

구조물의 진동 해석을 위한 비접촉 레이저 계측 시스템 개발

정현철*(조선대 대학원 기계공학과), 김경석(조선대 기계공학과), 최정석(목포과학대 메카트로닉스과)
김성식(목포과학대 메카트로닉스과), 강기수(조선대 대학원 기계설계공학과)
정승택(조선대 대학원 기계설계공학과), 최태호(조선대 대학원 기계설계공학과)

Development Non-contact Laser Measuring System for Vibration Analysis of Structures

H. C. Jung (Graduate School, Chosun U.), K. S. Kim (Mech. Eng. Dept., Chosun U.)
J. S. Choi(Mechatronics Dept., Mokpo Science Coll.), S. S. Kim(Mechatronics Dept., Mokpo Science Coll.)
K. S. Kang(Graduate School, Chosun U.), S. T. Jung(Graduate School, Chosun U.)
T. H. Choi(Graduate School, Chosun U.)

ABSTRACT

The non-contact laser measurement system what can be used for the vibration analysis of structures is discussed. There are few systems using laser speckle interferometer for vibration analysis. One of these systems is the Electronic Speckle Pattern Interferometer (ESPI). With ESPI system, one can obtain the vibration mode shape qualitatively and the maximum vibration amplitude quantitatively of the structure at each resonance frequency. In this paper, the phase-shifting ESPI system with stroboscopic illumination for measuring vibration mode shapes is constructed and the operating software is programmed. The results are compared with that of commercial ESPI system.

Key Words : Vibration Analysis (진동 해석), Non-contact measuring system (비접촉 계측 시스템), Electronic Speckle Pattern Interferometer (전자처리 스펙클 패턴 간섭계), stroboscopic illumination (스트로보스코프식 조사), Phase-shifting (위상이동),

1. 서론

현대 산업사회에서는 산업현장 각 분야에 크고 작은 기계 구조물이 사용되고 있으며, 이들 구조물에는 어떠한 형태로든 기계적 진동이 발생하게 된다. 진동이 발생하게 되면 기계 구조물에 나쁜 결과를 초래할 수도 있는 비정상 거동이 나타나게 되며, 경제적 피해뿐만 아니라 인명 피해도 불러올 수 있다. 따라서 진동에 대한 대책 마련 기계공학 분야에서의 당면과제로 여겨지고 있으며, 설계자들에게는 구조물의 진동 특성을 고려해서 구조물을 설계해야 할 필요성이 있다. 기계 구조물은 크고 작은 기계 요소들로 이루어져 있으며, 이들 각 요소들의 진동 특성을 고려해서 설계되어진다. 따라서 기계 구조물에 대한 전체적인 진동 거동을 계측하기 위해서는 구조물을 구성하고 있는 기계 요소

들의 진동 거동을 계측해야 한다.

지금까지 진동 계측을 위해서는 임팩트 해머와 가속도계를 이용한 진동 실험¹⁾이 주를 이루어 왔으나, 임팩트시 작용하는 힘이 매회 달라지고 가속도계의 무게가 실험 결과에 영향을 미치는 등의 문제점을 안고 있다. 최근 수년동안 비접촉 계측이 가능한 레이저를 이용한 실험이 각광을 받기 시작하였고 널리 보급되었다. 특히 스펙클 효과를 이용하는 레이저 스펙클 간섭계²⁾는 국내외적으로 그 활용성이 보고되면서 차츰 사용자들이 늘어가고 있는 상태이다.

레이저 스펙클 간섭계는 대상체의 표면에 접촉이 필요 없는 비접촉의 비파괴검사 시스템이다. 때에 따라서 간섭 줄무늬의 가시도를 향상시키기 위해 백색 도료를 대상체의 표면에 도포하는 작업만이 필요할 뿐이며, 확산된 레이저 광이 조사되는

영역은 측정 대상영역이 되기 때문에 전역검사가 가능한 비접촉 레이저 계측 시스템으로서 활용이 가능하다. 특히, 레이저 스펙클 간섭계에 CCD 카메라와 화상처리장치를 이용한 전자처리 스펙클 패턴 간섭계(ESPI)³⁾가 대상체의 면내변위(응력, 변형률 등)와 면외변위(변위량, 진동 등) 측정에 주로 사용되고 있다.

진동은 일종의 면외변위라고도 볼 수 있으며, 이의 측정을 위해서는 주로 시간-평균법과 위상이동법을 이용한 시스템이 사용되고 있다⁴⁾. 시간-평균법은 공진주파수에서의 진동모드 가시화를 위해 사용되는 방법이며, 위상이동법은 진동모드의 정량 해석을 위해 사용되는 방법이다. 그러나, 국내에서 사용되는 대부분의 시스템이 외국에서 수입한 장비들이며, 국내에서 개발되고 있는 시스템 또한 진동 측정을 위한 장비는 아직까지 나오지 않고 있다.

