

〈논 문〉

광탄성법에 의한 유리봉 잔류응력의 정밀측정

백 태 현*

(1995년 9월 22일 접수)

Accurate Measurement of Residual Stresses of Glass Rods by Photoelasticity

Tae Hyun Baek

Key Words : Residual Stress Analysis(잔류응력 해석), Photoelasticity(광탄성), Fringe Sharpening(프린지 세션처리), Fringe Multiplication(프린지 증식), Digital Image Processing(디지털 영상처리), Stress in Glass(유리내부응력), Filon's Method(필론방법), Photoelastic Stress Separation(광탄성 응력성분 분해)

Abstract

Residual stresses of cylindrical glass rods are measured by photoelasticity to study the variation of stresses with respect to heat treatment temperatures. In order to measure the stresses accurately, fringe sharpening and multiplication techniques are applied to the determination of photoelastic fringe orders. Filon's separation method is used to resolve circumferential and radial stress components from isochromatic fringes which are the same as in-plane maximum shearing stresses. According to the photoelastic measurements, residual stress is increased as the heat treatment temperature of the rods is raised from 560°C to 650°C. All the circumferential stress components are changed from tensile stresses to compressive ones at approximate $R_m/R_0=0.6$, where R_0 is outer radius and R_m any measured radius. This analysis shows that residual stresses of the glass rods approach zero if the rods are heat-treated near the strain point.

1. 서 론

현대생활에 있어서 유리는 일상적으로 사용되는 판유리나 병유리로 부터, 정밀공업적인 성격을 띠는 광학유리, 이화학유리, 전자기기용 유리 및 광전기기용 유리에 이르기 까지 광범위하게 이용되고 있다. 이와같은 유리제품은 유리원료를 용융하고 성형하는 제조과정에서 갑자기 가열시키거나 냉각시킬 경우가 있다. 이 경우에 유리의 점탄성(visco-elastic property)으로 인하여 냉각과정에 온도구배가 발생되며, 이로 인하여 재료내부에 잔류응력

(residual stress)이 발생^(1,2)된다. 유리표면과 내부에 압축과 인장등 서로 다른 잔류응력성분이 존재할 경우 외부 충격에 대하여 재료를 취약하게 하는 원인이 되므로 유리의 용도에 따라 이를 제거하여야 한다.

본 연구에서는 유리의 잔류응력을 감소시킬 수 있는 효율적인 열처리방법을 모색하기 위하여 열처리 온도 변화에 따른 잔류응력성분을 측정 한 후, 온도변화와 잔류응력의 상관관계를 분석하였다. 잔류응력측정은 광탄성법(photoelasticity)을 이용하였으며, 정밀한 응력측정이 가능하도록 시편으로부터 얻어진 광탄성 프린지 영상(photoelastic fringe image)을 증식(multiplication)시키고, 세션처리(sharpening)할 수 있는 기법⁽³⁾을 적용하였다. 각

*회원, 군산대학교 기계공학부

각의 응력성분은 광탄성 영상으로부터 측정된 값을 이용하여 Filon방법^(4, pp.461~462)으로 구하였다. 측정된 잔류응력성분은 Bartenev의 수치해석적인 순간동결모델⁽⁵⁾(instant freezing model)과 비교하였다. 열처리온도를 달리하여 얻어진 시편의 잔류응력을 분석한 후, 임의의 잔류응력을 내포한 시편의 열처리 온도 범위와 또한 잔류응력을 제거할 수 있는 온도범위를 예측하였다.

2. 광탄성 이론

2.1 프린지의 증식 및 세선처리

광탄성법은 재료가 응력을 받게되면 이중굴절(double refraction) 또는 복굴절(birefringence) 현상이 나타나게 되며, 하중이 가해진 상태에서는 복굴절도 유지되지만 하중이 제거되면 복굴절도 없어지는 현상^(4,6)을 이용한다. 광탄성에서 재료의 프린지상수(material fringe constant)가 높을 경우, 즉 복굴절현상이 하중에 둔감할 경우에는 광탄성시편에 응력을 가한다 하더라도 프린지 차수가 낮게 되고 또한 프린지의 폭이 넓게 되어 정확한 데이터 획득이 난이하다. 이 경우 프린지를 증식시키고 폭이 넓은 프린지를 세선으로 처리하면 더욱 많고 정확한 데이터를 얻을 수 있다.

프린지증식은 디지털 영상처리 시스템을 이용하여 아래와 같은 관계식을 적용하면 용이하게 수행될 수 있다.

