

광탄성 등색프린지의 세선처리를 위한 디지털 영상처리 기법

백 태 현*

Digital Image Processing Technique for Photoelastic Isochromatic Fringe Sharpening

Tae-Hyun Baek*

ABSTRACT

Photoelastic isochromatic fringes related to the difference of principal stresses have some bandwidth whose light intensities are not constant and asymmetrical in experimental images. Hence, it is difficult to measure fringe order accurately at a data point by visual observation. In this study, a method of fringe sharpening, which can extract sharpened lines from both full- and half-order fringes by digital image processing, is developed. To test the method, various simple photoelastic fringe patterns are simulated and their images are processed to yield sharpened lines. The method is then applied to general problems such as images of a circular disk compressed by diametrically concentrated loads and a circular cylinder subject to internal pressure. The procedure is proved to be capable of extracting sharpened lines accurately from photoelastic isochromatic fringes.

Key Words : Digital Image Processing (디지털 영상처리), Photoelasticity (광탄성), Isochromatic Fringe (등색프린지), Fringe Sharpening (프린지 세선처리), Photoelastic Fringe (광탄성 프린지), Gradient Vector (그레이디언트 벡터)

1. 서 론

광탄성 기법(Photoelasticity)은 역학에서 응력 또는 변형율을 해석하기 위한 실험방법으로서 구조 및 기계 부품의 복합적인 하중 상태하에서 접촉응력(Contact Stress), 응력집중(Stress Concentration), 응력분포 상태를 고려한 최적설계 및 균열부의 응력강도계수(Stress Intensity Factor) 해석등에 광범위하게 적용되고 있으며, 특히 전체응력장(Whole Stress Field)을 가시적으로 명확히 판별할 수 있는 장점이 있다(1-2). 그러나 광탄성 모델에서 임의점으로부터 응력과 관련된

데이터를 획득하기 위해서는 광탄성 영상(Photoelastic Image)의 등색(Isochromatic) 선과 등복각(Isoclinic) 선으로부터 타디보정법(Tardy Compensation) (3, pp. 456 ~ 457)과 같은 방법을 이용하여야 하며, 전체의 응력장을 해석하기 위해서는 한점 한점에 대해서 개별적으로 보정하고 측정해야 한다. 특히 광탄성 영상의 등색 또는 등복각선은 광강도(Light Intensity)가 서로 다른 유한 두께의 프린지 밴드(Fringe Band)를 이루고 있기 때문에, 프린지와 응력의 상관 관계로부터 최대 또는 최소의 광강도 위치를 측정하여 응력으로 변환하고자 할 때 프린지 밴드가 불분명하면 위치좌표에 관한 오차를 배제

* 군산대학교 기계설계학과(정회원)

할 수 없다. 또한 3차원 광탄성 실험시 응력동결 (Stress-frozen)된 시편에서 분리시킨 두께가 얇은 슬라이스(Slice)에서와 같이 프린지차수(Fringe Order)가 낮은 경우에는 프린지 밴드의 폭이 넓기 때문에 데이터 획득이 난이하다.

이러한 이유로 광탄성 영상으로부터 정확한 데이터를 획득하기 위하여 빔 스플리터(Beam Splitter) 및 부분 반사경(Partial Mirror) 등의 광학장비 배열(4-5)과 사진 촬영기법(6-7) 등을 응용하여 프린지의 세선화(Fringe Sharpening)와 프린지 증식(Fringe Multiplication) 기법을 개발하였다.

최근에 디지털컴퓨터의 발달로 영상처리 시스템을 이용하여 프린지를 해석하는 기법이 개발되고 있다. Müller와 Saackel⁽⁸⁾은 TV Scanning 카메라와 영상처리 시스템을 이용하여 광탄성 영상을 디지털화(Digitize)시킨 후 경계명암치(Threshold Grey Value)를 적용하여 흑·백 즉, 이원화명암(Binary Grey Level)으로 변환시켜 골격선(Skeleton Line) 탐색방법으로 세선처리를 하였다. Seguchi, Tomita 등⁽⁹⁾도 광탄성 프린지의 해석을 위하여 영상처리를 이용한 컴퓨터원용 프린지 패턴 해석장치를 개발하였으며, 프린지를 이원화영상으로 변환 후 기하학적 중심선을 계산하였다. Chen 및 Taylor⁽¹⁰⁾는 광탄성, 모페이(Moiré), 홀로그래픽 및 스펙클간섭(Holographic and Speckle Interferometry) 등의 광역학(Photomechanics)에 나타나는 프린지 특성을 디지털 영상처리 시스템을 이용하여 종합적으로 분석하였으며, 광탄성에 관해서는 세선처리를 하기 위하여 등색프린지의 영상으로부터 적합한 경계명암치를 선택하여 이원화 영상으로 처리 후 암흑프린지띠의 중심선을 취하였다. Yao⁽¹¹⁾는 디지털 영상처리 시스템을 이용하여 광탄성 등복각선에 대한 해석기법을 개발하였고, 프린지폭의 기하학적 중심선을 취하여 세선으로 처리하였다. 또한, Ramesh, Ganesan 등⁽¹²⁾도 최소광강도 기준(Minimum Intensity Criterion) 방법을 이용하여 응력집중 부위에서 프린지 밀도가 높을 때 프린지의 골격화(Fringe Skeleton)가 개선되도록 하였다.

