

## ESPI를 이용한 평판의 Nodal Pattern 해석

### Nodal pattern analysis of plane plate by using ESPI

김경석

(조선대 기계설계공학과)

정현철, 양승필, 김정호, 이도윤, 김태열, 김형택

(조선대 대학원)

#### Abstract

Recently, a new technique called Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) has been developed to overcome the drawbacks of existing holography. This technique enable real-time interference fringes to be displayed directly on TV monitor without recourse to any form of photographic processing. This research was carried out for the purpose of applying the vibration analysis method employing Electronic Speckle Pattern Interference technique to the vibration analysis of uniform rectangular cantilever plate. The natural vibration frequencies found by ESPI were in fair agreement with theoretical eigen frequencies acquired using theoretical formula G. B. Warburton proposed.

#### 1. 서론

1948년 Dennis Gabor<sup>(1)</sup>는 "A new microscopic principle" 이라는 논문을 통하여 Holography의 원리를 처음으로 소개하였다. 그 후 1960년대부터 가간섭성이 우수한 레이저 광이 도입되었고 Leith와 Upatnieks<sup>(2)(3)</sup>에 의해 比軸 홀로그래피(Off-axis holography)법이 개발됨에 따라 Holography는 광범위한 광학 기술로 발전하였다.

최근, 급속하게 발전되고 있는 현대 사회에서 보다 신속하고 정확한 정보의 처리가 크게 요구되고 있으며, Holography 또한 그와 같은 기대에 부응하도록 발전되었다. CCD 카메라와 모니터로 구성된 TV System은 Holography에서의 사진

기록재를 대신할 수 있게 되었으며, 그에 따라 전자적인 신호 처리와 컴퓨터 기술의 도입으로 간섭줄무늬를 생성하고 해석할 수 있게 되었다. 이와 같은 광응용계측기술을 Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI)라 한다.

공업 기술의 발전과 함께 대형 구조물, 예를 들어 항공기와 일반 수송기와 같은 것들은 충분한 강도와 함께 경량화가 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 일반적으로 이용되는 판재는 전체적인 구조물의 형상과 조건에 비해 상대적으로 박판이 되는 경향이 있으며, 따라서 판재에 대한 여러 가지 사용 조건에 따라 다양한 하중이 작용하게 되고 피로파괴와 이상 진동 등과 같은 현상이 발생하게 된다. 그 중 진동 현상은 안전적인 설계와 시공에 있어서 가장 큰 문제가 아닐 수 없으며, 직접적으로 항공기와 일반 차량과 같은 대중 운송수단의 안정성에 큰 문제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 기존의 시간평균 Holography법에 바탕을 두고 있는 ESPI를 이용하여 일단이 고정되어 있는 길이 대 폭의 비가 2 : 1 인 직사각 평판의 각 모드별 진동 특성을 실시간으로 관찰하면서 가진점과 평판의 재질(SS400, STS304), 두께(0.8mm, 1mm)에 따른 진동 특성을 분석하고자 하며, 실험에 의해 구한 진동모드 패턴과 Nodal line의 수에 따라 정해지는 고유진동수를 이론적인 값과 비교 분석함으로써 본 방법의 측정 정밀도와 문제점에 대해 검토하고자 한다

#### 2. 원리

##### 1) ESPI에 의한 진동해석

ESPI는 기존의 Holography법과 마찬가지로 레

이저로부터 방출되는 광을 물체광과 참조광으로 나누고, 물체로부터 산란된 광이 사진 기록재 대신 CCD 카메라의 수광소자에 결상된다. 구형파 혹은 평면파로 이루어진 참조파는 카메라의 수광소자에서 물체파와 함께 동일 선상에서 합성된다. CCD 카메라는 최종 홀로그램상의 세기를 그에 상당하는 비디오 신호로 변화시킨다<sup>(4)</sup>. 홀로그램은 이러한 단계에서 1차원적인 비디오 신호로 존재하게 된다. 따라서 기존의 Holography에서와 마찬가지로 광학적으로 홀로그램을 재생시키는 일을 실행할 필요는 없어지며, 광학적인 회절과 검출 처리는 전자적인 신호의 처리에 의해 행해지고, 이렇게 처리된 비디오 신호는 모니터 상에 간섭줄무늬로서 나타내어진다<sup>(3)</sup>.

