

## 위상이동 ESPI 를 이용한 진동실험에서 위상각에 따른 진동모드 형상의 변화

정현철\*(조선대 대학원 기계공학과), 김경석(조선대 기계공학과), 양승필(동아인재대 안경광학과)  
장호섭(조선대 대학원 기계설계공학과), 박찬주(조선대 대학원 기계설계공학과)  
조영학(조선대 LARC), 김종수(조선대 LARC)

### Vibration Mode Shape Changed by Phase Angle in Vibration Testing Using Phase-Shifting ESPI

H. C. Jung (Graduate School, Chosun U.), K. S. Kim (Mech. Eng. Dept., Chosun U.)  
S. P. Yang (Ophthalmic Optics Dept., Dong-A College), H. S. Jang (Graduate School, Chosun U.)  
C. J. Park (Graduate School, Chosun U.), Y. H. Cho (LARC, Chosun U.), C. S. Kim (LARC, Chosun U.)

#### ABSTRACT

The vibration mode shape changed by the phase angle that can be controlled by phase-shifting ESPI system is discussed. For the phase-shifting ESPI experiment the stroboscopic illumination by using AOM(Acousto-Optic Modulator) is needed, and the initial phase angle can be adjusted by the program. The vibration mode shape is changed when the initial phase angle is changed. We examined the vibration mode shape change due to the initial phase angle change at each resonance frequency. Through this study, we found that in the vibration testing using phase-shifting ESPI the vibration mode shape is improved in the quality by adjusting exact phase angle and the error of the quantitative vibration analysis can be reduced.

**Key Words** : Phase-Shifting ESPI (위상이동 ESPI), Vibration Mode (진동모드), Phase Angle (위상각), Stroboscopic illumination (스트로보스코프식 조사), Resonance Frequency (공진주파수), Aluminum Plates (알루미늄 평판)

#### 1. 서론

기계공학에서 진동 계측은 구조물의 동적 거동을 이해하기 위한 중요한 분야이다. 최근 수년동안 진동 계측을 위해 레이저를 이용한 방법들이 개발되어 왔으며, 현재 산업 현장에서 많이 사용되고 있다.

레이저를 이용한 진동 계측에는 홀로그래피 간섭법<sup>1)</sup>, 모아레 간섭법<sup>2)</sup>, 도플러 효과를 이용한 측정법<sup>3)</sup>, 레이저 스펙클 간섭법<sup>4,5)</sup> 등이 있다. 홀로그래피 간섭법은 레이저 경로상에 홀로그램 건판을 위치시키고 구조물의 진동 패턴을 건판에 기록한 후, 이것을 현상하여 다시 원래의 위치에 놓고 재생광을 이용해서 건판에 기록된 진동 패턴을 해석하는 방법이다. 모아레 간섭법은 구조물의 표면에

모아레 격자를 그려 넣거나 모아레 격자 패턴을 이용하여 모아레 격자를 표시하는 방법을 이용하여 구조물의 표면 변화에 따른 격자의 형상 변화 결과 발생하는 모아레 패턴을 해석하는 방법이다. 도플러 효과를 이용한 측정법은 레이저를 확산시키지 않고 레이저 빔의 편광 특성과 도플러 효과를 이용하여 구조물의 속도를 측정함으로써 진동을 해석할 수 있는 방법이다. 레이저 스펙클 간섭법은 홀로그래피 간섭법과 유사하며, 홀로그래피 간섭법에서는 노이즈로 작용하는 스펙클 효과를 이용하는 방법이다. 이것은 진동 패턴을 건판에 기록하는 대신 CCD 를 이용하여 컴퓨터 모니터를 통해 실시간적으로 결과를 확인할 수 있다는 점에서 최근 많이 사용되고 있다. 레이저 스펙클 간섭법은 홀로그래피 간섭법과 비교해서 간섭 줄무늬의 가시도가 나

빠다는 단점이 있지만, 실시간적으로 간섭 줄무늬의 변화를 관찰하고 간섭 줄무늬를 디지털 이미지로 저장할 수 있다는 등의 장점이 있다.

레이저 스펙클 간섭법을 이용한 진동 계측에서는 시간-평균법과 위상이동법을 주로 이용한다. 시간-평균법은 일정 시간동안 간섭 이미지를 평균하여 기준 이미지와 감산 처리를 통해 간섭 줄무늬 패턴을 얻는 방법이며, 공진주파수를 구하거나 진동 모드 형상을 보는 등의 정성적 해석을 위해 주로 사용된다. 위상이동법은 PZT(Piezo-Electric Transducer)를 이용하여 참조광의 위상을 이동시켜서 얻은 이미지를 이용하여 진동 진폭을 얻는 등의 진동 모드의 정량적 해석을 위해 사용된다.

