

< 논 문 >

얇은 직각판의 진동 모드에 대한 ESPI 시뮬레이션

ESPI Simulation for the Vibration Modes of the Thin Right-Angled Plate

장 순 석*

Soon Suck Jarng

(1999년 1월 11일 접수 : 1999년 5월 4일 심사완료)

Key Words : ESPI(전자 반점 형상 간섭계), FEM(유한요소기법), Vibration(진동), Phase Shifting(위상이동), Phase Unwrapping(위상 결필침), Sobel Edge Enhancement(쇼벨 윤곽선 강조), Monte-Carlo Method(몬테-칼로 기법), Median Filtering(메디안 필터링)

ABSTRACT

The ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) algorithm has been simulated to calculate vibrational modes of a thin right-angled STS304 plate. The phase transformation of the reference wave of the ESPI is carried out only one time during vibration in order to clarify ESPI speckle patterns. Two dimensional vibrational modes are calculated from one ESPI pattern before vibration onset and two ESPI patterns during vibrations but with and without the phase transformation. The ESPI harmonic results are compared with those derived from the finite element method (FEM), and they agree very well. Additionally a phase unwrapping algorithm has been newly developed to derive a displacement map from an ESPI phase map.

1. 서 론

어떤 물체에 압력이나 열을 가하면 변형이 생긴다. 이 같은 변형을 정량적으로 측정하면 그 물체에 대한 재질적인 그리고 구조적인 특성을 알 수 있다. 단순한 재질의 구조 특성을 알기 위해 스트레인 게이지나 압전 소자를 사용하여 측정하는 것이 보편화되어 있다. 이러한 방법들은 대부분 측정하고자 하는 물체와 접촉하기 때문에 측정상의 여러 가지 문제점들을 가진다. 최근에 초음파나 X선 혹은 빛의 간섭 현상을 이용하여 비접촉식으로 물체의 변위를 측정하는 방법들이 다양하게 개발, 보고되고 있다. 본 논문은 특히 빛의 간섭 현상을 이용한 물체의 변위

측정에 관해 이론 및 결과들을 보여주고자 한다. 일반적으로 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry : 전자 반점 형상 간섭계)라 불리는 이 기술로 500°C 이상의 극렬한 초고온 상태에서 발생하는 물체의 변형을 이차원적으로 측정할 수 있는 것으로 알려져있다^(1,2). 또한 가압이나 진동에 의한 면내·외 변위도 측정 가능하다⁽³⁾.

Butter와 Leendertz^(4,5)에 의해 처음 소개된 ESPI 기술의 공학적 응용이 지금까지 더딘 이유는 ESPI가 매우 불균일한 빛의 세기 분포인 스페클 형상을 이용해야만 하는 까닭에 측정의 선명도, 정밀도에서 약점을 가지고 있기 때문이다. 따라서 기존의 간섭계에서 기준파의 경로를 빛의 파장영역에서 미세하게 변화시키는 위상이동방법^(6,7)이나 위상변환 방법^(8~10)을 개발하여 ESPI의 선명도를 향상시키고 있다. 이를 위해 Michelson 간섭계와 같은 광학 장

* 정회원, 조선대학교 전기제어계측공학부

치를 이용하여 미세한 빛의 위상 이동/변환을 비교적 정확하게 제어하고 있다. 또한 정밀한 관측을 위해 스펙클 잡음의 통계적 특성을 이용한 최소자승 위상추정법⁽¹¹⁾과 최대확률 잡음해소법⁽¹²⁾ 그리고 위상도의 결핍차점^(7,13) 등의 정밀도 향상을 위한 알고리즘이 개발되고 있다. 현재까지 압력이나 열에 의한 정적인(static) 물체 변형을 측정하기 위해 위상이동기법이 주로 사용되어지며, 진동관측을 위해서는 위상변환기법이 사용되고 있으나, 이 두 기법을 위한 실험적 광학계 구성은 거의 유사하다. 위상이동기법에 의한 면내 변위 측정에 비해 위상변환기법에 의한 면외 변위 측정이 아직도 선명도에 있어서 많이 떨어진다. 이는 위상변환기법에 따른 정밀도 향상 알고리즘이 함께 개발되지 않고 있기 때문이다. 더구나 위상변환기법에 의해 얻어진 위상도(phase map)로부터 실제 변위도(displacement map)를 구하기 위한 위상결핍차점 알고리즘이 아직까지 개발되지 않고 있다.

지금까지 다른 진동 관측에 사용되는 ESPI에서는 단순히 2장의 진동 전후의 스펙클 형상들을 상호 감

하거나 (Fig. 1) 또는 진동 중에 4번의 기준파 위상 변환에 따른 스펙클 영상들을 상호 감하는 (Fig. 2) 방법으로 진동 모드를 수집하였다^(1,3). 이들 방법에서는 스펙클 잡음이 현저히 남아 있는 문제점이 있고, 특히 후자의 경우는 실제의 변위 진폭을 구하지 못해왔다. 왜냐하면 형상들 사이의 단순한 감쇠는 기준파와 물체파의 세기와 위상의 변수가 여전히 남아있기 때문이다.

