

시간 평균 ESPI 를 이용한 진동 물체의 공진 주파수 검출 신뢰도 검증에 대한 연구

홍경민*(전북대학교 대학원), 유원재(전주기계산업리서치센터)
강영준, 이동환(전북대학교 기계항공시스템공학부)

A Study on Reliability Verification of Resonance Frequency Detection of Vibration Object using Time-average ESPI

Kyung Min Hong* (Mech. Eng. Chonbuk Univ.), Weon Jae Ryu (Jeonju Machinery Research Center)
Young Jung Kang, Dong Hwan Lee (Mech. Eng. Chonbuk Univ.)

ABSTRACT

Non-destructive inspection techniques using laser have been broadening their application areas as well as growing their measurement skills together with the rapid development of circumferential technology like fiber optics, computer and image processing. The ESPI technique is already on the stage of on-line testing with commercial products in developed country nations. Especially, this technique is expected to be applied to the nuclear industry, automobile and aerospace because it is proper for the vibration measurement and it can be applied to objects of a high temperature. This paper describes the use of the ESPI system for measuring vibration patterns on the reflecting objects. Using this system, high-quality Jo fringes for identifying mode shapes are displayed. A bias vibration is introduced into the reference beam to shift the Jo fringes so that fringe shift algorithms can be used to determine vibration amplitude. Using this method, amplitude fields for vibrating objects were obtained directly from the time-average interferometer recorded by the ESPI system.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry (전자 스페클 간섭법), Time-average ESPI (시간 평균 ESPI)
Resonance Frequency (공진 주파수), Vibration mode shape (진동 모드 형태)

1. 서론

움직이는 모든 물체는 크고 작은 진동을 발생시키고 있다. 각종 기계류의 사용에 의한 산업 진동은 말할 것도 없고 고밀도 주거 건물에서의 단순한 일상 생활에 따른 활동 자체도 진동 소음이 원인이 되어 이웃에 불쾌감을 줄 수 있다. 이와 같은 거시적인 문제를 유발하는 진동은 일반적으로 큰 진폭을 갖는 것이 사실이다. 그러나 진동 문제는 반드시 큰 진폭의 진동에 의해서만 발생하는 것이 아니다. 정밀 공작 기계와 같은 정밀 산업 기계에서는 기계 가공에 수반되는 진동에 의해서 가공 정밀도에 영향을 줄 뿐만 아니라 기계 수명과 안전 가동에도 영향을 줄 수 있다. 진동하는 물체의 진동 진폭이나 전역적인 진동 패턴을 관찰하고자 할 때 여

러 가지 방법들이 사용되고 있는데, 전자 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)을 이용한 진동 측정 방법은 가속도계 등을 이용한 접촉식 측정법에서 나타나는 점단위 측정의 한계성 즉, 측정 시간이 비교적 길다거나 점단위로 얻어진 데이터를 조합하는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 진동 측정 장치가 피측정물의 진동모드에 영향을 미치게 되는 질량효과 및 댐핑효과 등의 단점을 극복할 수 있다. 또한 CCD 카메라를 기록 매체로 하여 추출된 화상 정보를 전자적으로 처리함으로써 홀로그래피 방법에서 나타나는 필름 현상 및 재생과정의 불편함을 제거할 수 있다.

본 연구에서는 ESPI 를 이용한 진동 측정 방법 중에 하나인 시간 평균 ESPI(Time-average ESPI) 시

시스템을 이용하여 공진 주파수를 검출해 낼 수 있는 방법을 소개하고 그 신뢰도를 검증하고자 한다. 신뢰도 검증을 위해 첫 번째로 진동모드 해석에서 널리 사용되고 있는 가속도계를 이용한 PULSE 6.0에서의 FFT(Fast Fourier Transform) 분석 데이터와 비교하였고, 마지막으로는 널리 사용되고 있는 유한요소 프로그램을 이용한 진동모드 해석 데이터와 비교하였다.

2. 공진 주파수

2.1 진동

어느 물체가 기준 위치에 대해 반복운동을 할 때 그 물체는 진동한다고 한다. 즉, 1초 동안에 완전한 운동주기가 일어나는 횟수를 주파수라고 부르며, Hertz(Hz)로 측정된다. 진동신호는 동시에 일어나는 매우 많은 주파수들로 구성되어 있으므로 진폭-시간의 관계에서는 얼마나 많은 성분이 있고, 어떤 주파수에서 진동이 일어나는지를 즉시 구별할 수 없다. 이러한 성분들은 주파수에 대해 진폭을 그림으로 나타냄으로써 알 수 있다. 진동 신호를 각각의 주파수 성분으로 분리하는 것을 주파수 분석이라 하는데, 진동을 측정하여 해석하는 기본적인 기술이다. 이러한 기계 진동의 주파수 분석으로 기계 여러 부분의 기본적인 운동에 직접적으로 관련된 특유의 주기적 주파수 성분들을 찾아냄으로써 바르지 않는 진동의 성분을 추적할 수 있는 것이다.

