

제 8 장 광학/광탄성(Photoelasticity)

1. 목 적

물체에 힘을 가하면 그 물체는 응력(stress)을 발생하게 되며, 상응하는 물체의 변형이 일어난다. 따라서, 물체의 변형 정도를 알려면 응력의 방향과 크기를 알아야 할 필요가 있다. 본 장에서는 응력 분포(Stress Distribution)를 알기 위해 쓰이는 광탄성 시험(Photoelastic Method)에 대해 공부한다. 특히, 하중이 작용되고 있는 물체의 응력 분포와 응력 집중 정도등을 알아본다.

2. 예습부분

- (1) Mechanical Measurements(4th Ed.) T. G. Beckwith & R. D. Marangoni, pp.376-392, 446-452
- (2) Experimental Stress Analysis, J. W. Dally, W. F. Riley
- (3) Photoelasticity vol. I, vol. II, Frocht, M. M.
- (4) 기타 물리광학 서적류

3. 실험장치

- (1) 광원
- (2) Polarizer set
- (3) Loading system
- (4) Camera
- (5) Specimene (Polyurethane)

4. 이 론

4.1 광탄성(Photoelasticity)

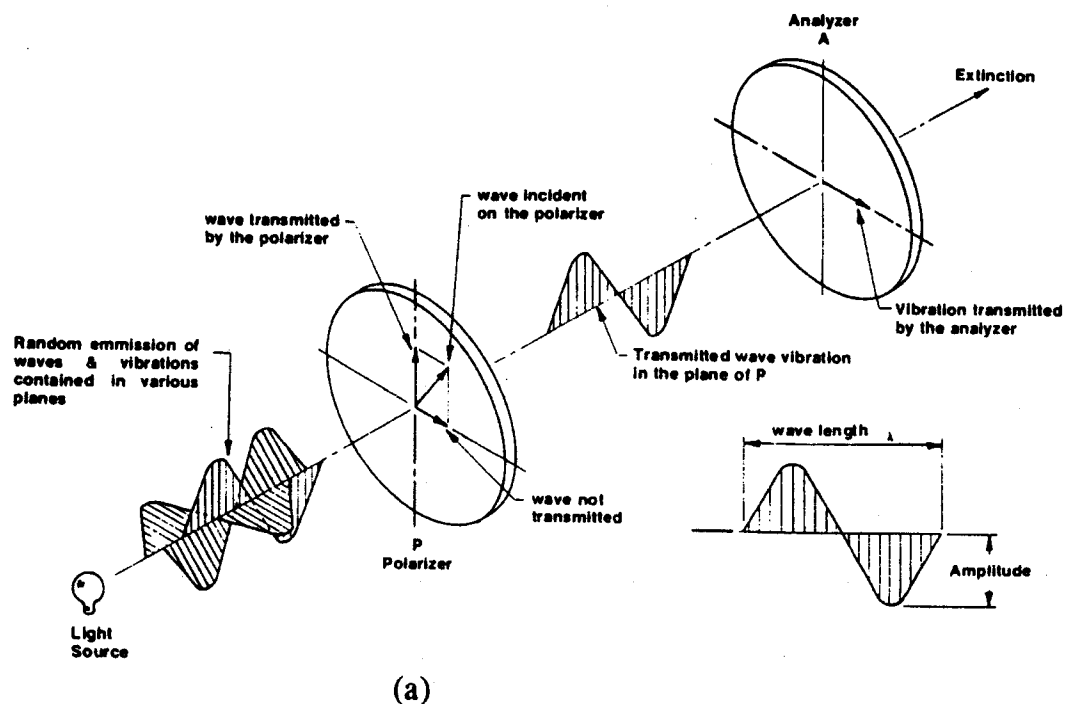
오늘날 여러가지 재료의 응력 상태를 탄성학에 의해서 해석적으로 해결하고는 있으나 복잡한 형상을 가진 부재의 해석은 수학적인 방법에 의해서 풀 수 없으므로 Grid, Brittle Coating, Strain Gage, 그리고 Optics(광탄성, 모아레, 간섭)등과 같은 실험적인 방법으로 많은 문제를 해결하고 있다.

