

# 광학적 비접촉 측정에 의한 구조물 해석의 화상처리 계측 시스템 개발에 관한 연구

장순석\*, 김경석\*\*, 양승필\*\*\*, 정현철\*\*\*\*, 강기수\*\*\*\*, 김종수\*\*\*\*, 최지은\*\*\*\*

## A Study on the Development of Image Processing Measurement System on the Structural Analysis by Optical Non-contact Measurement

Soon Suck Jarng\*, Kyoung Suk Kim\*\*, Sung Pil Yang\*\*\*,  
Hyun Chul Jung\*\*\*\*, Ki Soo Kang\*\*\*\*, Jong Soo Kim\*\*\*, Ji Eun Choi\*\*\*\*

### Abstract

This study discusses a non-contact optical technique, electronic speckle pattern interferometry(ESPI), that is well suited for in-plane and out-of-plane deformation measurement. However, the existing ESPI methods that are based on dual-exposure, real-time and time-average method have difficulties for accurate measurement of structure, due to irregular intensity and shake of phase. Therefore, phase shifting method has been proposed in order to solve this problem. About the method, the path of reference light in interferometry is shifted and added to least square fitting method to make the improvement in distinction and precision. This proposed method is applied to measure in-plane displacement, that is compared with the previous method. Also, Used as specimen, AS4/PEEK [30/-30/90]s was analyzed by ESPI based on real-time to determine the characteristics of vibration under no-load and tension. These results are quantitatively compared with those of FEM analysis in mode shapes.

**Key Words :** Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리스펙클간섭법), Image Processing (화상처리), Phase shifting method (위상이동법), Time-average method(시간평균법)

## 1. 서론

최근의 광학적인 빛의 간섭현상을 공학적으로 응용한 Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI)

기법이 각광을 받고 있다. 이 기법은 기존의 Speckle Pattern Interferometry(SPI)기법에 컴퓨터의 영상처리 기술을 부과한 검사기법으로 극한 상황에서 비접촉·실시간 계측이 가능하고 측정시간이 짧다는 장점을

\* 조선대학교 계측공학과  
\*\* 조선대학교 기계공학부  
\*\*\* 동아인재대학 자동차기계계열  
\*\*\*\* 조선대학교 대학원

가지고 있지만, 이와 유사한 holography 간섭계에 비하여 선명도가 떨어지는 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 간섭계에 참조광의 경로를 빛의 한과장 영역에서 미세하게 변형시켜 ESPI의 선명도와 정밀도를 크게 향상시키는 위상이동법을 들 수가 있다. 본 연구에서도 기존의 시간평균법에 근거를 둔 ESPI 기법에 위상이동법을 적용하여 면내변위 실험을 행하고, 변위 위상에서 노이즈 감소를 위하여 최소자승법을 적용하여 보다 개선된 Fringe를 획득하였다. 또한, 항공기 재료로서 각 광받는 복합재료 AS4/PEEK(30/-30/90)s의 양단을 고정하고 인장 실험과 인장을 받은 상태에서 시간평균법을 이용하여 무부하 상태와 부하상태에서의 진동특성을 조사하였다.<sup>(4)</sup> 이들의 결과는 유한 요소해석 결과와 비교되어 잘 일치하였으며, 진동모드가 복합재의 최외층각에 영향을 받는다는 것을 확인되었다.

## 2. 이 론

### 2.1 위상이동법 및 최소자승법의 적용

본 연구에서 이용한 알고리즘은 물체의 변형 전후에 위상을 각각  $\pi/2$  만큼 이동시킴으로써 변형정보를 나타내는 위상  $\psi_{i,j}$ 를 표현한다.

변위에 대한 위상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_{i,j} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{I_{2,i,j} - I_{3,i,j}}{I_{1,i,j} - I_{4,i,j}} \right) \quad (1)$$

여기서,  $I_{i,j}$ 는 각각의 변형 전후 위상변화에 대한 광의 세기를 나타낸다. 위상이동법에 의해 얻은 최종적인 변위 위상은 매우 노이즈가 심하므로 노이즈를 감소시키기 위한 방법이 함께 다루어져야 하는데 최소자승 위상추정법은 잡음이 보다 감소된 변위 위상을 얻을 수 있도록 개발된 방법으로서 이 방법을 이용하여 다음과 같은 세기 차이  $X_{i,j}$ 와  $Y_{i,j}$  분포로부터 변위 위상을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{i,j} &= I_{1,i,j} - I_{4,i,j} \\ &= 2\beta_{i,j} \cos\left(\phi_{i,j} + \frac{\psi_{i,j}}{2}\right) \cos\left(\frac{\psi_{i,j}}{2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_{i,j} &= I_{2,i,j} - I_{3,i,j} \\ &= 2\beta_{i,j} \cos\left(\phi_{i,j} + \frac{\psi_{i,j}}{2}\right) \sin\left(\frac{\psi_{i,j}}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

단, 여기에서 이미지에 더해지는 시스템 노이즈는 무시한다.