본 논문에서는 시간적 위상이동 기법의 하나인 DFT(이산 푸리에 변환)를 이용한 4-단계 위상이동 기법⁵⁾을 사용하여 위상이동 ESPI 시스템을 개발하였다. 각 공진주파수에서의 간섭 줄무늬와 위상도 이미지를 상용화 제품인 독일 Ettemeyer 사의 Vibro-ESPI 장치의 실험결과와 비교하였다.

2. 원리

2.1 ESPI

진동을 측정하기 위한 ESPI 시스템은 면외변위를 측정하기 위한 간섭계와 동일하게 구성된다. 물체로 조사되는 물체광과 CCD 카메라로 직접 들어가는 기준이 되는 참조광이 뚜렷이 구분된다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 물체광은 물체에 조사되고 물체의 표면에서 반사되어 렌즈와 빔결합기(Beam Combiner)를 지나 이미지 평면에 상이 맺힌다.

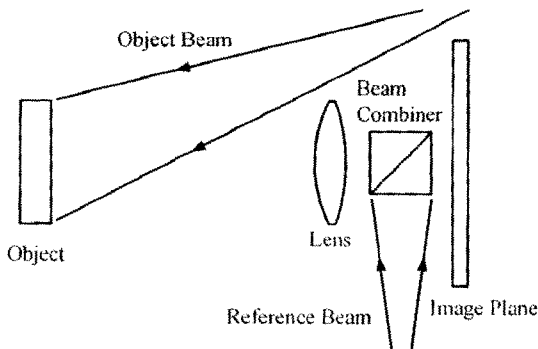


Fig. 1 Schematic of ESPI for measuring out of plane displacement.

참조광은 빔결합기를 거쳐 곧바로 이미지 평면에 조사된다. 이 두 빔은 이미지 평면에서 스펙클 패턴을 형성하게 된다. 이를 수식적으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (1)$$

여기서, I 는 물체광과 참조광이 결합하여 얻어진 이미지의 밝기 분포이며, I_1 과 I_2 는 물체광과 참조광의 밝기 분포, ϕ_1 과 ϕ_2 는 물체광과 참조광의 위상이다.

변형 전과 변형 후의 변형 상태를 확인하기 위해 변형 전, 후의 이미지를 각각 얻어서 감산처리를 하여 모니터에 출력한다. 이 과정은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_s &= (V_{before} - V_{after}) \propto (I_{before} - I_{after}) \\ &= 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos \Psi - \cos(\Psi + \Delta\phi)] \\ &= 4\sqrt{I_1 I_2} \sin\left(\Psi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin \frac{1}{2}\Delta\phi \end{aligned} \quad (2)$$

이때, V_s 는 CCD 카메라로부터 출력되는 신호이며, V_{before} 와 V_{after} 는 변형 전, 후의 신호, I_{before} 와 I_{after} 는 변형 전, 후의 이미지 밝기 분포, $\Psi = \phi_1 - \phi_2$, $\Delta\phi$ 는 변형으로 인한 위상 변화량을 각각 나타낸다.

식 (2)에 의해 얻어진 값은 음수와 양수를 갖기 때문에, 모니터에 출력되는 밝기 분포 B 는 식 (3)에 의해 얻어진 값을 갖는다.

$$B = 4K \left[I_1 I_2 \sin^2\left(\Psi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin^2 \frac{1}{2}\Delta\phi \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서 K 는 상수이다.

2.2 DFT를 이용한 4 단계 위상이동 알고리즘

본 연구에 사용한 위상이동 기법은 Fig. 1에서의 참조광의 경로상에 PZT를 설치하고, 일정량만큼 PZT를 이동시킴으로써 참조광의 위상을 이동시키는 시간적 위상이동(Temporal phase-shifting) 방법을 이용하였다. 위상이동량은 $\pi/2$ 로 설정하였으며, 변형 전과 후의 이미지를 각각 4 장씩 얻어서 DFT 처리 하였다.

