

진동 모우드 형태 계측을 위한 전자 전단간섭계의 개발

DEVELOPMENT OF THE ELECTRONIC SHEAROGRAPHY FOR MEASURING THE VIBRATION MODE SHAPES

최장섭^{*}, 강영준^{**}, 백성훈, 김철중^{***}

Jang-Seob Choi^{*}, Young-June Kang^{**}, Sung-Hoon Baik, Cheol-Jung Kim^{***}

(全北大學校 大學阮)

(韓國原子力研究所)

ABSTRACT

This paper describes the measuring method of vibration mode shapes by the Electronic Shearography. Shearographic interferometer has many merits in practical use, that is, low sensitive to the environmental noisy, low limit of the coherent-length and simple optical configuration etc.. 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. As a results of application to a simple cantilever plate vibration amplitude fields were obtained by the proper integration technique, and their experimental results were in good agreement with those of the ESPI experiment.

1. 서론

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)는 구조물의 고유 진동수에서의 모우드 형태(Mode Shape)를 가시화하는 유용한 방법으로 사용되고 있다. 즉 간섭무늬의 기록과 재생에서 화상처리장치(Image Processing system)를 사용함으로써 물체의 변형을 실시간 적으로 관찰할 수 있기 때문에 손쉽게 산업현장과 접속할 수 있게 된 것이다. 더구나 시간 평균법에 의한 계측 방법은 베셀함수형 간섭무늬를 만들어내므로 직접적으로 물체의 모우드 형태를 관찰할 수 있는 잇점이 있다. 그러나 ESPI 기법 역시 홀로그래픽 간섭법(Holographic Interferometry)과 마찬가지로 주위의 진동이나 공기 유동과 같은 환경적인 영향에 매우 민감하여 때때로 측정 자체가 불가능한 경우도 발생한다. 이는 ESPI 광학계의 구성상 발생하는 문제이기 때문에 본질적인 해결방법은 없다고 하겠다. 따라서 위의 단점을 극복할 수 있는 하나의 방법은 광학계를 달리 구성함으로써 환경적인 영향을 배제하는 것이다. 현재 간섭원리를 이용한 계측기법 중 환경적인 영향에 덜 민감하다고 알려진 광학계는 스페클을 전단 간섭계(Speckle Shearing Interferometer)이다. 이 간섭계는 시험 물체의 면외변위의 기울기를 계측하는 기법으로써 광학계의 구성상 주위 환경의 영향을 거의 받지 않으므로 ESPI 기법이 적용될 수 없는 곳에 손쉽게 적용될 수 있으며 광학계의 구성이 간단하고 사용되는 레이저의 가간섭 거리도 그리 길지

않아도 되기 때문에 경제적인 방법이라고 할 수 있다. 또한 전단량을 조절하는 것이 가능하므로 ESPI에서는 불가능한 보다 큰 변위량의 계측이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 환경적인 영향에 상대적으로 덜 민감한 스페클 전단 간섭계를 이용한 계측방법에 관하여 연구하였다. 마이켈슨형의 면외변위(Out-Of Plane) shearing 간섭계를 구성하고 화상처리장치를 이용하여 컴퓨터와 접속함으로써 Electronic Shearography 장치를 제작하여 변형의 구배 미분 값을 얻은 후 이를 전단 방향에 대해 수치 적분함으로써 ESPI의 경우와 같이 물체의 고유 진동수에 따른 실제적인 모우드 형태를 관찰할 수 있음을 보였다.

