韓國精密工學會 '95年度 春季學術大會論文集 pp.308~313

시간평균 ESPI 에 의한 진동 MODE SHAPE 의 계측

MEASUREMENT OF THE VIBRATION MODE SHAPE USING THE TIME AVERAGE ESPI

崔 張 燮* · 姜 永 準 · 文 相 竣

Choi, Jang-Seob* · Kang, Young-June · Moon, Sang-Joon

(全北大學校 大學院) (全北大學校) (全北大學校 大學院)

ABSTRACT

Non-destructive inspection techniques using laser have been broading their application areas as well as growing their measurement skills together with the rapid development of circumferential technology like fiber optics and computer. The remarkable inspection technique using laser speckle, so-called ESPI is aleady on the stage of on-line testing with commercial products in other nations. Especially, this technique is expected to be applied to the nuclear industry, because it is proper for the vibration measurement and it can be applied to objects of a high temperature.

This paper describes the use of the ESPI system for measuring vibration patterns on the reflecting objects. Using this system, high-quality J_0 fringes for identifying mode shapes is displayed. A bias vibration is introduced into the reference beam to shift the J_0 fringes so that fringe shift algorithms can be used to determine vibration amplitude. Using this method, displacement fields for vibrating obejcts were obtained directly from the time-average interferograms recorded by the ESPI system.

1. 서론

거의 움직이는 모든 물체는 크고 작은 진동을 발생시키고 있다. 각종 기계류의 사용에 의한 산업진동은 말할 것도 없고 고밀도 주거건물에서의 단순한 일상 생활에 따른 활동 자체도 진동이 원인이 되어 이웃에 불쾌감을 줄 수 있다. 이와 같은 거시적인 문제를 유발하는 진동은 일반적으로 큰 진폭을 갖는 것이 사실이다. 그러나 진동문제는 반드시 큰 진폭의 진동에 의해서만 발생되는 것이 아니다. 정밀공작기계와 같은 정밀산업기계에서는 기계 가공에 수반되는 진동에 의해서 가공정밀도에 영향을 줄 뿐만아니라 기계수명과 안전가동에도 영향을 줄 수 있다. 이러한 구조물 또는 기계 부품의 진동특성에 대한 기존의 연구는 유한요소법으로 대표되는 해석적 방법의 경우, 경계조건과 재료의 성질에 대하여 정확히 알고 있어야만 한다. 또한 실험적 방법에서는 실험재료에 대하여 단지 수 개의 점들만을 대상으로 실험을 행하여, 이들 제한적인 결과를 가지고 전체의 동적인 거동을 예상하므로 한계가 있게 된다. 그러나 1965년 홀로그래픽 간섭법이 개발되어 시험물체 전체에 대하여 진동 특성을 가시적으로 검사 할 수 있는 길이 열리게 되었다. 이러한 목적을 위해 다양한 홀로그래픽 간섭계가 개발되었으며 그의 실험적이며 이론적인 정보가 계속 보고되고 있다. 그러나 홀로그래픽 간섭계의 느리고 복잡한 기록 및 재생과정은 홀로그래피를 이용한 진동 해석에 있어서 큰 난점이며, 특히 실시간 처리가 요구되는 산업 현장의 적용에 한계가 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 홀로그래픽 간섭계와 유사하나 기록 및 재생에 있어서 신속한 비디오 시스템을 사용하는 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) 를 이용하여 물체의 동적인 거동을 실시간으로 관측할 수 있는 시스템을 구성하며 또한 구성된 시스템에 위상이동법(phase shift method)을 도입하여 진동물체의 진폭을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 시간 평균 홀로그램의 해석

시간 평균 홀로그래픽 간섭계에 있어서 물체의 진동수에 대하여 비교적 긴 노출시간으로 홀로그램을 작성할 경우 물체의 각 점에서의 앙상블 평균에 해당하는 상(image)이 기록된다. 이러한 상을 재생하게 되면 밝기가 균등하지 않은 간섭무늬가 얻어진다.

