

## 전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량적 계측

장호섭\*, 정성욱\*\*, 김경석\*\*\*, 정현철#

### Quantitative Measurement of Out-of-plane Deformation Using Shearography

Ho-Seob Chang\*, Sung-Wook Jung\*\*, Kyoung-Suk Kim\*\*\* and Hyun-Chul Jung#

#### ABSTRACT

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) is a common method for measuring out-of-plane deformation and in-plane deformation and applied for vibration analysis and strain/stress analysis. However, ESPI is sensitive to environmental disturbance, which provide the limitation of industrial application. On the other hand, Shearography based on shearing interferometer which is insensitive to vibration disturbance can directly measure the first derivative of out-of-plane deformation. In this paper a technique that extract out-of-plane deformation from results of shearography by numerical processing is proposed and measurement results of ESPI and Shearography are compared quantitatively.

**Key Words** : Electronic Speckle Pattern Interferometry (전자처리 스펙클 간섭법, ESPI), Shearography (전단간섭계), Out-of-plane deformation (면외변형), Shearing (전단), gradient (구배)

#### 1. 서론

일반적으로 변형을 측정하는 계측방법은 크게 접촉식과 비접촉식으로 나뉘게 된다. 그중 대상물의 변형률을 측정하는 대표적인 접촉식 방법은 스트레인게이지를 이용하는 방법이다. 비접촉식 측정은 카메라의 픽셀을 이용하는 방법, 도플러의 원리를 이용하는 방법 등이 있으나, 대표적인 비접촉식 변형측정 방법은 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)으로서 대상물의 전 영역에 걸쳐 실시간 측정

및 해석할 수 있는 방법으로 레이저의 시간적·공간적인 가간섭성을 이용한다.<sup>1</sup> 그러나 ESPI는 물체의 변형을 정밀하게 측정할 수 있으나 외부에서 발생하는 외란에 매우 민감하여 외부진동을 감쇠하는 방진 테이블이 없는 산업현장에서는 그 적용성이 매우 낮다. 반면에 전단간섭계(Shearography)를 이용한 계측기법은 간섭계의 특성상 대상물에 발생하는 변형의 구배를 측정하기 때문에, 물체의 결함검출이 용이하고 진동등과 같은 외란에 매우 강인하다는 장점을 바탕으로 산업현장에서 비파괴검사 기

접수일: 2006년 3월 27일; 게재승인일: 2007년 2월 26일

\* 조선대학교 일반대학원 기계설계공학과

\*\* 조선대학교 레이저응용 신기술개발 연구센터

\*\*\* 조선대학교 기계설계공학과

# 교신저자: 조선대학교 기계설계공학과

E-mail: yonggary@soback.kornet.net Tel. (062) 230-7839

법으로 많이 사용되고 있다.<sup>2</sup>

그러나 전단간섭계는 변형의 구배만을 측정하는 데 이용되고 있으며, ESPI가 측정할 수 있는 면외변형을 직접 측정할 수는 없었다.<sup>3,4</sup>

본 연구에서는 전단간섭계를 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 정량적으로 계측하여, ESPI를 이용한 계측결과와 비교하고 전단간섭계의 산업적 활용성을 높이고자 한다.

## 2. 원리

### 2.1 스펙클 간섭법의 원리

ESPI는 집속성과 간섭성이 우수한 레이저가 대상물체에 조사되었을 때 대상물의 표면에 발생하는 스펙클을 이용하여, 광학 간섭계를 구성하고, 대상물의 변형 전 후의 상관관계에 따라 발생하는 간섭 줄무늬를 해석하는 방법이다.

광학적으로 거칠기를 갖는 물체 표면에 레이저가 조사되면 물체에서 난반사가 일어나고 이 난반사된 빛들이 서로 간섭되면서, 어른거리는 회고 검은 반점 형태의 간섭 현상이 발생하는데 이것을 스펙클이라 한다. 스펙클은 대상물의 상태에 대한 중요한 위상정보를 포함하게 되며, 그 정보는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 화상처리 장치에 저장/처리되어 변형의 정보로 바뀌게 된다.<sup>5</sup>

Fig. 1은 면외변형 측정을 위한 시스템의 개략도로서, 하나의 레이저에서 나온 빛은 둘로 나누어져서 하나는 물체광으로서 대상물에 조사되어 난반사된 후 CCD 카메라에 입사되고, 다른 하나는 참조광으로서 대상물에 난반사되지 않고 CCD 카메라로 직접 입사되며, 이들의 간섭으로 대상물의 위상정보를 저장한다. 이렇게 물체광과 참조광의 간섭에 의해 식 (1)과 같은 레이저 빛의 강도분포를 갖는 제 3의 스펙클패턴을 형성하게 된다.

