

## 전자처리스펙클패턴간섭법에 의한 평판의 Strain 해석에 관한 연구

김경석\* 최형철\* 양승필\* 김형수\* 정재강\* 김동현\*\*

\* 조선대학교 기계설계공학과

\*\* 원광대학교 기계공학과

**요약** 전자처리스펙클패턴간섭법을 CW 레이저에 비디오 시스템과 화상 처리 장치를 조합하여 평판의 변위를 측정하는데 이용하였다. 과거의 스트레인 게이지나 모아레법과는 달리 전자처리스펙클패턴간섭법(ESPI)은 측정물에 아무런 처리를 할 필요가 없고, 완전한 비접촉 측정이 가능하며, 또한 감도가 높은 이점이 있다. 본 연구에서 사용한 시험편은 로드셀과 같은 방향으로 하중이 걸리도록 하였다. 시험편은 평판이고 스트레인 게이지를 부착하였다. 이 연구는 전자처리스펙클패턴간섭법에 의해 변위와 응력 분포를 구하여 스트레인 게이지와의 비교함으로써 전자처리스펙클패턴간섭법의 측정 정밀도에 대해 검토하고자 한다.

### 1. 서론

최근 공업 기술의 급속한 발달에 따라 기계 구조 재료가 다양한 조건하에서 사용되어지고 있고, 이에 따라서 기계 구조 재료에 대한 강도 해석을 행할 필요성이 증가하고 있다. 이러한 강도 해석의 기본이라 할 수 있는 재료의 strain, stress 및 변형의 측정 방법으로 여러가지 측정법이 사용되고 있지만 대부분 재료에 gauge를 직접 부착해야 하는 strain gauge법에 그치고 있으며 비접촉에 의한 계측 방법은 아직도 미진한 상태에 머물고 있다.

특히, 레이저의 출현에 의해 새로운 계측법의 개발이 가능하게 되었고, 계측, 정보처리, 통신, 재료 가공 분야에서 연구가 진행되고 있다. 레이저 스펙클이란 레이저 계측에서는 일반적으로 노이즈가 되고, 홀로그래피 등에서는 그 제거에 노력을 기울이고 있지만, 본질적으로는 물체 표면의 정보를 갖는

화상 신호로 간주할 수 있다. 이 레이저 스펙클은 레이저를 물체의 확산면에 조사시킬 때, 그 반사광의 중앙 또는 조사면의 결상 중앙에 발생하는 작은 불규칙한 알갱이 모양의 반점이고, 물체 표면이 갖고 있는 불규칙한 격자로 간주할 수 있다. 이 스펙클에 의해 이루어진 불규칙한 알갱이 모양을 스펙클 패턴이라한다. 스펙클은 물체의 변형에 따라 이동하며 이러한 스펙클 패턴이 변하는 성질을 이용하여 물체의 변형이나 스트레인을 측정하는 방법이 스펙클법이다.

따라서 본 연구는 한 방향의 변위성분에 대한 분포를 직접 얻을 수 있는 Speckle Pattern Interferometry(SPI)에 화상 처리 장치를 조합한 Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI)를 이용하여 인장 하중을 받는 평판의 면내 변위를 측정하여 ESPI법의 측정 정밀도와 가능성 및 문제점에 대해 검토하고자 한다.

2. 전자처리스펙클패턴간섭법(ESPI)의 원리

2.1. 스펙클 패턴

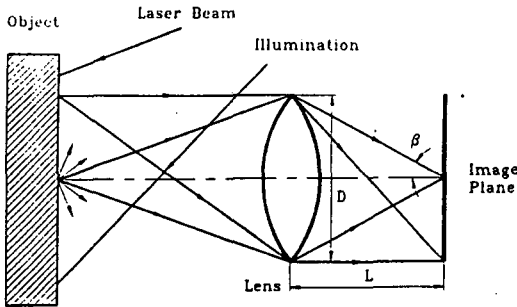


Fig. 1. Formation of subjective speckle pattern

레이저광을 광학적으로 거친 표면을 갖는 물체에 조사하고 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 렌즈를 이용하여 결상시킬 때 물체상에 겹쳐 발생하는 작은 반점 모양을 상계의 스펙클 패턴이라고 한다. 이러한 현상은, 레이저가 가간섭(coherent)광인 것으로부터 조사 영역에서는 random하지만 시간적으로는 정상인 위상 관계에 있는 다수의 광파가 간섭하는 것에 의해 발생한다. 상면상의 알갱이 모양의 반점 즉, 스펙클의 크기는 결상계의 분해능에 의해 결정되고 스펙클 최소의 크기는  $\sigma = 0.6\lambda / \sin\beta$  또는  $\sigma = 1.2(1+M)\lambda$ 이며 렌즈에서 화면까지의 거리 L이 렌즈의 직경 D보다 아주 클 때에는  $\sigma = 1.2\lambda L/D$ 로 주어지게 된다. 여기에서  $\lambda$ 는 레이저의 파장, M은 촬영배율, f는 렌즈의 f Number이다.

