

본 논문은 1997년 교육부 기계공학 연구 연구비에 의해 연구되었음

전자처리 스페클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용한 복합재료의 진동 특성 해석에 관한 연구

김경석*, 정성균**, 정현철****, 양승필***, 김형택****, 김동일****, 이승환*****

A Study on the Vibration Characteristics Analysis of Composite Materials by Using Electronic Speckle Pattern Interferometry Method

Koung-Suk KIM*, Sung-Gyun JUNG**, Hyun-Chul JUNG****, Seung-Pil YANG***, Hyoung-Tek KIM****, Dong-Iel KIM****, Seong-Hwan LEE*****

ABSTRACT

The ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) is a real time, full-field, non-destructive optical measurement technique that allows static and dynamic deformation analysis and surface shape measurements of engineering structures, e.g. turbine blades, vehicle engine components, body panels, etc. This technique is very similar to holographic interferometry, but uses a solid static camera and an image processing board for recording and digital processing of speckle patterns. In this paper, it is presented that FEM results for the free vibration of symmetrically laminated composite as (30/-30/90)s . The natural frequencies of laminated composite rectangular plates having the particular boundary condition are experimentally obtained. In order to demonstrate the validity of the experiment, FEM analysis using ANSYS was performed and natural frequencies experimentally obtained is compared with calculation by FEM analysis. The results obtained from both experiment and FEM analysis show a good agreement.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자스펙클패턴간섭법), Vibration Analysis(진동해석), Composite Materials (복합재료), FEM Analysis(유한요소 해석)

1. 서론

주파수 안정도가 매우 높은 레이저의 개발로 인해 레이저를 이용한 계측법의 연구가 활발히 진행되고 있으며,

많은 분야에서 레이저를 이용한 새로운 기술이 개발되고 있다. 레이저 광(光)은 단색성, 가간섭성, 집속성이 좋고, 에너지의 공간적, 시간적 집중, 짧은 Pulse광의 발생이 가능하다는 특징이 있다⁽¹⁾.

* 조선대학교 기계공학부
** 서울산업대학교 기계공학과
*** 동아인재대학 자동차기계계열
**** 조선대학교 대학원
***** 서울산업대학교 대학원

1965년 Stetson과 Powell이 처음으로 진동분야에서 HI(Holographic Interferometry)를 제시하였으며, 가속도계를 진동하고 있는 물체에 부착함으로써 진동상태를 측정해야 하는 기존의 측정 방법과는 달리, HI는 물체의 순수한 진동상태 그대로를 측정면 전체에 걸친 진폭 분포와 Nodal Line으로 측정 할 수 있었다^{(2),(3)}.

복합재료의 진동 특성에 대한 실험과 연구 논문은 많이 발표되었지만, 대표적으로, Ashton과 Anderson은 한쪽 단이 고정된 Boron-Epoxy 복합 판의 고유진동수와 진동모드를 실험하였고(1969), 같은 해 Bert와 Mayberry는 비대칭 단일방향 적층판에 대해서(1969), Clary는 단일방향의 복합판넬을 이용한 실험을(1972), Crawley는 외팔보와 셸을 이용한 고유진동수와 진동모드 실험을 행하였다(1979). 또한 일본의 一宮(Ichimiya)은 한쪽 단이 고정된 사각 판의 정상 응답 해석을, 成田(Narita)는 Ritz법을 이용한 고유진동 해석과, 복합재료 판 이론에 근거한 모델링과 고유진동을 해석하였으며, 細川(Hosokawa)는 판 형상에 따른 자유진동 해석을 했다⁽⁹⁾. 최근 국내의 몇몇 대학과 연구소에서도 관심을 두고 활발한 연구 활동을 하고 있다. 하지만, 이러한 실험결과가 말해주듯이 복합재료는 일반 등방성 재료와는 달리 완전한 해석이 어렵다.

본 연구에서는 기존의 홀로그래피 간섭법중에 시간평균 홀로그래피법에 바탕을 두고 있는 전자처리 스페클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용하여 단일방향 탄소섬유 강화 복합재에 Matrix가 PEEK이고, 적층구성이[30/-30/90]이며, 길이 대 폭의 비가 2:1인 양단 고정된 AS4/PEEK 복합재 적층판의 진동 실험을 통해, 동일한 실험조건으로 행한 등방성 평판(STS304)의 실험 결과와 비교, 분석하여 복합재 적층판의 진동 특성을 해석 하고자 한다. 또한 실험 결과값과 유한요소 해석 상용 프로그램인 ANSYS⁽⁸⁾에 의한 해석 결과를 비교함으로써 본 실험 방법의 측정 정밀도와 적용 가능성에 대해 검토 하고자 한다.

