

# 전자처리 스페클 패턴 간섭법을 이용한 복합재료의 진동 특성 해석에 관한 연구

김형택\*, 정현철\*, 김경석\*\*, 양승필\*\*\*

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

Hyung-Tek Kim, Koug-Suk Kim, Hyun-Chul Jung, Seong-Pil Yang,

### ABSTRACT

The Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) has been applied to many technical problems such as deformation and displacement measurement, strain visualization and surface roughness monitoring.

Composite materials have various complicated characteristics depending on the ply materials, ply orientations, ply stacking sequences and boundary conditions. Therefore, it is difficult to analyze composite material. For efficient use of composite materials in engineering applications, the dynamic behavior such as, natural frequencies and modal patterns should be identified. This studying presents FEM results for the free vibration of symmetrically laminated composite as [30/-30/90]<sub>s</sub>. The natural frequencies of laminated composite rectangular plates having the boundary condition( 2-edge clamped) 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 calculated by FEM analysis. The results obtained from both experiment and FEM analysis show a good agreement.

**Key Words** : Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), Composite Materials, Vibration Mode Analysis, 2-Edge Clamped, FEM.

### 1. 서론

일반적으로 진동 측정을 위한 방법으로는 여러 가지가 있지만, 오늘날 레이저의 출현에 의해 많은 새로운 측정법의 개발이 가능하게 되었다. 레이저광은 단색성, 가간섭성(Coherency)이며, 지향성, 집속성이 좋고, 에너지의 공간적 시간적인 집중, 짧은 Pulse광의 발생이 가능하다는 특징<sup>4)</sup>을 가지고 있다.

전자처리 스페클 패턴간섭법(ESPI)<sup>9)</sup>은 측정물에 아무런 처리를 할 필요가 없고 완전한 비접촉 측정이 가능하며 또한 감도가 높은 잇점을 가지고 있다. 높은 비강도와 비강성을 갖는 복합재료는 최근 항공 우주 분야 뿐만 아니라 자동차, 선박, 스포츠용품 등 다양한 산업분야에서 사용되고 있고, 많은 종류의 복합재료들이 개발되고 있으며, 그 응용성이 더욱 증대되고 있다<sup>3)</sup>.

\* 조선대학교 대학원

\*\* 조선대학교 기계공학부

\*\*\* 동아전문대학 금형설계과

본 연구에서는 최근의 광학을 이용한 측정법의 한가지인 ESPI를 이용하여 탄소섬유 라미나(Carbon fiber laminar)에 Matrix가 PEEK로 구성되고, 적층각도가 [30/-30/90],인 복합재료 AS4/PEEK의 진동 특성을 해석하고자 한다. 또한, 실험에서 얻은 결과와 유한요소 해석 상용 프로그램인 ANSYS<sup>(1)</sup>에 의한 해석 결과와 비교함으로써 본 실험 방법의 측정 정밀도와 문제점에 대해서도 검토하고자 한다.

## 2. 원리

### 2.1 홀로그래피 간섭법(HI)의 이론

홀로그래피 간섭법(HI)<sup>(4)</sup>의 기본 원리는 홀로그래피에 의해 형성된 이미지는 원래의 물체, 또는 또다른 물체의 홀로그래피 이미지와 간섭적으로 비교가 가능하다는 것이다. 물체가 응력, 진동, 또는 열에 의한 영향을 받는다면 간섭줄무늬 패턴은 수분 이내로 화상 안에서 관측된다. 즉, 줄무늬의 수로써 물체의 변위량을 결정할 수 있다. 홀로그래피 간섭법에는 이중노광법(Double - Exposure Holographic Interferometry), 실시간법(Real-Time Holographic Interferometry), 시간평균법(Time-Average Holographic Interferometry) 등이 있다.

### 2.2 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)

ESPI란 스페클 패턴 간섭법(Speckle Pattern Interferometry)에 TV 카메라와 화상처리 장치를 조합시켜 변형을 측정하는 방법을 말한다. 먼저, 어떠한 초기상태에 있는 물체의 스페클 패턴을 카메라로 촬영하여 화상처리 장치의 메모리에 저장시킨다. 그 다음 물체가 변형을 일으킨 후에 새로운 패턴이 발생되기 때문에 이것을 새로운 메모리에 저장한다. 결과적으로, 이 두 개의 화상 데이터를 감산함으로써 간섭 줄무늬를 얻을 수 있다. Laser와 같이 Spatial coherence가 우수한 빛으로 광학적으로 거친 표면을 조사하여 그 물체의 사진을 찍으면 Fig.2.1과 같이 곡식의 알갱이가 흩뿌려진 것같은 위치에따라 무작위적으로 변화하는 밝기의 분포로서 물체의 모습이 나타난다. 이러한 현상을 스페클 효과(Speckle Effect)라 한다.

