

<논 문>

전자 광학적 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동 물체의 모드형태 계측법

최장섭* · 강영준**

(1995년 8월 30일 접수)

Measurement Method of the Vibration Mode Shapes Using Electro-Optic Holographic Interferometry

Jang-Seob Choi and Young-June Kang

Key Words : Holographic Interferometry(홀로그래픽 간섭법), Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자적 스펙클무늬 간섭법), Finite Element Method(유한요소법), J_0 -Fringes(베셀함수형 간섭무늬), Time Average Method(시간평균법), Phase Shift(위상 이동), Phase Modulation(위상변조), Image Processing(화상처리), Vibration Mode Shape(진동모드형태)

Abstract

This paper describes an Electronic Speckle Pattern Interferometry system which has been designed for measuring vibration patterns and quantitative measurement of vibration amplitude fields by using the time average method on a object. Visibility of fringe patterns is more improved by using the phase stepping and frame average method to reduce speckle and electric noise. And a bias vibration is introduced into the reference beam to shift the J_0^2 fringes so that fringe shift algorithms can be used to determine vibration amplitude. The experimental results are compared to those of the FFT analyzer and the FEM modal analysis.

1. 서 론

홀로그래픽 간섭법(holographic interferometry, HI)의 성공적인 응용분야 가운데 하나로 다양한 구조물에 대해 고유진동수를 찾아내어 그 때의 모드형태(mode shape)를 측정하고 이를 시각적으로 표현하는 modal analysis에의 활용을 들수 있다.^(1,2) 이 방법은 사용되는 광원의 파장을 측정 단위로 하기 때문에 보통 수 마이크로미터 정도의 물체의 변형에 대한 측정이 가능하며 비접촉식 측정 방법이

고, 한번의 측정으로 측정 대상물 전 영역에 대한 계측이 가능한 장점들이 있다. 그러나 HI 기법은 홀로그래픽 필름의 처리과정의 복잡성과 처리 시간 때문에 그 응용 분야가 크게 제한되고 있어서 산업 현장에서의 적용에는 많은 불편이 따랐다. 따라서 1960년대 후반부터 TV 시스템과 홀로그래피의 연계 기술에 대한 연구가 활발해지기 시작하였는데, 그 대표적인 예로 미국의 Macovski 등은 투과형 홀로그래용 비디오 시스템에 관하여 연구하였으며 영국의 Butters와 Leendertz 등도 스펙클 상관 기법을 TV 시스템에 접목시켰다.^(3,4) 비디오 시스템의 낮은 분해능에도 불구하고 스펙클의 크기를 렌즈를 사용하여 분해 가능한 정도 이상으로 조절함

*전북대학교 대학원

**회원, 전북대학교 기계설계공학과

으로써 홀로그램을 기록하는데 TV 시스템의 사용이 가능하게 되어 스펙클을 이용한 실시간 계측의 길이 열리게 되었다. 이것을 소위 TV 홀로그래피 또는 TV 스펙클 간섭법이나 ESPI(electronic speckle pattern interferometry)라고 한다. ESPI는 기록 및 재생처리과정의 간단하고 그 속도가 매우 빠르기 때문에 간섭무늬의 정량적 해석과 실시간 계측이 가능하므로 선진국에서는 이미 자동차, 전자 및 항공기 산업 등의 분야에서 변형과 진동 해석 분야에서 중요한 계측방법으로 사용되고 있다. 그러나 국내의 경우에는 이에 대한 연구가 거의 전무하여 이와 관련된 실험은 전적으로 외국 기술에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 응용성을 갖으며 손쉽게 구현할 수 있는 위상이동 ESPI의 원리를 이용한 Electro-Optic Holographic Interferometry(E-O HI) 장치를 구현함으로써 본 실험방법을 국산화하고자 한다. E-O HI 기법은 그 계측방법으로서 다음 절에서 설명되는 시간평균법(time average method)을 이용하므로 진동계측에 있어서 많은 장점을 가지고 있다.

2. ESPI를 이용한 진동계측 방법

ESPI를 이용한 진동계측 방법으로서 시간평균 ESPI 방법(time average ESPI method), 스트로보스코픽 ESPI 방법(stroboscopic ESPI method) 그리고 이중펄스 ESPI 방법(dual-pulsed ESPI method) 등이 주로 사용되고 있다. 이들의 특징은 각각 다음과 같다.

시간평균법은 가장 일반적으로 사용되는 측정 방법으로서 물체의 진동주기와 비교하여 보다 긴 노출 시간으로 홀로그램을 제작하면 물체의 각각의 시간에 따른 변위의 평균치가 밝기 정보로 홀로그램에 기록된다. 사실 이러한 물체의 변위에 대한 밝기의 관계는 제1종 0차 베셀함수의 제곱, J_0^2 을 따른다. J_0^2 함수는 첫번째 최대 값이 그 이후의 최대 값보다 상대적으로 매우 크며 그 값이 순차적으로 감소하는 특성을 갖고 있다. 따라서 제작되는 홀로그램의 간섭무늬를 보면 간섭무늬의 차수에 따른 밝기 분포가 일정하지 않음을 알 수 있다. 즉 물체 상에서 전혀 움직이지 않은 노달점(nodal points)들은 첫번째 최대값을 갖으므로 다른 부분보다 구별되어 보이게 된다. 즉, 노달점들을 중심