광탄성 프린지의 세선처리를 하기 위하여, 위에서 열거한 방법(8-12)은 공통적으로 경계명암치를 이용하여 이원화영상으로 변환시킨 후 암흑프린지 폭의 기하학적 중심선을 계산하여 세선으로 간주하였다. 그러나 광탄성 등색프린지가 비주기 또는 비대칭(Nonperiodic or Asymmetric)일 경우에 최대 및 최소 광강도 위치는

이원화영상 프린지의 기하학적 중심선과 일치되지 않는 단점이 있다.

본 연구에서는 등색프린지의 명암도로부터 그레이디언트 벡터(Gradient Vector) 특성을 이용하여 최대 및 최소 광강도 선을 직접 계산하는 세선처리 방법을 제시하였으며, 이 방법에서는 경계명암치를 이용하여 이원화 영상으로 변환시키는 절차가 생략된다. 기존의 방법은 정차수 프린지(Full-order Fringe) 또는 반차수 프린지(Half-order Fringe)중 일부에 한하여 세선처리가 가능하나, 본 연구의 세선처리 방법을 이용하면 정차수 프린지 및 반차수 프린지 위치를 동시에 정확히 추출해 낼 수 있는 장점이 있으므로 2배의 프린지 증식효과가 있게 된다.

본 논문에서는 광탄성 프린지의 특성을 모델링하여 세선처리 알고리즘을 시험하였으며 영상처리시스템을 이용하여 프린지모델을 영상화 하였고, 이에 대한 세선처리 결과를 분석하였다. 또한, 세선처리 알고리즘을 일반적인 광탄성에 적용하기 위하여 직경상 압축하중을 받는 디스크와 내압을 받는 실린더의 이론적인 프린지를 영상화 하였고, 세선화된 프린지 결과도 함께 도식화 하였다. 마지막으로 세선처리 프로그램을 실제로 압축하중을 받는 디스크의 광탄성 프린지에 적용하여 이론적인 프린지와 세선처리된 영상에서 측정된 프린지 차수와 비교하였다.

2. 광탄성 이론

에폭시(Epoxy) 또는 폴리카보네이트(Polycarbonate) 등과 같이 일종의 투명한 비결정(Noncrystalline) 재료는 응력을 받지 않은 상태에서는 광학적으로 등방성(Isotropic)이나, 응력을 받게되면 결정체(Crystal)와 유사하게 이방성(Anisotropic)으로 변화된다. 이러한 현상을 이중굴절(Double Refraction) 또는 복굴절(Birefringence)이라 하며, 하중이 가해진 상태에서는 복굴절이 그대로 유지되지만 하중이 제거되면 복굴절 현상도 사라지게 된다. 광탄성은 투명한 재료가 응력이나 변형율의 변화되는 정도에 따라 발생하는 복굴절 현상을 이용한다.

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. 복굴절 현상에 의한 응력-광 법칙(Stress-

optic Law)에 따르면 주응력 차이($\sigma_1 - \sigma_2$)는 다음의 식과 같은 관계(8, pp. 411)를 갖는다.

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

위의 식에서 N 은 등색프린지 차수(Isochromatic Fringe Order), f_o 는 재료의 프린지 상수(Material Fringe Constant), t 는 모델의 두께를 의미한다.

원형편광기(Circular Polariscope)에서 두개의 4분파판(Quarter-wave Plate)을 편광축과 45° 교차시켰을 때 등색프린지가 나타나며, 암시야 배열(Dark Field Arrangement) 상태에서 광강도와 프린지 차수의 관계는

$$I = K \sin^2(N\pi) \quad (2)$$

여기서 K 는 광파장의 진폭(Amplitude)이다. 광강도 I 는 프린지 차수 $N=0, 1, 2, \dots$ 와 같이 정수일 때는 0이 되고 암흑프린지(Dark Fringe)가 된다. 또한 $N=1/2, 3/2, 5/2, \dots$ 와 같은 경우에 광강도는 K 가 되며, 백색프린지(Light Fringe)가 된다. 전자의 경우를 정차수프린지(Full-order Fringe)라 하며, 후자의 경우를 반차수프린지(Half-order Fringe)라 한다. 따라서 광탄성 영상으로부터 임의점이 프린지 차수 N 을 측정하여 식(1)에 대입하면 해당되는 점에서 주응력의 차($\sigma_1 - \sigma_2$) 또는 평면 최대전단응력(In-plane Maximum Shear Stress)을 구할 수 있다. 프린지 차수가 일정한 궤도에서는 주응력의 차 또는 평면 최대전단응력이 일정하다.

광탄성 프린지의 광강도 I 는 식(2)에서 보인 바와 같이 프린지 차수 N 에 관한 함수이며, N 은 다시 식(1)에서와 같이 주응력 성분 σ_1 및 σ_2 에 관계된다. 평면응력 상태에서의 주응력은 직각 좌표계의 응력성분을 이용하여 다음의 식으로 나타낸다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

식(3)에서 σ_x 및 σ_y 는 x, y 방향의 응력성분이며, τ_{xy} 는 전단응력 성분을 의미한다. 따라서 식(2)의 광강도 I 는 여러 응력성분의 복합적인 함수관계에 의해서 나타나므로 비선형이며, 또한 프린지의 광강도가 비대칭일 수 있다.