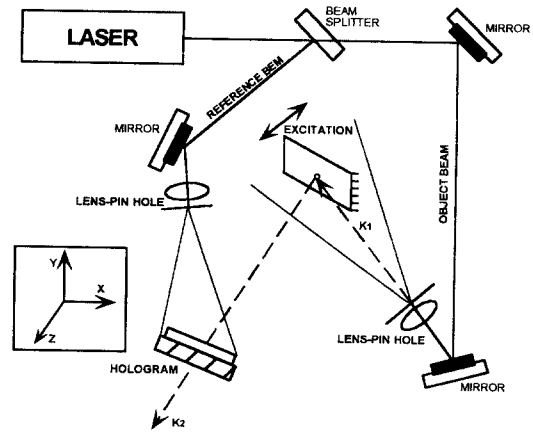


Fig. 1 A setup for recording and reconstruction of time average hologram

시간 평균 홀로그램은 보통 Fig. 1과 같은 광학계로 부터 기록될 수 있다. 임의의 시간 t 에서 홀로그램의 면 상에서의 광파 $\overrightarrow{F_h}(x, y, z, t)$ 는 다음과 같다.

$$\overrightarrow{F_h}(x, y, z, t) = A_o(x, y, z)\exp[\, i\phi_o(x, y, z) + i\Omega_t(x, y, z, t)] + A_r(x, y, z)\exp[\, i\phi_r(x, y, z)] \quad (1)$$

위의 식에서 A_o, ϕ_o 는 물체빔의 진폭과 위상을, A_r, ϕ_r 은 참

조빔의 진폭과 위상을 각각 나타내며 Ω_t 는 물체로부터 반사되는 빛의 시간에 따른 위상 변화를 나타낸다. 따라서 홀로그램면상에 기록되는 광파의 강도 $I_h(x,y,z,t)$ 는 $\overrightarrow{F_h}(x,y,z,t)$ 와 그의 공액파 $\overrightarrow{F_h^*}(x,y,z,t)$ 의 곱으로 표시된다. 즉,

$$\begin{aligned} I_h &= \overrightarrow{F_h}\cdot\overrightarrow{F_h^*} = [\ A_o\exp(i\phi_o+i\Omega_t)+A_r\exp(i\phi_r)] \\ &\quad\times[\ A_o\exp(-i\phi_o-i\Omega_t)+A_r\exp(-i\phi_r)] \qquad (2) \\ &= A_o^2+A_r^2+\overrightarrow{F_r}\overrightarrow{F_r^*}+\overrightarrow{F_r}\overrightarrow{F_r^*} \end{aligned}$$

위의 식에서 $\overrightarrow{F_r^*} = A_o\exp(i\phi_o+i\Omega_t)$, $\overrightarrow{F_r} = A_r\exp(i\phi_r)$ 이며 좌표부호 (x,y,z) 는 생략하였다. 따라서 T 시간 동안의 노출을 주었다면 홀로그램에 기록되는 상은 i_h 의 시간평균값이 될 것이다.

$$\frac{1}{T}\int_0^T I_h\,dt = A_o^2+A_r^2+\frac{1}{T}\overrightarrow{F_r}\int_0^T\overrightarrow{F_r^*}dt+\frac{1}{T}\overrightarrow{F_r^*}\int_0^T\overrightarrow{F_r}dt \quad (3)$$

위와 같이 만들어진 홀로그램이 참조빔의 조사에 의하여 재생된다고 하면 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F_r}\frac{1}{T}\int_0^T I_h\,dt = {} & A_o^2\overrightarrow{F_r}+A_r^2\overrightarrow{F_r}+A_r^2\exp(2i\phi_r)\frac{1}{T}\int_0^T\overrightarrow{F_r^*}dt \\ & +A_r^2\frac{1}{T}\int_0^T\overrightarrow{F_r}dt \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 우변의 첫번째와 두번째 항은 재생상의 배경밝기가 되며, 세번째 항은 공액상을 나타내고 마지막 네번째 항이 물체의 시간평균 변위에 비례하는 상을 만들어 낸다. 따라서 $\overrightarrow{F_r}$ 에 의하여 재생된 홀로그램은 $\overrightarrow{F_r}$ 의 시간평균에 비례하는 물체빔을 만들어 낸다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{1}{T}\int_0^T\overrightarrow{F_r}dt &= \frac{1}{T}\int_0^T A_o\exp(i\phi_o+i\Omega_t)dt \\ &= \overrightarrow{F_o}\frac{1}{T}\int_0^T\exp(i\Omega_t)dt \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에 나타나 있는 적분함수의 결과를 특성함수라고 하며 M_T 로 표시한다. 위의 적분의 결과는 제 1종 0차 베셀 함수, $J_0(|\Omega_t|)$ 이므로 시간평균 홀로그램에서는 베셀함수형 간섭무늬가 관찰되는 것이다.