으로 변위가 증가함에 따른 밝기가 점점 어두워져 가는 양상을 보이게 되므로 물체의 변형, 즉 모드 형태를 직접적으로 관찰할 수 있게 되는 것이다. 반면에 정량화(quantification)를 위해서는 베셀함수를 해석해야 하는 점이 곤란하다.⁽⁵⁾ 스트로보스코피 방법은 연속발진 레이저에 AO 변조기(acousto-optic modulator)나 chopper 등을 설치하여 스트로보 효과를 얻어내 물체의 진동에 대한 응답을 특수한 점에서 추출하는 방법으로 간섭무늬의 밝기 분포가 코사인 형태를 갖는 간섭무늬가 얻어진다. 따라서 간섭무늬의 분해능(resolution)이 시간 평균법의 경우보다 매우 높다. 그러나 홀로그램을 기록하는데 레이저 출력의 일부분만을 사용하므로 상대적으로 고출력 레이저를 필요로 하며 모우드 형태를 관측하기 위해서는 추가적인 처리가 필수적이다.⁽⁶⁾ 펄스 레이저를 이용한 이중 노출법(double exposure method)은 펄스 레이저를 이용하여 수 마이크로 초의 간격으로 고출력의 레이저를 발사하여 그 때의 물체의 변형을 기록하는 방법으로써 물체의 운동상태와는 관계없이 홀로그램 제작이 가능한 장점이 있다. 즉, 고유진동수로 진동할 때 뿐만 아니라 실제적인 운전상태에서도 물체의 변형 계측이 가능하다. 그러나 장비가 워낙 고가이며 고난이도의 기술이기 때문에 일반화되어 있지 않은 실정에 있다.⁽⁷⁾

3. 시간평균 전자 홀로그램의 제작과 정량적 해석

3.1 시간평균 전자 홀로그램의 제작

일반적인 ESPI 구성으로부터, 실험 물체가 가진기(exiter)등 외부 하중으로 인하여 변형되고 있을 때 CCD 카메라의 광센서에서의 빛의 강도분포(intensity distribution)는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$I(x, y) = I_o(x, y) + I_R(x, y) + 2A_o(x, y)A_R(x, y)A_R(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y)]M[\Omega(x, y)] \quad (1)$$

여기서, I_o 와 A_o 는 물체빔(object beam)의 강도(intensity)와 진폭(amplitude), I_R 과 A_R 는 기준빔(reference beam)의 강도와 진폭이며 $\Delta\phi$ 는 random phase로써 스펙클을 형성하는 항이고, M 은 물체의 변형으로 인한 기준빔과 물체빔 사이의 간섭을 변조(modulation)시키는 특성함수(characteristic function)로서 정적인 변형의 경우에는 코

사인 함수가 그리고 진동과 같은 동적인 변형인 경우에는 베셀함수가 된다. 또한 Ω 는 간섭무늬 제적함수 (fringe locus function)로서, 간섭무늬의 차수 (order)를 n 이라 하면 $\Omega(x, y) = 2\pi \cdot n(x, y)$ 으로 표현된다. $I(x, y)$ 는 모니터 상의 pixel의 밝기이고 진폭의 제곱은 강도와 같으므로 위의 식은 4개의 미지수, 즉 두개 빔의 강도와 진폭, 위상차 그리고 제적함수를 포함하고 있다. Ω 는 물체의 변형과 직접적인 관계를 갖고 있으므로 Ω 를 구하게 되면 물체의 변형에 대한 정량적인 정보의 추출이 가능하게 된다. ESPI의 경우 물체의 변형으로 인한 위상 변화로부터 간섭무늬가 형성되고 나면 그 이후부터 스펙클은 간섭무늬의 가시도(visibility)를 저하시키는 노이즈(noise)로 작용한다. 따라서 깨끗한 간섭무늬를 얻기 위해서는 식 (1)에서 스펙클을 나타내는 $\Delta\phi$ 항을 제거하여야 한다. E-O HI에서는 다음과 같은 위상 이동된 4-frame의 스펙클 패턴으로부터 $\Delta\phi$ 항을 제거한다. 기준빔(reference beam)이나 물체빔(object beam)에 90° 씩 4번의 위상 이동(phase stepping)을 실시하면 식 (1)은 다음과 같은 4개의 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$I_1 = I_0 + I_R + 2A_0A_R \cos(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (2)$$

$$I_2 = I_0 + I_R + 2A_0A_R \sin(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (3)$$

$$I_3 = I_0 + I_R - 2A_0A_R \cos(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (4)$$

$$I_4 = I_0 + I_R - 2A_0A_R \sin(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (5)$$

위의 식들로부터 $(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16I_0I_R M^2(\Omega)$ 을 얻을 수 있다. 물체가 고유진동수로 진동할 경우 특성함수 M 은 $M[\Omega(x, y)] = J_0[|\Omega(x, y)|]$ 즉 제 1종 0차 베셀함수가 된다.⁽⁹⁾ 따라서

$$(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16I_0I_R J_0^2(|\Omega|) \quad (6)$$

이 된다. 식 (6)을 보면 먼저 간섭무늬중 어두운 부분의 중심들은 Fig. 1과 같이 $J_0^2(|\Omega|) = 0$ 가 되는 표면상의 점들이 된다. 가장 밝은 0차 간섭무늬들은 진동으로 인한 변형에서 움직이지 않은 노달점들만을 나타내므로 노달점들을 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 중요한 특징으로 간섭무늬의 차수가 높아 갈수록 J_0 함수의 거의 주기적인 특성 때문에 일정한 간격으로 간섭무늬가 놓이게 된다. 이러한 특징은 간섭무늬의 정량적인 해석에 도움을 준다.

3.2 간섭무늬 제적함수의 결정

앞서 언급하였듯이 진동으로 인한 변형을 정량적

으로 계산하기 위해서는 간섭무늬 제적함수 Ω 를 구해야만 한다. Ω 를 얻는 방법으로는 간섭무늬 위치 추적법 (fringe tracking method), FFT 방법 (fast fourier transformation method)과 위상 이동법 (phase shifting method) 등이 있지만,^(10,11) 간섭무늬 위치 추적법이나 FFT 방법은 실험적인 수행은 간단하나 간섭무늬의 차수 (fringe order)를 인위적으로 결정해 주어야 하므로 해석의 자동화에는 적합하지 않은 방법들이다. 한편 위상 이동법은 앞의 방법들보다는 실험 수행이 다소 복잡하나 해석의 자동화에 용이하여 현재 일반적으로 사용되고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서도 Ω 를 구하는데 위상 이동법을 이용하였다.