최소자승 위상추정법은 추정 윈도우 상의 세기 차이  $X_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}$  분포로부터 위상 값을 예측할 수 있으며, Fig. 1은 추정 윈도우 내에서 세기 차이의 분포에 대한 일례를 나타내고 있다.  $X_{i,j}$ 와  $Y_{i,j}$ 는  $\psi_{i,j}$ 에 대한 좌표를 의미하며, 노이즈가 없을 경우 그들은 일직선상에 놓여야 한다.

추정 윈도우 내의 픽셀들의 모든 변위 위상들은 일정하다고 가정하여 데이터 분포로부터 한 라인을 추정하고, 그 라인과 데이터들과의 거리의 제곱의 합을 최소화한다. 따라서, 추정된 라인의 기울기 각의 두 배가 추정 윈도우의 중심 픽셀의 변위 위상으로 지정될 수 있다.

임의의 데이터 포인트로부터 직선까지의 거리  $d_{i,j}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{i,j} = (\cos\theta, \sin\theta) \times (X_{i,j}, Y_{i,j}) \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 직선의 기울기 각을 나타낸다.

이 추정법은 데이터를 나타내는 점들로부터 직선까지의 거리의 합을 나타내는 함수  $F(\theta)$ 를 최소화하는 각을 찾기 위한 방법으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\theta) = \sum_{i,j} (Y_{i,j} \cos\theta - X_{i,j} \sin\theta)^2 \quad (5)$$

식(5)을  $\theta$ 에 대해 미분하면 최소화된 각  $\theta$ 를 찾을 수 있다.

$$2\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{i,j} (2X_{i,j}Y_{i,j})}{\sum_{i,j} (X_{i,j}^2 - Y_{i,j}^2)} \right\} \quad (6)$$

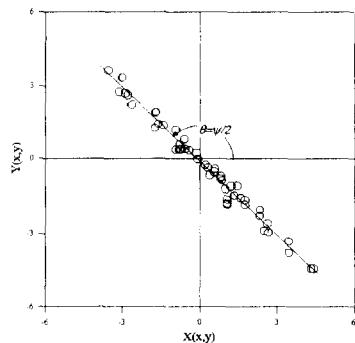


Fig. 1 A sample distribution of the intensity differences of four speckle patterns

라인의 경사도는 변형된 위상의 두 배를 나타내므로 최소 자승 위상 추정법에 의한  $\Psi_{LS}$ 는

$$\Psi_{LS} = \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \sum_{i,j} (X_{i,j} Y_{i,j})}{\sum_{i,j} (X_{i,j}^2 - Y_{i,j}^2)} \right\} \quad (7)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

또한, 위의 추정값을 얻기 위해 행해지는 단순 조작은 추정 원도위의 크기와 관계가 있다. 각각의 이미지 면에서 주변 픽셀들과의 상호 밀접한 관계를 가지고 임의의 좌표에 대응하는 픽셀의 값은 최소자승 위상추정법에 의해 새롭게 추정된 값을 갖게 됨으로서 노이즈가 한층 제거된 위상도를 얻을 수 있다.

### 2.2 ESPI 기법에서의 Fringe Pattern의 형성

ESPI를 이용한 변위 측정 광학계에서 홀로그램 대신 CCD 카메라를 기록 및 재생용으로 사용하게 될 경우 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형전과 변형후 광의 세기 분포가 있고, TV System은 물체에 변위가 일어나기 전 이미지의 세기 분포에 해당되는 전자적인 비디오 신호를 CCD의 수광소자를 통하여 화상처리장치의 메모리에 기록하고, 변위가 발생하면, 그에 상응하는 이미지의 강도 분포를 비디오 신호로 전환하여 변형전의 이미지 신호와 전자적으로 감산 처리한다. 출력 카메라의 신호  $I_{before}$  와  $I_{after}$  가 입력 화상의 강도에 비례하므로, 감산된 광의 강도는 다음과 같다.<sup>(5,6)</sup>

$$I = I_{before} - I_{after} = 2 \sqrt{I_R I_O} [\cos \phi - \cos(\phi + \Delta \phi)] \quad (8)$$