Fig. 2 에서 보듯이, 이 간섭무늬는 0차 간섭무늬가 더 높은 차수의 간섭무늬와 비교하여 훨씬 더 큰 강도값을 갖는다. 따라서 진동 물체에 대하여 nodal point 가 직접적으로 나타나므로 진동 물체의 mode shape 을 쉽게 관찰할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 Ω 는,

$$|\Omega_t| = |K\cdot L_t| = |(K_2-K_1)\cdot L_t| \quad (6)$$

으로 표시된다. 위의 식에서 K_1 과 K_2 는 광학계에서 각각 조사방향과 관측 방향을 나타내는 벡터이며, L_t 는 물체의 시간에 따른 변위를 나타낸다. 그러므로 Ω 을 결정하게 되면 역으로 물체의 변위를 또한 계산 할 수 있게 된다.

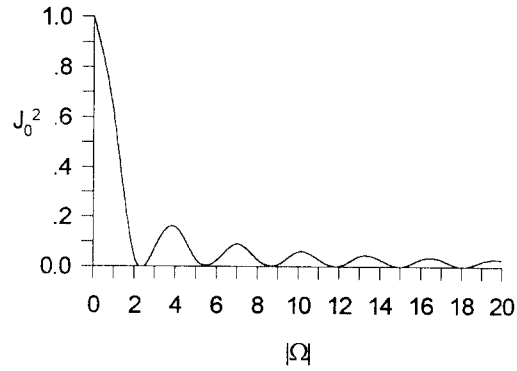


Fig. 2 Square of the first kind zero order Bessel function

3. 시간 평균 ESPI

3.1. 스페클(speckle)의 형성 원리

ESPI 의 측정 원리가 되는 스페클의 형성원리는 다음과 같다. 단색성이며 간섭성이 좋은 빛이 거친 표면에서 반사되거나 또는 굴절률이 일정하지 않은 매질을 통과할 때 고운 입자 형태의 밝고 어두운 점이 무질서한 분포를 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 스페클 패턴이라고 한다. 이 패턴은 물체 앞 또는 뒤에 초점을 맞추어도 여전히 볼 수 있으며 관찰자가 움직이면 물체면상에서 상대적으로 움직이며 반짝인다. 스페클 현상은 높은 간섭성을 지닌 빛의 고유 성질로서 홀로그래피를 비롯한 많은 물리적 현상에서 중요한 역할을 한다. 그림 3(a) 는 거친 표면에서 산란된 레이저 광에 의한 스페클 패턴의 사진이다. 스페클은 관찰점 근방으로부터의 간섭의 결과인데 그 물리적인 생성원인은 다음과 같다. 그림 3(b) 에서와 같은 계에서 레이저 빔이 물체면에 조사되면 제멋대로의 위상을 갖게 된다. 따라서 Q 점에서의 세기는 D 면에서 산란된 모든 빛의 중첩의 결과가 된다.