원형편광기(circular polariscope)의 암시야(dark field) 배열에서 검광자(analyzer)를 통하여 투과된 광강도, I_D 는

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

위의 식 (1)에서

A : 비례상수

N : 등색프린지 차수

한편으로 명시야(light field) 배열의 원형편광기에서 광강도 I_L 에 관한 식은

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

식 (2)에서 식 (1)을 빼 후 절대값을 취하면 다음의 식 (3)과 같이 프린지 증식에 의한 광강도 I_R 를 얻을 수 있다.

$$I_R = |I_i - I_D| = A |\cos(2\pi N)| \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 흑색프린지(dark fringe)는 $I_R=0$ 이 되고, 이러한 조건을 만족하기 위해서는 $\cos(2\pi N)=0$ 이 되어야 한다. 따라서,

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

프린지를 증식시키기 전에는 식 (1)과 (2)에서 보인 바와 같이 $N=0, 1/2, 1.3/2, 2, \dots$ 등에서 반차수 마다 번갈아 나타나지만, 프린지를 증식시킨 후에는 식 (3)과 (4)의 조건에 따라 $N=0, 1/4, 2/4, 1, 5/4, 6/4, \dots$ 등에서 1/4차수 간격으로 교차되어 나타나므로 2배의 프린지 증식효과가 있다.

광탄성 프린지의 세선처리는 그레이디언트벡터(gradient vector) 특성을 이용하였다. 즉, 암시야 배열의 원형편광기에서 실제 광탄성 영상의 광강도가 국소최소값(local minimum)에서는 정차수프린지($N=0, 1, 2, \dots$)가 되고, 국소최대값(local maximum)에서는 반차수프린지($N=1/2, 3/2, 5/2, \dots$)가 된다. 국소극값(local extremum) 사이에서는 광강도가 증가에서 감소하거나 또는 감소에서 증가한다. 그레이디언트벡터는 언제나 상향성(uphill)이며, 국소극값 양측에서는 그레이디언트벡터의 부호가 서로 반대방향이므로 국소극값 주위에서 그레이디언트 벡터합(sum of gradient vector)을 취하면 급격히 감소하게 된다. 위와 같은 그레이디언트 벡터합의 특성을 이용하여 다음의 식 (5)와 같이 수식화하여 세선처리 할 수 있다.⁽⁸⁾

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

위의 식에서

T : 세선처리된 영상에서의 광강도

∇_x : x 방향의 그레이디언트 성분

∇_y : y 방향의 그레이디언트 성분

그레이디언트벡터 성분은 Fig. 1과 같은 마스크를 이용하여 다음의 식 (5a)~(5d)와 같이 계산한다.

$$\nabla_{x1} = I_b - I_a \quad \nabla_{y1} = I_a - I_e \quad (5a)$$

$$\nabla_{xe} = I_c - I_e \quad \nabla_{ye} = I_b - I_f \quad (5b)$$

$$\nabla_{x3} = I_e - I_g \quad \nabla_{y3} = I_a - I_h \quad (5c)$$

$$\nabla_{x4} = I_f - I_h \quad \nabla_{y4} = I_e - I_i \quad (5d)$$

a		b		c
d		e		f
g		h		i

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

Fig. 1의 마스크를 좌우상하로 이동하여 프린지 영상에 적용할 경우 국소극값인 광강도에서 세선처리된 영상을 얻을 수 있다. 즉, 식 (5)에서 광강도가 일정방향으로 변화될 경우 $T=0$ 이 되고, 광강도가 최대 또는 최소인 레벨에서 양측으로 광강도 변화가 서로 반대방향으로 될 경우 $T=A$ 가 된다. 따라서, 식 (5)와 같은 관계식을 이용하면 흑색 또는 백색프린지의 광강도가 최대 또는 최소인 레벨은 광강도 A 인 세선으로 변화시킬 수 있다.

2.2 Filon방법에 의한 응력성분 계산

광탄성에서 응력-광법칙(stress optic law)을 광좌표성분을 이용하여 나타내면

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \frac{Nf\sigma}{h} \quad (6)$$

위의 식에서 σ_{θ} 는 원주방향의 응력성분(hoop stress component)이고, σ_r 은 반경방향의 응력성분(radial stress component)을 나타낸다. 한편으로, Lamé-Maxwell 평형방정식으로부터

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{r} \quad (7)$$

위의 식 (7)을 반경방향에 대해서 적분하면, 상응되는 위치에서 반경방향의 응력성분을 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\int_0^r d\sigma_r = \int_0^r \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{r} dr = \int_0^r F(r) dr \quad (8)$$

그러나, 시편의 치수가 작고 또한 프린지가 불분명하면 외경표면에 근접한 프린지차수는 광학적 보정방법(optical compensation method)으로 정확히 결정될 수 없으므로 측정된 프린지위치와 차수를 다항식에 의한 곡선으로 나타낸 후, 외삽법(extrapolation)에 의하여 외경의 프린지차수를 결

정할 수 있다.