$$I_{before} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi \quad (1)$$

$$I_{after} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

여기에서  $I_{before}$ 는 변형전 물체광과 참조광의 간섭에 의한 광강도 분포이며,  $I_O$ 는 물체광의 광강도 분포,  $I_R$ 은 참조광의 광강도 분포이고,  $\phi$ 는 물체광과 참조광의 초기위상차이다.

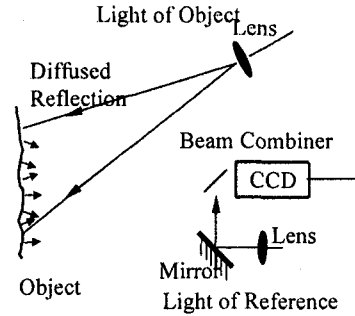


Fig. 1 Interferometer for out-of-plane deformation measurement

$I_{after}$ 는 변형 후 광강도 분포이고,  $\Delta\phi$ 는 물체의 변형에 기인한 위상변화이다. 변형 전후 두개의 스펙클 패턴을 감산처리하면 식 (3)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$I_{sub} = I_{before} - I_{after} \\ = 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \quad (3)$$

$I_{sub}$ 는 대상물의 변형 전후 감산처리된 광강도 분포로서, 변형에 따른 간섭줄무늬 패턴이 나타나게 된다.

Fig. 2에서와 같이 대상물의 변형에 의해 발생하는 점 P와 점 P'의 광경로 변화는 위상차를 발생시키며, 그 위상차  $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 표현되며, n은 단위 벡터이며, d는 변형벡터이다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_s) \cdot d \quad (4)$$

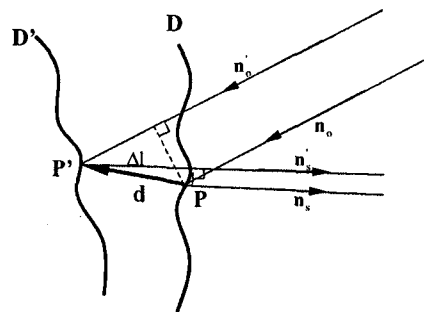


Fig. 2 Optical path change as the object deformation

### 2.2 정량해석의 원리

간섭줄무늬 패턴으로는 대상물의 변형을 정량적으로 해석할 수 없으며, 단지 시각적으로 대략적인 변형만을 추측하게 된다. 변형을 정량적으로 해석하기 위해서는 식 (1)에 표현된 미지수가 3개( $I_1, I_2, \phi$ )이므로 최소한 3개 이상의 방정식이 필요하게 되는데, 이를 위하여 대상물의 임의의 상태에서 3장 이상의 이미지를 저장하게 된다.

이를 적용하기 위한 방법으로 Piezo-electric transducer(압전소자, PZT)를 이용한 위상이동 기법을 가장 많이 사용하고 있으며, 이 기법에서는 참조광에 PZT 등으로 인위적인 위상변화를 발생시켜 식 (5)와 같이 4단계 위상이동기법을 적용한다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi \\
 I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi/2) \\
 I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi) \\
 I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + 3\pi/2)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

식 (5)와 같이 저장된 이미지를 식 (6)의 식에 대입하면, 임의의 상태에 대한 대상물의 위상정보를 계산할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right\}
 \tag{6}$$

### 2.3 전단간섭계의 원리

Fig. 3는 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스펙클의 발생은 ESPI와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기(Beam Splitter : B.S)에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD의 상면에 맺히게 된다.

이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 ESPI와 동일하며, 변형 전후 감산처리로 발생하는 간섭줄무

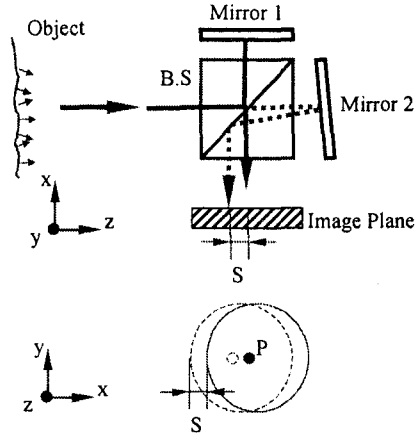


Fig. 3 Shearography interferometry

늬는 ESPI와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 구배의 결과를 표현하게 된다.

Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고  $s$ 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다.

전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 ESPI와 유사하기 때문에 식 (4)를 이용하게 된다. 이때 식 (4)와의 차이점은 식 (7)에 표현한 바와 같이  $d$ 와  $d'$ 은 대상물위의 점  $P$ 에서 발생한 변형과 전단량만큼 떨어진 곳의 변형이다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_s) \cdot (d - d')
 \tag{7}$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 일치하면 식 (7)을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d
 \tag{8}$$

$\Delta d$ 는 테일러급수에 의해 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며,  $x$ 방향의 변형  $\Delta x$ 는 상면에서 전단량  $S$ 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식 (9)에서 2차 이상의 고차항은 무시하고, 식 (9)은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

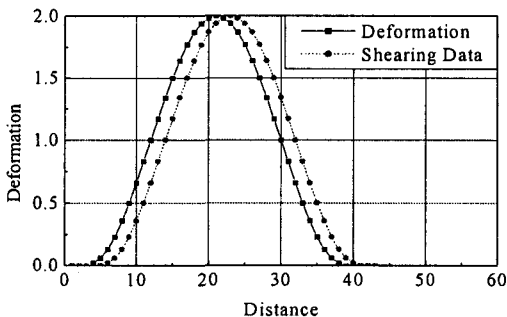
$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (9)$$

$$\Delta d = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial d}{\partial x} \right) S \quad (10)$$

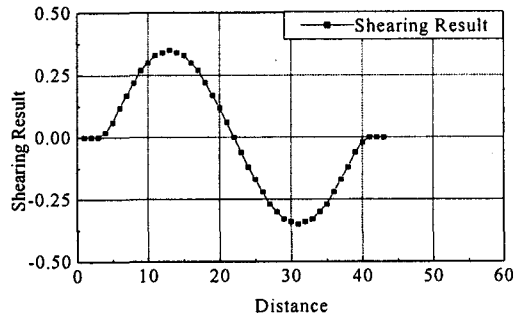
### 2.4 적분에 의한 면외변형 복원 개념

고정단을 가지는 평판에 발생하는 면외변형은 cosine 함수로 나타나며, Fig. 4(a)의 실선과 같은 형태이다. Fig. 3에 표현된 전단거울(Mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 4(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 4(b)는 전단간섭계로 표현되는 변형 전후의 비교결과로서, Fig. 4(a)에 표현된 두 값을 감소한 결과와 동일하다. 이는 통상적인 전단간섭계를 이용한 측정결과와 동일한 형태이며, 통상 이를 변형의 기울기라고 표현한다.

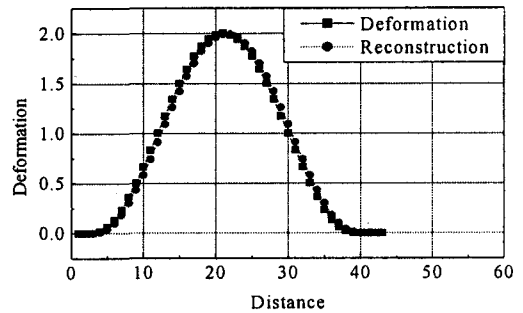
본 연구에서는 제안하는 내용은 Fig. 4(b)의 결과를 평행 이동한 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 4(c)와 같으며, 전단간섭계만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다. 또한, 전단간섭계는 간섭계의 구성상 하나의 이미지로부터 전단이미지를 구하여 간섭정보를 기록하게 되므로 전단량으로 인하여 복원된 결과는 전단량의 1/2만큼 전단되어 나타나게 된다.



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 4 Algorithm of deformation reconstruction

## 3. 구성 및 방법

### 3.1 실험장치 구성 및 방법

본 연구에서는 ESPI와 전단간섭계를 동시에 사용하였으며, 레이저는 파장이 532 nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였다.

정량해석을 위해 철판과 구리를 이용하여, Fig. 5에 표현한 것과 같이 두께 3 mm인 철판(110 mm × 110 mm)에 지름이 50 mm인 원공을 만들고, 1 mm 두께의 구리판(110 mm × 110 mm)을 접착한 후 철판을 4번을 고정하였다. 대상물의 측정면 반대편에서 PZT를 이용하여 정밀한 반복변형을 부과할 수 있는 변형발생장치를 설치하였으며, 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 5와 같다.