2.2. 스펙클패턴간섭법(SPI)의 원리

SPI(Speckle Pattern Interferometry)는, 2.1 절에서 기술한 바와 같이 스펙클 패턴끼리의 간섭을 이용해서 스펙클 크기 이하의 대단히 미소한 변위 분포를 측정하는 방법이다. 레이저광을 물체 표면에 조사할 때, 각 점으로부터의 확산 반사광을 벡터량으로 생각하면, 반사광의 진폭은 거의 일치한다고 생각할 수 있지만, 위상은 random하다. 따라서 조사 영역 각 점에서의 스펙클의 휘도는, 0에서 어느 값까지는 불규칙하게 변화하고 있다. SPI는 이것들의 스펙클 휘도가 벡터의 위상 관계에 의존하고 있다는 것을 이용하고 있다. 여기에서, 물체의 표면에 레이저광을 조사하고, 산란광을 결상하여 상면상에 스

펙클 패턴이 발생하는 경우를 생각해 보자. Fig. 2에 나타난 바와 같이 임의의 물체광  $\vec{a}_s$ 와 참조광  $\vec{a}_R$ 을 생각하여 보자. 여기서 벡터의 크기는 휘도를 나타내고 방향은 위상을 나타내게 된다.  $\vec{a}_s$ 와  $\vec{a}_R$ 의 초기 상태에서의 위상차를  $\delta_1$ 이라 하고  $\vec{a}_s$ 와  $\vec{a}_R$ 의 간섭에 의하여  $\vec{A}_1$ 이 발생하게 된다면, 여기서 발생한  $\vec{A}_1$ 의 휘도  $I_1$ 은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_1 = |\vec{A}_1|^2 = |\vec{a}_R|^2 + |\vec{a}_s|^2 + 2|\vec{a}_R||\vec{a}_s|\cos\delta_1 \quad (1)$$

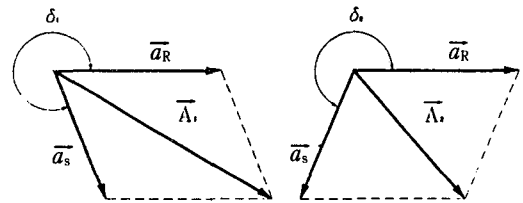


Fig. 2. The vector representation of object beam and reference beam

그러면, 참조광  $\vec{a}_R$ 은 일정하고 스펙클  $\vec{a}_s$ 를 만든 물체의 산란 표면이 미소량만큼 변화한다고 생각하자. 단, 변위량은 광의 파장보다도 작고,  $\vec{a}_s$ 에 기여하는 전반사광은 같은 진폭을 유지하고 있는 것으로 한다. 물체가 변형을 함으로써 확산 표면을 경유하는 스펙클의 위상은 변화한다. 따라서 동일한 휘도  $|\vec{a}_s|$ 이지만, 위상이 다른 새로운 스펙클이 발생한다. 이때  $\vec{a}_R$ 에 관한 위상차가  $\delta_2$ 가 되는 스펙클을  $\vec{a}_s$ 로 한다면  $\vec{a}_s$ 와  $\vec{a}_R$  사이의 간섭에 의해서 발생한 광의 스펙클  $\vec{A}_2$ 의 휘도  $I_2$ 는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$I_2 = |\vec{A}_2|^2 = |\vec{a}_R|^2 + |\vec{a}_s|^2 + 2|\vec{a}_R||\vec{a}_s|\cos\delta_2 \quad (2)$$

만일,  $|\delta_1 - \delta_2| / \lambda$ 가  $2n\pi$ 가 되는 경우에 휘도는  $I_1$ 과 동일하게 되지만, 그 이외의 경우에는 주기적으로 변화한다. 따라서 결과로써 발생한 휘도를 관찰함으로써 스펙클의 위상 변화를 알 수 있다.

물체 표면에 하중이 가해짐으로써 변형이 발생하는 경우, 상면상에서 스펙클의 위상이 변화한다. 따

라서 변형 전후의 스펙클 패턴을 감산함으로써 변위 분포를 알 수가 있는 즉, 광로 길이가 일정량 만큼 변화하는 부분을 보여주는 간섭 줄무늬 모양이 나타난다.

2.3. 기본 광학계

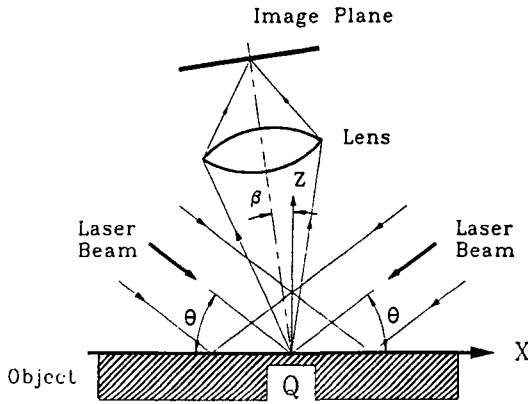


Fig. 3. The basic optical system of SPI

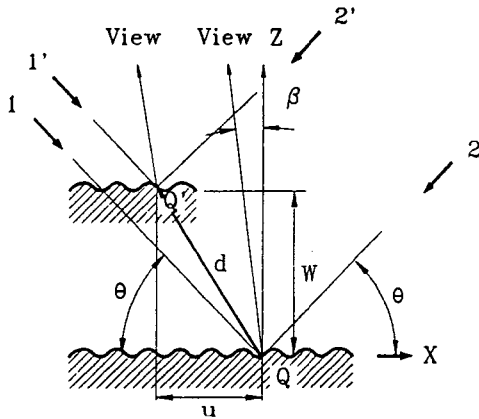


Fig. 4. Changes in optical path length as a result of translation in both x and z directions

Fig. 3은 SPI의 기본 광학계를 나타내고 있다. 두 개의 평행한 레이저광 1, 2를 같은 각도  $\theta$ 로 피측정면에 조사하여, 레이저광이 조사된 확산 표면을 렌즈를 이용하여 상면에 결상한다. 이때 두개의 광을 포함한 면과 측정면과의 교선의 방향(X방향)이 면내 변위를 측정하는 방향이다.  $\beta$ 는 관측 방향과 측정면에 수직인 Z축과 이루는 각이다. 한쪽 방