경계조건, 즉 외경에서 반경방향의 응력성분 $\sigma_r = 0$ 이 되므로 프린지차수(N), 재료의 프린지상수($f\sigma$) 및 시편의 길이(h)가 결정되면 식 (6)을 이용하여 외경에서 원주방향의 응력성분을 구할 수 있다. 한편으로, 식 (8)에서 $F(r)$ 을 식 (6)의 관계를 이용하여 다시 쓰면

$$F(r) = \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{r} = \left(\frac{Nf\sigma}{h} \right) \left(\frac{1}{r} \right) \quad (9)$$

위의 식 (9)에서 $F(r)$ 은 실험에 의한 측정 값이며, 반경방향에 대한 $F(r)$ 을 최소자승법을 이용하여 다항식곡선으로 나타낼 수 있다. 따라서, 식(8)로부터 경계조건을 이용하고, 함수 $F(r)$ 에 대해서 반경방향으로 각각의 구간에서 순차적으로 적분하게 될 경우 반경방향의 응력성분 σ_r 이 계산된다. 계산된 σ_r 을 다시 식 (6)에 대입하면 원주방향의 응력성분 σ_{θ} 을 구할 수 있다.

2.3 광탄성법에 의한 응력성분의 측정

광탄성 프린지의 증식 및 세선처리기법을 적용하여 유리봉의 잔류응력 성분을 측정하였다. 실험에 사용된 유리봉은 붕규산소다유리(sodium borosilicate)로서 광탄성계수가 약 $3.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ (Brewster 단위)인 특성⁽⁸⁾을 갖고 있다. 유리봉 시편의 직경은 9.45 mm 이고, 길이는 20.2 mm이다. 유리의 잔류응력 감소화에 관한 연구⁽⁹⁾의 일환으로 시중에서 상용되고 있는 유리봉에서 시편을 채취하였다. 이 시편을 650°C에서 5분동안 가열한 후 20°C까지 자연냉각시킨 후 잔류응력 성분을 측정하



Fig. 2 Isochromatic fringe patterns of a glass rod heat treated at 650°C and cooled to an ambient temperature in natural convective condition

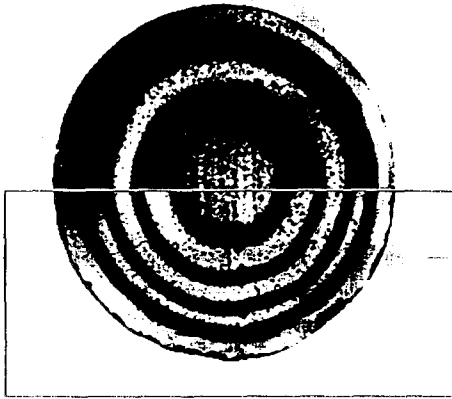


Fig. 3 Original isochromatic fringe pattern (upper half) and two times fringe-multiplied pattern (lower half) of the glass rod of Fig. 2

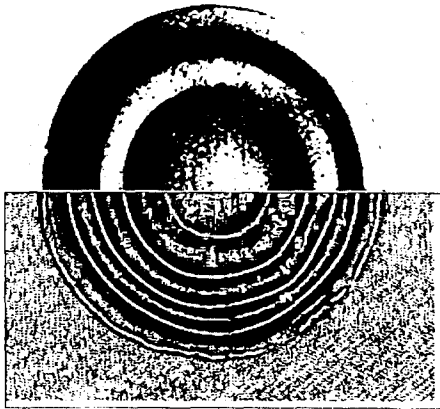


Fig. 4 Fringe-sharpened lines extracted from the fringe-multiplied pattern of lower half of Fig. 3

였다.

위와 같이 열처리된 유리봉의 잔류응력 상태를 원형편광기의 명시야배열에서 나타냈을 때 광탄성 프린지는 Fig. 2와 같다.

Fig. 3의 상반부는 Fig. 2와 동일한 프린지이고, 하반부는 프린지 증식기법에 의하여 2배로 증식된 프린지를 나타낸다. 또한, Fig. 4는 정밀한 데이터를 측정할 수 있도록 Fig. 3의 하반부를 식 (5)의 알고리즘에 의하여 세선처리하였다. 반경방향에 대한 프린지차수를 Fig. 4의 하반부로부터 측정 한 후 Fig. 5와 같이 다항식곡선으로 나타냈다. 이 곡선으로부터 외경($R_m/R_0=1$: R_m =임의의 측정반경, R_0 =시편의 반경)에서의 프린지 차수는 외삽법으

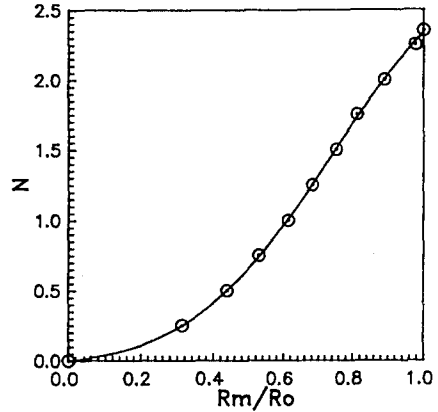


Fig. 5 Experimental data and polynomial curve fitted by least squares method for fringe orders (N) versus normalized radius (R_m/R_0) measured from the lower half of Fig. 3

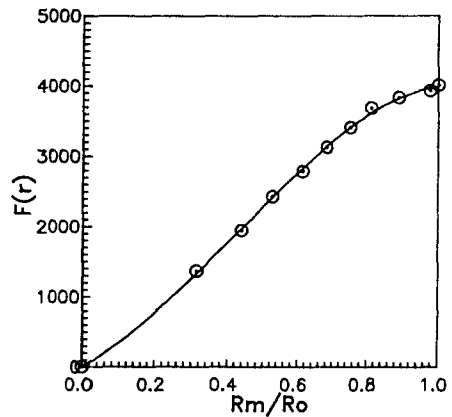


Fig. 6 Experimental data and polynomial curve fitted by least squares method for function of $F(r)$ versus normalized radius (R_m/R_0) of Eq. (9)

로 결정하였다. 또한, 식 (9)를 이용하여 측정된 값을 다항식으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 2.2절에 기술된 Filon방법에 따라 각각의 반경위치에서 구한 응력성분은 Table 1 과 같다.