2. 원 리

2.1 ESPI에 의한 진동 계측 이론

Fig. 1은 ESPI를 이용한 진동 측정의 기본 광학계로서, 홀로그램 대신 CCD 카메라를 기록 및 재생용으로 사용하게 될 경우 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형전, 변형후 광의 세기 분포는 식(1)로 표현 할 수 있다.

$$I_{before} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos\phi$$

$$I_{after} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (1)$$

여기서, I_O 와 I_R 은 물체광과 참조광의 강도이며, ϕ 와 $\Delta\phi$ 는 스페클의 위상과 변형된 위상이다.

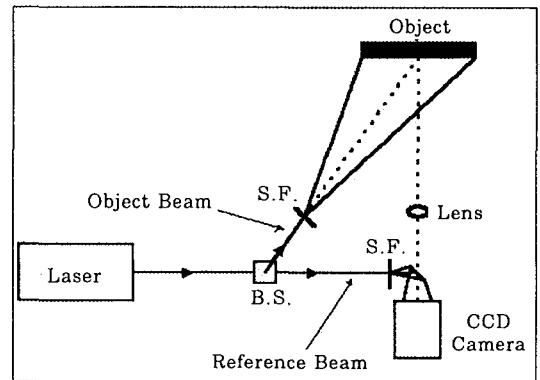


Fig. 1 Optical arrangement of the ESPI

TV System은 물체에 변위가 일어나기 전의 이미지의 세기 분포에 해당되는 전자적인 비디오 신호를 CCD의 수광소자를 통하여 화상처리장치의 메모리에 기록하고, 변위가 발생하면, 그에 상응하는 이미지의 강도 분포를 비디오 신호로 전환하여 변형전의 이미지 신호와 전자적으로 감산 처리한다. 출력 카메라의 신호 I_{before} 와 I_{after} 가 입력 화상의 강도에 비례한다면, 감산된 빛의 강도는 식(2)와 같다.

$$I = I_{before} - I_{after} = 2\sqrt{I_R I_O} [\cos\phi - \cos(\phi + \Delta\phi)] \quad (2)$$

이때, 빛의 휘도(Brightness) 분포식은 식(3)으로 정의되므로 밝고 어두운 줄무늬 패턴이 나타나는 것이다.⁽³⁾

$$B = K \left| \sqrt{I_R I_O} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right| \quad (3)$$

2.2 복합재 적층판의 응력-변형을 관계

복합재 적층판을 구성하는 각각의 층들은 직교성을 갖는 얇은 판들이므로 각 층을 평면응력 상태로 가정하면, 두께 방향의 응력 성분들은 무시할 수 있다.

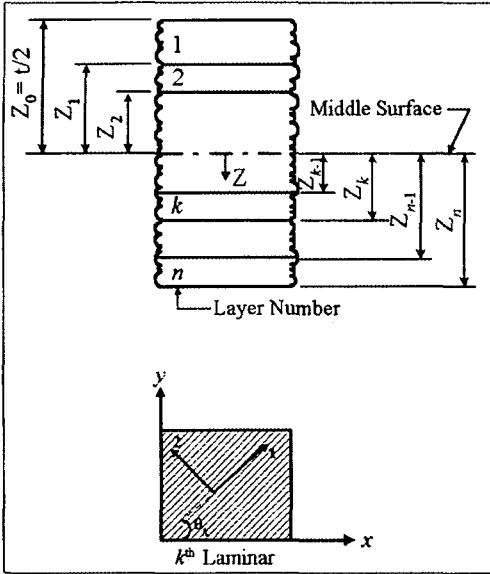


Fig. 2 Geometry of an n -layered laminate and coordinate system of k^{th} lamina

Fig. 2와 같은 복합재 적층판에 있어서 재료의 섬유방향을 1축, 그것에 수직인 횡방향을 2축이라 하고, 판 형상에 대한 기하학적 축으로 가로방향을 x , y 축이라 한다면, k 번째 층에 대한 1, 2축 방향으로의 응력과 변형률의 관계는 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

이 경우는 Q_{ij} 인 4개의 독립적인 탄성계수를 갖게 되는데 환산강성(Reduced stiffness)이라고 하는 이 탄성상수들은 복합재 적층판에 있어서 일반적인 공학 상수들과 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

