

동경방향 스펙클 전단 간섭계를 이용한 대칭형 물체의

진동 모드 특성에 관한 연구

A study on characteristics of mode shapes of symmetrical objects using radial Electronic Shearography

최장섭* · 강영준 · 오재윤 · 채희창**

* 국방과학 연구소, **전북대학교

Abstract

In this paper, radial sheared electronic shearography was studied in order to measure vibration characteristics of circular or radial symmetric objects. We calculated amplitude of vibration by using electro-optic holography theory, and utilized a porror prism for optical arrangement of sheared two images in this experiment. In this case, the data measured by shearing interferometer give us a distribution of the gradient of vibration amplitude. This developed system is applied to symmetrical objects such as fans of airconditioner and circular plates to test vibration characteristics.

1 서론

홀로그래피 간섭법은 구조물의 고유 진동수를 찾아내고 이를 가시화 하는 유용한 측정방법임을 전부의 연구로부터 확인하였다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾ 진동 계측에 있어서 홀로그래피 간섭법의 특징은 여러 가지를 들 수 있겠으나 먼저 물체의 진동모우드형을 가시화함으로써 물체의 진동특성에 관한 정보를 쉽게 습득할 수 있으며 또한 기존의 점(point)단위 측정 방법이 아닌 물체면에 레이저가 조사되는 부위 전체에 걸쳐 물체의 진동 형태를 관측 및 계측 할 수 있다는 것이다. 그러나 홀로그래피 간섭법은 공기의 유동, 주위의 진동 등에 매우 민감하게 반응하기 때문에 실제의 산업 현장 적용에 있어서 많은 어려움이 발생하고 있다.⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾ 따라서 이러한 단점을 보완하고 좀더 실용적인 진동 계측용 간섭계에 관한 연구가 활발히 행하여지고 있는데, 이러한 연구가운데에서 요즘 주목받고 있는 방법중의 하나로 전단 간섭법을 들 수 있다. 전단 간섭법은 광학계의 구성상 환경적인 영향을 거의 받지 않으며 전단량의 조절로 측정 감도의 조절이 가능하다.⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾ 또한 특기할 만한 특징으로 물체의 구조적인 특성에 맞는 다양한 전단 방법의

적용이 가능하다. 즉 물체의 형태에 따라 Lateral 전단, Radial 전단, Rotational 전단, Inversion 전단 등이 광학계의 구성에 따라 구현 될 수 있기 때문에 이러한 특징을 이용함으로써 물체의 구조적인 대칭성을 파악하는데 이용될 수 있는 여지가 있다. 본 연구에서는 다양한 전단 간섭법중 radial 전단 간섭법을 적용하여 광학계의 특성을 파악하기 위하여 원형 평판에 대하여 다양한 사전 실험을 수행하여 광학계의 성능을 파악하였으며 또한 본 광학계를 에이컨 Fan의 불균일성을 조사하기 위해서 적용한 결과를 논했다.

2. Electronic Shearography에 Electro-Optic Holography 이론 적용

이전의 연구로부터 전자광학적 홀로그래피(Electro-Optic Holography) 이론은 기존의 전자스펙클 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry)의 단점 즉, 직접적인 진동 모우드 형태의 관측, 스펙클 노이즈의 제거 그리고 진동 진폭의 정량화 등의 단점을 보완한 간섭이론임을 보였다.⁽³⁾ 따라서 본 연구에서는 위의 Electro-Optic Holography를 전단 간섭계에 도입함으로써 위의 이론의 장점을 이용하였다.⁽⁷⁾

본 이론의 구체적인 내용은 참고 2를 참조하기 바라며 간단하게 정리 요약하면 다음과 같다.

물체가 진동하고 있는 경우 광학계의 CCD 카메라의 빛의 강도분포는 다음과 같다.

$$I(x, y) = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos(\Delta\phi) J[\Omega(x, y)] \quad (1)$$

위의 식에서,

- I_0 = 물체빔의 강도
- I_R = 기준빔의 강도
- $\cos(\Delta\phi)$ = 물체빔과 기준빔의 위상차로 인한 스페클
- $J[\Omega(x, y)]$ = 1종 0차 베셀함수

또한 위의 식에서 베셀함수의 인자 $\Omega(x, y)$ 를 간섭무늬의 제적함수(Fringe locus function)이라고 하며 이는 다음 식과 같이 물체의 진폭에 관한 정보를 갖고있는 값이다.

$$\Omega(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial A(x, y)}{\partial r} \Delta r \quad (2)$$

여기서,

- λ = 광학계에 사용된 레이저 빔의 파장
- $A(x, y)$ = 물체의 진폭
- r = 물체의 기하학적 중심에서 반경방향에 따른 거리

따라서 식(2)에서 알 수 있는 바와 같이 실험 결과 나타나는 간섭무늬는 r 의 변화에 대한 진폭의 1차 도함수에 관한 정보를 보여줌을 알 수 있다.

