技術論文 한국정밀공학회지 제14권 제12호 (1997년 12월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No. 12. December. 1997.

대칭형 물체의 진동 진폭 분포 측정을 위한 레이디얼 전단 간섭계에 대한 연구

강 영 준*, 최 장 섭**, 노 경 완***

A Study on Radial Electronic Shearography for Measuring Amplitudes of Vibration of Symmetrical Objects

Young-June Kang* , Jang-Seob Choi** and Kyung-Wan Rho***

ABSTRACT

In this paper, a newly radial electronic shearography system was developed in order to study vibration characteristics of symmetrical objects. We utilized the electro-optic holography theory for quantificational analysis and a porror prism for shearing two images radially in this study. These image data obtained by this shearography give us various distributions of the gradient of vibration amplitude, and they are useful informations to study vibrational characteristics of symmetrical objects. Finally this developed system with phase stepping and modulation was applied to fans and disks to inspect characteristics of the vibration and the balance of symmetrical objects and obtained good results.

Key Words: Radial Electronic Shearography(레이디얼 스페클 전단 간섭계), Phase Stepping(위상이동), Phase Modulation(위상변조), Symmetrical Objects(대칭형 물체)

1. 서 론

홀로그래피 간섭법은 구조물의 고유 진동수를 찾아내고 이를 가시화하는 유용한 측정방법임을 이전 연구로부터 확인하였다.[1][2] 진동 계측에 있어서 홀로그래피 간섭법의 특징은 여러 가지를 들 수 있겠으나 먼저 물체의 진동형을 가시화함으로서 물체의 진동특성에 관한 정보를 쉽게 습득할 수 있다. 또한 가장 일반적인 진동 측정 방법인 가속도계를 이용한 측정 방법은 점(point)단위 측정 방법인데 반하여, 홀로그래피 간섭법은 물체면에 레이저가 조사되는 부위 전체에 걸쳐 물체의 진동 형태를 관측 계측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 홀로그래피 간섭법은 공기의 유동, 주위의 진동 등에 매우 민감하게 반응하기 때문에 실제의 현장 적용에 있어서 많은 어려움이 발생하고 있다.[3][4][5][6] 따라서 이러한 단점을 보완하고 좀 더 실용적인 진동 계측용 간섭계에 관한 연구가 많이 행하여지고 있는데, 이러한 연구 가운데에서 요즈음 주목받고 있는 방법중의 하나가 전단 간섭법이다. 전단 간섭법은 광

* 전북대학교 기계공학부
** 국방과학연구소
*** 전북대학교 대학원

학계의 구성상 외부 환경의 영향을 거의 받지 않으며, 전단량의 조절로 측정 감도의 조절이 가능하다.[7][9] 또한 특기할만한 특징으로 물체의 구조적인 특성에 맞는 다양한 전단 방법의 적용이 가능하다.[7][8] 즉 물체의 형태에 따라 측면형(lateral), 방사형(radial), 회전형(rotational)과 반전형(reversal) 전단 등이 광학계의 구성에 따라 구현될 수 있으며, 그 중에서 radial 전단 간섭법의 경우 구조적인 대칭성을 지니는 물체의 기계적 특성을 파악하는데 이용되어진다.[11] 본 연구에서는 위의 다양한 전단 간섭법 중 대칭 구조물의 진동 특성을 알아보기 위해 방사형(radial) 전단 간섭법을 적용하여 전단 간섭계를 구성하였고, 본 간섭계의 특성을 파악하기 위하여 원형 평판을 대상으로 다양한 응용 가능성 실험을 수행하였다. 이러한 응용 가능성 실험은 본 간섭계를 이용하여 진동의 최저와 최대 측정 범위를 알아보고, 실제 산업 현장의 적용 여부를 가늠해보기 위해서이다. 그러므로, 실제 산업현장에서 사용중인 공기조화용 팬(fan)의 진동 진폭 분포를 측정하고, 그에 따른 본 광학계의 성능을 파악해 보았다.