또한, 적층판에서 u, v, w 를 x, y, z 방향으로의 변위라고 하

면, 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

본 연구에서는 고전적층판 이론에 근거하여 이론을 전개함에 있어서, Kirchhoff 가설에 의해 변위장을 z 의 1차항까지만 가정한 것으로, 두께좌표 z 에 대한 선형 함수로 u, v, w 를 다음과 같이 표현 할 수 있다⁽⁹⁾.

$$u = u_0(x, y) + z u_1(x, y)$$

$$v = v_0(x, y) + z v_1(x, y)$$

$$w = w_0(x, y)$$

여기서, u_0, v_0, w_0 는 중앙면의 변위이다. Kirchhoff 가설로부터 층간 전단 변형 $\epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$ 를 무시할 수 있다. n 개의 층(Lamina)으로 구성된 복합 적층판에 대하여 t 를 전체 판의 두께라고 할 때 복합재 적층판의 구성과 좌표계는 Fig. 2와 같다. 식(4)에 중립 면에서의 변형과 판 곡률과의 관계식을 적용하면, 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$[\sigma]_k = [\bar{Q}]_k [\epsilon^0] + z [\bar{Q}]_k [\kappa] \quad (6)$$

여기서, \bar{Q} 와 κ 는 각각 적층판 중립면에서의 면강성 계수와 곡률이다.

복합재 적층판에 작용되는 응력의 합력, $N(N_x, N_y, N_{xy})$ 은 두께방향으로는 크기가 0이므로 면내력이라고도 한다.

n 층 복합재 적층판 전체에 작용되는 합성력 N 과 합성 모멘트 $M(M_x, M_y, M_{xy})$ 은 식(6)과 같이 간단하게 표현하는 방법으로, 식(7)과 같이 복합재 적층판에 대한 구성방정식으로 보다 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, A 는 인장 강성(Extensional stiffness), B 는 커플링 강성(Coupling stiffness), D 는 굽힘 강성(Bending stiffness)이다.

3. 실험 및 해석

3.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편인 AS4/PEEK 적층판은 탄소 강화 섬유 제품중의 하나로서, 사용 섬유는 AS4(12K)(Hercules Co.(U.S.A) 제품)이며, 사용수지는 결정성 열가소성 PEEK($T_g=143^\circ\text{C}$, $T_m=334^\circ\text{C}$)(I. C. I.(U.K) 제품)이다. 성형 방법은 410°C 에서 5분간 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 프레스 성형을 하였다. 시험편의 측정 면에는 금속광택을 제거하기 위하여 백색 도료를 도포 하였다. 또한, 시험편은 시험편 장착을 위해 제작된 전용 가이드에 에폭시와 나사로 접착 및 체결되었다.

시험편 적층구성은 $[30/-30/90]_6$ 의 6 Ply로 구성되었다. Table. 1에 시험편의 물성치를 나타내었다.

Fig. 3에 시험편의 형상과 각 모드별 가진 위치를 나타냈다. 가진 위치는 ANSYS 해석에 의해 각 모드별 진동 진폭이 최대인 지점을 택하였으며, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 모드별로 각각 (E, 8), (I, 8), (A, 5), (I, 4), (I, 3) 위치에 가진을 행하였다. 또한, 양단 끝부분의 빗금 부분은 전용 가이드에 에폭시와 나사로 접착 및 체결된 부분을 나타낸 것이다.

Table 1 Material properties of specimen

E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	E_{33} [GPa]	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} [GPa]	G_{23} [GPa]	G_{13} [GPa]	ρ [kg/m ³]
138.6	10.07	9.20	0.32	0.50	0.32	4.117	3.410	4.117	1600

여기서, E는 Young's modulus이며 ν 는 포와송의 비이고, ρ 는 재료의 밀도이다.

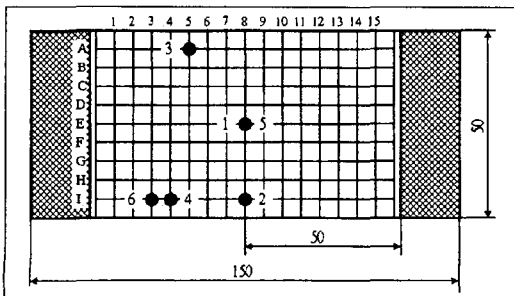


Fig. 3 Shape and exciting points of AS4/PEEK laminate

3.2 가진(加振) System

본 실험에서는 광학 정반 상에 가진 장치인 스피커 (50Hz~20kHz)를 설치하고 Laser가 조사되는 시험편의 뒤쪽에서 Fig. 3에 나타낸 각 점선의 교점 위치에 진동을 가하였다. Fig. 4는 본 실험에서 이용한 가진 시스템 구성을 나타냈다