물체의 진동과 동일한 주파수와 위상으로 기준빔을 위상변조(phase modulation)시키면 베셀함수형 간섭무늬를 이동(shift)시키는 효과를 일으킬 수 있으므로⁽⁵⁾ 이 효과를 이용하여 간섭무늬를 해석한다. 즉, 기준빔을 가지의 양 B 로 진동시킬 경우 특성함수 M 은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$M[\Omega(x, y), B] = J_0[|\Omega(x, y) - B|] \quad (7)$$

위의 식에서 B 를 Bias vibration이라고 하며 이 값은 정량화를 위해 인위적으로 부여하는 값이다. 따라서 식 (6)은 $[I_1 - I_3]^2 + [I_2 - I_4]^2 = 16I_0I_R J_0^2[|\Omega - B|]$ 으로 쓸 수 있다. 그러나 베셀함수는 성질상 인자들(arguments)의 직접적인 분리가 불가능하기 때문에 직접적인 방법으로는 Ω 를 구할 수 없기 때문에 정량적인 해석을 위해서는 추가적인 기법이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 3.1절에서 언급한 베셀함수의 거의 주기적인 성질을 이용하여 Ω 에 대한 근사적인 해를 구하는 방법을 이용하였다. 이러한 근사적인 해는 이중 노출법(double exposure

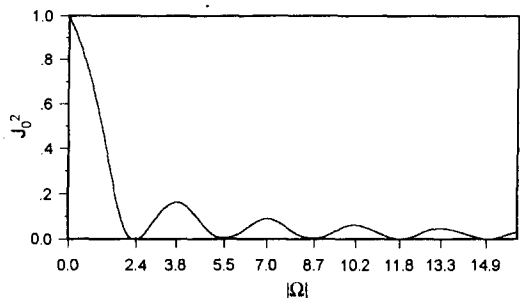


Fig. 1 Square of the zero order Bessel function of the first kind

method)의 강도 분포를 나타내는 일반식이 시간 평균법에서의 일반식과 유사하다는 점에 근거한다. 즉, 이중 노출법의 강도 분포와 이로부터 계산되는 제적함수는 다음과 같다.

일반적인 강도분포 :

$$I'_h(x, y) = I_a(x, y) + I_m(x, y) \cos^2[\Omega'(x, y)] \quad (8)$$

간섭무늬 제적함수 :

$$\Omega'(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\left(\frac{1 - \cos 2B}{\sin 2B} \right) \frac{I'_{h_2} - I'_{h_3}}{2I'_{h_1} - I'_{h_2} - I'_{h_3}} \right] \quad (9)$$

위의 식에서 I_a 는 배경강도(background intensity)이고 I_m 은 점 (x, y) 에서의 최대 강도 값이다. 또한, I'_{h_2} 와 I'_{h_3} 는 I'_{h_1} 에 각각 $-B, +B$ 의 위상 이동을 수행한 결과의 강도분포를 나타내는 수식이다. 시간평균 홀로그램에 대해서도 각각 $-B, +B$ 의 위상 이동을 실시하면 그 결과적인 강도 분포를 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$I_{h_1} = 16I_o I_R J_0^2(\Omega) \quad (10)$$

$$I_{h_2} = 16I_o I_R J_0^2(\Omega - B) \quad (11)$$

$$I_{h_3} = 16I_o I_R J_0^2(\Omega + B) \quad (12)$$

위의 3개의 식을 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$\Omega''(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\left(\frac{1 - \cos 2B}{\sin 2B} \right) \frac{I_{h_2} - I_{h_3}}{2I_{h_1} - I_{h_2} - I_{h_3}} \right] \quad (13)$$

즉, 물체의 진폭 정보인 제적함수, $\Omega''(x, y)$ 을 구할 수 있다. 그러나 J_0^2 와 \cos^2 의 차이 때문에 위의 결과에는 오차가 존재한다. 따라서 이러한 오차를 보정해 주어야 정확한 진폭을 구할 수 있다. 오차 보정법에 관해서는 다음 절에서 자세히 논하겠다. 일단 오차가 보정되면 위상 펼치기(phase unwrapping)를 통하여 진폭 정보를 gray level로 표시할 수 있으며 정량적인 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\begin{aligned} \Omega(x, y) &= \vec{K} \cdot \vec{A}(x, y) \\ &= (\vec{K}_2 - \vec{K}_1) \cdot \vec{A}(x, y) \\ &= k[\vec{k}_{2x} - \vec{k}_{1x}] \vec{A}_x(x, y) \\ &\quad + (\vec{k}_{2y} - \vec{k}_{1y}) \vec{A}_y(x, y) \\ &\quad + (\vec{k}_{2z} - \vec{k}_{1z}) \vec{A}_z(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

위의 식에서 \vec{K} 는 광학계의 민감도 벡터로서 관측 방향(observation direction) 벡터, \vec{K}_2 와 조사방향(illumination direction) 벡터, \vec{K}_1 의 차(subtraction)이다. $A(x, y)$ 는 물체의 진폭이며, k 는 파수(wave number)로 $2\pi/\lambda$ 로 계산되는 상수 값이다. 또한 진동으로 인한 변위방향을 Z 축으로 설정하고 간섭계의 구성을 면외변위(out-of-plane displacement) 구성으로 하면 민감도 벡터의 x 와 y 방향 성분은 각각 제거되고 $\vec{k}_{2z} - \vec{k}_{1z} \approx 2k$ 가 되므로 진폭은 다음과 같이 식이 된다.

$$A_z(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Omega(x, y) \quad (15)$$

