

ESPI를 이용한 광학식 정밀 계측 기술

Optical technique of precision measurement using Electronic Speckle Pattern Interferometry

은 재 정*, 정 영 환*, 최 평 석*, 박 해 수**

Jae-Jung Eun, Young-Hwan Jung, Pyung-Seok Choi, Hae-Soo Park

요 약

본 연구에서는 광학식 계측 기술인 ESPI에서 면외변위인 물체의 진동에 대한 분석을 수행하였다. 진동하는 물체는 고유한 노달 라인을 가지게 된다. 따라서 이를 분석함으로써 진동하는 물체에 대한 정보를 얻을 수 있다.

측정 물체로 스피커와 외팔보 평판을 사용하였으며, 이를 시간 평균 ESPI로 정성적으로 분석하였다. 본 연구의 실험 결과로 스피커에서는 진동 주파수 550Hz와 진폭 570mV에서 저차 모드 간섭무늬가 나타났으며, 진동 주파수 950Hz와 진폭 570mV에서 고차 모드 간섭무늬가 나타났다. 이러한 ESPI는 측정에 레이저를 이용하기 때문에 비파괴, 비접촉 검사이며, 높은 분해능을 가진다. 또한 레이저가 조사되는 영역이 측정 영역이 되므로 측정 물체의 크기에 제한되지 않는다.

Abstract

In this research, we accomplished the interpreting about the vibration of the object, which is the out of plane displacement in the Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), one of the optical measuring technique. The vibrating object has a inherent nodal line, therefore we can get the information about the vibration of the object by interpreting it.

we used a speaker and a cantilever plate for a measurement object, and interpreted it qualitatively by using the Time-Average ESPI. In this experimental result, the speaker has the lower mode of fringe at 550Hz, 570mV, and the higher mode of fringe at 950Hz, 570mV. This ESPI is a non-destructive test, and because of using the laser at measuring, it has a high resolution. The ESPI can test vibration mode regardless of the test object size, because the area which illuminated laser is the test area.

Key Words : interferometry, speckle, time-average ESPI, vibration, out of plane, fringe

I. 서 론

오늘날 산업 현장에서 이용되는 많은 기계들이 진동에 노출되어 있으며, 진동으로 인하여 정밀 작업에 어려움을 겪고 있다. 이에 진동 계측에 대한 많은 방법들이 제안되

었으며, 개발되어 왔다.

현재 사용되고 있는 진동 계측 기술에는 기계적 계측 (Mechanical Measurement)과 광학적 계측 (Optical Measurement)이 있다. 기계적 계측은 정밀도가 우수하고 설치가 용이하여 많이 이용되고 있으나, 접촉식으로 테스트하기 때문에 측정 물체의 상태에 중요한 영향을 미칠 수 있으며, 측정 부위에 제한을 받는다. 그에 반해 광학적 계측 기술인 스페클 패턴 간섭법(Speckle Pattern Interferometry)은 계측에 레이저를 사용하므로 비접촉식

*창원대학교 전자공학과, **한국전기연구원
접수 일자 : 2003. 7. 07 수정 완료 : 2003. 8. 28
논문 번호 : 2003-3-8
※본 논문은 2001년도 창원대학교 연구비에 의해 진행되었습니다.

테스트(Non- Destructive or Non-Contact Test)이며, 측정 단위로 레이저 파장을 사용하므로 분해능이 높고, 레이저가 조사되는 면적이 테스트 면적이 되므로 측정 물체의 크기에 무관하게 테스트를 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고 계측 시스템에 전자장비(CCD, Frame Grabber 등)를 이용하여 실시간 측정이 가능하고, 신속하게 정보를 처리할 수 있는 것이 전자 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)이다[1]-[4].

ESPI는 측정하는 대상에 따라 많은 응용분야로 나뉘어 지는데, 여기에는 흐르는 유체의 관측, 문화재 감식, 진동관의 진동 모드 및 진동 관측, 속도 및 각속도의 측정, 면내-면외 변위 및 변화율 측정을 통한 비파괴 검사가 있으며, 구체적으로 금속이나 플라스틱을 일정 부분을 잘라내고 그 주위의 변형을 측정하는 것(면내 변위 측정)에서부터, 섬유강화 복합소재의 내부에 생긴 공기주머니를 측정하기도 하고, 낡은 비행기의 부식에 의해 갈라진 틈을 찾기도 하며, 정밀 가공 선반 등에서 진동에 의한 영향을 가시화 하여 보여 주는 데도 응용되고 있다.