본 논문에서는 기준파 위상 변환에 따른 스펙클 형상 변화를 얇은 직각 STS 304판을 대상으로 컴퓨터로 시뮬레이션 하였다. 진동 전에 1개 그리고 진동 중에는 1번의 위상변환 전후로 2개의 형상들을 수집하고 이들 3개의 형상 자료들로부터 면외 변위를 추정하였다. 이를 위해서 구조진동해석에 필요한 유한요소기법(FEM) 프로그램을 개발하였다. FEM으로 얻어지는 진동 모드 자료를 가지고 1/30초의 시간 평균 ESPI 영상을 1번의 기준파 위상 변환에 대응하여 수집하였다. 그리고 1번의 위상 변환을 포함하여 진동 전후에 얻어지는 3개의 스펙클 형상들로부터 원래 진동 모드를 복원하였다. STS 304판의 진동 모드를 FEM으로 계산할 뿐만 아니라, ESPI 시뮬레이션과 그에 따른 위상변환기법으로도 계산하여 이 두 결과들을 비교하였다.

2. 방 법

2.1 유한요소기법

본 논문에서는 3차원적 유한요소를 사용하였으며 일반적으로 외부로부터 물체에 가해지는 힘에 의해 물체가 변형된다고 하면, 그 힘과 변위사이에는 정상 상태에서 다음 행렬식이 만들어진다:

$$[F] = [K][a] - \omega^2[M][a] + j\omega[R][a] \quad (1)$$

여기서 $[F]$ 는 힘 벡터, $[a]$ 는 변위 벡터, $[K]$ 는 탄성 계수 행렬, $[M]$ 은 질량 계수 행렬 그리고 $[R]$ 은 점성 계수 행렬에 해당한다. ω 는 각 주파수이고 $j = \sqrt{-1}$ 이다.

본 논문에서는 얇은 직각형의 STS 304판 (길이 150 mm 너비 75 mm 폭 0.8 mm)의 양쪽 변을 고정시키고, 판의 중앙점에 진동을 가하는 외부 조건을 주었다 (Fig. 3). STS 304판은 길이로 50등분, 너비로 25등분되어 전체 1250개의 유한요소들로 구성되었다 (Fig. 4). STS 304판의 밀도 ρ 는 8000 kg/m³이고 탄성계수 E 는 193 GPa이며 포아손 계



Fig. 1 Vibrational mode derived by subtraction of two speckle patterns before and after vibration

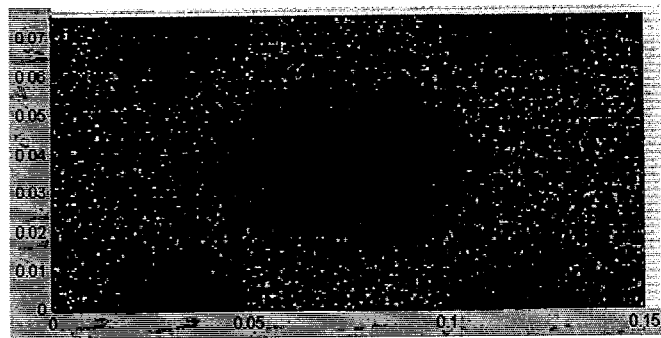


Fig. 2 Vibrational mode derived by subtraction between 4 speckle patterns acquired during vibration with 4 times of phase modulation of reference wave

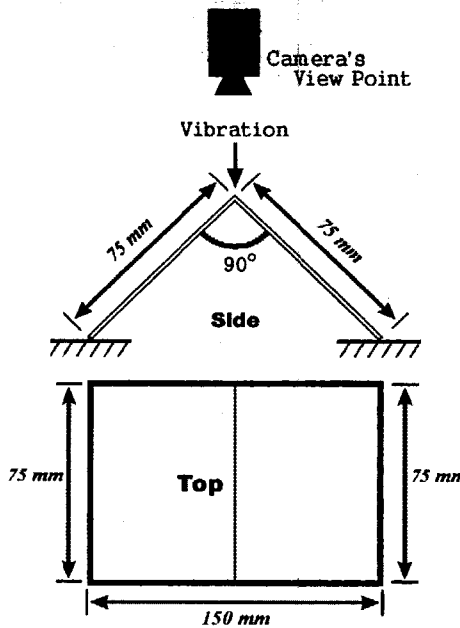


Fig. 3 Vibration applied onto a centre point of a then right-angled STS 304 plate

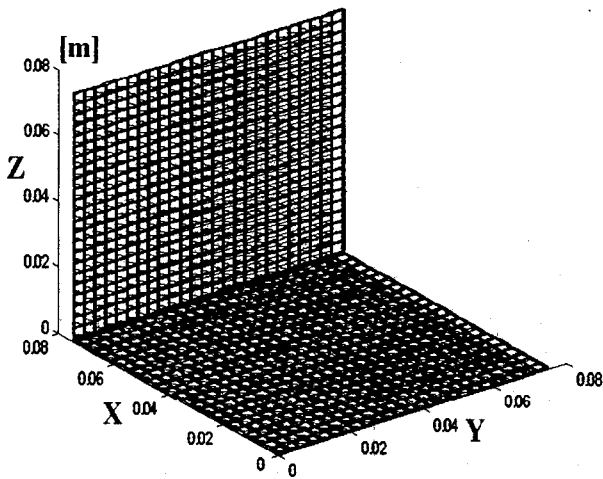


Fig. 4 1250 finite elements of a thin right-angled plate

수는 0.3이다. STS 304판 유한 요소의 최대 크기는 따라서 3 mm이다. 입력 주파수는 1 kHz로 하고 직각 판의 중앙점을 가진하도록 하였다.

