

ESPI에서 AO변조기를 사용한 진동모드 정량화에 관한 연구

박낙규, 유원재, 안중근 (전북대학교 대학원), 강영준 (전북대학교 기계공학부)

A study on the Quantification of vibration mode by ESPI using A·O Modulator

Nak Kyu Park, Won Jae Ryu, Joong Keun An (Mech. Eng. Chonbuk Univ.),
Young Jun Kang (Mech. Eng. Chonbuk Univ.)

ABSTRACT

Recently, the study on the vibration analysis of machinery is greatly important and ESPI is widely used because of its many attractive features. Firstly, ESPI can be used to measure the vibration mode shape and the phase in real-time. Secondly, the conventional measuring methode, such as accelerometers, take much time to measure the whole field of object, but ESPI needs shorter time than those other methods. Because ESPI is a field-inspection method. Thirdly, ESPI is a non-contact measuring system. ESPI does not have influence on the specimen. Beyond these features, there are several advantages in ESPI system.

In this paper, the Stroboscopic ESPI system is described for measurement of a vibration mode shape. The Stroboscopic ESPI system had been used to visualize the vibration mode shape, in which EO(Electro-Optic)modulator was used to chop CW(Continuous Wavefront)laser. But it was not easy to control EO modulator and quantified the vibration amplitude and the phase of circular metal plate.

At first, we found resonant frequency of the specimen by using time-averaged ESPI method. Nextly, the amplitudes of specimen were quantified by using Stroboscopic ESPI and we compare the results which were obtained in several chopping ratio.

Key Words : Chopping (연속 레이저의 변조), Resonant frequency (공진주파수), Phase map (위상도), Unwrapping (위상펼침),

1. 서론

현대의 기계 구조물의 경우 진동에 대한 정확한 측정과 분석의 필요성은 과거의 것보다 더욱 커지게 되었다.

ESPI^(1,2)(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용한 진동 측정 방법의 경우 유한 요소법에서 재료의 물성치나 경계조건을 넣어주어야 하는 등의 번거로움과 접촉식 측정법에서 나타나는 접단위 측정의 한계성 및 진동 측정장치가 측정물의 진동에 영향을 미치게 되는 질량효과 등의 단점을 극복할 수 있다. 또한 CCD카메라를 기록 매체로 하여 컴퓨터로 처리함으로써 홀로그래피 방법⁽³⁾의 불편함을 제거하였다.

이러한 장점들을 가진 ESPI의 방법 중에는 실험 구성 방식이나 측정물의 목적에 따라 여러 가지 방법이 있는데 먼저, 시간 평균법은 실험적으로 진동 모드를 가시화하기가 용이하나 시스템의 특성상 진동 파형의 특정부분에서의 진동모드를 가시화 할 수 없다는 단점을 가지고 있다⁽³⁾. 펄스 ESPI⁽⁴⁾는 레이저 파장의 극히 일부의 펄스를 사용하여 진동모드를 가시화하는 방법으로 매우 높은 출력의 레이저를 필요로 하게 되는데 고출력의 레이저 사용은 경제성의 문제 뿐 만 아니라 출력이 높은 장비인 만큼 장비의 구조 및 운용하는 방법이 까다롭고 복잡하다. 이에 진동모드의 가시화 및 정량화에 스트로보스코픽 ESPI를 사용하여 위와 같은 단점들을 극복하고자 한다.

스트로보스코피 방법은 연속되는 레이저를 chopping시키기 위하여 AO(acousto-optic)modulator, EO(electro-optic)modulator 및 mechanical chopper 등이 사용된다. 국내의 경우 이미 진동모드 가시화에 있어 스트로보스코피 방법을 적용한 예가 있으며 또한 EO 변조기를 사용하여 진동모드의 정량화를 수행한 예도 있다. 그러나 EO 변조기는 제어가 까다로워서 측정물을 가진시키기 위한 함수파(function waveform)와 레이저 파형을 변조(modulate)시키기 위한 펄스의 동기 및 위상차의 조정에 어려움이 있어서 원하는 수준의 레이저빔을 얻어내지 못하며 결과적으로 ESPI 방법을 이용한 진동모드 가시화 및 정량화에 효율이 떨어진 실험결과값을 얻을 수 밖에 없었다.

따라서 본 논문에서는 스트로보스코피 방법에 AO 변조기를 사용하여 진동 모드의 가시화 뿐만 아니라 정량화에도 질적인 향상을 이루고자 한다. 여기에 더하여 chopping ratio 즉, 진동하는 물체과의 파장 대 변조된 레이저 빔의 비에 따라 정량화 되어 나오는 진동 진폭 값의 차이를 비교하여 보고자 한다.