레이저를 이용한 광학적 계측은 1960년대에 가간섭성이 우수한 레이저가 개발되면서 도약적인 발전을 거듭해왔다. 레이저 광은 단색성, 가간섭성이며, 지향성, 집속성이 좋으며, 에너지의 공간적, 시간적 집중, 짧은 펄스광의 발생이 가능하다는 특징을 가지고 있다[2][3].

본 연구에서는 633nm, 최대 15mW인 He-Ne 레이저를 이용하였으며, 측정 물체로 스피커(120×120 mm, 8Ω)와 사각 평판(200 × 50 × 3 mm)을 이용하였다. 각 각의 측정 물체의 정성적인 해석을 위하여 면외변위 시간-평균 ESPI를 이용하였으며, 이는 진동주기보다 긴 주기동안 노출을 시킴으로서 진동하는 물체의 고유 진동수에 의한 모드 형태(mode shape)에 해당하는 간섭무늬를 관찰하게 된다.

II. 면외변위 측정 ESPI

ESPI에서는 스펙클(speckle)이라는 반점무늬를 이용하게 된다. Fig. 1과 같이 가간섭성이 뛰어난 레이저 광을 광학적으로 거친 표면위에 조사하면 표면위의 각 요소는 산란되고 회절된 파를 발생하게 되며, 가간섭성을 지닌 이러한 회절파들이 간섭하게 되고, 이로 인해 Fig. 2와 같은 밝고 어두운 무늬의 반점을 형성한다. 이것이 스펙클이다.

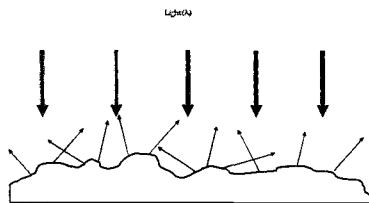


그림 1. 광학적 표면에서 산란되는 광
Fig. 1 Light scattering on optical surface

이러한 스펙클은 잡음의 성질을 가지고 있으나, 광학적 계측에서는 측정 물체가 가지는 표면의 거칠기(roughness), 변형(deformation), 변위(displacement) 등과 관련된 중요한 정보를 가지고 있다.

면외변위 측정 ESPI는 변형의 방향이 광축인 Z축으로 일어나는 경우에 측정하게 된다. 진동과 같은 경우가 이에 해당되며, 면외변위 측정에서 민감도는 레이저 파장을 λ 라고 하면,

$$sensitivity[\mu m] = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

와 같다. 레이저원의 파장이 633nm일 경우, 민감도는 0.316 μ m가 된다[3].



그림 2. 스펙클 패턴
Fig. 2 Speckle Pattern

III. 시간-평균 ESPI

1 시간-평균 ESPI

시간-평균 ESPI는 물체의 진동 주기보다 긴 시간동안 노출을 시킴으로서 각각의 위치에서 시간에 따른 변위의 평균값을 강도 분포로 나타낸다. 시간-평균 ESPI는 진동하는 물체에 대한 위상 정보가 평균에 의해 사라지게 되어 물체상(object image)의 각 위치로부터 진동의 방향을 정해주시는 못하므로, 진동하는 물체의 고유 진동수에 의한 모드 형태를 정성적으로 해석하는데 적합하다.

2 Subtraction

시간-평균 ESPI에서는 실시간으로 스펙클을 관찰할 경우, $\Delta\phi$ 의 위상 변화를 통해 가시도를 높이고, 더불어 평균 강도에서 배경 잡음으로 작용하는 물체빔과 기준빔의 강도를 제거할 수 있으며, 스펙클 잡음도 제거할 수 있다[5]-[7].

물체빔과 기준빔의 강도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{obj}(x, y, t) = A_{obj} \exp[i\phi_{obj}(x, y, t)] \quad (2)$$

$$I_{ref}(x, y, t) = A_{ref} \exp[i\phi_{ref}(x, y, t)] \quad (3)$$

여기서, I_{obj} 는 물체빔의 위상이며, I_{ref} 는 기준빔의 위상, 그리고 A_{obj} 와 A_{ref} 는 각각 물체빔과 기준빔의 진폭이

다.

