

ESPI를 이용한 충격손상을 받은 복합재료 내부결합의 정량평가

김경석*, 양광영*, 장호섭**, 지창준**, 윤홍석**

Quantitative Evaluation of Impact Defects inside of Composite Material Plate by ESPI

Koung-Suk Kim*, Gwang-Young Yang*, Ho-Sub Chang**, Chang-Jun Ji**, Hong-Suk Yoon**

Abstract

Electronic Speckle Pattern Interferometry for quantitative evaluation of a impact defect inside of composite material plate are described. The impact on composite material makes inside delamination which is difficult to detect visual inspection and ultrasonic testing due to non-homeogenous structure. This paper proposes the quantitative evaluation technique of defects under real impact. Artificial defects are designed inside of composite plate for development of inspection technique and real defects under impact are inspected and compared with results of visual inspection.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry, Composite material plate, Impact defect, Quantitative Evaluation

1. 서론

섬유강화 복합재료는 대형 수송기 및 기계구조물에서 고강도 경량화를 위한 재료로 많이 사용되고 있으며, 중요한 역할을 담당하고 있다. 진동감쇠특성 및 내화화성 등이 뛰어날 뿐만 아니라 하중조건에 적합한 구조로 섬유방향과 적층을 달리함으로써 강성 및 강도조절이 가능하다는 장점이 있다^{1,2,3)}. 복합재료는 이방성의 특징으로 매우 복잡한 역학거동을 하며, 해석 및 신뢰성 검사에 많은 어려움이 있다. 특히, 기존의 비파괴 검사기법으로 내부손상을 검출하는 것은 매우 어려운 실정이다.

또한, 대형 구조물에서 효과적인 검사를 위해서는 구조물의 외부에서 많은 면적을 동시에 검사할

수 있는 기법이 유리하며, 이에 적절한 검사기술이 최근 많은 발전을 하고 있는 전자처리 스페클패턴 간섭법(ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometry)이라고 할 수 있다^{4,5)}. 본 연구에서는 복합재구조물의 가장 취약한 분야인 충격에 의한 손상이 발생할 경우 효과적인 검출기법을 개발하고, 충격에 따른 내부결합의 정량평가에 ESPI를 활용하였다. 본 연구에서는 복합재 내부결합을 산업 현장에서 쉽게 응용하여 효과적으로 검출을 할 수 있는 검사방법을 제안하였으며, 정량화 방법을 개발하기 위해 인공결합을 내부에 제작하여 제안된 검사방법을 이용하여 검출하고 상호 비교하였다. 마지막으로 실제 충격손상을 받은 복합재 시험편에 대해 직접적용 실험을 하여 검출하고 이를 기존 검

* 주저자, 조선대학교 기계정보학과 (gskkim@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

** 조선대 대학원 기계설계공학과

사기법 및 육안검사를 통하여 결과를 비교하였다. 결과에서는 인공결합의 경우 매우 정확하게 위치 및 크기를 검출하였으나, 실제충격에 대해서는 정성적 평가는 정확히 검출하나, 정량평가에서는 기존 검사기법에 비해 다소 크게 평가하는 경향이 있었다. 이에 대한 결과분석이 되었으며, 복합재 구조물의 실제 현장적용을 위한 ESPI 검사기술의 전체적인 요약을 하였다.