2.2 전자반점형상간섭계

면의 ESPI에 대한 광학적 구성 방법은 Fig. 5에 의해 매우 잘 묘사되어 있다⁽¹¹⁾. 레이저빔은 BS (Beam Splitter)에 의해 PZT 거울에 반사되는 기준파와 물체표면에 의해 반사되는 물체파로 나뉜다.

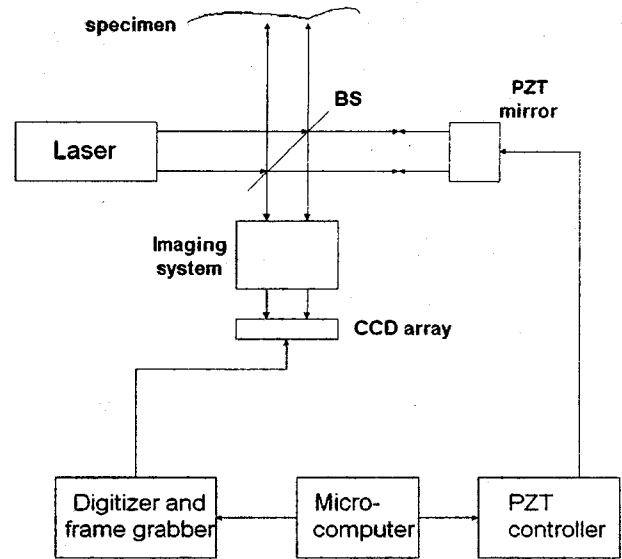


Fig. 5 Out-of-Plane ESPI apparatus

반사된 각각의 파는 BS에 의해 다시 합쳐지면서 BS면에서 간섭을 일으키는 데 그 간섭 지점을 (x, y) 라 하자. 기준파 $\zeta_r(x, y)$ 와 물체파 $\zeta_o(x, y)$ 의 광세기를 각각 $U_r(x, y)^2$ 와 $U_o(x, y)^2$ 라 하고 또 그들이 간섭하는 지점에서의 위상을 각각 $\phi_r(x, y)$ 와 $\phi_o(x, y)$ 라 하면 간섭된 빛의 세기 $I(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$I(x, y) = | \zeta_r(x, y) + \zeta_o(x, y) |^2 = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cdot \cos \Psi(x, y) \quad (2)$$

여기서

$$\alpha(x, y) = U_o(x, y)^2 + U_r(x, y)^2,$$

$$\beta(x, y) = 2 \cdot U_o(x, y) \cdot U_r(x, y),$$

$$\Psi(x, y) = \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)$$

로 표현한다.

ESPI광학 실험은 바닥으로부터의 진동을 흡수하는 기능을 가진 shock-absorber가 장착된 광학 테이블 위에서 수행되며, ESPI 자체가 불규칙한 스펙클 잡음을 역이용하는 광학간섭기법이기 때문에 오히려 불규칙한 스펙클 잡음이 요구된다. 레이저 조사 각도는 되도록 카메라 수광소자에 중변위가 측정되도록 물체 면에서 90° 각도가 되도록 하여야 하나 입사 각도 상에서 실제로는 약간의 차이는 있다. 실제 실험에 의한 중변위 ESPI에서는 실험 전에 PZT 거울에 의해 위치 보정을 해주는 까닭에 voltage

offset에 의한 bias error는 실험 후 교정된다. 즉 PZT 거울을 이동하면서 가장 선형적인 전압-변위 관계식이 도출되는 영역에서 PZT 거울이 이동되도록 하기 때문이다. ESPI에 의해 수집된 2차원적 종변위 화상 정보는 위상결별침 과정을 통해서 변위 정보로 재구성이 된다. 그리고 물체는 어느 한 부분이 고정되어 있기 때문에 그 부분의 변위를 영점으로 하고 상대적으로 주변의 2차원적 변위 화상을 구성해 간다. 따라서 수광소자의 voltage offset에 의한 bias error는 실제로 의미가 없다. 종변위 ESPI는 물체의 종변위만을 관측하기 때문에 미세한 물체의 Curvature와는 상관이 없다. 실제 상황에서 Curvature가 매우 심한 물체의 표면의 경우는 레이저 빔의 반사 방향이 매우 불규칙해져서 카메라 수광소자에 반사되는 빛이 매우 적어지기에 측정상의 문제점이 많으며 이에 대한 연구는 향후 계속되어야 할 것이다.