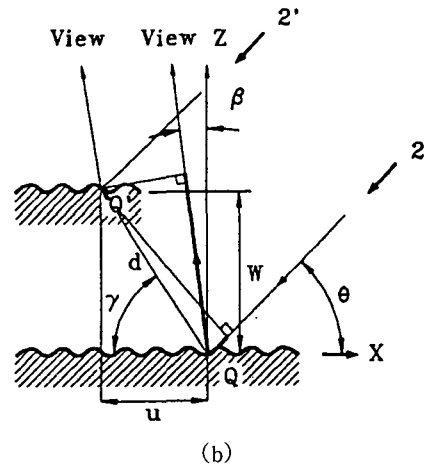
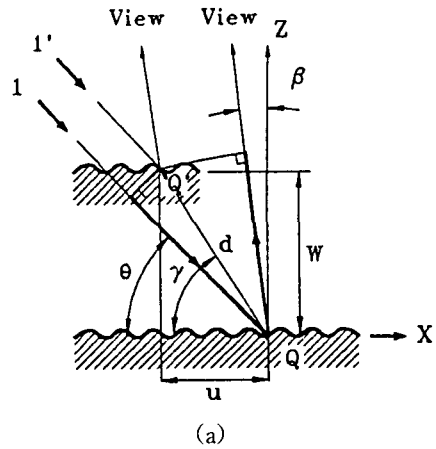


Fig. 5. Change of the optical path length

향의 레이저광만으로도 상면에 스펙클 패턴이 발생하지만, 두 개의 레이저광에 의한 각각의 패턴에 의해 새로운 스펙클 패턴이 발생하게 된다. 휘도는 이 두 개의 스펙클 패턴 간섭에 의해 결정된다. 따라서 한 쪽 방향의 레이저광을 물체광이라고 하면, 다른 쪽 레이저광은 참조광이라고 생각할 수 있다. 이러한 광학계를 이용하여 상면상의 변형 전후의 스펙클 패턴을 감산하거나 증첩함으로써 등변위 줄무늬를 얻을 수 있다. 여기에서 스펙클 패턴의 감산에 의해 얻어지는 줄무늬에 관해서 생각해 보자.

Fig. 4와 같이 측정면 상의 임의의 점 Q가 d만큼 변위한다고 하자. u는 변위 d의 X방향 성분, W는 Z방향 성분이다. 이 경우 레이저광 1과 관측 방향이 이루는 광로 길이의 변화량  $L_1$ 은 Fig. 5(a)에 의해

$$L_1 = d \cdot \cos(\gamma - \theta) + d \cdot \cos(\pi/2 - \gamma - \beta) \dots\dots\dots (3)$$

가 되고,  $\cos\gamma = u/d$ ,  $\sin\gamma = W/d$ 에 의해

$$L_1 = u \cdot \cos\theta + u \cdot \sin\beta + W \sin\theta + W \cos\beta \dots\dots\dots (4)$$

가 된다. 마찬가지로 레이저광 2에 대한 변화량  $L_2$ 는 Fig. 5(b)에 의해, 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$L_2 = d \cdot \cos(\pi - \theta - \gamma) + d \cdot \cos(\pi/2 - \beta - \gamma) \\ = -u \cdot \cos\theta + u \cdot \sin\beta + W \sin\theta + W \cos\beta \dots\dots\dots (5)$$

한 쪽 방향의 레이저광은 다른 한 쪽의 레이저광에 대해 참조광이라고 간주할 수 있기 때문에 변형 전후의 광로 길이의 변화  $\Delta$ 는, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2u \cdot \cos\theta = n\lambda \dots\dots\dots (6)$$

식(6)에 의해  $\Delta$ 는 면의 변형 성분  $W$ 와 관측 방향  $\beta$ 와는 무관하다는 것을 알 수 있다. 여기에서 광로 길이가 변화  $\Delta$ 가  $n\lambda$  ( $n=1,2,3\dots$ )가 될때 간섭 줄무늬를 볼 수 있으므로, 줄무늬 차수를  $n$ , 레이저 파장을  $\lambda$ 로 하면, 변위  $u$ 와의 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$u = n\lambda / (2 \cdot \cos\theta) \dots\dots\dots (7)$$

식(7)에 나타난 바와 같이, 변위  $u$ 는 레이저의 파장과 레이저광의 조사 각도만에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

**2.4. 전자처리스펙클패턴간섭법(ESPI)**

스펙클패턴간섭법(SPI)에 TV 카메라와 화상 처리 장치를 조합시켜 변형을 측정하는 방법을 전자처리 스펙클패턴간섭법(ESPI)이라고 한다. Fig. 6은 ESPI 시스템 구성을 나타낸다. 스펙클 패턴은 TV 카메라로 해석할 수 있을 정도로 카메라의 조리개를 조절하여 정확한 상이 형성되게 한다. 우선, 어떠한 초기 상태에 있는 물체의 스펙클 패턴을 카메라로 촬영하여 화상 처리 장치의 메모리에

기억시킨다. 그런 다음 변형된 후에 발생한 새로운 스펙클 패턴을 새로운 메모리에 기록한다. 이 두개의 화상 데이터를 감산함으로써 간섭 줄무늬를 얻을 수가 있다. 또 퍼스널 컴퓨터로 화상 처리 장치를 제어하면, 화상을 얻을 때의 처리 시간은 1/30초 정도로 거의 실 시간에서 간섭 줄무늬의 관찰이 가능하다. 그리고, 일단 화상 데이터를 기록한 후에 콘트라스트가 나쁜 줄무늬는 강조등의 처리를 할 수 있다.