고체가 하중을 받을때, 물체 내부에는 응력이 생기게 되는데, 이러한 응력은 각각의 분자들의 상대적 위치의 변화에 관계된다. 투명한 물체의 경우에는 분자의 배열의 변화가 광학적 성질의 변화를 가져온다. 즉, 이중 굴절이 생기게 되는데 이러한 현상을 Photoelasticity라 한다.

편광된 빛(polarized light)이 하중을 받는 투명한 물체를 지나면 두 개로 나뉘어 지는데, 그 때 그 빛들의 진동면은 서로 직각을 이루게 된다. 또 그 빛들은 물체의 분자 구조에 따라 서로 다른 속도로 움직이게 되고 그에 따라 간섭 현상이 일어나고, 빛의 intensity도 응력에 따라 달라진다.

응력을 받은 판(Fig.8.1.(b)에 있어서 굴절면(planes of refraction))은 Principal stress의 방향에 관계되고, 그 빛들의 속도차이는 Principal stress의 크기의 차이에 관계된다. 또 이러한 것들이 간섭에 영향을 주게 되고 따라서 간섭에 대한 조사는 물체내의 응력 분포에 관한 정보를 알게 해주고 그에 따라 stress의 해석이 가능해진다.

이 방법은 1816년 David Brewster가 응력을 받고 있는 유리에 편광을 투과시키면 응력에 따라 화려한 색채, 모형이 나타난다는 것을 발표함으로써 발전되게 되었다. 이 방법은 평면 응력(plane stress)의 해석에 국한되지 않고 3차원 응력(three-dimensional stress)까지도 해결하여 널리 공학 문제 해결에 공헌하고 있다.



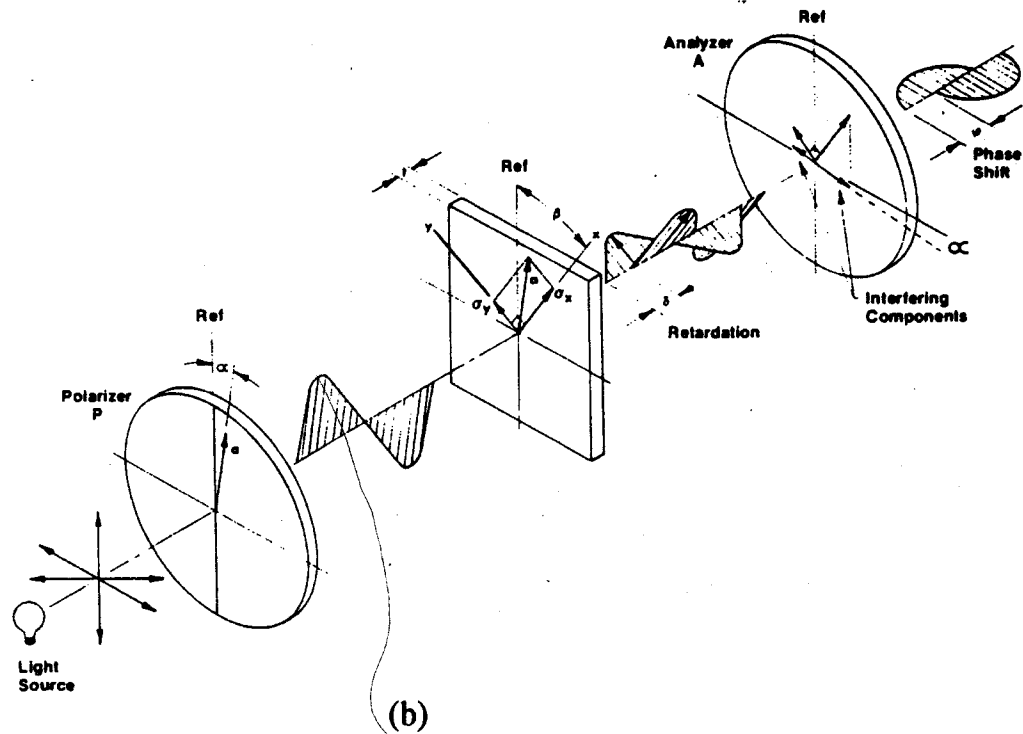


Fig.8.1 (a) Polarization of light.

(b) The plate setup shown in (a) with the plate now stressed.