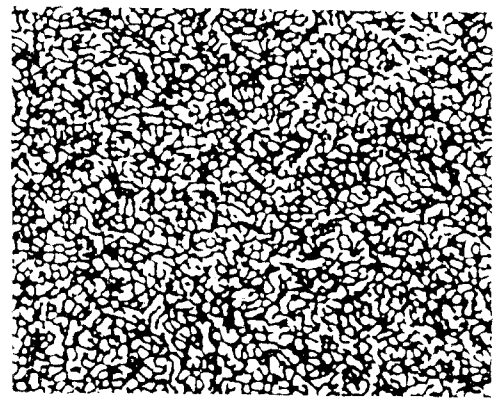


Fig. 3 (a) A laser speckle pattern

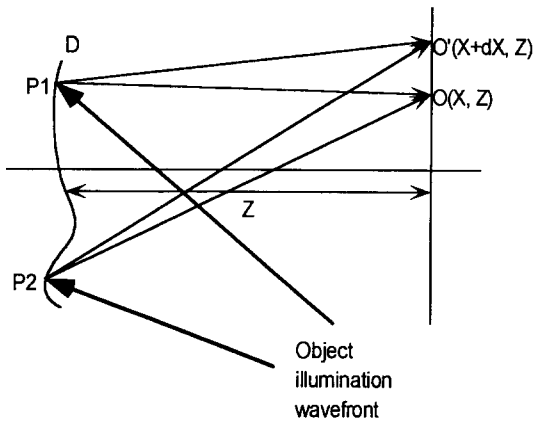


Fig. 3 (b) Formation of a speckle

이때의 분포변이를 객관적 스페클이라 하며 또한 조사면의 상이 형성될 때에도 제멋대로의 세기 변이를 보이는데 이것을 주관적 스페클이라고 한다. 즉 조사면의 각점은 빛을 흡수해서 다시 방출하는 것으로, Huygens-Fresnel 의 제 2 차파(secondary wave)와 흡사한 구면파원 처럼 생각될 수 있다. 따라서 공간의 임의 점에서 산란광의 복소 진폭은 산란면의 각점으로부터 기여되는 진폭의 합이 되는 것이다.

3.2. 진동 계측 이론

위의 그림 1 과 같은 광학계에서 홀로그램 대신 CCD 카메라를 기록 및 재생용으로 사용하게 될 경우 CCD 의 광센서에서의 빛의 강도 분포는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(x,y) = I_O(x,y) + I_R(x,y) + 2A_O(x,y)A_R(x,y) \times \cos[\,\Delta\phi(x,y)]\; M[\,\Omega(x,y)] \qquad (7)$$

식 (6)에서 I_O 와 A_O 는 물체빔의 강도와 진폭, I_R 과 A_R 는 참조빔의 강도와 진폭이며 $\Delta\phi$ 는 물체빔과 참조빔사이의 위상차이다. M 은 물체의 운동으로 인한 참조빔과 물체빔사이의 간섭을 변조시키는 특성 함수이며, Ω 는 간섭 무늬의 궤적 함수로써, 간섭무늬의 차수를 n 이라하면 $\Omega(x,y) = 2\pi \cdot n(x,y)$ 으로 표현된다. I 는 모니터의 밝기이므로 위의 식은 4개의 미지수를 포함하고 있다. 즉 두개 빔의 강도와 진폭, 위상차 그리고 궤적함수이다.

위의 식 (7)에서 스페클 노이즈인 $\Delta\phi$를 제거하기 위하여 참조빔에 대해 90° 씩 4번의 위상이동(phase stepping)을 실시하면 다음과 같은 4개의 식을 얻을 수 있다.

$$I_1 = I_O + I_R + 2A_OA_R\cos(\Delta\phi)M(\Omega) \qquad (8)$$

$$I_2 = I_O + I_R + 2A_OA_R\sin(\Delta\phi)M(\Omega) \qquad (9)$$

$$I_3 = I_O + I_R - 2A_OA_R\cos(\Delta\phi)M(\Omega) \qquad (10)$$

$$I_4 = I_O + I_R - 2A_OA_R\sin(\Delta\phi)M(\Omega) \qquad (11)$$

위의 식들로부터 (8)식에서 (10)식을 빼고 (9)식에서 (11)식을 빼어 제곱한후 더하면 $(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16I_OI_RM^2(\Omega)$ 을 얻을 수 있다. 만일 물체가 조화 진동을 하고 그 주기가 TV 의 노출 시간보다 훨씬 더 크다고 하면, 이 경우 특성함수 M 은 $M[\,\Omega(x,y)] = J_O[\,|\Omega(x,y)|]$ 즉, 제 1 종 0차 베셀 함수가 된다. 따라서,

$$(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16I_OI_RJ_0^{\,2}(\Omega) \qquad (12)$$

으로 쓸 수 있다. 시간 평균 홀로그램의 정량적 해석을 위해서는 간섭무늬의 궤적 함수 Ω 를 물체의 각 점에서 결정해야만 한다. Ω 을 구하기 위해 본 연구에서는 J_0 형 간섭 무늬를 이동시키는 기법을 이용하였다. 물체의 진동과 동일한 주파수와 위상으로 기준빔을 위상변조시키면 베셀함수형 간섭 무늬를 이동(shift)시키는 효과를 일으킬 수 있다. 기준빔을 B 의 크기로 진동시켰다고 하면,

$$M[\,\Omega(x,y), B] = J_0[\,|\Omega(x,y) - B|] \qquad (13)$$

으로 쓸 수 있다. 그러므로 식 (13)으로부터 식 (12)를 다시 쓰면 $[\,I_1 - I_3]^{\,2} + [\,I_2 - I_4]^{\,2} = 16I_OI_RJ_0^{\,2}[\,|\Omega - B|]$ 이 된다. 또한 일반적인 시간 평균 홀로그램은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_h(x,y) = I_a(x,y) + I_m(x,y)J_0^2[\,|\Omega(x,y) - B|] \qquad (14)$$