2. 전단 간섭계의 원리

Fig. 1은 방사형 전단 간섭계의 개략도이다. 시험할 물체에 광원을 조사하고 그로부터 반사되어 나온 광원을 포로 프리즘(porror prism)과 광분할기(Beam Splitter, BS)를 통하여 나오면, 하나는 수축되어진 빔이, 다른 하나는 팽창되어진 빔이 나오게 된다. Fig. 2는 보다 상세히 그린 그림으로서 그 그림을 보면 더 잘 알 수 있다. 광원 U_O가 물체면에 조사되면 여기에서 산란된 빛이 광분할기(BS)에 입사된다. 이렇게 입사된 빛은 각각 두개의 빔(Beam)으로 나누어진다. 한 빔은 입사광에 수직하게

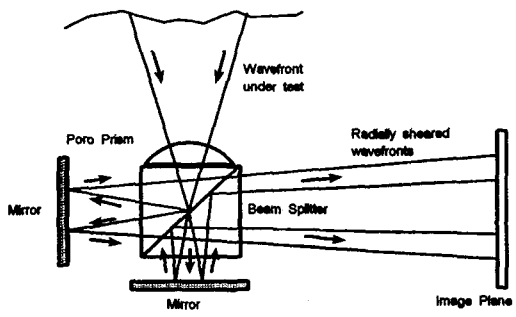


Fig. 1 Schematic block for a radial shear interferometer

놓여있는 반사경 M1에서 반사되어 다시 광분할기(BS)를 거쳐 상면(Image Plane, IP)에서 상을 맺는다. 그리고 다른 하나의 빔은 광분할기(BS)를 거쳐 입사광과 수직한 방향으로 입사되고 반사경 M_2에서 반사된다. M_2에서 반사된 빔은 렌즈 L을 거쳐 상면에서 상을 맺게 되는데, 이 M_2를 통과한 빔에 의하여 맺어진 상은 M_1에 의해 맺힌 상과 일치하지 않고 더 작은 상을 형성하여 S_x만큼 전단되어 나타난다.

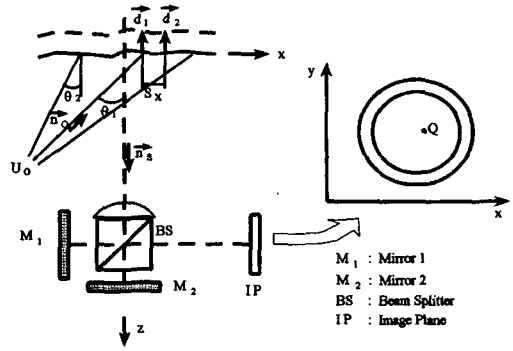


Fig. 2 The optical arrangement of a radial shear interferometer

따라서 물체면의 임의점 Q는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전단 간섭계의 광학계의 상면에서 두개의 상이 서로 전단되어 있기 때문에 거리 S_x만큼 떨어져 나타나고, Q는 물체가 실제로 움직인 변위 $\vec{d}_1$과 $\vec{d}_2$의 조사점이 된다. Q에 의해 전달된 위상의 위상 변화는 다음 식과 같다.[7]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_o - \vec{n}_s)\cdot(\vec{d}_1 - \vec{d}_2)$$
$$= \frac{4\pi}{\lambda}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)\Delta d \qquad (1)$$

여기에서, λ : 레이저의 파장
$\vec{n}_o$: 조사 방향을 나타내는 단위벡터
$\vec{n}_s$: 관측 방향을 나타내는 단위벡터
θ_1 : 평면에 수직한 물체빔의 각
θ_2 : 평면에 수직한 관측방향의 각

위의 식 (1)에서 $\vec{n}_o$와 $\vec{n}_s$은 서로 직각이며, Δd는 테일러 정리를 이용하여 다음식과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x}\frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2}\frac{(\Delta x)^2}{2!}\cdots \quad (2)$$

Δx는 상면에서 S_X와 같고 이 값은 충분히 작기 때문에 위의 식에서 2차 이상의 고차 항을 무시할 수 있다. 그러므로 식(2)을 식(1)에 대입해서 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{\partial d}{\partial x}\right)S_X \quad (3)$$

따라서 나타나는 간섭무늬는 $\partial d/\partial x$의 값이 일정한 등고선(contour)을 나타낸다. 다시 말해 전단 방향 x에 대한 물체의 면외 변위 d의 1차 미분값이 일정한 간섭무늬가 보여진다. 이때 M_2의 경사각에 의해 S_X가 변경될 수 있으므로 전단 방향뿐만 아니라 광학계의 민감도를 간단히 바꿀 수도 있다.[5]

