

미소변형 해석을 위한 Dual I-beam Shearography

김경석*(조선대 기계공학부), 최태호**(조선대 대학원 기계설계공학과),
김성식**(목포 과학대학), 최정석**(목포 과학대학)

Strain Analysis by Dual-beam Shearography

K. S. Kim*(Mech. Eng. Dept., Chosun Univ.), T. H. Choi**(Graduate School, Chosun Univ.),
S. S. Kim**(Mokpo Science College.), J. S. Choi**(Mokpo Science College.)

ABSTRACT

In recent years, shearography has significantly improved capabilities in the areas of unbond and separation detection in tires. Although shearography has many advantages for qualitative evaluation, the technique remains the problem of quantitative analysis of inside defects, because shearography needs several effective factors including the amount of shearing, shearing direction and induced load, which exist as barrier for the quantitative analysis of inside defects. Since the factors are highly dependent on inspectors skill and also affect the in-situ workability. The factors were optimized and the size of cracks inside of pipeline and tire has been quantitatively determined.

Key Words : Dual-beam Shearography, Speckle interferometry (스펙클 간섭법), Fringe pattern (간섭무늬), Non-contacted strain analysis(비접촉 스트레인 해석)

1. 서론

일반적으로 기계구조물의 응력분포의 측정에는 스트레인게이지를 이용한 방법이 널리 사용되어져 왔다. 그러나 이 방법은 point by point 측정, 고온에서의 온도보상, 접촉식 방법이라는 한계를 지니고 있어, 이를 보완하고자 여러 가지 방법으로서의 연구가 이루어져왔다. 그 대표적인 예로 레이저의 시간적·공간적인 가간섭성⁽¹⁾을 이용한 스펙클 간섭법(Speckle interferometry)의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이는 레이저를 이용해 비접촉으로 대상체의 응력분포를, 측정 전영역에 걸쳐 실시간적으로 해석할 수 있는 방법으로, 이미 국외에서는 이 기법을 응용한 제품이 상용화된 상태이며, 국내에서도 연구실 단위로 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히, Shearography는 직접적으로 표면의 변위에 대한 미분값을 측정하고 있어 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 활용되고 있다. 이를 이용한 변형해석을 시도하였으나, 정량화 과정에서 필연적

으로 z -변위 성분(w)이 포함이 되었다.⁽²⁾ 그러나, 본 연구에서 제시하는 Dual-beam Shearography에서는 두 개의 확산광을 사용하여 변위 방향에 평행하게 좌우에서 각각 조사하고, 각 조사광으로부터 얻은 간섭무늬(Fringe pattern)를 감산처리함으로써 결함주위에서의 x 또는 y 의 순수한 변형만을 획득할 수 있다. 이 기법은 하나의 시스템으로 내부결함의 검출 및 결함주위의 변형해석으로 수명 평가까지 가능하여 산업적 활용가능성이 매우 높을 것으로 사료된다.

2. 이론

2.1 Shearography

Shearography에서는 레이저에서 나온 빛이 물체면에 조사된 후 반사되어 나와서 광분할기(Beam splitter)에 의해 두 개의 빔으로 나누어진 후 하나는 위에 있는 거울에 반사되어 상면에 맞히고, 나머지 하나는 옆에 있는 거울에서 반사되어 다시 광 분

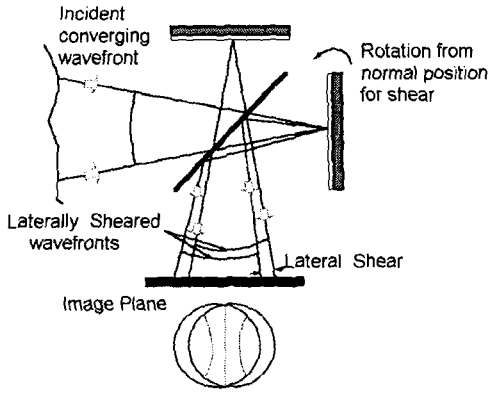


Fig. 2 Shearography 간섭계 구성

할기로 들어가서 상면에 맺히게 된다. 이때, Fig. 1에서 보듯이 옆에 있는 거울에 기울기(전단량)를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면은 기울어지지 않은 거울에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 상면에 맺히게 된다. 이렇게 변형된 물체의 정보를 가진 스펙트럼 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서와 같은 방식으로 저장한 스펙트럼 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 간섭무늬(Fringe pattern)를 형성하게 된다. 이 간섭무늬는 물체표면 변위의 미분값을 나타내고 있으며, 전단거울의 전단방향, 전단량 등에 영향을 받아 간섭무늬의 선명도 및 형태가 결정이 된다.

2.2. Dual-beam Shearography

변형은 면내 변위의 도함수인 다음의 요소(분력)와 관계가 있다.

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{and} \quad e_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

여기서, e_x, e_y 는 각각 x 와 y 의 변형성분이다.