2. Shearography의 원리

아래의 Fig.1과 같은 광학계를 보자. 광원 U_0 가 물체면을 조사하고 여기에서 산란된 빛이 광분할기(Beam Splitter)를 통하여 광학계에 입사한다. 입사된 빛은 BS에서 각각 두개의 광경로(Optical Path)로 나누어진다. 한 줄기는 입사광에 수직하게 놓여있는 M_1 (Mirror)에서 다시 반사되고 BS를 거쳐 상면(Image Plane)에서상을 맺는다. 그리고 다른 하나의 줄기는 입사광과 수직한 방향에 대해 α 만큼 경사지게 설치되어 있는 M_2 (Mirror)에서 반사된다. 따라서 M_2 에서 반사되는 빛이 L(Lens)을 거쳐 상면에서상을 맺게 될 때, 이 M_2 에 의하여 맺어진 상은 M_1 에 의해 맺힌 상과 일치하지 않고 M_2 의 경사각 α 에 의하여 S_2 만큼 전단 되어 나타난다.

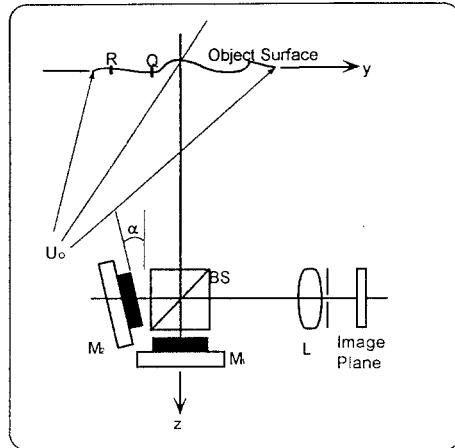


Fig. 1 A basic configuration of shearing interferometer

따라서 물체면의 임의점 Q는 전단 간섭계를 통하여 상면에서 두개의 점으로 나타나게 된다. 그러나 실제로 두개의 상이 서로 전단 되어 있기 때문에 두개의 점 Q는 일치되어 나타나지 않고 거리 S_2 만큼 떨어져 나타나고 대신 실제 물체에서 Q 점과 S_2 만큼 떨어져 있는 점 R이 Q와 중첩되어 나타나게 된다. 물체의 변형으로 인하여 물체면의 Q와 R이 각각 \vec{q}_z , \vec{r}_z 만큼 씩 변형되었다고 하면 이로 인한 광원의 위상 변화는 다음 식과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{q}_z - \vec{r}_z) \quad (1)$$

여기서, \vec{n}_o : 조사 방향을 나타내는 단위벡터
 \vec{n}_s : 관측 방향을 나타내는 단위벡터

단순화하기 위해 \vec{n}_o 와 \vec{n}_s 가 서로 직각이고, $D_z = \vec{q}_z - \vec{r}_z$

이라 하면 D_z 는 테일러 정리(Taylor Theorem)를 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$D_z = f(Q) - f(R) \\ = \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\Delta y}{1!} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \frac{(\Delta y)^2}{2!} \dots \quad (2)$$

Δy 는 상면에서 S_2 와 같고 이 값은 충분히 작기 때문에 위의 식에서 2차 이상의 고차 항을 무시할 수 있다. 결과적으로 식 (1)은 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) S_2 \quad (3)$$

따라서 나타나는 간섭무늬는 $\partial f / \partial y$ 의 값이 일정한 등고선 (contour)을 나타낸다. 다시 말해 전단 방향 y에 대한 물체의 면외 변위 f의 1차 미분값이 일정한 간섭무늬가 보여진다. 또한 M_2 의 경사각에 의해 S_2 가 변경될 수 있으므로 전단 방향뿐만 아니라 광학계의 민감도를 간단히 바꿀 수도 있다.⁽¹⁾

