

ESPI 법에 의한 복합재 평판의 인장 및 진동 거동에 관한 연구

양승필*, 김경석**, 정현철***, 김태열***, 강기수***, 김동일***, 이찬우***

A study under behavior of tensile and vibration in composite plate by ESPI method

S. P. Yang*, K. S. Kim**, H. C. Jung***, T. Y. Kim ***,
K. S. Kang***, D. I. Kim***, C. W. Lee***

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. Used as specimen, which has the boundary condition of two clamped parallel edges, composite material, AS4/PEEK[30/-30/90]s, was analyzed by ESPI to determine the characteristics of tensile and vibration. These are quantitatively compared with the result of FEM analysis. Finally, the results of this study are briefly summarized as follows : (1) In the in-plane strain analysis, by comparison of theoretical results with experimental results, qualitatively we confirmed that measurement errors are within 3 % in case of accuracy. (2) From comparison of experimental vibration modes with numerical vibration mode shapes by the FEM analysis, quantitatively we confirmed that vibration mode measurement by the ESPI has high accuracy.

Keywords : Non-contact(비접촉), ESPI(전자처리 스페클 패턴 간섭법), In-plane Strain (면내변형), Vibration Mode(진동모드), Out-of-plane Deformation(면외변형)

1. 서론

레이저의 출현은 홀로그래피 간섭법, 스페클 간섭법¹⁾²⁾ 등의 기술들을 급격히 발전시켰으며, 최근의 스페클 간섭

법을 이용한 계측분야³⁾에서는 컴퓨터의 영상처리 기술⁴⁾에 힘입어 기존의 복잡한 처리과정을 용이하게 하면서 비접촉 실시간 계측도 가능한 전자처리 스페클 패턴 간섭 (Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)

* 동아인재대학 자동차기계계열

** 조선대학교 공과대학 기계공학부

*** 조선대학교 대학원

법으로 발전하였다. 최근에는 이러한 장점들을 이용하여 첨단재료의 평가에 많이 사용되고 있다.^{5,6)} 이러한 첨단재료는 고강도·경량화에 따라 구조물들은 상대적으로 박판을 이용하고 있는데 조건에 따라 피로파괴와 이상진동 등이 발생하게 된다. 그러나, 모든 구조물은 순수 인장이나 순수 진동에 의한 변형은 드물며, 대개 인장과 진동이 함께 작용하여 변형을 일으킨다. 이러한 문제들은 대중 운송 수단인 자동차나 선박, 항공기 등의 안전성 문제로 대두되고 있으며, 정확한 재료의 평가는 안전설계 측면에서 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 지금까지 ESPI법을 이용한 연구의 대부분은 등방성재료에 대한 평가로 국한되어 있었으며 복합재료와 같은 이방성재료에 대한 평가는 거의 없었다.

따라서 본 연구에서는 기존의 시간평균 홀로그래피 간섭법³⁾에 바탕을 두고 있는 ESPI법을 이용하여 현재 항공기에 이용되는 복합재료 AS4/PEEK [30/-30/90]_S의 양단을 고정하고 인장, 진동·인장 상태에서의 진동 실험을 하였다. 이들의 결과는 유한요소 해석 결과와 각각 비교 되었으며, 하중에 따른 진동 특성을 해석하였다.

2. 이론

2.1 면내변위 측정

면내 변위 측정에서는 두 개의 레이저광(L_1, L_2)이 물체에 조사가 되어진다. 한쪽은 다른 한쪽의 참조광이라고 할 수 있으며, 변위 u 에 대한 변형 전후의 광로길이의 변화 Δ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2u \cos \theta \quad (1)$$

여기서 θ 는 시험편에 입사되는 레이저 광의 조사각이며, 광로길이 변화 Δ 는 $n\lambda$ ($n = 1, 2, 3 \dots$)가 될 때, 간섭 줄무늬를 형성하기 때문에 줄무늬 차수를 n , 레이저 파장을 λ 라 하면, 변위 u 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{n\lambda}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

결국 변위 u 는 레이저의 파장과 레이저 광의 조사각만으로 결정됨을 알 수 있다.

2.2 면외변위 측정

ESPI를 이용한 진동 측정을 위한 면외 광학계에서는 홀로그램 대신 CCD 카메라를 기록 및 재생용으로 사용하게 될 경우 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형전과 변형후 광의 세기 분포는 식 (3)으로 표현할 수 있다

$$\begin{aligned} I_{before} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi \\ I_{after} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, I_O 와 I_R 은 물체광과 참조광의 강도이며, ϕ 와 $\Delta\phi$ 는 스페클의 위상과 변형된 위상이다. TV계는 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 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} I &= I_{before} - I_{after} \\ &= 2\sqrt{I_R I_O} [\cos \phi - \cos(\phi + \Delta\phi)] \end{aligned} \quad (4)$$

