

〈논 문〉

진동해석을 위한 전자전단간섭계의 개발

강 영 준* · 권 용 기**

(1997년 2월 1일 접수)

Development of Electronic Shearography for Vibration Analysis

Young-June Kang and Yong-Ki kwon

Key Words : Electronic Shearography(전자전단간섭계), Vibration Mode Shape(진동모드형태), Vibration Gradient(진동기울기), Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자스펙클간섭계)

Abstract

This paper describes a measuring method of vibration mode shapes by the Electronic Shearography. This method called the speckle shearing interferometer has many merits in practical use, such as low sensitivity to environmental noise, low limit of coherent-length and simple optical configuration. In this study, we developed Michelson-type shearing interferometer provided with a phase stepping mirror and with a bias modulation mirror to quantify the vibration gradient fields. Results of application to a simple cantilever plate show that the vibration amplitude fields obtained are in good agreement with those of the electronic speckle pattern interferometry (ESPI).

1. 서 론

전자스펙클간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)^(1,3,5)는 구조물의 고유진동수에서의 진동모드형태(vibration mode shape)를 가시화하는 유용한 방법으로 사용되고 있다. 즉 간섭무늬의 기록과 재생에서 화상처리장치(image processing system)를 사용함으로써 물체의 변형을 실시간적으로 관찰할 수 있기 때문에 손쉽게 산업현장에 이용될 수 있게 되었다. 더구나 시간평균법에 의한 계측방법은 베셀함수형 간섭무늬를 만들어 내므로 직접적으로 물체의 모드형태를 관찰할 수 있는 이점이 있다.^(8,9) 그러나 ESPI 기법도 홀로그래피간섭법(holographic interferometry)보다는 덜

하지만 마찬가지로 주위의 진동이나 공기유동과 같은 환경적인 영향에 매우 민감하여 때때로 측정 자체가 불가능한 경우도 발생한다. 이것은 ESPI 광학계의 구성상 발생하는 문제이기 때문에 본질적인 해결방법은 현재로는 없다. 따라서 위의 단점을 극복할 수 있는 하나의 방법은 광학계를 달리 구성함으로써 환경적인 영향을 줄이는 것이다. 현재 간섭원리를 이용한 계측기법중 환경적인 영향에 덜 민감하다고 알려진 광학계는스펙클전단간섭계(Speckle Shearing Interferometry 약해서 Shearography)⁽⁴⁾이다. 이 간섭계는 시험물체의 면외변위의 기울기를 계측하는 기법으로써 주위 환경의 영향을 거의 받지 않으므로 ESPI 기법이 적용될 수 없는 곳에 손쉽게 적용될 수 있으며, 광학계의 구성이 간단하고 사용되는 레이저의 가간섭거리가 그리 길지 않아도 되기 때문에 낮은 출력의 레이저를 사용해도 되는 경제적인 방법이다. 또한 선단량을 조절하는

*회원, 전북대학교 기계설계학과

**회원, 전주공업전문대학 기계과

것이 가능하므로 ESPI에서는 불가능한 보다 큰 변위량의 계측이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 마이켈슨형의 면외변위 전단간섭계(out-of-plane shearing interferometer)를 구성하고 화상처리장치를 컴퓨터와 접속하여 전자전단간섭계를 제작했다. 이 장치에 의해서 물체의 고유진동수를 구할 수 있었고, 이 고유진동수에서의 실제적인 진폭의 크기와 모드형태를 가시화 할 수 있었다.

2. 전단간섭계의 원리

Fig. 1은 전단간섭계의 개략도이다. 광원 U_0 가 물체면에 조사되면 여기에서 산란된 빛이 광분할기(Beam Splitter, BS)에 입사된다. 이렇게 입사된 빛은 각각 두개의 빔 (beam)으로 나누어진다. 한 빔은 입사광에 수직하게 놓여있는 반사경 M_1 에서 다시 반사되어 BS를 거쳐 상면(image plane)에서 상을 맺는다. 그리고 다른 하나의 빔은 BS를 거쳐 입사광과 수직한 방향에 대해 각도 α 만큼 경사지게 설치되어 있는 반사경 M_1 에서 반사된다. M_2 에서 반사된 빔은 렌즈 L을 거쳐 상면에서 상을 맺게 되는데, 이 M_2 를 통과한 빔에 의하여 맺어진 상은 M_1 에 의해 맺힌 상과 일치하지 않고 M_2 의 경사각 α 때문에 S_x 만큼 전단되어 나타난다.