3. Electronic Shearography■ 이용한 진동 계측

Electronic Shearography(ES)를 이용한 진동 계측 방법은 그 이론적 배경으로써 Electro-Optic Holographic Interferometry(E-O HI)에 근거한다.^(2,3) 이 방법은 시간 평균법(time average method)을 이용하여 베셀함수형 간섭무늬를 얻고, 여기에 간섭무늬 이동 기법(fringe shifting method)을 도입하여 변형량을 정량화 하는 방법이다. 본 이론을 ES에 도입하기 위해서 2개의 광경로에 대해 한쪽 빔은 위상 이동(phase stepping)을 그리고 다른 한쪽 빔은 위상 변조(phase modulation) 시킨다. 즉 정적인 변위의 계측에 있어서는 단지 한쪽 빔의 위상만을 변경시킴으로써 정량적인 해석이 가능하나 진동으로 인한 동적인 변형의 경우에는 나타나는 간섭무늬의 형태가 다를 뿐만 아니라 위상 이동만으로는 간섭무늬의 이동 효과를 가져올 수 없기 때문에 E-O HI이론에서는 다른 쪽 빔을 물체와 동일한 주파수로 진동시키고 그 진폭을 변경함으로써 간섭무늬를 이동시킨다. 즉, 시간 평균법에 의해 작성된 간섭무늬는 다음 식으로 표현되는 강도 분포를 갖는다.

$$I_N(x, y) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\phi(x, y) + \phi_N) J_0[\Omega(x, y)] \quad N=0..3 \quad (4)$$

위의 식에서 A는 빔의 진폭을 나타내며 $\Delta\phi$ 는 두 빔의 경로 차에 의한 불규칙 위상을 그리고 ϕ 는 한쪽 빔의 위상 이동시 변경된 양을 나타낸다. J_0 는 제 1종 0차 베셀함수로써 식 (4)에서와 같이 시간 평균법으로 작성되는 간섭무늬의 패턴은 베셀함수의 형태를 따른다. 또한 $\Omega(x, y)$ 는 간섭무늬의 궤적함수(fringe locus function)라고 하며 물체의 변형에 따른 간섭무늬의 위치를 나타낸다. 위의 식 (4)는 배경 노이즈와 불규칙 위상에 의한 노이즈로 인하여 간섭무늬가 제대

로 관찰되지 않는다. 때문에 4 frame 위상 이동 기법^[4]을 이용하면 배경 노이즈와 불규칙 위상에 의한 노이즈가 제거된 아래의 식으로 표현되는 간섭무늬를 얻을 수 있다.

$$I_{out}(x, y) = (I_0 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2 = J_0^2[\Omega(x, y)] \quad (5)$$

위의 식 (5)로 표시되는 간섭무늬는 진동으로 인한 진폭의 기울기에 대응되는 등고선과 같다. 광학계를 면외 변위(Out-of Plane Displacement) 구성으로 하고 전단 방향을 x축으로 하면 간섭무늬 궤적함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

위의 식에서 λ 는 광학계에 사용되는 광원의 파장이고, Δx 는 전단량을 나타내므로 위의 식에서 간섭무늬 궤적함수를 구하면 역을 전단 방향에 대한 물체의 진폭 변화율을 구해낼 수 있다. 따라서 물체의 전폭 기울기를 구하게되면 이를 전단 방향에 대해 수치적분하여 실제의 진폭을 구할 수 있으므로 모우드 형태의 계측이 가능하다.

간섭무늬 궤적함수를 구하는 방법으로써 E-O HI에서는 3 frame 위상 이동법을 이용한다. 즉 위상 변조(Phase Modulation)에 의해 위치가 이동된 3개의 간섭무늬를 얻고 이를 이중 노출법에서 궤적함수를 구하는 식에 대입하여 간섭무늬 궤적함수를 구하고 이에 따른 오차를 보정해 주는 것이다.^[2] 위상 변조법을 이용하여 간섭무늬의 위치가 각각 $0, +\pi/3, -\pi/3$ 만큼씩 이동된 3개의 간섭무늬를 얻으면 이로부터 궤적함수를 구할 수 있다. 즉,

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

이다. 위의 식에서 B는 위상 변조되는 빔의 진폭이고 $I_{h_1}, I_{h_2}, I_{h_3}$ 는 다음과 같다.