위상이동 ESPI 를 이용하여 진동 계측을 할 때, 주로 공진주파수에 근거하여 진동모드 형상을 얻었으나, 초기 설정된 위상각의 변화로 인해 진동모드의 형상이 달라지는 것을 볼 수 있었다.

본 논문에서는 위상이동 ESPI 를 이용한 진동실험에서 위상각에 따른 진동모드 형상의 변화에 대하여 연구하였다.

## 2. 위상이동 ESPI

ESPI 는 기본적으로 레이저의 스펙클 효과를 이용하고 있다. 레이저는 가간섭성이 매우 우수하다는 특징을 지니고 있다. 레이저를 광학적으로 거친 물체의 표면에 조사하면 모든 점에서 각 방향으로 레이저 빔이 산란하게 되고, 이 산란광들은 위상 변화가 발생하여 서로 간섭을 일으켜서 렌즈를 거쳐 이미지 평면에 상이 맺히는 표면의 각 점에서는 밝기가 랜덤하게 변한다. 이와 같은 현상을 스펙클 효과라고 하며, Fig. 1 은 물체 표면에서의 스펙클 패턴을 나타낸다.

진동을 측정하기 위한 ESPI 시스템은 면외변위를 측정하기 위한 간섭계와 동일하게 구성된다. 즉,

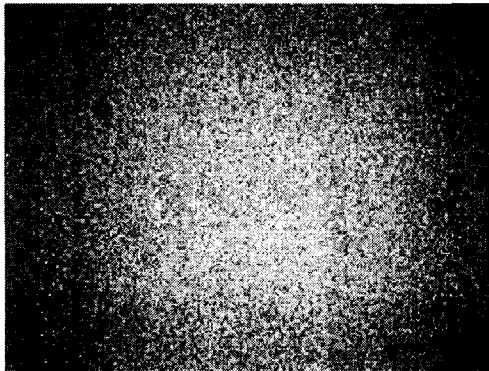


Fig. 1 Photograph of a speckle pattern.

기준이 되는 참조광과 물체로 조사되는 물체광의 구분이 명확하게 나뉘어진다.

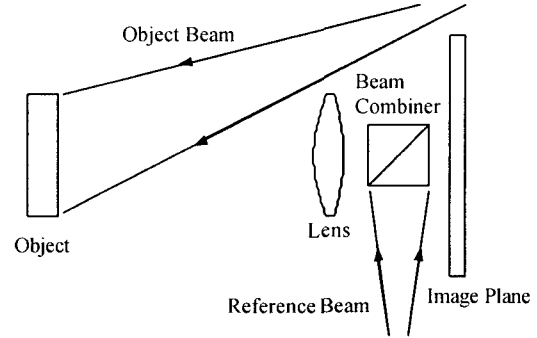


Fig. 2 Schematic of out of plane ESPI.

Fig. 2 에서 보는 바와 같이, 물체광은 물체광의 경로를 따라 대상체에 조사되고, 대상체의 표면에서 산란 반사된 광은 렌즈에 의해 광결합기(Beam Combiner)를 거쳐 이미지 평면에 결상된다. 참조광은 참조광의 경로를 따라 광결합기에 의해 이미지 평면으로 바로 조사된다. 물체광과 참조광의 광량은 렌즈의 조리개를 조절하거나 참조광의 경로상에 ND 필터 등을 설치하여 조절해주면 동일한 밝기로 맞춰줄 수 있다.

본 연구에서 사용한 위상이동 ESPI 는 참조광의 경로상에 PZT 를 설치하고, 일정량만큼 PZT 를 이동시켜줌으로써 참조광의 위상을 이동시키는 방법을 이용하였으며, 위상 이동량을  $\pi/2$  만큼씩 이동시키는 4 단계 위상이동 기법을 이용하였다.

이미지 평면에서 물체광과 참조광이 결합하여 만들어내는 이미지의 밝기 분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_b + k a_0 \cos \Psi \quad (1)$$

여기서,  $I_b$  는 배면 노이즈이며,  $k$  는 해당 위치에서의 기울기,  $a_0$  는 진폭,  $\Psi$  는 물체광과 참조광의 위상차를 각각 나타낸다.