3. 시간 평균법의 이론 적용

이전의 연구로부터 전자 광학적 홀로그래피(Electro-Optic Holography) 이론은 기존의 전자 스페클 간섭계(Eletronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)의 단점 즉, 직접적인 진동 모우드 형태의 관측, 스페클 노이즈의 제거, 그리고 진동 진폭의 정량화 등을 보완한 간섭이론임을 보였다.[9] 따라서 본 연구에서는 위의 전자 광학적 홀로그래피를 전단 간섭계에 도입함으로써 위 이론의 장점을 이용하였다.[10]

본 이론을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

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

$$I(X,Y) = I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\cos(\Delta\phi)M[\Omega(x,y)] \quad (4)$$

여기에서, I_o : 물체빔의 강도
I_R : 기준빔의 강도
$co(\Delta\phi)$: 물체빔과 기준빔의 위상차로 인한 스페클
$M[\Omega(x,y)]$: 특성함수

위의 식에서 M은 물체의 변형으로 인한 기준빔과 물체빔 사이의 간섭을 변조(modulation)시키는 특성함수(characteristic function)로서 정적인 변형의 경우에는 코사인 함수가 되고, 진동과 같은 동적인 변형인 경우에는 베셀함수가 된다. 또한 Ω는 간섭무늬 궤적함수(fringe locus function)이다. 여기에서 깨끗한 간섭무늬를 얻기 위하여 위 (4)식의 불규칙 위상인 $\Delta\phi$항을 제거하여야 한다. 이 불규칙 위상항은 기준빔에 4번 90°의 위상을 주는 위상이동법(phase stepping)을 이용하여 제거할 수 있는데 이를 실시하면 다음과 같은 4개의 식을 얻을 수 있다.[5]

$$I(X,Y) = I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\cos(\Delta\phi)M[\Omega(x,y)] \quad (5)$$
$$I(X,Y) = I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\sin(\Delta\phi)M[\Omega(x,y)] \quad (6)$$
$$I(X,Y) = I_o + I_R - 2\sqrt{I_o I_R}\cos(\Delta\phi)M[\Omega(x,y)] \quad (7)$$
$$I(X,Y) = I_o + I_R - 2\sqrt{I_o I_R}\sin(\Delta\phi)M[\Omega(x,y)] \quad (8)$$

위 다항식들을 연립하면 다음 (9)식으로 표현된다.

$$(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16 I_o I_R M^2[\Omega(x,y)] \quad (9)$$

물체가 고유진동수로 진동할 경우 물체의 변형은 정현적이므로, 이 경우 특성함수 M은 다음과 같다.

$$M[\Omega(x,y)] = J_o[\Omega(x,y)] \quad (10)$$

즉, 간섭무늬가 제 1종 0차 베셀함수로 변조되므로 식(10)은

$$(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16 I_o I_R J_0^2[\Omega(x,y)] \quad (11)$$

이 된다. 그러므로 간섭무늬 중 어두운 부분의 중심들은 $J_o[\Omega(x,y)] = 0$이 되는 표면상의 점들이 된다. 또한 가장 밝은 0차 간섭무늬들은 진동으로 인한 변형에서 움직이지 않는 노달점을 나타내므로 노드(node)들을 직접적으로 관찰할 수 있으며, 간섭무늬 차수가 높아 질수록 $J_o[\Omega(x,y)]$의 반주기적 특성 때문에 일정한 간격으로 간섭무늬가 위치하게 된다.

4. 실험 장치와 실험 방법

4-1. 실험 장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 광학계의 구성도이다. 본 구성에서 사용된 광원은 파장이 532nm인 주파수 중첩

(frequency-doubled) Nd:Yag 레이저이고, CCD 카메라로부터 입력받은 화상 신호를 처리하기 위한 화상 처리 장비로는 ITI사의 영상처리장치(VFG image board)를 사용하였다. 본 광학계에서 알 수 있듯이 레이저 빔은 거울 M과 빔 익스펜더(beam expander)를 거쳐 가진기에 의해 진동하고 있는 물체의 표면에 조사된다. 그리고 물체 표면에서 산란, 반사된 빛은 광분할기(BS)를 통하여 2개의 빔으로 나누어져 각각 PZT1(piezo-electric transducer 1)과 PZT2로 입사하게 된다. PZT1은 레이저 빔의 위상이동(phase stepping)으로써 스페클 노이즈를 제거하기 위한 것이며, PZT2는 위상변조(phase modulation)로써 진동의 진폭을 정량화시키기 위해 사용되었다. 2 channel 신호발생기는 물체를 가진시키고, 레이저 빔의 위상을 변조시키기 위해 사용되었다.