$$I_{h_1} = 16I_O I_R J_0^2(\Omega) \quad (8)$$

$$I_{h_2} = 16I_O I_R J_0^2(\Omega - B) \quad (9)$$

$$I_{h_3} = 16I_O I_R J_0^2(\Omega + B) \quad (10)$$

그러나 위의 식에서 구한 궤적함수는 J_0^2 과 \cos^2 의 차이 때

문에 오차가 존재하므로 오차를 보정해 주어야 정확한 진폭을 구할 수 있다. 이 오차는 임의의 Ω 와 B에 대한 표를 작성하여 계산할 수 있다. 즉 식 (8)~(10) 을 (7)에 직접대입하여 Ω 와 B에 대하여 수치해법적으로 계산함으로써 이의 결과와 Ω 를 표(Look Up Table)로 작성할 수 있다. 따라서 작성된 LUT를 이용하면 오차가 보정된 궤적함수를 구할 수 있게 된다.^[5]

4. 실험 장치와 실험 방법

4.1 실험 장치

본 연구에서 제작된 ES 시스템의 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다. 사용된 광원은 100mW급 frequency doubled CW Nd:YAG 레이저로써 레이저빔은 M₁(Mirror)과 SF(Spatial Filter)를 거친 후 물체면을 조사(illumination)하고 물체면에서 반사된 빛이 ES 시스템의 광학계로 입사한다. 입사된 빔은 BS(Beam Splitter)를 통하여 2개의 빔으로 나누어진 후 한쪽 빔은 PZT1 (Piezoelectric Transducer)에서 위상 이동(phase stepping)되고 다른 쪽 빔은 물체의 진동수와 동일한 진동수로 진동하는 PZT2에서 위상 변조된다. 각각의 위상 이동되고 위상 변조된 빔이 다시 BS를 거쳐 CCD카메라의 광센서로 들어오게 된다. 여기에서 두 빔의 간섭으로 인한 정보가 전기적인 신호로 바뀌고 화상처리 장치를 통해 모니터에 나타난다.

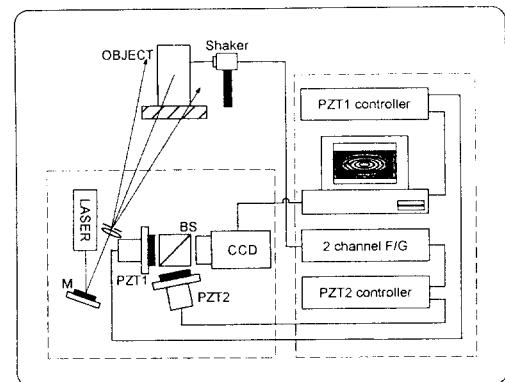


Fig. 2 Electronic Shearography configuration

4.2 노이즈 제거

위의 과정을 거쳐 나타나는 간섭무늬는 비록 위상 이동법을 이용하여 배경노이즈와 불규칙 위상을 제거하였다고는 하나 스펙클 노이즈와 전기적인 노이즈로 인하여 간섭무늬의

가시도(visibility)가 그리 좋지 않다. 따라서 이러한 노이즈를 제거해 주어야 나중에 정량화 과정에서 오차가 발생하지 않게 된다. 물리적으로 스페클의 크기는 광학계의 F#와 관련되어 있다. F#가 작은 경우에는 스페클의 크기가 커지게 되어 두 빔간에 간섭이 잘 일어나지만 나중에 스페클 노이즈가 매우 심하게 된다. 따라서 적당한 F#는 스페클 노이즈를 더욱 줄일 수 있어 간섭무늬의 가시도를 향상시킬 수 있다. 아래 Fig.3은 3개의 F#에 따른 간섭무늬를 나타낸 것이다. 아래의 그림에서 명확히 알 수 있듯이 본 연구에서는 F#를 5.6으로 하여 실험을 수행하였다.