3.3 오차의 보정

위의 식 (10)~(12)를 식 (13)에 직접 대입하면 $16I_o I_R$ 은 소거되므로 정리하면 다음 식과 같다.

$$\Omega''(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{1 - \cos 2B}{\sin 2B} \frac{J_0^2[|\Omega - B|] - J_0^2[|\Omega + B|]}{2J_0^2[|\Omega|] - J_0^2[|\Omega - B|] - J_0^2[|\Omega + B|]} \right] \quad (16)$$

식 (16)은 수치 해법적으로 계산할 수 있으므로 임의의 B 값에 대하여 Ω 를 대입하면 Ω'' 이 계산되므로, 일정한 범위에 대하여 Ω 와 Ω'' 을 포(look up

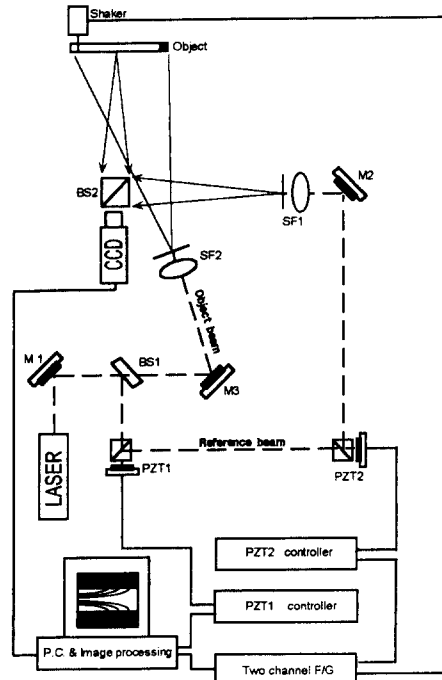


Fig. 2 ESPI system configuration

table, LUT)로 작성할 수 있다. 따라서 식 (13)으로부터 계산된 Ω'' 에 대해 위에서 작성된 LUT를 적용함으로써 오차가 제거된 Ω 를 구할 수 있다. Fig. 2에 $B=\pi/3$ 에 대하여 Ω 와 Ω'' 의 관계를 그림으로 나타내었다.

4. 실험장치와 실험절차

4.1 실험장치

본 실험을 위해 구성된 E-O HI 장치의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 사용된 광원은 파장이 532 nm인 frequency-doubled Nd : YAG 레이저이다. 레이저빔은 M1(mirror)으로부터 반사되어 광분할기(beam splitter) BS1로 들어가 기준빔과 물체빔으로 나누어져 각각의 경로(beam path)를 지나게 된다. 기준빔에는 $\Delta\phi$ 항을 없애기 위해 PZT1(piezoelectric translator)에서 90°씩 4번의 위상 이동(phase stepping)이 수행된다. 또한 물체와 동일한 주파수와 위상으로 가진 되는 PZT2에서 위상 변조되어 간섭무늬의 이동효과를 가져오게 된다. 다음으로 SF1(spatial filter)을 거친 후 고른 강도 분포로 CCD 카메라에 입사된다. 또한 물체빔은 M3을 지나 SF2를 통해 확대된 후 물체를 조사하고 여기에서 산란된 빛이 BS2를 통해 CCD 카메라로 입사하여 기준빔과 간섭을 일으키게 된다. CCD 카메라를 통하여 빛의 강도분포는 전기적인 신호로 바뀌어 화상처리장치 내로 들어오고, 여기에서 디지털 정보로 바뀌어 모니터에 상(image)이 나타난다.

4.2 노이즈 제거

비록 위상 이동법(phase stepping)을 이용하여 스펙클 노이즈를 어느 정도 제거하였다고는 하나 실제적으로 실험을 수행하게 되면 어느 정도 스펙

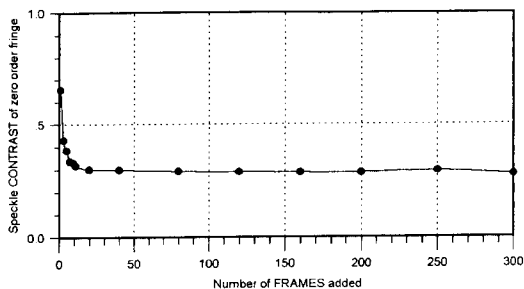


Fig. 3 Effect of frame average

클 노이즈가 잔류하게 되며 또한 전기적인 노이즈 등으로 인하여 간섭무늬의 가시도는 그리 좋지 않다. 본 연구에서는 시간에 따라 변하는 노이즈(time variant noise)를 효과적으로 제거할 수 있는 기법인 frame averaging method를 도입하여 상당량의 노이즈가 제거된 간섭무늬를 얻을 수 있었다.⁽¹³⁾ 즉, 식 (6)으로 표현되는 간섭무늬를 연속적으로 수개 얻어 이를 가산(summation)한 후 평균하는 방법이다. 아래의 Fig. 3은 가산회수, N 에 따른 스펙클 contrast의 변화 양상을 보여주고 있다. 본 그래프와 평균을 위해 소요되는 시간을 감안하여 본 연구에서는 $N=30$ 으로 설정하였다.