2.4 수치모델에 의한 잔류응력 예측

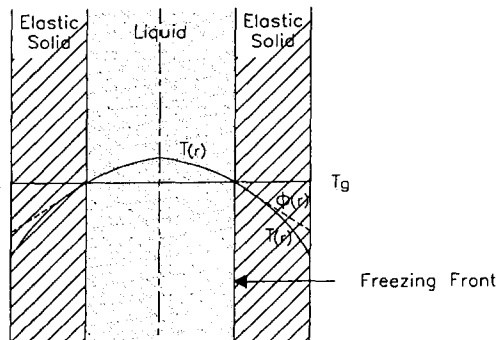
유리의 잔류응력을 예측하는 대표적인 수치모델로서 Bartenev의 순간동결모델(instant freezing numerical model)^(5,9)을 이용할 수 있다. 순간동결 모델은 유리전이영역(glass transition range)의 복잡한 점탄성현상을 가상적인 순간동결온도(hypo-

Table 1 Residual stress components of the glass rod of Fig. 2 determined by photoelastic measurement

Radius (R_m/R_0)	Fringe order (N)	Radial stress (σ_r) MPa	Hoop stress (σ_θ) MPa	Maximum shear stress (τ_{max}) MPa
0.	0.	10.412	10.412	0.
0.313	-0.25	9.404	7.388	-1.008
0.439	-0.50	8.424	4.391	-2.017
0.528	-0.75	7.504	1.455	-3.025
0.613	-1.00	6.462	-1.604	-4.033
0.683	-1.25	5.481	-4.601	-5.041
0.752	-1.50	4.414	-7.685	-6.050
0.812	-1.75	3.419	-10.696	-7.058
0.890	-2.00	2.021	-14.111	-8.066
0.977	-2.25	0.425	-17.723	-9.074
1.000	-2.35	0.	-18.939	-9.470

thetical instant frozen temperature), T_g 로 단순화시킬 수 있다. 즉, 가상 순간동결온도 순간동결온도 T_g 에 대한 정의는 T_g 보다 높은 온도의 유리상태에서는 어떠한 전단응력(shear stress)도 지탱할 수 없는 액체상태(liquid state)로 취급하는 반면, T_g 보다 낮은 온도의 유리는 유동흐름(flow)이 없다고 가정하여 탄성매질상태(elastic solid state)로 간주한다. 순간동결 모델을 그림으로 형상화한 예를 Fig. 7에 나타내었다.

순간동결 모델에서는 유리봉의 순간응고(instant solidification)시 냉각에 의하여 생성되는 응력은 실제로는 표면으로부터 동결부(freezing front)의

**Fig. 7** The "instant freezing model" from the reference 5,9

온도구배 $T(r)$ 에 의해서 결정되나, 탄성매질의 가상온도분포를 $\phi(r)$ 로 가정하여 잔류응력을 계산한다. 가상온도분포 $\phi(r)$ 과 실제온도분포 $T(r)$ 의 관계는 동결부에서 다음의 경계조건을 갖는다.

$$\frac{d\phi(r)}{dr} = \left[\frac{dT(r)}{dr} \right]_{r \approx T_g} \quad (10)$$

또한 원형유리봉은 기하학적으로 축대칭(axisymmetric)이므로 평면변형률(plane strain)조건하에서 응력과 변형의 관계는 다음의 식⁽¹⁰⁾으로 표시된다.

$$\sigma_r = \frac{E}{3(1-\nu)} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b \nu r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r \nu r dr \right] \quad (11a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{3(1-\nu)} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b \nu r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r \nu r dr - \nu \right] \quad (11b)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{3(1-\nu)} \left[\frac{2}{b^2} \int_0^b \nu r dr - \nu \right] \quad (11c)$$

위의 식(11a, b, c)에서 E 는 영탄성계수, ν 는 포와송비, b 는 유리봉의 반지름을 나타낸다. 또한, ν 는 온도변화에 의한 팽창률(dilatation due to temperature)로서 다음의 관계를 갖는다.

$$\nu = 3a[\phi(r) - T(r)] \quad (12)$$

식(12)에서 a 는 열팽창계수(thermal expansion coefficient)이다.

Table 2 Physical properties of a commercial borosilicate glass rod used in the experiment.