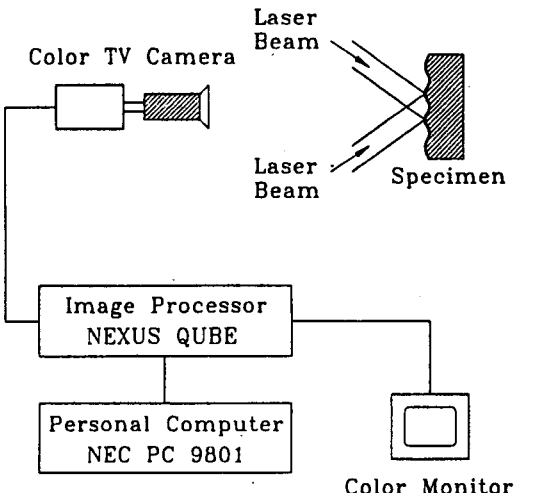


Fig. 6. Block diagram of image processing system

**3. 실험 장치 및 방법**

본 연구에서 사용한 레이저는 아르곤(Ar) 레이저로써 파장 $\lambda$ 는 514.5nm이고, 사용중의 최대출력이 200mW 인 연속파 레이저이다.

본 장에서는 광학계, 해석계 및 시험편과 실험 방법에 대해서 기술한다.

**3.1. 광학계 및 해석계**

**3.1.1. 광학계의 배치**

실험의 성공 여부 즉, 선명한 간섭 줄무늬를 얻기 위해서는 레이저광을 시험편에 안정하게 조사하여야 하므로 광학계의 설치가 무엇보다도 중요하다. 본 실험에 사용된 광학계의 평면 배치도를 Fig. 8에 나타냈다.

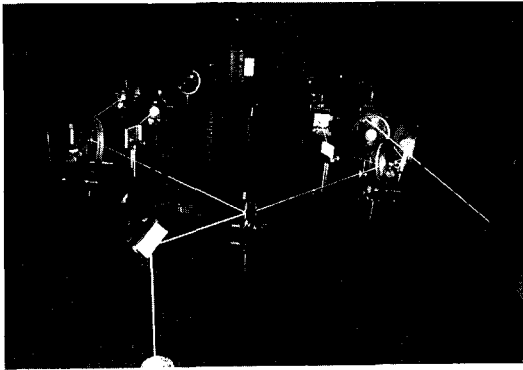


Fig. 7. The optical system of ESPI

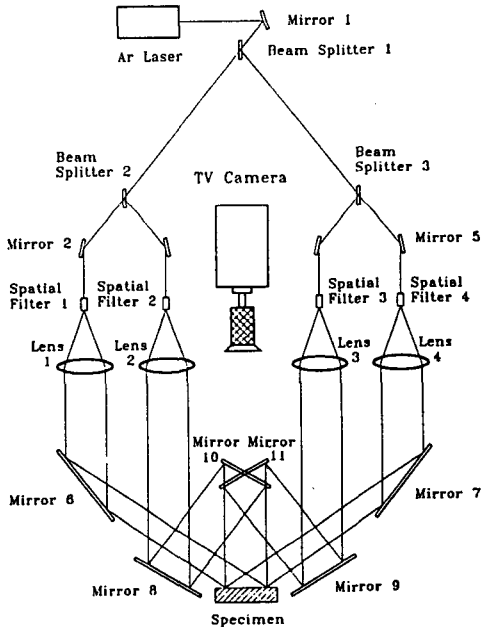


Fig. 8. Arrangement of the ESPI optical system

Mirror 10과 Mirror 11은 상하로 배치되어 있고 각각 같은 각도로 시험편에 조사된다. 광원으로부터 나온 레이저광은 빔 스플리터(beam splitter)에 의해서 두 개의 광으로 나뉘고, 그 각각은 빔 스플리터에 의해서 또다시 두 개의 광으로 나뉘어진다.

이 광을 스페셜 필터(spatial filter)를 통과시켜 광을 확산시키고 노이즈를 제거하여 상하, 그리고 좌우에서 시험편에 조사한다. Fig. 8에서는 Mirror 10과 Mirror 11의 반사광이 중첩되어 있는 것처럼 보이지만 실제 화면에 대해 연직 방향에서 +θ의 각도로 시험편에 조사하고 있다.

3.1.2. 화상 처리 장치

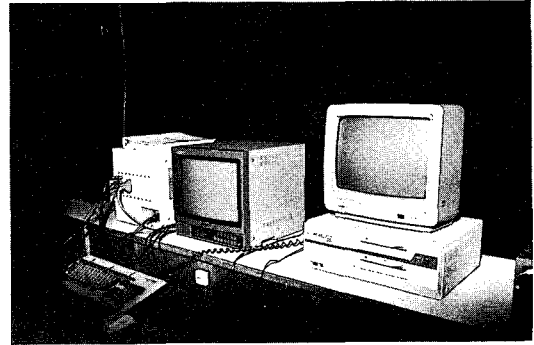


Fig. 9. The image processing system

Fig. 9 은 본 실험에서 변형 전후의 스페클 패턴을 간섭시켜 해석하기 위한 화상 처리 장치(NEXUS사 제품 QUBE)를 나타내고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 측정면의 두 방향에서 레이저광을 조사하고, 레이저광에 의하여 발생하는 스페클 패턴을 고해상도의 TV 카메라로 촬영하여 256단계의 2차원 디지털 화상 데이터로 화상 처리 장치의 메모리에 수록한다. 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 화상 처리 장치를 제어하며, 처리 시간은 약 1/30 초로써 대부분 실시간으로 간섭 줄무늬를 관찰할 수 있다.

3.2. 시험편

본 논문에서는 시험편으로 Aluminum 7075-T6 평판을 사용하였으며 그 특성치는 다음과 같다.