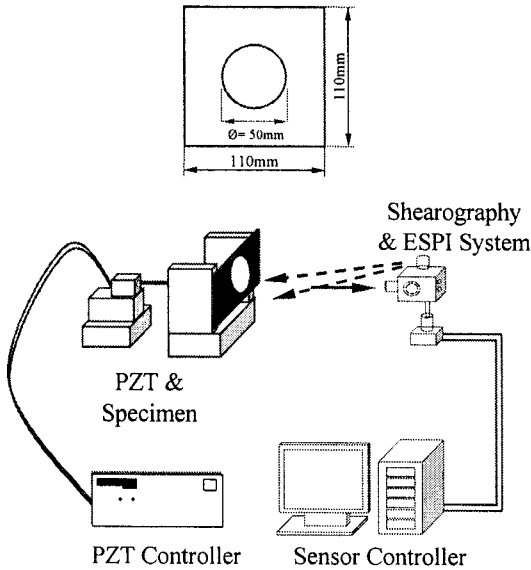


Fig. 5 Specimen and schematic of system

ESPI 측정결과와 제안된 방법에 의한 측정결과를 비교하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. 먼저, 전단량을 일정하게 하고, PZT를 이용하여 변형을 일정하게 증가시키면서 ESPI와 전단간섭계를 이용하여 동시에 측정하였으며, 또한 변형을 일정하게 하고 전단량을 일정하게 증가시키면서 동시에 실험을 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 전단량 고정 변형량 변화

앞에서 언급한 바와 같이 전단간섭계의 전단량을 5 mm로 고정하고, 변형은 PZT 지시창의 숫자를 0.5 μm부터 2.5 μm까지 0.5 μm씩 일정하게 증가시키면서 실험하였고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 변형량의 증가에 따라 ESPI와 전단간섭계 모두 Phase-map에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, ESPI 측정결과는 PZT의 수동 조작한 결과와 거의 같음을 알 수 있다.

Fig. 6은 ESPI와 전단간섭계를 이용한 변형량 변화에 따른 측정결과의 프로파일을 나타내고 있으며, Fig. 7은 ESPI 측정결과와 전단간섭계를 이용한 제안된 방법에 의한 변형 측정결과를 비교하고 있으며, 그래프의 선형성은 실험 수행의 신뢰성을 나

Table 1 ESPI and Shearography phase-map according to deformation variation

Deform. (μm)	ESPI		Shearography	
	Phase-map	Deform. (μm)	Phase-map	
0.488		0.502		
0.957		0.938		
1.457		1.139		
1.941		1.905		
2.492		2.453		

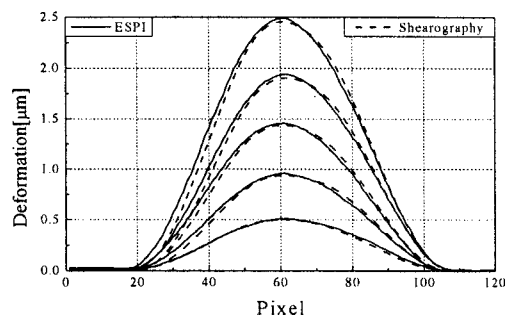


Fig. 6 Deformation profile according to deformation variation

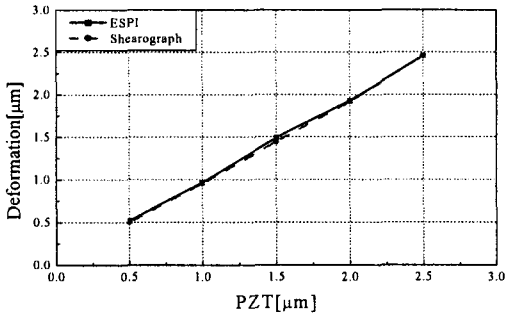


Fig. 7 Measurement result of ESPI vs Shearography according to deformation variation

타내고 있다.

Fig. 6은 ESPI와 전단간섭계를 이용한 변형량 변화에 따른 측정결과의 프로파일을 나타내고 있으며, Fig. 7은 ESPI 측정결과와 전단간섭계를 이용한 제안된 방법에 의한 변형 측정결과를 비교하고 있으며, 그래프의 선형성은 실험 수행의 신뢰성을 나타내고 있다. 또한, 그 오차는 1.66%로 제안된 방법이 매우 신뢰도가 높음을 나타내는 결과이다.