빛의 휘도(Brightness) 분포식은 식 (5)로 정의되며 밝고 어두운 줄무늬 패턴이 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_R I_O} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right| \quad (5)$$

3. 실험

3.1 ESPI 계의 구성

ESPI에서는 사용 목적에 따라 광학계의 구성이 달라지며 본 연구에서는 면내와 면외변위를 모두 측정하였다. 면내와 면외 변위 계측을 위한 광학계의 평면배치도를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 면내 광학계에서는 레이저광의 간섭을 위해 하나의 레이저 광을 광 분리기(splitter)를 이용하여 분리하여 두 개의 광으로 분리시켰다. 분리된 광은 거울 2와 거울 3에 의해 경로가 바

뀌게 되고 확산 필터에 장착된 핀홀(pin hole)에 의해 노이즈가 제거된 상태로 확산된다. 시준화 렌즈(collimate lens)에 의해 구면파는 평면파의 형태로 변환된다. 그림에서 거울 6와 거울 7은 시험편에 대해 시험편에 대해 상하방향으로 조사하도록 하였다.

면의 변위계측을 위한 광학계에서는 레이저 광이 광 분리에 의해 2개의 광으로 나뉘게 되며, 물체광은 확산 필터에 의해 확산되어 시험편에 조사되고, 거울 5에 의해 CCD 카메라 내에 있는 광 합성기(beam combiner)에서 물체광과 참조광이 간섭을 일으켜 수광소자에 상이 맺히게 된다.

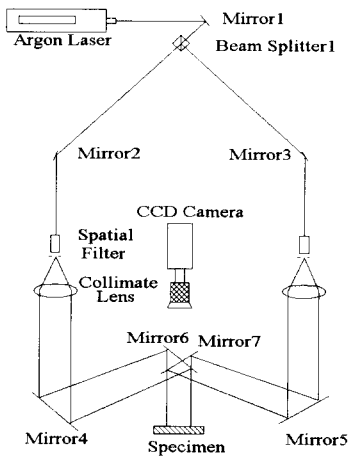


Fig. 1 Optical configuration for in-plane displacement measurement

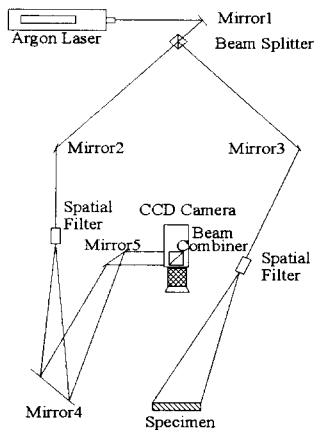


Fig 2 Optical configuration of out of plane displacement

measurement

3.2 가이드 구성 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 AS4/PEEK 적층판 AS4(12K)(Hercules Co.(U.S.A.))이며, 사용수지는 결정성 열가소성 PEEK이다. 시험편의 측정면에는 금속 광택을 제거하기 위해 백색도료를 도포하였다. 또한, 시험편의 양단은 인장시험기에 예폭시와 나사로 접촉 및 체결하였다. AS4/PEEK 적층판은 $[30/-30/90]_s$ 으로서 6층(ply)로 구성되어 있으며, 적층판의 두께는 0.84mm이다. 재질에 따른 물성치는 Table. 1에 나타내었다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 시험편을 고정하고 인장을 가할 수 있는 수동 인장 시험기의 개략도를 나타내었다. 시험편은 상하 양단을 고정하고 하중을 가함으로써 인장 시험을 행하였으며, 진동 실험에서는 함수 발생기에 의해 생성된 정현파가 스피커를 통해 시험편에 진동을 가하도록 하였다. 여기서, E 는 탄성계수, ν 는 포와송 비, ρ 는 재료의 밀도이다.

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

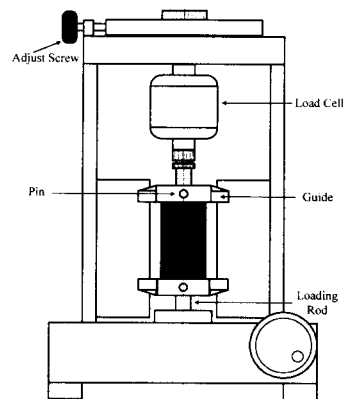


Fig. 3 Guide configuration

3.3 실험방법

실험에 있어서는 동일 시험편에 대해 인장, 진동, 인장 하에서의 진동 실험을 행하였다. 인장 실험에서는 시험편 전체에 걸쳐서 간섭무늬는 등분포로 나타났으며, 줄무늬 사이의 간격을 5점에서 측정하고 그 평균값을 구하였다. 실험에서의 하중차는 58.86 N일 때 해석 가능한 최소 줄무늬를 얻을 수 있었으며, 하중차가 117.72 N 일 때 해석 가능한 최대의 줄무늬 차수를 얻을 수 있었다. 측정된 변형률 값은 392.4 N~1177.2 N의 하중 범위에서 동일한 하중차(9.8N)로 하중을 증가시키면서 측정된 결과이다.

