

ESPI법에 의한 인장을 받는 복합재 평판의 진동 특성 해석

Vibration characteristics analysis on the composite laminate plate under the tensile loading by ESPI method

김경식(조선대학교 기계공학부), 양승필(동아인재대학 자동차기계계열), 김중수(조선대학교 대학원), 박찬주(조선대학교 학부), 장호섭(조선대학교)

Abstract

This study discusses a non-contact optical technique, electronic speckle pattern interferometry(ESPI), that is well suited for in-plane and out-of-plane deformation measurement. AS4/PEEK[30/-30/90], composite laminate plate was analyzed by ESPI to determine the vibration characteristics with tensile loading and without it. vibration mode shapes are quantitatively compared with the result of numerical analysis. The experimental results agree well with those of numerical analysis. we found that when the composite laminate plate is under the tensile loading, vibration modes can be measured with high accuracy by ESPI.

Key word : Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), Vibration Mode, numerical analysis, Composite laminate plate(복합 적층판)

최근에는 이러한 기술을 이용하여 첨단재료의 평가에 많은 응용을 하고 있다. 구조물들의 경량화 요구에 구조물 부재로서 가벼우면서 높은 강성을 지니고 있는 첨단재료의 박판을 주로 이용하고 있으나 조건에 따라 피로파괴와 이상 진동 등이 발생하게 된다. 그러나 모든 구조물은 순수 인장이나 순수 진동에 의한 변형은 드물며, 대개 인장과 진동이 함께 작용하여 변형을 일으킨다고 할 수 있다. 이러한 문제들은 대중 운송 수단인 자동차나 선박, 항공기 등에 안전성 문제로 대두되고 있으며, 정확한 재료의 평가는 안전 설계 측면에서 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 시간-평균 홀로그래피 간섭법에 바탕을 두고 있는 ESPI를 이용하여 현재 항공기에 이용되는 복합재료 AS4/PEEK [30/-30/90],를 인장 상태에서 진동 실험을 하였다. 이들의 결과는 유한요소 해석 결과와 각각 비교하였고, 하중에 따른 진동 특성을 해석하였다.

1. 서론

레이저의 개발과 더불어 많은 분야에서 레이저를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 계측 분야에서 홀로그래피 간섭법, 스펙클 가섭법 등의 기술들은 급격히 발전하였으며, 최근의 스펙클 간섭법을 이용한 비파괴 계측분야에서는 컴퓨터 영상처리 기술에 힘입어 기존의 복잡한 처리과정을 용이하게 하면서 비접촉 실시간 계측도 가능한 Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) 기법으로 발전하였다.

2. 이론

진동 측정을 위한 면의 변위 계측용 광학간섭계에서는 홀로그램 대신 CCD 카메라를 기록 및 재생용으로 사용하게 된다. 이때, CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형 전과 변형 후의 광의 세기 분포는 식(1)로 표현 할 수 있다.

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

여기서, I_R 와 I_O 은 참조광과 물체광의 강도이며, ϕ 와 $\Delta\phi$ 는 스펙클의 위상과 변형에 의한 위상의 변화량이다. TV System은 물체에 변위가 일어나기 전 이미지의 세기 분포에 해당되는 전자적인 비디오 신호를 CCD의 수광소자를 통하여 화상처리장치의 메모리에 기록하고, 변위가 발생하면, 그에 상당하는 이미지의 강도 분포를 비디오 신호로 전환하여 변형전의 이미지 신호와 전자적으로 감산 처리한다. 출력 카메라의 신호 I_{before} 와 I_{after} 가 입력 화상의 강도에 비례하므로, 감산된 광의 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 정의되며 밝고 어두운 줄무늬 패턴으로 나타나게 된다.

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

3. 실험

1) ESPI System 구성

ESPI에서는 사용 목적에 따라 광학계의 구성이 달라지며 면의 변위 계측을 위한 간섭계의 평면 배치도를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에 나타난 면의 변위 계측용 간섭계에서는 Mirror 1에 의해 반사된 레이저 광이 Beam Splitter에 의해 2개의 광으로 나뉘게 되며, 물체 광은 Spatial Filter 2에 의해 확산되어 시험편에 조사되고, 참조광은 Spatial Filter 1에 의해 확산되어 Mirror 5에 의해 CCD 카메라 내에 있는 Beam combiner에서 물체광과 참조광이 간섭을 일으켜 수광소자에 상이 맺히게 된다.