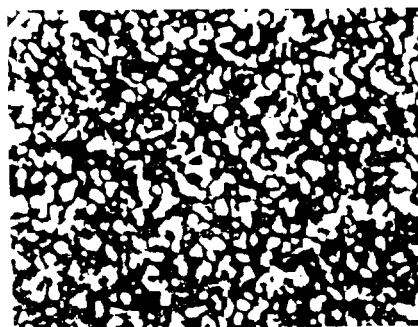


Fig. 2.1 Shape of speckle pattern.

이것은 Random한 위상변화를 가지는 반사광이 관측면상의 각 점에서 겹치면서, 서로 간섭을 일으키기 때문에 발생 하는 것이다. 이때, Image Plane (또는 Screen)에 형성되는 Objective Speckle의 평균 크기  $S_{obj}$ 는

$$S_{obj} \approx 1.2 \lambda L/D \quad (2-1)$$

와 같이 쓸 수 있다.

### 2.2 적층판의 미소 형변형 해석

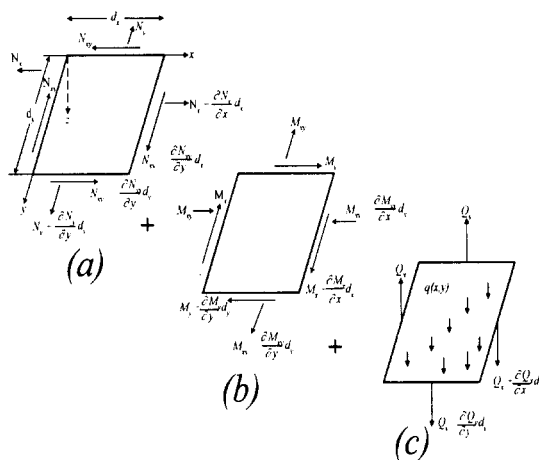


Fig. 2.2 Stress resultants and external loads acting on laminate.

Fig. 2.2와 같이 적층판이 3차원 적층으로 구성되고, 각각의 laminar는 단일성, 비균질성, 이방성판으로 완

전 적층되었다고 가정하였을 때 적층판의 미소 횡변형 해석은 고전 적층이론과 힘의 평형 방정식에 기초를 두어 다음식으로 정리 할 수 있다<sup>2)</sup>.

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (2-3)$$

$$Q_x = \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \quad (2-4)$$

$$Q_y = \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \quad (2-5)$$

### 2.3 적층판의 횡진동 해석

Fig. 2.2에서 적층판의 횡진동 운동방정식은 뉴턴 제 2법칙을 근거로 하여 다음과 같이 유도할 수 있다<sup>2)</sup>.

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = \rho_0 \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} \quad (2-6)$$

여기서,  $\rho_0 = \rho h$ ,  $\rho$  = density of laminate,  $h$  = thickness of laminate,  $u_0 = u_0(x, y, t)$ 이다. 또한, 판의 가로와 세로의 비가  $a : b$ 이고, 모드  $m$ 에서의 고유진동수 ( $m = n = 1$ )는 식(2-7)으로 정의되고, 모드shape 함수는 식(2-8)로서 정의된다<sup>2)</sup>.

$$\omega_{11}^2 = \frac{\pi^4}{\rho_0} \left[ \frac{D_{11}}{a^4} + \frac{2(D_{12} + 2D_{66})}{a^2 b^2} + \frac{D_{22}}{b^4} \right] \quad (2-7)$$

$$\omega(x, y) = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (2-8)$$

### 2.4 유한요소 해석에 의한 복합 적층판의 모델링

복합적층판에 대한 고유진동수와 모드형상을 구하기 위한 모달해석이 ANSYS Mode-Frequency Analysis(ANTYPE,MODAL)를 사용하여 해석하였다. 이 해석형태는 선형, 비감쇠, 자유진동을 전제로 하고 있고 운동의 평형방정식은 질량 행렬과 강성행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2-8)$$

선형계의 자유진동에 있어서 절점변위,  $u$ 는 다음과 같이 조화적인 함수로 나타낼 수 있다.

$$\{u\} = \{\Phi\}_i \omega \cos_i t \quad (2.9)$$

진동의 1주기를  $T$ 라고 하면  $2\pi/T = \omega$ 로 나타내며 rad/sec로 나타낸다. 이것을 절점 변위식에 대입하여 다음 방정식을 얻는다.