3. 실험 장치와 실험 방법

Fig1은 제작된 장치의 개략도를 나타내고 있다. 본 장치에 사용된 광원은 파장이 532nm인 frequency-doubled Nd:Yag 레이저이고 CCD 카메라로부터 전달되는 신호를 처리하기 위한 화상 처리 장비로는 ITI사의 VFG image board를 사용하였다. 본 광학계에서 알 수 있듯이 레이저 소스에서 나온 빛은 거울 M과 beam expander를 거쳐 shaker에 의해 진동하고 있는 물체 면에 조사된다. 다음 물체 면에서 반사되어 산란된 빛은 Beam Splitter를 통하여 2개의 빔으로 나누어져 각각 PZT1과 PZT2로 입사하게 된다. PZT1은 스페클 노이즈를 제거하기 위하여 레이저 빔에 90° 씩의 위상 이동(phase stepping)을 시키기 위한 것이며 PZT2는 진동 진폭의 정량화를 위하여 레이저 빔에 위상변조(phase modulation)를 하기 위한 장치이다.

2 channel F/G는 물체와 레이저 빔의 진동원을 공급하기 위한 것이다.

본 연구에서는 제작된 광학계의 성능을 평가하고 실제적인 적용을 위해서 여러 조건에 따른 성능 실험을 수행하고 이를 분석한 뒤 실제적인 적용 실험을 수행하였다.

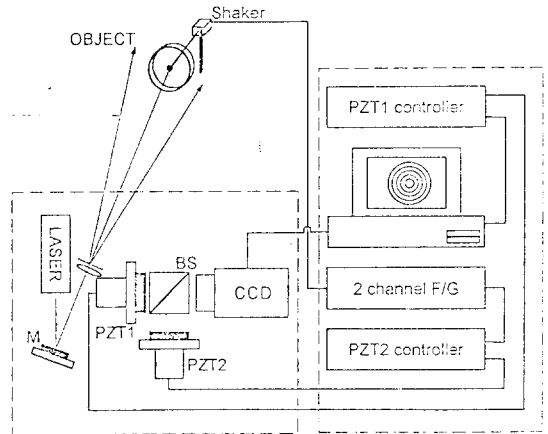


그림 1. Schematic of radial electronic shearography

4. 실험 결과

Fig2에서 Fig5까지는 직경 D=254mm의 원형 플레이트의 시편이며, 균질한 원형평판에 대하여 중심점을 완전고정하고 주변부에 가진기를 부착하여 고유진동 모드들을 측정 한 그림이다.

Fig2(a)는 시편에 하중을 부착하지 않은 실험물의 그림이며 (b)는 고유진동수 F=104.5Hz, (c)는 고유진동수 F=395Hz, (d)는 고유진동수 F=922.5Hz, (e)는 고유진동수 F=1619Hz로 가진한 상태의 간섭무늬 패턴을 나타내고 있다.

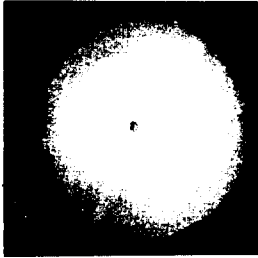
Fig3(a)는 재질이 방진고무이며 무게 10g의 하중을 부착한 상태를 나타낸 그림이며 Fig2와 동일한 조건으로 가진했다. 그림(a)에서 (d)까지의 고유진동수로 가진한 상태의 간섭무늬 형태를 나타내고 있어서 Fig2와는 상당히 다른 형태를 보이고 있다.

Fig4는 재질을 금속조각으로 하고 무게8g의 하중을 가하여 Fig2와 동일한 고유주파수와 가진량으로 한 실험결과이다.