따라서 물체면의 임의점 Q는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전단간섭계의 광학계의 상면에서 두개의 상이 서로 전단되어 있기 때문에 거리 S_x 만큼 떨어져 나타나고, Q는 물체가 실제로 움직인 변위 \vec{d}_1 과 \vec{d}_2 의 조사점이 된다. Q에 의해 전달된 위상의 위상변화는 다음 식과 같다. ^(1,7)

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

여기에서,

- λ : 레이저의 파장
- \vec{n}_o : 조사방향을 나타내는 단위벡터
- \vec{n}_s : 관측방향을 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 법선상에 있으며, θ_1 과 θ_2 도 실제 상황에서는 거의 0에 가깝다. Δd 는 테일러 정리를 이용하여 다음식과 같이 전개할 수 있다.

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

Δx 는 상면에서 S_x 와 같고 이 값은 충분히 작기 때문에 위의 식에서 2차 이상의 고차 항을 무시할 수 있다. 그러므로 식 (2)를 식 (1)에 대입해서 정리하면 다음 식과 같이 된다.

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

따라서 나타나는 간섭무늬는 $\partial d / \partial x$ 의 값이 일정한 등고선(contour)을 나타낸다. 다시 말해 전단방향 x 에 대한 물체의 면외변위 d 의 1차 미분값인 일정한 간섭무늬가 보여진다. 이때 M_1 의 경사각에 의해 S_x 가 변경될 수 있으므로 전단방향뿐만 아니라 광학계의 민감도를 간단히 바꿀 수도 있다. ⁽¹¹⁾

3. 전자전단간섭계를 이용한 진동계측

전자전단간섭계를 이용한 진동계측방법의 이론적 배경은 전자광학홀로그래피간섭법(Electro-Optic Holographic Interferometry, E-O HI)에 근거한다. ^(2,6) 이 방법은 시간 평균법(time average method)을 이용하여 베셀함수형 간섭무늬를 얻고, 여기에 간섭무늬이동기법(fringe shifting method)을 도입하여 변형량을 정량화하는 방법이다. 본 이론을 전자전단간섭계에 도입하기 위해서 2개의 광경로에 대해 한쪽 빔은 위상이동(phase stepping)을, 그리고 다른 한쪽 빔은 위상변조(phase modulation)을 시킨다. 즉 정적인 변위의 계측에 있어서는 단지 한

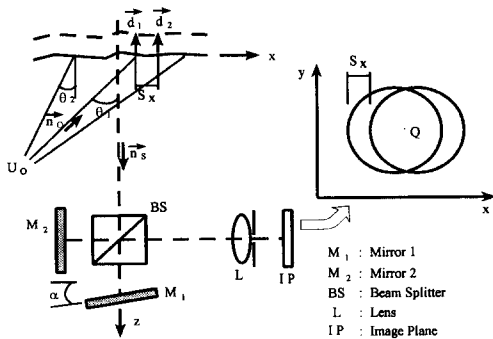


Fig. 1 The optical arrangement of shearing interferometer for the measurement of displacement gradients

쪽 빔의 위상만을 변경시킴으로써 정량적인 해석이 가능하나 진동으로 인한 동적인 변형의 경우에는 나타나는 간섭무늬의 형태가 다를 뿐만 아니라 위상이동만으로는 간섭무늬의 이동효과를 가져올 수 없기 때문에 다른 쪽 빔을 물체와 동일한 주파수로 진동시키고 그 진폭을 변경함으로써 간섭무늬를 이동시킨다. 시간평균법에 의해 작성된 간섭무늬는 다음 식으로 표현되는 강도분포를 갖는다.