여기서 I_a 는 산란된 빛에 의한 배경 강도이며, I_m 은 최대의 강도를 나타낸다. 따라서, 식 (13)은 식 (14) 의 특수한 경우가 된다. 그러나 베셀함수는 인자들(arguments)의 직접적인 분리가 불가능하기 때문에 직접적으로 Ω을 구할 수는 없다. 따라서 진동의 정량적인 평가를 위해서는 추가적인 기법이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 베셀함수의 거의 주기적인 성질을 이용하여 Ω 에 대한 근사적인 해를 구하도록 하였다. 즉, 이중 노출 홀로그래피에 의해 작성되는 홀로그램의 강도분포를 나타내는 식이 위의 식 (15)와 유사하다는 성질을 이용하였다.

일반적인 이중노출 홀로그램으로부터 재생되는 상의 강도분포는 다음과 같다.

$$I'_h(x,y) = I_a(x,y) + I_m(x,y)\cos^2[\,\Omega'(x,y) - B] \qquad (15)$$

여기서 미지수는 I_a, I_m, Ω'이며 I'_h 는 모니터 화소의 밝기 정보로 알 수 있는 양이다. 또한 ' 은 시간평균의 경우와 구별하기 위한 표시이다. 식 (15)는 단지 J_0^2 이 $\cos^2$ 으로 대체된 것이지만 식 (14)와는 달리 인자들의 분리가 가능해 진다. 즉, 위의 식 (15)는 $I_a'(x,y) = I_a(x,y) + I_m(x,y)/2$ 이고 $I_m'(x,y) = I_m(x,y)/2$ 라고 하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$I_h'(x,y) = I_a'(x,y) + I_m'(x,y)\cos[\,2\Omega'(x,y) - 2B] \qquad (16)$$

식 (16)로 부터 기준빔의 변조정도를 나타내는 B의 값을 변경시켜 가며 홀로그램을 작성하면, 각각 아래의 식들로 표시될 수 있는 3개의 새로운 상(image)을 얻어 낼 수 있다.

$$I_{h1}'(x,y) = I_a'(x,y) + I_m'(x,y)\cos[\ 2\Omega'(x,y)] \quad (17)$$

$$I_{h2}'(x,y) = I_a'(x,y) + I_m'(x,y)\cos[\ 2\Omega'(x,y) - 2B] \quad (18)$$

$$I_{h3}'(x,y) = I_a'(x,y) + I_m'(x,y)\cos[\ 2\Omega'(x,y) + 2B] \quad (19)$$

위의 3 개의 식을 Ω'에 대하여 풀면,

$$\Omega'(x,y) = \frac{1}{2}\tan^{-1}[\ (\frac{1-\cos 2B}{\sin 2B})\frac{I_{h_3}' - I_{h_2}'}{2I_{h_1}' - I_{h_2}' - I_{h_3}'}\ ] \quad (20)$$

이 되므로 궤적함수를 결정할 수 있다. 위의 결과를 시간평균 간섭계에 적용하면 다음과 같다.

$$\Omega''(x,y) = \frac{1}{2}\tan^{-1}[\ (\frac{1-\cos 2B}{\sin 2B})\frac{I_{h_3} - I_{h_2}}{2I_{h_1} - I_{h_2} - I_{h_3}}\ ] \quad (21)$$

여기서 $I_{h1}(x,y)$, $I_{h2}(x,y)$, $I_{h3}(x,y)$ 는 다음과 같다.