3. 광탄성 프린지의 세선처리

1. 프린지의 세선처리 이론(Theory of Fringe Sharpening)

암시야 배열로된 원형 편광기에서 프린지와 광강도 사이의 관계는 식(2)와 같으며, 실제의 광탄성에서는 프린지 위치에 따라 최대 및 최소의 광강도값이 일정하지 않다. 광탄성 영상에서 광강도가 국소 극값(Local Extremum)일 경우에 정차수 프린지나 또는 반차수 프린지가 된다. 즉, 국소 최소값(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. Fig. 1은 직경상 반대방향의 양지점에서 압축하중을 받는 디스크의 광탄성 영상이며, 그래프는 디스크 A-A 선상에 있는 프린지의 광강도를 나타내고 있다. 이 그래프에서 보인 바와 같이 광탄성 영상에서 광강도는 여러개의 국소 극값이 있으며, 각각은 정차수 또는 반차수 프린지를 의미한다.

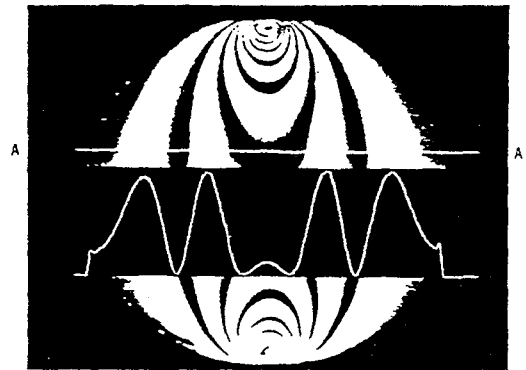


Fig. 1 A photoelastic isochromatic image of a disk in diametral compression with a graph of the light intensities along a line A-A just above the horizontal center line superimposed.

정차수 또는 반차수 프린지를 탐색하기 위하여 일반적인 경우를 고려해보기로 하자. 광강도 분포를 3차원 표면도표(3-Dimensional Surface Map)로 나타내면 극값은 능선(Ridge)이나 골(Valley)로 나타난다. 그러나 동일한 능선이나 골에 해당되는 광강도도 실제로는 일정하지 않기 때문에 경계명암치(Threshold Grey Value)를 적용할 경우 데이터 획득에 어려움이 있다.

광강도에 대한 3차원 표면도표로부터 세선처리를 하기 위하여 그레이디언트 벡터특성을 이용하였다. 그레이디언트 벡터는 언제나 상향성(Uphill)이며, 가장 급격히 변화되는 방향을 향한다. 따라서, Fig. 2에서와 같이 능

선이나 골에서는 그레이디언트 벡터가 언제나 서로 반대 방향이며, 그레이디언트 방향(Gradient Direction)의 변화량(Measure of Change) ⁽¹³⁾을 계산하면 능선이나 골의 위치를 쉽게 식별할 수 있다.

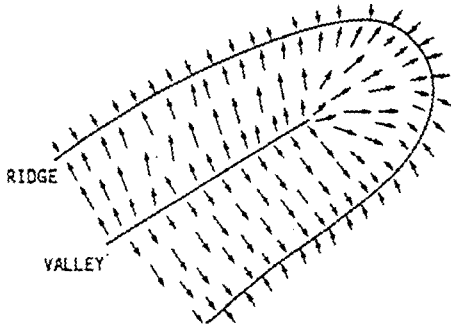


Fig.2 The gradient direction changes abruptly across a ridge and a vally.

많은 영상 데이터 점으로부터 그레이디언트 방향을 한점 한점에 대해서 계산하는 것은 용이한 일이 아니며, 다음과 같이 그레이디언트 각의 사인(Sine) 및 코사인(Cosine)을 계산하면 훨씬 편리하다.

$$\sin \theta = \frac{\nabla_y}{\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \quad (4-1)$$

$$\cos \theta = \frac{\nabla_x}{\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \quad (4-2)$$

위의 식에서

θ : 그레이디언트 방향각도
(Gradient Direction Angle)

∇_x : 그레이디언트 벡터의 x 방향성분

∇_y : 그레이디언트 벡터의 y 방향성분

식(4-1) 및 (4-2)의 값은 그레이디언트 벡터와 동일한 방향의 단위벡터(Unit Vector) 성분이며, 이와같은 단위벡터의 합의 크기를 방향상사값(Measure of Directional Similarity) ⁽¹³⁾으로 나타낼 수 있다. 예를 들면, Fig. 3(a)와 같이 거의 동일한 방향의 벡터값은 약 4단위 벡터의 합과 같으나 Fig. 3(b)와 같이 이들 중 하나의 벡터라도 반대 반향일 경우에는 벡터길이가 전자에 비해 거의 절반으로 감소하게 된다. 후자는 능선이나 골에서 벡터특성을 의미한다.

위의 관계를 다음과 같이 요약하여 정리할 수 있다. N 의 동일한 방향의 벡터합은 벡터수(Number of



Fig.3 The sum of unit vectors reflect their similarity of direction.