2. Electronic Speckle Pattern Interferometry

ESPI는 가장 널리 알려진 Holography 기법과 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 즉, Fig. 1에서와 같이 참조광(Reference beam)과 물체광(Object beam)의 간섭현상을 이용하여 변형 전과 변형후의 이미지를 Hologram에 저장하고, 처리하여 이를 재생(Reconstruction)함으로써 변형정보를 얻을 수 있다. ESPI에서는 Fig. 2에서와 같이 Hologram을 대신하여 CCD camera와 광합성광학기기(Beam combiner)를 이용하여 각 이미지의 위상정보를 레이저의 간섭성질에 의해 일어나는 물체표면의 Speckle의 강도분포로 컴퓨터에 저장하고, 화상처리장치를 통하여 두 이미지를 감산(Subtraction) 또는 더하기(Addition)처리를 함으로서 Fringe Pattern을 형성하게 된다. 즉, 두 장의 스페클 패턴 변형 전후 $I_{ref}(x, y)$ 와 $I_{obj}(x, y)$ 는 CCD에 수광된 빛의 강도분포를 나타내며, 이들 차를 구함으로써 관찰대상의

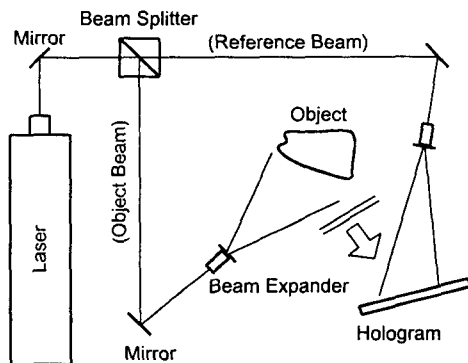


Fig. 1 Holographic interferometer

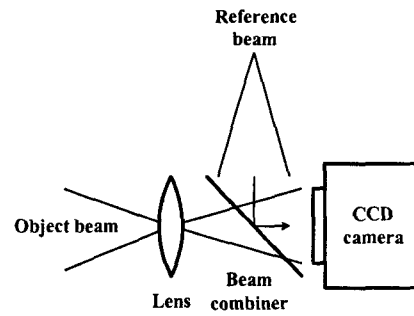


Fig. 2 Combination of reference with object beam

변화된 정도가 가시화된다. 만일 CCD 카메라의 수광소자에 입력되는 변형전후의 신호인 $V_{ref}(x, y)$ 와 $V_{obj}(x, y)$ 가 이미지의 강도 분포에 비례한다면 감산된 신호 $V_s(x, y)$ 는 다음과 같다⁶⁾.

$$V_s(x, y) = V_{ref}(x, y) - V_{obj}(x, y) \\ = 4\sqrt{I_{ref}I_{obj}} \sin\left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \quad \text{----- (1)}$$

여기에서 $\phi(x, y)$: 초기위상,

$\Delta\phi(x, y)$: 물체의 변형에 따른 위상차

이 값을 모니터 상에 출력하면 물체의 변형된 정도를 관측할 수 있는데 모니터 상에서 음의 출력신호는 검은색으로 출력되기 때문에 신호의 손실을 피하기 위해 모니터로 출력하기 전에 절대값을 취해 V_s 값을 정류시킨다. 따라서 모니터 한 점에서의 밝기 $B(x, y)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다⁷⁾.

$$B(x, y) = |V_s(x, y)| \\ = K\left|\sqrt{I_{ref}I_{obj}} \sin\left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right)\right| \quad \text{----- (2)}$$

여기에서 K : 모니터 상수

즉, 변형전후의 2장의 이미지를 처리하여 프린지 패턴(Fringe pattern)을 얻을 경우 줄무늬는 사인함수의 특성을 따르며, 이러한 특성은 정확한 위상급변점을 찾기 어려우며, 일부구간에서는 정확히 보정된 위상값을 갖지 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 위상이동기법과 언래핑(Unwrapping)이 적용되어 표면변위의 정량해석이 가능하다.

3. 장치구성

3.1 복합재 시험편

복합재 시험편은 탄소섬유 강화플라스틱 (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastic)의 내부에 테프론을 이용한 내부 인공결합 시험편을 제작하였으며, 실제 충격시험편은 충격시험기를 이용하여 시험편의 중앙에 충격을 가하였다. 인공결합은 층간분리를 모델링하기 위해 원형 모양의 직경 30 mm의 테프론과 충격결합을 모사한 땅콩모양의 길이 40 mm 높이 15 mm의 인공결합을 복합재 성형 시 내부에 삽입하였다. Fig. 3은 인공결합의 형상을 나타내었다.