Electronic Speckle Pattern Interference에 의한 이미지는 물체파와 참조파 사이의 상호작용에 의해서 기존의 Holography에서와 같은 간섭 감도를 갖고 있지만, 홀로그램보다 TV System의 해상도가 낮기 때문에 기존의 방법보다는 훨씬 조잡한 모양을 하고 있다는 것 외에는 서로 유사한 줄무늬 패턴을 만든다.

ESPI에서의 줄무늬 패턴은 변형 전과 변형 후에 얻어지는 두개의 비디오 신호를 전자적으로 감산 처리함으로써 변형 전·후의 상관영역내에서 형성된다. 특히 기존의 사진적인 처리나 광학적인 공간필터링 등의 구속 조건 없이 줄무늬를 실시간으로 모니터 상에서 관측할 수 있기 때문에 기존의 방법에 비해 외란에 대한 조건이 엄격하지 않다.

실제 정현적인 진동 상태에 있는 물체의 진동 패턴 계측에 있어서 ESPI를 적용하여 보자. 물체 표면상의 임의의 점 $(x_0, y_0)$ 가 진폭  $a(x_0, y_0)$ , 각(角) 진동수  $\omega$ 의 정현적인 진동 상태에 있을 때 물체 표면에 파장  $\lambda$ 의 레이저를  $\theta_1$ 으로 조사하고, CCD camera을 통하여  $\theta_2$ 로 물체 표면으로부터 산란된 광을 받아들여 카메라의 수광소자에 결상되도록 한다.

임의의 시간  $t$ 에서 물체의 변위  $d(x_0, y_0; t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(x_0, y_0; t) = a(x_0, y_0) \cos \omega t \quad (1)$$

그러므로 선형적인 물체광의 위상 변화량  $\delta(x_0, y_0; t)$ 은 다음과 같다.

$$\delta(x_0, y_0; t) = a(x_0, y_0)(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \cos \omega t \quad (2)$$

먼저 진동 상태에 있지 않은 물체 표면을 확산된 레이저로 조사할 경우 그 표면으로부터 산란된 레이저 빔을  $U_o(x, y)$ 이라고 하고 참조광을  $U_R(x, y)$ 이라고 하자.

$$U_o(x, y) = A_o(x, y) \exp -i[vt - \phi_o(x, y)] \quad (3)$$

$$U_R(x, y) = A_R(x, y) \exp -i[vt - \phi_R(x, y)] \quad (4)$$

CCD camera의 수광소자에 기록되는 변형 전의 이미지에 대한 세기 분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{before} &= (U_o + U_R) \cdot (U_o^* + U_R^*) \\ &= A_o^2 + A_R^2 + 2A_o A_R \cos[\phi_o(x, y) - \phi_R(x, y)] \end{aligned} \quad (5)$$

다음으로 물체가 각 주파수  $\omega$ 로 정현적인 진동 상태에 있다고 한다면, 그때의 물체광  $U'o(x, y; t)$ 는 물체의 진동으로 인해서 시간 평균적인 위상 변화  $\Delta\phi_o(x, y; t)$ 를 하게 된다.

$$U'o(x, y; t) = A_o(x, y) e^{-i[vt - \phi_o(x, y) - \Delta\phi_o(x, y; t)]} \quad (6)$$

여기에서 참조광은 물체의 진동과는 독립적으로 레이저 광의 우수한 가간섭적인 성질로 인하여 본래의 광학적인 상태에는 아무런 변화가 없이 처음 상태를 유지한다. 따라서 물체의 진동상태 즉 물체의 변형 후에 기록되는 최종적인 이미지의 세기 분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{after} &= (U'o + U_R) \cdot (U'o^* + U_R^*) \\ &= A_o^2 + A_R^2 + 2A_o A_R e^{i[\phi_o(x, y) - \phi_R(x, y) + \Delta\phi_o(x, y; t)]} \end{aligned} \quad (7)$$

CCD camera은 1/30초의 Sampling Time으로 이미지를 받아들여 Frame grabber에 기록하게 되는데, 만약 물체의 임의의 점에 대한 진동주기  $2\pi/\omega$ 가 화상 수룩을 위한 Frame 시간  $T_{frame}$ 보다 충분히 작다고 한다면, 다시 말해서 주파수  $\omega$ 가 Frame 시간보다 충분히 크다면 ( $2\pi/\omega \ll T_{frame}$ ), 정현적인 진동에 따른 세기 분포는 시간

