

# 레이저 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석

## Measurement and Analysis of in-plane deformation by laser interferometry

노경완\*, 유원재(전북대 대학원), 강영준, 김동우(전북대 공대)  
K. W. Rho, W. J. Ryu (Graduate School, Chonbuk Univ.)  
Y. J. Kang, D. W. Kim (Chonbuk Univ.)

### ABSTRACT

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) is new optical measuring method to be able to measure the surface deformations of engineering components and materials in industrial areas. Conventional measuring method of surface deformation such as the strain gauge have many demerits because it is contact and point-to-point measuring one. But ESPI that is non-contact, whole field measuring method can overcome previous disadvantages. The speckle pattern to be formed with interference phenomena of scattering light from rough surfaces illuminated by laser light have phase information of surface. In this study we used this interference phenomena and the phase shifting method to measure the in-plane deformation, together with the use of digital equipment to process the information contained in the speckle pattern and to display consequent interferograms. Finally we obtained good agreement between the experimental results and those of FEM.

**Key Words** : ESPI(전자 스펙클 패턴 간섭법), in-plane displacement(면내 변위), interferogram(간섭무늬), image processing(화상처리), phase shifting method(위상이동법), FEM(유한요소법)

### 1. 서 론

Gabor<sup>(1)</sup>에 의해 홀로그래피 원리가 발견된 이후로 홀로그래피에 대한 연구가 홀로그래피 간섭법<sup>(2)</sup>으로 지향되면서 물체의 변형 정보를 담고있는 간섭무늬의 관측이 가능하게 되었다. 이러한 간섭법을 이용한 측정 방법은 광학적으로 거친 측정 대상 표면 때문에 측정 민감도가 대단히 우수하고, 비접촉식으로 검사 대상에 영향을 주지 않으며 점단위 측정이 아닌 레이저가 조사되는 부분의 전영역이 측정 가능하다는 장점을 갖게 되었다. 그러나 홀로그래피 간섭법의 느리고 복잡한 기록 및 재생 과정은 현재 홀로그래피 간섭법을 이용함에 있어 하나의 난점으로 작용

하고 있으며, 특히 실시간 측정이 요구되는 산업 현장은 홀로그래피 간섭법의 이용이 매우 힘든 실정이다.

그러므로 홀로그래피 간섭법의 장점들을 수용하며, 동시에 그의 단점을 보완하는 신속한 비디오 시스템의 사용이 제안되었는데 이러한 간섭 시스템을 전자 스펙클 패턴 간섭계(ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometer)<sup>(3)</sup>라 한다. ESPI는 측정 물체의 변형 정보를 갖고 있는 간섭무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 사용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 대단히 용이하며, 현장 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 ESPI가 현장에 보다 적합하게 적용되기 위해서는 외란에 덜 민감한 면내 변형 측정 ESPI가 적합하다.

이에 본 연구는 면내 변형 ESPI를 제작하여 원형 구멍이 있는 시편과 홈을 가지고 있는 시편에 인장력을 주고 각각의 변형 특성을 파악하였다. 실험 결과인 간섭무늬가 변형 정보를 가지고 있다 하여도 단지 간섭무늬 만으로는 변형의 요철을 파악하기가 어렵다. 그러므로 변형의 요철 정보를 알아보기 위해서 위상이동법<sup>(4)</sup>을 수행할 수 있도록 간섭계에 PZT를 부착하여 정량화를 수행하였다.

또한 본 실험을 수행하기 전 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS<sup>(6)</sup>를 사용하여 각 시편의 변형 결과를 미리 구해 보았다.

## 2. 면내 변위 측정 레이저 간섭계의 원리

ESPI 장치는 사용 목적에 따라 간섭계의 구성이 달라지는데 크게 면외 변위에 민감한 ESPI와 면내 변위에 민감한 ESPI 두 가지가 존재한다. 면내 변위에 민감한 간섭무늬를 얻기 위한 간섭계의 구성도는 그림 1과 같다.