변형 전 $\pi/2$ 만큼씩 위상을 이동시키면서 위상 이동된 이미지를 4 장 얻을 수 있으며 각 이미지의 밝기 분포는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
h_1 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Psi \\
h_2 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Psi + \pi/2) \\
h_3 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Psi + \pi) \\
h_4 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Psi + 3\pi/2)
\end{aligned} \quad (4)$$

변형 후의 위상이동된 이미지 4 장도 동일한 방법으로 얻을 수 있다. 이들 이미지에 대해 식 (5)를 이용하여 2 차원 DFT 처리하면,

$$H_k = \sum_{n=0}^{N-1} h_n e^{-i2\pi nk/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

이때 h_n 은 시간 $t = nT$ 일 때 얻은 연속함수 $h(t)$ 이며, H_k 는 주파수 $\omega = 2\pi k/(NT)$ 에서 연속 스펙트럼 $H(\omega)$ 의 근사이다. 또한, $2\pi k/(NT)$ 는 위상이동량 $\pi/2$ 를 의미한다. 따라서, $N = 4$ 일 때의 변형 전,후 결과를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
H_{before} &= \sum_{n=0}^3 h_n e^{-in\pi/2} \\
H_{after} &= \sum_{n=0}^3 h'_n e^{-in\pi/2}
\end{aligned} \quad (6)$$

이제, 2개의 스펙트럼 결과를 이용하여 변형 전, 후에 발생한 변형차를 나타내는 위상 스펙트럼을 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$z = H_{before}^* \otimes H_{after} \quad (7)$$

$$\Delta\phi = \arctan \left[\frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)} \right] \quad (8)$$

변형에 의한 위상차 $\Delta\phi$ 는 그 자체에 많은 노이즈를 포함하고 있다. 따라서, 변형 정보의 손실을 최소화하면서 노이즈를 제거하기 위해 윈도우를 설정하여 윈도우 내부의 z 를 컨볼루션 시켜준다. 이것은 윈도우 내부를 평균하는 역할을 하며, 그 결과 노이즈가 거의 제거된 위상도를 얻을 수 있다.

3. 진동 계측 시스템

3.1 간섭계 구성

본 연구를 위해 구성한 간섭계를 Fig. 2에 나타냈다. 위상이동 기법을 적용시키기 위해 AOM을 이용하여 함수발생기(FG)에서 생성된 사인파의 주파수에 동기하여 레이저를 on/off시킬 수 있도록

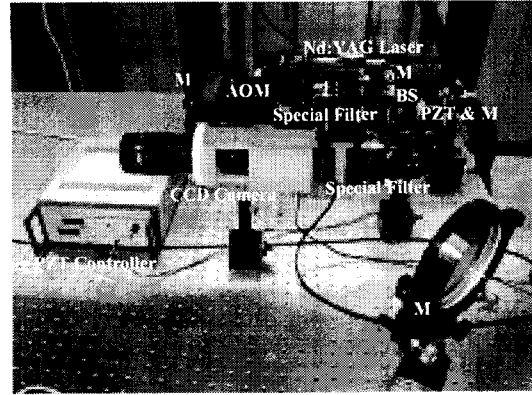


Fig. 2 Arrangement of developed interferometer.

하였다. PZT 미러는 광량의 손실을 최소화하기 위해 프리즘을 이용하였으며, 정도 높은 스펙클을 얻기 위해 확산 렌즈를 대신하여 공간 필터를 이용하였다. PZT는 PI사의 최대 이동량 $45 \mu\text{m}$ 인 P841.30을 이용하였으며, Laser는 Coherent사의 Nd:YAG Laser(최대 출력 4 W)를 이용하였다. 레이저 출력을 제어하는 AOM은 IntraAction사의 AOM403을 이용하였다. CCD 카메라 본체와 렌즈의 사이에 빔결합기가 위치해 있으며, 달라지는 초점거리의 보상을 위해 추가 렌즈를 이용하였다.

3.2 프로그램 및 하드웨어 구성

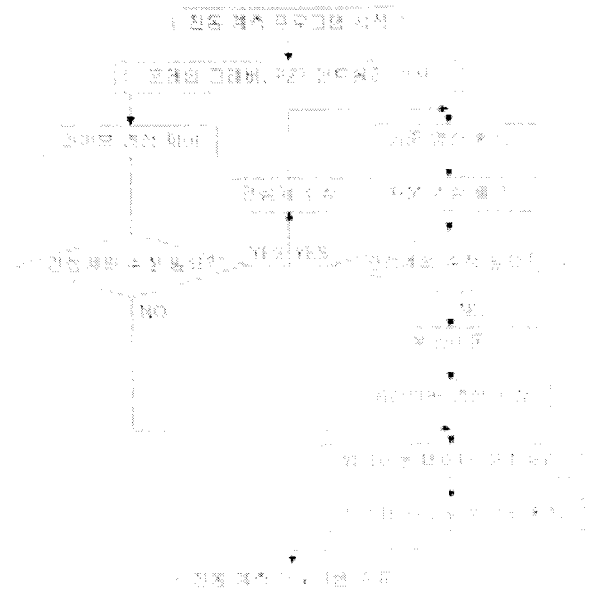


Fig. 3 Flowchart of vibration measurement program.