2. 스트로보스코피 ESPI

스트로보스코피(stroboscopic) ESPI 방법은 진동 주기의 임의 부분에서 진동을 표본 추출하는 방법으로 연속 발진 레이저의 광경로 내에 AO 변조기(AOM, Acousto-Optic Modulator)나 EO 변조기(EOM, Electric-Optic Modulator) 또는 기계적 Chopper 등을 설치하여 얻어지는 스트로보 효과를 이용하여 물체의 진동에 대한 응답을 임의의 점에서 추출하는 방법이다. 변조기(modulator)는 진동 주기보다 적어도 10배 정도 짧은 빛의 펄스를 얻기 위해 사용된다. 이 펄스는 진동 주기의 유사한 두 부분에서 다중 노출을 하기 위해 진동 주기에 동조(synchronize)시킨다. 즉, 짧은 노출로 인하여 물체가 정지된 듯한 효과를 만들어 물체의 진폭을 측정하는 원리로서 강도 분포는 다음과 같다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) \cos^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y) (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right]$$

$I_0(x, y)$: 정지시의 간섭 영상의 세기

$a_0(x, y)$: 정지시의 진폭

θ_1, θ_2 : 조사, 관측 방향과 운동 벡터와의 사이각

여기에서 나타나는 간섭 무늬는 시간 평균법에서처럼 감쇠하는 J_0^2 형 패턴이 아닌 일정한 세기의 코사인 형태의 밝기 분포를 갖는다. 이 방법에 의한

간섭무늬의 분해능(resolution)은 시간 평균법의 경우보다 높기는 하지만 레이저 출력의 극히 일부만을 사용하므로 상대적으로 고효율 레이저를 사용해야 한다. 아래의 그림 1은 위 방법의 레이저 변조의 원리를 나타낸 그림이다.

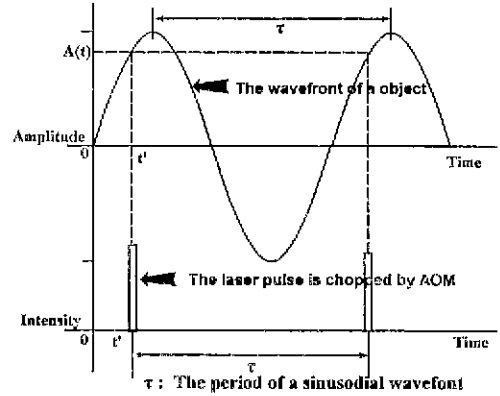


Fig. 1 Intensity modulation of laser beam

3. 실험 방법 및 결과

구성된 스트로보스코피 ESPI^(5,6,7,8,9) 시스템에서 광원은 파장이 532nm인 Nd-YAG 레이저를 사용하였으며, 시편은 직경 12cm, 두께 1.5mm의 금속판을 사용하였다.

광경로를 살펴보면 Nd-YAG 레이저에서 나온 빛은 스트로보효과를 얻기 위해 AO 변조기를 통해 변조된 다음 시스템 전체에 사용되고 AO 변조기로 chopping된 레이저빔이 두 개의 경로로 나뉘어지며 물체빔과 기준빔의 간섭^(10,11)으로 나타난 무늬가 CCD에 기록된다.

기준빔의 Mirror에 PZT를 설치하여 위상 이동을 실행하고, 함수 발생기는 두 개의 채널로 같은 형태의 함수를 발생시켜 주는데 하나의 채널은 측정물을 가진시켜 주는데 사용되며 다른 하나의 채널은 펄스 발생기로 연결되고 이 펄스 발생기는 AO 변조기 드라이버에 연결되어 레이저빔을 변조하는데 사용된다.

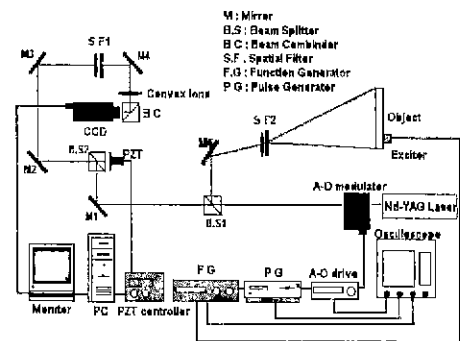


Fig. 2 Experimental Setup

1) 스트로보스코픽 방법에 의해 진동모드를 가시화하기 전에 먼저 시간평균법으로 진동모드를 가시화하는 작업을 통하여 측정물의 고유 진동수를 쉽게 찾을 수 있고, 나타난 진동 패턴을 스트로보스코픽 방법에 의한 진동패턴과 비교하여 볼 수 있다.