4.3 실험절차

위의 Fig. 3과 같은 E-O HI 장치에서 실험 물체를 적당한 위치에 설치한 다음 물체에 가진기(exciter)를 부착한다. 다음으로 2 channel F/G(function generator)의 한쪽 출력을 가진기로 입력하여 주파수를 변화시켜 가면서 그때의 물체의 변형을 모니터를 통하여 관찰한다. 가진기로의 입력 주파수가 물체의 고유진동수와 일치하게 되면 공진 현상으로 인하여 물체의 변형량이 갑작스럽게 많아지게 되어 간섭무늬가 증가하면서 모드형태가 관찰된다. 간섭무늬의 차수가 최대가 되는 주파수가 물체의 고유진동수이며, 이러한 상태에서 30회의 frame averaging을 통하여 노이즈를 제거한 후 결과 상(image)을 컴퓨터의 보조 기억장치에 저장한다. 계속해서 주파수를 변화시켜 가면서 모니터를 관찰하면 위와 같은 과정을 거쳐 각각의 고유진동수에서의 모드 형태를 관찰할 수 있다. 또한 Bias vibration, B는 Stetson 등에 의해 고안된 방법을 적용하여 구하였다.⁽⁵⁾ 이 방법은 모니터를 관찰하면서 F/G의 전압 값을 변경해 감으로써, 즉 PZT2의 진폭을 변화시켜 가며 Ω 의 값이 0에서 첫 번째 최소값, 즉 베셀함수에서 $\Omega=2.4$ 가 되는 F/G의 전압값을 구한다. 이 전압값은 간섭무늬에 2.4만큼의 위상 이동을 준 경우의 전압값이 되므로 이 값을 기준으로 $\pi/3$ 에 대한 전압값을 비례적으로 구할 수 있다. 다음으로 PZT2의 위상을 변경하여 PZT2의 진동 위상이 물체의 진동 위상과 일치하도록 설정한다. 위의 과정이 모두 완료되면 위상 변조없이 첫번째 간섭무늬를 그리고 $\pi/3$ 의 진폭과 위상이 일치된 상태에서 두 번째 간섭무늬를 얻으며 마지막으로 $\pi/3$ 의 진폭과 PZT2의 위상을 180°

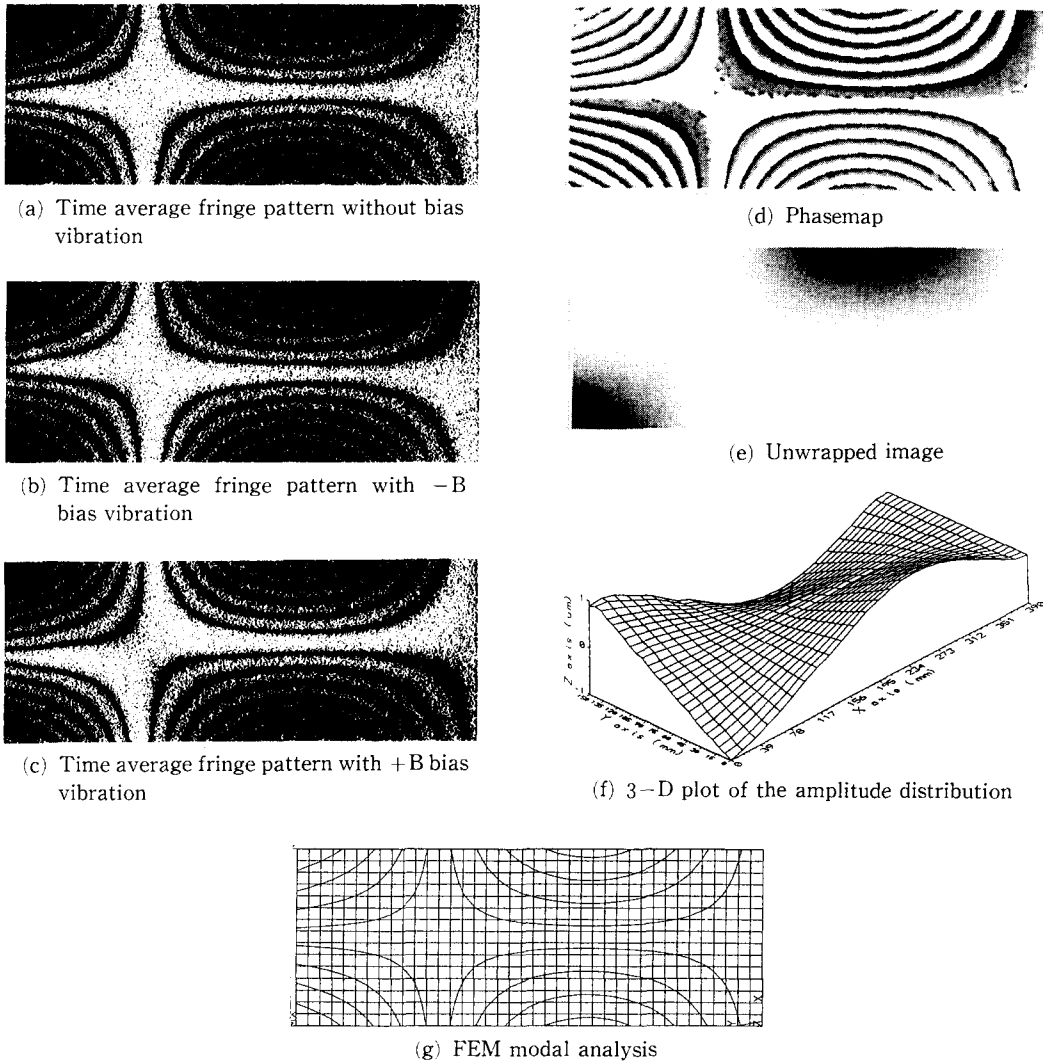


Fig. 4 Example of the quantification procedure at 1076 Hz

이동시켜 세번째 간섭무늬를 얻는다. 이러한 방법으로 각각 0 , $-B$, $+B$ 에 대한 3개의 위상 변조된 간섭무늬를 얻을 수 있게 된다. 일단 3개의 간섭무늬를 얻게 되면 3절에서 언급된 방법을 이용하여 정량적인 값을 얻어낼 수 있다. 식 (16)으로부터 계산된 제각함수는 \arctan 함수로부터 계산되었기 때문에 불연속적인 값을 갖게 되는데 실제적으로 $-\pi/2 \sim +\pi/2$ 의 값을 갖게 된다. 이러한 값을 갖는 상을 위상지도(phasemap)라 하며 위상지도에 대해 화상처리기법을 적용하여 위상 펼치기(phase unwrapping)를 수행함으로써 불연속적인 곡선을

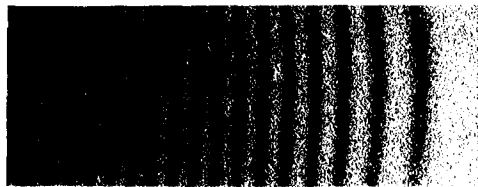
연속적인 하나의 곡선으로 연결해 불연속성을 배제한 결과를 얻을 수 있다. Ω 가 gray level 분포로 결정되면 식 (15)를 이용하여 진폭을 정량적으로 계산할 수 있게 된다.