4.2 동경사선(Isoclinic line)

시편이 하중을 받을 때 여러 점에서 주응력의 한 면과 시편으로 들어가는 편광면과 일치하는 응력 상태가 존재한다. 이런 점에서 광은 분해되지 않고 직접 애널라이저에 들어가며 폴라라이저와 애널라이저의 편광면은 직각이므로 애널라이저를 통하는 광은 없고 휘도는 최소가 된다. 이러한 점들의 궤적을 동경사선이라 하며 암선으로서 나타난다.

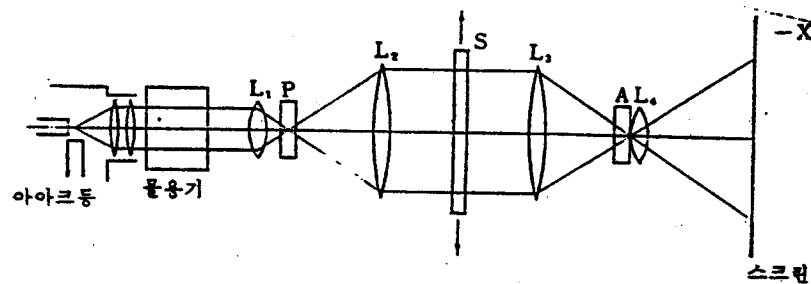


Fig.8.2 동경선용 광탄성 장치

Fig.8.2는 백색광을 사용하여 등경선을 구하는 실험 장치를 표시한다. 광원인 Arc Lamp에서 나온 광선은 polarizer P와 Analyser A를 제외하고, Lens L₁, L₂, L₃ 및 L₄를 조정하여 시편 S의 상을 screen X 상에 나타나게 한다. Polarizer P를 넣고, 주면의 방향을 기준방향에 맞춘 다음에 Analyser A를 넣고 A를 회전하여 screen X위의 시야가 가장 검은 위치에 고정한다. 이 때에 polarizer와 Analyser의 주면이 직각으로 된다. 시편 S에 하중을 가하면 시편 부분이 밝아지고 등경선만이 암대(dark band)로 나타난다. 이것을 screen X 상에서 트레스하고, 이 때의 polarizer와 Analyser를 다 같이 각도 $\phi_1(0^\circ)$ 으로 한다. 다음에 polarizer P와 Analyser A를 같은 방향에 각도 $\phi_2(5^\circ)$ 만큼 돌리면서 먼저와 같은 방법으로 스크린상의 상을 기입한다. 이와 같이 하여 얻은 등경선의 예를 표시하면 Fig.8.3과 같다. 등경선이 얻어지면 등경선 ϕ_1 과 등경선 ϕ_2 사이의 경사각 $(\phi_1 + \phi_2)/2$ 가 되는 직선을 AB로, 등경선 ϕ_2 의 등경선 ϕ_3 의 사이를 경사각 $(\phi_2 + \phi_3)/2$ 가 되는 직선을 BC로 연결하고 A, B, C, ...등을 통과하는 매끈한 곡선을 그으면 Fig.8.4와 같은 주응력선이 얻어진다. Fig.8.5는 이와 같이 하여 얻어진 주응력선군을 표시한다.

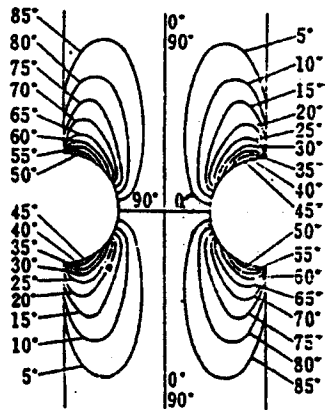


Fig.8.3 등경선

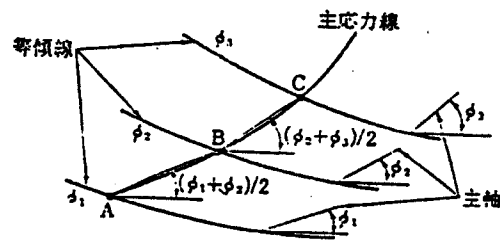


Fig.8.4 주응력선

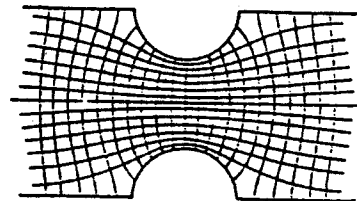


Fig.8.5 주응력선군

4.3 등색선(Isochromatic line)