Vector)의 합과 같게 되며, 방향이 다른 벡터가 있을 경우 서로 상쇄된다. 만일 벡터합을 벡터수의 모든 합으로 나누면 0에서 1 사이에 있으며, 이 값을 방향상사값으로 정의한다. 또한 1에서 방향상사값을 빼값을 유효방향 변화량(Effective Measure of Change in Direction) ⁽¹³⁾으로 정의하고, 이를 방향의 차(Difference in Direction)를 의미하는 D 로 나타낸다. 즉,

$$D = 1 - S \quad (5)$$

위의 식에서 S 는 방향상사값을 의미하며, 또한 D 의 범위도 역시 0과 1 사이에 있다. 방향상사값 S 의 수학적 의미는

$$S = \left[\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\nabla_x}{\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \right]^2 + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\nabla_y}{\sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

위의 식에서 N 은 벡터수를 나타낸다. 식(6)에 대한 계산이 작은 영역의 마스크(Mask)내에서 수행된다고 가정하면 다음과 같은 과정에 의하여 단순화시킬 수 있다. 식(6)으로부터

$$S \approx \left[\left[\frac{\sum \nabla_x}{\sum \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \right]^2 + \left[\frac{\sum \nabla_y}{\sum \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \right]^2 \right]^{1/2} = \frac{\sqrt{(\sum \nabla_x^2) + (\sum \nabla_y^2)}}{\sum \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}} \quad (7)$$

또한 다음과 같은 사-구간 거리(City-block Distance) 관계식 ⁽¹⁴⁾을 적용하면 계산을 더욱 단순화시킬 수 있다.

$$\sqrt{x^2 + y^2} \approx |x| + |y| \quad (8)$$

식(8)의 관계를 식(7)에 적용하면

$$S \approx \frac{|\sum \nabla_x| + |\sum \nabla_y|}{\sum |\nabla_x| + \sum |\nabla_y|} \quad (9)$$

또한 식(9)의 관계를 식(5)에 대입하면

$$D = 1 - \frac{|\sum \nabla_x| + |\sum \nabla_y|}{\sum |\nabla_x| + \sum |\nabla_y|} \quad (10)$$

위의 식(10)을 이용하여 적은 영역의 마스크로부터 그레이디언트 방향의 변화량을 쉽게 계산할 수 있다. 식(10)에서 D는 0에서 1 사이의 범위에 있다. 만일 D=0일 경우 방향변화가 없으며, 이는 광강도가 균일한 방향으로 변화됨을 의미한다. 또한 D=1일 경우 방향변화가 최대이며, 광강도 표면도표에서 능선이나 골에 해당된다.

2. 프린지 모델링 및 세션처리 프로그램

프린지와 광강도의 관계식은 식(2)와 같으며 응력상태에 따라 여러가지 형태로 변화될 수 있다. 식(2)와 같이 이상적인 조건으로부터 일반적으로 나타나는 비선형 및 비대칭을 포함한 여러 형태의 프린지에 대한 광강도 식을 다음의 식들과 같이 가정하여 모델링하였다.

$$I_{10} = 255 \sin^2(N\pi) \quad (11-1)$$

$$I_{30} = (-30N + 270) \sin^2(f(N)\pi) \quad (11-2)$$

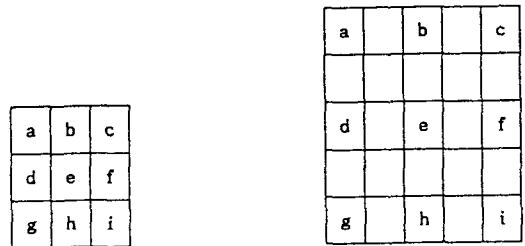
단, 식(11-2)에서

$$f(N) = 1.38333 N - 0.92778 N^2 + 0.33333 N^3 - 0.02222 N^4$$

세션처리 프로그램은 식(10)을 이용하였다. 명암도 (Grey value)가 일반적인 영상처리 시스템에서는 8비트, 즉 $2^8=256$ 의 범위를 사용하고 있으므로 디지털이화된 프린지(Digitized Fringe)의 광강도 범위는 0에서 255 사이에 있다. 따라서 식(10)의 D 값에 255를 곱한값을 다음과 같이 T로 나타냈다.

$$T = 255 D = 255 \left[1 - \frac{|\sum \nabla_x| + |\sum \nabla_y|}{\sum |\nabla_x| + \sum |\nabla_y|} \right] \quad (12)$$

위의 식(12)에서 T는 세션처리된 광강도를 의미한다. T 값을 계산하기 위해서는 광강도에 대한 데이터로부터 각각의 그레이디언트 값을 계산하여야 하며, 위에서 언급한 바와 같이 적은 영역의 마스크내에서 일차적으로 계산한 후 마스크의 배열을 순차적으로 이동시켜 가면서 전체를 계산하였다. 광탄성 프린지에서 명암도의 주파수 (Frequency)가 서로 다른 점을 감안하여 마스크의 크기(Mask Size)에 대한 T 값의 영향을 조사할 수 있도록 Fig.4와 같은 2가지 형태의 마스크(Mask)로 시험하였다.



(a) Mask 1

(b) Mask 2

Fig. 4 Masks for computing a two-dimensional, discrete gradient.

Fig. 4의 Mask 1 및 Mask 2는 각각 3×3 , 5×5 픽셀배열 (Pixel Array)로 되어 있다. 각 배열요소의 광강도값으로부터 다음과 같은 식을 이용하여 그레이디언트 성분을 계산하였다.

$$\nabla_{x1} = I_b - I_d \quad \nabla_{y1} = I_a - I_e \quad (13-1)$$

$$\nabla_{x2} = I_c - I_e \quad \nabla_{y2} = I_b - I_f \quad (13-2)$$

$$\nabla_{x3} = I_e - I_g \quad \nabla_{y3} = I_d - I_h \quad (13-3)$$

$$\nabla_{x4} = I_f - I_h \quad \nabla_{y4} = I_e - I_i \quad (13-4)$$

식(13)에서 I는 배열요소의 광강도를 의미하며, 첨자는 Fig. 4의 Mask에 표시된 요소의 위치를 나타낸다. 위의 식과 같이 계산된 각각의 그레이디언트 값을 식(12)에 대입하여 T 값을 계산한다. 이와같이 프린지 광강도 데이터를 세션처리 하면, 광강도가 최대인 능선이나 또는 최소인 골에서 T 값은 255에 근접하게 된다.