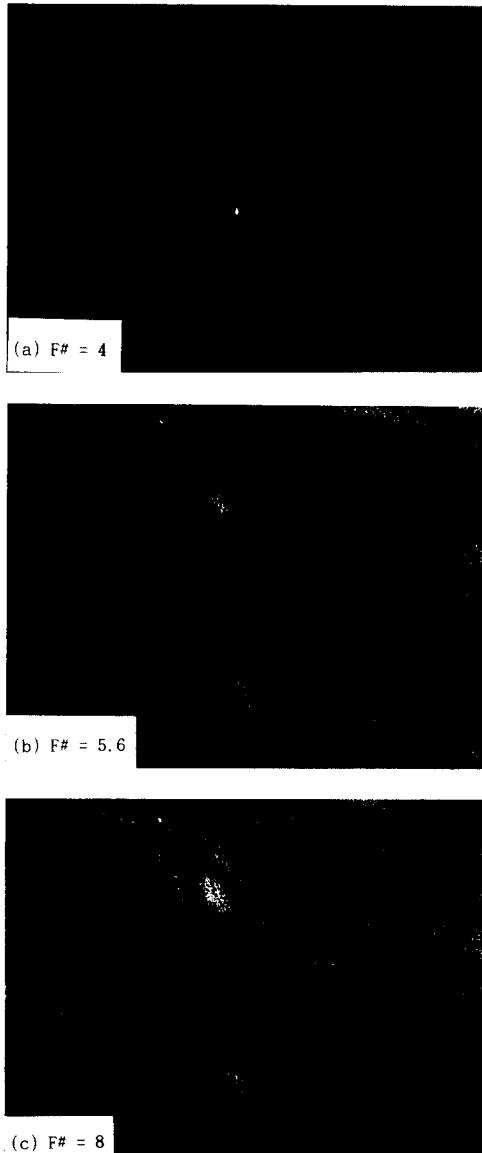


Fig.3 Fringe pattern according to F#

또한 frame averaging 방법을 이용하여 시간에 따라 변화하는 노이즈성분을 상당량 제거하였는데 본 방법은 동일한 조건에서 간섭무늬를 연속적으로 수 개 더한 후 이를 평균하는 방법이다. 이 방법은 frame의 가산과 평균에 상당 시간이 소요되므로 노이즈의 제거효과와 시간을 감안하여 가산 회수를 정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 아래의 Fig.4와 같이 가산 회수에 따른 0차 간섭무늬의 contrast 값을 계산한 결과 가산 회수를 30으로 하는 것이 가장 적당함을 알았다.

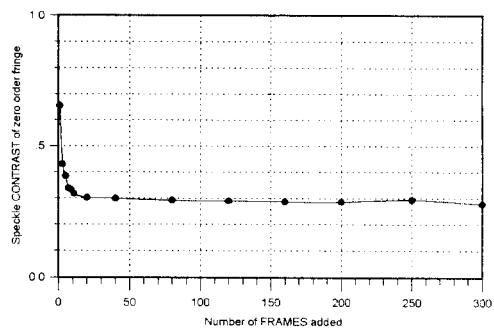


Fig.4 Effect of frame averaging

4.3 정량적 해석

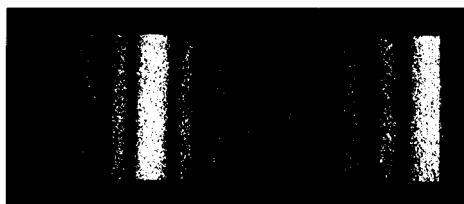
위의 식 (7)로부터 계산된 궤적함수는 \arctan 함수의 불연속성 때문에 그 값이 $-\pi/2$ 에서 $+\pi/2$ 사이의 값을 갖는 톱니파 형태의 반복적인 값들을 갖게 되므로 이를 $0 \sim \pi$ 의 범위로 정규화 하여야 한다. 이러한 정규화 과정을 거치면 변형에 대한 정보가 연속적인 grey level로 나타나는 unwrapped image를 얻을 수 있고 이 결과로부터 위의 식 (6)을 이용하여 진폭기울기의 값을 정량적으로 계산할 수 있다.