Property	Value
Strain point	520°C
Annealing point	560°C
Softening point	750°C
Density	2.37 g/cm ³
Elastic modulus	70GPa
Poisson's ratio	0.25
Thermal expansion coefficient	58 × 10 ⁻⁷ °C ⁻¹
Heat capacity(100°C)	0.211cal/(g · °C)
Thermal conductivity - 100°C	2.7 × 10 ⁻³ cal/(cm · sec °C)
- 0°C	2.4 × 10 ⁻³ cal/(cm · sec °C)
Stress Optic Coefficient	3.5 × 10 ⁻¹² m ² /N (Brewster)

한편으로 원통형좌표계를 이용하여 초기 및 경계 조건에 따른 유리봉의 온도분포는 다음의 방정식⁽¹¹⁾으로 표시될 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [Kr \frac{\partial T}{\partial r}] \text{ for } 0 \leq r \leq b, t > 0 \quad (13a)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial r} + h(T, t)[T - T_a(t)] \text{ at } r = b, t > 0 \quad (13b)$$

$$T_i = T_0 \text{ for } 0 \leq r \leq b, t = 0 \quad (13c)$$

여기서, ρ , C_p , K 는 각각 유리의 밀도

(density), 열용량(heat capacity) 및 열전도도(heat conductivity)를 나타내며, $T_a(t)$ 와 $h(T, t)$ 는 각각 주위온도(ambient temperature)와 필름계수(film coefficient)로서 경계조건과 시간의 함수로 표시될 수 있다. 또한 고온의 유리는 대류에 의한 열전달(convective heat transfer) 이외에도 방사에 의한 열전달(radiant heat transfer)이 중요하다고 알려져 있다.⁽¹²⁾ 따라서 본연구에서는 필름계수를 대류에 의한 열전달 필름계수 $h_c(T, t)$ 와 방사에 의한 열전달 필름계수 $h_r(T, t)$ 의 합으로 나타내었다. 식(4a, b, c)로부터 경계조건과 시간경과에 따른 실제온도분포 $T(r)$ 을 계산한 후, 식(10)과 (11a, b, c)에 대입하면 응력성분을 계산할 수 있다. 다음의 Table 2는 본연구의 실험에 사용된 유리봉의 물성치를 나타낸다.

Fig. 8은 열처리온도가 650°C일 때 식 (11a, b, c)와 같이 Bartenev의 수치모델 방법에 의하여 계산된 응력성분의 곡선과 Table 1의 광탄성법에 의하여 측정된 실험치를 나타낸다. Fig. 8에서 보인 바와 같이 수치모델에서 가상순간동결온도 및 열팽창계수등의 매개변수를 조절하여 실험치에 근접한 잔류응력을 예측할 수 있다.

3. 열처리온도에 따른 유리봉 잔류응력의 변화

열처리온도에 따른 유리봉 잔류응력변화를 측정

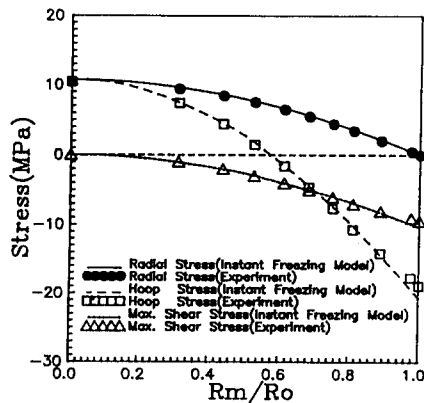


Fig. 8 Comparison of experimental residual stresses and calculated ones for a glass rod heat-treated at 650°C

Table 3 Specimen used in residual stress measurement by photoelasticity

No.	Heat treated temperature (°C)	Diameter (mm)	Length (mm)
1	560	9.51	40.05
2	600	9.50	21.91
3	650	9.45	20.17
4	665	9.37	21.96
5*	As-Re	9.49	20.86

* Note: Specimen No. 5 was cut as it was purchased without taking any heat-treated procedure, and measured residual stresses by photoelasticity

하기 위해 지름이 0.95 cm이고 길이가 60 cm인 유리봉을 Table 3과 같이 여러가지 온도로 가열하였다. 특정온도로 가열한 후, 로에서 일정시간동안 유지시킨 다음, 신속히 꺼내어 공기중에서 자연냉각시켰다. 광탄성 측정은 열처리된 유리봉의 중심부에서 좌, 우로 Table 3과 같은 길이로 절단된 시편이 사용되었다.

광탄성법에 의한 응력측정은 일반적으로 시편을 편광기 사이에 위치시켜 나타나는 프린지로서 측정할 수 있다. 그러나, 시편의 광탄성계수(photoelastic coefficient)가 대단히 높아 측정하고자 하는 프린지를 얻을 수 없거나 또한 시편이 작은 경우에는 재래식 편광기에 의하여 측정이 곤란할 경우가 많다. 이와같은 경우를 고려하여 본 연구에서는 유리봉의 잔류응력을 Fig. 9의 Block Diagram으로 표시된 디지털 영상처리장치(digital image processing system)를 사용하여 분석하였다. 이러한 영상처리 장치를 이용하면 프린지를 세선으로 처리하거나, 낮은 차수의 등색프린지는 필

요에 따라 증식시키 광탄성법으로부터 응력을 정밀하게 측정할 수 있다.