위 관계를 수치적으로 확인할 수 있도록 프린지가 등간격이고, 광강도도 가장 이상적인 식(11-1)을 이용하였다. 식(11-1)에 의해 계산된 프린지의 광강도 값

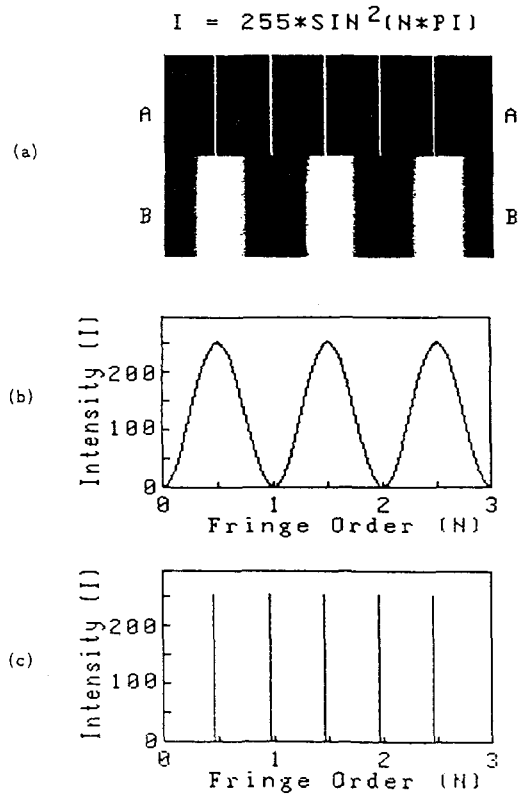
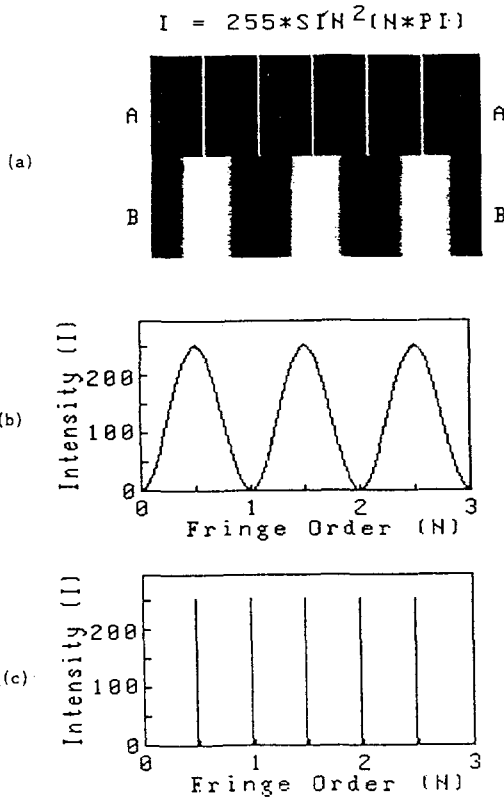


Fig.7-1(a) Photoelastic isochromatic fringe patterns simulated by Eq. (11-1) and fringe-sharpened image processed by Mask 1 of Fig.4(a)
 (b) Light intensities along a line B-B
 (c) Light intensities along a line A-A

Fig.7-2(a) Photoelastic isochromatic fringe patterns simulated by Eq. (11-1) and fringe-sharpened image processed by Mask 2 of Fig.4(b)
 (b) Light intensities along a line B-B
 (c) Light intensities along a line A-A

세선처리가 되지 않았다. 그러나 Mask 2를 사용할 경우에는 Fig.8-2에서와 같이 모든 프린지 위치에서 세선으로 처리되었다.

본 연구에서 개발된 세선처리 알고리즘을 시험하기 위하여 일반적인 광탄성 프린지를 컴퓨터로 시뮬레이션 하여 영상화 하였다. 프린지의 영상화는 다음의 절차에 따랐다. 즉, 기하학적 형상 및 하중조건에 따라 각지점의 응력성분을 계산하고 이를 이용하여 식(3)으로 주응력을 계산한다. 다음에 주응력의 차이값을 식(1)에 대입하여 프린지 차수를 계산한 후, 식(2)에 대입하면 각지점의 프린지에 해당되는 광강도를 얻을 수 있다. 이상과 같은 절차에 따라 다음의 두가지 경우를 시험하였다.