Young's modulus :  $E = 7.53372 \times 10^3 (\text{kg/mm}^2)$

Poisson's ratio :  $\nu = 0.321162$

여기에서 E는 Young's modulus이며 ν는 Poisson's ratio이다. 평판의 치수는 50mm×100mm×0.4mm이다. 측정면에는 금속 광택을 제거하기 위해 흰색 도료를 칠했다. 또한 ESPI법에 의해 구한 등분위 줄무늬로부터 계산한 strain 값이 타당한 값을 나타내는지 조사하기 위해 시험편 앞 뒷면의 동일한 위치에 strain gauge를 부착했다. Fig. 10에 시험편의 형상과 gauge의 위치를 나타냈다. 사용된 gauge는 모두 단축이며, gauge 길이는 1mm이다.

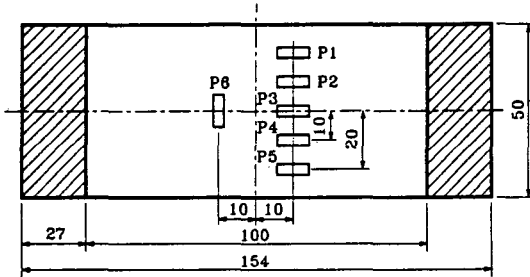


Fig. 10. The dimension of specimen and bonded location of gauge

### 3.3. 인장시험기

실험에 사용한 인장시험기는 Fig. 11에 나타내었다. 시험편은 가이드에 끼우고 시험편의 폭 전체에 균등한 하중이 걸리도록 하였다. 시험기의 위쪽은 고정되어 있고, worm과 worm wheel에 의해 하부 축에 인장 하중을 주어 시험편이 인장되는 구조로 되어 있다. 기어 장치의 레버를 회전시킴으로써 시험편은 팽창하게 되고, 이 팽창의 정도와 줄무늬 간격의 변화가 비례함으로써 줄무늬 간격으로부터 스트레인을 계산할 수 있다.

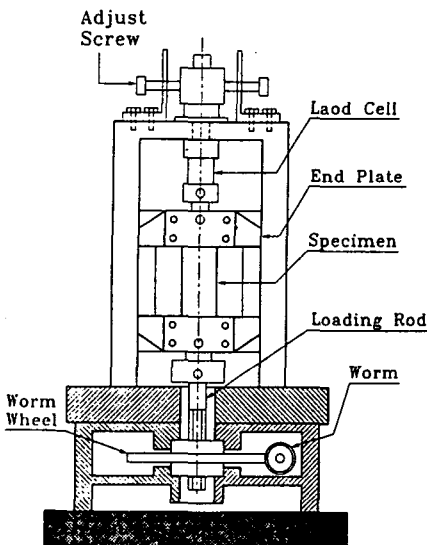


Fig. 11. The fixed jig of specimen and tensile loading device

### 3.4. 실험 방법

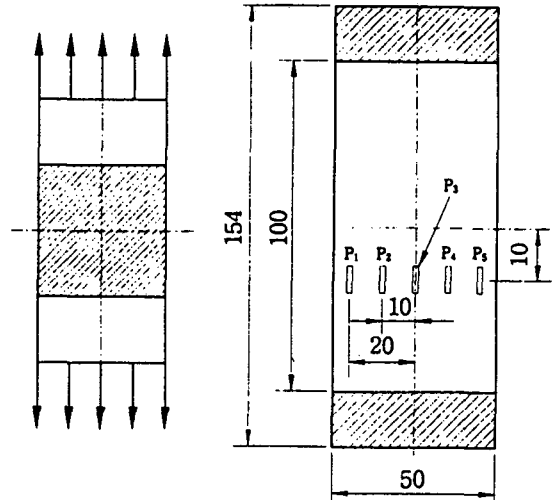


Fig. 12. The measured area of specimen

Fig. 12는 평판의 측정 영역을 나타내고 있다. 측정에 있어서는 시험편에 적당한 하중을 가하고 그때의 화상을 기준 화상으로 화상 처리 장치의 메모리에 수록한다. 다음에 하중을 가하면서 변형중의 화상을 연속해서 화상 처리 장치의 메모리에 수록함으로써 실시간으로 간섭 줄무늬의 변화를 관찰하였다.

### 4. 평판의 해석

본 연구는 ESPI법에 의한 측정 결과와 스트레인 게이지에 의한 측정 결과와 비교함으로써 실험의 정밀도를 평가하였다. 평판의 해석은 간섭 줄무늬의 세선화에 의해서 구해진 줄무늬의 간격을 이용하여 스트레인의 계산을 하였다. 본 실험에서 주의해야 할 부분은 간섭 줄무늬의 간격을 정확히 구해내는 것이다. 그 처리 과정에 대해서 알아보자.

#### 4.1. 세선화

세선화를 하는 목적은 스트레인 값을 구할 때 필요한 간섭 줄무늬 간격을 측정하기 위함이다. 세선화는 다음 몇개의 과정을 거친 후에 이루어진다.