4-2. 실험 방법

본 연구에서는 제작된 광학계의 성능을 평가하고 실제적인 적용을 위해서, 여러 조건에 따른 성능 실험을 수행함과 동시에 이를 분석하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 실험은 시편의 종류 및 가진기의 위치에 따라 세 단계로 나누어 수행하였다.

첫번째 실험인 실험 A는 지름이 254mm, 중량이 700g, 두랄루민 재질인 원형판의 중심을 고정하고, 그 주변부에 PZT를 부착하여 가진을 하였다. 그 실험 결과가 Fig. 5-1 ~ Fig. 5-3에 나타나있다. Fig. 5-1의 (a)는 실험물체인 원판의 사진이고, (b)에서 (e)까지는 각각 주어진 공진주파수로 가진했을 때의 진동 모우드를 나타낸다. Fig. 5-2는 측정 원판에 편심 질량을 주고 그 결과를 알아보기 위하여, 무게가 10g인 방진고무를 원형판의 우측 뒷면에 부착하여 Fig. 5-1과 동일한 조건으로 가진하여 측정해 본 실험 결과이다. Fig. 5-3은 편심질량의 크기와 재질을 변경하여 실험해 보기 위해 무게가 8g인 금속 조각을 편심질량으로 주어 Fig. 5-1과 동일한 가진량으로 실험을 수행해 보았다.

두번째 실험은 Fig. 4의 실험 B 상태와 같이 지름이

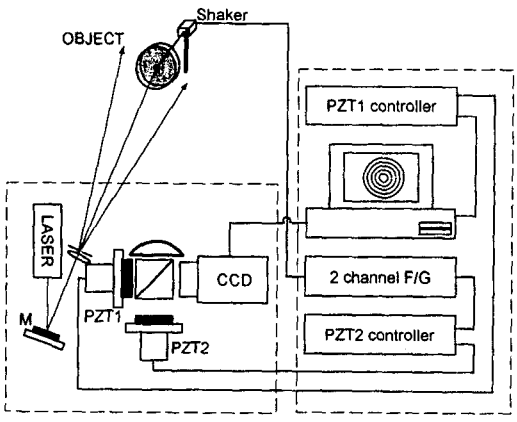
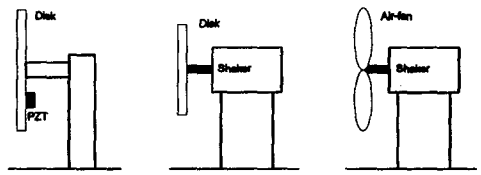


Fig. 3 Schematic of the laser interferometer used to the Shearography and image acquisition system



(a) Experiment A (b) Experiment B (c) Experiment C

Fig. 4. Geometry used for each experiment

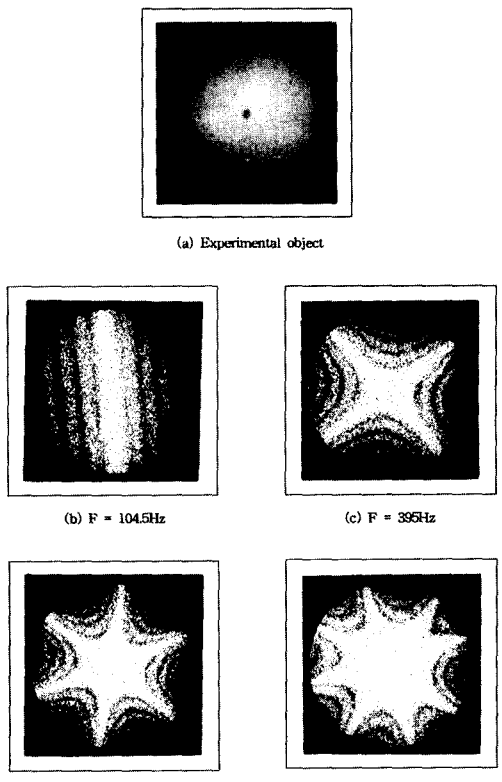
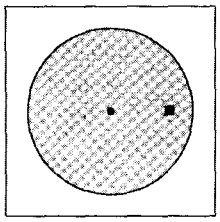
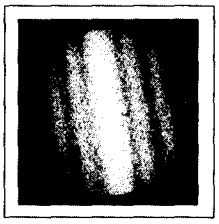