물체로부터 얻어진 스펙클과 관계된 위상 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi(x, y, t) = (2\phi/\lambda)ka(x, y, t) + \phi_{obj}(x, y) \quad (4)$$

여기서 $a(x, y, t)$ 는 시간 t 에서 기준점에 대한 물체의 면의 변위이며, k 는 기하학적 인자(geometrical factor)로 수직으로 조사되는 입사각에 대해 $k=2$ 가 된다.

CCD array에 들어오는 강도를 계산하면,

$$\begin{aligned} I(x, y, t) = & A_{obj}^2 + A_{ref}^2 \\ & + 2A_{obj}A_{ref}\cos[(2\pi/\lambda)ka(x, y, t) \\ & + \phi_{obj} - \phi_{ref}] \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. T 동안 평균화된 강도는

$$\begin{aligned} I(x, y) = & A_{obj}^2 + A_{ref}^2 + 2A_{obj}A_{ref} \\ & \times \frac{1}{T} \int_0^T \cos[(2\pi/\lambda)ka(x, y, t) \\ & + \phi_{obj} - \phi_{ref}] dt \end{aligned} \quad (6)$$

이 되며, 이를 다시 정리하면 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} I(x, y) = & A_{obj}^2 + A_{ref}^2 + 2A_{obj}A_{ref} |\cos(\phi_{obj} - \phi_{ref})| \\ & \times |J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)]| \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, J_0 는 제1종 0차 베셀함수이다.

식 (7)에서 배경 잡음으로 작용하는 배경 강도항인 $A_{obj}^2 + A_{ref}^2$ 을 제거하기 위해 두 이미지 사이에 $\pi/2$ 만큼의 위상 이동을 한다.

$$\begin{aligned} I_1(x, y) = & A_{obj}^2 + A_{ref}^2 + A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times |\cos[\phi_{obj} - (\phi_{ref} + \Delta\phi_R)]| \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I_2(x, y) = & A_{obj}^2 + A_{ref}^2 + A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times |\cos[\phi_{obj} - (\phi_{ref} + \Delta\phi_{add}) - \pi/2]| \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\Delta\phi_{add}$ 는 두 이미지에서 추가된 위상 이동 항이다. 식 (8)과 식 (9)의 감산 처리 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta I_1(x, y) = I_1 - I_2 = & 2A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times |\cos\{2[\phi_{obj} - (\phi_{ref} + \Delta\phi_{add})]\}| \end{aligned} \quad (10)$$

ΔI_2 와 ΔI_3 의 감산 처리에 대한 결과는

$$\begin{aligned} \Delta I_1(x, y) = & 2A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times |\cos\{2[\phi_{obj} - (\phi_{ref} + \Delta\phi_{add}')] \}| \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_1(x, y) = & 2A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times |\cos\{2[\phi_{obj} - (\phi_{ref} + \Delta\phi_{add}'')] \}| \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다. 여기서 위상 이동은 각각 식 (10), (11) 그리고 (12)에 대해서 $\Delta\phi_{add} = 0$, $\Delta\phi_{add}' = \pi/6$, $\Delta\phi_{add}'' = \pi/3$ 이 되며, 식 (10), (11), (12)을 더한 결과는

$$\begin{aligned} \Delta I(x, y) = & \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 \\ = & 2A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times \{ |\cos[2(\phi_{obj} - \phi_{ref})]| \\ & + |\cos[2(\phi_{obj} - \phi_{ref} - \pi/6)]| \\ & + |\cos[2(\phi_{obj} - \phi_{ref} - \pi/3)]| \} \end{aligned} \quad (13)$$

이 되며, $|\cos x|$ 의 수학적 근사는 $|\cos x| \approx \cos^2 x$ 으로 식 (13)을 다시 정리하면,

$$\begin{aligned} \Delta I(x, y) = & \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 \\ = & 2A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \\ & \times \{ 3 + |\cos[4(\phi_{obj} - \phi_{ref})]| \\ & + |\cos[4(\phi_{obj} - \phi_{ref} - \pi/6)]| \\ & + |\cos[4(\phi_{obj} - \phi_{ref} - \pi/3)]| \} \end{aligned} \quad (14)$$