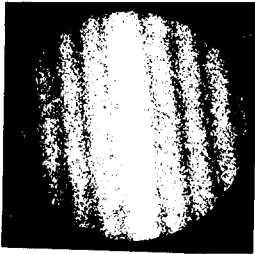
Fig5는 고유진동수 $F=1619\text{Hz}$ 에서 가진한 경우이며 재질은 방진고무이고 무게10g 의 하중을 그림(a), (b), (c)의 위치에 부착하여 실험하였으며 각각의 경우의 간섭무늬는 (d), (e), (f)에 나타나있다.

Fig6은 공기조화용 fan에 대하여 가진하여 고유진동수의 모우드 측정을 하였는데 하중을 가지지 않은 상태에서 그림(b)~(i)의 고유진동수에서의 간섭무늬 패턴이다.

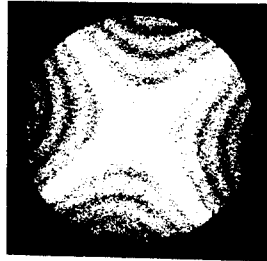
Fig2의 경우



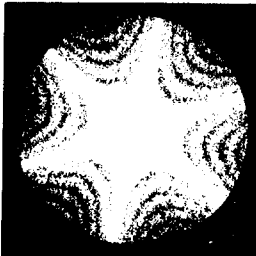
(a) 실험 물체



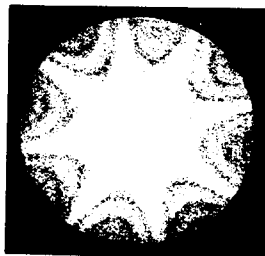
(b) $F=104.5\text{Hz}$



(c) $F=395\text{Hz}$

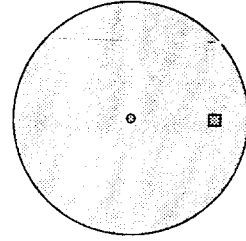


(d) $F=922.5\text{Hz}$

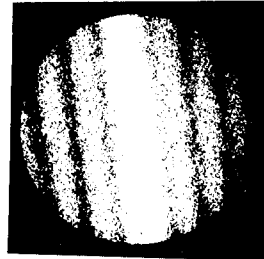


(e) $F=1619\text{Hz}$

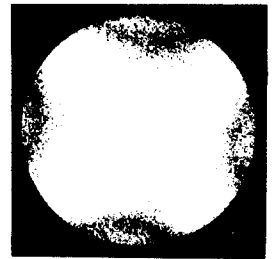
Fig3의 경우



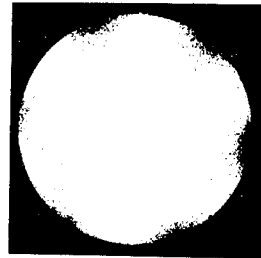
(a) 실험 물체



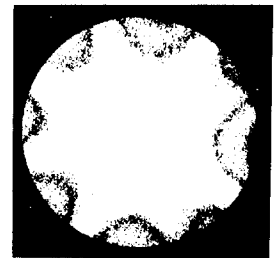
(b) $F=104.5\text{Hz}$



(c) $F=395\text{Hz}$

