

# Shearography의 1차도함수로부터 면외변위의 정량적 추출

김경석 †·윤홍석 \* ·박찬주 \* · 최정석 \*\*

## Quantitative Determination of Out-of-plane Displacement by Shearography

Koungsuk Kim, Hongseok Yoon, Chanju Park, Jungsuk Choi

**Key Words:** Shearography(전자전단간섭법), Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리 스펙클페턴 간섭법), Out-of-plane displacement(면외변위), Amount of shearing(전단량)

### Abstract

The paper describes the quantitative determination of out-of-plane displacement from result of Shearogrphy, which can measure the first-order partial derivative of out-of-plane displacement directly. However, the differential sensitivity of Shearography is related to the amount of shearing, which is manually adjustable in optical interferometer and affects the quantitative determination. The relationship between those is inspected by comparing ESPI with Shearography. From the result, the amount of shearing plays a modulation factor of out-of-plane displacement and small amount of shearing gives good agreement with out-of-plane displacement.

### 1. 서 론

레이저를 이용해 비접촉으로 측정대상의 표면변위를 전영역에 걸쳐 실시간적으로 해석할 수 있는 대표적인 방법으로 전자처리 스펙클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI)을 가장 많이 연구를 하고 있다. 이 기법은 레이저의 우수한 간섭성질을 기반으로 스펙클간의 상관 간섭현상을 이용하여 물체의 표면변위를 측정하는 기술로 국내뿐만 아니라 국외에서도 많

은 연구가 진행이 되어 기계분야의 해석기술로 인정을 받고 있다<sup>1)</sup>. 그러나, ESPI는 고감도 측정 기술로서 진동 및 유체흐름 등의 환경외란에 매우 민감하여 열악한 환경에서 적용에는 어려움이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고자 스펙클 간섭법의 한 분야인 Shearography를 이용하고자 한다. 1974년 Hung<sup>2)</sup>에 의해 제안된 Shearography는 간섭계 구성의 특징으로 면외변위의 1차 미분값을 직접 측정할 수 있는 장점이 있다. 즉, 환경외란에 해당하는 물체의 병진운동에 둔감하다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 측정된 면외변위의 1차 미분값을 이용하여 Shearography 간섭계의 특성을 분석하고, 영향인자들을 고려한 수치해석을 통하여 면외변위를 정량적으로 추출할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

---

† 조선대학교 기계정보공학과

E-mail : gsckim@chosun.ac.kr

TEL : (062) 230-7004 FAX : (062) 230-7838

\* 조선대학교 대학원

\*\* 독포과학대학 메카트로닉스과

---

## 2. 이론

### 2.1 스페클간섭법(Speckle interferometry)

스페클 간섭법은 간섭성이 우수한 레이저를 물체에 조사할 때 레이저 파장보다 큰 표면거칠기로 인하여 생기는 스페클의 상관간섭법을 이용하여 물체의 표면변위를 측정하는 기술로 초기의 스페클포토그래피(Speckle photography)에서 화상처리장치들과 조합하여 ESPI와 Shearography로 발전하게 되었다. Fig. 1에서 광원으로부터 나온 빛은 광분리기(Beam Splitter)에서 CCD 카메라로 접적 입사되어 기준이 되는 참조광(Reference beam)과 대상체에 조사되어 물체의 변형정보를 포함하고 CCD 카메라로 입사되는 물체광(Object Beam)으로 나누어진다. 다시 두 개의 빛은 광합성기(Beam combiner)에 의해 중첩이 되어 간섭을 일으키며, ESPI 및 Shearography 기법에서는 화상처리 장치에 의해 물체 변형 전과 변형 후의 두 개의 스페클패턴을 CCD 카메라에 의해 기록하게 된다. 식(1)은 변형 전후의 스페클 패턴의 광강도를 나타낸 식이다<sup>3)</sup>.

$$\begin{aligned} I_{\text{before}} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi \\ I_{\text{after}} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi) \end{aligned} \quad \text{-----(1)}$$

