레이저 계측시스템을 이용한 복합재료 구조물의 실제결함 검출

김태형* · 정성균** · 김경석*** · 장호섭****

Detection of Real Defects in Composite Structures by Using Laser Measuring System

Tae-Hyung Kim*, Seong-Kyun Cheong**, Koung-Suk Kim***, Ho-Seob Chang****

Key Words: ESPI, Shearography, Laminate, Honeycomb, Free edge delamination, Adhesive joint

Abstract

Real defects in composite structures were detected by using laser measuring system. Four types of specimens, that is, a composite laminate, a honeycomb structure, a free-edge delamination and an adhesive joint, were used to study the applicability of ESPI and Shearography to composite structures. Thermal loading method, which can easily induce the surface deformation of specimen, was used to detect defects. Experimental results show that defects in composite structures can be easily detected by ESPI and Shearography. Moreover, it shows that ESPI and Shearography can be usefully applied to the detection of defects in various kinds of composite structures.

1. 서 론

항공, 우주산업 및 방위산업등 구조의 경량화를 추구하는 여러 산업분야에서 연구개발 및 응용이 급속히 증가하고 있는[1] 복합재료는 충격이나 피로등에 의해서 내부에 보이지 않는 형태의 손상을 가져올 수 있다. 기존의 금속 구조재료와는 달리 복합재료는 매우 복잡한 역학적 거동을 하기 때문에 높은 신뢰도를 요구하는 구조재료로서의 응용을 위해서는 복합재료의 이방성 역학적 특성에 대한 올바른 이해가 요구된다. 최근들어 손상부위를 보다 효과적으로 찾아내기 위한 비파괴 검사방법으로 초음파장비(C-Scan) 및 X-ray, 전자 스페클 패턴 간섭법(ESPI)이 이용되고 있으며[2,3] 전단간섭계(Shearography)의 활용도 활발한 실정이다.

일반적으로 행해지고 있는 초음파를 이용한 비파괴적인 방법은 직접 복합재료 구조물의 표면을 조금씩 검사해 나가야하는 시간상의 문제와 사람이 직접 접근해야하는 공간상의 문제점들을 가지고 있다. ESPI는 실시간 측정이 가능한 비접촉 미소변형측정방법으로서 종래 홀로그래피 기법에서 CCD 카메라와 컴퓨터를 이용하여 3차원 미소변형측정 및 진동측정등에 적용되고 있으며, 변형구배를 측정하는 방법의 Shearography 또한 비접촉 실시간 측정이 가능하며 재료내 결함검출을 위한 유용한 기법이다.[4,5]

본 연구에서는 복합재료 구조물에서 발생할 수 있는 여러 형태의 실제 결함을 검출하고자 한다. 이를 위해 시험편에 충격, 인장시험 및 피로시험을 통하여 실제 결함을 생성시키고 ESPI 및 Shearography를 이용하여 결함을 검출하며, 초음파 장비인 C-scan으로부터 검출된 결함의 이미지와 비교 검토 하고자 한다.

* 서울산업대학교 대학원
** 서울산업대학교 기계공학과
*** 조선대학교 기계공학부
**** 조선대학교 대학원

2. 관련이론

2.1 Shearography의 원리

실험하고자 하는 대상물에 확산된 빔(beam)이 조사되고 물체 표면으로부터 반사된 빔은 전단 간섭계 앞에 설치된 CCD 카메라의 상면에 결상된다. Fig. 1에서와 같이 임의의 거리 dx에 있는 두 점 1, 2를 관찰해보면 Mirror와 전단거울이 마이켈슨 간섭계와 같이 B.S(Beam Splitter)와 평행하다면 Image Plane의 1′, 2′에 맺히게 된다. 그러나 두 개의 점이 전단거울에 의해 아주 작은 각으로 Shearing되어 Image Plane 상의 1′, 1″에 맺히게 된다. 그러므로 두 점 1, 2는 전단거울 때문에 CCD Plane에서 1′과 2″에서 서로 만난다.

2.2 ESPI의 면외변위 측정의 원리

ESPI 면외변위(out-of-plane)의 측정은 실시간(real-time) ESPI 방법을 이용하게 된다. 실시간법은 물체가 외력을 받기 전의 상태를 기록하고 외력을 주면서 변형전의 파면과 변형된 파면을 중첩시켜 나타난 간섭 무늬를 관찰 하게된다. 물체가 변위 $\underline{d}$를 받은 후의 빔은 이미지 평면의 위상차는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi}{\lambda}[d_1(1+\cos\theta)+d_2\sin\theta] \qquad (1)$$

일반적인 setup은 $\sin\theta \le 1/50(1+\cos\theta)$ 이므로

$$d_1 = \frac{n\lambda}{(1+\cos\theta)} \quad , \quad n=1,2,3,\ldots \qquad (2)$$

일 때 어두운 간섭 무늬를 얻을 수 있다.