첫째로 직경의 반대방향에서 압축하중을 받는 원형디스크에 대한 광탄성 프린지를 영상처리 시스템에서 영상화한 후, 세선처리 하였다. Fig.9(a)는 디스크의 응력 성분(15, pp.126)을 이용하여 영상화시킨 광탄성 프린지이고 Fig.9(b)는 디스크의 상반부를 세선처리한 영상이며, 또한 Fig.9(c)는 광탄성 프린지의 세선처리가 완료된 디스크 영상을 나타내고 있다. 두번째로 Fig.10에서 보인 바와 같이 내압을 받는 두꺼운 벽두께의 실린더의 응력상태를 광탄성 영상으로 시뮬레이션한 후에 프린지를 세선처리하였다. Fig.10의 그래프는 상반부의 세선처리 영상의 광강도와 수평 교차선상에서 세선처리되기 이전의 프린지에 대한 광강도를 나타낸다. 위의 모든 경우에 Mask 2를 사용하였으며, 광탄성 프린지는 정차

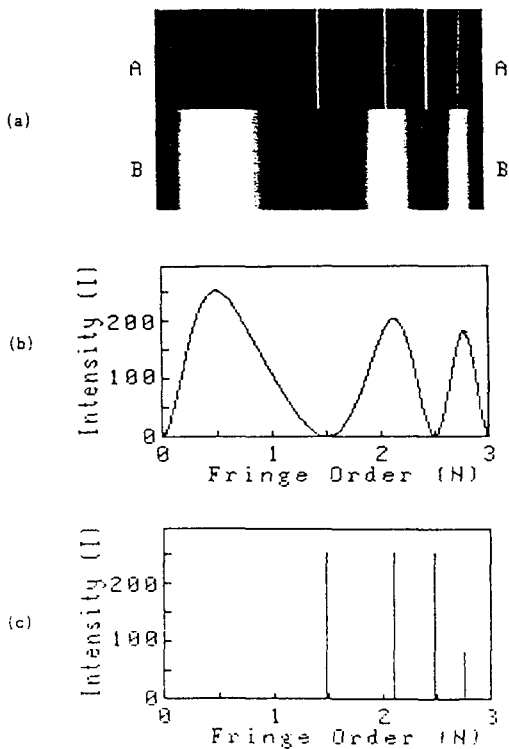


Fig. 8-1(a) Photoelastic isochromatic fringe patterns simulated by Eq. (11-2) and fringe-sharpened image processed by Mask 1 of Fig.4(a)
 Fig.8-1(b) Light intensities along a line B-B
 Fig.8-1(c) Light intensities along a line A-A

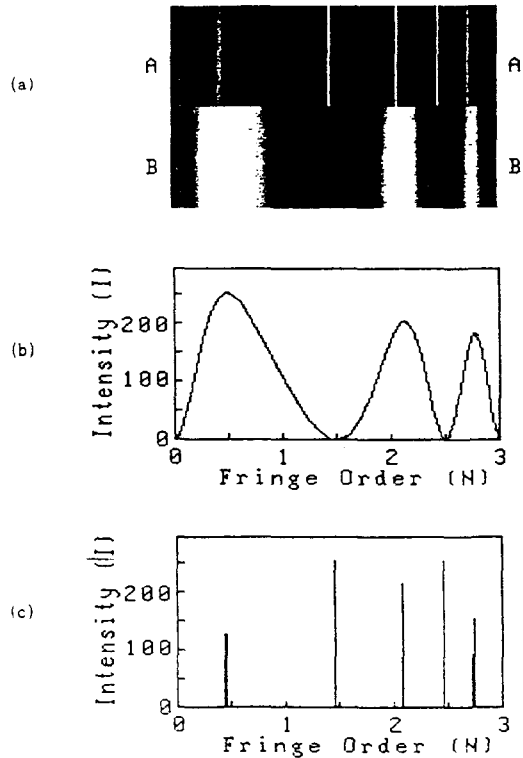


Fig. 8-2(a) Photoelastic isochromatic fringe patterns simulated by Eq. (11-2) and fringe-sharpened image processed by Mask 2 of Fig.4(b)
 Fig.8-2(b) Light intensities along a line B-B
 Fig.8-2(c) Light intensities along a line A-A

수나 반차수의 모든 프린지 위치에서 세선으로 처리되었음을 확인할 수 있었다. 특이한 사항으로 Fig. 10의 우측 하단에 나타난 프린지의 광강도에 대한 그래프에서 코인 바와 같이 광탄성 프린지는 비대칭일 수 있다.

4. 실험

본 연구의 세선처리 프로그램을 실제로 압축하중을 받는 디스크의 광탄성 영상에 적용하였다. Fig. 11은 에폭시 수지(Epoxy Resin)의 재질로서 직경은 4.52cm이며, 응력동결점(Stress Freezing Point)에서 재료의 프린지 상수 $f_o = 0.3517 \text{ kN/m}^{(13)}$ 인 디스크가 직경상에서 36.15 N의 하중을 받을 때 암시야 배열의 원형편광기를 통하여 나타난 등색선프린지 사진이다.