먼저 간섭 줄무늬의 명암이 선명하지 않을 때 행하는 화상의 강조와 화상의 휘도 분포를 매끄럽게

하는 평활화, 2치화 처리, 2치화 처리를 행한 화상에서 서로 밝은 부분이 연결되어 있을 경우에 그 부분을 절단해 주는 수정 과정, 경계가 거친 상태에서 세선화를 행하면 그 줄무늬에는 많은 요철이 발생하게

된다. 따라서 확산, 수축을 행함으로써 2치화상 중의 폭이 좁은 부분을 제거해 준다. 다음으로 2치화상의 중심선을 검출하는 세선화를 행하며, 세선화한 줄무늬의 수정을 위해 원화상과 중첩을 시켜 잘

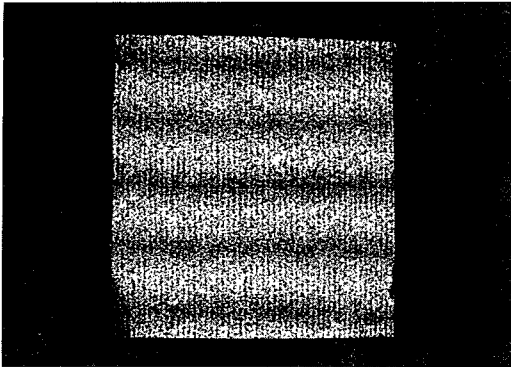


Fig. 13. The enhancement of source image



Fig. 14. The smoothing of source image

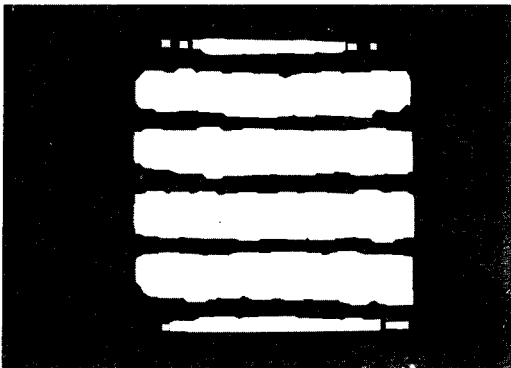


Fig. 15. The expansion and contraction of image

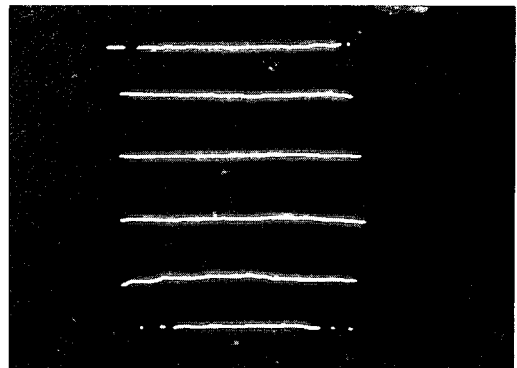


Fig. 16. The thinning

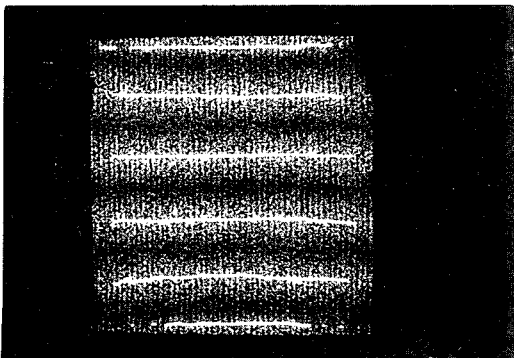


Fig. 17. The thinning (with enhanced image)

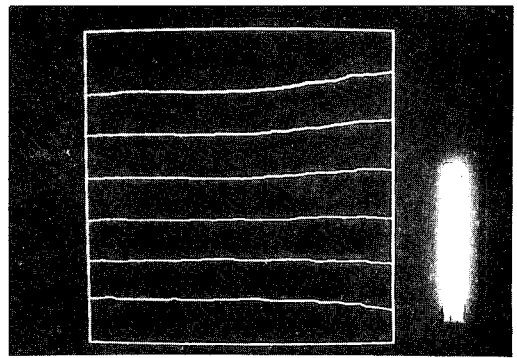


Fig. 18. The labeling (with outlines of measured area)

못된 부분을 처리한다.

다음으로는 간섭 줄무늬에 번호를 붙이는 것으로서 스트레인을 구할 때는 차수가 다른 간섭 줄무늬의 간격을 측정하여야 되는데, 간섭 줄무늬가 구부러졌다거나 외형선과 인접한 줄무늬의 경우, 같은 차수의 줄무늬끼리 간격을 측정하지 않도록 연결된 줄무늬 각각의 휘도 변화를 기록하여 줄무늬를 구별하는 것이다.

그리고 간섭 줄무늬와 외형선을 구별하기 위해서 외형선의 휘도는 항상 255로 하였다. 마지막 단계로 측정 영역의 외형선을 그리는 것으로 세선화 과정을 마치게 된다. Fig. 13~Fig. 18은 세선화 처리 과정을 보여주고 있다. Fig. 18은 세선화 과정을 마친 최종적인 사진이다.

4.2. 스트레인의 계산

일반적으로 인접한 두개의 간섭 줄무늬를 n차와 n+1차의 간섭 줄무늬로 한다. 이때 각각의 줄무늬에 대응하는 변위량  $u_n$ 과  $u_{n+1}$ 은,

$u_n = n\lambda / (2\cos\theta)$  ..... (8)

$u_{n+1} = (n+1) \lambda / (2\cos\theta)$  ..... (9)

와 같이 나타낼 수가 있다. 따라서 인접한 간섭 줄무늬의 변화량 차  $\Delta u$ 는,

$\Delta u = \lambda / (2\cos\theta)$  ..... (10)

가 되며, 이것은  $\lambda$ 와  $\theta$ 만에 의해서 결정된다. 그리고 Fig. 19에서 줄무늬의 간격을 F라 하면 수직 변형률  $\epsilon$ 은,

변형률 :  $\epsilon = u/L = (n \cdot \lambda / 2\cos\theta) / L$   
 $= (L \cdot \lambda / F) / (2\cos\theta \cdot L) = \lambda / (2\cos\theta F)$  (11)

가 된다. 이렇게 해서 구해진 스트레인은 두개의 줄무늬의 중심 스트레인이 된다. 이러한 원리를 근거로 하여, 세선화시킨 화상을 퍼스널 컴퓨터에 의해 해석한다.