또한 unwrapped image에 대하여 각각의 전단 방향에 대하여 적분을 수행하면 실제의 진동으로 인한 모우드 형태를 얻을 수 있다. 즉 임의 기준점을 중심으로 전단 방향으로 grey level값들을 가산하고 이를 $0 \sim 255$ 의 범위로 정규화 함으로써 적분을 수행하였다.

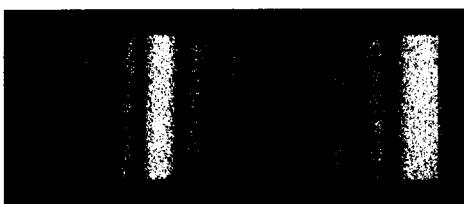
5. 실험결과

본 연구에서 제작된 Electronic Shearography 시스템을 시험하기 위해 두랄루민 6061을 사용하여 가로 390mm, 세로 150mm 그리고 두께가 12mm인 평판을 제작하여 한쪽 변을 완전히 고정한 외팔보로 하여 실험을 행하였다. 실험은 x축과 y축에 대하여 각각 20mm와 15mm의 전단량을 주어 각각의 고

유 진동수를 찾고 이에 따른 간섭무늬를 얻은 후 정량화를 수행하였다. 또한 적분한 결과의 정확성을 검증하기 위해 ESPI를 이용한 실험결과와 비교하였다. 아래의 Fig.5는 1090Hz의 고유진동수에서 x축 방향의 전단에 대한 실험결과로써 (a)는 빔에 위상 변조를 가하지 않은 순수한 시간 평균 간섭무늬이고 (b)는 (a)와 동일한 주파수이나 빔에 진폭 B의 위상 변조를 가한 결과이며 (c)는 역시 (a)와 동일한 주파수이나 -B의 위상 변조를 가한 간섭무늬이다. 3개의 그림에서 알 수 있듯이 위상 변조를 통하여 간섭무늬의 위치가 약간씩 이동하였음을 알 수 있다. 이 3개의 간섭무늬들로부터 궤적 합수를 구하고 오차를 보정한 결과가 (d)에 나타나 있다. (e)는 (d)를 화상처리와 수치적 계산을 통하여 정량화한 결과이다. 또한 (f)는 (e)를 x축 방향에 대해 실제적으로 적분한 결과이이며 (g)는 동일 고유 진동수에서의 ESPI의 실험결과로써 ES에 의한 실험 결과와 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한 Fig.6 은 Fig.5 의 경우와 동일한 주파수에 대하여 y축 방향의 전단에 대한 실험결과를 보여 주고 있다. Fig.5 와 Fig.6 으로부터 각각의 전단 방향에 따른 간섭무늬의 형태가 매우 다르게 나타나지만 정량화와 적분과정을 통하여 원래의 진동 모우드 형태와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. Fig.7 과 Fig.8 은 각각의 고유진동수에서의 ESPI에 의한 실험결과와 x축 그리고 y축 방향으로 shearing한 경우의 실험결과를 나타낸 것으로 결과들이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig.9에서는 y축 방향에대한 실험 결과만인 나타나 있는데 이는 x축 방향으로 진폭 변화율이 0인 모우드 형태이기 때문에 이 방향으로의 간섭무늬가 나타나지 않기 때문이다.