2.2 공진(Resonance)

강제진동에서 외력의 가진주파수가 계의 고유진동수와 일치하여, 입력이 계속 가해짐에 따라 진동이 커지는 현상을 말한다. 공진현상에서 구체적으로 일어나는 외력과 응답 사이의 관계는 주파수 응답함수의 크기와 위상으로써 잘 관찰할 수 있다. 즉 공진 현상이 발생할 때는 특별히 외력과 응답속도(Velocity)가 같은 위상을 갖게 되어 외력에 의한 진동계의 에너지 공급 즉 파워의 효과적인 공급이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 공진현상을 피하기 위한 관점에서 공진현상이 다루어지나 (기계, 구조물, 항공기, 자동차, 선박 등 운송기계) 공진현상을 이용한 발전기 등 적극적인 관점에서 또한 광범위하게 응용되기도 한다.

3. 시간 평균 ESPI

조화 진동의 경우, 기록 면에서 평형점에 대한 진동 진폭의 크기는 0 차 베셀 함수의 형태로 나타난다. 따라서 진폭이 커질수록 극대 값들이 심하게

줄어들면서 간섭 무늬의 구분이 어려워진다. 간섭 무늬의 대비를 높이기 위해서 사용된 가장 대표적인 방법이 스펙클 평균법이다. 일반적으로 스펙클 평균법은 물체를 비추는 물체빔의 방향을 미세하게 바꾸어 가면서, 각각의 물체빔에 대해 진동 패턴의 간섭무늬를 얻어내고 각각의 간섭 무늬들 사이에는 스펙클 상관 관계가 없도록 하는 것이다.

스펙클 패턴 간섭법의 진동 측정 방법에는 시간 평균법, 스트로보스코픽 방법, 이중 펄스 방법이 있으나 가장 일반적이고 간단한 기술은 물체가 진동하는 동안 기록하는 시간 평균법이다. 규칙적으로 진동하는 물체의 진동 범위와 노달 등고선(nodal contour)을 얻기 위해 물체의 진동 주기와 비교하여 보다 긴 노출 시간으로 영상을 제작하면 물체 각각의 시간에 따른 변위의 평균치가 밝기 정보로 영상이 CCD 에 기록된다. 즉 물체의 고유 진동수가 CCD 의 프레임 비(frame rate)인 30Hz 이상이 되면 위의 조건이 자연스럽게 만족되기 때문에 간단하게 진동 분포나 진동 모드를 측정할 수 있다. 물체의 진동 상태가 아래와 같다면

$$u_0(x, y, z) = a_0(x, y) \cos[2\pi ft + \phi_0(x, y)] \quad (3.1)$$

진동체의 재생상의 세기는 다음과 같다.

$$I(x, y) \propto J_0^2\left[\frac{2\pi}{\lambda} \vec{K} \vec{A}_0(x, y)\right] \quad (3.2)$$

식 (3.2)와 같이 시간 평균법에 의해 획득한 정보에서 물체의 변위에 대한 밝기의 관계는 제 1종 0 차 베셀 함수의 제곱에 비례한다. J_0^2 함수는 첫 번째 최대 값이 그 이후의 최대 값보다 상대적으로 매우 크며 그 값이 순차적으로 감소하는 특성을 가지고 있음을 Fig. 1 에서 알 수 있다.

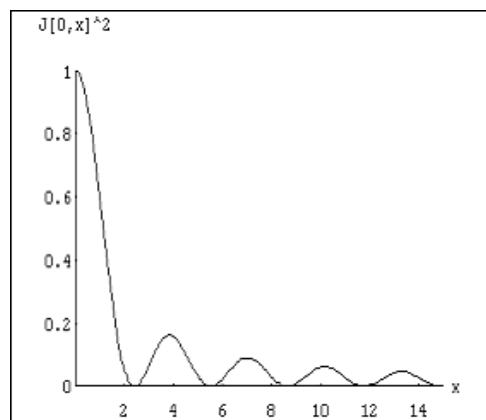


Fig. 1 Square of the zero order Bessel function of the 1st kind

따라서 시간 평균법에 의해 측정된 결과의 간섭 무늬를 보면 간섭 무늬의 차수에 따른 밝기 분포가 일정하지 않음을 알 수 있다. 즉 물체면에서 전혀 움직이지 않은 노달점(nodal point)들은 첫 번째 최대 값을 가지므로 다른 부분보다 구별되어 밝게 나타난다. 그러므로 노달점들을 중심으로 변위가 증가함에 따라 밝기가 점점 어두워져 가는 양상을 보이게 되므로 물체의 진동 변형인 모드 형태를 직접적으로 관찰할 수 있다.