4.3. 실험 결과 및 고찰

4.3.1. 평판의 실험결과와 strain gauge법과의 비교

스트레인 게이지를 붙인 위치에서 ESPI법에 의해 구한 스트레인 값과 스트레인 게이지에 의해 구한 스트레인 값의 정량적인 비교를 하기 위해 게이지 위치에서 ESPI법에 의해 스트레인 값을 구했다. 그리고 2개 줄무늬의 중심 스트레인 값을 구하여 그 사이를 1차 보간하고 게이지 위치에서 스트레인 값을 구했다. 게이지의 중심을 게이지의 위치로 했으며 게이지에는 폭이 있으므로 스트레인 값을 게이지의 중심과 중심에서 좌우 2dot씩 띄워 총 5개 점에서 스트레인을 계산하고 그 평균치를 사용했다.

각각의 Table에서 이론치  $\epsilon_L$ 은 loadcell의 변형에 의해 계산된 하중 P(kgf)를 시험편의 단면적 A(mm<sup>2</sup>)으로 나눈 값을 사용했다. 즉

$\epsilon_L = P/AE$  ..... (12)

이다. 또한 오차 G(%)는 ESPI에 의해 구한 스트레인을  $\epsilon_E$ 라하고 게이지의 스트레인을  $\epsilon_G$ 라하면

$G = [(\epsilon_E - \epsilon_G) / \epsilon_G] \times 100$  ..... (13)

으로 계산했다. 평판에 대한 실험 결과를 각 gauge별로 구분하여 Table 1~Table 3과 Fig. 19~Fig. 21에 나타냈다. 또한 Table에서 load는 loadcell이 나타내는 스트레인 값의 차이이다.

4.4. 고찰

실험 결과를 보면 알 수 있듯이 ESPI법에 의한 측정치와 strain gauge에 의한 측정치를 비교해 보면 시험편 앞면에서는 ±8%의 오차가 발생했으며 뒷면에서는 ±20%의 오차가 발생했다. 이러한 오차의 원인으로는 파장, 각도, 줄무늬의 간격의 3가지로 생각할 수 있다. 파장은 catalogue값을 사용하고 있으므로 각도와 줄무늬 간격의 2가지 원인에 의해 오차가 발생한 것으로 생각된다. 그외의 문제점으로는 strain gauge의 위치에서 strain을 구할때 strain이 얻어진 점 사이를 1차 보간할때 발생하는 오차를 생각할 수 있다. 따라서 동일한 하중차에서도 줄무늬 간격이 좁은 곳보다는 넓은 곳에서 오차가 클 가



Table 1. The measuring results of plate( $p_1$  gauge)

LOAD(kgf)	STRAIN( $\times 10^{-6}$ )			ERROR(%)
	THEORY	ESPI	GAUGE	
5.61	37.23	37.93	38	-0.18
7.47	49.57	50.85	50	1.70
9.34	61.99	65.17	63	3.44
11.03	73.20	79.34	76	4.39
13.08	86.81	91.79	88	4.20
14.95	99.22	108.69	100	8.69
16.82	111.63	112.10	114	-1.67
18.69	124.04	138.75	126	10.12

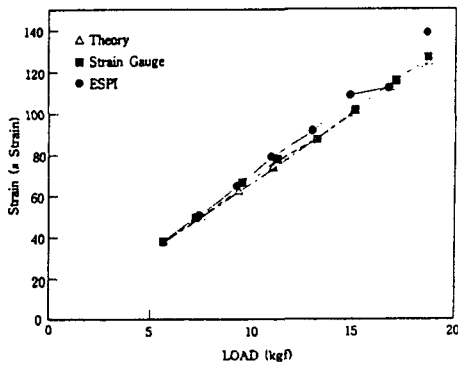


Fig. 19. The measuring results of plate( $p_1$  gauge)

Table 3. The measuring results of plate( $p_5$  gauge)

LOAD(kgf)	STRAIN( $\times 10^{-6}$ )			ERROR(%)
	THEORY	ESPI	GAUGE	
5.61	37.23	35.47	35	1.34
7.47	49.57	48.21	47	2.57
9.34	61.99	59.77	57	4.86
11.03	73.20	73.65	69	6.74
13.08	86.81	91.58	79	15.92
14.95	99.22	98.19	93	5.58
16.82	111.63	101.46	103	-1.50
18.69	124.04	119.92	116	3.38

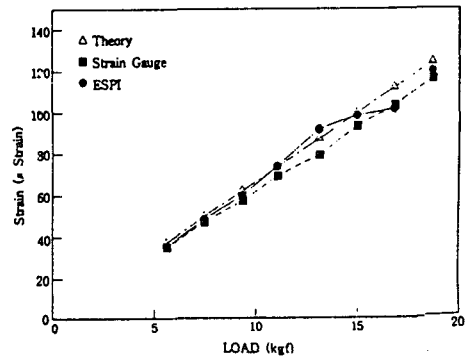


Fig. 21. The measuring results of plate( $p_5$  gauge)

Table 2. The measuring results of plate( $p_2$  gauge)

LOAD(kgf)	STRAIN( $\times 10^{-6}$ )			ERROR(%)
	THEORY	ESPI	GAUGE	
5.61	37.23	38.13	36	5.92
7.47	49.57	50.58	49	3.22
9.34	61.99	66.52	62	7.29
11.03	73.20	77.86	75	3.81
13.08	86.81	93.73	87	7.74
14.95	99.22	107.59	99	8.68
16.82	111.63	114.84	113	1.63
18.69	124.04	130.03	125	4.02

