

스트레인 게이지와 반사형 광탄성법을 이용한 굽힘을 받는 외팔보 시편 구멍 주위의 응력측정

Stress Measurement around a Circular Hole in a Cantilever Beam under Bending Moment Using Strain Gage and Reflective Photoelasticity

백태현**†, 박태근**, 양민복**

Tae Hyun Baek**†, Tae Geun Park** and Min Bok Yang**

초 록 기계구조물 설계시 파손이나 갑작스런 붕괴를 방지하기 위하여 응력집중을 실험적으로 측정해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 중앙에 원형구멍이 있는 외팔보 시편의 응력집중계수를 스트레인 게이지와 광탄성법으로 측정하였다. 스트레인 게이지법에서는 구멍 주위에 3개의 스트레인 게이지를 부착하여 측정된 값으로부터 외삽법을 사용하여 구멍에 인접한 지점에서 최대 변형률을 추정하였다. 광탄성법에서는 두 가지 측정법, 즉 배비넷-솔레일 보상법과 위상이동법을 이용하여 응력분포를 측정하였다. 스트레인 게이지와 광탄성법에 의한 측정값들을 서로 실험오차 이내로 근접하였다.

주요용어: 스트레인 게이지법, 광탄성법, 변형률 측정법, 응력집중계수, 배비넷-솔레일 보상법, 광탄성 위상이동법

Abstract It is necessary to study on the stress concentration experimentally, which is the main reason to avoid mechanical dilapidation and failure, when designing a mechanical structure. Stress concentration factor of a specimen of cantilever beam with a circular hole in the center was measured using both strain gage and photoelastic methods in this paper. In strain-gage measurement, three strain gages along the line near a hole of the specimen were installed and maximum strain was extrapolated from three measurements. In photoelastic measurement, two methods were employed. First, the Babinet-Soleil compensation method was used to measure the maximum strain. Secondly, photoelastic 4-step phase shifting method was applied to observe the strain distribution around the hole. Measurements obtained by different experiments were comparable within the range of experimental error.

Keywords: Stress-Gage Measurement, Photoelasticity, Strain Measurement, Stress Concentration Factor, Babinet-Soleil Compensation Method, Photoelastic Phase Shifting Method

1. 서론

하중을 받고 있는 구조물의 응력 상태를 해석하기 위해서는 이론에 의한 해석 방법과 실험에 의한 측정값 등을 이용한다. 최근 컴퓨터를 이용한 수치 해석의 분야가 급속히 발전되어 신뢰할 만한 계산 결과를 얻을 수 있다. 그러나 수치해석 결과는 반

드시 실험적인 검증이 있어야 하므로, 실험법은 기계 구조물 설계 및 해석에 필수적이고 중요한 분야이다. 실험에서 응력 및 변형률 측정에 스트레인 게이지법과 광탄성법이 많이 사용되고 있다.

스트레인 게이지법의 원리는 가는 금속선에 외력에 의해 변형될 경우 변화되는 전기 저항 값을 측정하는 것이며, 기계 구조물의 응력, 정하중, 동하

중 등의 측정과 각종 센서에 광범위하게 응용되고 있다[1,2].

광탄성 실험법은 외력에 의해 편광물질의 복굴절이 변화되는 물리적인 현상을 이용하며, 광탄성 모델을 통해 실제 응력 상태를 관찰할 수 있으므로 공학적으로 널리 이용되고 있다. 스트레인 게이지에 의한 측정법은 특정 위치의 변형률에 한하여 측정할 수 있는 반면, 광탄성법은 전체 응력장(whole stress field)을 가시적으로 명확히 판별할 수 있는 장점이 있다[1,3-5]. 광탄성법 중, 반사형 실험법은 실제의 구조물에 광탄성 재료로 피막을 입혀 변형률을 측정하는 방법이다.

본 논문에서는 구멍이 있는 알루미늄 시편의 한 면에 스트레인 게이지를 부착하고, 다른 한 면에는 반사형 광탄성 피막재료를 입혀 같은 조건의 하중을 받는 상태에서 응력 집중계수를 측정하였다. 광탄성 실험법에서는 두 가지 방법을 사용하였다. 첫째, 배비넷-솔레일 보상법[1]을 이용하여 구멍주위의 최대 변형률을 측정하였다. 다음으로 광탄성 4단계 위상이동법[6,7]을 이용하여 구멍 주위의 변형률 분포를 구하였다.