변형된 위상이동을 통해 얻은 4 장의 이미지의 밝기 분포는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_b + k a_0 \cos \Psi \\ I_2 &= I_b + k a_0 \cos \left( \Psi + \frac{\pi}{2} \right) = I_b - k a_0 \sin \Psi \\ I_3 &= I_b + k a_0 \cos (\Psi + \pi) = I_b - k a_0 \cos \Psi \\ I_4 &= I_b + k a_0 \cos \left( \Psi + \frac{3\pi}{2} \right) = I_b + k a_0 \sin \Psi \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터 변형전의 위상  $\Psi$ 를 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$\Psi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (3)$$

동일한 방법으로 변형후 위상이동을 통해 얻은 4 장의 이미지로부터 변형후 위상  $\Psi'$ 을 구할 수 있으며, 물체의 변형에 의한 위상 변화  $\Delta\Psi$ 를 식 (4)를 통해 구할 수 있다.

$$\Delta\Psi = \Psi' - \Psi \quad (4)$$

이때, 면내변위 측정이나 면외변위 측정을 위해서는 이상과 같은 위상이동 기법을 이용하면 변형량을 구할 수 있으나, 진동 측정을 위해서는 시간에 따라 달라지는 물체의 위상변화를 간섭 줄무늬를 통해 확인할 수만 있으며, 이를 정량적으로 해석하기가 어렵다.

따라서, 음향광변조기인 AOM 을 이용하여 연속파 레이저를 펄스화 시켜줄 필요가 있다. AOM 은 음압을 이용하여 레이저빔을 0, 1, 2, 3차 빔 등으로 나누어주는 역할을 한다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 물체가 진동하는 동안 레이저빔은 물체의 진동 주파수에 동기하여 출력되며, 위상이  $\alpha$ 와  $\beta$ 일 때 레이저빔이 조사되도록 설정할 경우 변형이 최대가 되는 간섭 줄무늬를 얻을 수 있다.

이때, 초기 위상값  $\alpha$ 에 따라 진동모드를 나타내는 간섭 줄무늬의 형상이 조금씩 변하게 되며, 각각의 진동 주파수에 대해 진동 진폭이 최대가 되는 초기 위상이 달라지고 있음을 확인할 수 있다.

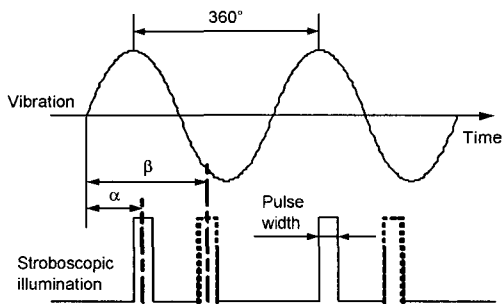


Fig. 3 Stroboscopic illumination synchronized with the vibration of an object.

### 3. 실험 및 고찰

Table 1 Mechanical properties of specimen

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Density
193 GPa	0.3	8000 kg/m <sup>3</sup>

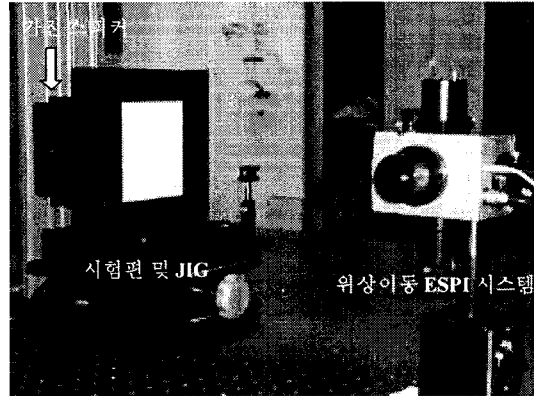


Fig. 4 Arrangement of phase-shifting ESPI system, specimen, and speaker.

#### 3.1 실험

본 논문에서는 재질이 STS304 인 4 면이 고정된 스테인레스강 평판을 이용하여 실험하였으며, 기계적 특성은 표 1 에 나타냈다. 시험편의 측정영역의 크기는 가로×세로×두께가 120×120×1 mm<sup>3</sup>이다.

Fig. 4 는 위상이동 ESPI 시스템과 실험 대상체 및 가진 시스템인 스피커의 배치를 보여주고 있다. 시험편은 4 면을 고정할 수 있는 JIG 를 이용하여 고정하였으며, 각 나사를 체결할 때의 체결력은 200 kgf/cm<sup>2</sup> 으로 하였다. 시험편의 배면에서 가진시키는 스피커는 전면을 개방하여 시험편 전체에 음파의 영향이 미치도록 하였다. 스피커는 삼미스피커의 SR-100A25, 앰프는 삼미전자의 SMX-101 , 합수 발생기는 Agilent 사의 33120A 를 이용하였다. 위상이동 ESPI 시스템은 독일 Etemeyer 사의 Q-500 3D Vibro ESPI 를 이용하였다.

먼저 스피커 자체의 결함 유무를 파악하기 위한 실험을 통해 스피커에는 문제가 없음을 확인한 후, STS304 시험편에 대한 실험을 행하였다.

위상이동 ESPI 를 이용한 실험에 앞서, 시간평균법을 이용하여 시험편에 대한 공진주파수를 찾아내고, 해당 공진주파수별로 위상이동법을 적용시켜 초기 위상을 30 도씩 바꿔가며 0 도에서 180 도까지 진동모드의 형상을 비교 측정하는 순서로 실험을 진행하였다.