Fig. 12는 세선처리 후의 영상을 나타내고 있으며, Fig. 9와 비교하면 실제영상에서는 노이즈(Noise) 등의 영향으로 세선처리 상태가 다소 균일하지 않으나 정차수 및 반차수 프린지에 대한 측정이 충분히 가능하였다. Fig. 13은 x-축에서의 이론적인 프린지 차수와 세선처리 영상으로부터 측정된 프린지 차수를 나타내고 있다. 이론적인 프린지 차수는 아래의 식(15, pp. 136)을 이용하여 계산하였다.

$$N = \frac{4}{\pi} \frac{PR}{f_o} \left\{ \frac{R^2 - (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + R^2)} \right\} \quad (14)$$

식(14)에서

P = 하중

R = 디스크 반경

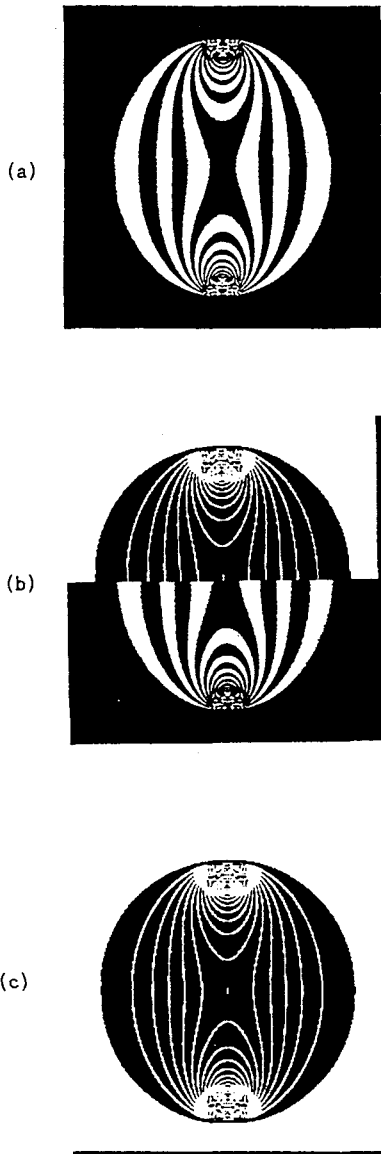


Fig. 9 Photoelastic fringe patterns of a disk compressed by two diametrically opposite concentrated loads.

- (a) Computer simulated photoelastic isochromatic patterns of the disk.
- (b) Fringe-sharpened lines extracted from the fringes on the upper half of the disk
- (c) Fringe-sharpened image of the disk of Fig. 9(a).

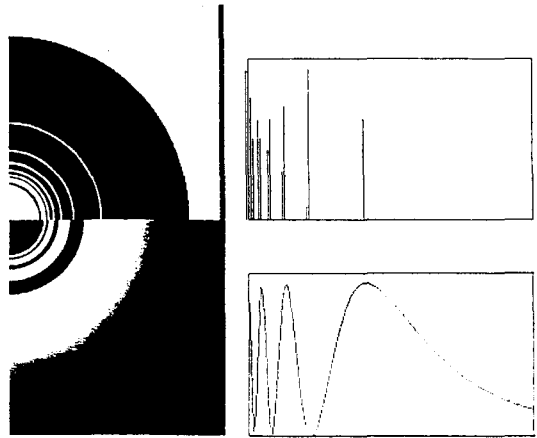


Fig. 10 Photoelastic fringe patterns and fringe-sharpened lines of a circular cylinder subject to internal pressure with graphs of the light intensities along horizontal line A-A of the image of fringe-sharpened lines and fringe patterns.

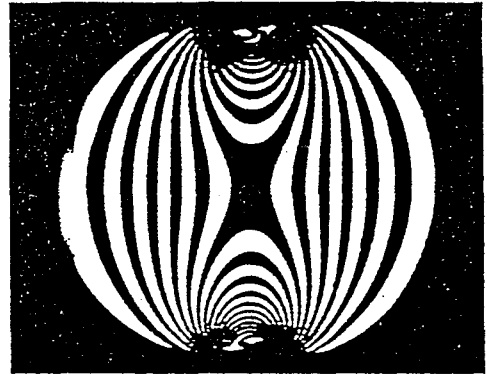


Fig. 11 Isochromatic fringe patterns of a stress-frozen disk in diametral compression.

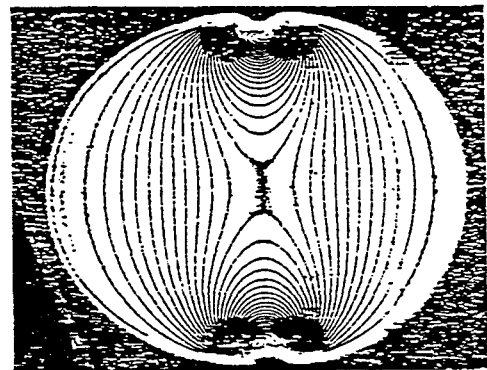


Fig. 12 Fringe-sharpened lines extracted from the fringes of Fig. 11.

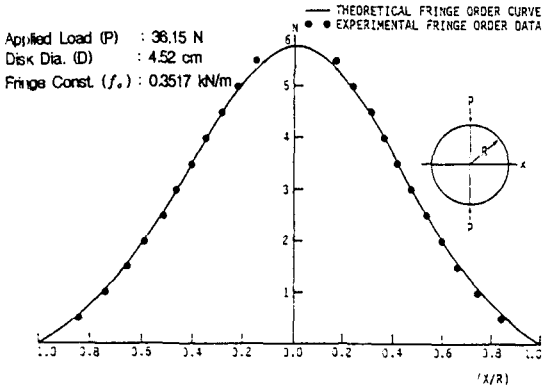


Fig.13 Theoretical fringe-order curve and experimental data for points along x-axis.

- x = 디스크 중심으로부터 하중축과 직교되는 수평거리
- y = 디스크 중심으로부터 하중축 방향의 수직거리

Fig. 13에서 보인 바와 같이 이론적인 프린지 차수와 세션처리 후 실험에 의해서 측정된 프린지 차수가 서로 잘 일치됨이 확인되었다.