여기에서 물체는  $x_2, x_3$  평면에 놓여 있고 물체면에 수직인 방향과 이루는 각의 크기가  $\theta$  이며 방향이 반대인 두 평면 파면  $U_0^I$ 과  $U_0^{II}$ 이 물체에 조사되고 있다. 변위  $d$ 에 의한 두 빔의 상대적인 위상차는  $x_2$ -축에서 아래의 식과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (1)$$

여기에서

$\lambda$  : 광원인 레이저의 파장

$d$  :  $x_2$ -방향의 변위, 즉, 면내 변위

$\theta$  : 레이저의 입사각

또한 위상차  $\Delta\phi$ 는 스펙클 상관 계수에 의하여 아래의 식과 같이 된다.

$$\Delta\phi = 2N\pi \quad (2)$$

여기에서

$N$  : 간섭무늬 차수

식 (1)을 식(2)에 대입해 보면, 간섭무늬 차수에 비례하는 면내 변위의 상관식이 성립한다.

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin\theta} \quad (3)$$

그러므로, 이 식을 토대로 측정하고자 하는 물체의 면내 변위를 결정할 수 있다.

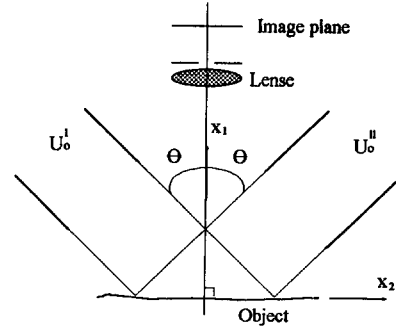


Fig 1. The optical arrangement of laser interferometer for measuring in-plane displacement

## 3. 위상 이동법

위상 이동법은 단지 간섭무늬 만으로는 변형의 요철 정보를 확인할 수 없으므로 변형의 요철 확인 및 화상처리 시스템을 이용하여 변형의 정량화를 실시하기 위해서 수행하는 방법이다.

변형 정보를 알고자 하는 구조물의 변형 전과 변형 후에 물체에서 산란되어 나오는 파의 복소 진폭에 따른 빛의 세기 즉, 간섭무늬 패턴은 다음식과 같다.

$$I_i(x) = I_a(x) \{1 + m(x) \cos[\Delta\phi(x) + \alpha_i]\} \quad (4)$$

i = 1, 2, 3, 4

여기에서

$I_a(x)$  : 빛의 평균 세기

$m(x)$  : 간섭무늬 대비값

$\Delta\phi(x)$  : 두 파의 위상차 즉,  $\phi_2 - \phi_1$

$\alpha_i$  : 부가되는 상호 위상값

위의 (4)식에서 우리가 알고자 하는 것은 두 파의 위상차 즉, 변형에 의한 간섭위상  $\Delta\phi(x)$ 이다. 이 간섭위상을 구하기 위하여 재생시 두 빔중의 하나를 이동시키기 위해 PZT(Piezo-electric Transducer)를 사용하여  $\alpha_i$ 를  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  씩 위상 이동한다. 그에 따른 연립방정식을 만들어 구한 식은 다음과 같다.

$$\Delta\phi(x) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x) - I_2(x)}{I_1(x) - I_3(x)} \right] \quad (5)$$

이러한 기법을 4-프레임 위상 이동법이라하며 변위를 나타내는 간섭무늬는 이러한 위상 정보를 포함하고 있다. 이렇게 4개의 간섭무늬 상을 받아 만든 상은  $2\pi$  씩 나누어진 계단형 위상지도인 불연속 위상도를 나타내게 된다.

#### 4. 유한요소해석 및 결과

ESPI를 이용한 실험에 앞서 실험에서 나온 측정 결과를 어느 정도 유추하고 비교하기 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 사용하여 유한요소 해석 시뮬레이션을 해 보았다. 이러한 해석을 수행하기 위해 실제 실험에서의 환경과 동일한 조건을 주었으며, 그림 2의 기하학적인 구조와 같이 원형 구멍이 있는 시편과 홈이 있는 시편을 축 방향으로 인장하였다. 시편의 재질은 알루미늄합금 2014-T6이다.