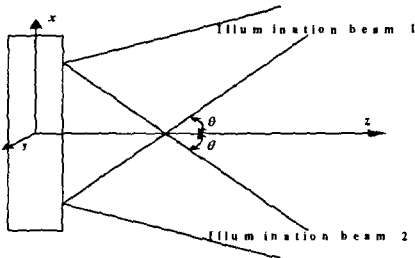


Fig. 2 Dual-beam Shearography geometry

Fig. 2는 x 축 변형을 측정하기 위한 Dual-beam Shearography의 좌표구성이다. 대상체에 대한 측정은 Beam Splitter에 의해 나누어진 두 개의 레이저 빔을 z 축에 대해서 동일한 각도로 번갈아 조사한다. 빔의 방향은 측정의 변형성분에 달려있다. 변형성분의 측정은 그림에서 보듯이 x 방향과 평행하고, 두 빔의 입사는 각각 y, z 평면에 대칭이다. 위상변화는 오른쪽 빔과 왼쪽 빔이 각각 조사하는 동안의 물체의 변형에 기인한다. 오른쪽 빔에 기인하는 위상변화 ΔR 은 다음과 같다.

$$\Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(1 + \cos \phi) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \sin \phi \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] \delta x \quad (2)$$

여기서 λ 는 레이저의 파장이고, δx 는 게이지 길이에 상당하는 전단량이다. 왼쪽 빔에 의한 위상변화 ΔL 은 다음으로 주어진다.

$$\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(1 + \cos \phi) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) - \sin \phi \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] \delta x \quad (3)$$

측정은 대상체에 한번에 하나의 빔만이 조사된다. 오른쪽 빔의 조사와 함께 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 로 위상이동에 대응하는 네 개의 스펙트럼 이미지는 연속적으로 저장된다. 마찬가지로 왼쪽 빔이 조사되는 동안 네 개의 스펙트럼 위상이동 이미지들도 저장된다. 대상체의 변형 이후의 스펙트럼 이미지는 오직 zero(0) 위상을 나타내어 각각의 조사에 대해 개별적으로 저장된다. 식(2)과 식(3)의 감산은 식(4)와 같다.

$$\Delta R - \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \sin \phi \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \delta x \quad (4)$$

그러므로, x 방향의 면내변형은 결정된다. 만일, z 축에 대해서 90도 회전해서 조사가 이루어지면, Shearing 방향은 y 축과 평행해지고 식(4)는 다음이 된다.

$$\Delta R - \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \sin \phi \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \delta y \quad (5)$$

실제로, 어떤 변형 분력은 조사되는 시스템의 방향을 조절하면 측정되어질 수 있다. 면외변위의 도함수도 또한 $(\Delta R + \Delta L)$ 의 합의 컴퓨터계산에

의해서 또한 결정할 수 있다.

$$\Delta R + \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2(1 + \cos \phi) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x \quad (6)$$

이것은 x 방향으로 평행한 Shearing 방향이다. y 방향으로 평행한 전단량이면 다음으로 주어진다.

$$\Delta R + \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2(1 + \cos \phi) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta y \quad (7)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 광학계구성

Fig. 3은 변형된 마이켈슨 전단 간섭계를 구성한 것이다. Nd:YAG 레이저로부터 나온 광원은 Beam Splitter를 통해 두 개의 빔으로 나누어지고 확산렌즈(Expanding Lens)를 통해 시험편의 전 영역에 걸쳐 조사된다. 시험편을 통해서 반사된 빔은 Beam Splitter에 의해 다시 두 빔으로 나뉘어 PZT를 거쳐 위상 이동된 빔과 전단거울(Shearing Mirror)에 의해 경사진 빔이 CCD 카메라의 수광소자에 간섭무늬가 결상된다. 이 때, CCD 카메라는 변형 전과 변형 후의 이미지를 감산처리하여 전단 간섭무늬를 모니터 상에 출력하게 된다.

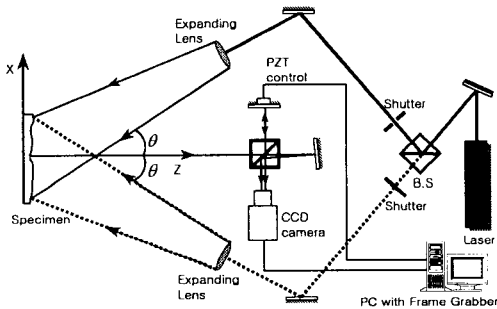


Fig. 3 Dual-beam shearography interferometry

3.2. 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 알루미늄 재질로서 Al1050이고 규격은 다음과 같다.

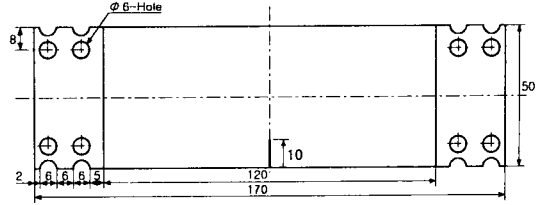


Fig. 4 Specimen with crack(10 mm)

Table 4.2 Mechanical properties of specimen

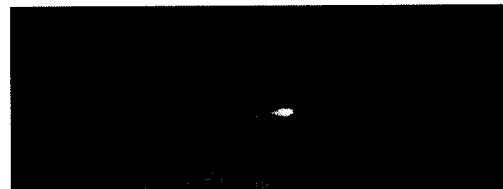
Specification of material	Young's modulus (E)	Poisson Ratio (ν)	Thickness (T)	Dimension(L×W)
Al 1050	69 GPa	0.33	1 mm	170mm×50mm