광탄성 4단계 위상이동법은 현재까지 많은 연구가 이루어져 적용되어왔다. 그러나 이는 실제 구조물이 아닌 형상이 유사한 투명 시편을 투과형 광탄성기에 설치하여 하중을 가한 후 프린지를 측정하는 실험이었다. 본 논문에서는 실제 구조물에 적용 가능한 반사형 광탄성 실험장치를 이용해 프린지 위상이동법을 이용, 실험을 실시하였다. 또, 그 결과를 스트레인 게이지법과 배비넷-솔레일 보상법을 통해 얻은 결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 스트레인 게이지법

하중을 받는 구조물에 구멍이 있을 경우, 구멍 주위에 응력은 갑자기 높아지며 응력집중이 발생한다. Fig. 1은 한 단이 고정된 구멍이 있는 외팔보의 끝지점 부근에 집중하중 P를 받고 있는 경우, 응력 분포를 나타낸다. Fig. 1에서 보인바와 같이 구멍으로부터 멀리 떨어진 선 A에서는 응력분포가 σ_A 로 균일하지만 구멍을 가로지르는 선 B에서는 응력분포가 다르다. 즉 구멍 주위에서는 $\sigma_{B, MAX}$ 로 응력집중 현상이 나타난다.

Fig. 1의 선 A 표면에서는 응력 분포가 균일하며, 균일한 응력 σ_A 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_A = \frac{M_A c}{I_A} = \frac{6PL}{bt^2} \tag{1}$$

위의 식에서 $M_A = PL$ 로서 외팔보에 가한 모멘트이며, P와 L은 각각 하중과 A 지점으로부터 하중점까지 거리를 나타낸다. I_A 는 A 지점에서 단면 2차모멘트, c는 외팔보 중립축으로부터 보의 표면까지의 거리, 그리고 b와 t는 각각 외팔보의 폭과 두께를 나타낸다.

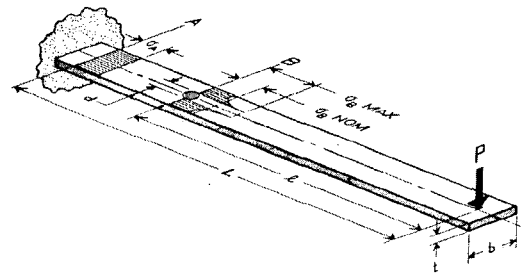


Fig. 1 Schematic representation of a cantilever beam with stress concentration

또한, 선 B 표면에서의 공칭응력 $\sigma_{B, NOM}$ 는 단면 B의 순수면적을 기준으로 하여 다음 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\sigma_{B, NOM} = \frac{M_B c}{I_B} = \frac{6PL}{(b-d)t^2} \tag{2}$$

식 (2)에서 d는 구멍의 지름이다. 만일 $l/L = (b-d)/b$ 의 관계를 만족한다면, 이 위치에서 선 A 표면의 균일한 응력 σ_A 와 선 B 표면의 공칭응력 $\sigma_{B, NOM}$ 은 서로 같아진다. 그리고 응력집중으로 인하여 선 B 표면의 구멍주위에서는 응력이 크게 증가된다. 따라서 Fig. 1에서와 같이 구멍의 가장자리에서 최대응력이 발생되고, 구멍으로부터 멀어질수록 응력이 급격히 감소됨을 알 수 있다. 응력집중계수 K_t 는 식 (3)과 같이 공칭응력 $\sigma_{B, NOM}$ 과 최대응력 $\sigma_{B, MAX}$ 의 비로 나타낸다.

$$K_t = \frac{\sigma_{B, MAX}}{\sigma_{B, NOM}} \tag{3}$$

또한, 응력과 변형률은 탄성영역 내에서는 서로 비례하므로 응력집중계수는 식 (4)와 같이 선 B 표면에서 공칭변형률과 최대변형률의 비와 같다.

$$K_t = \frac{\epsilon_{B,MAX}}{\epsilon_{B,NOM}} = \frac{\epsilon_{B,MAX}}{\epsilon_A} \quad (4)$$

2.2. 광탄성 실험법

빛의 속도(C)는 공기 중에서 3×10^{10} cm/sec 이며, 다른 매질에서는 속도는 달라지며, 다른 매질에서의 빛의 속도(V)와의 비(C/V)를 굴절률이라 한다. 균일한 물체에서의 굴절은 진동의 진행 방향이나 진동면에 관계없이 일정하나, 결정에서의 굴절은 그 축에 대해 진동의 방향에 따라 다르다. 재료에 응력이 있으면 불균일하게 되고 굴절률의 변화를 가져온다.