5. 실험결과

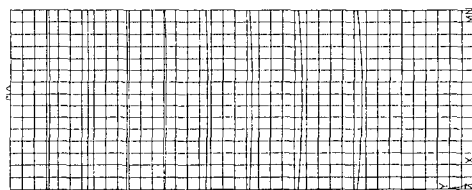
본 연구에서 제작된 E-O HI 장치의 시험을 위해 두랄루민 6061을 사용하여 가로 390 mm, 세로 150 mm, 두께 12 mm인 평판을 제작, 한쪽 변을 완전히 고정된 외팔보로 하여 각각의 고유 진동수

에 다른 모드 형태를 계측하고 정량화를 수행하였다. 실험 물체에는 빛에 대한 반사율을 향상시키기 위하여 표면에 백색도료를 칠하였다. Fig. 5는 1076 Hz의 고유진동수에서의 실험결과로서 (a)는 기준빔을 위상 변조하지 않은 실재의 시간 평균 간섭무늬로써 앞서 언급한 바와 같이 간섭무늬의 강도 분포는 베셀함수를 따르므로 노달점들의 밝기가 가장 밝으며 간섭무늬의 차수가 증가할 수록, 즉 변형량이 많아질수록 점점더 어두워져 간다. 따라서 쉽게 모드형태를 관찰할 수 있다. (b)는 (a)와 동일한 주파수이나 기준빔에 크기 B의 Bias vibration을 가한 경우의 간섭무늬이고, (c)는 역시 (a)와 동일한 주파수이나 (b)에 대하여 기준빔의 진동 위상을 180° 이동시킨 경우의 간섭무늬이다. 각각의 그림에서 알 수 있듯이 위상 변조의 결과로 간섭무늬의 위치가 약간씩 이동하고 있음을 알 수 있는데 이러한 강도 분포의 변화로부터 베셀함수를 구할 수 있다. (d)는 (a)~(c)로부터 구한

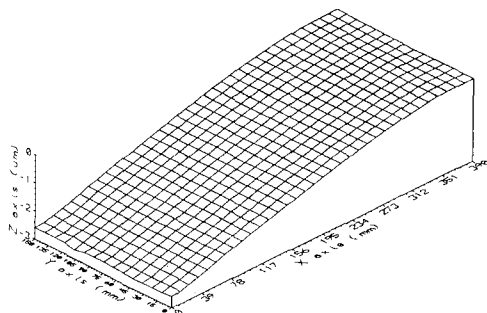
위상지도이며 (e)는 위상지도의 불연속성을 배제한 위상펼치기가 수행된 화상(unwrapped image)이다. (f)는 (e)의 밝기 정보로부터 진폭을 정량적으로 구한 결과를 3-D 그래프로 표시한 것이다. 3-D 그래프에서 진폭을 나타내는 Z축의 스케일은 m로 매우 미소한 진폭을 계측할 수 있었다. 또한 (g)는 같은 물체에 대하여 FEM(ANSYS 5.0 A)을 이용하여 modal analysis를 행한 결과를 나타낸 그림으로서 E-O HI를 이용한 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 5~Fig. 12는 각각의 고유진동수에서의 간섭무늬, FEM (finite element method)에 의한 해석결과와 그의 정량화의 결과를 나타낸 그림이다. 각각의 그림에서와 같이 각 고유진동수에서의 모드 형상을 관찰할 수 있었으며 위에서 언급한 과정을 거쳐 정량화도 가능하였다. 마지막으로 Table 1은 본 연구에서 제작된 ESPI 실험장치로부터 구한 고유 진동수와 laser vibrometer를 이용한 FFT 해석결과 그리



(a) Time average fringe pattern

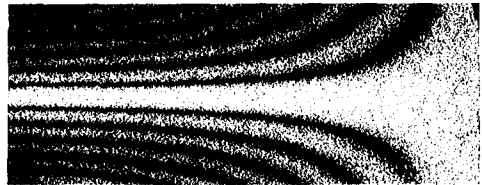


(b) FEM modal analysis

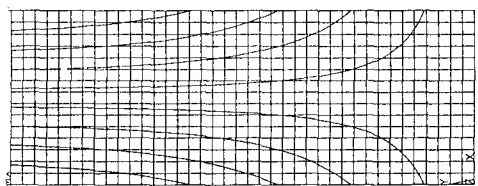


(c) 3-D plot of the Amplitude distribution

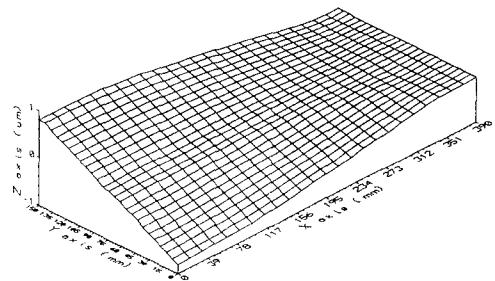
Fig. 5 Cantilever plate vibrating at 63 Hz