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\Phi\}_i = \{0\} \quad (2.10)$$

유용해를 갖기 위해서는 위식에서  $([K] - \omega_i^2 [M])$ 의 행렬식이 0이 되어야 한다.

$$|[K] - [\lambda][M]| = 0 \quad (2.11)$$

따라서, 고유치 문제가 되는데 ANSYS 모달해석에 의하여 계의 고유진동수를 나타내는  $\lambda$ 와 모드형상을 나타내는 고유벡터  $\{\Phi\}$ 가 계산되고 해석결과로 고유진동수와 모드형상을 얻을 수 있게 된다<sup>11)</sup>.

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

#### 3.1.1 시험편

Table. 3.1 Material properties of specimen.

$E_{11}$ [GPa]	$E_{22}$ [GPa]	$E_{33}$ [GPa]	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$	$G_{12}$ [GPa]	$G_{23}$ [GPa]	$G_{13}$ [GPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
138.6	10.07	9.20	0.32	0.50	0.32	4.117	3.410	4.117	1600

본 실험에서는 두께가 0.84mm이고, [30/-30/90]<sub>s</sub>의 적층구성을 갖는 AS4/PEEK 복합재료를 시험편으로 사용하였다. Table 3.1에 시험편 특성값을 나타내었고, Fig. 3.1은 그 형상을 나타내었다.

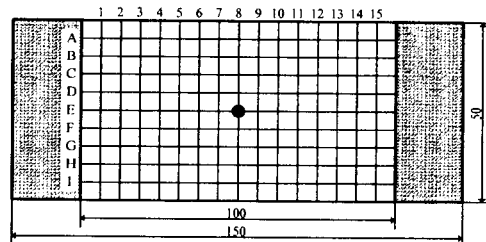


Fig. 3.1 Shape and details of specimen [mm].

### 3.1.2 광학계의 구성

Fig. 3.2는 본 실험에 사용된 광학계의 배치도를 나타내고 있다.

하나의 레이저광을 Beam Splitter에 의해 참조광과 물체광으로 분리하여 CCD Camera의 수광소자에서 간섭을 일으키도록 하였다.

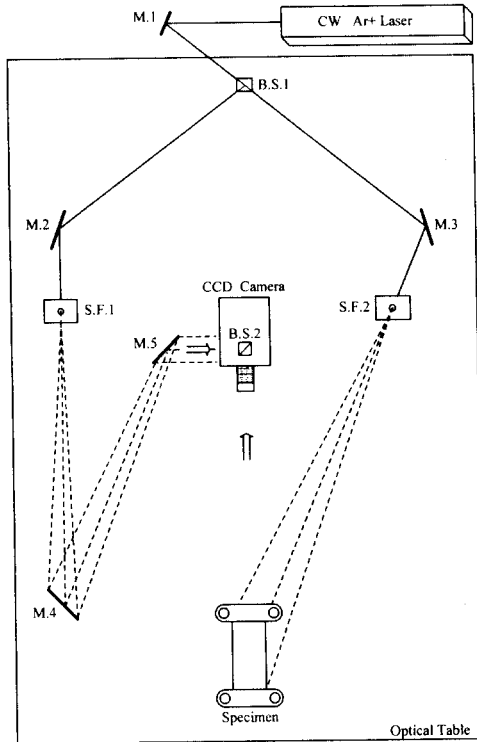


Fig. 3.2 Arrangement of the optical system

### 3.2 가진 시스템

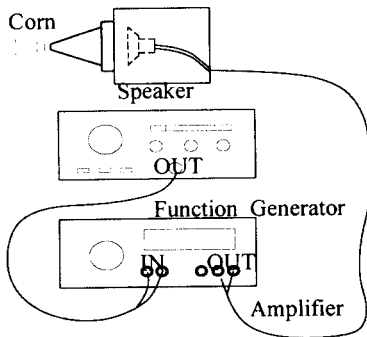


Fig. 3.4 Exciting System used in experiment.