Fig. 10은 각각의 열처리온도에 따른 등색프린지

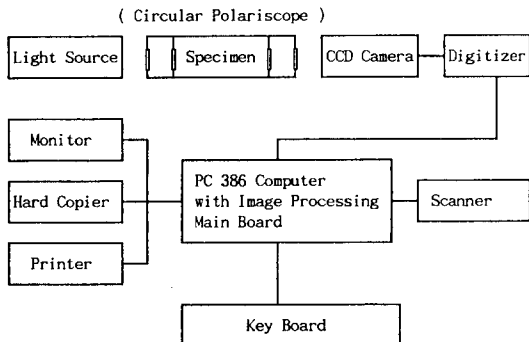
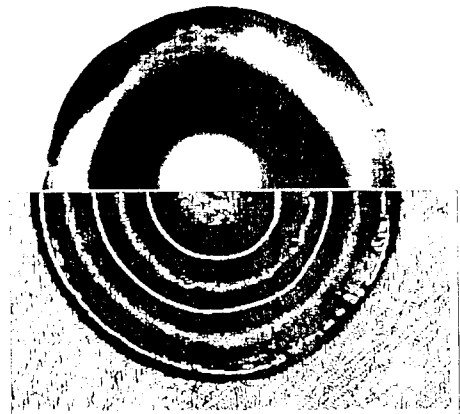
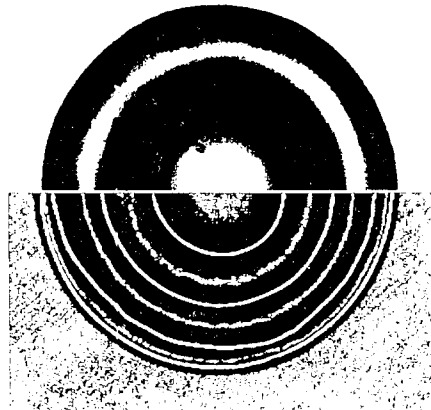


Fig. 9 Photoelastic digital image processing system

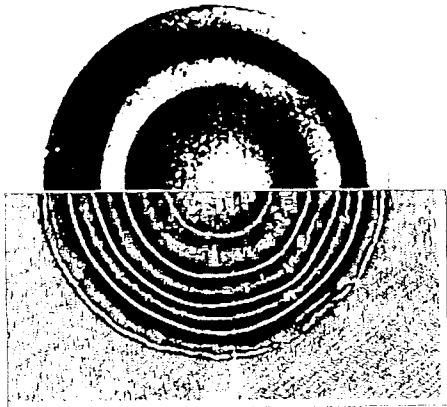


(a) 560°C



(b) 600°C

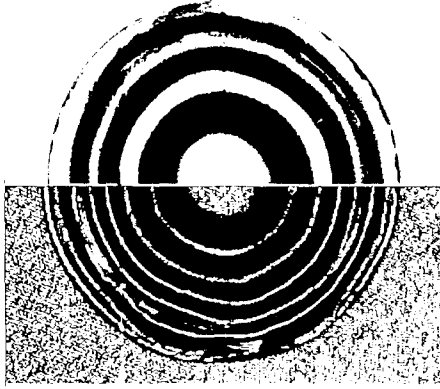
Fig. 10 Continued



(c) 650°C



(d) 665°C



(e) As-Re Sample

Fig. 10 Isochromatic fringe patterns of glass rods cooled to an ambient temperature in natural convective condition. The initial heat treated temperature of each sample is as follows

패턴이다. 상반부(upper half part)는 편광기로부터 그대로 나타난 프린지패턴(original fringe pattern)이며, 하반부(lower half part)는 프린지를 증

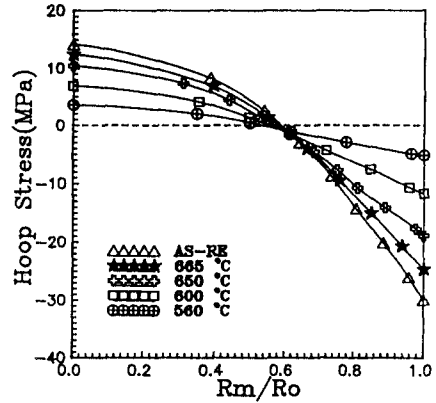


Fig. 11 Distributions of hoop stress components versus dimensionless radius measured from the fringe patterns of Fig. 10

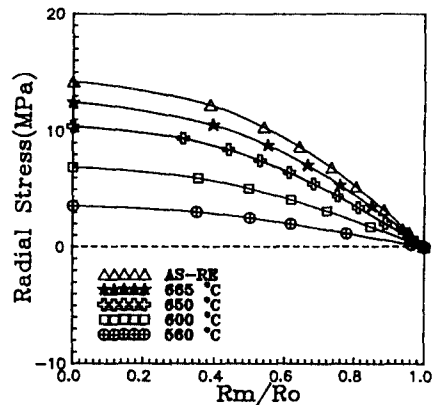


Fig. 12 Distributions of radial stress components versus dimensionless radius measured from the fringe patterns of Fig. 10