원형 구멍이 있는 시편의 면내 변형 결과, 즉 하중이 가해진 영역 주변에서 시편 표면 위에 위치의 함수인 축 방향 변위와 그에 따른 응력 분포가 그림 3의 (a)와 (b)에 있다. 여기에서 그림 3의 (b)는 원형 시편의 응력 분포를 나타내는데, 어떤 부재에 구멍이 있는 경우 인장응력이 가해질 때 급격한 변화인 불연속을 가지므로 그 부분에 높은 국부적 응력이 존재한다. 이를 응력집중현상이라 하며, 그림 3의 (b)에서 구멍의 상단과 하단에서 이러한 현상이 존재함을 알 수 있다. 시편에 가해진 하중은 3.5 kPa이며, 그에 따른 최대 변위는  $4.23 \mu m$  이다.

홈이 있는 시편의 면내 변형 결과는 그림 4의 (a)와 (b)에 존재한다. 이 시편의 변형 해석은 기하학적인 특성을 고려하여 좌우 대칭인 관계로 우측만을 고려하여 해석하였다. 하중을 3.5 kPa 가했을 경우 면내 변위의 분포가 그림 4의 (b)이며, 그에 따른 최대 변위는  $6.4 \mu m$  이다. 그림 4의 (b)는 응력 분포를 나타내고 있으며, 홈이 있는 영역에서 원이 표시되어 있는 부분이 변형에 급격한 변화를 갖는 응력 집중부이다.

이상의 유한요소해석 결과는 면내 변형에 민감한 ESPI 시스템으로 측정된 실험 결과와 잘 일치함을 다음 장에서 알 수 있다.

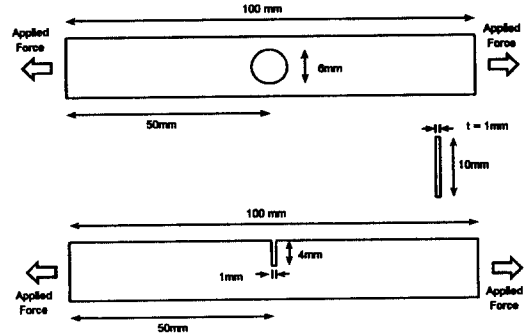


Fig 2. Specimen geometry used for finite-element analysis simulations of the experiments

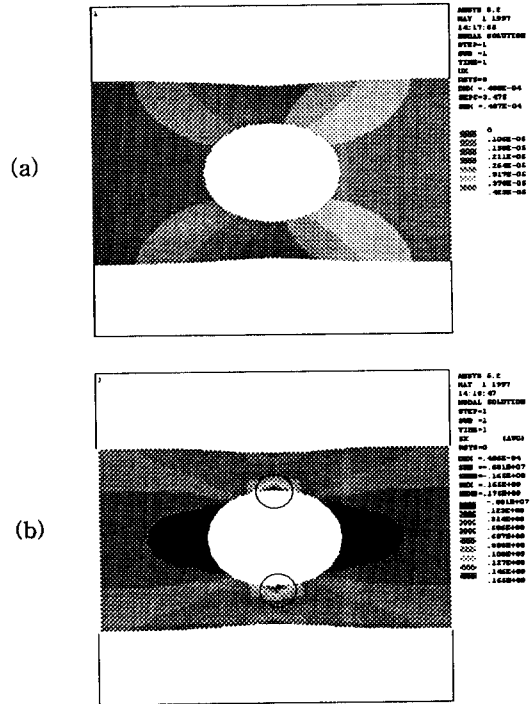


Fig 3. (a) the distribution of in-plane displacement and (b) the distribution of in-plane stress with stress concentration around a hole in a specimen by finite element analysis