4. 결론 및 토의사항

본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 식(11-1) 및 (11-2)와 같은 프린지 모델에 대하여 세션처리 알고리즘을 적용한 결과, 세션처리는 프린지의 광강도 주기 및 진폭 또는 그레이디언트 성분을 계산하는 Mask의 종류에 관계되며, Mask 2를 사용할 경우 정차수 및 반차수 프린지 위치에서 모두 세션처리가 되었다.
- (2) 직경상 반대방향에서 압축하중을 받는 디스크와 내압을 받는 실린더의 응력성분에 관한 식을 이용하여 광탄성 등색프린지를 컴퓨터로 시뮬레이션 하였으며, 이와같은 일반적인 프린지의 경우에도 정차수 및 반차수의 모든 프린지가 세션처리 되었다. 특히 내압을 받는 실린더에서 광탄성 프린지의 광강도 분포가 비대칭으로 관찰되었다. 이 경우에 프린지를 세션으로 처리하기 위하여 이원화된 영상으로부터 프린지의 중앙선을 세션으로 간주할 경우,

정확히 결정될 수 있으므로 광탄성 응력해석시에 정밀도를 향상시킬 수 있다.

- (3) 세션처리 프로그램을 압축하중을 받는 실제의 광탄성 영상에 적용하였다. 실제의 영상에서는 노이즈(Noise) 등의 영향으로 세션처리 상태가 다소 불균일하나, 프린지 위치의 식별이 충분히 가능하였으며, 실험에 의해 측정된 프린지 차수는 이론적인 프린지 차수와 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥 재단의 지방대육성 중점과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 제위께 감사합니다. 특히 본 연구가 기간이내에 완료될 수 있도록 알고리즘에 대해 많은 조언을 하여 주신 군산대학의 김명수 교수에게 감사드리며, 프로그램작성과 자료정리에 노고가 많았던 범성훈군과 이청천군에게도 사의를 표합니다.

참고문헌

1. A. S. Kobayashi, Handbook on Experimental Mechanics, Prentic-Hall Inc., 1987.
2. A. Kuske and G. Robertson, Photoelastic Stress Analysis, John Wiley and Sons Inc., 1974.
3. J. W. Dally and W. F. Riley, Experimental Stress Analysis, McGraw-Hill Book Company, 1978.
4. D. Post, "Isochromatic Fringe Sharpening and Fringe Multiplication in Protoelasticity", Proceedings of SESA, Vol. 12, No. 2 (1955), pp.143~156.
5. D. Post, "Fringe Multiplication in Three-dimensional Photoelasticity", Journal of Strain Analysis, Vol. 1, No. 5 (1956), pp.380~388.
6. J. W. Dally and F. J. Ahimaz, "Photographic Method to Sharpen and Double Isochromatic Fringes", Experimental Mechanics, Vol. 2, No. 6 (1962), pp.170~175.

7. N. K. Das Talkuder and P. Ghosh, "On Fringe Multiplication by Super-imposition of Negatives", Experimental Mechanics, Vol. 15, No. 6 (1975), pp.237~239.
8. R. K. Müller and L. R. Saackel, "Complete Automatic Analysis of Photoelastic Fringes", Experimental Mechanics, Vol. 19, No. 7 (1979), pp.245~251.
9. Y. Seguchi, Y. Tomita and M. Watanabae, "Computer-aided Fringe-pattern Analyzer-A Case of Photoelastic Fringe", Experimental Mechanics, Vol. 19, No. 10 (1979), pp.362~370.
10. T. Y. Chen and C. E. Taylor, "Computerized Fringe Analysis in Photomechanics", Experimental Mechanics, Vol. 29, (1989. 9), pp.322~329.
11. J. Y. Yao, "Digital Image Processing and Isoclinics", Experimental Mechanics, (1990. 9), pp.264~269.
12. K. Ramesh, V. R. Ganesan and S. K. Mullick, "Digital Image Processing of Photoelastic Fringes-A New Approach", Experimental Techniques (1990. 9/10), pp.41~46.
13. T. H. Baek, B. H. Koerner and C. P. Burger, "A Digital Procedure for Photoelastic Fringe Sharpening", Proceedings of the VI international Congress on Experimental Mechanics, The Society for Experimental Mechanics, Inc., Vol. 2 (1988), pp.925~930.
14. R. C. Gonzalez and P. Wintz, Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, 1987, pp.176~179.
15. Max M. Frocht, Photoelasticity, John Wiley and Sons, Inc., 1957.

학회광고

1993年度 본學會 春季學術大會를 後援해 주신 後援社는 아래와 같습니다.

大嶺紙化 株式會社

소재지: (우) 703-110 대구시 서구 아현동 42-11

TEL : (053) 559 - 8871 - 3, FAX : (053) 557 - 9779

설립년도: 1962년 3월

사장: 吳 進

생산제품: 化纖絲 捲置用 紙管

주거리업체: 코오롱(주), 삼양사, 동양폴리에스터, 동양나일론, 제일합섬등 다수업체

韓國OSG 株式會社

소재지: (우) 704-170 대구시 달서구 갈산동 100-68

설립년도: 1972년 6월

사장: 鄭 台 一

생산제품: 탭, 초경탭, 엔드밀, 나사전조 다이슨 등 각종 절삭공

주거리업체: 현대자동차, 기아자동차, 삼성전자, 대우중공업, 현대정공등 다수업체