평균적인 위상의 변화로서 계산할 수 있다. 그러므로 식 (7)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{after} = A_o^2 + A_R^2 + 2A_oA_R e^{i[\phi_o(x,y) - \phi_R(x,y)]} \times \frac{1}{T_{frame}} \int_{-\frac{T_{frame}}{2}}^{\frac{T_{frame}}{2}} e^{i[\Delta\phi_o(x,y;t)]} dt \quad (8)$$

여기에서 진동에 의한 각 위상 변화량은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_o(x,y;t) = \frac{4\pi}{\lambda} a(x_0, y_0) \cos \omega t \quad (9)$$

최종적으로 식 (8)을 다시 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{after} = A_R^2 + A_o^2 + 2A_R A_o \cos[\phi_o(x,y) - \phi_R(x,y)] J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} a(x_0, y_0)\right) \quad (10)$$

TV System은 변형 전의 이미지의 세기 분포에 해당되는 전자적인 비디오 신호를 CCD의 수광소자를 통하여 화상처리장치의 메모리에 기록하고 물체의 변위가 발생되면, 그에 상응하는 이미지의 세기 분포를 비디오 신호로 전환하여 변형 전의 이미지 신호와 전자적으로 감산 처리를 행한다. 출력 카메라의 신호  $V_{before}$ 와  $V_{after}$ 가 입력 화상의 세기에 비례한다면, 감산된 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$V_s = (V_{before} - V_{after}) \propto (I_{before} - I_{after}) = 2A_R A_o \cos[\phi_o(x,y) - \phi_R(x,y)] \times \left[1 - J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} a(x_0, y_0)\right)\right] \quad (11)$$

이 신호는 음의 값과 양의 값을 둘다 가지고 있다. 그러나 TV monitor는 어두운 영역으로서 음으로 진행되는 신호를 나타낸다. 따라서 이러한 신호의 손실을 막기 위해  $V_s$ 는 모니터 상에 나타나기 전에 정류되기 때문에 모니터 상에 나타나는 진동 간섭무늬의 밝기 분포  $M$ 은  $V_s$ 의 절댓값에 비례한다. 그러므로 모니터상의 어떤 Pixel의 위치( $i,j$ )에서 밝기 분포를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(i,j) = K \left| A_R A_o \cos[\phi_o(x,y) - \phi_R(x,y)] \left\{1 - J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} a(x_0, y_0)\right)\right\} \right| \quad (12)$$

여기서  $K$ 는 비례상수이다. 식 (12)에서 알 수 있듯이 ESPI를 이용한 진동 실험에서 나타나는 간섭 줄무늬의 형태는 Bessel함수가 Fig. 1과 같이  $1 - J_0$ 의 특성을 가지고 있기 때문에 진폭이 0이고 0차의 줄무늬가 발생하는 Nodal line은 가장 어렵게 나타남을 알 수 있다.

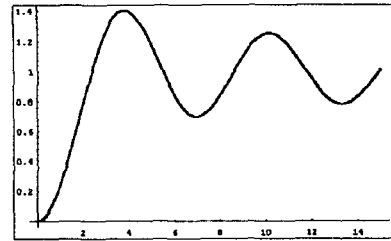


Fig. 1 Characteristic function  $1 - J_0$  of ESPI based on time-average method

## 2) 일단 고정된 평판의 진동 모드

본 연구에서 사용되는 평판은 균일한 두께를 가진 균질적인 등방성의 탄성체 평판이라 가정하였으며, Fig. 2와 같이 일단 고정된 평판의 진동 특성에 대해 고려하였다.

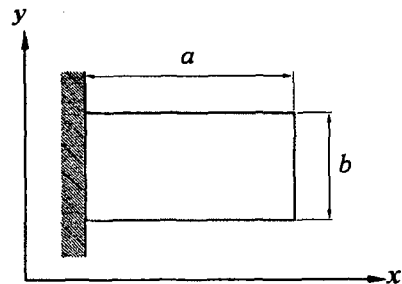


Fig. 2 Rectangular plate which is clamped along one edge and free along three edges

G. B. Warburton<sup>(5)</sup>은 판의 진동 해석에 있어서 Rayleigh method를 적용하여 진동하는 판과

Beam의 파형이 유사하다고 가정함으로 근사적인 주파수 방정식을 유도하였다. 이러한 근사 방정식은 평판의 크기와 평판 재질에 따른 고유상수 값 그리고 Nodal line과 평판의 경계 조건의 견지에서 주파수를 나타내고 있다. Warburton에 의한 이론적인 고유진동수<sup>(5)</sup>를  $f_w$ 라 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_w = \frac{\lambda \pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho t}} \quad (13)$$

여기서  $a$ 는 평판의 길이이고,  $t$ 는 두께,  $\rho$ 는 평판의 밀도, 그리고  $D$ 는 평판의 굽힘강성으로서 다음과 같이 주어진다.