광탄성에서 응력이 작용하면 시편내의 각 점에서 응력차가 있는 곳에는 간섭

이 일어나고 완전 간섭시에 휘도는 최소가 된다. 시편에 두께 t 인 투명 등방체 재료를 사용하고, 광원에 필요한 광선의 파장이 결정된다면 주응력차는 위상차의 어떤 값의 배수인 차수에 비례하고 이 때의 차수마다 시편에는 완전 간섭이 생겨 검은 암대가 나타나게 된다. 이 궤적을 등색선이라고 한다. 그러므로 차수를 계산하면 응력차를 알 수 있다.

Fig.8.2에서 광원에 단색광을 사용하면 등경사선과 등색선이 함께 암대로 나타난다.

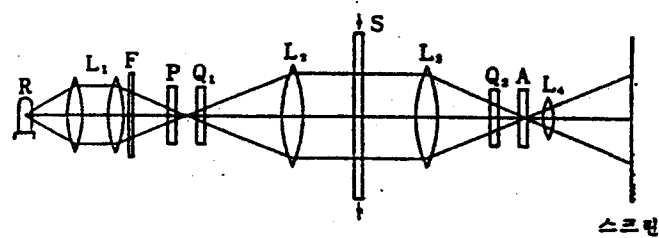


Fig.8.6 편광장치

등색선만을 측정할 때에는 Fig.8.6과 같이 광원에 단색광 R과 filler F를 사용하고 $1/4$ 파장판 Q_1 , Q_2 를 추가하여 사용한다. Polarizer P의 뒤에 $1/4$ 파장판 Q_1 을 그 주면과 45° 의 경사가 되도록 배치한다. 그러면 평면 편광은 원 편광으로 변한다.

주면의 방향이 회전하기 때문에 시편 S를 통과하여도 등경선이 나타나지 않는다. 시편을 통과한 후의 원 편광에 의한 주면의 회전을 다시 바로 잡기 위하여 시험편과 Analyzer 사이에 제2의 $1/4$ 파장판 Q_2 를 그 주면이 Q_1 의 주면과 직교하도록 배치한다. 이 때에는 스크린 위에는 등색선만이 나타난다. 암대의 차수의 갯수를 세어 주응력차를 구한다.

단색광을 사용할 때에는 등경사선과 등색선을 구별할 수 없으나, 편광판을 변화시킴으로써 이동되는 것은 등경사선이며 고정된 것은 Isochromatic line이다. 백색광을 사용하면 등색선은 착색광이 되며 등경사선은 암부로서 이루어진다.

4.4 간섭 (Interference)

Fig.8.7에서와 같이 광원으로부터의 빛이 Detector D에서 검출된다고 하자. 이 때 빛은 그 Intensity가 시간에 대해 Sinusoidal Function인

Electromagnetic Radiation이다.

따라서 그림에서 처럼 광원1과 D사이의 거리를 l_1 , 광원2와 D사이의 거리를 l_2 라 할때 빛이 단색광이라면 즉 single frequency f 와 그에 따른 wavelength λ 를 가진다면($f = c/\lambda$: c -광속), 다음과 같은 무늬를 얻을 수 있다.

$$l_2 - l_1 = 2n \frac{\lambda}{2} \quad (n:\text{integer}) \text{일 때 bright} \\ \Rightarrow \text{constructive interference}$$

$$l_2 - l_1 = 2(n+1) \frac{\lambda}{2} \quad (n:\text{integer}) \text{일 때 dark} \\ \Rightarrow \text{destructive interference}$$