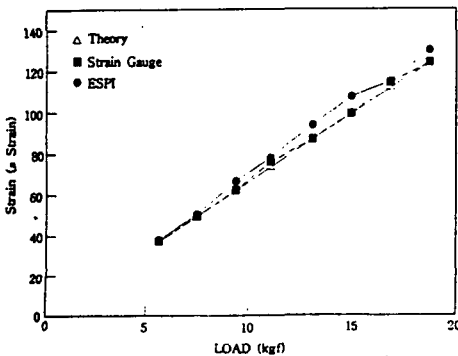


Fig. 20. The measuring results of plate( $p_2$  gauge)

능성이 있다. 이외에도 스케일 팩터를 구할 때의 오차나 게이지 위치의 측정 오차, 카메라 렌즈의 구면 수차에 의한 오차도 생각할 수 있지만 이러한 오차는 미소한 양이므로 크게 문제가 되지 않는다. 또한 줄무늬를 구할 때 줄무늬가 대칭이 될 수 있도록 축 맞춤을 했다 축 맞춤을 하지 않은 상태에서는 스트레인 값이 전혀 틀리게 나왔으며 그 이유로는 시험편 전체가 면내에서 회전함에 따른 강체 회전 변위가 더해진 결과라 생각된다.

5. 결론

본 연구에서 ESPI법을 이용하여 면내 스트레인 분포를 2차원적으로 측정하여 ESPI법의 유용성 및 문제점에 대해 고찰하였다.

- 1) 평판의 해석 결과를 보면 알 수 있듯이 ESPI법에 의한 측정 결과 8%전후의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다.
- 2) ESPI법은 미소변위를 측정하는 방법으로써 측정 변위량이 미소이기 때문에 면내 스트레인 이의

에 등변위 줄무늬에 관여하는 요인이 존재하는 경우 그 영향을 크게 받았다.

- 3) 해석에 있어서 단순히 스트레인이 구해진 점 사이를 1차 보간했다. 같은 하중차에서 줄무늬 간격이 좁은 곳과 넓은 곳에서는 구해진 data수가 다르므로 넓은 곳에서 오차가 클 가능성이 있다. 따라서 1차 보간에 대치될 수 있는 이산화 방법에 의한 줄무늬 해석을 다음 연구에서 보완하고자 한다.
- 4) 실험 결과 발생한 대부분의 문제점은 ESPI법 자체의 문제점은 아니며 해석 방법에 따른 문제점이라 생각된다. 따라서 ESPI법은 비접촉의 면내 스트레인 해석 방법으로써 매우 유용한 방법이라 생각된다.

#### 〈후 기〉

본 연구는 1993년도 한국과학재단 특정기초연구비 지원(과제번호 93-0200-05)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) D. Denby and J. A. Leendertz, "Plane-Surface Strain Examination by Speckle Pattern Interferometry using Electronic Processing," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 9, No. 1 (1974), pp. 17-25.
- 2) S. Sumi, "Speckle Pattern Correlation Method for Measurement of Surface Structural Changes Caused by Fatigue," *The Society of Materials Science, Japan*, 1976, pp. 17-21.
- 3) 山口一郎, "レーザ スペックルひずみ計による高温下のひずみ測定," *非破壊検査*, 32(9), 1983, pp. 676-682.
- 4) 角誠之助, "構造強度解析におけるレーザの應用," *日本宇宙航空學會誌*, 第25卷, 第281號, 1977, pp. 259-267.
- 5) O. J. Lokberg and J. T. Malmo, "Deformation Measurements at Very High Temperatures by ESPI and Moire Methods" *Applied Optics*, Vol. 1, No. 2 (1986), pp. 62-68.
- 6) 志自岐雄介, "スペックルペタソン干渉法による高温下の變形測定," *九州大學 修士論文*, 1989.
- 7) 山口秀穂, "スペックルペタソン干渉法を用いた高温下での面内變位測定に関する研究," *九州大學 修士論文*, 1990.
- 8) B. Ineichen, P. Eglin and R. Dandliker, "Hybrid Optical and Electronic Image Processing for Strain Measurement by Speckle Photography," *Applied Optics*, 19(13), 1980, pp. 2191-2195.
- 9) O. J. Lokberg, J. T. Malmo and G. A. Slettemoen, "Interferometric Measurements of High Temperature Objects by Electric Speckle Pattern Interferometry," *Applied Optics*, Vol. 24, No. 19 (1985), pp. 3167-3172.
- 10) 김경석, "CW-레이저 스펙클 寫眞法에 의한 고온하에서의 面内變位測定에 관한 研究," *漢陽大學校 博士論文*, 1988.

## **A Study on the Strain Analysis of Plane by Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI)**

Koung Suk Kim\*, Hyoung Chul Choi\*, Seung Pil Yang\*, Hyoung Soo Kim\*, Jae Kang Chung\*  
and Dong Hyun Kim\*\*

\*College of Engineering Chosun University

\*\*College of Engineering Wonkwang University

**Abstract** Electronic speckle pattern interferometry(ESPI) using a CW laser, a video system and an image processor were applied to the in-plane displacement measurements. Unlike traditional strain gauges or Moire method, ESPI method requires no special surface preparation or attachments and it can be measured in-plane displacement without any contact and real time. In this experiment, specimen was loaded in parallel with a loa cell. The specimen was plance to which strain gauges was attached. The study provides an example of how ESPI have been used to measure displacement and strain distribution in this specimen. The results measured by ESPI were compared with the data which were measured by strain gauge method in tensile testing.

---

*(Received : March 11, 1994)*