두께가 t 인 투명한 편광재료에 빛이 통과하는 경우, 원하는 측정지점의 주변형률 방향을 x, y라 하면 편광된 빛은 갈라지고 두 개의 편광선은 x, y면에서 진동하며 나간다. 이러한 방향으로 진동하는 빛의 속도는 각각 V_x, V_y 라 할 때, 그들 각각이 판을 가로 지르는데 필요한 시간은 t/V 이다. 이때, 두 광선 사이의 상대 지연 δ 는 식 (5)와 같다.

$$\delta = C \left(\frac{t}{V_x} - \frac{t}{V_y} \right) = t(n_x - n_y) \quad (5)$$

식 (5)에서 n_x 와 n_y 는 각각 x, y방향의 굴절률을 나타낸다.

Brewster의 법칙에 따르면 굴절률의 상대적인 변화는 주변형률 ϵ_x 와 ϵ_y 의 차이에 비례한다고 정의된다[1]. 이를 이용하면 식 (5)는 다음의 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$(n_x - n_y) = K(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (6)$$

위의 식에서 K는 재료의 물리적 특성을 나타내는 변형률-빛 계수(strain-optic coefficient)이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 다음의 식 (7a, 7b)을 얻을 수 있다.

$$\delta_1 = tK(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (7a)$$

$$\delta_2 = 2tK(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (7b)$$

식 (7a)와 (7b)의 δ_1 과 δ_2 는 각각 투과형 및 반사형 광탄성법에서 상대지연을 나타낸다. 투과형 광탄성법에서는 빛이 시편 두께를 한번만 통과하나 반사형에서는 Fig. 2와 같이 광탄성 피막(photoelastic coating)을 두 번 통과하므로 지연이 2배가 된다. Fig. 2는 반사형 광탄성 실험법의 개념도를 나타낸다.

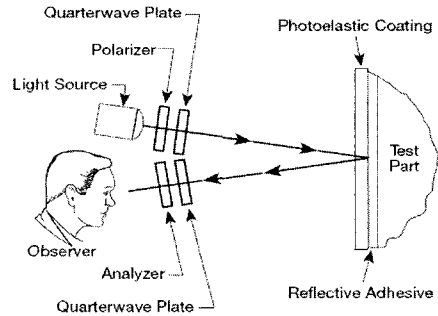


Fig. 2 Reflective type photoelastic experiment

원형편광기(circular polariscope)에서 상대지연이 $\delta = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$ 일 때 광강도(light intensity)는 0 이 된다. 여기서 λ 는 빛의 파장(wave length)을 말하며, 상대지연과의 관계는 다음의 식 (8)과 같다.

$$\delta = N\lambda \quad (N=0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7b)의 반사형 편광기에 관한 식에 대입하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$(\epsilon_x - \epsilon_y) = \frac{N\lambda}{2tK} = \frac{Nf_c}{2t} \quad (9)$$

식 (9)에서 f_c 는 변형률-광탄성계수 (strain-optic coefficient)로서 $f_c = (1 + \nu^c)f_\sigma / E^c$ 관계를 갖는다. 여기서 ν^c 와 E^c 는 각각 광탄성 피막재료의 푸와송비와 영탄성계수를 의미하며, f_σ 는 광-응력계수(stress-optic coefficient)이다. 이러한 관계와 광탄성 피막법 원리를 이용하면 시편의 주변형률 차이는 다음과 같다.

$$\epsilon_x^s - \epsilon_y^s = \frac{N}{2t^c} \left\{ \frac{1 + \nu^c}{E^c} \right\} f_\sigma \quad (10)$$

식 (10)에서 $\epsilon_x^s, \epsilon_y^s$ 는 각각 시편(specimen)에서 x, y 방향의 주변형률이고, t^c 는 광탄성피막 두께이다. 따라서 시편의 주변형률 차이는 식 (10)과

같이 광탄성 피막의 등색프린지 차수 N 에 관계되며, 광탄성 피막법으로 직접 측정할 수 있다[1,8].