(a) No phase modulation



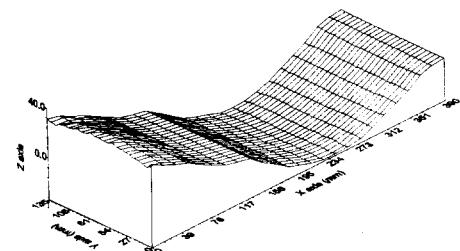
(b) +B phase modulation



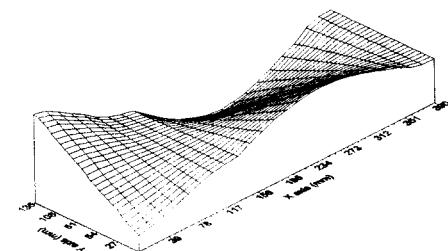
(c) +B phase modulation



(d) Unwrapped image



(e) 3-D plot of vibration gradients

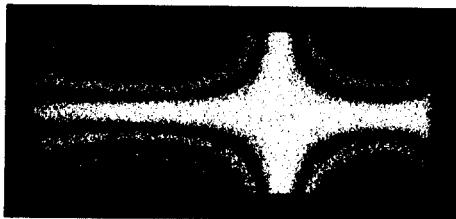


(f) 3-D plot of vibration amplitude

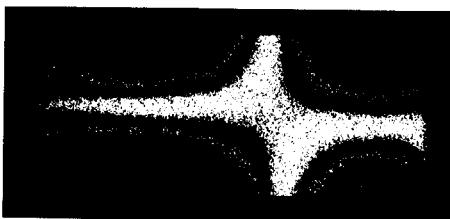


(g) mode shape by ESPI method

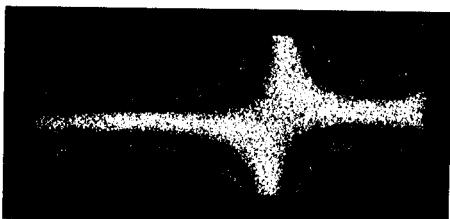
Fig. 5 From X-axis shearing at 1090Hz



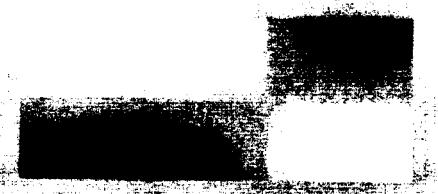
(a) No phase modulation



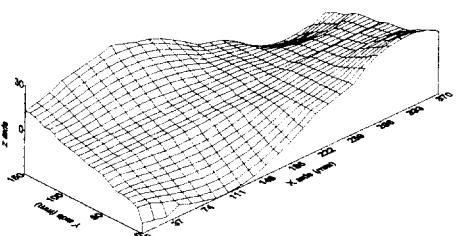
(b) -B phase modulation



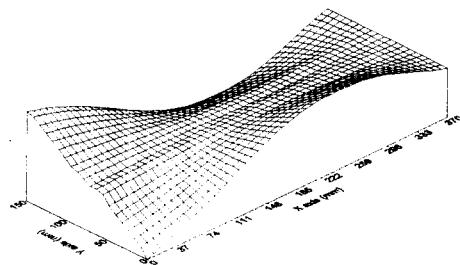
(c) +B phase modulation



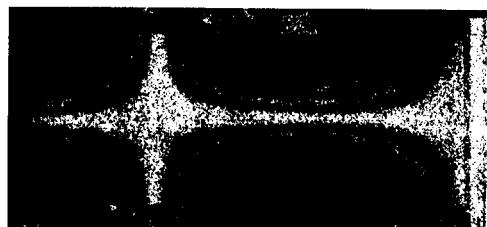
(d) Unwrapped image



(e) 3-D plot of vibration gradients



(f) 3-D plot of vibration amplitude

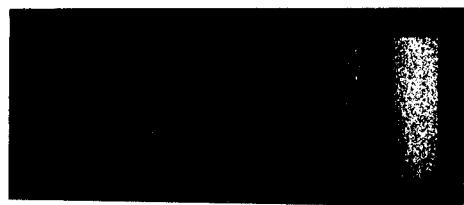


(g) mode shape by ESPI method

Fig. 6 From Y-axis shearing at 1090Hz



(a) mode shape by ESPI method

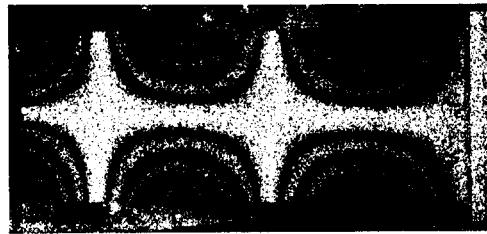


(b) from X-axis shearing

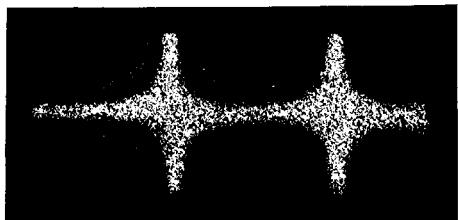


(c) from Y-axis shearing

Fig. 7 Cantilever plate vibrating at 343Hz



(a) mode shape by ESPI method

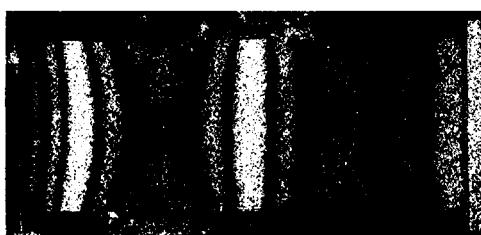


(b) from X-axis shearing

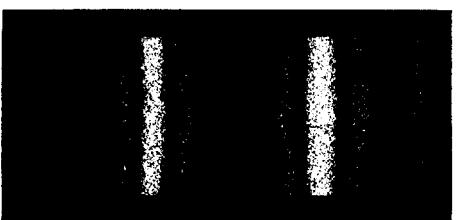


(c) from Y-axis shearing

