimental fringe pattern of a circular glass bar in a light-field circular polariscope arrangement when residual stresses are included

고, 하반부는 식(3)에 의해서 계산된 프린지영상이다. Fig. 6의 상반부는 Fig. 5의 상반부와 동일한 원형편광기의 암시야 배열상태에서 광탄성 등색프린지이며, 하반부는 식(5)에 의하여 증식된 프린지패턴을 나타내고 있다. Fig. 6의 상반부에서는 프린지차수가 $N=0, 1, 2, \dots$ 등에서 암흑프린지이나, 하반부에서는 식(5)에서와 같이 $N=1/4, 3/4, 5/4, \dots$ 등에서 암흑프린지로 나타난다. Fig. 7은 식(6)의 알고리즘에 의하여 Fig. 6을 세선처리한 영상이다. Fig. 6의 상반부에서는 프린지차수가 $N=0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ 등에서 세선으로 처리되고, 하반부에는 $N=0, 1/4, 2/4, 3/4, 1, 5/4, 6/4, 7/4, \dots$ 등에서 프린지가 4분차수 간격으로 선명하게 세선으로 처리되었다.

4. 유리봉의 잔류응력 측정실험

본 연구를 통하여 구현된 프린지증식 및 세선처리기법을 유리봉의 잔류응력 측정에 적용하였다. 실험에 사용된 유리봉은 붕규산 소다유리(sodium borosilicate)로서 광탄성계수가 약 3.5 Brewster ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)⁽¹²⁾인 특성을 갖고 있다. 유리봉 시편의 직경은 9.497 mm이고 길이는 21.907 mm이다. 유리의 잔류응력 감소화에 관한 연구⁽¹³⁾의 일환으로 시중에서 사용하고 있는 유리봉에서 시편을 채취하여 600°C에서 5분동안 가열한 후 20°C까지 자연냉각시킨 상태에서 잔류응력을 측정하였다. Fig. 8은 위와 같이 처리된 유리봉의 잔류응력상태가 명시야 배열의 원형편광기에서 나타난 광탄성 프린지

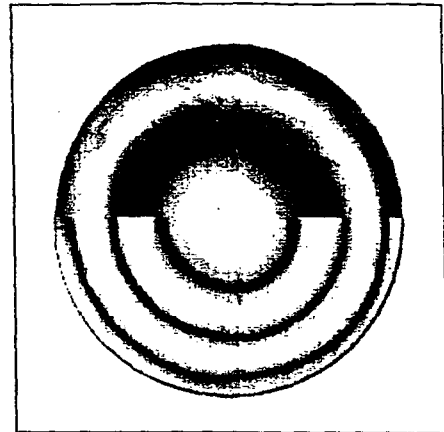


Fig. 9 Light-field fringe pattern(upper half) and two times fringe-multiplied pattern(lower half) of the glass bar of Fig. 8

패턴이다. Fig. 9의 상반부는 Fig. 8과 동일한 프린지이고, 하반부는 2배로 증식된 프린지를 나타내고 있다. 또한 Fig. 10은 Fig. 8 전체를 2배로 증식시킨 프린지패턴이다. Fig. 11은 Fig. 9를 세선처리한 영상이며, 프린지의 위치와 차수는 Fig. 11의 하반부에서와 같이 프린지를 증식시켜 세선처리된 영상으로부터 측정하였다.

이와같이 세선처리된 영상으로부터 프린지차수와 해당되는 위치를 측정한 후, Filon 방법^(1, pp.461~462)을 이용하여 유리봉에 내재된 잔류응력 성분을 다음과 같이 계산하였다.

식(1)의 응력-광법칙을 극좌표 응력성분을 이용하여 다시 나타내면

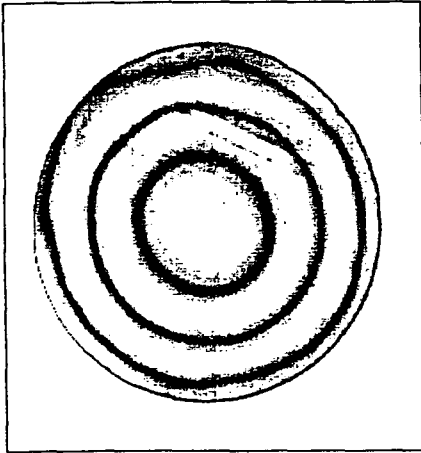


Fig. 10 Two times fringe-multiplied pattern of the glass bar of Fig. 8

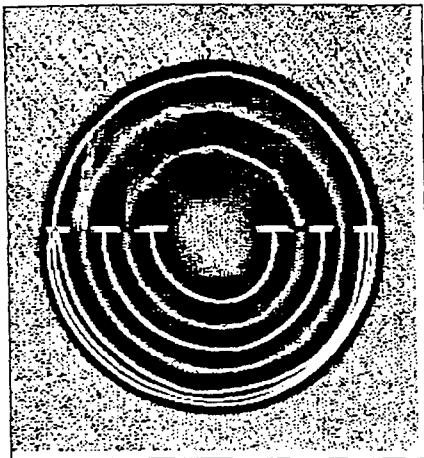


Fig. 11 Fringe-sharpened lines extracted from the fringe pattern of Fig. 9

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \frac{Nf\sigma}{h} \quad (11)$$

위의 식에서 σ_{θ} 는 원주방향의 응력성분이고, σ_r 은 반경방향의 응력성분을 나타낸다. 한편으로, 원통 좌표계의 Lamé-Maxwell^(1, pp.459~462) 평형방정식으로부터

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{r} \quad (12)$$

위의 식(12)를 반경방향에 대해서 적분하면, 해당되는 위치에서 반경방향의 응력성분을 다음 식으로 구할 수 있다.