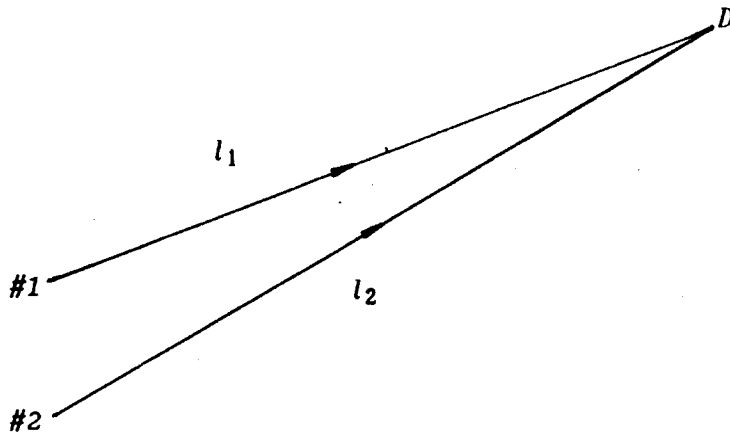


Fig.8.7 Radiation from two light sources arriving on detector D

4.5 편광 시험 장치 (Polariscope)

위에 말한 광탄성 실험을 위한 장비로써 다음과 같이 구성되어 있다.

- 광원(light source)
- 폴러라이저(polarizer)
- 단색광 발생을 위한 필터(filter)
- 원형 편광(circular polarization)을 위한 1/4 파장판

주응력면을 찾는데 광원으로서 백색광을 사용하나 대부분 단색광을 투사함으로써 실험을 한다.

평면 편광은 nicol prism이나 polaroid 판으로써 이루어지고, 한 특정 방향으로 진동을 하는 평면 편광을 응력을 받는 시편에 투사하면 등색선과 등경사선이 동시에 모형상에 나타나게 된다.

시편상에 입사되는 광은 반드시 평행이 되어야 하며, 만약 평행이 안되는 경우 경계선상에 심한 오차를 가져올 뿐 아니라 불확실한 모형을 얻게 되므로 여러가지 렌즈로서 평행과 집광을 해야 한다.

원형 편광을 얻기 위해서는 평면광을 1/4 파장판에 투과시킴으로써 얻어진다. 원형 편광에 의해서 모형상에 등경사선이 없어져 등색선만이 남게 된다.

4.6 정량 분석

시편이 응력을 받고 있을 때 그 주변형률을 각각 ϵ_x , ϵ_y 라 하면, Hook's Laws에 의해

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_x - \nu\epsilon_y) \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_y - \nu\epsilon_x) \quad (2)$$

이다.

위 두식의 차는

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1 - \nu} (\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (3)$$

이다. 그리고 시편을 통과한 두 개의 light beam사이에서 생기는 Photoelastic signal의 Retardation δ 은

$$\delta = N \cdot \lambda = t \cdot K \cdot (\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (4)$$

여기서 δ : Retardation
 λ : Wavelength
 N : Fringe order
 K : Stress Optical Coefficient
 (Supplied by manufacture)

(4)식을 변형하면,

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = N \frac{\lambda}{tK} = Nf \quad (5)$$

이다.

그리고 fringe value, f 는

$$f = \frac{\lambda}{tK}$$

이다.

여기서 $\lambda = 22.7 \times 10^{-6} \text{ inch } (575 \times 10^{-6} \text{ mm})$