4. 결과 및 고찰

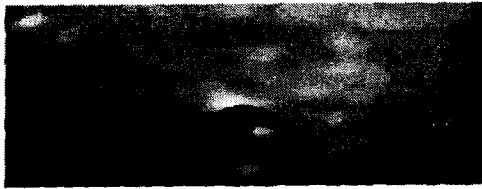
Fig. 5는 Fig. 4의 시편에 대한 유한요소 해석(FEM Analysis) 결과를 보여주고 있다. 그림과 같이 결함 첨단부에 응력집중이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이는 재료거동학적인 해석에서 이미 이론적인 해석이 이루어진 바와 같이 땅콩모양의 응력 집중을 보임을 알 수 있다. Fig. 5는 면내 변형 해석을 위해 Fig. 3과 같은 간섭계 구성을 하여 얻은 실험결과로서 Fig. 5(a)는 변위 방향의 우측에서 조사된 확산광으로부터 얻은 Shearography 간섭무늬이며(식 2), Fig. 6(b)는 변위방향의 좌측에서



Fig. 5 FEM result of specimen with crack(10 mm)



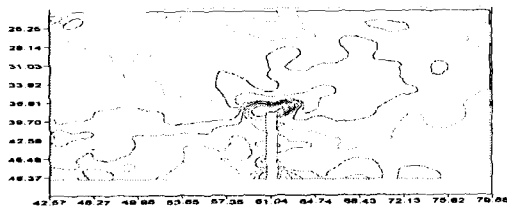
(a) Phase map by right illumination



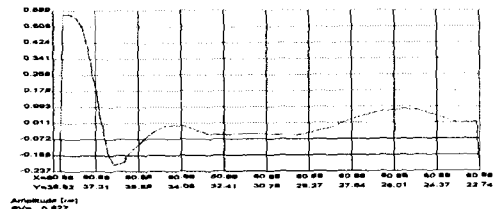
(b) Phase map by left illumination



(c) Phase map by subtraction



(d) Contour-line of strain distribution



(e) Line-profile of strain distribution

Fig. 6 In-Plane deformation measurement

조사된 확산 광으로부터 얻은 간섭무늬이다(식 3). 간섭무늬들을 감산 처리할 경우 Fig. 6(c)와 같이 z 방향의 변형성분 ($\partial w/\partial x$)이 제거되며 순수한 x 방향 변형성분 ($\partial u/\partial x$)만이 남게된다(식 4). 이 수치 연산을 통한 간섭무늬를 정량해석 함으로서 물체의 순수한 x 축 변형률을 직접 계측할 수 있다. Fig. 6(c)에 대해 결별침 과정을 거치게되면 Fig. 6 (d)와 같이 스트레인 분포도를 얻을 수 있다. 마지막으로 그림 Fig. 6(e)는 시험편의 결함 첨단부에서 수직방향, 즉 하중이 작용하는 방향에 대한 반대방향으로의 프로파일을 그린 것이다. Fig. 6(e)

의 프로파일로써 결함 첨단부에서의 응력집중을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Shearography를 이용하여 변형해석을 시도하였다. 기존의 Shearography 기법과는 달리 두 개의 확산광을 사용하여 변위 방향에 평행하게 좌우에서 조사를 하고 각 조사광으로부터 얻은 간섭무늬(Fringe pattern)를 감산처리함으로써 변위 방향에 대한 변형률을 구하였다. 기존의 Shearography를 이용하여 변형해석을 시도하였으나, 정량화 과정에서 필연적으로 z -변위 성분(w)이 포함이 되었다. 그러나, 본 기법을 사용함으로써 결함주위에서의 x 또는 y 의 순수한 변형만을 획득할 수 있다. 이 기법은 하나의 시스템으로 내부결함의 검출 및 결함주위의 변형해석으로 수명평가까지 가능하여 산업적 활용가능성이 매우 높을 것으로 사료된다.

후기

이 논문은 과학기술부/한국과학재단지정 지역협력연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2003년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- Hung Y. Y., "Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing", *Opt. Engng*, May/June, p391-395, 1982.
- Steinchen W., Yang L. X., Schuth M. and Kupfer G., "Electronic shearography for direct measurement of strains", *Proc. SPIE*, Vol.2248, p210-221, 1994.
- Rastogi, P. K., "Measurement of in-plane strains using electronic speckle and electronic speckle-shearing pattern interferometry", *J. Mod. Opt.*, Vol 43, pp403-407, 1996.
- Steinchen, W., Yang, L. X., Kupfer, G., Mackel, P., and Vassing, F., "Strain analysis by means of digital shearography: potential, limitations and demonstration", *JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS* Vol.33, No.2, pp171-182, 1998.
- Steinchen, W., Yang, L. X., Schuth, M., and Kupfer, G., "Application of shearography to quality assurance", *J. Master. Processing Technol.* Vol.52, pp141-150, 1995.