진동실험에서는 광학 정반에 가진 장치인 스피커(50 Hz~20 kHz)를 설치하고, 시험편에 그려 넣은 선의 각 교점에 스피커를 위치하였다. 이 교점은 유한요소 해석에 의해 시험편의 진동 진폭이 최대인 점만을 고려하여 총 6 개의 가진 점에 대해서 진동 모드를 관측하였다.

마지막으로, 인장을 받는 상태에서의 진동 실험을 하였다. 인장 시험기에서 하중을 일정하게 유지하고(0, 294.3, 588.6, 882.9 N) 가진 시스템에 의해서 시험편의 뒷면에서 유한 요소해석 결과에서 얻은 진폭 최대 점에서 가진을 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 인장실험

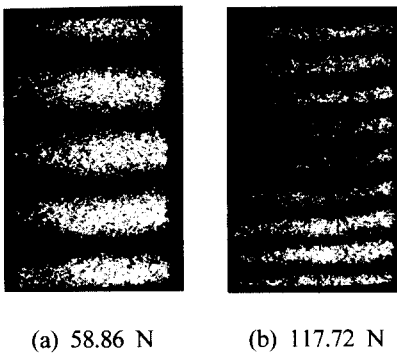


Fig. 4. Interference fringe pattern according to loading difference

실시간으로 측정 가능한 ESPI 시스템을 사용하여 복합 재료의 변형률을 측정하였다. 또한 고전 적층이론으로 계산된 이론 값과 실험을 통하여 측정된 값을 비교함으로써 정량적인 검증은 하였다. Fig. 4는 인장시험에 따른 간섭 무늬를 보여주고 있고, Fig. 5는 고전적층이론과 결과 값을 비교하였다. 평균 오차율은 2.94%로 평가되었다.

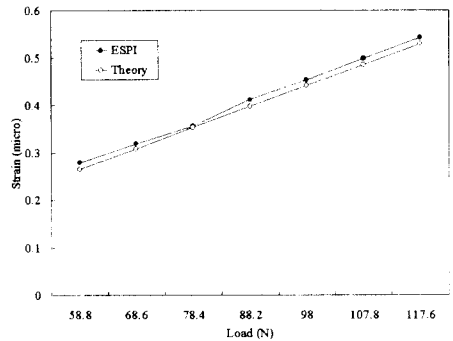


Fig. 5 Comparison of theory with experiment

4.2 진동실험

진동 실험에서는 결과 값의 비교를 위해서 유한요소해석 프로그램(ANSYS)을 사용하여 고유주파수를 비교하였고(Table 2), 그때의 각 진동 모드를 나타내었다(Fig. 6 과 Fig. 7). 복합재의 실험에서 특이점으로는 등방성재료(STS304)와 비교를 하였을 때 적층판의 최외층에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