STS 304판의 진동 변위진폭을 $a(x_1, y_1)$ 라 하고 레이저 스펙클의 간섭 형상을 CCD 카메라 수광소자에 의해 1/30초 간격으로 수집하게 되면 진동 주기에 비해 광 수집시간이 상대적으로 길므로, 진동 변위 진폭은 0차 Bessel 함수, $J_0(4\pi a(x_1, y_1) / \lambda)$ 에 의해 시간 평균화된다. Fig. 5의 PZT 거울은 이를 이동하면서 기준파의 경로 위상을 변환시키게 된다. 진동 전에 수집된 레이저 스펙클 형상을 $I_1(x, y)$ 라 하고, 진동 도중에 PZT거울의 이동에 의한 기준파 경로 위상 변환이 없을 때 수집된 형상을 $I_2(x, y)$ 이라 하며 π 만큼의 위상 변환이 있을 때 수집된 형상을 $I_3(x, y)$ 이라 하자. 이를 식으로 표현하면,

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= a(x, y) + \beta(x, y) \cdot \cos(\Psi(x, y)) + \epsilon_1(x, y) \\ I_2(x, y) &= a(x, y) + \epsilon_2(x, y) + \beta(x, y) \cdot \cos \Psi(x, y) \cdot J_0\left(\frac{4\pi a(x_1, y_1)}{\lambda}\right) \\ I_3(x, y) &= a(x, y) + \epsilon_3(x, y) + \beta(x, y) \cdot \cos(\Psi(x, y) + \pi) \cdot J_0\left(\frac{4\pi a(x_1, y_1)}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$\epsilon_1(x, y)$, $\epsilon_2(x, y)$, $\epsilon_3(x, y)$ 는 수광소자의 전기적 잡음이다. 식 (3)으로부터 J 는,

$$J_0\left(\frac{4\pi a(x_1, y_1)}{\lambda}\right) = \frac{I_2(x, y) - I_3(x, y)}{2I_1(x, y) - I_3(x, y) - I_2(x, y)} \quad (4)$$

주어진 식 (4)의 $J_0(4\pi a(x_1, y_1) / \lambda)$ 로 부터 Bessel 함수를 역변환시켜야 실제 $a(x_1, y_1)$ 를 구할 수 있다. Bessel 함수는 1대 1로 대응하지 않으므로 이에 따른 적절한 역 변환 과정을 고려해야 한다. 이러한 과정을 위상결별침이라 하며, 구체적인 해결 방법을 결과에서 설명하였다. 기준파와 물체파의 광세기, $U_r(x, y)^2$ 와 $U_o(x, y)^2$, 그들의 위상 차, $\Psi(x, y)$, 그리고 수광소자에서의 전기적 잡음, $\epsilon(x, y)$ 에 대한 시뮬레이션은 이들 파라미터들의 다음과 같은 확률 분포 함수들로부터 Monte-Carlo 방법에 의해 얻는다⁽¹⁴⁾.

$$p_{I_r}(I_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{I_r}^2}} \exp\left(-\frac{(I_r - \langle I_r \rangle)^2}{2\sigma_{I_r}^2}\right) \quad (5)$$

여기서 I_r 는 기준파의 세기이며 $\langle I_r \rangle$ 는 평균값이다. σ_{I_r} 은 표준편차이다. 기준파는 빛의 세기의 확률적 분포이므로 정규분포함수로 나타난다.

$$p_{I_o}(I_o) = \frac{\left(\frac{M}{\langle I_o \rangle}\right)^M I_o^{M-1} \exp(-M \frac{I_o}{\langle I_o \rangle})}{\Gamma(M)} \quad (6)$$

여기서 I_o 는 물체파의 세기이며 $\langle I_o \rangle$ 는 평균값이다. 이러한 감마 함수 형태의 물체파 세기의 확률 분포가 발생하는 이유는 스펙클 크기보다 수광소자의 크기가 크기 때문에 평균화되면서 나타나는 현상이다. 하나의 레이저 스펙클이 여러 개의 수광소자에 들어오게 할수록 우리는 더 많은 화상 정보를 얻게된다. ESPI에서는 레이저 조사 면과 수광소자사이의 거리가 떨어져 있고 그 사이에 있는 렌즈가 초점을 맞추게되는 데 보통 스펙클 크기보다 수광소자의 크기가 커지게 된다. 따라서 수광소자의 크기가 스펙클 크기보다 상대적으로 작아지도록 줌렌즈를 사용하는 것이 유리하다. 감마 함수의 차수 M은 물체 표면에서 카메라 렌즈까지의 거리와 그 렌즈의 조리개의 넓이에 의해 좌우된다. 여기서는 M=2를 사용하였다⁽¹⁵⁾.

$$p_E(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_E^2}} \exp\left(-\frac{(\epsilon - \langle \epsilon \rangle)^2}{2\sigma_E^2}\right) \quad (7)$$

여기서 $\langle \epsilon \rangle$ 과 σ_E 는 평균과 표준편차이며 실험 측정치인 [0.95, 1.97]의 값을 사용하였다.