이 되고, 마지막으로 정리하면 다음과 같다.

$$I(x, y) = 6A_{obj}A_{ref}J_0[(2\pi/\lambda)ka(x, y)] \quad (15)$$

결과 식 (15)를 보면, 스펙클 잡음 항인 $|\cos(\phi_{obj} - \phi_{ref})|$ 이 제거되며, 시간-평균 ESPI에서 $\Delta\phi$ 를 $\pi/2$ 로 한 것은 결과적으로 Fig. 3에서 나타내듯이 간섭무늬의 대비도(contrast)를 더욱 선명하게 개선하게 된다[6]-[8]. Fig. 3은 간섭무늬의 대비도가 간섭무늬 차수가 증가함에 따라 감소하는 것을 나타낸다. 간섭무늬 차수의 증가는 진동 진폭의 증가와 간섭무늬 차수의 증가를 의미하기 때문에, 일반적으로 간섭무늬 차수가 0차일 때 가장 잘 관측되며, 이 때 진동물체의 노달 라인을 관측할 수 있다.

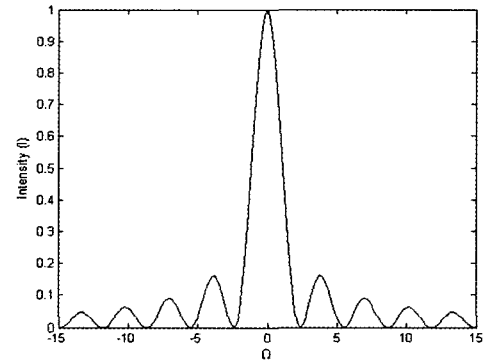


그림 3. 시간 평균 간섭무늬 함수 $J_0(x, y)$

Fig. 3 Time-Average fringe function $J_0(x, y)$

IV. 실험 및 결과

1 시간-평균 ESPI 실험 장치

본 연구에서 시간-평균 ESPI를 위한 장치 구성은 Fig. 4에 나타내었다. 광원으로 633 nm, 최대 15 mW인 He-Ne 레이저를 이용하였으며, 광원에서 나온 빔을 기준빔(reference beam)과 물체빔(object beam)으로 나누는 빔

분할기(Beam Splitter), 기준빔의 위상을 변화시키기 위해 PZT를 빔분할기에 부착하였다.

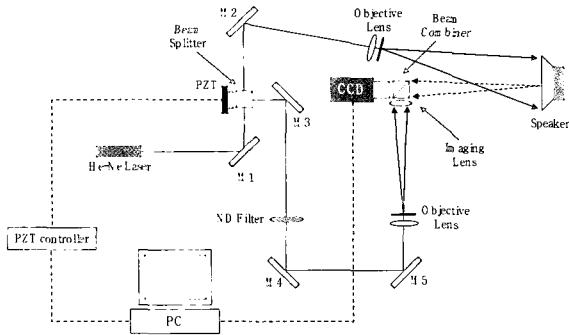


그림 4. 실험 장치 구성
Fig. 4 Experimental setup

실험장치 구성을 나타낸 Fig. 4에서 연속 레이저인 He-Ne 레이저에서 나온 광원은 빔분할기에서 M2(Mirror)로 가는 물체빔과 M3로 가는 기준빔으로 나뉘어진다. 빔분할기에 부착된 PZT에 의해 기준빔의 위상이 $\pi/2$ 씩 위상 이동을 하게된다. 이때 기준빔과 물체빔의 강도(intensity) 분포를 같게 하기 위해서 광원의 편광 상태를 P파로 유지시켜주었으며, 기준빔의 파워(power)는 0.79mW, 물체빔의 파워는 0.78mW이다. M2를 지난 물체빔은 확산렌즈(Objective Lens)를 통해 측정 물체에 조사되며, 광학적으로 거친 표면을 갖는 물체에 조사된 물체빔은 산란되어 CCD 카메라 앞에 놓인 빔결합기(beam combiner)에서 기준빔과 간섭이 일어나게 된다. 이때 물체빔과 기준빔의 광경로를 같도록 맞추어 간섭이 잘 일어나도록 하였다. 기준빔과 물체빔의 광경로 오차는 5cm로 설정하였다. CCD 카메라에 들어온 광학적 신호인 간섭무늬의 강도 분포는 측정 물체의 표면의 각 점에서 일어난 위상 변화에 대한 정보를 가지고 있으며, 이 간섭무늬는 다시 화상처리장치로 입력되며, 컴퓨터에서 신호처리 되어 모니터에 출력된다.