여기에서,  $I_R$  : 참조광의 광강도

$I_O$  : 물체광의 광강도

$\phi$  : 참조광과 물체광의 초기위상차

$\Delta\phi$  : 물체의 변형

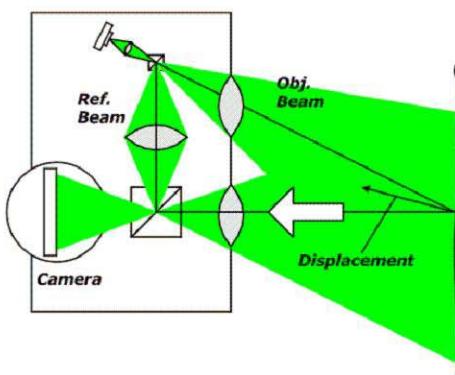


Fig. 1 Out-of-plane sensitive ESPI

스페클상관간섭무늬(Speckle correlation fringe pattern)는 변형전후의 스페클 패턴을 감산처리하여 얻을 수 있으며, 다음 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} I &= I_{\text{before}} - I_{\text{after}} \\ &= 4\sqrt{I_R I_O} \sin(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi) \sin(\frac{1}{2}\Delta\phi) \end{aligned} \quad \text{-----(2)}$$

최근에는 1985년 Creath에 의해 제안된 위상이동기법(Phase shifting method)을 사용하여 Phase map을 형성하고, 결편침 기법(Unwrapping)을 적용하여 정량해석을 하고 있다<sup>4)</sup>. 본 연구에서도 정량해석의 자동화가 가능한 4단계위상이동기법을 적용하여 측정량의 정량화를 하였다.

### 2.2 Shearography 원리

Shearography의 측정원리는 ESPI와 같으나, 독특한 광학간섭계의 특징으로 측정결과는 물체 표면변위의 1차 미분값을 직접 측정할 수 있다.

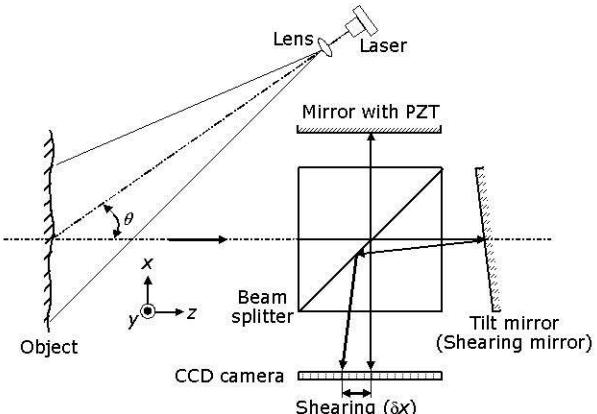


Fig. 2 Optical setup of Shearography

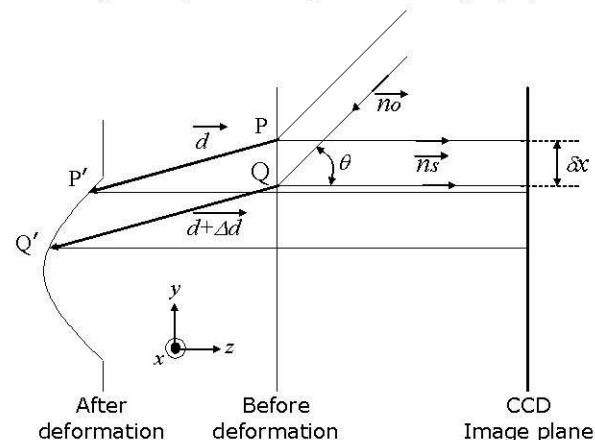


Fig. 3 Geometric optical path in Shearography

레이저로부터 나온 광원은 렌즈(Lens)를 통해 시험편에 확산 조사되고 대상체 표면으로부터 반사된 레이저광은 광분할기(Beam Splitter)에 의해 참조광과 물체광 두 개의 광으로 나뉘게 된다. 두 개의 광은 PZT(Piezoelectric Transducer) Mirror와 전단량을 조절하는 전단거울(Tilt mirror)에서 반사되고 다시 중첩이 되어 CCD 카메라에 기록되어진다. Shearography에서 물체 변형에 따른 기하학적 광로 변화를 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 물체 위의 임의의 점  $P$ 와 변형 후의 점  $P'$ , 전단량( $\delta x$ )에 의한  $Q$ 와 변형 후의 점  $Q'$ 에서의 각각의 위상차는 각각 식(3)과 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_p = \frac{2\pi}{\lambda} [d_1(1 + \cos\theta) + d_2 \sin\theta] \quad \text{-----(3)}$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(d_1 + \Delta d)(1 + \cos\theta) + (d_2 + \Delta d)\sin\theta] \quad \text{-----(4)}$$