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (14)$$

여기서  $E$ 는 본 실험에서 사용된 평판의 Young's modulus이고  $\nu$ 는 포와송의 비이다. 또한, 식 (13)에서  $\lambda$ 는 Warburton에 의해 구하여진 Frequency factor로서  $a/b=2$ 인 평판에 있어서  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 Nodal line 수를 각각  $m$ 과  $n$ 이라 하면, 그에 따른  $\lambda$ 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\lambda = [G_x^2 + G_y^2 (a/b)^4 + 2(a/b)^2 [\nu H_x H_y + (1-\nu) I_x I_y]]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

여기서  $G_x, G_y, H_x, H_y, I_x, I_y$ 는  $m, n$ 의 함수이다.

### 3. 실험

본 연구에서는 일단 고정된 평판의 진동 특성을 해석하기 위해 STS304와 SS400 시험편을 사용하였다. 각각의 재료에 따른 물성치는 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Material properties of each plate

재 질	탄성계수(E)	포와송비( $\nu$ )	밀도( $\rho$ )
STS304	193GPa	0.3	8.0g/cm <sup>3</sup>
SS400	206GPa	0.28	7.85g/cm <sup>3</sup>

여기서  $E$ 는 Young's Modulus이며  $\nu$ 는 포와송의 비이고,  $\rho$ 는 재료의 밀도이다.

본 실험에서는 일단 고정된 길이와 폭(100mm×50mm)이 동일한 평판의 각 재료별 진동 특성과 두께에 따른 영향을 고려하기 위해 평판의 두께를 1mm와 0.8mm로 하여 각각 측정하였다. 측정면에는 금속 광택을 제거하고 조사된 레이저 광의 산란 특성을 향상시키기 위해서 흰색 무광 도료를 칠하였다. 또한 전자 광학 Holography 간섭법에 의해 각각의 가진점에 따른 진동 특성을 살펴보기 위해 시험편 뒷면에 격자를 그어 가진점을 표시하였다. Fig. 3에서는 시험편의 형상과 가진점의 위치를 나타냈다.

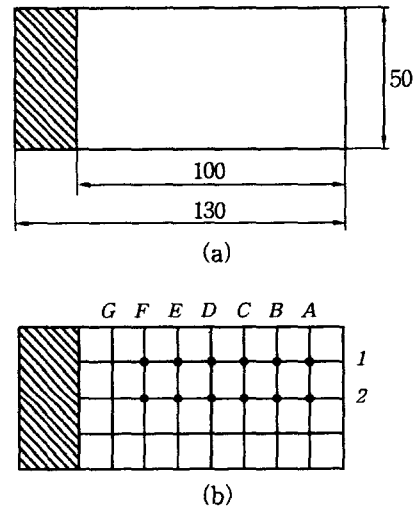


Fig. 3 (a) and (b) respectively shows dimensions and exciting point of rectangular plate for vibration experiment

본 연구에 사용된 광학계의 평면 배치도를 Fig. 4에 나타냈다. Laser beam의 간섭에 의해 발생하는 줄무늬를 해석하는 것이므로, 기존의 Holography 간섭법과 동일하게 하나의 Laser beam을 Beam splitter에 의해 두개의 광으로 분리시켰다. 그 중 하나의 광은 Spatial filter에 의해 직접 물체 표면으로 조사되고 다시 그 표면으로부터 산란되어, CCD 카메라의 렌즈를 통하여 수광소자에 결상되도록 하였다. 이것을 물체광