$$I_{h1} = 16 I_O I_R J_0^2(2\Omega) \quad (22)$$

$$I_{h2} = 16 I_O I_R J_0^2(2\Omega - 2B) \quad (23)$$

$$I_{h3} = 16 I_O I_R J_0^2(2\Omega + 2B) \quad (24)$$

따라서 물체의 진폭정보인 궤적 함수, $\Omega''(x,y)$을 구할 수 있다. 그러나 J_0^2 와 $\cos^2$ 의 차이 때문에 오차가 존재한다. 따라서 이러한 오차를 보정해 주어야 정확한 진폭을 구할 수 있다. 오차가 보정되면 진폭은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}\Omega(x,y) &= \vec{K}A(x,y) \\ &= \frac{2\pi(\vec{k_2} - \vec{k_1})}{\lambda}A(x,y)\end{aligned} \quad (25)$$

위의 식에서 $\vec{K}$ 는 광학계의 민감도 벡터, A(x,y) 는 물체의 진폭 그리고 λ 는 광학계에 사용된 레이저의 파장이다.

3.3 오차의 보정

위의 식 (22)~(24)를 식 (21)에 직접 대입하면 I_O, I_R 은 소거되므로 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Omega''(x,y) = \frac{1}{2}\tan^{-1}[\ \frac{1-\cos 2B}{\sin 2B} \times \frac{J_0^2[\ |\Omega+B|\ ] - J_0^2[\ |\Omega-B|\ ]}{2J_0^2[\ |\Omega|\ ] - J_0^2[\ |\Omega-B|\ ] - J_0^2[\ |\Omega+B|\ ]}\ ] \quad (25)$$

식 (25)에서 임의의 B 에 대하여 Ω 을 대입하면 Ω'' 을 직접계산할 수 있으므로 일정한 범위에 대하여 Ω 대 Ω'' 을 표(Look Up Table)로 작성할 수 있다. 따라서 식 (21)로 부터 계산된 Ω'' 에 대해 위에서 작성된 LUT 를 적용하면 오차가 제거된 Ω 을 구할 수 있다.

4.실험 장치와 실험 방법

본 실험에서 사용된 ESPI 장치가 그림 4 에 나타나 있다. 레이저빔은 BS1 에 의해 참조빔과 물체빔으로 나뉘어 진다. 참조빔의 진행방향에는 위상이동을 위하여 PZT (Piezoelectric Transducer) 를 부착하여 참조빔에 90° 씩의 위상이동을 주도록 하였다. 그리고 다음에 EOM(Elecro-Optic Modulator) 를 설치하였는데 이것은 앞에서 언급한 바처럼 물체와 동일한 주파수와 위상으로 참조빔을 진동시키기 위한 것이다. 또한 two channel synthesizer 를 통해 2개의 동일 주파수와 위상을 갖는 정현파를 발생시켜 그중 하나는 shaker 를 통해 물체를 고유진동수로 가진 시키는데 사용하고, 다른 하나는 EOM controller 로 입력하여 참조빔을 진동시키는데 사용하였다. 물체빔은 M3 를 통해 반사된 후 물체를 조사하고 여기서 산란된 빛이 BS2 를 통하여 CCD 카메라로 들어오게 된다. 여기서 참조빔과 만나 간섭을 일으키게 되어 물체의 변형에 따른 정보가 빛의 강도 분포의 형태로 기록 된다. 4번의 위상이동으로 기록된 각각의 상은 화상처리 장치를 통하여 메모리에 기억되고 노이즈 제거기법이 적용된 후에 모니터에 나타나도록 하였다. 따라서 주파수를 변경시켜 가며 각각의 고유 진동수에 대한 물체의 변형을 실시간으로 관찰할 수 있었다. 일단 고유진동모드가 관찰되면 진폭을 구하기 위해 EOM 을 적용할 수 있다.