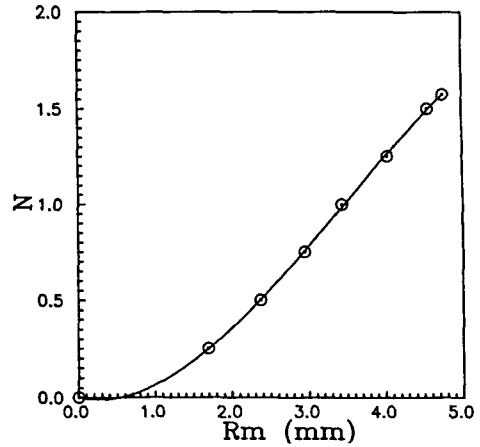


Fig. 12 Experimental data and polynomial curve fitted by least squares method for fringe orders(N) versus radius(Rm) measured from the lower half of Fig. 11

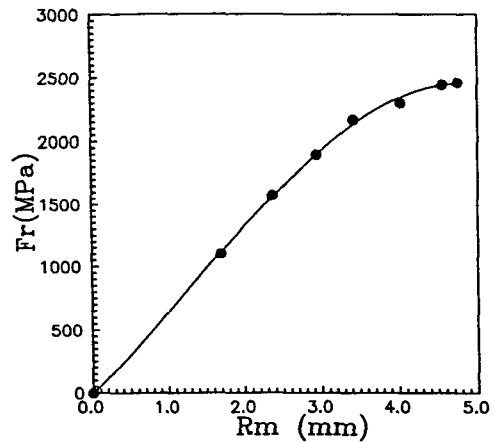


Fig. 13 Experimental data and polynomial curve fitted by least squares method for function of $F(r)$ versus radius(Rm) in Eq. (14)

$$\int_0^r d\sigma_r = \int_0^r \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{r} dr = \int_0^r F(r) dr \quad (13)$$

식(13)의 $F(r)$ 을 구하기 위하여 먼저 경계조건인 외경에서 프린지차수가 결정되어야 한다. 그러나 시편의 치수가 적고 또한 프린지가 불분명하여 보정에 의한 방법으로는 외경의 프린지차수가 정확히 결정될 수 없으므로 Fig. 10의 하반부에서 측정된 프린지위치와 차수분 Fig. 12와 같이 다항식에 의한 곡선으로 나타낸 후, 외삽법(extrapolation)에 의하여 외경에서의 프린지차수를 결정하였다.

경계조건, 즉 외경에서는 반경방향의 응력성분이

Table 1 Experimental residual stress components of the glass bar of Fig. 8 analyzed from the lower half of Fig. 11

Radius (R_m) (mm)	Fringe order (N)	Radial stress (σ_r) (MPa)	Hoop stress (σ_θ) (MPa)	Max. shear stress (τ_{max}) (MPa)
0.	0.	6.909	6.909	0.
1.688	-0.250	5.994	4.137	-0.928
2.360	0.500	5.092	1.379	-1.857
2.934	0.750	4.096	-1.474	-2.785
3.419	1.000	3.115	-4.312	-3.713
4.026	1.250	1.747	-7.536	-4.642
4.555	1.500	0.745	-10.665	-5.570
4.749	-1.573	0.	-11.681	-5.841

$\sigma_r=0$ 이 되므로, 프린지차수(N), 재료의 프린지상수(f_σ) 및 시편의 길이(h)가 결정되면 식(11)을 이용하여 원주방향의 응력성분 σ_θ 를 구할 수 있다. 한편 편으로, 식(13)에서 $F(r)$ 은 식(11)의 관계를 이용하면

$$F(r) = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \left(\frac{Nf_\sigma}{h} \right) \left(\frac{1}{r} \right) \quad (14)$$

위의 식(14)에서 보인 바와 같이 함수 $F(r)$ 은 실험에 의한 측정값이며, 반경방향에 대한 $F(r)$ 을 최소자승법을 이용하여 다항식곡선으로 나타내면 Fig. 13과 같다.