특히, 본 연구에서 실험은 외부진동을 최소화시킨 상태에서 실험을 진행해야 외부진동이 있을 때보다 깨끗한 간섭무늬를 얻을 수 있기 때문에 주간에는 주위 환경이 상당량의 진동으로 인한 외란이 작용하는 관계로 주로 야간을 택하여 실험을 진행하였다.

2 스피커에서 시간-평균 ESPI

120×120, 8Ω 스피커에 대한 진동 주파수 대역을 200 Hz ~ 2 kHz로 설정하여 진동 모드를 관측하였다. 스피커의 방사 형태의 울림판(corn) 표면에 광학적 산란을 위해 백색 도료를 칠하였으며, 함수 발생기를 이용하여 스피커에 진동 주파수를 주었다.

스피커는 일반적으로 진동 모드로 저차 모드(lower mode shape)와 고차 모드(higher mode shape)를 가진다.

본 연구에서 실험한 스피커의 저차 모드는 550 Hz, 570 mVpp에서 나타났으며, ± 5 Hz 사이에서 저차 모드를 유지하였으며, 진동 주파수가 1 Hz의 변화만 생겨도 곧 저차 모드는 사라진다. 이를 통해서 진동하는 물체가 가지고 있는 고유 진동수에 의한 모드 형태가 정해져 있다는 것을 알 수 있었으며, 스피커의 경우도 저차 모드가 특정 주파수 대역에서 나타난다는 것을 알 수 있었다. 이는 고차 모드에서도 동일한 결과를 보였다.

Fig. 6에서는 스피커의 울림판에 나타나는 진동 주파수에 대한 저차 모드에 해당하는 간섭무늬를 나타내고 있다. 전압 570 mVpp에서 진동 주파수가 535 Hz일 때, 저차 모드가 나타나기 시작하며, 550 Hz에서 저차 모드에 해당하는 간섭무늬를 나타내었다.

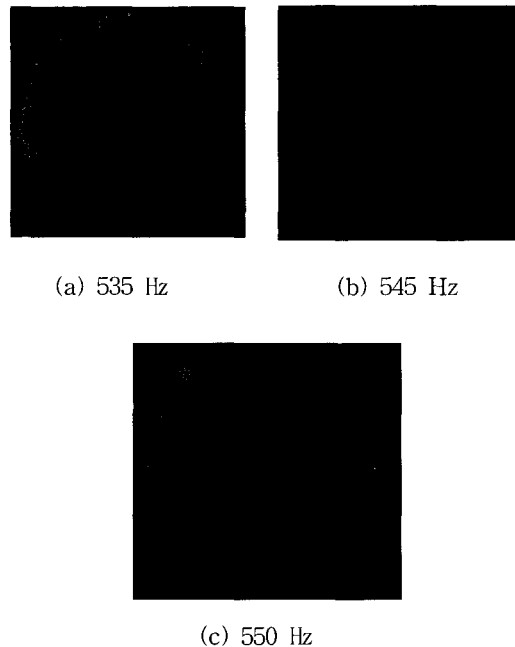
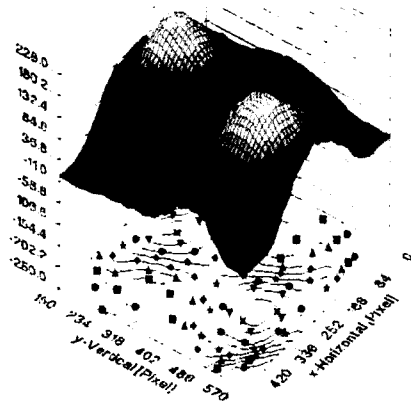


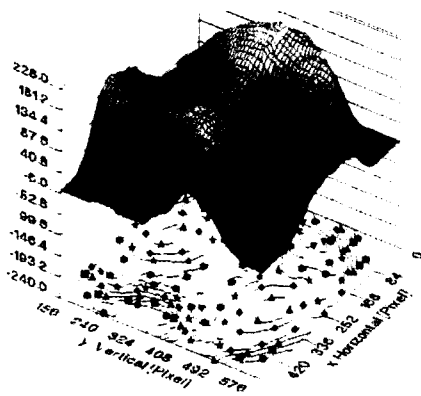
그림 5. 스피커에서 시간 평균 ESPI에 의해 관측된 저차 모드 간섭무늬