2.3. 광탄성프린지 4단계 위상이동법

등경각이 일정한 x -선상에서 광강도 $I(x)$ 에 관한 일반적인 식은 다음과 같다[6,7].

$$I(x) = I_0(x) + I_f(x) \cos[\delta(x) + \phi] \quad (11)$$

식 (11)에서 $I_f(x)$ 는 프린지 패턴의 광강도를 의미한다. ϕ 는 위상차로서 등색선프린지 차수와 관계되는 $\delta(x)$ 를 구하기 위하여 0에서 2π 사이의 값을 택할 수 있다. 위상차를 $\phi=0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 로 변화시켜가며 이에 해당되는 광강도로부터 다음과 같이 광탄성 4단계 프린지 위상 이동법에 관한 다음의 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\delta(x) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (12)$$

식 (12)로부터 $\delta(x)$ 에 관한 전체적인 위상맵(phase map)을 구할 수 있다. 그러나 식 (12)의 arc tangent 함수는 $-\pi$ 에서 π 의 범위 이내이므로 위상점프가 나타난다. 이로부터 위상펼침(phase unwrap)하면 $\delta(x)$ 에 관한 위상맵을 얻을 수 있다. 이러한 위상맵은 광탄성에서는 검광관을 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 및 135° 로 회전시킬 때 프린지의 위상이동으로 나타나는 현상을 이용하므로 4단계 프린지 위상 이동법이라고도 한다.

식 (12)로부터 얻은 $\delta(x)$ 는 등색프린지 차수와 $N=\delta(x)/2\pi$ 관계이며, 이를 식 (10)에 대입하면 주 변형률 차이에 대한 값을 구할 수 있다.

3. 실험

3.1. 스트레인 게이지법 실험

본 실험에서 사용한 시편 형상은 Fig. 3과 같다. 시편재질은 알루미늄(6061-T6)이고 두께(t)는 6 mm이다. 스트레인 게이지는 Fig. 3에서와 같이 구멍의 중심으로부터 y 방향으로 5.05 mm, 7.6 mm, 10 mm 떨어진 곳에 부착하였으며 이들 위치에 부착된 스트레인 게이지를 각각 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 로 표시하였

다. 다른 하나의 스트레인 게이지는 구멍으로부터 x 방향으로 44 mm 떨어져 변형률이 균일하게 발생하는 위치에 부착하였으며, 이 게이지를 ε_4 로 나타냈다.

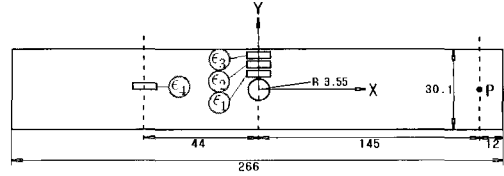


Fig. 3 Dimensions and positions of 4 gages in specimen (unit: mm)

Fig. 3과 같이 구멍을 가로지르는 선상에 부착된 3개의 스트레인 게이지 측정값($\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 및 ε_3)으로부터 아래의 식 (13)에 나타난 3개의 미지상수 A, B 와 C 를 구할 수 있다[9].

$$\varepsilon_i = A + B \left(\frac{R}{x_i} \right)^2 + C \left(\frac{R}{x_i} \right)^4 \quad (13)$$

식 (13)에서 ε_i 와 x_i 는 $i=1, 2$ 및 3의 위치에서 스트레인 값과 구멍중심으로부터 거리를 나타내고, R 은 그 위치에서의 측정된 변형률 값을 나타낸다. 세 개의 측정값으로부터 상수 A, B 와 C 가 결정되면 식 (13)으로부터 구멍 중심으로부터 거리에 따른 변형률 분포곡선을 얻을 수 있으며, 구멍에 인접한 위치에서 최대 변형률도 추정할 수 있다.

구멍주위 3곳의 변형률 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 및 ε_3 과 균일한 응력이 발생하는 위치에서 변형률 ε_4 는 상용 스트레인 계측기[10]를 이용하여 측정하였다.

3.2. 반사형 광탄성 실험

본 연구에서 사용한 반사형 광탄성 실험장치는 Fig. 4와 같다. Fig. 1과 같이 한쪽 끝단이 고정된 외팔보의 자유단에 변위를 가하였을 때 나타나는 광탄성 프린지를 캠코더로 촬영하였으며, 상용 장비에 제공된 소프트웨어(Vishay PSCalc™ 2.0)[8]를 이용하여 프린지를 측정하였다. 사용된 소프트웨어의 기본원리는 배비넷-솔레일 (Babinet-Soleil) 보상법이며, 특정위치에 등경각을 일치시킨 후 프린지 차수를 측정하는 점측정 (point measurement) 방법이다. 소프트웨어 사용 시 시편과 광탄성 피막에

대한 물성치를 입력해야 하며, 이들 값들은 Table 1 과 같다.