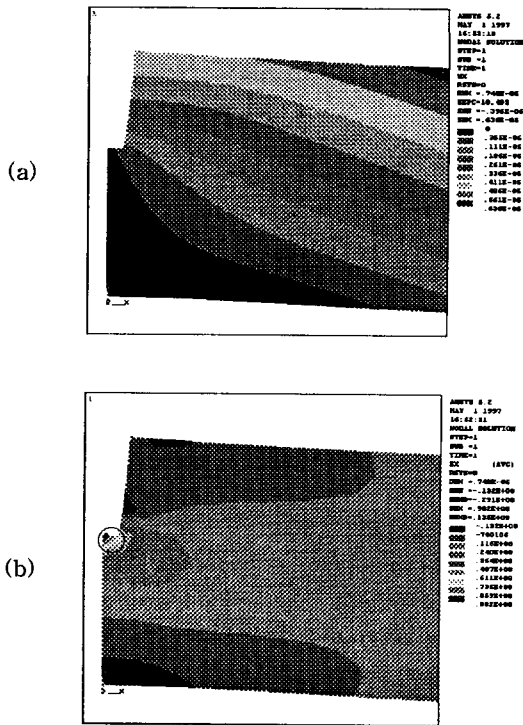


Fig 4. (a) the distribution of in-plane displacement and (b) the distribution of in-plane stress with stress concentration around a crack in a specimen by finite element analysis

### 5. 실험 결과 및 고찰

그림 5는 실험에 사용되어진 ESPI와 화상 획득 및 처리 시스템의 구성도이다. 그림을 보면 위상이 동범을 수행하기 위하여 PZT에 일정 크기로 전압을 주어 각각의 화상이 일정한 위상차를 지닐 수 있도록 PZT driver를 컴퓨터와 연결하여 자동으로 위상을 맞추어 줄 수 있도록 구성하였다.

이 시스템에 사용된 레이저는 파장이  $532nm$ 인 CW Nd:YAG 2nd Harmonic 레이저이며 시편의 변형으로 인하여 측정된 간섭무늬는 CCD 카메라를 통해 그 상을 획득할 수 있도록 구성되어 있다. CCD는  $512 \times 512$  화소로 이루어진 단색 비디오 카메라를 사용하고 있으며, 최적의 간섭무늬 계측은

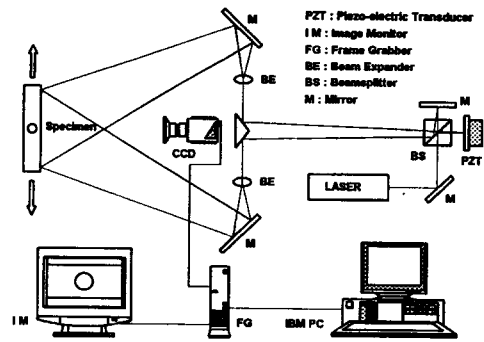


Fig 5. Schematic of the laser interferometer used in the ESPI and image acquisition system

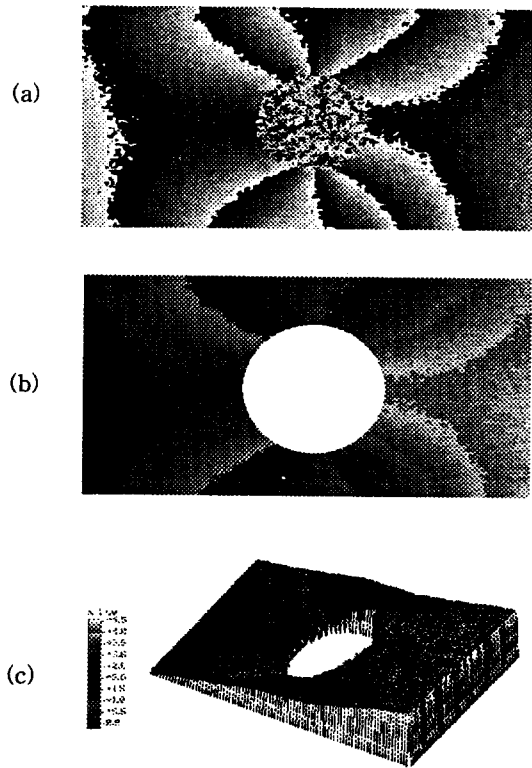


Fig 6. The results of a deformed specimen with a central hole; (a) the phase map of fringe, (b) the unwrapping image for quantification and (c) 3-D plot of fringe with  $4.5 \mu m$  displacements