Table. 2 Resultant frequencies in experiment compared with FEM analysis

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

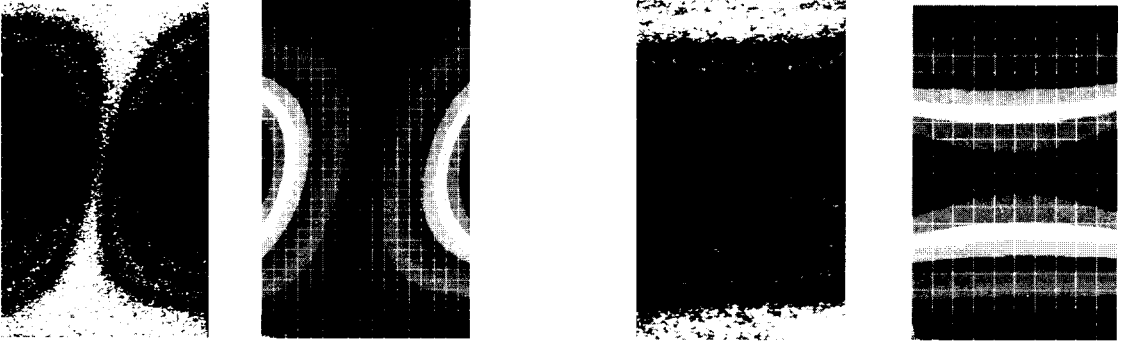


Fig. 6 Comparison of 2nd vibration mode

(a) 294.3 N, 1st mode

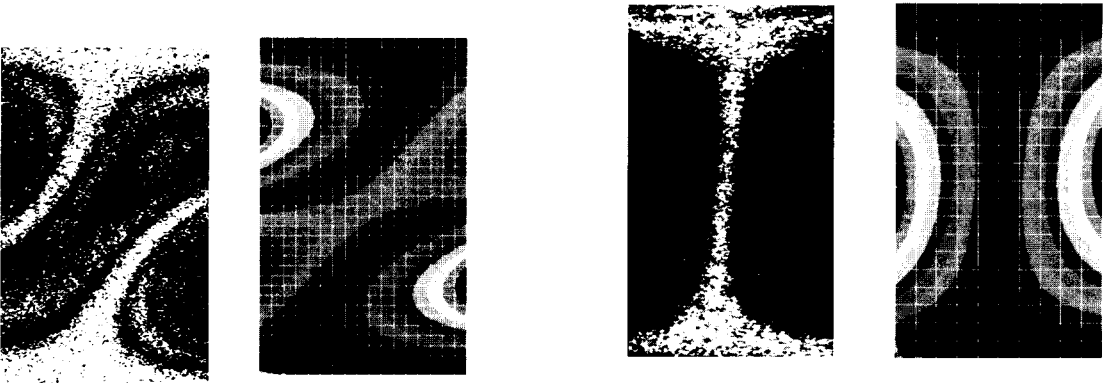
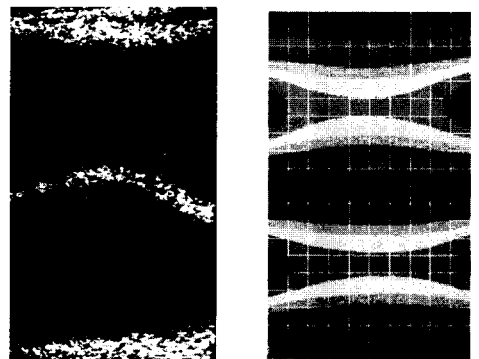


Fig. 7 Comparison of 4th vibration mode

(b) 588.6 N, 2nd mode

4.3 인장 및 진동 실험 결과

Fig. 8에서는 각각 294.3, 588.6, 882.9 N의 하중을 가한 상태에서 시험편의 모드 형상에 따른 고유진동수를 비교하여 나타내었다. 유한요소해석 결과와 비교 분석한 결과, 양단 고정 경계조건을 갖는 AS4/PEEK 복합재 적층판에 대한 실험 결과와 유한요소 해석 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 하중이 증가할수록 모드 형상에서 Nodal Line의 기울기가 수직에 가까워짐을 알 수 있었다. 또한, 이방성 재료에 있어서 작용하중이 변해도 고유진동수만이 변화할 뿐, 기본적인 모드 형상을 계속 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.



(c) 882.9 N, 3rd mode

Fig. 8 Comparison of vibration mode between FEM and experiment

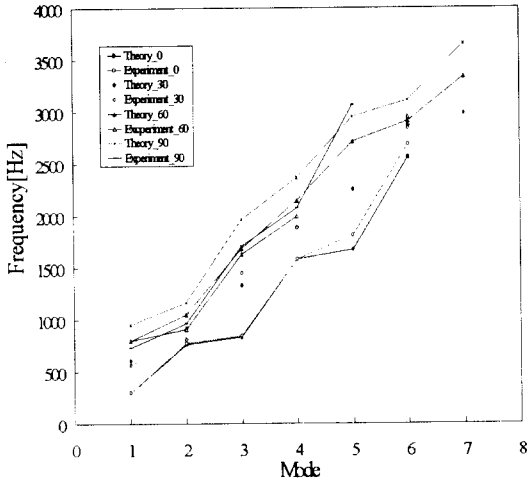


Fig. 9 Comparison of frequency according to loading difference.

5. 결론

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

- (1) 복합재료의 변형을 측정에 있어서 그 오차는 대부분 3% 정도의 평균오차로서 정밀한 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.
- (2) 양단 고정 경계조건을 갖는 AS4/PEEK 복합재 적층판에 대해서 실험 결과와 유한요소 해석 결과에서 고유진동수 값이 잘 일치하였으며, 모드 형상(mode shape)은 평판과 비교하여, 일정한 기울기를 갖는 것으로 보아 최외층(最外層)의 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.
- (3) 인장 하에서의 진동실험에서는 작용하중이 변해도 고유진동수만이 변화할 뿐, 기본적인 모드 형상을 계속 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.

- (4) 이와 같은 실험을 통하여 ESPI 기법이 복합재의 기계적 거동해석에 유용함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

6. 참고 문헌

1. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University press, pp. 51~61, 146~163, 1983.
2. Smith, Howard Michaelm, "Principles of Holography, 2nd Edition", John Wiley Sons, Inc, pp. 220~267, 1975
3. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis", Cambridge University press, pp.13~53, 343~407, 440~475, 1995.
4. Frank L., Stasa, "Applied Finite Element Analysis for Engineers", Saunders College Publishing, 1985.
5. 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.
6. 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.