식시킨 후 세선처리한 결과를 나타내고 있다. 잔류응력의 크기는 가시적으로 Fig. 10의 상반부에 나타난 프린지차수로 직접 비교할 수 있다. Fig. 10의 (a)~(d)는 각각 560°C, 600°C, 650°C 및 665°C의 열처리온도로 유지되다가 실온으로 냉각된 등색프린지 패턴이며, 열처리온도가 증가할 수록 각 패턴의 상반부에 나타난 등색프린지의 차수도 증가함을 알 수 있다. Fig. 10의 (e)는 시중에서 구입된 As-received(As-Re) 상태의 유리봉 시편에 대한 등색프린지로서, 가장 큰 잔류응력상태를 나타내고 있다. 여기서, As-Re 시편이 공기중에서 자연 냉각되었다고 가정하면, 이 유리봉의 온도는 665°C 보다 더 높은 온도에서 유지되다가 공냉되었

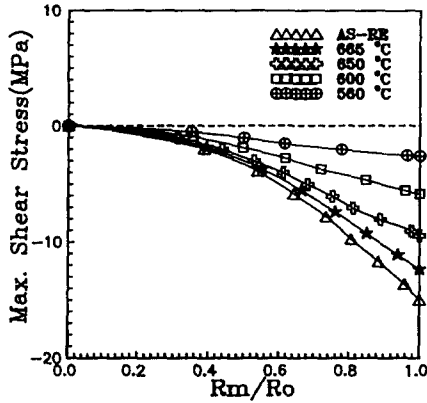


Fig. 13 Distributions of in-plane maximum shear stress components versus dimensionless radius measured from the fringe patterns of Fig. 10

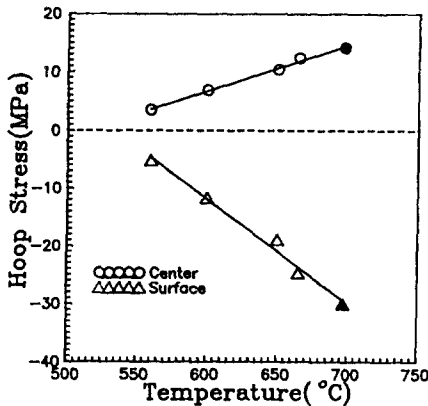


Fig. 14 Variations of hoop stress component versus heat-treated temperature

음을 예상할 수 있다.

Figs. 11~13은 각각의 열처리 온도에 따른 원주 응력(hoop stress), 반경방향응력(radial stress) 및 평면상 최대전단응력(in-plane maximum shear stress)성분의 변화를 나타낸다. Fig. 11에서 보인 바와 같이 원주응력성분은 열처리 온도가 높을 수록 중심부에서는 인장응력이 증가되며, 표면에 근접할 수록 압축응력이 증가된다. 또한 모든 원주응력성분은 $R_m/R_0=0.6$ 부근에서 인장에서 압축상태로 변화되는 지점을 지난다. 열처리온도가 Annealing point (560°C)에 근접할 때, 원주응력성분은 중심부에서 최소인장응력이 되며, 표면에서는 최소압축응력이 된다. 반경방향의 응력성분은 Fig. 12에서 보인 바와 같이 중심부에서는 열처리온도가

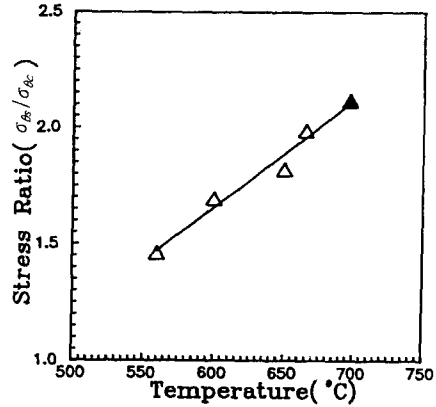


Fig. 15 Variations of hoop stress ratio (σ_{bs}/σ_{bc}) versus heat-treated temperature

높아질 수록 인장응력이 증가되며, 표면에서는 모두 영으로 된다. 평면상 최대 전단응력은 Fig. 13에서 보인 바와 같이 중심부에서는 양축으로 동일한 응력상태(equi-biaxial stress)가 되므로 영이되며, 열처리온도가 증가할 수록 전단응력도 증가하게 된다.