반사형 광탄성 실험법으로 스트레인 게이지가 를 부착된 4 지점에서 변형률을 측정하였다. 스트레인 게이지법과 반사형 광탄성 실험법으로 측정된 변형 률은 Table 2와 같다. Table 2의 측정값으로부터 식 (13)과 식 (4)를 이용하여 각각의 실험방법 경우, 응 력집중계수를 구하면 Table 3과 같다.

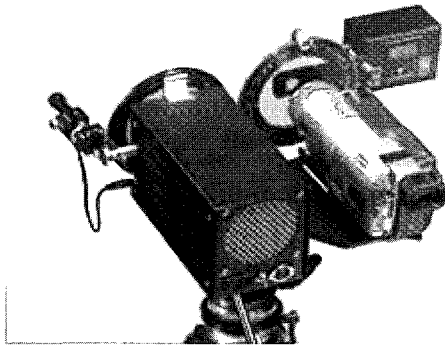


Fig. 4 PhotoStress@ LF/Z reflection polariscope system

Table 1 Properties of structure and coating materials for Vishay PSCalcTM 2.0.

Description	Specimen	Coating Material
E(Young's Modulus)	71.52 GPa	2.48 GPa
ν (Poisson's ratio)	0.346	0.38
t_i (thickness)	6 mm	1.041 mm
K_t (Optical coefficient)		0.15

Table 2 Strains of 4 points obtained by strain gage and photoelasticity

Gage	스트레인 게이지법			광탄성실험	변형률 오차(%)
	Initial	Final	Strain	Strain	
1	0	1578	1578	1624	-2.92
2	20	1430	1410	1445	-2.48
3	-363	1012	1375	1415	-2.91
4	143	1574	1431	1531	-6.98

Table 3 Stress concentration factor obtained by strain gage method and photoelastic method

응력집중계수	스트레인 게이지법	광탄성 실험법
K_t	1.490	1.502

3.3. 광탄성프린지 4단계 위상이동법

광탄성프린지 4단계 위상이동법에 관한 식 (12)를 이용하여 등색프린지 분포를 정확히 측정하기 위해 서는 측정하려는 선상에서 주변형률 방향이 같아야 한다. Fig. 1의 선 B에서는 주변형률 방향이 일정하 므로 4단계 위상이동법을 적용할 수 있다.

Fig. 4와 같은 상용 반사형 광탄성기는 광탄성 위 상이동법에 적합하지 않으므로, 검광관을 자유로이 회전시킬 수 있는 원형편광기를 Fig. 5와 같이 설치 하고 검광관을 0°, 45°, 90° 및 135° 로 회전시켜 프 린지 패턴을 CCD 카메라로 촬영하여 PC에 저장하 였다. 저장된 프린지 패턴은 Fig. 6과 같다.

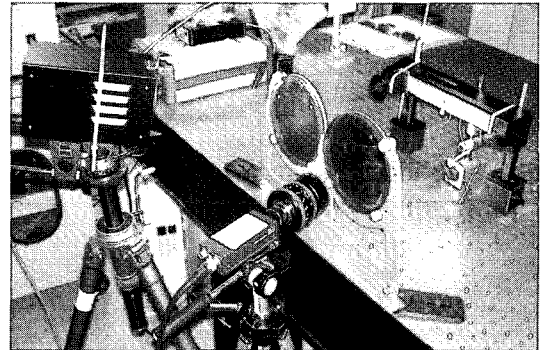


Fig. 5 Arrangement for reflective 4-step phase shifting method

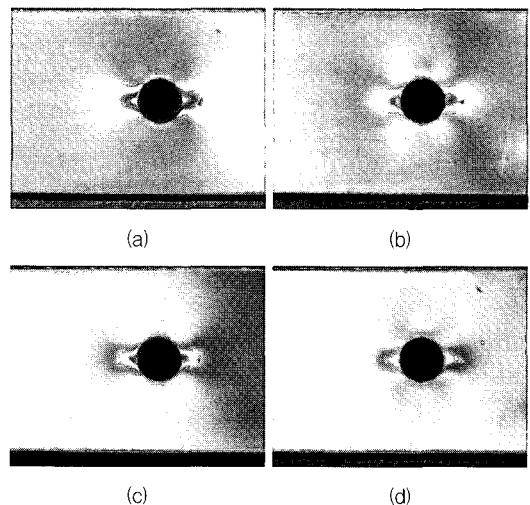


Fig. 6 Isochromatic fringe patterns obtained from circular polariscope by rotating the analyzer at (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°