따라서, 식(13)으로부터 경계조건을 이용하고 함수 $F(r)$ 에 대해서 반경방향으로 각각의 구간에서 순차적으로 적분하게 될 경우, 해당되는 위치에서 반경방향의 응력성분(σ_r)이 계산된다. 계산된 σ_r 을

다시 식(11)에 대입하면 원주방향의 응력성분(σ_θ)을 구할 수 있다. 위와 같은 절차를 거쳐 본 실험으로부터 구한 응력성분은 다음의 Table 1과 같다. Table 1을 이용하여 유리봉에 내재된 잔류응력 성분을 그래프로 나타내면 Fig. 14와 같다. Fig. 14를 살펴보면 유리봉의 중심선상인 $R_m=0$ 에서 원주방향, 반경방향 및 최대 전단응력성분은 각각 $\sigma_\theta=6.909$ MPa, $\sigma_r=6.909$ MPa 및 $\tau_{max}=0$ 으로서 2축 응력상태이다. $R_m=4.749$ mm인 외경에서는 $\sigma_r=0$ 이며, $\sigma_\theta=-11.681$ MPa의 압축 잔류응력이 존재한다. 측정된 반경을 R_m 이라고 외경을 R_o 라고 하면, 원주방향의 응력성분은 $R_m/R_o=0.56$ 부근에서 영(zero)이 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 프린지 세선처리기법을 증식되지 않은 원래의 광탄성 영상에 직접 적용할 경우에는 프린지차수가 $N=0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$ 등에서 반차수 간격으로 세선처리되지만, 증식된 프린지에 적용할 경우에는 $N=0, 1/4, 2/4, 3/4, 1, 5/4, 6/4, 7/4, \dots$ 등에서의와 같이 4분 차수 간격으로 세선처리가 되어 정확한 데이터 획득이 가능하다.

(2) 본 연구를 통하여 개발된 기법을 유리봉의 잔류응력 측정에 시험한 결과 Fig. 14에서 보인 바와 같이, 1 mm 미만의 간격에서도 잔류응력 성분을 정량적으로 정밀하게 측정할 수 있다. 특히, 유리봉 시편을 다른 적합한 조건에서 열처리하여 잔류응력이 감소될 경우라도 프린지증식과 세선처리 기법을 이용하면 미소의 잔류응력 측정이 가능할 것으로 예측된다.

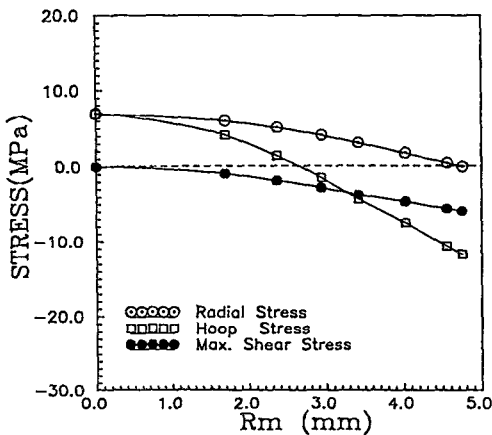


Fig. 14 Plot of residual stress components versus radius(R_m) of the glass bar analyzed from the lower half of Fig. 11

후 기

이 논문은 1993년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지방대 육성 중점과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1978, *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill Book Company.
- (2) Kobayashi, A. S., 1987, *Handbook on Experimental Mechanics*, Prentice-Hall Inc.
- (3) Kuske, A. and Robertson, G., 1974, *Photoelastic Stress Analysis*, John Wiley and Sons Inc.
- (4) Post, D., 1955, "Ischromatic Fringe Sharpening and Fringe Multiplication in Photoelasticity," *Proceedings of the Society for Experimental Stress Anaysis*, Vol. XII, No. 2, pp. 143~156.
- (5) Dally, J. W. and Ahimaz, F. J., 1962, "Photographic Method to Sharpen and Double Isochromatic Fringes," *Experimental Mechanics*, Vol. 2, No. 6, pp. 170~175
- (6) Das Talkuder, N. K. and Ghosh, P., 1975, "On Fringe Multipliation by Super-imposition of Negatives," *Experimental Mechanics*, Vol. 15, No. 6, pp. 237~239.
- (7) Han, B. and Wang, L., 1993, "Isochromatic Fringe Sharpening and Multiplication," *Proceedings of the 1993 SEM 50th Anniversary Spring Conference on Expermental Mechanics, Society for Experimental Mechanics*, pp. 1206~1209.
- (8) Gonzalez, R. C. and Wintz, P., 1987, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 176~179.
- (9) Baek, T. H. and Kim, M. S., 1993, "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.
- (10) 백태현, 1993, "광탄성 등색프린지의 세션처리를 위한 영상처리기법," 한국정밀공학회지, 제 10권, 제3호, pp. 220~230.
- (11) Frocht, M. M., 1967, *Photoelasticity*, John Wiley and Sons, Inc., pp. 156.
- (12) Bansal, N. P. and Doremus, R. H., 1986, *Handbook of Glass Properties*, Academic Press, pp. 36~39.
- (13) 이재춘, 1994, "유리의 잔류응력 예측 및 감소화 방안에 관한 연구," 1993년 한국학술진흥재단 연구지원과제, 중간보고서.