#### 4.2 변형량 고정 전단량 변화

본 실험은 대상물의 변형량은 1 μm로 고정하고, 전단간섭계의 전단량을 일정하게 변화시키면서 그 결과를 측정하였으며, 전단량은 상면에서 1mm부터 15mm까지 변화시켰으며, 화소수는 각 전단 이미지에서 전단량에 대응하는 화면에서의 픽셀수이다. Table 2에서 보는 바와 같이 거의 동일한 변형이라 할지라도, 전단간섭계는 전단량의 증가에 따라 Phase-map에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정한 비율로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 전단량 변화에 따른 전단간섭계를 이용한 측정결과의 프로파일을 나타내고 있으며, 이는 거의 동일한 변형을 측정한 결과이며, 앞에서 언급한 바와 같이 복원된 결과에서 변형의 최고값의 위치가 전단량의 1/2만큼 전단방향으로 이동되어 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 ESPI를 이용한 측정결과와 제안된 방법에 의한 실험결과로써, 전단량 변화에 따른 변형 측정결과를 비교하고 있으며, 그래프상의 결과는 그 오차는 1.76%이다.

Table 2 ESPI and Shearography phase-map according to shearing amount variation

Shearing amount		Phase-map	
mm	Pixel	ESPI	Shearography
1	5		
2	9		
3	14		
5	24		
10	48		
15	72		

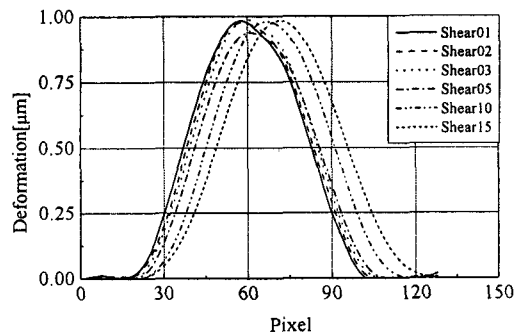


Fig. 8 Deformation profile according to shearing amount variation

## 참고문헌

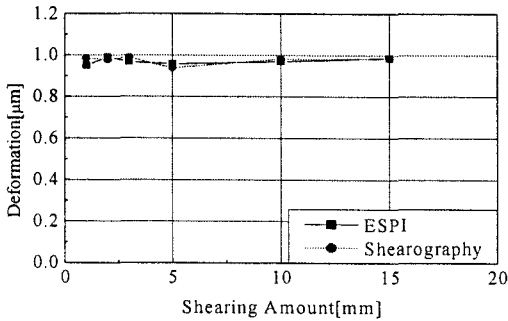


Fig. 9 Measurement result of ESPI vs Shearography according to shearing amount variation

## 5. 결론

본 연구에서 ESPI와 전단간섭계를 이용한 동일한 대상물의 변형계측 실험을 통해 얻은 변형의 결과들을 비교하여 전단간섭계의 산업 현장의 적용성을 높이며, 결함의 계측과 동시에 면외변형의 정량 계측이 가능한 비파괴검사 장비로 활용할 수 있는 방법을 제시하였고, 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

1) ESPI를 이용한 면외변형의 측정결과와 제안된 방법의 전단간섭계에 의한 면외변형의 측정결과를 비교한 결과 약 1.7%의 오차를 나타내고 있으며, 전단간섭계를 이용하여 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.

2) 제안된 방법에 의한 전단간섭법 면외변형의 해석영역은 변형영역보다 전단량만큼 증가되어 그 결과를 제시함을 알 수 있다.

3) 제안된 방법은 외란에 민감한 ESPI의 제한사항을 극복할 수 있는 방법으로 산업현장에서 크게 활용될 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 산업자원부 한국산업기술평가원지정 지역협력연구센터인 조선대학교 산학협력단 레이저 응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

1. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, pp. 156-158, 1989.
2. Steinchen, W. and Yang, L., "Digital Shearography," SPIE Press, pp. 27-54, 2003.
3. Robinson, D. W. and Reid, G. T., "Interferogram Analysis," Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, pp. 95-114, 1993.
4. Baik, S. H., Park, S. K. and Kim, C. J., "Applications of Speckle Interferometer," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 14-18, 2004.
5. Kang, Y. J., Lee, J. S., Park, N. K. and Kwon, Y. K., "Ideal Phase map Extraction Method and Filtering of Electronic Speckle Pattern Interferometry," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 20-26, 2002.