$$I_N(x, y) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\phi(x, y) + \phi_N)$$

$$J_0[\Omega(x, y)]$$

$$N = 0, 1, 2, 3 \quad (4)$$

위의 식에서 A_1, A_2 는 빔의 진폭을 나타내며, $\Delta\phi$ 는 두 빔의 경로차에 의한 불규칙 위상을 그리고 ϕ_N 는 한쪽 빔의 위상이동시 변경된 양을 나타낸다. J_0 는 제1종 0차 베셀함수로서 식 (4)에서와 같이 시간 평균법으로 작성되는 간섭무늬 패턴은 베셀함수의 형태를 따른다. 또한 $\Omega(x, y)$ 는 간섭무늬의 제적함수(fringe locus function)라고 하며 물체의 변형에 따른 간섭무늬의 위치를 나타낸다. 위의 식 (4)는 배경노이즈와 불규칙 위상에 의한 노이즈로 인하여 간섭무늬가 제대로 관찰되지 않는다. 때문에 4-frame 위상이동법⁽⁴⁾을 이용하면 배경노이즈와 불규칙 위상에 의한 노이즈가 제거된 아래의 식으로 표현되는 간섭무늬를 얻을 수 있다.

$$I_{out}(x, y) = (I_0 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2$$

$$= J_0^2[\Omega(x, y)] \quad (5)$$

여기에서 I_0, I_1, I_2, I_3 는 4-frame 위상 이동에 대한 각각의 간섭무늬 강도분포를 의미하며, I_{out} 으로 표시되는 간섭무늬는 진동으로 인한 진폭의 기울기에 대응되는 등고선을 의미한다. 광학계를 면외변위(out-of plane displacement)구성으로 하고, 전단방향을 x 축으로 하면 간섭무늬 제적함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Omega = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \quad (6)$$

위의 식에서 Δx 는 전단량을 나타내므로 간섭무늬 제적함수를 구하면 역을 전단방향에 대한 물체의 진폭 변화율을 구해낼 수 있다. 따라서 물체의 진폭 기울기를 구하게 되면 이를 전단방향에 대해 수치적분하여 실제의 진폭을 구할 수 있으므로 모드 형태의 계측이 가능하다.

간섭무늬 제적함수를 구하는 방법으로써 E-O HI

에서는 3-frame 위상이동법을 이용한다. 즉 위상 변조(phase modulation)에 의해 위치가 이동된 3개의 간섭무늬를 얻고 이를 이중노출법에서 제적함수를 구하는 식에 대입하여 간섭무늬 제적함수를 구하고 이에 따른 오차를 보정해 주는 것이다.⁽²⁾ 위상변조법을 이용하여 간섭무늬의 위치가 각각 $0, +\pi/3, -\pi/3$ 만큼씩 이동된 3개의 간섭무늬를 얻으면, 이로부터 다음 식과 같은 제적함수를 구할 수 있다.

$$\Omega(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \cdot \left[\frac{(1 - \cos 2B)}{\sin 2B} \frac{I_{h_2} - I_{h_3}}{2I_{h_1} - I_{h_2} - I_{h_3}} \right] \quad (7)$$

위의 식에서 B 는 위상변조되는 빔의 진폭이고, $I_{h_1}, I_{h_2}, I_{h_3}$ 는 다음 식과 같다.

$$I_{h_1} = 16I_0I_RI_0^2(\Omega) \quad (8)$$

$$I_{h_2} = 16I_0I_RJ_0^2(\Omega - B) \quad (9)$$

$$I_{h_3} = 16I_0I_RJ_0^2(\Omega + B) \quad (10)$$

그러나 위의 식에서 구한 제적함수는 J_0^2 과 \cos^2 의 차이때문에 오차가 존재하므로 오차를 보정해 주어야 정확한 진폭을 구할 수 있다. 이 오차는 임의의 Ω 와 B 에 대한 표를 작성하여 계산할 수 있다. 즉 식 (8)~(10)을 (7)에 직접 대입하여 Ω 와 B 에 대하여 수치해법적으로 계산함으로써 이의 결과와 Ω 를 표(look up table)로 작성할 수 있다. 따라서 작성된 look up table를 이용하면 오차가 보정된 제적함수를 구할 수 있게 된다.^(5,6)