(Objective beam)이라고 하며, 다른 광은 물체광과 동일한 광로길이를 가지면서 Spatial filter를 거쳐 직접 CCD 카메라의 수광소자에 입사되는데 이것을 참조광(Reference beam)이라 한다. 여기에서 참조광은 일반적으로 구면파이거나 평면파이든지 그다지 중요치 않지만, 본 실험에서는 불필요한 광학적인 노이즈를 제거하고 빔을 확산시키기 위해 사용된 Spatial filter 앞에 렌즈를 배치함으로써 구면파를 평면파로 전환하였으며, 물체파 역시 물체까지의 광로길이가 길기 때문에 진폭의 감소를 피하기 위해서, Spatial filter를 통과한 확산된 레이저 빔을 시준화(Collimation)하였다. 또한 물체광과 참조광의 광량을 조절하기 위해 참조광로 중에 두개의 Polarizer를 배치하여 레이저 고유의 편광 상태에 변함없이 물체광의 광량에 따라 참조광을 조절할 수 있도록 하였다.

CCD 카메라의 수광소자와 결상렌즈 사이에는 각각 두개로 나누어졌던 참조광과 물체광을 다시 합성시켜서 간섭을 일으킬 수 있도록 Beam splitter와는 정반대 역할을 하는 Beam combiner를 설치하였다.

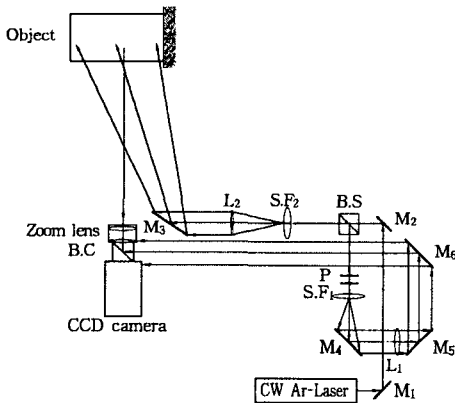


Fig. 4 Experimental optical system layout

ESPI는 수광소자인 CCD cell의 크기와 스펙클의 크기의 비율에 따라 간섭 효율과 정밀도에 차이가 발생한다. 따라서 하나의 cell에 입사되는 스펙클 수가 적을수록 효율이 높은 간섭계를 구

성할 수 있다. 본 실험에서는 스펙클의 크기를 크게 하면서 입사되는 광량을 일정 수준으로 유지할 수 있도록 참조광이 수광소자로 직접 입사되도록 하였다.

변형전의 상태에 있는 물체로부터 산란된 광은 CCD 카메라의 결상렌즈로 집광되며 이것은 참조파면과 간섭하여 카메라의 수광소자에 화상을 형성한다. 이렇게 형성된 초기 기준 화상은 화상처리 장치의 Memory에 Digital Data로 저장되며, 또한 진동 상태에 있는 물체로부터 산란된 광은 화상처리 장치 내부에서 미리 저장되어진 초기 화상과 전자적으로 감산 처리된다. 이러한 처리를 통하여 변형 전·후 상관영역내에 존재하는 간섭 줄무늬 패턴을 관찰 할 수 있다. Personal Computer를 이용하여 화상처리 장치를 제어하고 화상을 수록하여 처리하는 시간은 약 1/30초 정도이며, 대부분 Real Time으로 간섭줄무늬를 관찰할 수 있다.

본 실험에서는 스피커 가진을 통하여 평판의 불안정한 진동 상태를 조사하기보다는 일정한 선형적인 진동 상태를 줄무늬 패턴으로써 조사하고자 하였으므로 일정한 주파수를 갖는 음파가 스피커에서 발생될 수 있도록 Function generator를 사용하였다.

평판의 일단고정을 위하여 자체적으로 필요에 따라 일단고정과 양단고정을 겸하여 사용할 수 있는 Jig를 제작하였다. 또한 스피커가 일정한 가진점에 대하여서만 집중된 음압으로 가진할 수 있도록 원추형 Corn을 제작하여 부착하였다.

본 실험은 일단 고정된 평판의 스피커 가진에 의한 순수 진동특성을 관측하고자 하였으므로, 정확한 실험을 수행하는데 있어서 영향을 미칠 수 있는 외부 잡음이나 사람과 차량 통행에 따른 외부 진동의 영향을 최소화시키기 위하여 주로 사람과 차량 통행이 없는 야간에 행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 실험에서는 Cantilever의 경계 조건을 만족하고 있는 SS400과 STS304 평판의 진동 특성

실험을 행하였다. 두께에 따른 진동 특성을 살펴 보기 위해서 두께 0.8 mm와 1mm인 SS400 평판을 시험편으로 사용하였으며, 또한 가진점의 위치에 따른 진동 패턴의 유별성을 검토하였다.