Fig. 5 Fringe of the lower mode shape with time-average ESPI at speaker

Fig. 6 (a)는 전압 378 mVpp, 진동 주파수 535 Hz에서 나타난 저차 모드 간섭무늬에 대한 3-D 그래프이며, Fig. 6 (b)는 전압 558 mVpp, 진동 주파수 535 Hz에서 나타난 저차 모드 간섭무늬에 대한 3-D 그래프이다. Fig. 6 (a)와 (b)에서 스피커의 울림판의 변위는 각각 29.9 μ m, 30.4 μ m를 나타내었다.



(a) 535 Hz, 378 mVpp에서 3-D 그래프, 변위 : 29.9 μm
 (a) 3-D plot at 535 Hz, 378 mVpp displacement : 29.9 μm

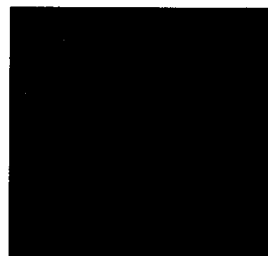


(b) 535 Hz, 558 mVpp에서 3-D 그래프, 변위 : 30.4 μm
 (b) 3-D plot at 535 Hz, 558 mVpp displacement : 30.4 μm

그림 6. 시간 평균 ESPI에서 3-D 그래프
 Fig. 6 3-D plot for time-average ESPI

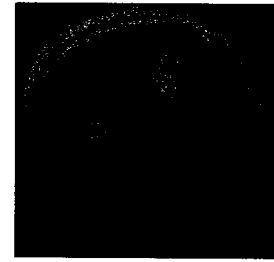


(a) 800 Hz



(b) 950 Hz

그림 7. 스피커에서 시간 평균 ESPI에 의해 관측된 고차 모드 간섭무늬

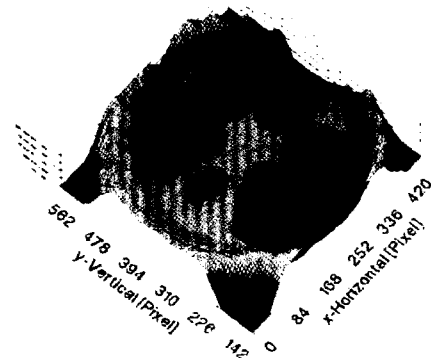


(c) 1000 Hz

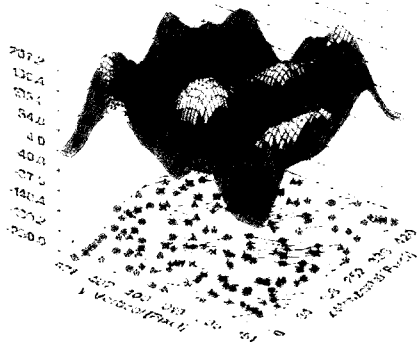
Fig. 7 Fringe of the higher mode shape with time-average ESPI at speaker

Fig. 7은 스피커의 고차 모드를 나타내고 있다. 전압을 570 mVpp로 하고, 주파수의 대역을 변화시켜가면서 관측하였으며, 진동 주파수가 950 Hz에서 가장 좋은 고차 모드 간섭무늬를 나타내었다. 고차 모드는 950 Hz에서 나타났으며, 고차 모드의 경우는 저차 모드와는 달리 ± 3 Hz 사이에서 고차 모드를 유지하였다. 고차 모드에서도 저차 모드와 동일하게 스피커의 울림판에서 방사형태의 간섭무늬를 나타내었다. 일반적으로 좋은 스피커는 방사형태의 진동 모드에 대한 간섭무늬를 나타내는데, 실험에 이용한 스피커에서 방사형태를 따라가는 형태를 관측할 수 있었다.