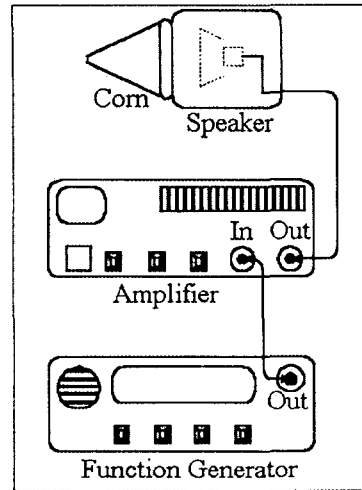


Fig. 4 Exciting system used in experiment

3.3 광학계의 구성

본 실험에서 구성한 광학계의 배치도를 Fig. 5에 나타냈다.

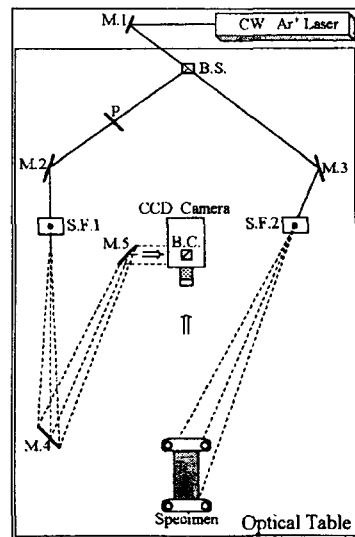


Fig. 5 Arrangement of optical system

여기서, B.S.는 Beam Splitter, M은 Mirror, P는 Polarizer, B.C.는 Beam Combiner, 그리고 S.F.는 Spatial Filter이다.

정반의 아래에 위치한 CW Ar⁺ Laser에서 편광되어 나온 레이저 빔이 Mirror M1에 의하여 정반 위로 올려지게 된다. M1을 지난 빔은 Beam Splitter B.S.에 의하여 두 개의 빔으로 나뉘게 되고, 이때 물체 쪽으로 향하는 빔을 물체빔(Object Beam), 곧바로 CCD 카메라 쪽을 향하는 빔을 참조빔(Reference Beam)이라 한다.

B.S.에 의해 나뉘어진 두 빔은 각각 일정한 경로를 거쳐 CCD 카메라의 수광소자로 들어가게 된다. 이때, B.C에 의하여 참조빔과 물체빔이 합해져서 CCD 카메라의 수광소자로 들어가게 되는데, 시험편에 변형이 발생하면 물체빔의 위상이 달라지게 된다. 이 변형된 물체빔과 참조빔이 서로 간섭을 일으키며 관측자가 모니터상에서 보게 되는 Fringe Pattern을 형성하게 된다. 고유진동수의 측정은 시험편의 뒤에서 정현파를 가진함으로서 그 시험편이 가진 고유진동수를 찾을 수가 있는데, 일정한 모드 형상을 지니며 변화할 때 고유진동수 대역을 구할 수가 있다.

3.4 복합재 적층판의 진동 해석

본 연구에서는 유한 요소 해석 상용 프로그램인 ANSYS 5.2를 사용하였고, 양단 고정된 AS4/PEEK 복합재 적층판 시험편의 모델링은 'SHELL99' Element Type을 이용하였다. 'SHELL99'는 3-D 8-Node Shell Element를 기본으로 100층까지 적층할 수 있으며, 각각의 층에 대해서 적층각(섬유방향)과 두께, 재료의 이방성 등을 고려 할 수 있는 Element 형태이다.

본 해석에 사용된 Mode-Frequency analysis는 Subspace iteration method를 사용하였고, 6개 모드의 형상과 고유 진동수에 대해서만 해석 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과와 해석결과와의 비교

실험을 위해 자체 제작한 인장시험기 형상의 문제로 인하여 시험편상에 그어 놓은 모든 선들의 교점에 대해 실험을 행하지는 못하였으며, 유한요소 해석에 의해 시험편의 진동 진폭이 최대인 점만을 고려하여, 총 6개의 가진점에 대해서 진동 모드를 관측 하였다. 본 실험을 통하여 얻어진 주파수와 ANSYS 해석에 따른 주파수를 Table. 2에 비교하였다.