4. 실험 장치와 실험 방법

본 실험에서 사용된 시편은 Fig. 2 에 나타나 있고 지름 70mm, 두께 2mm 의 알루미늄 금속 원판이며 레이저 빔이 물체면에 조사되어 반사될 때 반사율을 향상시키기 위해 무광택 백색도료로 도색 하였다. 레이저는 최대 출력 20mW 의 다이오드 레이저를 사용하였다.

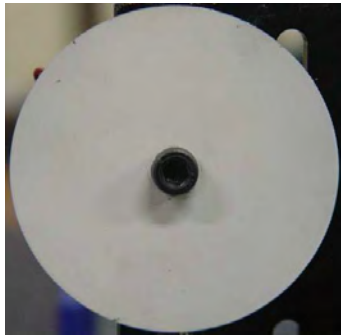


Fig. 2 Photograph of specimen

본 실험에서 구성된 시간 평균 ESPI 시스템이 Fig. 3 에 나타나 있다. 시편을 진동 시키기 위하여 시편 뒤쪽에 가진기(Exciter)를 부착하여 증폭기(Amplifier)와 함수 발생기(Funtion Generator)에 연결시킨다. 함수 발생기를 조작하여 원하는 주파수만큼 시편을 진동 시킬 수 있다. 시간 평균 ESPI 의 광경로를 살펴보면 레이저에서 나온 빔은 BS(Beam Splitter)에 의해 기준빔(reference beam)과 물체빔(object beam)으로 나뉘어진다. 물체빔은 Mirror 에 반사된 후 Spatial Filter 에 의해 시편의 크기만큼 레이저 빔을 확산시켜 시편에 조사되고 여기서 산란된 빛이 Beam Combiner 를 통하여 CCD 카메라로 들어오게 된다. 기준빔은 Mirror 와 Spatial Filter 를 통과한 후 Beam Combiner 앞에 놓인 Convex Lens 로 초점을 맞추어 CCD 카메라로 들어오게 된다. 여기서 시편에 조사되어 산란된 물체빔과 기준빔이 만나 간섭을 일으키게 되어 물체의 변형에 따른 정보가 빛의 강도 분포의 형태로 기록된다. 기록된

상은 화상 처리 장치를 통하여 컴퓨터의 보조 기억 장치에 저장되고 계산을 거쳐 모니터에 간섭 무늬가 나타난다. 따라서 주파수를 변경시켜가며 각각의 고유 진동수에 대한 물체의 변형을 실시간으로 관찰할 수 있다.

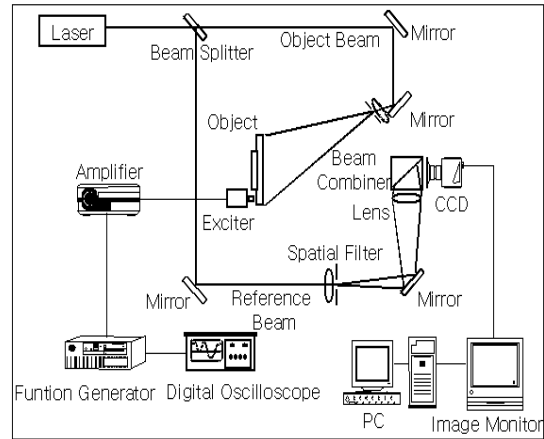


Fig. 3 A schematic of Time-average ESPI

5. 실험 결과

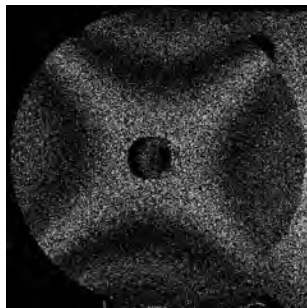
Fig. 4 는 가속도계를 부착시켜 진동 실험을 하여 PULSE 6.0 을 이용한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석 데이터이다. 여기서 검출된 시편의 공진 주파수는 2050Hz, 4880Hz, 8380Hz 이다.