여기에서  $d_1$  와  $d_2$ 는 변위  $d$ 의  $z$ 축과  $y$ 축 성분이다. 또한, 식(4)에서  $\Delta d$ 는 테일러 정리에 의하여 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \cdot \delta x \quad \text{-----(5)}$$

따라서, 식(4)는 식(6)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ (d_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x} \cdot \delta x)(1 + \cos\theta) + (d_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x} \cdot \delta x)\sin\theta \right] \quad \text{-----(6)}$$

물체로의 입사각  $\theta$ 가 작으면  $\sin\theta \approx 0$  이므로 점  $P$ 와  $Q$ 에서의 변형 전후의 위상차  $\delta\phi$ 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta\phi = \delta\phi_Q - \Delta\phi_p \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_1}{\partial x} \delta x \quad \text{----- (7)}$$

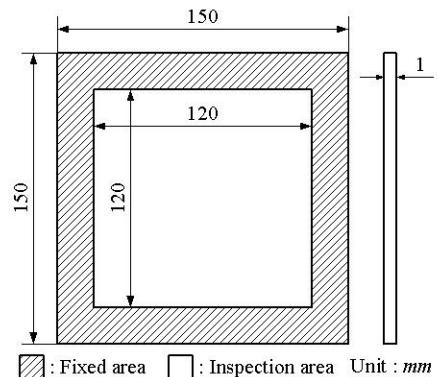


Fig.4 Geometry of specimen

Shearography는 면외변위에 대한 1차 미분값을 직접 구할 수 있으며, 전단량  $\delta x$ 에 의해 광학간섭계의 민감도를 조절할 수 있게 된다. 또한, 식(7)에서 전단거울을 이용하여 제어가 가능한 전단량은 간섭계의 민감도와 면외변위의 정량화에 많은 영향을 미치게된다. 즉, 작은 전단량은 곡률이 큰 면외변위 측정을 어렵게 하며, 큰 전단량은 작은 면외변위를 무시할 가능성이 있게 된다. 따라서, 면외변위의 정량화를 위해서는 전단량과 면외변위량과의 관계를 규명할 필요가 있다.

### 3. 실험장치구성 및 방법

본 논문에서는 독일 Ettemeyer사의 ESPI 시스템과 Shearography 시스템을 동시에 사용하였으며, 실험을 위한 시험편은 Fig. 4와 같이 STS304 시험편의 4면을 강력하게 기계적 구속을 하고, 시험편의 후면에서 마이크로미터로 중심부에서 강제변위를 주어 측정면에서 면외변위를 일으킬 수 있도록 제작하였다. 또한,  $d_2$  성분의 효과적 제거를 위해 대상체와 측정센서와의 충분한 간격을 주어  $\theta$ 의 크기를 매우 작게 하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 ESPI 와 Shearography 비교실험

시험편의 변형을 ESPI와 Shearography를 이용하여 동시에 측정하게 된다. 면외변위에 의해 Fig. 6과 같이 Phase map을 두 개의 기법으로 얻게되고, Fig. 7과 같이 정량분석결과를 line profile의 형태로 구하게 된다. 본 논문에서는

Fig. 7(b)의 Shearography의 결과를 수치 해석하여 실제 면외변위를 구하는 것이다. Fig. 8은 Shearography에서 획득한 profile를 수치 적분한 결과와 ESPI 측정결과를 비교한 것으로 식(7)에서 예측한 것과 같이 전단량이 이득으로 존재하면서 실제 측정값과 많은 오차를 보이고 있다.