Table 2 Result frequencies in experiment compared with analysis

Mode	Experiment[Hz]	Analysis[Hz]
1	301	301.7
2	760	757.2
3	845	834.6
4	1577	1577
5	1810	1671
6	2645	2560

Fig. 6~Fig. 8은 인장력이 작용하지 않은 순수 진동에 따른 진동 모드의 형상을 2, 4, 6모드에 대해 각각 FEM 해석결과와 비교한 것이다.

각 모드별 가진점은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 그림에서 밝은 부분은 평판 시험편에서 변형이 일어나지 않은 영역을 나타내며, 이 영역은 Nodal line이라 한다. 각 모

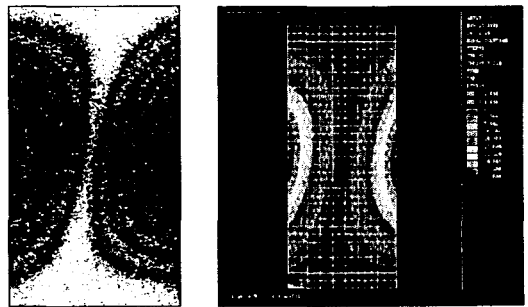


Fig. 6 Comparing fringe patterns of vibration mode 2 when (1, 8) point was excited

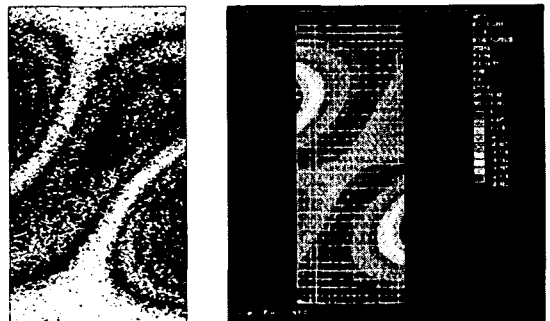


Fig. 7 Comparing fringe patterns of vibration mode 4 when (1, 4) point was excited

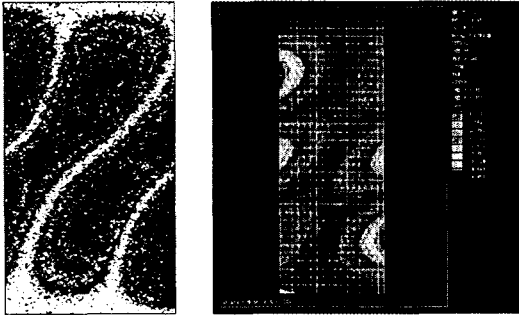
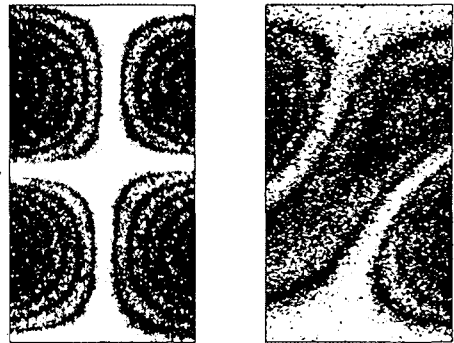


Fig. 8 Comparing fringe patterns of vibration mode 6 when (1, 3) point was excited



(a) STS304 (b) AS4/PEEK

Fig. 9 Comparing fringe patterns of vibration mode 4

드별 형상은 x, y방향의 Nodal line의 개수로써 구분되며 고차모드로 갈수록 개수가 많아짐을 알 수 있다.

실험을 통해 얻은 주파수는 동일 진동 모드를 유지하는 동안, 일정한 주파수 대역을 가지고 있었으며, 실험상에서의 주파수는 진동 모드가 가장 확연히 나타났을때의 주파수 값이다.

각 모드별 형상은 그림에서 볼 수 있듯이 실험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 재료별 진동 모드의 비교

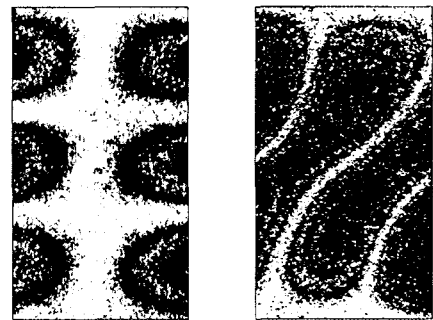
복합재료의 진동 모드형상과 비교하기 위해 스테인레스강인 STS304에 대해 동일한 크기 및 형상을 갖는 시험편을 가공하여 실험하였으며, STS304의 물성치를 Table 3에 나타냈다.