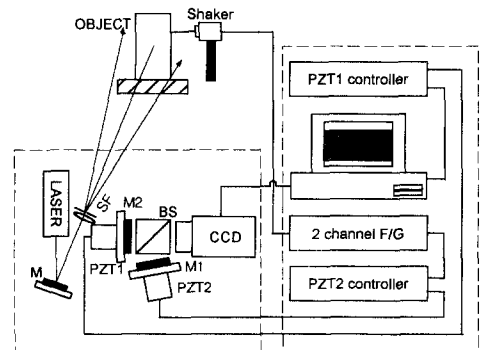


Fig. 2 Schematic of the laser interferometer used in electronic shearography and image acquisition system

4. 실험장치와 실험방법

4.1 실험장치

본 연구에서 구성한 전자진단간섭계의 시스템 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다. 사용된 광원은 100 mW급 Frequency Doubled CW Nd : YAG 레이저로서 레이저빔은 반사경 M₁과 공간필터 SF(spatial filter)를 거친 후 물체면을 조사(illumination)하여 물체면에서 반사된 빔이 BS로 입사한다. 입사된

빔은 BS를 통하여 2개의 빔으로 나누어진 후, 한 쪽 빔은 PZT1(Piezoelectric Transducer 1)에서 위상이동되고 다른 쪽 빔은 물체의 진동수와 동일한 진동수로 진동하는 PZT2(Piezoelectric Transducer 2)에서 위상변조된다. 각각 위상이동되고 위상변조된 빔이 다시 BS를 거쳐 CCD 카메라로 들어오게 된다. 여기에서 두 빔의 간섭으로 인한 정보가 전기적인 신호로 바뀌고 화상처리 장치를 통해 모니터에 나타난다.

4.2 노이즈 제거

위의 과정을 거쳐 나타나는 간섭무늬는 비복 위상이동빔을 이용하여 배경노이즈와 불규칙 위상을 제거하였다고는 하지만 스펙클노이즈와 전기적인 노이즈로 인하여 간섭무늬의 가시도(visibility)가 그리 좋지 않다. 따라서 이러한 노이즈를 제거해 주어야 나중에 정밀과과정에서 오차가 적게 발생한다. 물리적으로 스펙클의 크기는 광학계의 F#(F-number)와 관계되어 있다. F#가 작은 경우에는 스펙클의 크기가 커지게 되어 두 빔간에 간섭이 잘 일어나지만 나중에 스펙클노이즈가 매우 심하게 된다. 따라서 적당한 F#는 스펙클노이즈를 더욱 줄일 수 있어 간섭무늬의 가시도를 향상시킬 수 있다. Fig. 3은 3종류의 F#에 따른 간섭무늬를 나타낸 것이다. 본 그림에서 명확히 알 수 있듯이 F#를 5.6으로 하였을 때 가시도가 가장 좋은 간섭무늬를 얻을 수 있었기 때문에 본 연구에서는 F#를 5.6으로 하여 실험을 수행하였다.

동일한 조건에서 간섭무늬를 연속적으로 수 개 더한 후 이를 평균하는 방법, 즉 프레임평균법(frame averaging method)을 이용하여 시간에 따라 변화하는 노이즈성분을 상당량 제거하였다. 그러나 이 방법은 frame의 가산과 평균에 상당 시간