$$p_U(u) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-u^2}}, \quad -1 < u < +1 \quad (8)$$

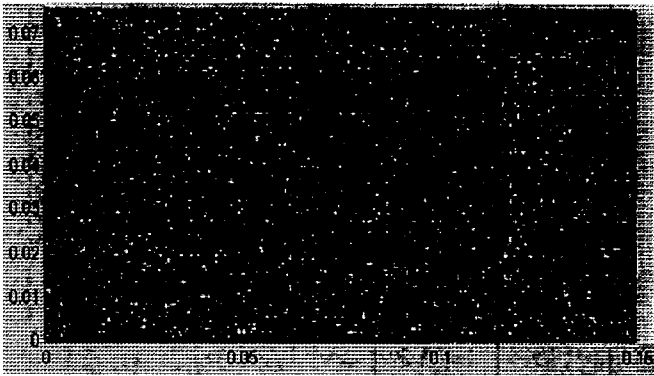


Fig. 6 Laser speckle pattern acquired before vibration, $I_1(x, y)$

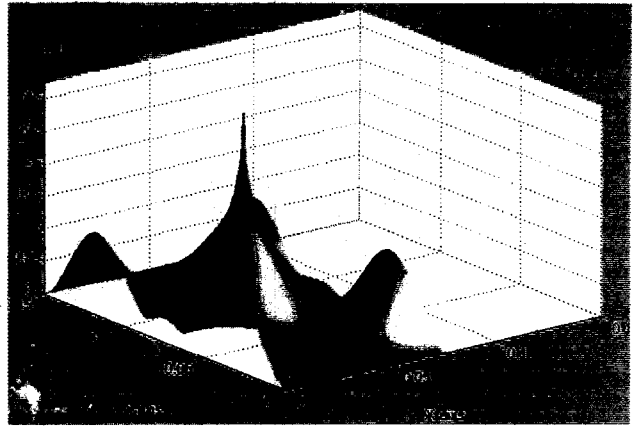


Fig. 9 The amplitude of the displacement is derived from the vibrational magnitude for one cycle

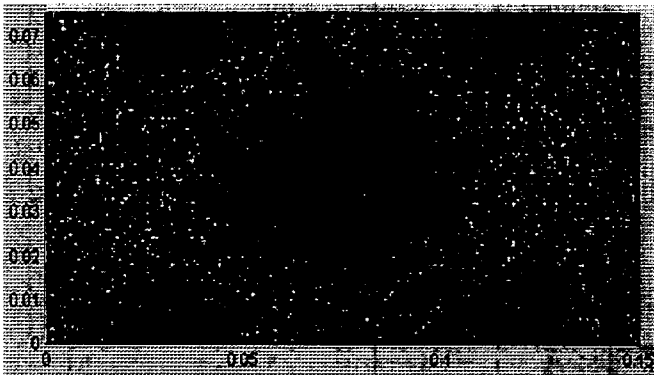


Fig. 7 Speckle pattern acquired during vibration without reference wave phase modulation, $I_2(x, y)$

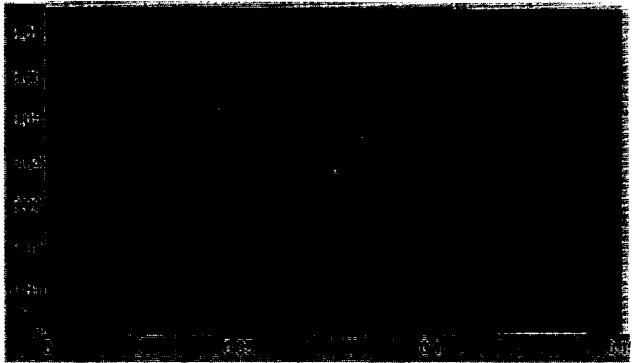


Fig. 10 The difference between the maximum and the minimum of the vibrational displacement amplitude is divided into 256 levels to be expressed as a white-black image

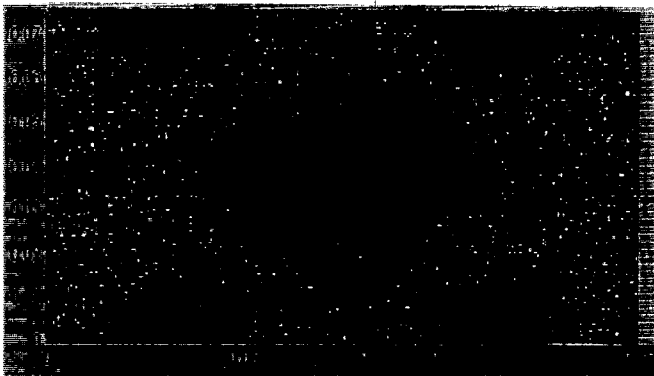


Fig. 8 Speckle pattern acquired during vibration with π amount of phase modulation, $I_3(x, y)$

여기서 $u = \cos(\Psi)$ 이다.

Figs. 6~8은 이러한 확률분포함수를 가지는 $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ 을 보여준다. 그림들은 직각 판의 가진(加振) 중앙점 방향의 관점에서 관찰한 결과이다 (Fig. 3 참조).