Table 3 Properties of specimen

	E (가르탄성 계수)	ν (포와송 비)	ρ (밀도)
STS304	193Mpa	0.3	8.0 g/cm ³

실험 방법은 AS4/PEEK 복합재 적층판과 동일하게 행하였다. Fig. 9와 Fig. 10에 각각 4모드와 6모드에 대하여 두 재료에 대한 결과를 비교하여 나타냈다.

그림을 통하여 알 수 있듯이 등방성 재료인 STS304에 있어서는 Nodal line이 x, y방향에 평행하게 형성되지만, 이방성 재료인 AS4/PEEK 복합재에 있어서는 Nodal line이 일정 각도만큼 기울어져 있음을 볼 수 있



(a) STS304 (b) AS4/PEEK

Fig. 10 Comparing fringe patterns of vibration mode 6

으며, 특히 최외측 적층판의 적층 각도가 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

4.3 고찰

각각의 진동 모드는 동일한 모드 형상이 관측되는 일정한 주파수 대역을 가지고 있었다. 각 모드별 주파수 대역을 정리해 보면, Mode 1은 300 Hz~600 Hz, Mode 2는 710 Hz~820 Hz, Mode 3은 830 Hz~890 Hz, Mode 4는 1565 Hz~1610 Hz, Mode 5는 1810 Hz~1845 Hz, Mode 6은 2645 Hz~2710 Hz이다. 이를 통해 고차 모드 보다는 저차 모드에서 주파수 대역이 넓게 나타남을 알 수 있었다. 이것은 각각의 진동 모드에 대해 동일 진폭에 따른 모드 형상을 관측하였기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서, 진폭을 변화시킴으로써 보다

정확한 고유주파수를 얻을 수 있다. 이때, 진폭이 증가하면 줄무늬의 간격이 줄어들며, 줄무늬의 개수가 많아지지만 Nodal line의 수 또는 그 위치에는 변함이 없었다.

5. 결 론

본 연구에는 시간평균법을 기본으로 한 ESPI법을 이용하여 AS4/PEEK 복합재 적층판을 시험편에 대한 고유진동수값과 모드 형상을 측정하였고, 이를 등방성 재료인 STS304 평판에 대한 진동 실험 결과와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양단 고정 의 경계조건을 갖는 AS4/PEEK 복합재 적층판에 대해서 실험 결과와 유한 요소 해석 결과에 의해 얻어진 고유진동수 값이 잘 일치하였다.
- 2) 복합재 적층판에 있어서 모드 형상(Mode Shape)은 평판과 비교하여, 일정한 기울기를 갖는 것으로 보아 최외층(最外層) 적층각의 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.
- 3) 단일 등방성 재료인 평판뿐만 아니라, 이방성 복합재 적층판의 고유진동수값과 모드 형상 측정에 있어서 본 ESPI법이 유용함을 확인 할 수 있었다.
- 4) 고유진동수와 변위는 정량적으로 평가 할 수 있었으며, 모드 형상은 정성적인 해석이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. Tomas, Kreis: "Holographic Interferometry," Akademie Verlag GmbH, Berlin, 1996.
2. 深堀勝市 · 山本 廉司 · 材田正義: "ホログラフィ干渉法による振動解析法," 三菱重工技報, Vol. 8, No. 3, pp. 15~25, 1971.
3. Gary L. Cloud: "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, 1995.
4. Smith, Howard Michael: "Principles of Holography, 2nd Edition," John Wiley Sons, Inc., pp. 220~267, 1975.
5. 이대길: "복합재료역학 및 가공론," 성안당, 1995.
6. T. J. Anderson and A. H. Nayfeh: "Natural Frequencies and Mode Shapes of Laminated Composite Plates: Experiments and FEA," Journal of Vibration and Control, pp. 381~414, 1996.
7. Ettemeyer A. · Wang Z. · Waltz T.: "Applications of Speckle Interferometry to Material Testing," KSME, 1996.
8. "Dynamics, User's Guide for Revision 5.2 ANSYS," Swanson Analysis System. Inc., 1993.
9. 이기형: "ANSYS를 이용한 복합적층 사각판의 진동 특성에 관한 연구," 한국산업안전학회지, 제 1권 제2호, pp. 37~44, 1997.
10. Frank L, Stasa: "Applied Finite Element Analysis for Engineers," Saunders College Publishing, 1985.