이때, 빛의 휘도(Brightness) 분포식은 아래와 같이 정의되며 밝고 어두운 줄무늬 패턴이 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_R I_O} \sin \left( \phi + \frac{1}{2} \Delta \phi \right) \sin \left( \frac{1}{2} \Delta \phi \right) \right| \quad (9)$$

## 3. 실험

### 3.1 면내변위 측정을 위한 위상이동법의 적용

위상을 보정하기 위해 본 연구에서는 면내변위 간섭계에 Michelson 간섭계를 광로상에 추가하여 Photo

detector에 의해 광량 변화를 측정하였다. Fig. 2의 그림에서 보여지는 바와 같이 레이저가 Beam Splitter(B.S)에 의해 두 빔으로 나뉘고 한쪽은 전반사 거울을 이용하여 렌즈에 결상하고, 다른 쪽은 레이저의 한 파장 내에서 미세하게 이동시키기 위해 전압에 민감한 Piezoelectric Transducer(PZT)를 이용하여 렌즈에 함께 결상, 간섭시켜 Photo-Detector (P-D)에서 레이저의 위상을 얻어냄으로써 이동시키고자 하는 위상을 찾아낼 수가 있다.

본 논문에서는 위상을  $\pi/2$  간격으로 이동시켰으며, 물체의 변형 전에 위상 이동 전과 후 2장의 간섭패턴을 얻고, 변형 후에 다시 동일한 양만큼 위상을 이동시켜 2장의 간섭패턴을 얻어 처리하였다. 그러나, 위상의 이동에 의해 얻어진 간섭 패턴은 노이즈를 포함하고 있어, 이를 줄이기 위해 최소자승 위상추정법을 적용하여 얻고자 하는 픽셀의 값과 연계적인 주변 픽셀들의 값들을 평균적으로 처리하였다. Fig. 3은 위상( $\pi/2$ )을 얻기 위해 구성한 시스템을 도식화한 것이며, Fig. 4는 P-D에 의해 얻어진 위상의 결과 값을 그래프 화한 것이다.