t : Thickness of specimen

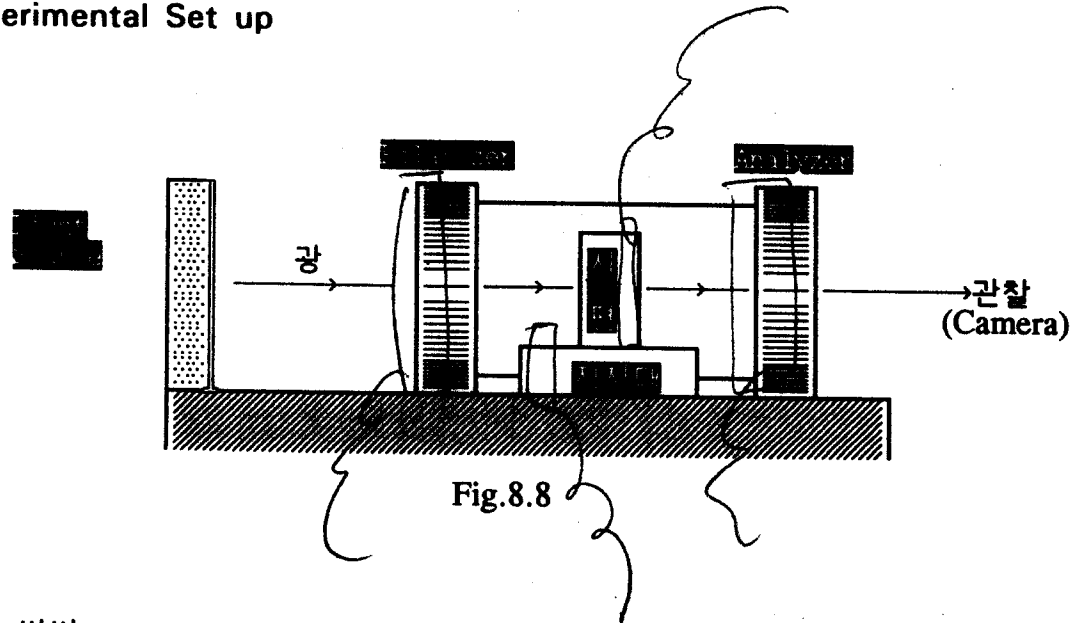
따라서 주응력 차는

$$\sigma_x - \sigma_y = (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \frac{E}{1 + \nu} = Nf \frac{E}{1 + \nu}$$

으로 주응력차를 정량적으로 계산할 수가 있다.

실 험 8 : 광탄성

1. Experimental Set up



2. 실험 방법

- (1) Fig.8.8과 같이 편광기의 Polarizer와 Analyzer가 서로 직각이 되도록 한다.
- (2) Fig.8.9와 같은 두 가지 형상의 시편을 편광기의 Polarizer와 Analyzer 사이에 각각 두고 시편을 걸어 잡아 당기거나, 임의의 힘을 시편 양단에 주어 시편에 응력이 발생하도록 한다.
- (3) 편광기로 부터 이 상태로 시편의 등색선을 관찰하고 Analyzer의 각도를 15° 간격으로 돌리면서 등경사선을 관찰하여 촬영한다. 이로부터 응력 중심 방향 및 응력 분포를 찾고 응력을 정량적으로 계산한다.

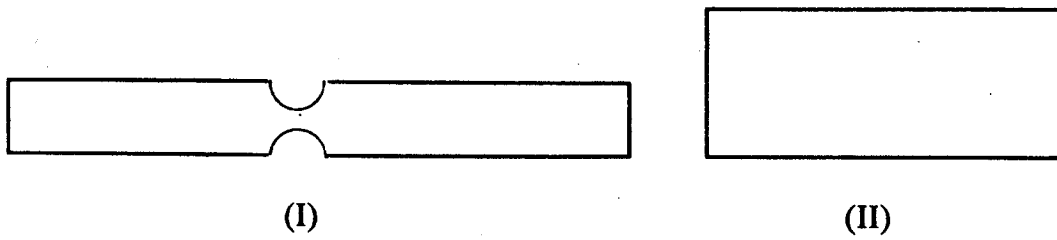


Fig.8.9 시편 형상

Table 8.1 Isochromatic Fringe Colors for Full Field Interpretation

Color	Approximate Fringe Order
Black	0
Yellow	0.6
Red	0.9
Purple (Tint of Passage)	1.0
Blue Green	1.2
Yellow	1.5
Red	1.75
Red/Green Transition	2.0
Green	2.2
Yellow	2.5
Red	2.8
Red/Green Transition	3.0
Green	3.2

Table 8.2. Photoelastic material specification.

σK_d - Stress Optical Constant psi/fringe/in (kPa/fringe/m)	Elastic Modulus - E 1000psi (GPa)	ν	Thickness inch (mm)
1.0 (0.17)	0.6 (0.004)	0.500	0.500 (12.70)

* PSM-4 Sheet (Photoelastic material Model): Polyurethane material exhibiting low modulus that requires very low forces for straining. Desirable for making dynamic or wave propagation studies. Also useful for hand loaded demonstration applications.

시편	Polarizer 각도(°)	동경선	동색선
I	0		
	15		
	30		
	45		
	60		
	75		
	90		

시편	Polarizer 각도(°)	동경선	동색선
II	0		
	15		
	30		
	45		
	60		
	75		
	90		