Fig. 14는 중심부와 표면에서 열처리온도에 따른 원주방향 응력성분의 변화를 나타내고 있다. 중심부와 표면에서의 원주응력성분을 최소자승법에 의한 직선으로 연결하면 열처리온도가 Table 2의 변형온도(strain point)에 근접한 530°C에 근접할 수록 원주응력성분이 없어지게 됨을 알 수 있다. 여기서, 변형온도에 대한 정의는 어떠한 급냉에도 응력이 잔존하지 않은 온도를 말하며, 이 온도에서 유리를 장시간 유지할 경우 응력이 제거되는 최저 온도이다. (2, pp.242) Fig. 15는 온도변화에 따른 원주 응력성분의 중심부 압축응력(σ_{bc})과 표면의 인장응력(σ_{bs})의 응력비(σ_{bs}/σ_{bc})를 나타낸다. 응력비는 4개의 열처리시편(560°C, 600°C, 650°C, 665°C) 분석결과 Fig. 15에서 보인 바와 같이 온도변화에 따라 선형으로 증가됨을 알 수 있으며, 시중에서 직접 구입한 시편(As-Re)은 약 700°C에서 처리되었음을 추정할 수 있다. (Figs. 14, 15의 ●, ▲표시)

4. 결 론

본 연구로부터 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 디지털 영상처리를 이용한 프린지 증식 및

세선처리기법을 광탄성법에 적용하면 정밀한 응력 해석이 가능하다. 재래식 광탄성에서는 정차수 또는 반차수에서 데이터 획득이 가능하지만 본 연구의 방법을 적용하면 포린지 증식과 세선처리된 영상으로부터 $N=0, 1/4, 2/4, 3/4, 1, 5/4, \dots$ 등의 4분차수 간격의 포린지에서 데이터 획득이 가능하며, 응력을 보다 정밀하게 측정할 수 있다.

(2) 열처리온도에 따른 유리봉의 잔류응력성분을 광탄성법에 의한 Filon방법으로 측정 하였다. 측정 결과, 원주응력성분은 열처리온도가 증가할 수록 중심부에서 인장응력이 증가하였으며, 표면에서는 압축응력성분이 증가하였다. 이는 유리봉의 냉각과정에서 열처리온도가 높으면 표면과 중심부의 온도 차이가 커지게 되며, 이로 인하여 중심부에서 표면으로 온도구배가 증가되기 때문이다. 서로 다른 온도에서 처리된 모든 시편은 원주응력성분이 $R_m/R_0 = 0.6$ 부근에서 인장에서 압축으로 변화되었다. 반경방향의 응력성분은 열처리온도가 증가할 수록 중심부에서는 증가되었으며, 표면에 근접할 수록 영으로 수렴하였다. 또한, 평면상 최대전단응력성분은 중심부에서는 영이며, 표면에서는 열처리온도가 증가할 수록 전단응력도 증가되었다.

(3) 유리봉의 중심부와 표면에서의 원주응력성분은 열처리온도가 증가될 수록 크게 되었으며, 유리의 변형온도(strain point)에서 열처리될 경우 잔류응력은 크게 감소할 것으로 예상되었다. 또한, 열처리온도에 따른 원주응력성분의 표면응력과 중심응력 비(σ_{os}/σ_{oc})의 관계는 선형으로 변화되었으며, 시중에서 구입된 상용제품의 유리봉은 약 700°C에서 처리되었음을 예측할 수 있었다.

(4) 유리봉에서의 잔류응력변화는 관계되는 가상동결온도와 열팽창계수 등의 매개변수를 조절하면 Bartenev의 순간동결모델(instant freezing model)로서 실험치에 근접시킬 수 있었다.

참고문헌

(1) Rawson, H., 1967, *Inorganic Glass-Forming*

Systems, Academic Press, London.

- (2) 이정훈, 1989, 유리공학 (Glas Natur, Struktur and Eigenshaften 번역서), 반도출판사.
- (3) 백태현, 1994, "광탄성포린지 해석을 위한 영상처리기법 개발," 대한기계학회논문집, 제18권, 제18호, pp. 2577~2584.
- (4) Dally, J. W. and Riley, W. F. , 1978, *Experimental Stress Analysis*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company.
- (5) Bartenev, G. M. , 1970, *The Structure and Mechanical Properties of Inorganic Glasses*, Groningen: Walters-Noordhoff Publishing Company.
- (6) Kuske, A. and Robertson, G. , 1974, *Photoelastic Stress Analysis*, John Wiley and Sons Inc.
- (7) Han, B. and Wang, L. , 1994, "Isochromatic Fringe Sharpening and Multiplication," *Experimental Techniques*, Vol. 18, No. 6, pp. 11~13.
- (8) 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.
- (9) 이재춘, 백태현, 1994, "유리의 잔류응력 감소화방안 연구(1): 순간동결모델에 의한 유리의 잔류응력 해석," 한국요업학회논문집, 제31권, 제8호, pp. 902~910.
- (10) Boley, B. A. and Weiner, J. H. , 1960, *Theory of Thermal Stress*, John Wiley and Sons, Inc. , pp. 243~298.
- (11) Ozisic, M. N. , 1980, *Heat Conduction*, John Wiley and Sons, Inc.
- (12) Gardon, R. , 1961, "A Review of Radiant Heat Transfer in Glass," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 44, pp. 305~312.