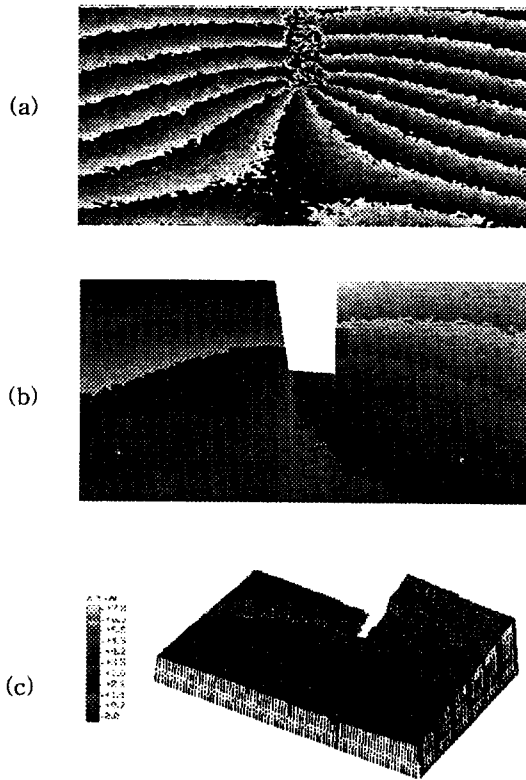


Fig 7. The results of a deformed specimen with a central crack; (a) the phase map of fringe, (b) the unwrapping image for quantification and (c) the 3-D plot of fringe with  $7.0 \mu m$  displacements

화소의 밝기값이 포화 상태에 가까울 때 이루어졌다.

그림 6을 보면 원형 구멍을 가지고 있는 시편이 3.5 kPa의 인장응력을 받을 때, 그에 따른 위상도와 정량화한 값들을 보여준다. 위상도는 위에서 언급하였듯이 변형전 4개의 이미지과 변형후 4개의 이미지를 받아 그 이미지들의 차를 식 (5)와 같이 조합하여 구한 상을 말한다. 그림 6의 (a)인 위상도만으로는 완벽하게 정량화가 이루어지지 않은 상태이므로 이 위상도의 위상을 펼치는 이미지 처리 작업을 해주는데 그 결과가 그림 6의 (b)이다. 그 결과 약  $4.5 \mu m$ 의 변위가 생성됨을 알 수 있으며, 그림 3의 유한요소해석 결과와 약 6%의 오차를 허용하고 있다.

홈이 있는 시편도 원형 구멍이 있는 시편과 마찬가지로 위상이동법을 사용하여 그림 7과 같이 먼저 위상도를 구하고, 정량화를 위해 위상 펼치기와 3차원 도면을 구하였다. 그 결과 인장 응력이 3.5 kPa일 경우 변위가 약  $7 \mu m$ 임을 알 수 있으며, 유한요소해석 결과와 비교하여 약 8.6%의 오차를 갖고 있다.

## 5. 결 론

축 방향으로 인장력이 가해진 시편의 면내 변형을 알아보기 위하여 실험에 앞서 유한요소법을 통해 그 결과를 어느 정도 유추하였으며, 실제 ESPI 시스템을 구성하여 원판의 변형 간섭무늬를 획득해본 결과 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것을 보였다.

따라서 본 실험은

첫 번째, ESPI 시스템을 구성하여 원형 구멍과 홈이 있는 시편의 면내 미소 변형을 측정하였고  
 두 번째, 유한요소법을 이용하여 변형이 급격히 일어나는 응력집중부를 알아보았으며  
 세 번째, ESPI에 의한 결과값과 유한요소해석에 의한 결과를 비교·검증하였다.

본 연구를 확장하면 차체 판넬의 변형, 용접부의 결합, 연결 장치의 변형 등 현장에 존재하는 많은 부품의 변형을 실 시간적으로 측정할 수 있으리라 예상된다.

## REFERENCE

1. D. Gabor, 1948, "A new microscopic principle", Nature(London), Vol.161, 777.
2. Charles M. Vest, 1979, "Holographic Interferometry", John Wiley & Sons. Press, pp. 36-66.
3. R. Jones and C. Wykes, 1989, "Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed.", Cambridge Univ. Press, pp. 165-196.
4. K. Creath, 1991, "Phase-measurement interferometry: Beware these errors", SPIE, Vol. 1553, pp. 213-220.
5. ANSYS Procedures Volume I User's Manual, Reversion 5.2, 1994, Swanson Analysis System, Inc.