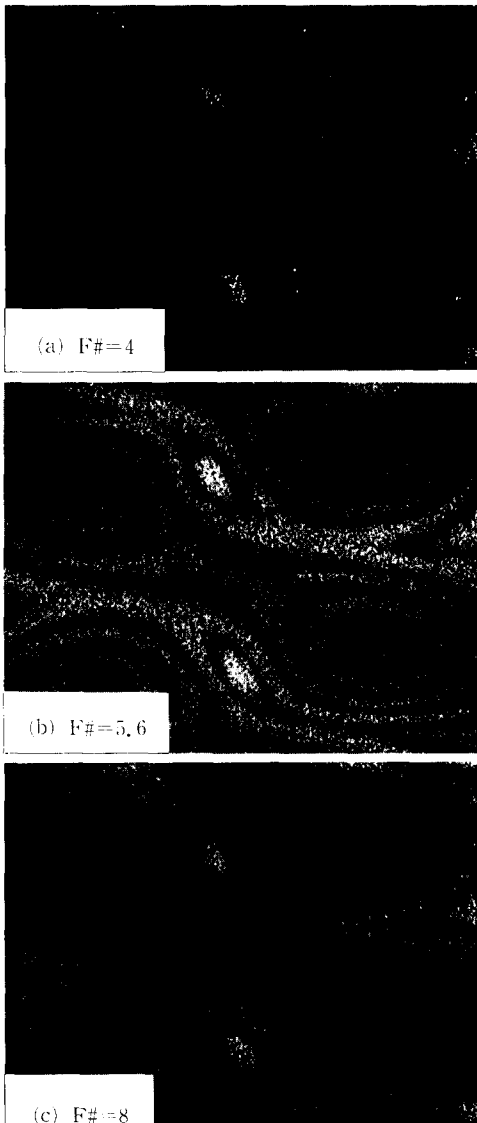


Fig. 3 Interference fringe patterns according to F number

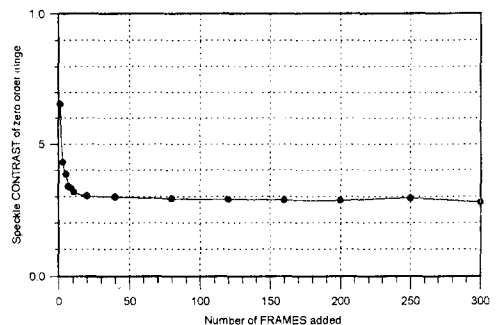


Fig. 4 Correlation between number of frame and speckle contrast

이 소요되므로 노이즈의 제거효과와 시간을 감안하여 가산회수를 정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 가산회수에 따른 0차 간섭무늬의 contrast 값을 계산한 결과, 가산 회수를 30으로 하는 것이 가장 적당함을 알았다.

4.3 정량적 해석

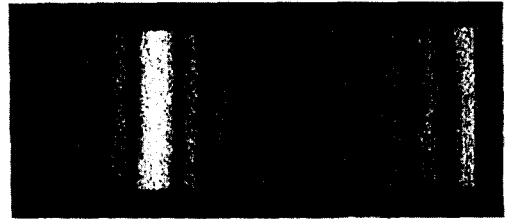
식 (7)로부터 계산된 궤적함수는 arctan 함수의 불연속성때문에 그 값이 $-\pi/2$ 에서 $+\pi/2$ 사이의 값을 갖는 톱니파형태의 반복적인 값들을 갖게 되므로 이를 $0\sim\pi$ 의 범위로 정규화하여야 한다. 이러한 정규화과정을 거치면 변형에 대한 정보가 연속적인 grey level로 나타나는 위상 펼치기가 수행된 화상(unwrapped image)을 얻을 수 있고, 이 결과로부터 식 (6)을 이용하여 진폭기울기의 값을 정량적으로 계산할 수 있다.

또한 unwrapped image에 대하여 각각의 전단 방향에 대하여 적분을 수행하면 실제의 진동으로 인한 모드형태를 얻을 수 있다. 즉 임의 기준점을 중심으로 전단방향으로 grey level 값들을 가산하고, 이를 $0\sim255$ 의 범위로 정규화함으로써 적분을 수행하였다.

5. 실험결과

본 연구에서 제작된 전자전단간섭계의 시스템을

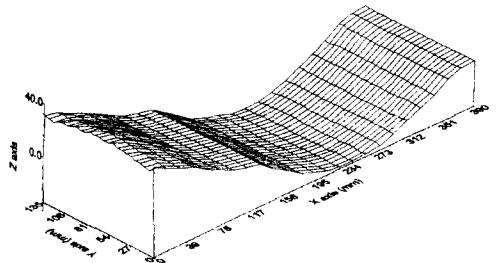
시험하기 위해 두랄루민 6061을 사용하여 가로 390



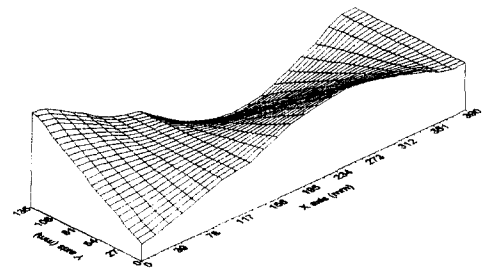
(c) +B phase modulation for fringe of a plate