진동모드를 검색하여 본 결과 479Hz, 955Hz, 2017Hz, 3539Hz, 4023Hz, 5408Hz, 5568Hz에서 시편의 진동모드를 관찰할 수 있었다.

이러한 각각의 고유진동수를 함수 발생기와 가진기에 입력하여 줌으로써 Fringe pattern을 얻었다.

본 실험에서 사용한 변조기의 경우 입사한 빔과 6.4 milli radian의 각을 이루며 회절하여 진행하게 되는데 시스템에서 사용하는 레이저빔은 이 회절된 빔이다. 회절이 이루어진 빔과 그렇지 않은 빔과의 비율을 회절효과를 50%이상으로 하여 CW레이저의 일부 파형만 사용하는 스트로보스코픽 방법으로는 적절한 수준의 물체빔을 얻을 수 있다. 회절되어 시스템에 사용되는 빔의 폭은 진동 물체의 파장의 1/10 정도로 하였다.

다음 Fig. 4는 위와 같은 시스템 구성방법으로 얻은 위상지도(phase map)이고, Fig. 5는 위상지도를 unwrapping하여 본 그림이다.

또한 Fig. 6은 unwrapping한 이미지에 나타난 변형량의 정보를 알기 쉽도록 나타내기 위하여 각각의 이미지를 3차원으로 표현한 그림이다.

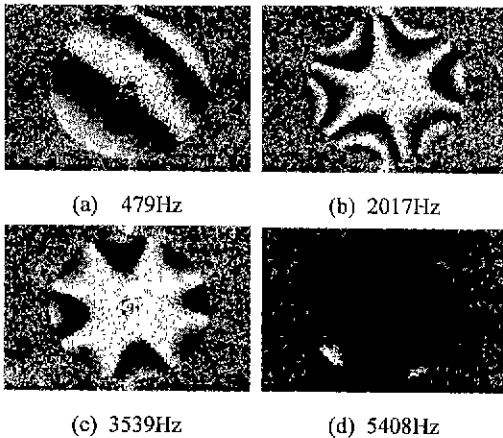


Fig. 4 The phase maps of specimen at resonant frequencies

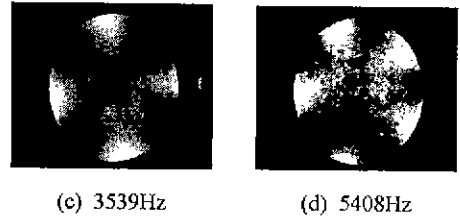
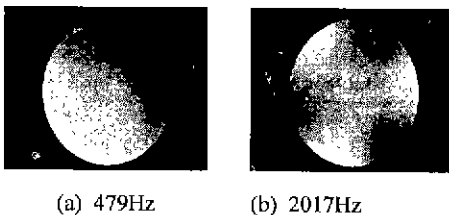


Fig. 5 The unwrap images of specimen

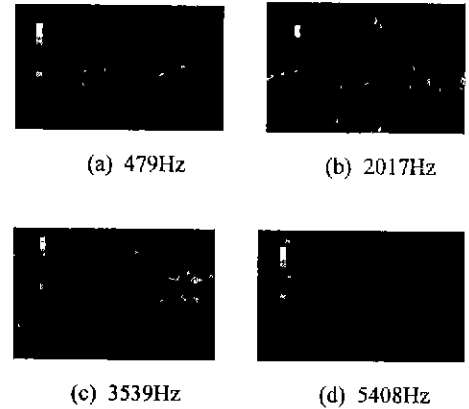


Fig. 6 The 3-D plots of specimen at resonant frequencies

2) 펄스 폭에 따른 진동모드 형태의 비교하기 위해 함수 발생기에서 발생시키는 파형과 펄스 발생기에서 발생하는 파형을 조정하여 측정물의 진동파형에 스트로보효과를 나타내는 레이저빔과의 위상차 및 빔의 폭을 조정하는 결과가 된다.

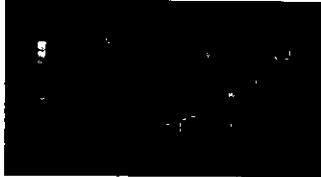
본 연구에서는 AO 변조기에 의해 회절되어 단락된 빔의 폭을 진동물체의 파장과 비교하여 1/16, 1/8, 1/4의 세 가지 경우를 적용하여 이것이 정량화된 진동모드에 어떤 영향으로 나타나는가를 알아보았다.