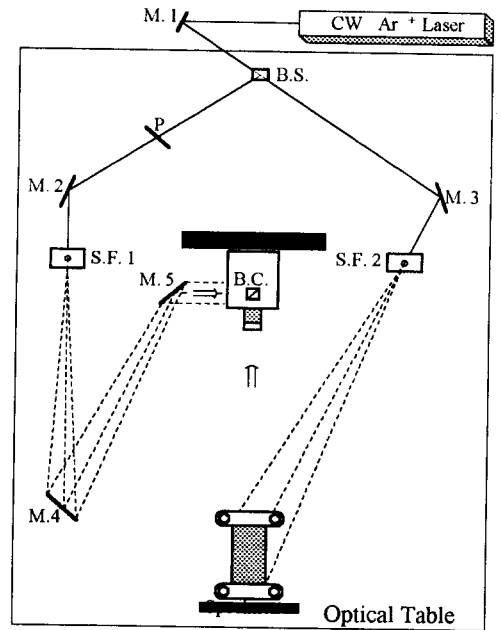


Fig. 1 Optical configuration of out of plane displacement measurement

(M : Mirror, B.S : Beam Splitter, S.F : Spatial Filter, P. : Polarizer, B.C : Beam Combiner)

2) 가이드 구성 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편인 AS4/PEEK 적층판의 섬유는 AS4(12K)(Hercules Co.(U.S.A.))이며, 수지는 결정성 열가소성 PEEK이다. 시험편의 측정면에는 백색 도료를 도포하였다. 또한, 시험편의 양단은 가이드에 에폭시와 나사로써 접착하였다. AS4/PEEK 적층판은 $[30/-30/90]_6$ 으로서 6 ply로 구성되어 있으며, 적층판의 두께는 0.84이다. 재질에 따른 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of specimen

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

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 시험편을 고정하고 인장을 가할 수 있는 수동 인장 시험기의 개략도를 나타내고 있다. 시험편은 상단을 고정하고 하단에 하중을 가함으로써 인장을 가하였으며, 진동 실험에서는 함수 발생기에 의해 생성된 정현파가 스피커를 통해 시험편에 진동을 가하도록 하였다. 여기서, E 는 Young's modulus이며, ν 는 포와송의 비, ρ 는 재료의 밀도이다.

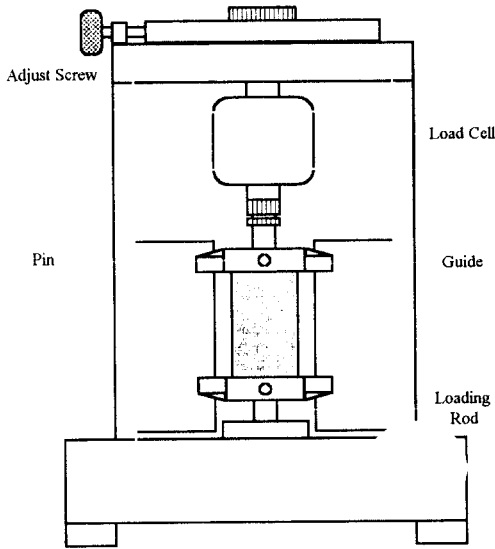


Fig. 2 Guide configuration

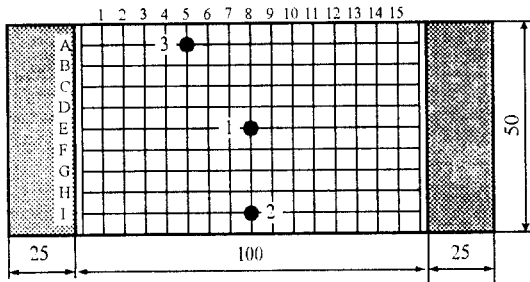


Fig. 3 Shape and Exciting Points of AS4/PEEK Laminate

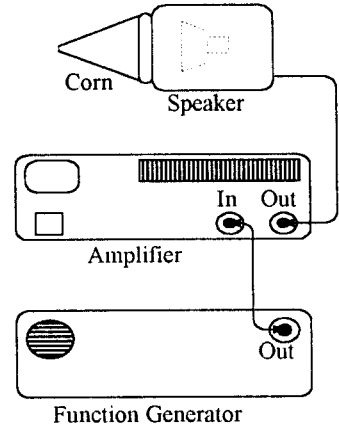


Fig. 4 Exciting System Used in Experiment

3) 실험방법

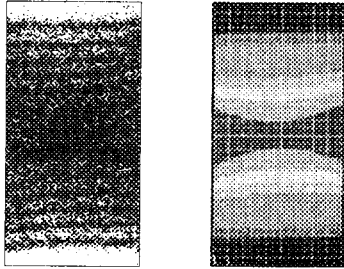
AS4/PEEK 시험편에 대해 인장 하에서의 진동 실험을 행하였다. 진동 실험을 위한 가진 장치는 광학정반에 스피커(50 Hz ~ 20 KHz)를 설치하고, Fig. 3에 나타난 바와 같이 시험편에 그려 넣은 선의 각 교점에 스피커를 위치하였다. 이 교점은 유한요소 해석에 의해 시험편의 진동 진폭이 최대인 점을 고려하여 가진을 행하였다. 가진 장치를 Fig. 4에 나타냈다. 음압 가진을 위한 Cone을 제작하여 부착하였다. 총 3개의 가진 점에 대하여 진동 모드를 관측하였다.