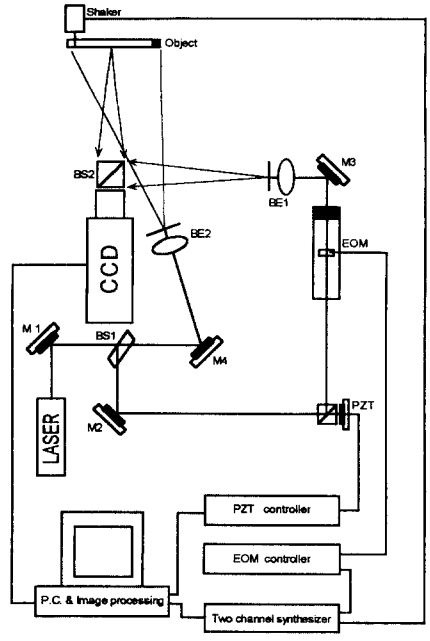


Fig.4 ESPI system configuration

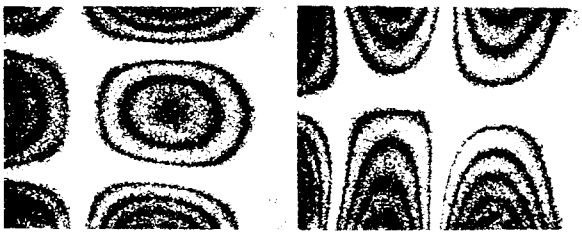
본 연구에 사용된 실험 물체는 일단 고정된 평판(Cantilever plate) 으로써 반사율을 향상시키기 위하여 표면에 백색 도료를 칠하였다. 평판은 가로 180 ㎜, 세로 140㎜ 이며 두께가 4㎜ 인 연강이었다.

5. 실험 결과

그림 5 의 (a)~(d) 는 각각 255Hz, 510Hz, 1565Hz 와

1780Hz 의 고유 진동수로 진동 하고 있는 평판의 mode shape 을 나타낸 사진으로 모니터상에 나타난 간섭무늬를 카메라로 직접 찍은 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 진동하고 있는 물체의 nodal point 가 극명하게 나타나므로 쉽게 mode shape 을 관측할 수 있다.

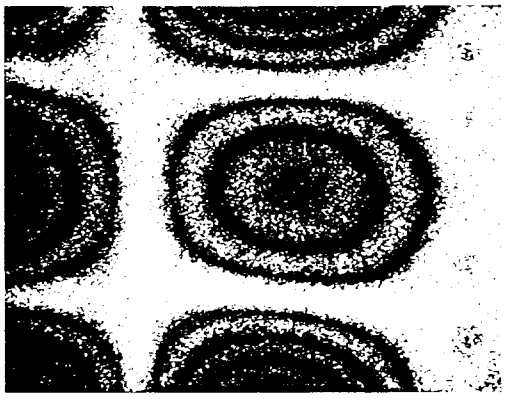
(a) 255Hz (b)510Hz



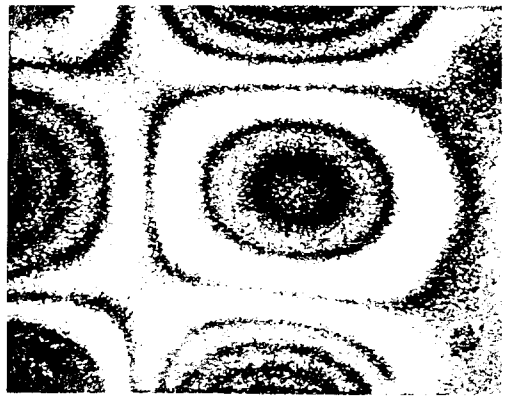
(c) 1565Hz (d) 1780Hz

Fig. 5 Mode shapes of the vibrating cantilever plate

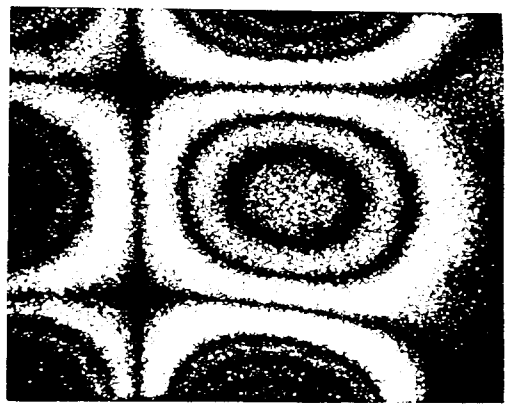
또한 진폭을 정량적으로 계산하기 위하여 EOM 을 사용하여 참조빔에 각각 +B 와 -B 의 위상 변조를 가한 결과가 그림 6 (a)~(c) 에 나타나 있다. 그림에서도 볼 수 있듯이 위상 변조를 통하여 3개의 그림에서 간섭 무늬의 위치가 각각 다르게 나타나 있다는 것을 알 수 있다. 즉 물체의 각 점에서의 강도값이 바뀌어진 것이다.