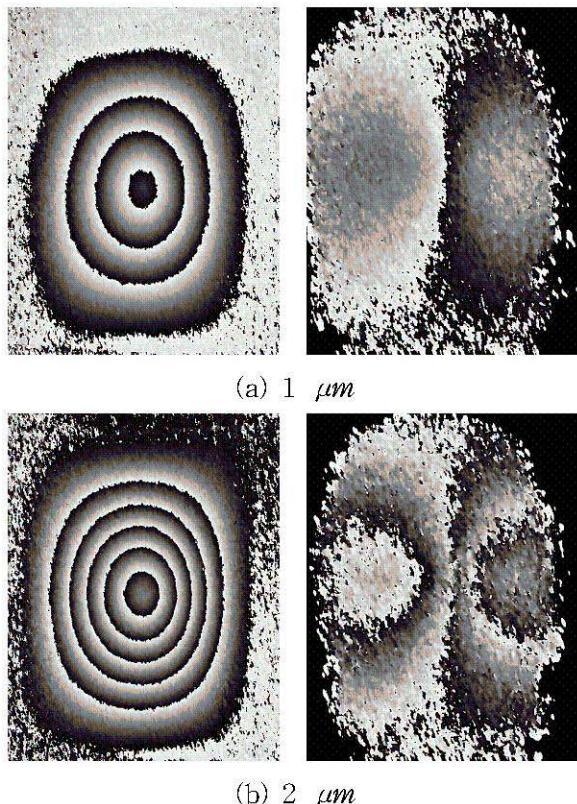
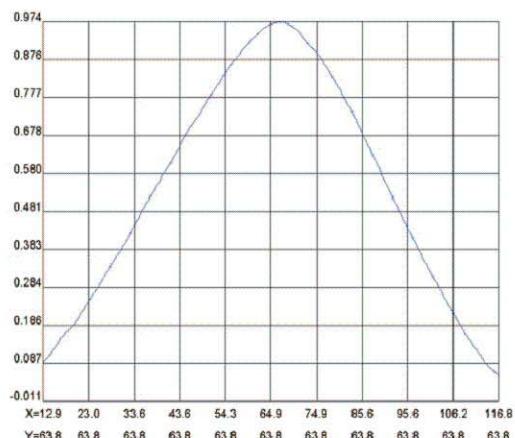
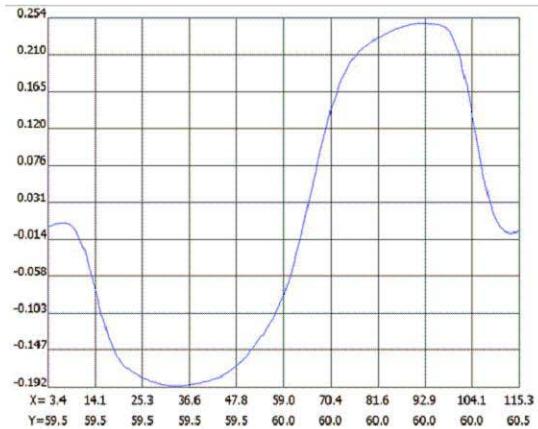


Fig. 6 Phase map of ESPI (left) and Shearography (right) in out-of-plane displacement



(a) Displacement profile in ESPI



(b) Displacement profile in Shearography  
Fig. 7 Displacement profile

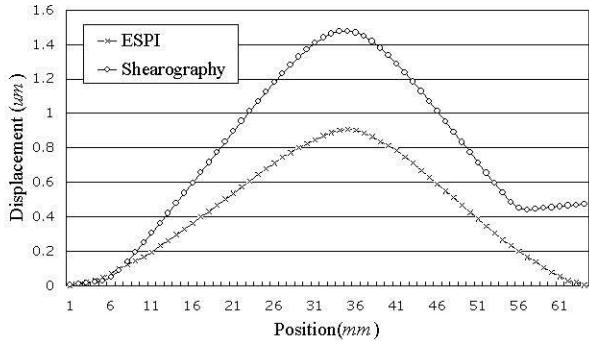


Fig. 8 Comparison of ESPI and Shearography

#### 4.2 전단량의 영향분석

Fig. 8의 결과로부터 전단량(Shearing)의 영향을 실험을 통하여 분석하였다. Fig. 9는 전단량의 변화에 따라 물체의 면외변위를 Shearography의 측정결과를 적분한 결과와 ESPI결과와 비교하였다. 결과에서 전단량이 클수록 오차가 많은 것을 알 수 있으며, 전단량은 작은 값일수록 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 사실을 알 수 있다. 그러나, 실험에서 ESPI 시스템과 Shearography 시스템을 동시에 측정하여야 한다는 장치구성의 한계로 전단량을 4.5 mm 이하에서 측정이 어려웠다. 전단량 4.5 mm에서 오차는 15%로 모든 변위에 대해 일정하게 발생하고 있다. 이는 측정 결과를  $\delta x \rightarrow 0$ 의 조건으로 적분한 결과이며, 실제 실험에서 존재하는 전단량의 인자를 고려하지 않은 것으로 측정변위 전체에 오차가 발생하고 있다.