#### 3.2 결과

Table 2 Mode shapes at each resonance frequency.

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	6 <sup>th</sup>
Freq. (Hz)	567	838	893	944	1304	1520
Shape						

표 2 에는 각 공진주파수별 진동모드 형상을 나타냈다. 진동 진폭이 최대인 위상을 찾아서 진동모드를 저장한 것이며, 주파수별로 위상이 조금씩 차이가 있었다.

Fig. 5 에 각 공진주파수별로 위상을 30 도씩 바꿔가며 얻은 위상도(Phase map) 이미지의 예를 나타냈다.

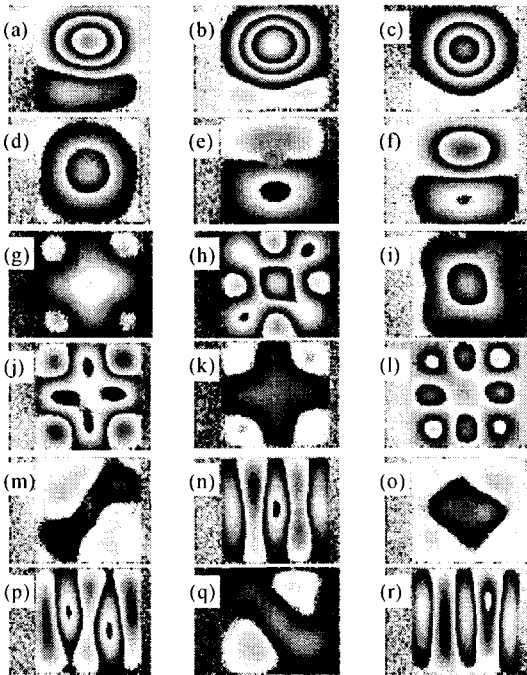


Fig. 5 Mode shapes due to the phase angle change at each resonance frequency. (a)-(f) for 2<sup>nd</sup> mode; (g)-(l) for 4<sup>th</sup> mode; and (m)-(r) for 5<sup>th</sup> mode. (a), (g), and (m) for 30°; (b), (h), and (n) for 60°; (c), (i), and (o) for 90°; (d), (j), and (p) for 120°; (e), (k), and (q) for 150°; and (f), (l), and (r) for 180°

### 3.3 고찰

실험 결과의 예에서 볼 수 있듯이, 2 차 모드의 경우 위상각이 120 도 일 때는 1 차 모드와 유사한 진동모드 형상이 나타난다. 또한, 4 차 모드의 경우

다양한 형상의 진동모드를 동일한 주파수에서 볼 수 있었다. 5 차 모드의 경우 FEM 해석에서는 낮은 주파수에서 볼 수 있는 진동모드 형상을 30°, 60°, 150° 위상각에서 볼 수 있었다. 이것은 시험 대상체가 4 면이 고정된 정사각형 평판이기 때문에 동일한 주파수에서 여러 형태의 진동모드가 나타나는 현상이다. 위상이동 기법을 이용하여 얻은 진동모드는 시간에 따라 계속 진동하고 있기 때문에 위상이 달라지게 되면 진동모드의 형상도 조금씩 달라지게 된다. 따라서 위상이동 ESPI 를 이용하여 진동 실험을 할 경우 초기 위상각을 변화시키면서 모니터에 출력되는 진동모드의 변화를 살펴보고, 진폭이 최대인 위상각에서 정량해석을 하면 해석상의 에러를 줄일 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 위상이동 ESPI 를 이용하여 진동 실험을 할 때, 초기 위상각의 변화에 따라 달라지는 진동모드 형상의 변화에 대하여 연구하였다. 진동 진폭의 정량해석을 하기 위해서는 해당 주파수에서 정확한 진동모드의 위상도를 얻는 것이 중요하며, 이 때 초기 위상각에 따라 진동모드의 형상이 달라질 수 있음을 확인하였다. 따라서, 초기 위상각이 진동실험을 위한 중요한 파라미터로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 과학기술부·한국과학재단지정 지역협력연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2003 년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

### 참고문헌

1. Rastogi, Pramod K.(Ed.), Holographic Interferometry, Berlin, Springer-Verlag, 1994.
2. Post, Daniel, Han, Bontae, and Ifju, Peter, High Sensitivity Moire, New York, Springer-Verlag, 1994.
3. Castellini, P., Marchetti, B., and Tomasini, E. P., "Scanning Laser Doppler Vibrometer for Dynamic Measurements on MEMS," Proceeding of IMAC-XXI, #161, 2003.
4. Cloud, Gary L., Optical Methods of Engineering Analysis, Cambridge University Press, 1995.
5. Rastogi, Pramod K. and Inaudi, Daniele, Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection, Elsevier Science, 2000.