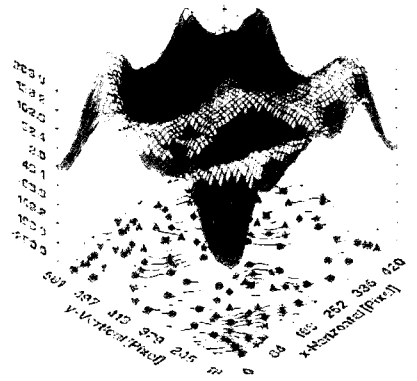
Fig. 8 (a)는 전압 1214 mVpp, 진동 주파수 939 Hz에서 나타난 고차 모드 간섭무늬에 대한 3-D 그래프이며, Fig. 8 (b)는 전압 1088 mVpp, 진동 주파수 960 Hz에서 나타난 고차 모드 간섭무늬에 대한 3-D 그래프이다. Fig. 8 (c)는 전압 738 mVpp, 진동 주파수 940 Hz에서 나타난 고차 모드 간섭무늬에 대한 3-D 그래프이다. (a), (b)와 (c)에서 스피커의 울림판의 변위는 각각 30.1 μm , 32 μm , 31.6 μm 를 나타내었다.



(a) 939 Hz, 1214 mVpp에서 3-D 그래프, 변위 : 30.1 μm
 (a) 3-D plot at 939 Hz, 1214 mVpp displacement : 30.1 μm



(b) 960 Hz, 1088 mVpp에서 3-D 그래프, 변위 : 32 μm
 (b) 3-D plot at 960 Hz, 1088 mVpp
 displacement : 32 μm



(c) 940 Hz, 738 mVpp에서 3-D 그래프, 변위 : 31.6 μm
 (c) 3-D plot at 940 Hz, 738 mVpp
 displacement : 31.6 μm

그림 8. 시간 평균 ESPI에서 3-D 그래프
 Fig. 8 3-D plot for time-average ESPI

Fig. 8의 (a)와 (b), (c)는 각각의 진동 주파수와 전압에 대한 고차 모드를 나타내고 있으며, 전압이 달라지면 그에 해당하는 고차 모드가 나타나는 진동 주파수가 달리 나타남을 확인할 수 있다. 이는 측정에 사용된 스피커의 고차 모드 특성을 나타냄을 의미하며, 전압이 달라지더라도 스피커에서 나타나는 고차 모드의 진동 주파수 대역이 근접함을 알 수 있다.

3 사각평판에서 시간-평균 ESPI

본 연구에 사용된 실험 물체인 사각 평판은 일단 고정된 평판(Cantilever plate)으로써 스펙클 형성에 필요한 산란(scattering)을 향상시키기 위해 표면에 백색 도료를 칠하였다. 평판은 가로 200 mm, 세로 50 mm, 두께 3 mm인 알루미늄 판을 이용하였다.

일단 고정된 알루미늄 평판의 경우는 Fig. 9와 같이 한

쪽을 고정하고 고정된 부분에 솔레노이드(solenoid)로 가진(shaking)하여 진동을 발생시켰다.

Fig. 10의 (a) ~ (c)는 각각 115 Hz, 118 Hz와 320.35 Hz에서 사각 평판이 셰이커에 의해 진동되어 고유 진동수로 진동하고 있는 모드 형태를 나타낸다.

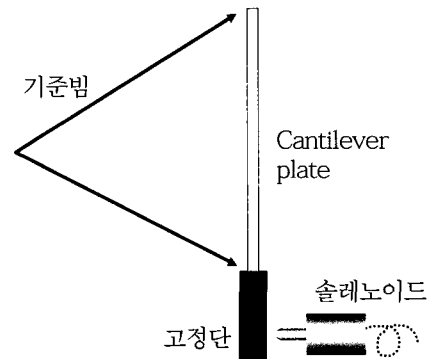
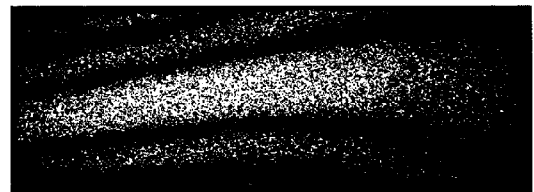
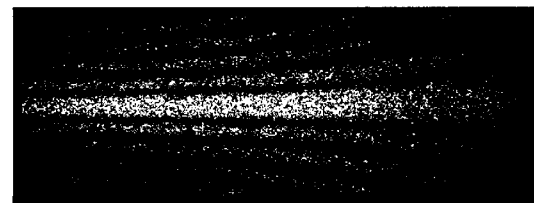


그림 9. 셰이커
 Fig. 9 shaker



(a) 115 Hz



(b) 118 Hz



(c) 320.35 Hz

그림 10. 시간 평균 ESPI에서 진동하는 외팔보 평판의 모드 형상

Fig. 10 Mode Shape of the vibrating cantilever plate at time-average ESPI.