저장된 4개의 프린지 패턴으로부터 식 (12)를 이용하여 계산된 위상맵은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 구멍 위에 표시된 선 A-A에서 광강도 분포는 Fig. 8과 같으며, 위상점프가 일어난다. 이 위상점프를 펼쳐 연결하여 나타내면 A-A 선상에서 연속적인 광강도 분포를 얻을 수 있다. 또 Fig. 6의 (a)와 (c)를 이용하여 프린지 증식[11]을 하면 Fig. 9와 같은 이미지를 얻을 수 있다. Fig. 9를 세선처리[12,13] 하면 Fig. 10과 같은 이미지를 얻을 수 있다. Fig. 10의 선과 A-A 선과 만나는 몇 개의 점에서 정확한 프린지 차수를 구할 수 있다. 이 몇 개의 점을 기준으로 Fig. 8을 프린지 차수로 바꾼 후 식(10)을 이용해 주변형률 차이의 분포를 구할 수 있다. 스트레인 게이지법, 광탄성 보상법에 의한 측정값, 그리고 광탄성 4단계 프린지 위상이동법으로부터 얻은 주변형률 분포는 Fig. 11과 같다.

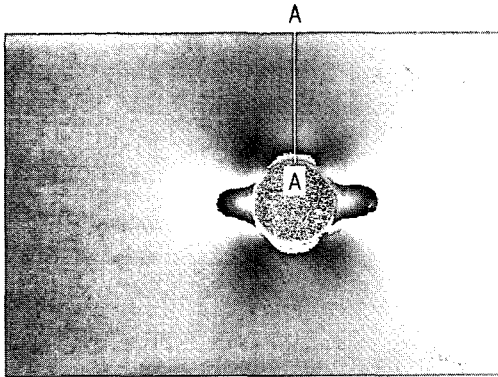


Fig. 7 Isochromatic fringe phase map calculated by Eq. (12)

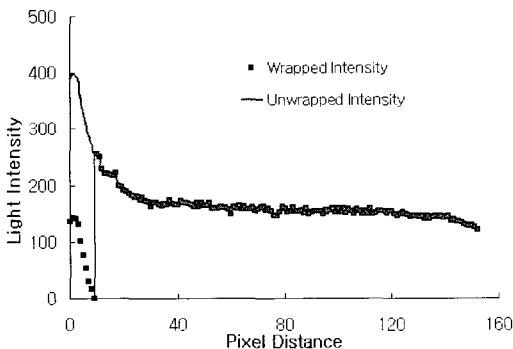


Fig. 8 Wrapped and unwrapped light intensities along line A-A of fringe phase map