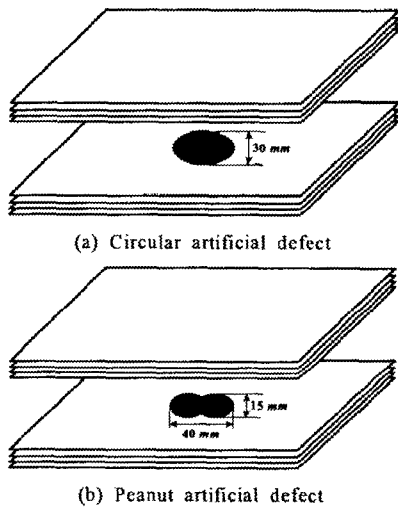


Fig. 3 Artificial defect inside of composite plate

3.2 ESPI 시스템 구성

ESPI 시스템은 독일 Ettemeyer 사의 3D ESPI 시스템을 사용하였다. 측정은 시험편의 면외변위 (out-of-plane displacement)를 측정하여 결함을 정량화 하였다. 검출방법은 복합재료가 온도에 약한 성질을 이용하여 열전구를 이용하여 5 ℃ 내외의 온도변화를 주고 검출하는 방법을 이용하였다. 이 시험기법은 현장에서 적용이 용이할 뿐만 아니라 제어가 간단하여 현장활용 기술로 사용이 가능하다. 온도변화는 충격손상에 의해 내부 박리가 발생하고 이 박리는 온도변화에 대해 열변형이 다르며, 물체의 표면에까지 영향을 주고, 표면 변위를 ESPI 시스템으로 검사함으로써 결함의 위치 및 크기를 결정할 수 있다.

4. 결과분석

4.1 인공결합 검사

인공결합검사 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 내부결합은 실제 결함에 비해 다소 작게 검출이 되었다. 이는 내부에 존재하는 테프론의 열변형이 표면까지 충분히 전달이 되지 않아 나타날 수 있는 현상으로 파악된다. 결함은 직경 30 mm의 원형결합을 29 mm로 측정하였으며, 40 mm, 15 mm의 땅콩모양의 결함에 대해서 39 mm와 13 mm로 측정하였다. 이 결과는 수회의 실험을 평균하여 얻었다.

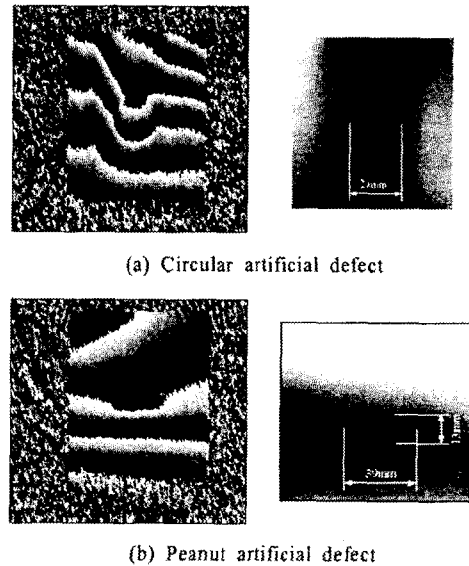
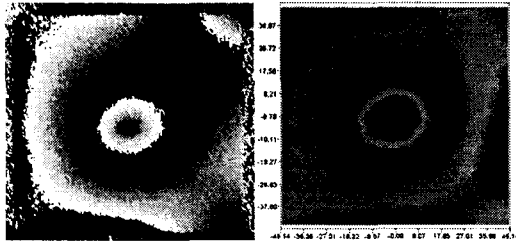