본 실험에서 사용된 가진시스템의 개략도를 Fig. 3.4에 나타냈다. 또한 시험편의 양단 고정을 위한 Jig를 제작 하였으며, 스피커는 일정한 가진점에 대하여서만 집중된 음압을 통하여 가진할 수 있도록 Frame을 제작 하였고 스피커의 음이 방출되는 부분에 직경 약 8mm의 Corn을 제작하여 부착 하였다. 또한 FEM 해석을 위하여 ANSYS사의 ANSYS5.0를 사용하였으며, 시험편의 경계조건과 물성치를 입력하여 그 결과를 비교 하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1. 실험결과와 FEM해석결과와의 비교



Fig. 4.1 Mode in experiment at 300Hz (point : E,8).

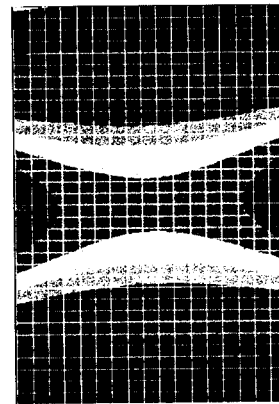


Fig. 4.2 Mode in FEM analysis at 301.7Hz.



Fig. 4.3 Mode in experiment at 740Hz (point : E,8).

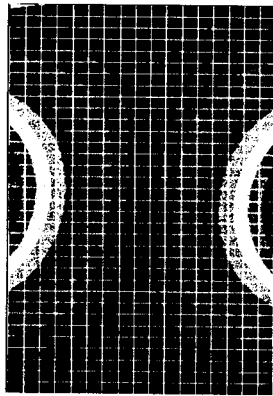


Fig. 4.4 Mode in FEM analysis at 757.2Hz.

## 5. 결 론

본 연구는 시간평균법을 기본으로 한 ESPI법을 이용하여 AS4/PEEK 복합재료를 시험편으로 하여 진동모드를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ESPI를 이용하여 AS4/PEEK 복합재료의 진동모드를 해석하고, 이를 FEM 해석 결과와 비교해 본 결과 최대 오차율 5% 이내로 비교적 잘 일치 하였다. 따라서, 본 연구에서 구성한 실험장치가 고정변의 경계조건을 비교적 만족 시킨다고 확신 할 수 있었고, ANSYS 모달 해석도 정확하게 수행 되었다.
- 2) 복합 적층판에 있어서 고유 진동수값과 모드 형상은 적층각의 영향을 받는다는 사실을 확인 할 수 있었다.

## 6. 참 고 문 헌

1. Warbuton, G. B. "The Vibration of Rectangular plates", proc. Instn. Mech. Engrs, London, Vol.168, pp. 371~384, (1954).
2. T. J. Anderson. "Natural Frequencies and Mode Shape of Laminated Composite Plates: Experiments and FEA", Journal of Vibration and Control, pp. 381 ~ 414. (1996).
3. Ronald F. Gibson, "Principle of composite material mechanics", McGraw-Hill, Inc. pp. 250~315, (1994).
4. P. K. Rastogi, "Holographic Interferometry Principles and Methods", Springer-Verlag, pp. 2~316, (1994).
5. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis", Cambridge University press, pp. 21~36, 343~407, 440~475, (1995).
6. J. C. Dainty, "Laser Speckle and Related Phenomena", Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 203~252, (1984).
7. 이기형, "ANSYS를 이용한 복합 적층 사각판의 진동 특성에 관한 연구", 한국산업안전 학회지, 제12권 12호, (1997).
8. 정현철, "전자처리 스페클 패턴 간섭법에 의한 양단이 고정된 직사각형 평판의 진동모드 측정에 관한 연구", 석사논문, pp. 3~30, (1996).
9. Ichirou Yamaguchi, "Fringe formations in Deformation and Vibration Measurements using Laser light", Elsevier Science Publishers B. V., pp. 273~340, (1985).
10. John F. ready, Robert K. Erf, "Application of Laser Speckle to Measurement" in the main topic 'Laser Applications', Academic Press, Inc., London, pp. 2~62, (1980).
11. "Dynamics, user's Guide for Revision 5.0", ANSYS. Swanson Analysis System. Inc, (1993).