(a) Time average fringe pattern



(b) FEM modal analysis

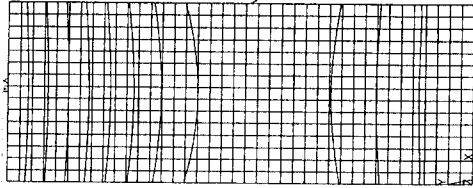


(c) 3-D plot of the amplitude distribution

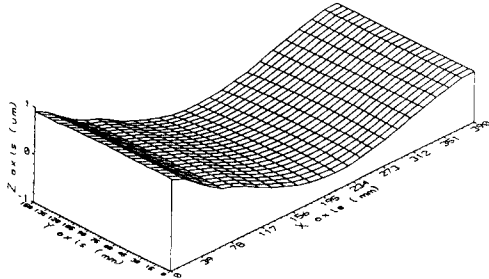
Fig. 6 Example of the quantification procedure at 337 Hz



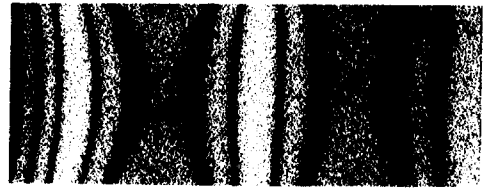
(a) Time average fringe pattern



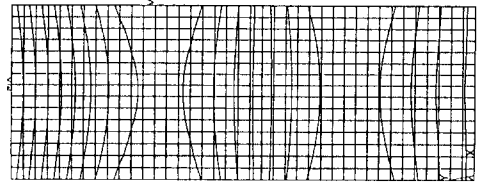
(b) FEM modal analysis



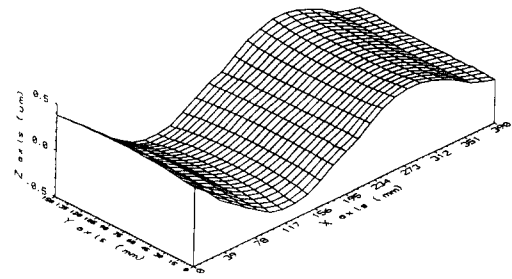
(c) 3-D plot of the amplitude distribution
Fig. 7 Cantilever plate vibrating at 396 Hz



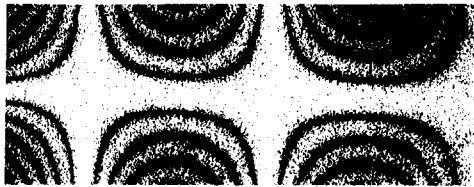
(a) Time average fringe pattern



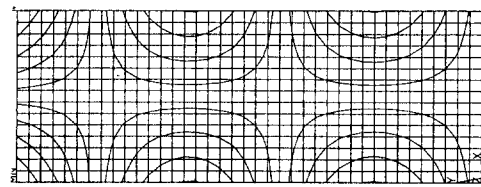
(b) FEM modal analysis



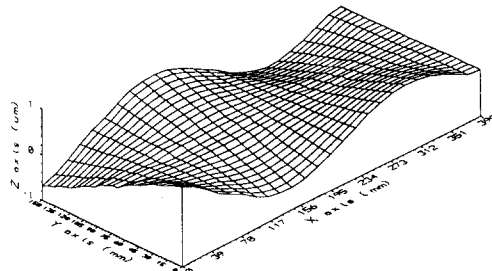
(c) 3-D plot of the amplitude distribution
Fig. 8 Cantilever plate vibrating at 1112 Hz



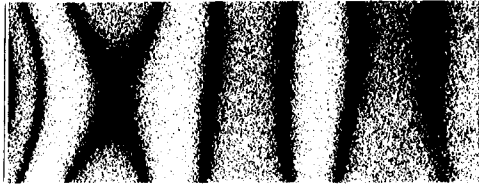
(a) Time average fringe pattern



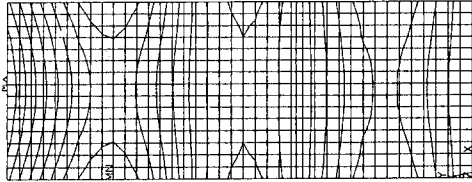
(b) FEM modal analysis



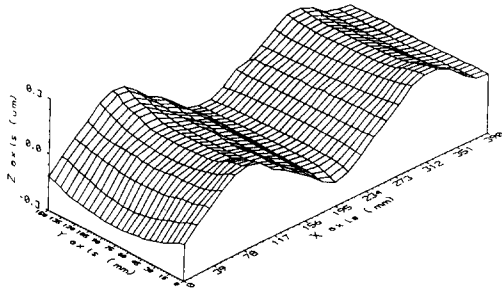
(c) 3-D plot of the Amplitude distribution
Fig. 9 Cantilever plate vibrating at 1978 Hz



(a) Time average fringe pattern



(b) FEM modal analysis

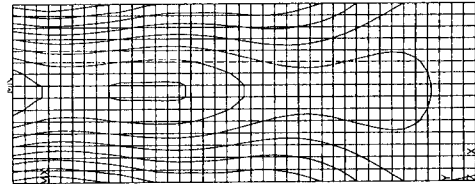


(c) 3-D plot of the amplitude distribution

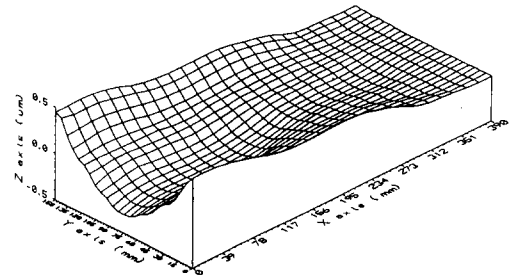
Fig. 10 Cantilever plate vibrating at 2160 Hz