본 실험에서는 3차원적인 줄무늬 패턴으로서 일단 고정된 평판의 진동에 대한 정보를 가지고 있는 Speckle Pattern을 TV 모니터를 통하여 실시간적으로 관측할 수 있었으며, 모니터 상에 나타난 이미지를 플로피 디스크에 기록하고 사진촬영함으로써 시간 평균적으로 변화하는 진동 패턴을 기록하고 관찰할 수 있었다. 또한 Table 2~3에서와 같이 각 시험편의 진동 모드별 실험적인 고유진동수  $f_{ss}$ 를 기록함으로써 Nodal line에 따른 Warburton의 고유진동수  $f_w$ 의 값과 비교하여 ESPI의 정확도와 신뢰성을 평가하였다. Fig. 5~6은 본 실험에서 얻어진 두께 1mm인 일단 고정된 SS400과 STS304 평판의 진동모드와 Nodal line, 그리고 가진 위치와 고유진동수를 각각 나타내고 있다.

Table 2 Theoretical and experimental eigen frequencies (SS400, B,1)

(Unit : Hz)

m	n	0		1		2		3	
		1t	0.8t	1t	0.8t	1t	0.8t	1t	0.8t
1	$f_w$	86.20	68.96	447.63	358.11	2367.18	1893.74	6098.58	4878.87
	$f_{ss}$	88	44.5	365	-	2340	1800	6000	4700
2	$f_w$	539.82	431.86	1279.33	1023.46	3298.01	2638.41	7061.85	5649.48
	$f_{ss}$	500	360	1300	845	3120	2310	6700	5100
3	$f_w$	1511.58	1209.26	2344.59	1875.67	4595.16	3675.84	8415.04	6732.04
	$f_{ss}$	1530	990	2300	1650	-	-	-	6000



(a) (b)

Fig. 5 Vibration mode pattern of SS400 plate

(a) t=0.8 at 44.5Hz (B, 1)

(b) t=1.0 at 365Hz (B, 1)

Table 3 Theoretical and experimental eigen frequencies (STS304, E,1)

(Unit : Hz)

m	n	0		1		2		3	
		1t	0.8t	1t	0.8t	1t	0.8t	1t	0.8t
1	$f_w$	77.18	61.74	395.38	316.30	2115.03	1692.02	5534.38	4427.50
	$f_{ss}$	67.5	59	332	261	2220	1800	-	4580
2	$f_w$	483.32	386.66	1132.27	905.82	2933.95	2347.16	6304.91	5043.93
	$f_{ss}$	455	370	1180	820	2900	2350	6200	5000
3	$f_w$	1353.36	1082.69	2082.08	1665.67	4083.51	3266.81	7501.95	6001.56
	$f_{ss}$	-	1200	2150	1750	-	3280	-	5900



(a) (b)

Fig. 6 Vibration mode pattern STS304 plate

(a) t=0.8 at 1,800Hz (E, 1)

(b) t=1.0 at 6,200Hz (F, 2)

물체의 진동에 대응하는 간섭줄무늬는 변형전과 후에 각각 얻어지는 휘도의 전자적인 감산처리에 의해서 TV 모니터 상에 실시간으로 나타나게 되는데 이러한 줄무늬 패턴의 휘도분포는  $1-J_0$ 의 특성을 따라 변화하기 때문에 진동 진폭이 0이 되는 위치, 즉 Nodal line에서는 가장 어둡게 나타남을 알 수 있다. 그러나 어둡게만 나타날 것으로 예상하였던 Nodal line은 항상 가장 어두운 상태만을 유지하지 않고 가장 밝게 반전되었다가 다시 어둡게 그리고 다시 밝게 반복적으로 변화함을 알 수 있었다. 이것은 레이저로부터 직접 CCD 카메라의 수광소자로 입사되는 참조광의 위상이 자체적으로 약간씩 변화하거나 또는 마그네틱으로 고정된 광학계상에 미소한 움직임이 참조광과 물체광의 간섭 특성에 영향을 미치고 있는 것으로 사료되지만, 이러한 것이 본 실험의 근본적인 목적과 결과에 영향을 미치는 것은 아니라고 사료된다.