3. 결 과

FEM에 의한 얇은 직각 STS 304판의 진동 시뮬레이션을 실행하고 변위 진폭, $a(x_1, y_1)$ 을 구하여 3차원적으로 표현하면 Fig. 9와 같다. 식 (1)로부터 전체 노드들에 대한 가진 방향의 변위들만을 추출한 뒤, 다시 보간법에 의해 각 요소 내부의 임의의 좌표에 대하여 가진 방향 변위를 계산하였다. 이 같은 방법으로 변위의 연속성을 유지하였다. Fig. 9를 이미지 형태로 표현하기 위해 최대 진폭과 최소 진폭 사이를 256개로 등분한 뒤 256 레벨의 흑백색으로 표현하면 Fig. 10과 같다. 방법에서 언급한 대로, Fig. 9의 진폭 데이터를 Bessel 함수에 의해 시간 평균화하여 $J_0(4\pi a(x_1, y_1) / \lambda)$ 를 계산한다. 그리고 식 (5)~(8)의 확률분포를 가지는 기준파와

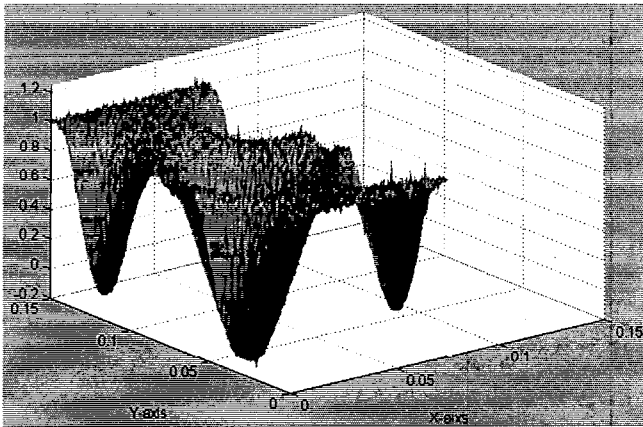


Fig. 11 Vibrational mode of the right-angled STS 304 plate calculated by simulated ESPI

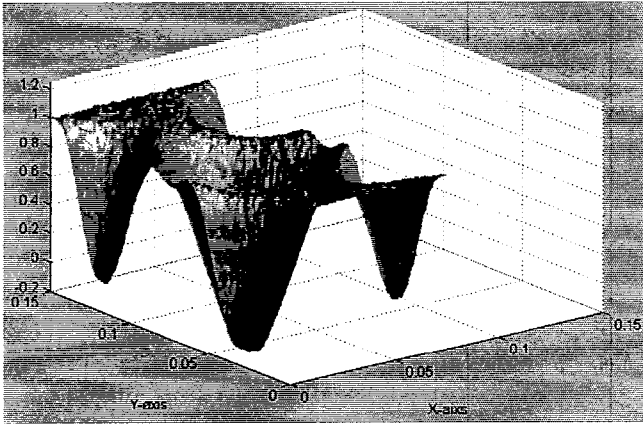


Fig. 12 Speckle noise rejection by median filtering

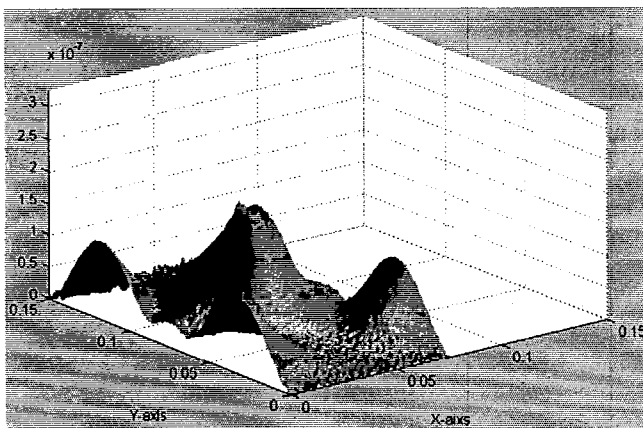


Fig. 13 $4\pi a(x_1, y_1) / \lambda$ are calculated by 1 by 1 inverse matching according to Bessel function $J_0(x)$ with $0 \leq x \leq 3.8317$

물체파의 스펙클 형상으로부터 식 (2)의 $a(x, y)$, $\beta(x, y)$, $\epsilon(x, y)$, $\Psi(x, y)$ 를 구한다. 그리고 다시 이들 스펙클 화상 정보로부터 식 (3)에 의해 $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ 을 계산한다(Figs. 6~8). 주어진 I_1, I_2, I_3 으로부터 식 (4)에 의해 $J_0(4\pi a(x_1, y_1) / \lambda)$ 를 얻게되는데 여기에는 불규칙한 스펙클 잡음이 섞여진다 (Fig. 11). 이 같은 잡음을 제거하는데는 Median 필터링이 가장 효과적이다 (Fig. 12)⁽¹⁶⁾.