본 실험에서 구성한 시간 평균 ESPI 시스템으로 찾아낸 시편의 공진 주파수는 2180Hz, 4900Hz, 8610Hz 이고, 각각의 간섭 무늬는 Fig. 5 의 (a-1), (a-2), (a-3)과 같다. 각각의 그림들에서 보는 바와 같이 점단위가 아닌 실시간으로 물체의 전면적인 진동 진폭 분포를 쉽게 확인할 수 있다. 가진기를 이용하여 0 ~ 10,000Hz 범위만큼 진동을 주다가 시편의 고유 진동수와 일치하게 되면 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 누구나 쉽게 알아볼 수 있는 무늬가 형성된다. 또한 간섭 무늬가 베셀 함수로서 나타나기 때문에 첫 번째 노달선을 중심으로 간섭 무늬 차수가 증가할수록 밝기가 점점 감소하는 형태를 띄고 있음을 알 수 있다. 그림에서 하얀 부분이 진동하지 않는 부분을 나타내는 노달선이다.

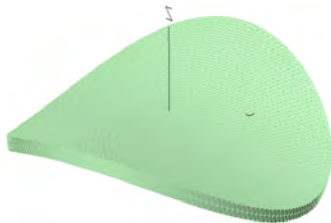
Fig. 5 의 (b-1), (b-2), (b-3)은 유한요소 프로그램 중의 하나인 Nastran 을 사용하여 시편의 형상을 모델링 하여 적당한 형태로 Mesh 한 후 진동 해석을 한 것이다. Nastran 에서 검출된 공진 주파수는 2130Hz, 4930Hz, 8610Hz 이다. 눈으로 쉽게 알아 볼 수 있게 각각의 공진 주파수에서의 형상을 3D 형태로 저장하였다.



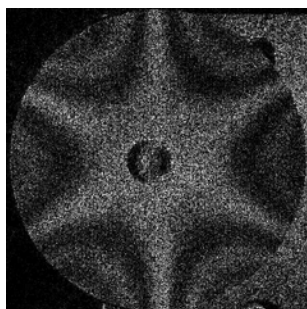
Fig. 4 FFT analysis of PLUSE 6.0



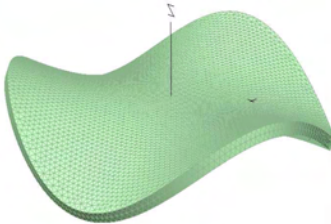
(a-1) Fringe pattern at 2180Hz



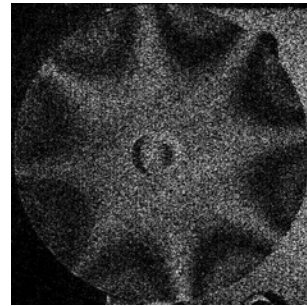
(b-1) Mode shape at 2130Hz for Nastran



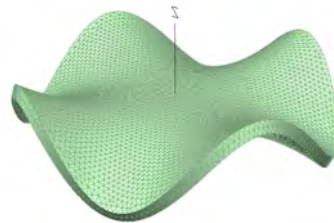
(a-2) Fringe pattern at 4900Hz



(b-2) Mode shape at 4930Hz for Nastran



(a-3) Fringe pattern at 8610Hz



(b-3) Mode shape at 8610Hz for Nastran

Fig. 5 Compare Time-average ESPI with Nastran

6. 결론

본 연구에서 사용한 시간 평균 ESPI 시스템을 이용하여 진동하는 물체의 모드 형태를 실시간으로 모니터를 통하여 관찰할 수 있었으며 검출된 시편의 공진 주파수를 PULSE 6.0 과 Nastran 의 FFT 분석 결과와 비교해 볼 때 오차 범위 5% 이내로 시스템의 신뢰도를 검증할 수 있었다. 오히려 시간 평균 ESPI 시스템이 가속도계를 이용한 진동 측정 방법 보다 유한요소 해석 결과와 더 정확함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. A. E. Ennos, "Speckle Interferometry", Laser speckle and Related Phenomena, edited by J. C. Dainty, Springer, Germany, 1975, pp.203
2. J. A. Leendertz, "Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect", Journal of Physics E, 3, 214, 1970.
3. Stroud, R. C. "Excitation, Measurement and Analysis Method for Model Testing", Sound and vibration, Aug. 1987.
4. Robert D. Cook, David S. Malkus and Micheal E. Pleshe "Concepts and applications of Finite element Analysis", John Wiley & Sons, pp. 367~417, 1987.
5. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, pp. 165~196, 1989.