Fig. 4 Detection of defects inside of composite plate

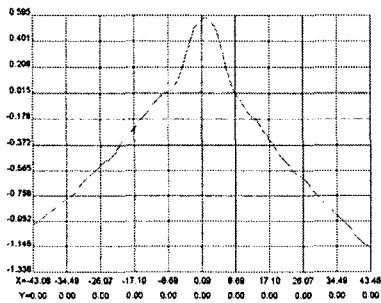
4.2 실제 충격손상 결함검사

실제 충격결합도 인공결합 검사방법과 동일하게 열변형을 이용하여 검사하였다. 충격손상 표면과 손상부 후면을 각각 검사하였다. 충격시험편 적층 구성은 [0°/90°]_n으로 구성되었다. 실제 충격손상실험 결과에서는 충격손상부가 테프론처럼 경계가 일정하지 않아 정확히 결함을 산정하는데 주관적인 판단이 개입될 가능성이 발생하였다. Fig. 5는 실제 충격을 받은 면에서 검사한 결과이며, Fig. 6은 충격면의 후면에서 검사한 결과이다. 정량 분석을 위해 표면변위를 측정하고 결함부분에서 line profile를 구하여 결정할 수 있으나, 결함경계가 불명확하였다. 이 문제를 해결하기 위해 측정변위 값을 미분하여 기울기를 구함으로써 기울기 급변점

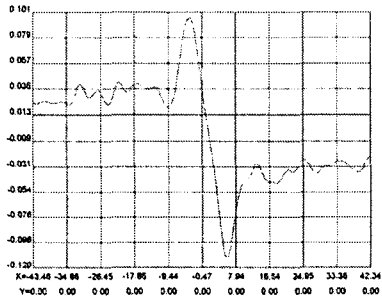
을 찾아 결함의 크기로 산정하였다. 충격 손상면에서 결함은 9.94 mm, 7.38 mm로 검사되었으며, 그 후면에서는 13.03 mm, 6.87 mm로 측정되었다. 검출결과는 각 층을 벗겨내어 육안 검사하는 방법으로 결과를 비교하였으며, 육안검사결과와는 잘 일치하였다.



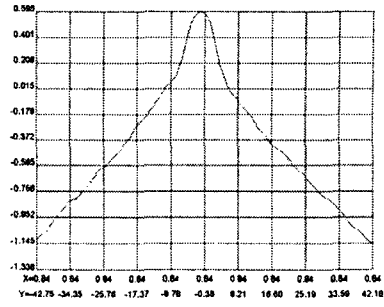
(a) phase map and out-of-plane displacement distribution