그러므로, 간섭무늬 간격 d는 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$d = \frac{n\lambda}{(2\cos\theta)} \quad , n=1,2,3,\ldots \qquad (3)$$

3. 실 험

실험에 이용된 복합재료 시험편은 USN125B 제품을 사용하여 적층 후 오토클래이브를 이용하여 성형하였다. 적층판 시험편은 $[0_4/90_4]_S$로 적층한

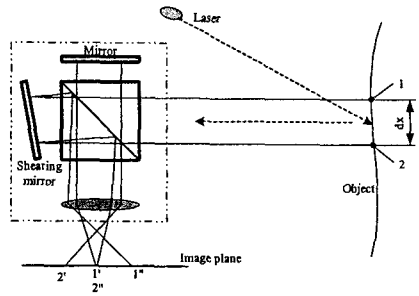


Fig. 1 Shearopgraphy system.

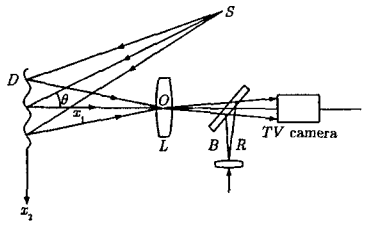
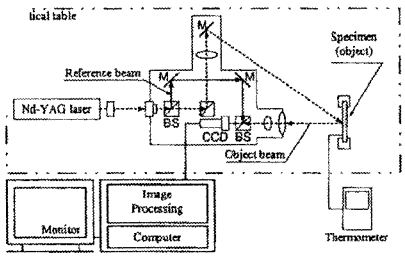


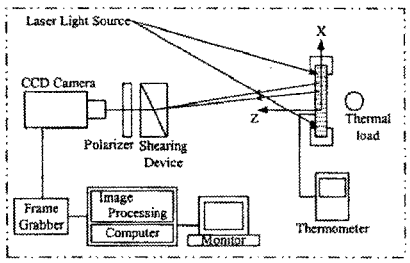
Fig. 2 An optical arrangement for the out-of-plane displacement of ESPI.

105mm×105mm 크기의 탄소섬유 적층판을 제작한 후 낙하식 충격 시험기(Dynatup-8250 drop weight tester)를 이용하여 2.4J의 에너지로 충격을 가하였다. 하니컴 구조의 시험편을 만들기 위해 심재(core)는 알루미늄 심재를 사용하였고 면재(face)는 $[0_4/90_4]_S$로 적층한 탄소섬유 적층판을 제작하여 심재와 면재의 접착을 위해 항공기 접착용 필름을 사용하였다. 완성된 105mm×105mm 크기의 하니컴 구조에 낙하식 충격 시험기로 2.4J의 충격을 가하였다. 자유단에서의 하중에 의한 실제 결함을 평가하기 위한 적층판 구조의 시험편은 $[\pm 30/90]_S$ 로 적층한 탄소섬유 적층판을 폭 25mm, 길이는 250mm로 제작하였고 인장시험기(INSTRON 4467)를 이용하여 정적 인장하중을 가하였다. 이때 헤드변위속도는 3mm/min로 하였으며 자유단에서의 층간분리 결함을 생성시켰다.

또한 $[0/90/\pm 45]_S$로 적층한 준등방성(quasi-isotropic) 탄소섬유 적층판의 40mm×40mm 구간에 접착필름을 사용하여 두 적층판을 접착한 접착조인트 시험편을 제작하여 접착부위 파괴하중의 80%를 피로시험의 최대하중으로 하고 주파수는 10Hz로, 응력비는 0.1로 하여 30,000 cycles까지 피로시험을 하여 접착분리 결함을 생성시켰다.



(a) Schematic diagram of ESPI system for measuring out-of-plane displacement.



(b) Schematic diagram of lateral shearography.

Fig. 3 Measuring system of ESPI and shearography.

본 실험에 사용된 레이저 계측 시스템 장비는 독일의 Ettemeyer사의 ESPI 및 Shearography 시스템을 사용하였으며, 광원은 Nd-YAG 레이저로서 출력은 500mW이고 파장(λ)은 532nm이다. 온도측정은 휴대용 디지털 온도센서(TSE-1300 digital thermometer)를 사용하였다. Fig. 3은 ESPI 및 Shearography의 광학계의 구성을 나타낸다.

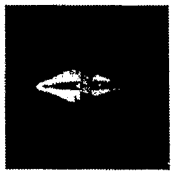
4. 실험결과 및 고찰

탄소섬유 적층판이 외부 충격을 받게 되면 충격이 가하여진 면에서는 육안 식별이 어려우며 충격을 받은 부위보다 내부나 후면에 더 큰 손상을 나타낸다.[6] Fig. 4는 충격에 대한 탄소섬유 적층판의 결함을 검출한 이미지로서 결함이 검출된 온도는 ESPI는 25.8℃, Shearography는 32.4℃였다. Fig. 4(a)는 결함이 검출되었을때의 프린지 이미지를 나타낸 것이며 Fig. 4(b)는 C-scan 결과이다. 결과로부터 땅콩 모양의 결함을 두 계측 시스템 모두 위치 및 크기를 쉽게 검출할 수 있었다.