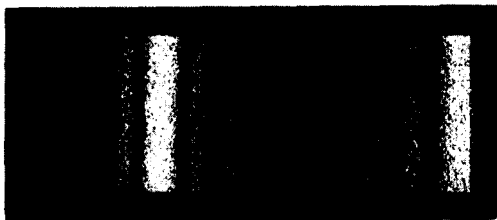
(d) Unwrapped image for fringe of a plate



(e) 3-D plot for displacement gradients of a plate



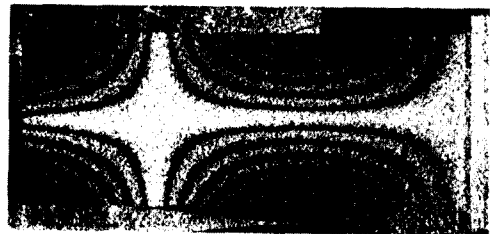
(f) 3-D plot for vibration amplitude of a plate



(a) No phase modulation for fringe of a plate

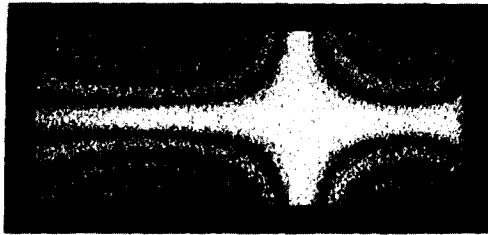


(b) -B phase modulation for fringe of a plate

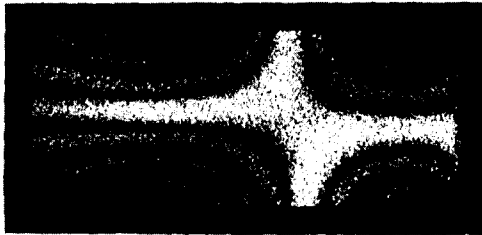


(g) Mode shape by ESPI method

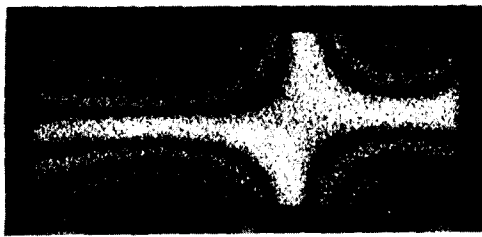
Fig. 5 X-axis shearing fringes and 3-D plot when a plate was excited at a frequency of 1090 Hz



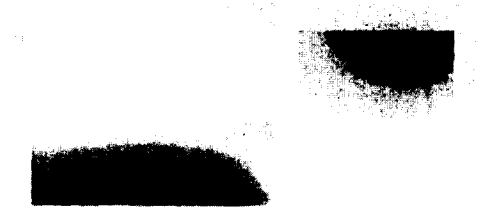
(a) No phase modulation for fringe of a plate



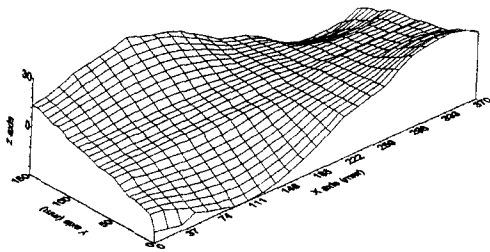
(b) -B phase modulation for fringe of a plate