이제 Fig. 12의 $J_0(4\pi a(x_1, y_1) / \lambda)$ 로부터 $a(x_1, y_2)$ 를 유도하여야 한다 (위상결편침 과정). Bessel 함수 $J_0(x)$ 는 최대 1과 최소 -0.4028 값을 가진다. 특히 최소값에 대응하는 $J_0(x)$ 의 x 는 3.8317이다. 일차적으로 x 의 범위를 0~3.8317로 하고 Bessel 함수로부터 1대 1 역대응시키면 $4\pi a(x_1, y_1) / \lambda$ 를 얻게된다(Fig. 13). Fig. 13의 일부분은 크기가 3.8317에 접근해 있다. 이 부분은 일단 실제로는 3.8317보다 큰 영역이지만 Bessel 함수에 의해 오히려 감소된 것으로 유추될 수 있다. 따라서 우선 크기가 3.6 이상이 되는 영역만을 검출하고자 하였으며 이를 위해 Sobel Edge Enhancement 기법을 사용하였다⁽¹⁶⁾. 이 기법은 2차원적으로 크기가 감소하는 지역에 대해 그 2차원적 미분이 모두 음수화되는 특징이 있다. 따라서 음수화되는 미분 영역을 의심나는 부분에 대해 강조하여 표현하게 되면 Fig. 14와 같다.

Fig. 14의 표시된 영역에서의 $4\pi a(x_1, y_1) / \lambda$ 값이 3.8317보다 크다고 할 때, Bessel함수의 두 번째 최대값은 x 가 7.0156에서 $J_0(x)$ 이 0.3001이므로, 다시 2차적으로 x 의 범위를 3.8317~7.0156으로 하고 Bessel 함수로부터 1대 1 역대응시키면 새롭게 증가된 $4\pi a(x_1, y_1) / \lambda$ 를 얻게된다. $4\pi / \lambda$ 를 환산하면 진동 변위진폭 $a(x_1, y_2)$ 가 계산된다(Fig. 15). Fig. 16은 Fig. 15를 256 Gray레벨로 표현한 것이다. Fig. 15와 Fig. 16을 Fig. 9와 Fig. 10에 비교해 보면 ESPI에 의한 직각 STS 304판의 진동 변위진폭의 정량적 크기 분포의 정도와 모드가 FEM의 결과와 거의 유사함을 알 수 있다. FEM의 경우 Fig. 9의 가장 진폭 변화가 심한 중간 부분에서는 변위진폭 $3.237E-7$ m가 계산되었으며 전체 변위 진폭에 대한 평균과 표준편차는 각각 $5.224E-8$ 과 $3.594E-8$ 이다. 그리고 ESPI의 경우 Fig. 15의

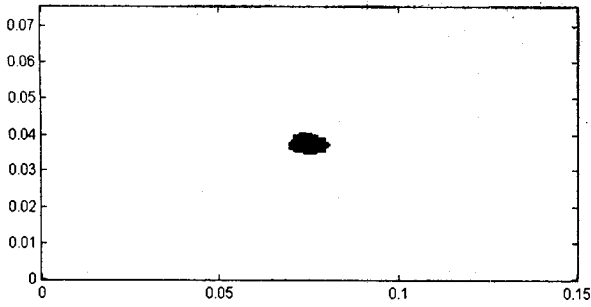


Fig. 14 Only a part of Fig. 13 is expressed where the magnitude is more than 3.6 and the two dimensional magnitude differentiation of the area is negative

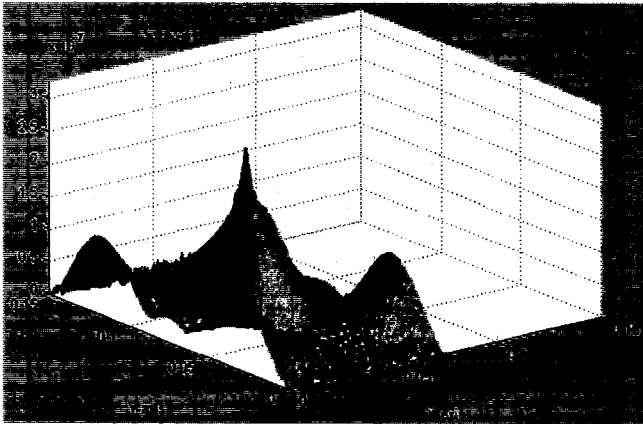


Fig. 15 Vibrational displacement amplitude of the STS 304 plate calculated from the speckle patterns acquired by simulated ESPI

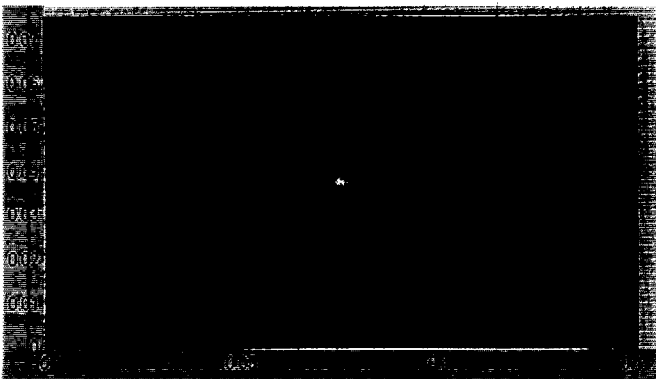


Fig. 16 The magnitude of Fig. 15 is displayed as a white-black image with 256 gray levels

중간 동일한 부분에서 $2.713E-7$ m가 계산되었으며 전체 변위 진폭에 대한 평균과 표준편차는 각각 $5.229E-8$ 과 $3.594E-8$ 이다. 이는 두 그림의 변위 진폭이 전체적으로 매우 유사함을 입증한다.