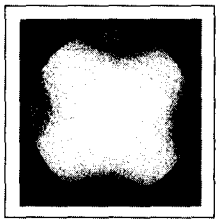
Fig. 5-1 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk excited by PZT



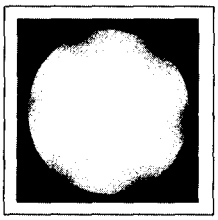
(a) Experimental object with eccentric weight



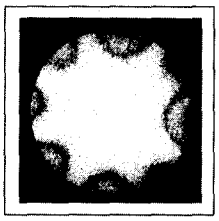
(b) F = 104.5Hz



(c) F = 395Hz

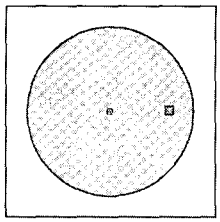


(d) F = 992.5Hz

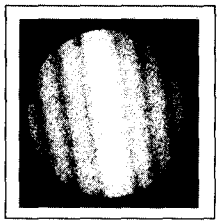


(e) F = 1619Hz

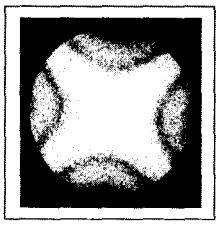
Fig. 5-2 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk with anti-vibration rubber of the 10g weight at right side



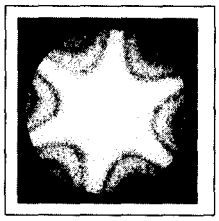
(a) Experimental object with eccentric weight



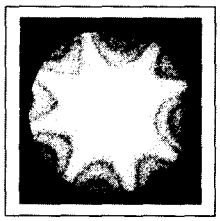
(b) F = 104.5Hz



(c) F = 395Hz



(d) F = 992.5Hz

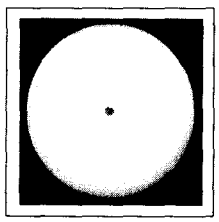


(e) F = 1619Hz

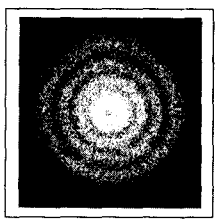
Fig. 5-3 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk with metal piece of the 8g weight at right side

150mm, 중량이 140g인 원형판의 중심을 가진기로 고정하고 그 부분을 가진하였다. 이에 대한 실험 결과가 Fig. 6-1~Fig. 6-4이다. 즉, 실험조건 중 가진 위치와 저널(pivot)위치가 실험 A와는 다르다. Fig. 6-1의 결과처럼 먼저 방진고무를 부착하지 않은 기준 상태에서 원형판의 고유 진동 모우드를 측정하였고, 그 다음에 Fig. 6-2는 무게가 10g인 방진 고무를 편심질량으로 주어 기준 상태와 같은 주파수로 가진한 결과이며 Fig. 6-3과 Fig. 6-4에서는 편심질량의 부착 위치를 각각 변경하여 간섭 무늬를 획득해 보았다.

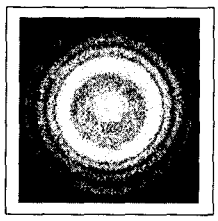
실험 C는 실제품에 본 간섭계를 적용하여 실용성을 파악해 보고자 공기조화용 팬(fan)을 대상으로 실험이 수행되었다. 이에 대한 각각의 결과가 Fig. 7-1~2이다. 먼저 그 중심을 가진기에 고정시키고 가진하여 Fig. 7-1에서 보는 바와 같이 제품 원래의 상태에서 고유 진동 모우드를 측정하였고, Fig. 7-2는 날개에 밸런서(balancer)를 부착하여 고유 진동 모우드에서 간섭 무늬를 획득한 것이다.



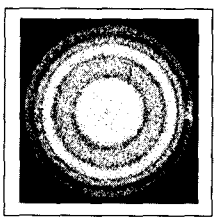
(a) Experimental object



(b) F = 968Hz



(c) F = 3545Hz



(d) F = 8282Hz

Fig. 6-1 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk excited by exciter at center