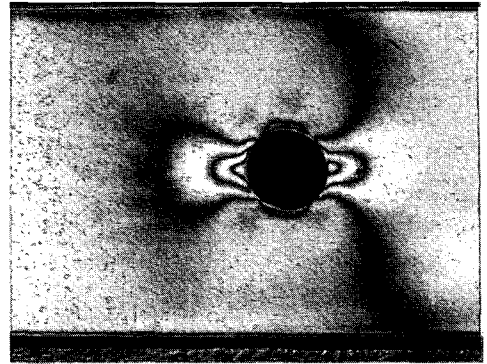


Fig. 9 Twice multiplied isochromatic fringe pattern

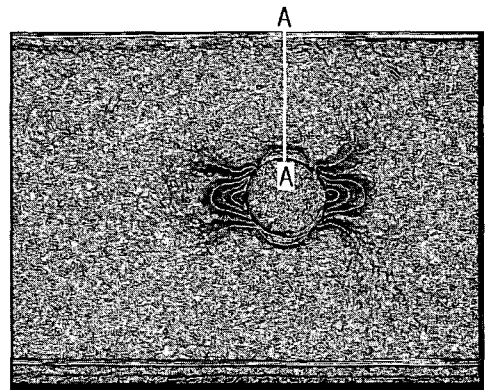


Fig. 10 Isochromatic fringe sharpened lines

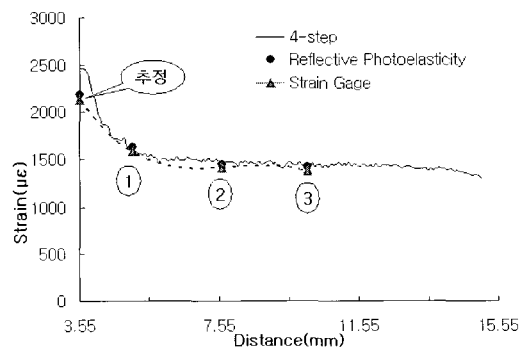


Fig. 11 Comparison of fringe orders obtained by strain-gage method and photoelasticity.

4. 결 론

본 연구에서는 스트레인 게이지법과 반사형 광탄성 실험법을 이용해 구멍 주위에서의 주변형률 분포와 응력 집중계수를 구하였다. 또한, 광탄성 4단

계 프린지 위상이동법으로 구멍주위의 선상에서 주변형률 분포를 측정하였다. 이들로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 스트레인 게이지법과 반사형 광탄성 실험법을 이용해 구멍 주위의 같은 점에서 변형률을 측정 한 결과 7% 미만으로 서로 일치하였다. 본 실험에서 스트레인 게이지법과 광탄성법으로 구한 응력집중계수는 각각 1.49와 1.50으로 나타났다.
- 2) 광탄성 4단계 프린지 위상이동법을 이용하여 구멍주위의 선상에서 주변형률 분포를 얻을 수 있었으며, 이 방법으로 구한 응력집중계수는 1.72로 다소 높게 측정되었다.

스트레인 게이지법과 광탄성 재래식 보간법은 최대변형률이 발생하는 구멍 가장자리에서 측정이 곤란하므로 구멍으로부터 떨어진 3개의 위치에서 변형률을 측정하여 외삽법으로 구멍 가장자리에서 최대변형률을 추정하였다. 그러나 프린지 위상이동법에 의한 변형률 분포는 구멍 가장자리까지 직접 구할 수 있으므로 위상이동법에 의해 구한 응력집중계수가 신뢰성이 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J. W. Dally and W. F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Co., (1991)
- [2] T. H. Baek and R. E. Rowlands, "Hybrid stress analysis of perforated composites using strain gages," *Experimental Mechanics*, Vol. 41, No. 2, pp. 194-202, (2001)
- [3] T. H. Baek and M. S. Kim, "Computer simulation of photoelastic fringe patterns for stress analysis," *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 3398/2005, pp. 214-221, Springer-Verlag GmbH, (2005)
- [4] F. Zandman, S. Redner and J. W. Dally, *Photoelastic Coating*, SESA Monograph No. 3, Society for Experimental Stress Analysis, CT, USA (1977)
- [5] T. H. Baek and M. S. Kim, "Test and evaluation of newly built multi-purpose polariscope," *Advanced Nondestructive Evaluation 1*, Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 81-86, Trans Tech Publications Ltd, ISSN: 1013-9826, Switzerland, (2006)
- [6] 백태현, 김명수, 조성호, "광탄성 4단계 위상이동법을 이용한 TV 유리패널의 등색프린지 분포 측정", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-8, (2005)
- [7] 백태현, 김환, 이춘태, "광탄성 4단계 위상 이동법과 유한요소법에 의한 크레인 축의 응력분포 비교", *비파괴검사학회지*, Vol. 24, No. 1, pp. 38-44, (2004)
- [8] *Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress® Method*, Micro-Measurements Group Tech Note, TN-702-2
- [9] *Stress and Strain Concentration*, E-104, Measurements Group, Inc. NC, USA, (1982)
- [10] *Model P3, Strain Indicator and Recorder*, Vishay Micro-Measurements, NC, USA
- [11] 백태현, 이재춘, "광탄성 프린지 해석을 위한 영상처리 기법 개발", *대한기계학회 논문집*, 제 18권, 제10호, pp. 2577-2584, (1994)
- [12] T. H. Baek and C. P. Burger, "Accuracy improvement technique for measuring stress intensity factors in photoelastic experiment," *Key Engineering Materials*, Vols. 51-52, pp. 63-68, (1991)
- [13] 백태현, "광탄성 등색프린지의 세션처리를 위한 디지털 영상처리 기법", *한국정밀공학회지*, 제10권, 제3호, pp. 220-230, (1993)