하니컴 구조에 충격을 가한 결과 Fig. 5(b)의 C-scan 이미지로부터 면재 내부에서 발생한 층간분리 결함과 면재와 심재사이에서 발생한 접착분리 결함이 동시에 공존함을 알 수 있었다. Fig. 5(a)는 검출된 프린지 이미지를 나타낸다. 두 레이저 계측 시스템으로부터 층간분리와 접착분리의 두 결함을 함께 포함하는 이미지 결과를 보여주었고, 결함이 검출된 온도는 ESPI는 28.7℃, Shearography는 38.6℃였다.

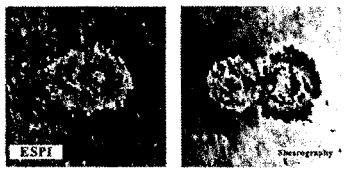
탄소섬유 적층판 시험편의 자유단 층간분리 현상을 ESPI 및 Shearography 시스템으로 측정한 결과 ESPI는 20.0℃, Shearography는 28.8℃에서 결함이 검출되었다. Fig. 6(a)는 프린지 이미지를 나타낸 것이며 Fig. 6(b)의 C-scan 이미지와 비교 분석한 결과 ESPI 및 Shearography 모두 층간분리가 있는 부위에서의 프린지 형상이 뚜렷하게 나타났고 결함의 위치 및 크기가 비교적 근사하게 일치함을 알 수 있었다.

(a) Deformation phase shifting convolution.

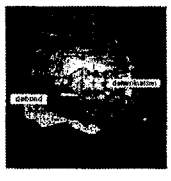


(b) C-scan image.

Fig. 4 Detection of impact-induced delamination.



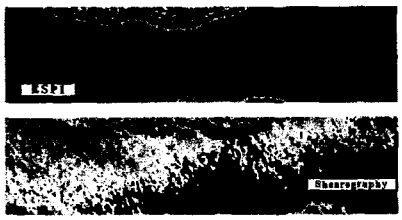
(a) Deformation phase shifting convolution.



(b) C-scan image.

Fig. 5 Detection of delamination and debond i honeycomb structure.

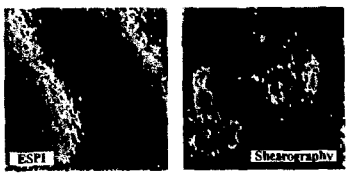
복합재료의 접착분리를 검출한 결과 Fig. 7(a)와 같이 ESPI는 23.5℃, Shearography는 37.5℃에서 접착분리가 검출되었고, Fig. 7(b)의 C-scan으로 검출한 이미지와 비교 분석한 결과 ESPI의 경우에는 접착분리가 일어나지 않은 부위에 비해 프린지가 사선으로 나타났고 Shearography는 접착분리가 일어난 부위에서 간섭무늬가 불규칙한 형태로 밀집되어 ESPI 및 Shearography 모두 좌측하단과 우측 상단이 다른 부위에 비해서 접착분리가 큼을 어느정도 예측할 수 있었으며, 프린지 형상만으로는 결함의 정확한 형상 및 크기를 식별하는데는 쉽지 않았지만 비교적 근사하게 일치함을 알 수 있었다.



(a) Deformation phase shifting convolution.

(b) C-scan image.

Fig. 6 Detection of a free edge delamination of laminate.



(a) Deformation phase shifting convolution.

(b) C-scan image.

Fig. 7 Detection of a debond in single lab joint.

5. 결 론

가열 후 냉각에 의한 온도차는 시험편에 내재된 층간분리와 접착분리, 그리고 열팽창 차이에 따른 변형을 나타내게 된다. 이러한 변형에 의해 복합재료 구조물의 실제 결함을 검출할 수 있었고 복합재료의 특성과 레이저 간섭계의 원리를 잘 파악한다면 복합재료 구조물의 실제 응용분야에 대해 다양한 결함 검출에 있어서 레이저를 효율성 높게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 협동연구과제(과제번호 : KRF-99-042-E00009)의 연구비 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Swanson. S. R. "Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials", Prentice Hall. pp.22-24, 1997.

(2) H. Kaczmar, 1995, "Ultrasonic Detection of Damage in CFRP," J. Composite Materials, Vol. 29(1), pp.59～95.

(3) K. V. Steiner, 1992, "Defect Classifications in Composites Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation Techniques," Damage Detection in Composite Materials, ASTM STP 1128, J.E. Masters, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.72～84.

(4) L. X. Yang, W. Steinchen, M. Schuth and G. Kupfer, "Precision Measurement and Nondestructive Testing by Means of Digital Phase Shifting Speckle Pattern and Speckle Pattern Shearing Interferometry", Measurement, Vol. 16, pp.149-160, (1995)

(5) Y. Y. Hung, "Searography: A New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing", Optical Engineering, Vol. 21, No. 3, pp.391-395, (1982)

(6) Richard, J. and Graham, C. "Modeling of Impact Damage Features in Graphite/Epoxy Laminates", Damge Detection in Composite Materials, ASTM STP 1128, J.E. Masters, Ed., ASTM, Philadelphia, pp. 200～212, 1992.