(a) The fringe pattern without bias vibration B



(b) The fringe pattern with bias vibration +B



(c) The fringe pattern with bias vibration -B

Fig.6 Cantilever plate vibrating at 1565Hz

위의 3개의 상을 식 (21)에 대입하여 계산된 위상(phase map)이 Fig. 7 이며 오차가 보정되고 위상 펼치기가 행해진 결과(unwrapping image) 가 Fig. 8에 나타나 있다.

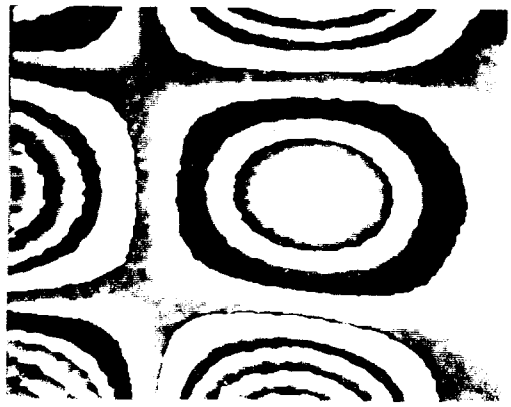


Fig. 7 Phase image

Fig. 8 unwrapping image

마지막으로 Fig. 9는 Fig. 8의 강도분포로 부터 계산된 물체의 진동으로 인한 변위를 정량적으로 계산한 것이다. Fig. 9에서 x축과 y축은 각각 mm 단위로 물체의 실제 길이를 나타내며 z축은 nm 단위로 물체의 진폭을 5mm 간격으로 표시하였다.

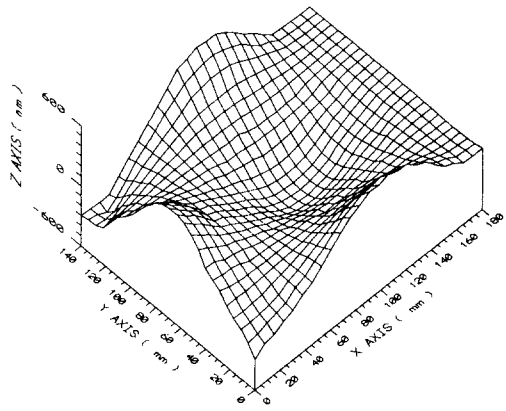


Fig. 9 Wire frame represention of the displacement field

6. 결론

본 연구로 부터 ESPI 장치를 이용하여 진동하는 물체의 mode shape 을 실시간으로 모니터를 통하여 관찰할 수 있었으며 추가적인 장비를 이용하여 진폭을 정량적으로 계산할 수 있었다. 따라서 비진동 전문가라 할지라도 가시적으로 물체의 진동특성에 대해 쉽게 이해할 수 있으며 실시간적인 특징을 이용하면 산업현장에서도 그 적용이 매우 용이할 것으로 생각된다.

7. 참고 문헌

(1)J. A. Leendertz, "Interferometric displacement measurement onscattering surfaces utilizing speckle effect", Journal of Physics E, **3**, 214(1970).

(2) R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry* (Cambridge, England, 1989).

(3) K. A. Stetson and W. R. Brohinsky "fing-shifting technique for numerical ananlysis of time-average holograms of vibrating objects", J. Opt. Soc.Am., Vol. 5, No. 9. 1988

(4) G. A. Slettemoen, "Electronic speckle pattern interferometric system based on a speckle reference beam", Applied Optics, **19**, 616(1980).

(5) A.R.Ganesan, M. P. Kothiyai and R. S. Sirohi, "Simple image processing techniques for the contrast enhancement of real-time digital speckle pattren interferometry fringes", Optical Engineering, **28**, 1019 (1989).

(6) Ryszard J. "Time average holography in vibration analysis", OPTICAL ENGINEERING, Vol 24, No. 5, 1985

(7) K. A. STETSON "Effects of Beam Modulation on Fringe Loci and Localization in Time average Hologram Interferometry", Journal of the Optical Society of America, Vol 60, No. 10, 1970

(8) W.R.Brohinsky "An Electro-Optic Holography Sysyem with Real-Time Arithmetic Processing", Journal of Nondestructive Evaluation", Vol. 8, No. 2, 1989

(9) R.J. Pryputniewicz "AUTOMATED SYSTEMS FOR QUANTITATIVE ANALYSIS OF HOLOGRAM", SPIE Institute Series Vol. IS 8