Fig. 10에서 보면 첫 번째 모드 형태가 115 Hz에서 나타나기 시작하여 118 Hz에서 첫 번째 모드 형태를 나타냈으며, 320.35 Hz에서 두 번째 모드 형태가 나타남을 확인하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 진동하고 있는 물체의 모드 형태가 확실하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구로부터 진동 계측에 적합한 ESPI 광학계를 설계하고 적절한 화상처리를 실시하여 진동하는 물체의 모드 형태를 실시간으로 모니터를 통하여 관측할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구의 실험에 사용한 스피커의 경우에는 저차 모드 간섭무늬가 550 Hz, 570 mVpp에서 나타났으며, 고차 모드 간섭무늬는 950 Hz, 570 mVpp에서 나타났다. 그리고 일단 고정된 알루미늄 평판에서는 118 Hz와 320.35 Hz에서 모드 형태가 나타남을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과로부터 ESPI를 이용하여 진동하는 물체에 대한 모드 형태를 가시적으로 관측할 수 있기 때문에 진동 계측 기술에 있어서 보다 편리한 방법을 제공할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고, 연속발전 레이저에 AO 변조기(acousto-optic modulator)나 EO 변조기(electro-optic modulator) 등을 설치하여 스트로보 효과를 얻어내 물체의 진동에 대한 응답을 특수한 점에서 추출해내는 스트로보스코피 ESPI(stroboscopic ESPI)로 정량적인 해석을 추후 수행해야 할 것이며, 정량적인 측정 결과를 FEM 등의 Analysis Tool 등을 이용하여 검증하는 단계가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

[1] John F. Ready, *Industrial Application of Lasers*, 2nd Ed : Academy Press, 1997.
 [2] P. K. Rastogi, *Holographic Interferometry Principle and Methods*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994.
 [3] P. K. Rastogi, *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques*, John Wiley & Sons Ltd., 2001.
 [4] Kjell j-gasvik(Ed), Trondheim, Norway, *Optical metrology*, 2nd Ed : John Wiley & Sons Ltd., 1995.
 [5] G.A. Slettemoen, "Electronic speckle pattern interferometric system based on a speckle reference beam", *Applied Optics*, 19, pp. 616, 1980.
 [6] H. Eggers, E. Ziolkowski, "Improvement of time-average subtraction technique applied to

vibration analysis with TV-holography", *optics communication*, Vol. 78, number 3-4, 1990.

[7] Harald Abendroth and H. Eggers, "Time-Average subtraction method in Electronic Speckle Pattern Interferometry", *optics communication*, Vol. 70, number 3, 1989.
 [8] Ryszard J., "Time average holography in vibration analysis", *Optical Engineering*, 28, pp. 1019, 1989.



은 재 정(Jae Jung Eun)
 正會員
 1982년 연세대학교 전자공학과
 1986년 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1994년 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 현재 창원대학교 전자공학과 교수

관심 분야 : 광섬유센서, 광 계측, ESPI, 광 신호처리



정 영 환(Young Hwan Jung)
 準會員
 2001년 창원대학교 전자공학과
 2003년 창원대학교 전자공학과(공학석사)
 2003년 - 현재 영광기전 근무

관심 분야 : 광섬유센서, 광 계측, ESPI, 광 신호처리



최 평 석(Pyung Suk Choi)
 正會員
 1978년 성균관대학교 전자공학과
 1980년 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1985년 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 현재 창원대학교 전자공학과 교수

관심 분야 : 광 신호처리, 광섬유센서, 홀로그래픽



박 해 수(Hae Soo Park)
 準會員
 1987년 경북대학교 전자공학과
 1994년 경남대학교 전자공학과(공학석사)
 현재 전기연구원 전기정보망기술연구그룹 선임연구원

관심 분야 : 광섬유센서, 광 계측