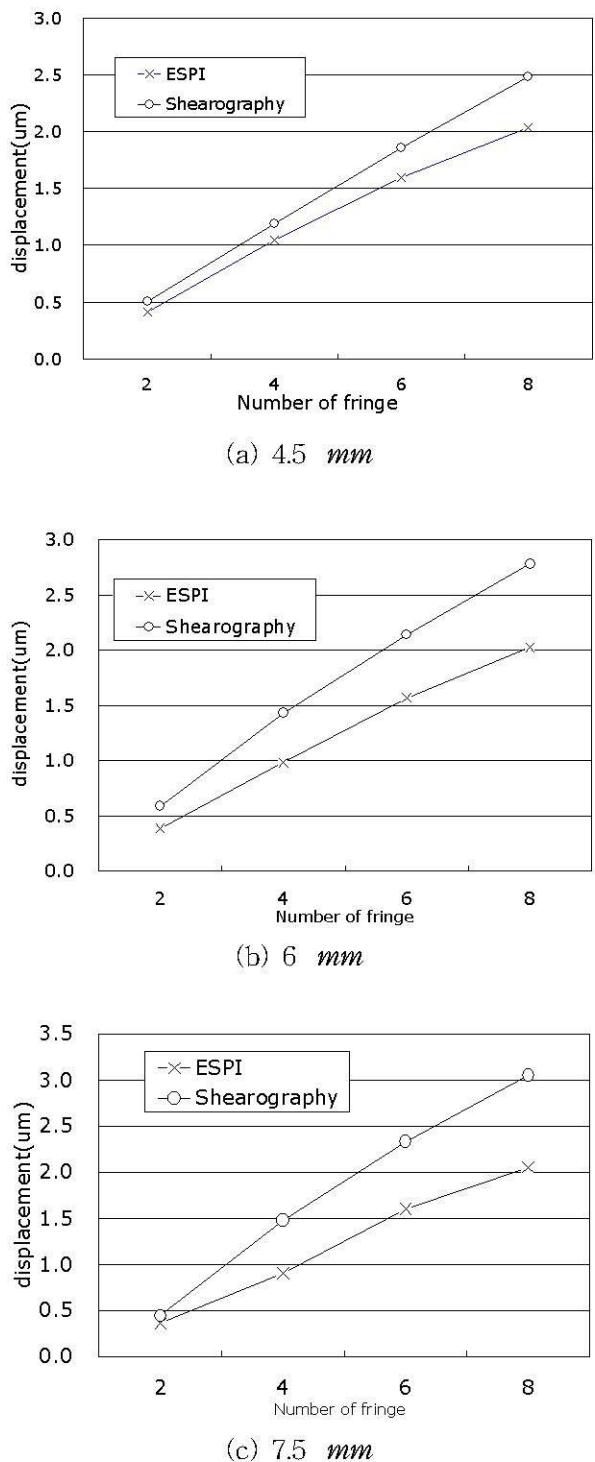


Fig. 9 Comparison of ESPI and Shearography according to amount of shearing

의 표면변위측정에 많은 해답을 제공하고 있으나, 사용자의 환경제약이 있었다. 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 Shearography를 이용하여 면외변위를 측정할 수 있는 새로운 개념을 제시하였다. Shearography의 측정결과를 적분하여 구할 수 있는 면외변위값은 광학간섭계에서 조절이 되는 전단량의 인자와 관련되어 있다는 사실을 밝혔으며, 전단량과 면외변위의 상관관계를 실험적으로 조사하였다. 결과로부터 작은 전단량에서 차가 가장 작으면서 일관성있는 데이터를 제공하고 있음을 보였다. 또한, 이 오차율이 적분하는 과정에서 영향인자로 작용하고 있음을 보였다. 본 연구를 바탕으로 전단량을 최소화 할 수 있는 광학시스템의 구성과 오차율-전단량의 상관관계를 고려한 수치적분을 수행함으로서 Shearography를 이용한 면외변위를 직접적으로 추출할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) G.L. Cloud, 1990, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press., England, Ch. 21.
- (2) Y.Y. Hung, 1974, A Speckle-shearing Interferometer: A tool for measuring derivatives of surface displacements , *Optics Communications*, Vol. 11, pp. 132~135.
- (3) Jones, R and Wykes, C., 1983., *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts.
- (4) Henri A. Vrcoman and Ad A. M. Mass, 1999., "Image processing algorithms for the analysis of phase-shifted speckle interference pattern", *Applied Optics*, Vol. 30, No. 13, pp 1636 ~ 1641.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 물체의 면외변위 측정을 위해 Shearography를 이용하였다. 기존 ESPI가 물체