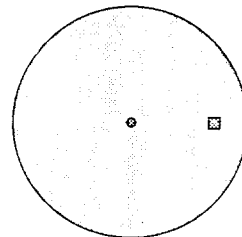


(d) $F=922.5\text{Hz}$



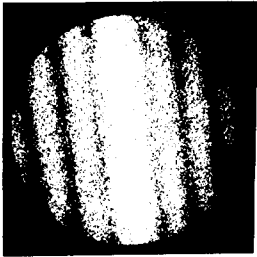
(e) $F=1619\text{Hz}$

Fig4의 경우

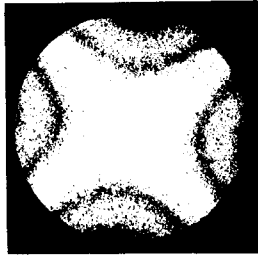


(a) 실험 물체

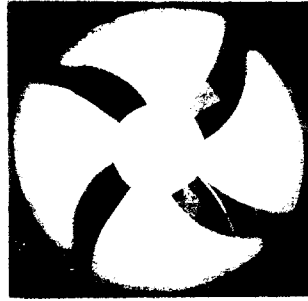
Fig6의 경우



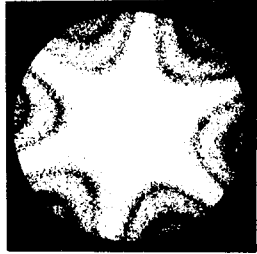
(b) F=104.5Hz



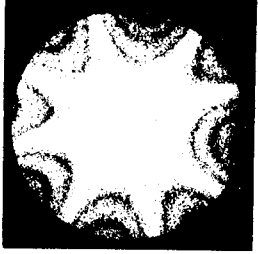
(c) F=395Hz



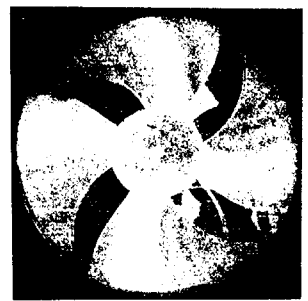
(a) 실험물체



(d) F=922.5Hz

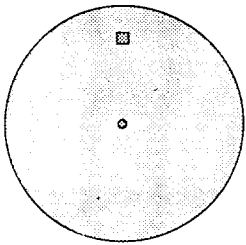


(e) F=1619Hz

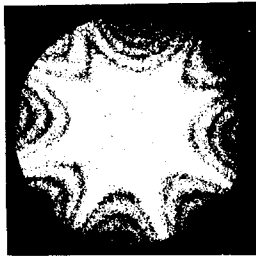


(b) F=55Hz

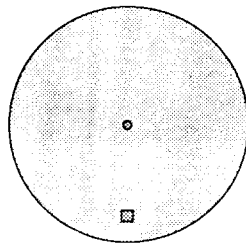
Fig5의 경우



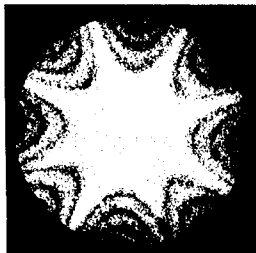
(a)



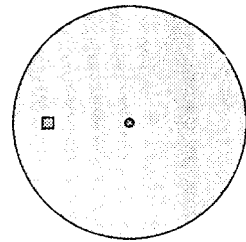
(d) F=1619Hz



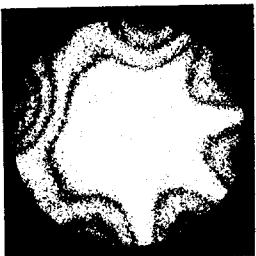
(b)



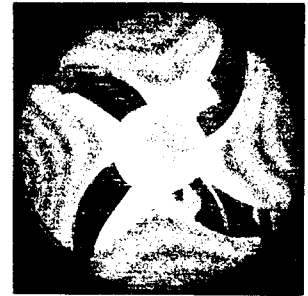
(e) F=1619Hz



(c)