(c) +B phase modulation for fringe of a plate

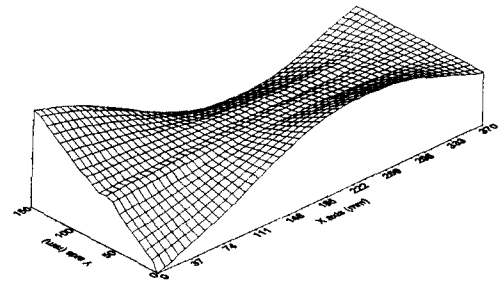


(d) Unwrapped image for fringe of a plate



(e) 3 D plot for displacement gradients of a plate

mm, 재로 150 mm 그리고 두께가 12 mm인 평판을 제작하여 한쪽 변을 완전히 고정된 외팔보로 하여 실험을 행하였다. 실험은 x축과 y축에 대하여 각각 20 mm와 15 mm의 전단(shear)을 주어 각각의 고유진동수를 찾고, 이에 따른 간섭부리를 얻은 후 정량화를 수행하였다. 또한 얻어진 결과의 정확성을 검증하기 위해 ESPI를 이용한 실험결과와 비교하였다. Fig. 5는 1090 Hz의 고유진동수에서 x축 방향으로 전단을 주고 실험한 각각의 결과로써 Fig. 5(a)는 빔에 위상변조를 가하지 않은 순수한 시간평균 간섭부리이고, Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와 동일한 주파수이나 빔에 진폭 B 의 위상 변조를 가한 결과이며, Fig. 5(c)는 역시 Fig. 5(a)와 동일한 주파수이나 B 의 위상변조를 가한 간섭부리이다. 3개의 그림에서 알 수 있듯이 위상 변조를 통하여 간섭부리의 위치가 약간씩 이동하였음을 알 수 있다. 이 3개의 간섭부리들로부터 제적함수를 구하고 오차를 보정한 결과가 Fig. 5(d)에 나타나 있다. Fig. 5(e)는 Fig. 5(d)를 화상처리와 수치적 계산을 통하여 정량화한 결과이다. 또한 Fig. 5(f)는 Fig. 5(e)를 x축 방향에 대해 실제적으로 적분한 결과이며, Fig. 5(g)는 동일 고유진동수에서의 ESPI의 실험결과로써 간섭부리가 전자전단간섭계의 경우와 다르게 나타났지만 3-D Plot은 Fig. 5(f)에서와 같이 동일하게 나타났다. 또한 Fig. 6은 Fig. 5의 경



(f) 3 D plot for vibration amplitude of a plate



(g) Mode shape by ESPI method

Fig. 6 Y-axis shearing fringes and 3 D plot when a plate was excited at a frequency of 1090 Hz

우와 동일한 주파수에 대하여 y축 방향의 전단에 대한 실험결과를 보여주고 있다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 각각의 전단방향에 따른 간섭무늬의 형태가 매우 다르게 나타나지만 정량화와 적분과정을 통하여 얻어진 3-D plot은 Fig. 5(f)와 Fig. 6(f)에서 진동모드형태와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각의 고유진동수에서의 ESPI에

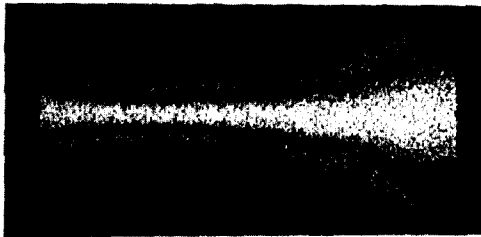
의한 실험결과와 x축 그리고 y축 방향으로 전단한 경우의 간섭무늬의 실험결과를 나타낸 것들이다. 또한 Fig. 9에서는 ESPI에 의한 방법과 y축 방향에 대한 실험결과만 나타나 있는데, 이는 x축 방향으로 진폭 변화율이 0인 모드형태이기 때문에 이 방향으로의 간섭무늬가 나타나지 않기 때문이다.



(a) Mode shape by ESPI method



(b) From X-axis shearing

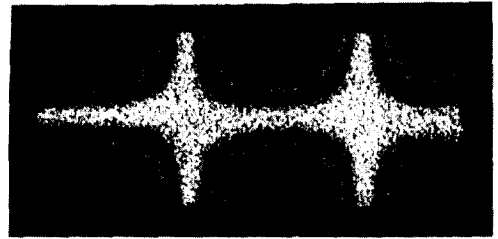


(c) From Y axis shearing

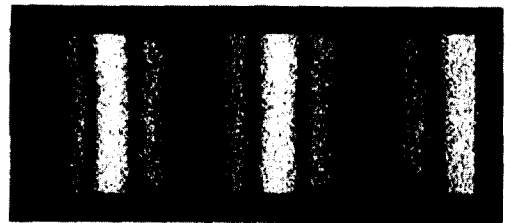
Fig. 7 Fringe patterns observed when a cantilever plate was excited at a frequency of 343 Hz