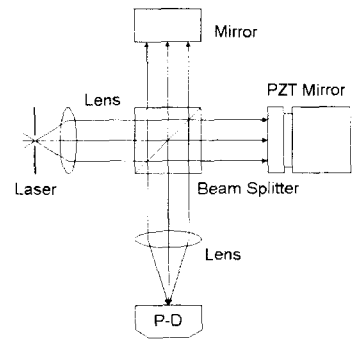


Fig. 2 Optical arrangement for phase shifting

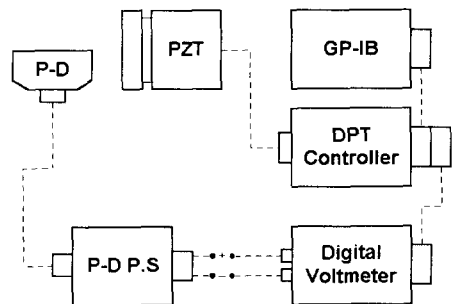


Fig. 3 Diagram of phase calibration system

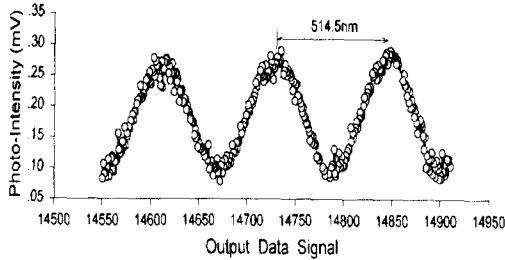


Fig. 4 Relationship of measured photo intensity respect to output data signal

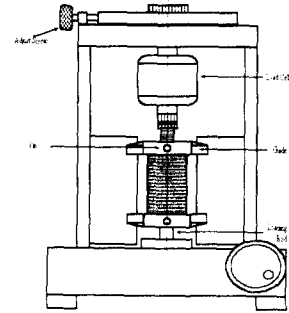


Fig. 5 Guide configuration

### 3.2 구조물의 진동모드 해석

면외변위 계측을 위한 대상체로 항공기 재료로 각광 받는 AS4/PEEK[30/-30/90]s 적층판을 사용하였다. 시험편의 측정 면에는 광택을 제거하기 위해 백색 도료를 도포하였으며, 시험편의 양단은 가이드에 에폭시와 나사로 구속하였다. 적층판의 두께는 0.84cm이다. 재질에 따른 물성치는 Table. 1에 나타내었다. 여기서, E는 Young's modulus이며,  $\nu$ 는 포와송의 비,  $\rho$ 는 재료의 밀도이다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 시험편을 고정하고 인장을 가할 수 있는 수동 인장 시험기의 개략도와 시험편 경계조건을 나타내고 있다. 시험편은 상하 양단을 고정하고 인장을 가하였으며, 진동실험을 위한 가진 장치는 스피커 (50 Hz ~ 20 kHz)를 설치하고, Fig. 6에서처럼 시험편에 그려 넣은 선의 각 교점에 스피커를 위치하였다. 이 교점은 유한요소 해석에 의해 시험편의 진동 진폭이 최대인 점을 고려하여 총 4개의 가진 점에 대하여 진동 모드를 관측하였다. 인장을 받는 상태의 진동 실험에 있어서는 인장 시험기에서 하중을 일정하게 가한 상태를 유지하고(294.3 N) 가진 시스템에 의해서 시험편의 뒷면에서 유한 요소해석 결과에서 얻은 최대 진폭 점에서 가진을 하였다.<sup>(7)</sup>

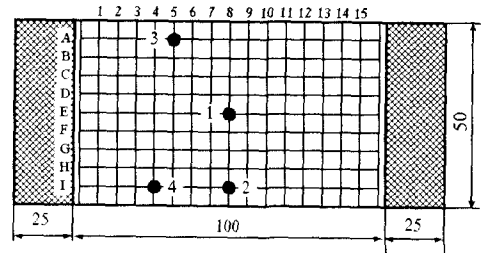


Fig. 6 Shape and Exciting Points of AS4/PEEK Laminate

## 4. 결 과

### 4.1 위상이동법을 적용한 Fringe의 개선

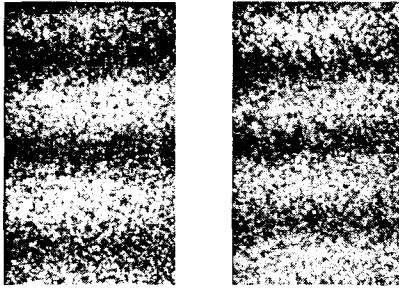
Fig. 7에서는 시험편에 임의의 인장하중을 가하였을 경우에 시간 평균법에 근거한 화상처리 기법과 위상이동을 적용한 기법의 줄무늬 패턴을 각각 비교하였다. Fig 7-(a)에서 나타난 바와 같이 기존의 방법에 의한 줄무늬 패턴은 주위의 환경과 시스템에 따른 노이즈 등으로 인해 줄무늬 주변의 값들이 매우 노이즈가 심하였다. 그러나 Fig. 7-(b)와 같이 위상이동법에 의한 줄무늬 패턴은 보다 가시도가 향상되었으며 프로파일에 나타난 바와 같이 위상 이동에 의해  $2\pi$  특성을 지니고 패턴(위상도)이 형성됨을 알 수 있었다.

### 4.2 구조물의 진동모드 해석

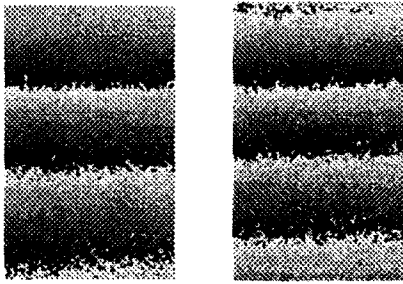
294.3N의 하중하에서의 진동실험은 아래와 같이 유한 요소해석 결과와 비교 분석한 결과 양단 고정 경계조건을 갖는 AS4/PEEK 복합재 적층판에 대해 실험 결과와 유한요소 해석 결과가 비교적 잘 일치하였으며, 이방성

Table 1 Material properties of specimen

$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$
[GPa]	[GPa]	[GPa]		
138.6	10.07	9.20	0.32	0.50
$\nu_{13}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	
0.32	4.117	3.410	4.117	1600



(a) Time-average method



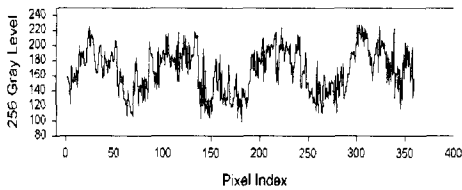
156.8 N

166.6 N

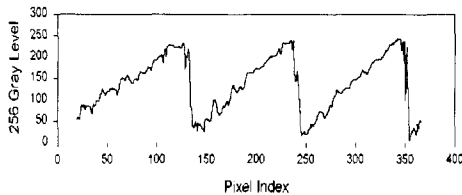
(b) Phase-shifting method

Fig. 7 Reduction of noise

재료에 있어서는 하중이 작용하더라도 고유진동수만이 변화할 뿐, 기본적인 진동 모드 형상은 계속 유지하고 있음을 알 수 있었다.