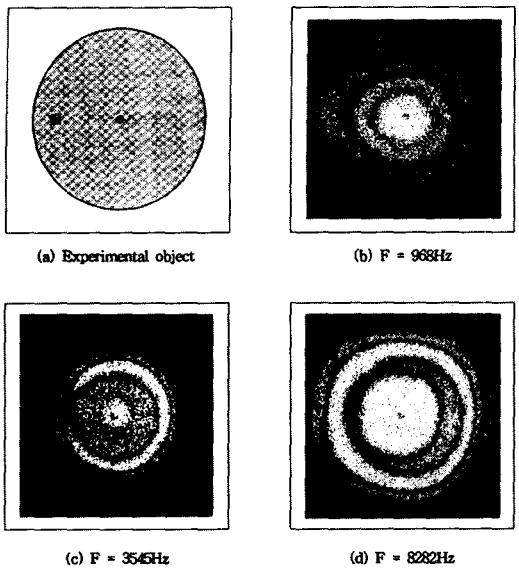


Fig. 6-2 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk with anti-vibration rubber of the 10g weight at up side

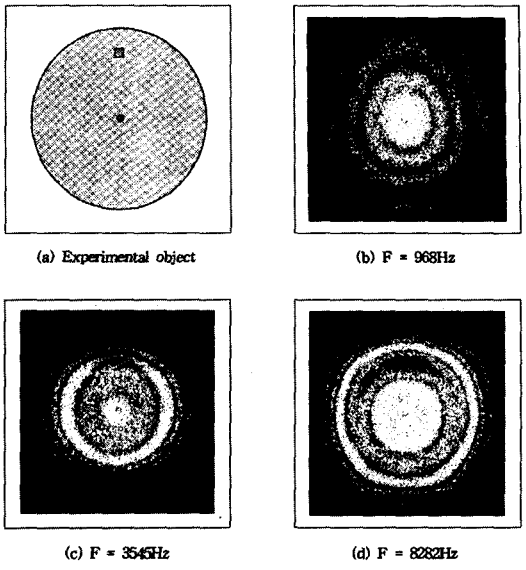


Fig. 6-3 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk with anti-vibration rubber of the 10g weight at up side

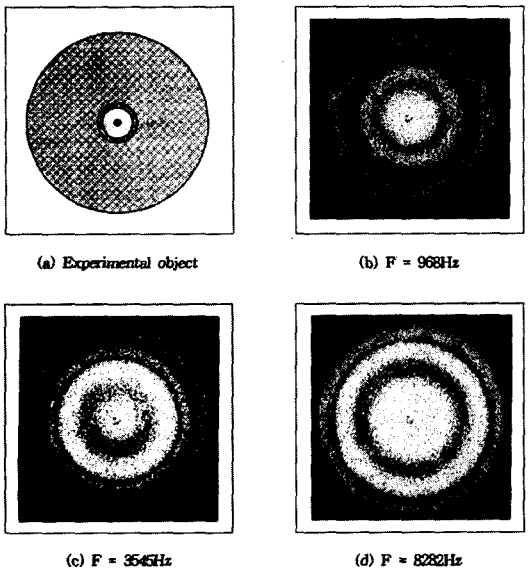


Fig. 6-4 Fringe pattern for the vibration amplitude of a disk with anti-vibration rubber at center

5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5-1의 편심질량이 없는 균질한 재질의 원판에 가진을 한 경우 각각 주어진 주파수에서 대칭 무늬가 나타났다. Fig. 5-2의 결과를 보면 편심질량의 재질이 방진고무인 경우 간섭무늬수가 확연히 감소한 것을 알 수 있으며, 이것은 가진기에 의해서 발생된 진동이 방진고무의 영향으로 인해서 상당부분 감소되었다는 것을 의미한다. 편심질량의 재질이 금속조각인 경우의 실험 결과인 Fig. 5-3을 보면 Fig. 5-2인 경우보다는 무늬수가 많으나 Fig. 5-1 보다는 무늬수가 적어 금속 조각의 경우에도 약간의 방진 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 각각의 그림에서 흰 부분은 노달선(nodal line)을 나타내고 있으며, 무늬수가 많은 경우는 더 심한 진동이 있는 부분이다.

Fig. 6-1은 전 주파수에서 동심형의 간섭무늬를 나타내고 있으며, Fig. 6-2와 Fig. 6-3의 방진고무를 부착한 경우에는 간섭무늬 형태가 비 동심원이고 방진고무의 위치에 따라서도 무늬 모양이 달라짐을 알 수 있다. 여기에서 흰색 부분인 노달선(nodal line)은 대체로 동심원 형태를 이루고 있다. Fig. 6-4는 원판 형태의 방진고무를 부착한 경우로 무늬는 동심원 형태를 나타내고 있으나 방진고무가 부착되어 있지 않은 Fig. 6-1과 비교해 보면 상당히 감소되었음을 알 수 있다.