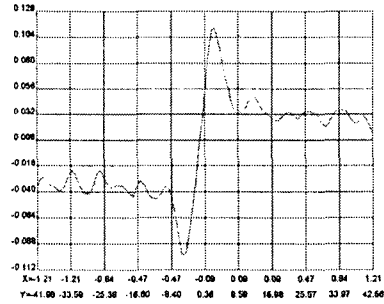
(b) Line profile to x-axis



(c) Differentiation of Line profile to x-axis

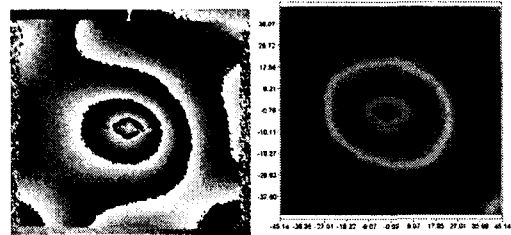


(d) Line profile to y-axis

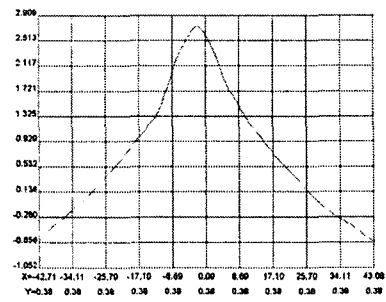


(e) Differentiation of Line profile to y-axis

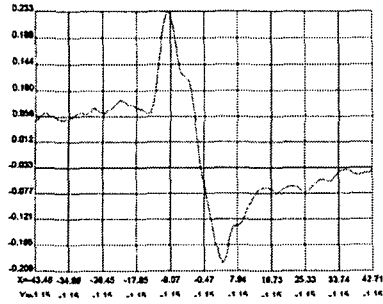
Fig. 5 Front side of impact damage



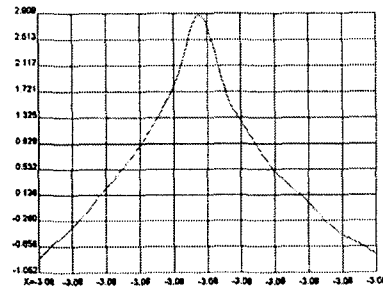
(a) phase map and out-of-plane displacement distribution



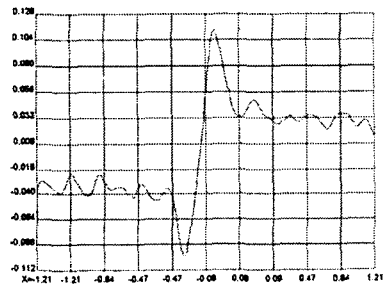
(b) Line profile to x-axis



(c) Differentiation of Line profile to x-axis



(d) Line profile to y-axis



(e) Differentiation of Line profile to y-axis

Fig. 6 Back side of impact damage

5. 결과분석 및 요약

ESPI를 이용하여 충격손상을 받은 복합재 평판의 내부결합의 정량화를 위해 먼저 인공결합을 이용하여 그 적용 가능성 및 정량화를 시도하여 ESPI를 이용하여 내부결합 검사방법론을 개발하였다. 손상부에서 열변형 변화에 따른 표면변위 분포만을 분석함으로써 내부결합을 정량적으로 평가할 수 있었다. 인공결합은 크기가 일정한 테프론을 삽입함으로써 결합의 경계가 확실하여 정량화를 정확히 할 수 있으나, 실제 충격손상결합은 손상부에 박리층의 경계가 불확실하여 본 연구에서는 변위분포의 미분값을 측정하여 기울기 급변점을 구하여 결합의 크기로 결정하였다. 결과는 각층을 벗겨내어 육안

검사를 하여 검증하였으며, 약 1~2 mm 정도씩 작게 평가하는 경향을 보였다. 본 실험결과는 표면을 검사하는 방법으로 내부결합을 정확히 예측하기 위해서는 z 축방향의 강성변화를 고려하여 검사되어진 표면결합의 크기만으로 진행깊이와 내부 크기를 평가할 수 있는 기법을 개발하여야 할 것이다.

후기

이 논문은 과학기술부/한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2003년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- [1] Swanson, S. R. "Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials", Prentice Hall, pp.22-24, 1997.
- [2] ASM International, Section 12. Applications and Experience. Engineered Materials Handbook Composites. Vol.46 pp. 799~845, 1997.
- [3] Isaac, M. Daniel and Ishai. Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, Vol. 2, pp. 10~11, 1994.
- [4] Lekberg, O. J. and Malmo, J. T. "Detection of Defects in Composite Materials by TV Holography," NDT International, Vol. 21, No. 4, pp. 223~228, 1988.
- [5] Wykes, C. "Use of Electronic Speckle Pattern Interferometry in the Measurement of Static and Dynamic Surface Displacement", Optical Engineering, Vol. 21(3), pp.400~406, 1982.
- [6] Moore, A.J. and Tyrer, R. "An Electronic Speckle Pattern Interferometer for complete In-plane Displacement Measurement", Measurement Science and Technology, Vol. 1, pp. 1024~1030, 1990.
- [7] Butters, J. N. and Leendertz, J. A. "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology", Optical and Laser Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 26~30, 1971.