(a) Time average fringe pattern

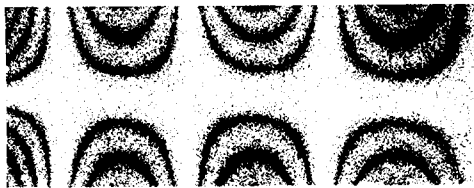


(b) FEM modal analysis

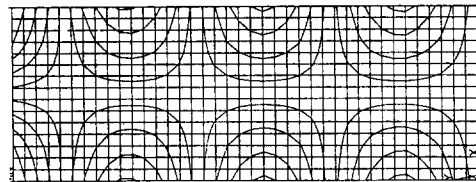


(c) 3-D plot of the Amplitude distribution

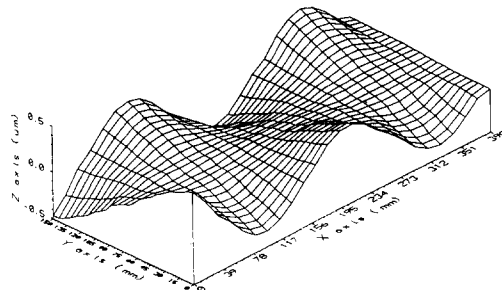
Fig. 11 Cantilever plate vibrating at 2890 Hz



(a) Time average fringe pattern



(b) FEM modal analysis



(c) 3-D plot of the amplitude distribution

Fig. 12 Cantilever plate vibrating at 3108 Hz

Table 1 Comparison the results of between ESPI experiment and FEM modal analysis

mode number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ESPI(Hz), ①	63	337	396.9	1076.2	1,112	1,978	2,160	2,890	3,108
FFT(Hz), ②	62.5	337.5	400	1087.5	1,137	2,000	2,225	2887.5	2,138
FEM(Hz), ③	60.5	333.8	379.7	1,059	1,071	1,950	2,117	2,977	3,109
% difference of ① and ②	0.8	0.15	0.8	1.04	2.2	1.1	2.9	0.08	0.9
% difference of ① and ③	4.0	1.0	4.3	1.6	3.4	1.4	2.0	3.0	0.0

고 FEM으로부터 구한 결과를 비교한 것이다. FFT에 의한 측정결과는 최대 오차 2.9% 이내, FEM에 의한 해석결과는 최대 오차 4% 이내로 나타나 본 측정장치를 이용한 결과와 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다.

6. 결 론

본 논문은 진동계측에 적합한 ESPI 광학계를 설계하고 이에 대해 적절한 화상처리를 실시하여 진동 물체의 모드형태를 계측하는 장치의 개발에 관한 연구로서 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실제적으로 위상 이동 ESPI의 원리를 이용한 E-O HI 장치를 구성하여 진동물체를 대상으로 모드형태를 가시화 할 수 있었다.

(2) Accelerometer나 vibrometer가 물체상의 한 점에 대한 측정법인 반면에 본 방법은 물체 전체의 진동진폭 분포를 한번에 측정할 수 있었다.

(3) 진폭의 정량화를 위하여 위상 이동법을 도입함으로써 자동화된 방법으로 정량적인 정보 추출이 가능하였으며 이를 위해 광학계와 접속된 화상처리를 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

(4) 고유진동수 계측의 경우 실험결과는 FEM과는 최대 오차 4% 이내, 그리고 FFT 분석과는 최대 오차 2.9%이내로 잘 일치하고 있어서 본 방법에 신뢰성을 부여할 수 있었다.

이상과 같은 결과로부터 본 연구로부터 제작된 E-O HI 장치를 이용하면 진동 전문가가 아니더라도 구조물의 진동 특성에 대하여 좀 더 쉬운 방법으로 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Ole J. Lokberg, 1984, "ESPI—The Ultimate Holographic Tool for Vibration Analysis?," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, No. 6.
- (2) Tyrer, J. R., 1986, "Critical Review of Resent Development in Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Holographic Nondestructive testing Proc. SPIE*, Vol. 604, pp. 95~111.
- (3) Macovski, A., Ramsey, S. D. and Schaefer, L. F., 1971, "Time-Lapse Onterferometry and Contouring Using Television System," *Applied Optics*, Vol. 10, pp. 2722.
- (4) Butters, J. N. and Leendertz, J. A., 1971, "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology," *Optics and Laser Technology*, Vol. 3, No. 27.
- (5) 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.
- (6) Xizhou Wang, Yushan Tan, 1991, "Vibration Modal Using Stroboscopic Digital Speckle Pattern Interferometry(DSPI)," *Speckle Techniques, Birefringence Methods, and Applications to Solid Mechanics, SPIE*, Vol. 1554A.
- (7) Santoyo, F. M., Tyrer, J. R., West, T. C. and Kerr, D., 1989, "Vibration Analysis Using Stepped Pulsed Electronic Speckle Pattern Interfer-

- ometry," *Stress and Vibration : Recent Developments in Industrial Measurement and Analysis*, SPIE, Vol. 1084.
- (8) Ryszard J. Pryputniewicz, 1985, "Time Average Holography in Vibration Analysis," *Optical Engineering*, Vol. 24, No. 5.
- (9) Karl. A. Stetson, 1970, "Effects of Modulation on Fringe Loci and Localization in Time-Average Hologram Interferometry," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 60, No. 10.
- (10) Sridhar Krishnaswamy, 1991, "Algorithm for Computer Tracing of Interference Fringes," *Applied Optics*, Vol. 30, No. 13, 1.
- (11) Donald J. Bone, 1991, "Fourier Fringe Analysis : the Two-Dimensional Phase Unwrapping Problem," *Applied Optics*, Vol. 30, No. 25, 1.
- (12) Raid, G. T., 1987, "Automatic Fringe Pattern Analysis : a Review," *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 7, No. 37.
- (13) Eiolf Vichagen, 1986, "Vibration Measurement Using Phase Shifting TV-Holography and Digital Image Processing," *Optics Communications*, Vol. 69, No. 214.