(a) Mode shape by ESPI method

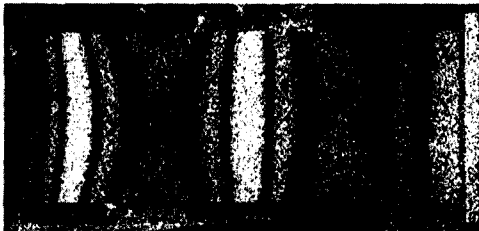


(b) From X axis shearing



(c) From Y axis shearing

Fig. 8 Fringe patterns observed when a cantilever plate was excited at a frequency of 2005 Hz



(a) Mode shape by ESPI method



(b) From Y axis shearing

Fig. 9 Fringe patterns observed when a cantilever plate was excited at a frequency of 1142 Hz

6. 결 론

본 연구는 외부 진동에 민감한 간섭계인 ESPI로는 산업현장에서 진동측정시 어려움이 있으므로, 외란과 외부 진동에 둔감한 전자전단간섭계를 이용하여 진동모드와 정량화를 수행하여 민형량의 계측이 가능함을 보였다. 실제 본 실험에서 ESPI를 이용하여 진동 모드를 측정할 때는 외란의 영향이 많아서 좋은 질의 간섭무늬를 생성하기 위해 광학테이플을 사용하여 방진시킨 후 측정을 다였고, 전자전단간섭계를 이용할 때는 광학테이플을 사용하지 않고 일반테이플에서 측정을 수행하였다. 이것으로써 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있었다.

(1) 전자전단간섭계를 구성하여 피실험 물체를 대상으로 진동계측실험을 행하여, μm 단위의 진동진폭과 모드형태를 계측할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 제작된 전자전단간섭계의 시스템은 거울의 기울어짐 양을 조절하여 광학계의 민감도를 조절할 수 있기 때문에 보다 큰 진폭 변형의 계측에도 사용 가능하였다.

(3) 본 시스템의 신뢰성을 높이기 위하여 ESPI를 이용한 계측결과와 비교 검토한 결과 잘 일치함을 알았다.

(4) 또한 전자전단간섭계 시스템에 사용된 소프트웨어를 자체 개발하여 본 실험을 통해 성능평가를 하여 안정성과 신뢰성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호: 961-1002-013-2)에 의해서 수행된 연구결과에 일부로서 관계자 여러분께 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

(1) Jones, R. and Wykes, C., 1989, "Holographic

and Speckle Interferometry," 2nd ed. Cambridge University Press, pp. 122~164.

(2) 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, pp. 104~111.

(3) Joenathan, C., 1991, "Vibration Fringe by Phase Stepping on an Electronic Speckle Pattern Interferometer," *Applied Optics*, Vol. 30, No. 32, pp. 4658~4665.

(4) Pryputniewicz, R. J., 1992, "Electronic Shearography and Electronic Holography Working Side by Side," *SPIE*, Vol. 1821, pp. 27~37.

(5) Giancarrio Pedrini and Hans J. Tiziani, 1994, "Double pulse Electronic Speckle Interferometry for Vibration Analysis," *Applied Optics*, Vol. 33, No. 34, pp. 7857~7863.

(6) Pryputniewicz, R. J. and Stetson, K. A., 1989, "Measurement of Vibration Patterns Using Electro optic Holography," *SPIE*, Vol. 1162, pp. 435~447.

(7) Krishna Mohan, N. Saldner, H. O. and Molin, N. E., 1993, "Electronic Shearography Applied to Static and Vibrating Objects," *Optics Communications*, Vol. 108, pp. 197~202.

(8) 강영준, 최정집, 1996, "시간평균 ESPI를 이용한 진동물체의 모드형태의 계측," 한국정밀공학회지, 제13권, 제2호, pp. 84~93.

(9) 최정집, 강영준, 1996, "전자광학적 홀로그래피 간섭법을 이용한 진동물체의 모드형태 계측법," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제2호, pp. 564~574.