Fig. 8 Cantilever plate vibrating at 2005Hz



(a) mode shape by ESPI method



(b) from Y-axis shearing

Fig. 9 Cantilever plate vibrating at 1142Hz

6. 결론

본 연구는 Electronic Shearography를 이용한 진동 계측에 관한 연구로써 주위 환경에 덜 민감한 Shearography의 특징을 이용하여 ESPI로는 측정 불가능한 상황에서 변형량의 계측이 가능함을 보인 것으로써 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) Electronic Shearography를 구성하여 피실험 물체를 대상으로 진동 계측실험을 행하여 구성된 시스템의 성능을 평가하였다.
- (2) 본 연구에서 제작된 ES 시스템은 거울의 기울어짐 량을 조절하여 광학계의 민감도를 조절할 수 있기 때문에 보다 큰 진폭 변형의 계측이 가능하였다.
- (3) 본 시스템을 사용하여 얻은 결과와 ESPI를 이용한 계측 결과와 비교함으로써 본 연구방법에 정확성을 기하였다.

따라서 ESPI 시스템을 적용하기에 까다로운 조건에서도 본 방법을 이용함으로써 진동 물체의 모우드 형태를 계측할 수 있음을 알았다. 실제로 본 연구에서 얻은 결과는 진동 절연된 table이 아닌 일반 table위에서 진행되었고 또한 광학계의 F#가 크게 결정되었기 때문에 그에 따른 빛의 손실이 적으로므로 경제적인 방법이라고 할 수 있다.

7. 참고 문헌

- (1) R. Jones and C. Wykes, 1989, "Holographic and speckle interferometry", 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.
- (3) R. J. Pryputniewicz and K. A. Stetson, 1989, "MEASUREMENT OF VIBRATION PATTERNS USING ELECTRO-OPTIC HOLOGRAPHY", SPIE Vol. 1162,
- (4) 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.
- (5) 최장섭, 문상준, 강영준, 1995, "시간 평균 ESPI에 의한 진동 Mode Shape의 계측", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집.
- (6) P. A. Klumpp and E. Schnack, 1990, SHEAROGRAAMS WITH VARIABLE MEASUREMENT SENSITIVITY", Experimental Techniques, pp. 42-44