진동 계측 프로그램은 위상이동 영상을 얻기 위한 부분은 Visual C++ 6.0 을 이용하여 개발되었으며, 위상 데이터 및 위상도 획득을 위한 프로그램은 MATLAB 6.1.0 을 이용하여 개발되었다. 영상 획득을 위한 CCD 카메라는 Pulnix 사의 TM-7EX 를, 줌 렌즈는 Nikon 사의 AF 35-70 기본 줌렌즈를 이용하였다. 화상처리를 위한 프레임 그래버는 Data Translation 사의 DT 3152 를 이용하였으며, PZT 는 IBM 호환 PC 의 RS-232 포트를 이용하여 제어하였다.

4. 실험

본 연구에서는 재질이 STS304 인 4 면이 고정된 스테인레스강 평판을 이용하여 실험하였으며, Young Modulus 는 193 Gpa, 포와송의 비는 0.3, 밀도는 8000 kg/m³ 이다. 시험편의 측정 영역은 가로x세로x두께가 120x120x1 mm³ 이다.

JIG 는 광학정반에 고정되고 4 면의 고정은 볼트를 이용하여 체결력 200 kgf/cm² 으로 고정하였다. 스피커는 시험편의 배면으로부터 시험편 전체에 음파의 영향이 미치도록 설치하였다.

실험 결과의 검증을 위해 상용 제품인 독일 Etmeyer 사의 Q-500 3D Vibro ESPI 를 이용하여 획득한 위상도 결과와 비교하였다. Fig. 4 에 비교 결과를 나타냈으며, 상용 제품의 실험 결과와 비교한 결과, 노이즈가 더욱 많이 제거되었음을 확인할 수 있었다. 각 진동모드별 주파수를 Table 1 에 나타냈다.

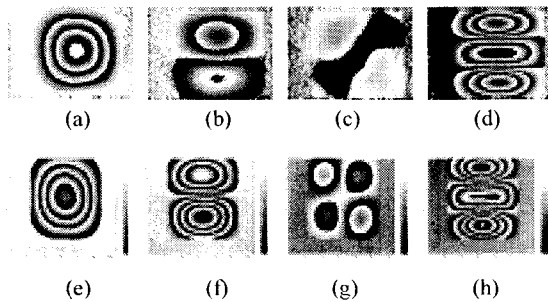


Fig. 4 Comparison of vibration mode shape phase maps resulted from commercial 3D Vibro ESPI and that of developed vibration measuring system. (a) to (d) for 3D Vibro ESPI and (e) to (h) for developed system

Table 1 Comparison of vibration resonance frequencies

	Frequency (Hz)			
3D ESPI	(a) 567	(b) 838	(c) 1304	(d) 1520
Dev. Sys.	(e) 400	(f) 822	(g) 1268	(h) 1491

실험 결과, 공진주파수에서 약간의 차이가 있는 것을 볼 수 있으며, 이것은 스피커를 이용한 진동 실험시 공진 대역이 넓기 때문에 발생하는 현상이라고 생각된다. 1 차 진동 모드의 경우 300-600 Hz 사이에서 계속적으로 관찰이 가능하다.

4. 결론

본 연구를 통하여 구조물의 진동 해석을 위한 비접촉 레이저 계측 시스템을 개발하였다. AOM 을 이용한 위상이동 기법에 정확한 변형 위상의 계산을 위하여 DFT 기법을 결합시켜 기존 국내에서 사용되고 있는 상용 제품의 계측 결과에 비해 매우 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 추후 현재 개발중인 시간-평균 기법의 적용과 기 측정한 위상도에 위상 Unwrapping 기법을 적용시키면 구조물의 진동 계측을 위한 완전한 제품이 개발될 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 1999 년 학술진흥재단 신진연구인력 연구장려금지원에 의해 연구되었습니다. 이에 감사드립니다. DFT 를 이용한 4 단계 위상이동 기법을 적용시킬 수 있도록 도움을 주신 포항공대 홍정기 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Reese, Robert T. and Kawahara, Wendell A., Handbook On Structural Testing, The Fairmont Press, 1993.
2. Erf, Robert K. (Ed.), Speckle Metrology, Academic Press, 1978.
3. Rastogi, Pramod K. and Inaudi, Daniele (Ed.), Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection, Elsevier Science, 2000.
4. Robinson, David W. and Reid, Graeme T. (Ed.), Interferogram Analysis - Digital Fringe Pattern Measurement Techniques, IOP Publishing, 1993.
5. Rastogi, Pramod K. (Ed.), Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, John Wiley & Sons, 2001.