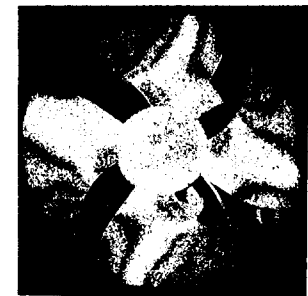
(f) F=1619Hz



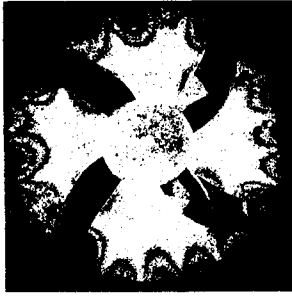
(c) F=90.2Hz



(d) F=150.5Hz



(e) F=359Hz



(f) F=768Hz



(g) F=1188Hz

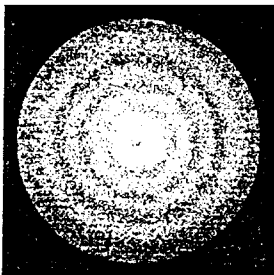


(h) F=1320Hz

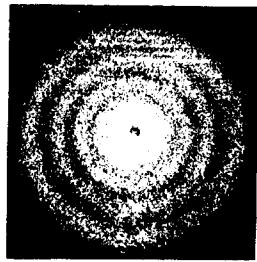


(i) F=1830Hz

Fig 7 shearing data의 정량화



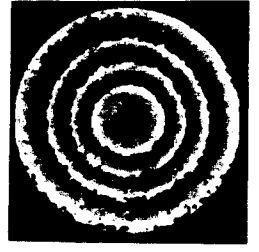
(a) Without B



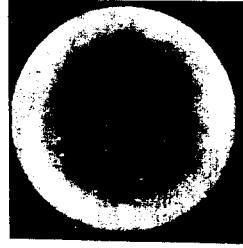
(b) With -B



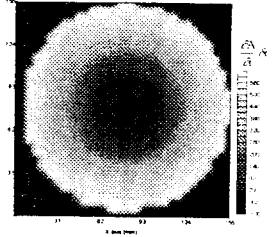
(c) With +B



(d) phasemap



(e) Demodulation



(f) Contour map

Fig7은 진폭을 정량적으로 계산하기 위하여 EOM(electro-optic modulation)을 사용하여 기준빔에 각각 0, +B, -B의 위상변조(Phase modulation)을 가한 결과가 Fig7의 (a)~(e)에 나타나 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 위상변조를 통하여 3개의 그림에서 간섭무늬가 각각 $\pi/3$ 씩 나타나 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 물체의 각 점에서 강도값이 바뀌어 진다. 이렇게 달라진 강도값으로부터 식 (1)과 (2)에서 계측함수를 구할 수 있다.

위의 3개의 상으로부터 계산된 위상지도(Phase Map)가 그림(d)이며 오차가 보정되고 위상필치가 행해진 결과가 그림(e)에 나타나 있다. 그림(f)는 (e)의 강도분포로부터 계산된 물체의 진동으로 인한 변위를 정량적으로 계산하는 것을 나타낸 것이다.

5. 결론

본 논문을 원점에 대하여 대칭성을 갖는 물체의 진동 특성을 파악함으로써 그 물체의 불균일성을 판정하기 위한 동경방향 전단 간섭계의 구성에 관한 것이다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 동경방향 전단 간섭계를 이용하여 원점 대칭성을 갖는 구조물의 균일성을 검사할 수 있음을 보였다.
- (2) 낮은 주파수의 고유 진동 모드에서는 물체에 부착한 하중의 효과가 거의 나타나지 않았으나 고주파 성분 쪽에서는 확연히 그 효과가 나타나고 있음을 알았다.
- (3) Fan과 같은 복잡한 구조를 갖는 물체에 대해서는 여기서 발생하는 복잡한 간섭무늬의 해석방법에 관한 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다.

6 참고문헌

1. 최장섭, 강영준, "전자 광학적 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동물체의 모드형태 계측법", 대한기계학회논문집 (A) Vol. 20, No. 2, pp. 564~574. 1996.
2. 강영준, 문상준 : "위상이동 실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 파이프의 내부결함 측정법", 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 2, p68~75, 1996.2
3. R.Krishna Murthy, R.K.Mohanty, R.S.Sirohi and M.P.Kothiyal, "Radial speckle shearing interferometer and its engineering applications", OPTIK, 67, No. 1(1984)85-94
4. 강영준, 최장섭 : "시간평균 ESPI를 이용한 진동물체의 모드 형태 계측법", 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 2, p84~93, 1996.2
5. R. Jones and C. Wykes, 1989, "Holographic and speckle interferometry", Cambridge University Press, pp.122~164.
6. Karl A. Stetson and William R. Brohinsky, 1988, "Fringe-shifting technique for numerical analysis of time-average hologram of vibrating objects", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 5. No. 9.
7. R. J. Pryputniewicz and K. A. Stetson, 1989, "MEASUREMENT OF VIBRATION PATTERNS USING ELECTRO-OPTIC HOLOGRAPHY", SPIE, Vol. 1162.
8. N. Krishna Mohan, H. O. Saldner and N. E. Molin, 1993, "Electronic shearography applied to static and vibrating objects", Optics Communications, Vol. 108, pp.197~202.
9. 최장섭, 문상준, 강영준, 1995, "시간평균 ESPI에 의한 진동 Mode Shape의 계측", 한국정밀공학회 춘계학술대회는문집.
10. P. A. Klumpp and E. Schnack, 1990, "SHEAROGRAMS WITH VARIABLE MEASUREMENT SENSITIVITY" Experimental Techniques, pp. 42-44.