공기조화용 팬(fan)의 진동 측정 실험인 Fig. 7-1에서, 벨란서(balancer)를 부착하지 않은 경우 저주파수 영역에서는 그 균일성 여부를 파악하기 어렵지만 고주파 영역으로 가면 불균일성을 뚜렷이 알 수 있다. 그리고 공기조화용 팬에 밸란서(balancer)를 부착시키고 간섭무늬

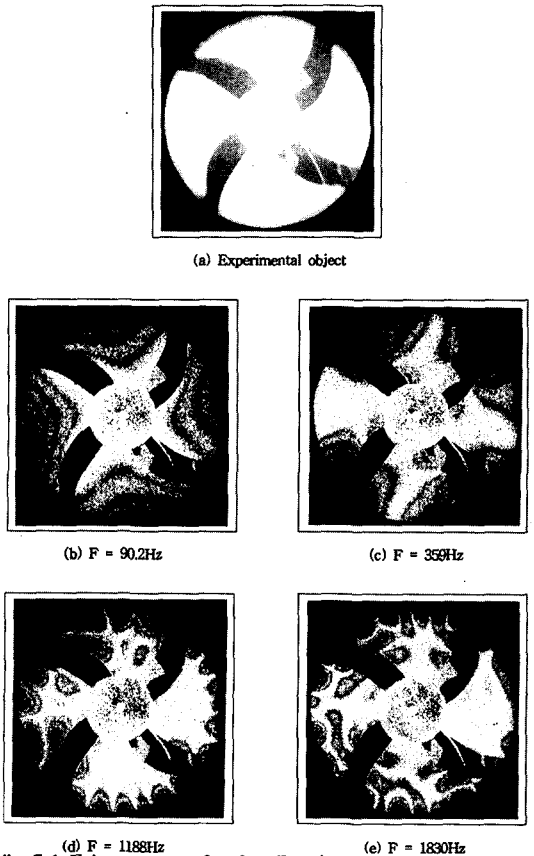


Fig. 7-1 Fringe pattern for the vibration amplitude of an air-fan excited by shaker at center

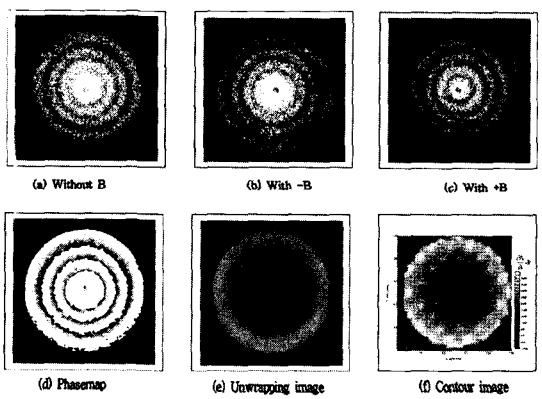


Fig. 8 Quantificatinal process of a disk image datum at 968Hz

를 획득한 결과인 Fig. 7-2에서는 그 진동 진폭이 상하·좌우로 균일함을 저주파뿐 아니라 고주파 영역에서도 뚜렷이 알 수 있었다.

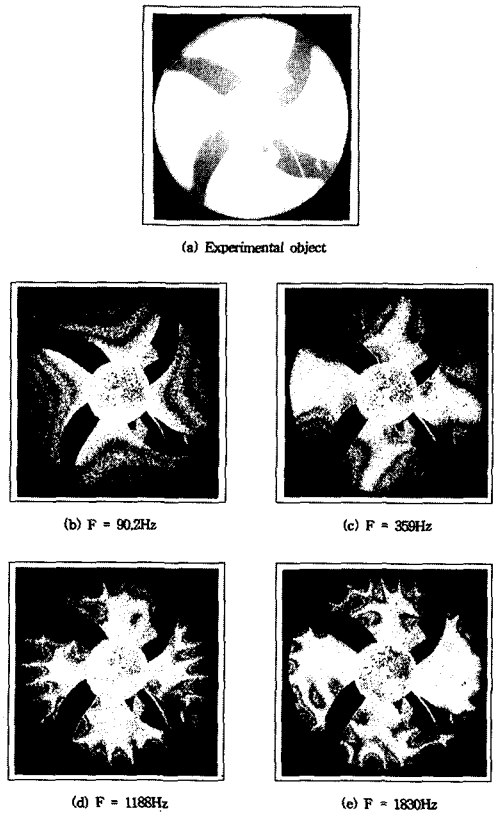


Fig. 7-2. Fringe pattern for the vibration amplitude of an air-fan attached balancer