다음 그림은 2017Hz에서의 물체가 진동할 때 진동파의 파장의 1/16, 1/8, 1/4의 레이저빔의 펄스의 폭을 각각 적용하며 얻어낸 3차원 정량화된 데이터인데 그림에서 보면 레이저빔의 펄스 폭을 넓게 적용하면 할수록 각 점에 대해서 진동량이 더 많은 것처럼 나타내고 있을 뿐만 아니라 진동 진폭이 비교적 높은 부분에서 변위량이 매끄럽게 이어지지 않고 거칠게 나타나는 것을 볼 수 있다.

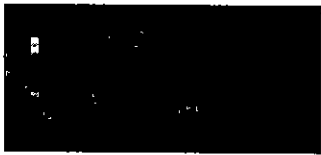
이로써 변조된 빔의 폭이 커질수록 오차가 많아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 고주파 공진 주파수 5408Hz에서도 같은 결과로 나타났다.



(a) 2017Hz(1/16)



(b) 2017Hz (1/8)



(c) 2017Hz(1/4)

Fig. 7 The 3-D plots of specimen in several chopping ratio

6. 결론

본 논문에서는 ESPI 방법의 한 종류인 스트로보스코픽 방법을 진동모드 계측에 적용함에 있어 보다 나은 개선점을 찾고자 하여 여러 가지 조건을 적용해 보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전자스펙클 간섭계를 구성하여 진동하는 금속원판의 진동계측실험을 수행, micrometer 단위의 진동 진폭과 모드 형태를 계측할 수 있었다.

(2) 스트로보스코픽 방법을 진동모드계측에 적용하여 진동 진폭을 정량화하는데 적합한 방법임을 알았다.

(3) 스트로보효과를 얻기 위해 사용하는 여러 가지 chopping 방법 중 AO 변조기를 사용함으로써 획득한 정보의 유용성에 보다 나은 결과를 얻었다.

(4) 레이저빔 펄스의 폭을 다양하게 적용하여 본 결과 펄스의 폭이 크면 클수록 정량화된 진동 진폭의 값에서 오차가 커짐을 알 수 있었다.

(5) AO 변조기는 1차 회절된 빔을 사용하여

extinction ratio가 높음으로써 확실한 chopping이 가능한 점과 정렬이 쉽다는 특성으로 인하여 높은 현장 적용성을 확인하게 되었다.

참고문헌

1. Ole J. Lokberg, "ESPI - The ultimate holographic tool for vibration analysis", J. Acoust. Soc. Am, Vol. 75, No. 6, 1984.
2. Ryszard J. Pryputniewicz, "Measurement of Vibration pattern using Electro-Optic Holography", SPIE, Vol. 1162, pp. 456~467, 1989.
3. K. A. Stetson, et al, "An Electro-Optic Holography system with real-time arithmetic processing", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 8, No. 2, pp. 69-76, 1989.
4. Charles M. Vest, "Holographic Interferometry", John Wiley & Sons. Press, pp. 36~ 77, 1979.
5. P. Hariharan and B. F. Oreb, "Stroboscopic Holographic Interferometry : Application Of Digital Techniques" Optics Communications, Vol 59, No. 2, 1986.
6. Y. M. He & Y. S. Tan & C. H. Ku, "Stroboscopic Laser Speckle Interferometry Used for Measuring Dynamic Behaviour of Structures", Optics in Engineering Measurement, SPIE Vol. 599, pp. 166~ 172, 1985.
7. P. Hariharan, B. F. Oreb, and C. H. Freund, "Stroboscopic holographic interferometry : measurements of vector components of a vibration", Applied Optics, Vol. 26, No. 18, pp. 3899~3903, 1987
8. Xizhou wang, Yushan Tan, "Vibration Modal Analysis Using Stroboscopic Digital Speckle Pattern Interferometry(DSPI)", A Speckle Techniques, Birefringence Methods, and Applications to Solid Mechanics, SPIE Vol. 1554, pp. 907~914, 1991.
9. 문상준, 강영준, 백성훈, 김철중, "스트로보스코픽 전자스펙클 간섭계를 이용한 진동모드의 측정", 1995년도 한국물리학회 학술대회 Vol. 13, No. 2, 1995. 10.
10. K. A. Stetson and P. A. Taylor, "The use of normal mode theory on holographic vibration analysis with application to an asymmetrical circular disk", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 4, pp. 1009-1015, 1971.
11. J. D. Fieldhouse and T. P. Newcomb, "Double pulsed holography used to investigate noisy brakes", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 25, pp. 455~ 494, 1996.