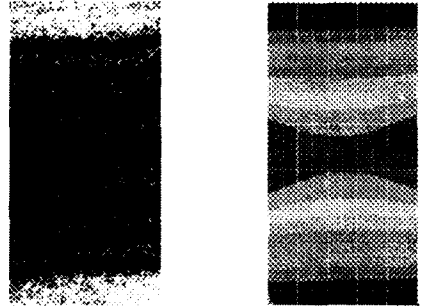


(a) Time-average method

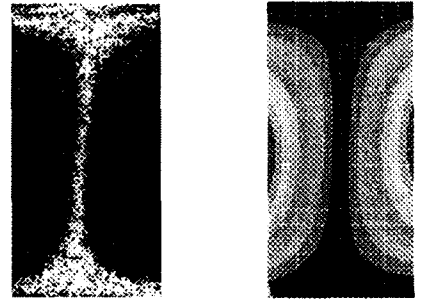


(b) Phase-shifting method

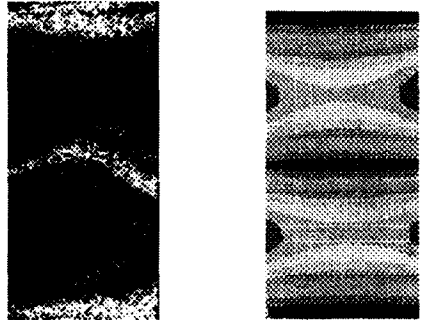
Fig. 8 Comparison of profile of fringe pattern



(a) Comparison of the 1st vibration mode



(b) Comparison of the 2nd vibration mode



(c) Comparison of the 3rd vibration mode

Fig. 9 Comparison of the vibration mode between FEM and experiment (Under 294.3 N)

## 5. 결 론

ESPI를 이용한 복합재 적층판의 인장 진동 평가와 화상처리의 노이즈감소를 위한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 양단 고정의 경계조건을 갖는 AS4/PEEK 복합재 적층판에 대해서 실험 결과와 유한요소 해석 결과에 있어서 모드 형상(Mode shape)은 등방성인 평판재료와 비교해 볼 때, 일정한 기울기를 갖는 것으로 보아 적층각의 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.
- (2) 인장하에서의 진동 실험에서는 하중이 작용하더라도 기본 모드 형상은 변화가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.
- (3) 기존의 ESPI기법은 많은 노이즈와 평활화 이치화 등 번거로운 과정을 거쳐야 하지만, 압전소자를 이용한 위상 이동법을 적용한 ESPI 기법은 노이즈를 한층 더 제거시킴으로서 스펙클 패턴의 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

## 후 기

본 과제는 학술진흥재단 자유공모과제(No.1998-001-E01212)의 지원을 받아 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Henri A. Vrcoman and Ad A. M. Mass, "Image processing algorithms for the analysis of phase-shifted speckle interference pattern", Applied Optics, Vol. 30, No. 13, pp. 1636~1641, 1991.
- (2) R. Jones, C. Wykes, Holographic and Speckle Interferometry, Cambridge University press, pp. 51~61, 146~163, 1983.
- (3) 김경석, 양승필, "전자처리 Speckle Pattern 간섭법에 의한 균열평판의 Strain해석에 관한 연구", 대한기계학회, Vol. 19, No. 6, pp. 1382-1390, 1995.
- (4) Suezou Nakadate, "Vibration measurement using phase-shifting time average holographic interferometry", Applied Optics, Vol. 25, No. 22, pp. 4155-4161, 1986.
- (5) Gary L. Cloud, Optical Methods of Engineering Analysis, Cambridge University press, pp.13~53, 343~407, 440~475, 1995.
- (7) Valery P. Shchepinov, Vladimir S. Pisarev, Sergey A. Novikov, Vitaly V. Balalov, Igor N. Odintsev and Mikhail M. Bondarenko, Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry, John Wiley and Sons, 1996.
- (6) Frank L., Stasa, Applied Finite Element Analysis for Engineers, Saunders College Publishing, 1985.