인장을 받는 상태의 진동 실험에 있어서는 인장 시험기에서 하중을 일정하게 가한 상태를 유지하고(0, 294.3 N) 가진 시스템에 의해서 시험편의 뒷면에서 유한 요소해석 결과에서 얻은 최대 진폭 점에서 가진을 하였다.

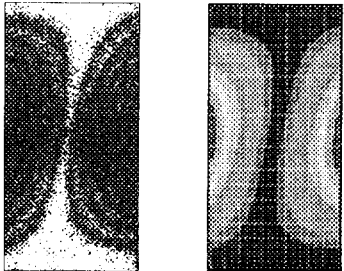
4. 결과 및 고찰

실시간 측정이 가능한 ESPI System을 이용하여 복합재료의 면외 변위를 측정하였다. 진동 실험에서 실험 결과값을 비교하기 위하여 유한요소 해석 프로그램 (ANSYS)을 사용한 해석 결과와 실험에 의한 결과를 각 진동 모드별로 비교하였다. 복합재의 실험에서 특이점으로는 등방성 재료와는 달리 적층판의 최외층에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. Fig. 5에서는 무부하 상태에

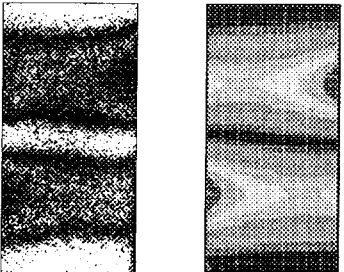
서의 실험 결과와 FEM 해석 결과를 비교하였으며 서로 잘 일치함을 보여주고 있다.



(a) Comparison of 1st vibration mode



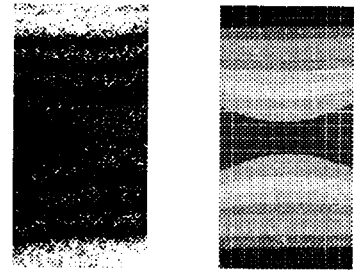
(b) Comparison of 2nd vibration mode



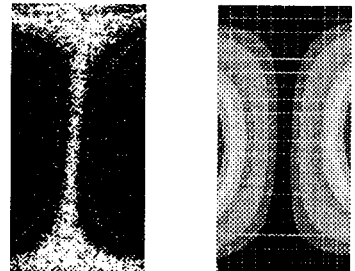
(c) Comparison of 3rd vibration mode

Fig 5 Comparison of vibration mode between FEM and experiment (0 N)

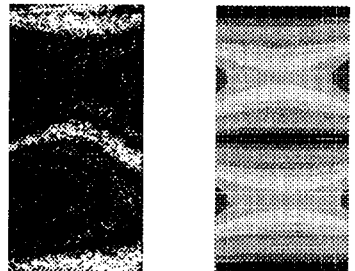
그리고 Fig. 6 에서는 294.3 N의 하중 하에서 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였으며, AS4/PEEK 복합재 적층판에 있어서 실험 결과와 유한요소 해석 결과가 잘 일치하였으며, 이방성 재료에 있어서는 하중이 작용하더라도 고유진동수만이 변화할 뿐, 기본적인 진동 모드 형상은 계속 유지하고 있음을 알 수 있었다.



(a) Comparison of 1st vibration mode



(b) Comparison of 2nd vibration mode



(c) Comparison of 3rd vibration mode

Fig. 6 Comparison of vibration mode between FEM and experiment (294.3 N)

5. 결과

ESPI를 이용한 복합재 적층판의 진동 및 인장 진동 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AS4/PEEK 복합재 적층판의 경우, 실험 결과와 유한요소 해석 결과에 있어서 모드 형상(Mode shape)은 등방성 평판재료와 비교해 볼 때, 일정한 기울기를 갖는 것으로 보아 적층각의 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.

(2) 인장 하에서의 진동 실험에서는 하중이 작용 하더라도 모드 형상에는 큰 변화가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. R. Jones, C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry". Cambridge University press, pp.51~61, 146~163, 1983.
2. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis", Cambridge University press, pp.13~53, 343~407, 440~475, 1995.
3. Smith, Howard Michaelm, "Principles of Holography, 2nd Edition", John Wiley Sons, Inc, pp.220~267, 1975.
4. Ennos, A. E., 1975 Speckle Interferometry, in Laser Speckle and Related Phenomena, Topics in Applied Optics, Vol. 9, springer-verlag
5. Nobuhide Uda, Kazuo Kundo, and I. K. Kim, "A Simplified Method for Determining Mode Components of Strain Energy Release Rate of Free-Edge Delaminations in Composite Laminates", Japan Nation Congress for Applied Mechanics, Vol.44, pp.127~135, 1995.
6. Frank L., Stasa, "Applied Finite Element Analysis for Engineers", Saunders College Publishing, 1985.