본 실험에서는 두께가 다른 두 가지 재료로 제

작된 일단 고정된 평판의 진동 특성을 조사하였다. 먼저 재료에 따라 동일한 진동 모드라 할지라도 공진주파수에 약간의 차이가 있었다. 대체로 SS400보다는 STS304의 공진주파수가 약간 낮게 나타났으며, 고주파가 될수록 그 차이는 더욱 크게 나타났다. 또한 동일한 재료로 제작된 두께 0.8mm와 1mm의 평판에서 0.8mm의 평판인 경우, 1mm인 평판보다는 다소 낮은 공진 주파수를 가졌으며, TV 모니터를 통하여 다양한 진동 모드를 관측할 수 있었으며, 다소 용이하게 진동 패턴을 구할 수 있었다. 반면에 1mm인 경우에는 진동 패턴을 구하기 어려웠다. 또한 동일한 시험편인 경우라도 가진점을 어디에 두느냐에 따라 거의 비슷한 가진주파수에서 동일한 진동 모드를 용이하게 관측할 수도 있었으나 전혀 관측할 수 없는 경우도 있었으며, 관측 가능한 진동 모드의 최대 공진주파수도 각각 다르게 나타났다.

G. B. Warburton의 이론식에 근거한 일단 고정된 평판의 Nodal line의 수에 따른 고유진동수와 실제 실험에서 얻어진 고유진동수와의 비교는 Table 2~3에서 알 수 있듯이 Warburton의 이론 고유진동수는 가진 위치에 따라서 계산된 값이 아니라 시험편의 경계조건과 시험편의 재질,  $a/b$ 의 조건 그리고 두께( $t$ )에 따른 주파수 성분이므로, 본 논문에서는 가진 위치에 상관없이 시험편의 재질과 두께에 따라서 이론 고유진동수를 계산하여 실험값과 비교하였다. 일반적으로 저주파일수록 오차가 크게 나타났으며, 고주파가 될수록 오차는 다소 줄어들음을 알 수 있었고, 전체적으로 실험에서 구한 주파수 보다 Warburton의 이론식에 의해 계산된 주파수가 높게 나타났다.

## 5. 결론

본 실험에서는 ESPI를 이용하여 일단 고정된 SS400과 STS304 평판의 두께와 가진위치에 따른 진동 특성을 측정함으로써 본 방법을 실제적인 진동패턴 해석에 적용할 수 있었다. 또한 각각의 모드에 따른 실험적인 공진주파수를 측정하고 이론적으로 계산되어진 고유진동수와 비교하

여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재료에 따른 일단 고정된 평판의 진동 특성은 비교적 연성 재료인 SS400이 STS304에 비해 진동에 있어서 보다 뚜렷한 감쇄특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한, 두께가 얇은 재료일 때 진동모드의 관찰이 용이하였고, 고차 진동모드와 Nodal line을 볼 수 있었다. 동일 진동모드라 할지라도 가진점이 시험편의 중앙부로 이동할수록 진동모드를 관찰하기가 어려웠으며, 자유단과 고정단으로 갈수록 어느 정도 용이하였다.
- 2) ESPI를 이용하여 각각 고유한 물성치를 가지고 있는 SS400과 STS304의 일단 고정된 평판의 진동에 따른 평판 전체의 Nodal line을 실시간적으로 TV 모니터를 통하여 관측할 수 있었으며, 각각의 Nodal line에 따른 공진주파수를 구하여 Warburton에 의해 제안된 이론식에 의해 계산된 고유진동수와 비교함으로써 본 방법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

## 參 考 文 獻

1. 深堀勝市・山本廣司・材田正義, “ホログラフィ干涉による振動解釋法”, 三菱重工枝報 Vol. 8, No. 3, 1971, pp.15~25.
2. P. K. Rastogi, “Holographic Interferometry Principles and Methods”, Springer-Verlag, 1994, pp.2~316.
3. Gary L. Cloud, “Optical Methods of Engineering Analysis”, Cambridge University press, 1995, pp.21~36, 343~407, 440~475.
4. J. N. Butter・J. A. Leendertz, “Holographic and Video Techniques applied to Engineering measurement”, Measurement and Control, Vol. 4, No. 12, December, 1971, pp.349~354.
5. G. B. Warburton・M. A., Ph. D., “The Vibration of Rectangular Plates”, Proc. Instn. Mech. Engrs., London, Vol. 168, 1954, pp.371~384.