지금까지는 단지 간섭무늬 형태에 따른 정성적인 평가를 위한 실험 결과를 제시했는데, Fig. 6-1의 (b)와 같이 주파수 968Hz인 가진 조건에서 간섭무늬를 정량화한 실험 과정 및 결과가 바로 Fig. 8이다. 위 결과에서 위상도는 변형전의 이미지 4개와 변형후의 이미지 4개를 받아서로 조합하여 위상값을 산출한 그림을 말한다. 이 위상도를 다시 위상 펼치기하여 최종적으로 정량적인 결과를 산출하였다. 위상 변조에 의해 데이터를 정량화하여 표현한 이미지인 Fig. 8의 (f)를 보면 중앙의 검은 부분이 보이는데 그 점이 곧 노달점(nodal point) 이다. 즉, 이러한 결과는 고정 부분과 가진 부분이 일치하기 때문에 그 부분을 중심으로 원형판이 앞뒤로 진동하고 있다는 것을 의미한다.

6. 결 론

본 연구는 레이디얼 전단 간섭계를 사용하여 원점에 대해 대칭성을 갖는 물체의 진동 특성을 파악함으로서, 본 간섭계의 산업현장 적용 가능성을 파악해 보기 위한 것이다. 이 결과로서 레이디얼 전단 간섭계는 대칭형 물체의 진동 특성을 알아보는데 아주 유용한 측정 장비임을 알 수 있었다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 내릴수 있다.

(1) 레이디얼 전단 간섭계를 이용하여 원점 대칭성을 갖는 구조물의 진동 특성을 실시간, 전면적으로 검사할 수 있음을 보였다.

(2) 광학계에서 두 개의 PZT를 동시에 사용하여 위상이동과 위상 변조를 통하여 정량적이고, 보다 가시성이 높은 결과를 획득할 수 있음을 알았다.

(3) 낮은 주파수의 고유 진동 모우드에서는 물체에 부착한 편심질량의 효과가 거의 관측되지 않았으나 고주파 영역에서는 그 영향이 나타나고 있음을 확연히 알았다.

(4) Air-fan과 같은 복잡한 구조를 갖는 실제 제품에 본 간섭계를 적용해 보았으며, 이에 발생되는 복잡한 간섭무늬 해석 방법에 관한 연구가 이후 지속적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다

후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원(과제번호 : 961-1002-013-2)으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 최장섭, 강영준, "전자 광학적 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동물체의 모드형태 계측법", 대한기계학회논문집(A) 제 20권, 제2호, pp. 564~574, 1996.
2. Karl A. Stetson and William R. Brohinsky, "Fringe-shifting technique for numerical analysis of time-average hologram of vibrating objects", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 5. No. 9, 1988.
3. 강영준, 문상준, "위상이동 실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 파이프의 내부결함 측정법", 한국정밀공학회지, 제13권, 제2호, pp. 68~75, 1996.
4. 강영준, 최장섭, "시간평균 ESPI를 이용한 진동물체의 모우드 형태 계측법", 한국정밀공학회지, 제13권, 제2호, pp.84~93, 1996.
5. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and speckle interferometry", Cambridge University Press, pp.122~164, 1989.
6. 최장섭, 문상준, 강영준, "시간평균 ESPI에 의한 진동 Mode Shape의 계측", 한국정밀공학회 95년 도춘계학술대회 논문집, pp.308~ 313, 1996.
7. N. Krishna Mohan, H. O. Saldner and N. E. Molin, "Electronic shearography applied to static and vibrating objects", Optics Communications, Vol. 108, pp.197~202, 1994.
8. P. A. Klumpp and E. Schnack, "Shearograms with variable measurement sensitivity" Experimental Techniques, pp.42~44, 1990.
9. R. Krishna Murthy, R.K.Mohanty, R.S.Sirohi and M.P.Kothiyal, "Radial speckle shearing interferometer and its engineering applications", Optik, Vol.67, No.1, pp.85~94, 1984.
10. R. J. Pryputniewicz and K. A. Stetson, "Measurement of vibration patterns using electro-optic holography", SPIE, Vol. 1162, pp.435~447,1989.
11. D. Malacara, "Optical Shop Testing", John Wiely and Sons. Inc., New York, pp.149~165,1978.