4. 결 론

본 논문에서 제시한 진동 전의 1장, 그리고 진동 중에 1번의 기준파 위상 경로 변환에 따른 2장, 이렇게 전체 3장의 스펙클 형상들로부터 실제의 진동 변위 진폭을 구하는 새로운 기법은 ESPI에 의한 진동 모드 측정의 기술을 한층 더 향상시킬 수 있다. 결과에서 보여주듯이 이 새로운 ESPI 기법의 결과와 유한요소기법에 의해 계산되는 얇은 직각 STS 304판의 진동 변위 모드 결과는 정량적 크기 분포 면에서도 매우 유사하다. 본 논문에서 새롭게 제시한 진동 변위 진폭을 계산하는 데 필요한 위상결편 침 방법은 앞으로 더욱 그 알고리즘을 개발하여 자동화시키고자 한다.

후 기

본 연구는 1998년 한국학술진흥재단 자유공모과제(과제번호 1998-001-E01212)의 지원으로 연구가 수행되었음. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) K. S. Kim, J. H. Kim, J. K. Lee and S. S. Jarng, 1997, "Measurement of Thermal Expansion Coefficients by Electronic Speckle Pattern Interferometry at High Temperature", J. of Materials Science Letters, Vol. 16, pp. 1753~1756.
- (2) D. J. V. Martin, 1987, "Laser Speckle Photography Measurement of Movement and Strain in Structure at Temperature of 20-52 0°C", Materials Evaluation, Vol. 36(53), pp. 53~56.
- (3) 김경석, 양승필, 1995, "전자처리 Speckle Pattern 간섭법에 의한 균열평판의 Strain 해석에 관한 연구", 대학기계학회논문집 제19권 제6호, pp. 1382~1390.
- (4) J. A. Leendertz, 1970, "Scientific Instruments",

- J. Phys. E., Vol. 3, pp. 214~218.
- (5) J. M. Burch and J. A. Leendertz, 1971, "Scientific Instruments", J. Phys. E., Vol. 4, pp. 1~4.
- (6) D. Kerr, F. M. Santoyo and J. R. Tyrer, 1990, "Extraction of Phase Data from Electronic Speckle Pattern Interferometric Fringes using a Single-Phase-Step Method : a Novel Approach," Opt. Soc. of Am., Vol. 7, pp. 820.
- (7) M. Owner-Petersen, 1991, "Phase Map Unwrapping: A Comparison of Some Traditional Methods and a Presentation of a New Approach," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. Vol. 1508, pp. 73~82.
- (8) T. Rosgen, K. Wozniak and G. Wozniak, 1990, "Image Processing for Laser Speckle Velocimetry using the 2-D Fast Fourier Transform", Appl. Opt., Vol. 29, pp. 5298.
- (9) H. A. Vrooman and Ad. A. M. Maas, 1991, "Image Processing Algorithms for the Analysis of Phase-Shifted Speckle Interference Patterns", Appl. Opt., Vol. 30, pp. 1636.
- (10) M. Owner-Petersen, 1991, "Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry: limitation and Prospects", Appl. Opt., Vol. 30, pp. 2730.
- (11) C. K. Hong, H. S. Ryu and H. C. Lim, 1995, "Least-Squares Fitting of the Phase Map Obtained in Phase-Shifting Electronic Speckle Pattern Interferometry," Opt. Lett. Vol. 20, pp. 931~933.
- (12) Jr. C. V. Jakowatz and D. E. Wahl, 1993, "Eigenvector Method for Maximum Likelihood Estimation of Phase Errors in Synthetic-Aperture-Radar Imagery", J. Opt. Soc. Am. Vol. 10, pp. 2539~2546.
- (13) D. C. Ghiglia and L. A. Romero, 1980, "Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping that Use Fast Transforms and Iterative Methods", Appl. Opt. Vol. 19, pp. 616.
- (14) J. W. Goodman, 1984, "Statistical Properties of Laser Speckle Patterns", in Laser Speckle and Related Phenomena, 2nd ed., J. C. Dainty, ed. (Springer-Verlag, Berlin) pp. 51~54.
- (15) 류현석, 1998, "Precise Phase Measurement in Phase-Shifting Interferometry and its Applications", 포항공과대학교 대학원, 박사학위 논문, pp. 37~44.
- (16) G. A. Baxes, 1994, "Digital Image Processing, Principles and Applications", John Wiley & Sons, Inc., pp. 365~366.