

## ESPI를 이용한 복합재료 박리결함의 정량평가

### Quantitative Evaluation of Delamination Inside of Composite Materials by ESPI

김경석\*\*<sup>†</sup>, 양광영\*, 강기수\*\*, 지창준\*\*

Koungsuk Kim\*\*<sup>†</sup>, Kwang-young Yang\*, Kiso Kang\*\* and Changjune Ji\*\*

초 록 복합재료는 이방성의 특징으로 매우 복잡한 역학거동을 하며, 해석 및 신뢰성 검사에 많은 어려움이 있다. 특히, 기존의 비파괴검사기법으로 내부손상을 검출하는 것은 매우 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 복합재료 조물의 가장 취약한 분야인 충격에 의한 손상이 발생할 경우 효과적인 검출기법을 개발하고, 충격에 따른 내부결함의 정량평가에 ESPI를 활용하였다. 인공결함을 이용하여 ESPI기법의 신뢰성을 확보하고 실제 충격손상 시험편에 대해 적용하여 5%이내의 오차율로 결함을 정량평가하였다.

**주요어:** 전자처리 스페클패턴 간섭법, 복합재료, 충격손상, 정량평가, 박리결함

**Abstract** Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for quantitative evaluation of delaminations inside of a composite material plate is described. Delaminations caused by the impact on composite materials are difficult to detect visual inspection and ultrasonic testing due to non-homogeneous structure. This paper proposes the quantitative evaluation technique of the defects made in the composite plates by impact load. Artificial defects are introduced inside of the composite plate for the development of a reliable ESPI inspection technique. Real defects produced by impact tester are inspected and compared with the results of visual inspection which shows a good agreement within 5% error.

**Keywords:** electronic speckle pattern interferometry (ESPI), composite material plate, impact defect, quantitative evaluation, delamination

#### 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 대형 수송기 및 기계구조물에서 고강도 경량화를 위한 재료로 많이 사용되고 있으며, 중요한 역할을 담당하고 있다. 진동감쇠특성 및 내화화성 등이 뛰어난 뿐만 아니라 하중조건에 적합한 구조로 섬유방향과 적층을 달리함으로써 강성 및 강도조절이 가능하다는 장점이 있다[1-3].

복합재료는 이방성의 특징으로 매우 복잡한 역학거동을 하며, 해석 및 신뢰성 검사에 많은 어려움이 있다. 특히, 기존의 비파괴검사기법으로 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 내부결함의 정량평가에 ESPI를 활용하였다. 본 연구에서는 복합재 내부결함을 산업현장에서 쉽게 응용하여 효과적으로 검출을 할 수 있는 검사방법을 제안하였으며, 정량화 방법을 개발하기 위해 인공결함을 내부에 제작하여 제안된 검사방법을 이용하여 검출하고 상호 비교하였다. 결과에서는 인공결함의 경우 매우 정확하게 위치 및 크기를 검출하였으나, 실제결함의 정량평가의 경우 결함의 경계가 불분명하여 Line profile의 미분값을 구하는 방법을 개발하여 적용하고 육안검사기법과 비교하여 5%이내의 오차율로 정량평가를 하였다.

2. 전자처리 스페클 간섭법 (ESPI)

ESPI는 가장 널리 알려진 홀로그래피기법(holography)과 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 즉, Fig. 1에서와 같이 참조광(reference beam)과 물체광(object beam)의 간섭현상을 이용하여 변형 전과 변형 후의 이미지를 홀로그램에 저장하고, 처리하여 이를 재생(reconstruction)함으로써 변형정보를 얻을 수 있다. ESPI에서는 Fig. 2에서와 같이 홀로그래프를 대신하여 CCD 카메라와 광합성광학기기 (beam combiner)를 이용하여 각 이미지의 위상정보를 레이저의 간섭성질에 의해 일어나는 물체표면의 스페클의 강도분포로 컴퓨터에 저장하고, 화상처리장치를 통하여 두 이미지를 감산(subtraction) 또는 더하기(addition)처리를 함으로써 프린지패턴을 형성하게 된다[6,7]. 이 프린지 패턴은 물체의 변형과 관련이 있으며 이를 해석하기 위하여 다양한 방법이 소개되었으나, 최근에는 가장 유용한 기법으로 위상이동기법(phase shifting method)이 많이 사용되고 있다[8]. 위상이동기법은 ESPI 뿐만 아니라 Holography, Moire 등 비접촉 측정분야에서 다양하게 응용되고 있다. ESPI에서는 위상이동기법을 적용하기 위해 참조광의 광로상에 거울이 장착된 Piezoelectric transducer을 삽입하여 인위적으로 레이저의 위상을  $\pi/2$ 씩 변화하면서 4개의 이미지,  $I_1(x, y)$ ,  $I_2(x, y)$ ,  $I_3(x, y)$ ,  $I_4(x, y)$ 를 획득하고, 식 (1)과 같이 처리함으로써

각 점의 위상( $\Delta\phi$ )을 구하게되고, 물체전체에 대해 위상지도(Phase map)를 형성할 수 있다. 그러나, 식 (1)으로부터 구하여진 위상은 Arc tangent의 형태로 나타나게 되며,  $2n\pi$ 에서 톱니 형태(saw tooth or wrapped image)로 불연속성을 갖게 된다. 따라서, 대상체의 모든 점에서 정확한 위상정보를 얻기 위해서는 이 불연속 부를 연결하여  $2\pi$ 이상의 위상점에 대해서는 적절한 위상보정을 해주어야 하며, 이 위상보정과정을 결꺾침(unwrapping)이라 하고, 이러한 과정과 기타 간섭계의 감도벡터 등을 고려하여 최종의 물체의 표면변위를 구할 수 있게 된다[8].

$$\Delta\phi(x, y) = 2 \tan^{-1} \left( \frac{I_2(x, y) - I_3(x, y)}{I_1(x, y) - I_4(x, y)} \right) \quad (1)$$

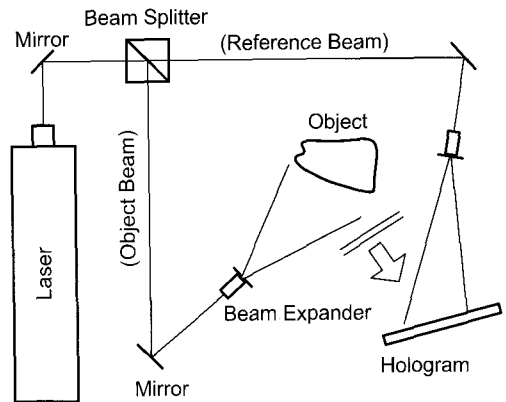


Fig. 1 Holographic interferometer

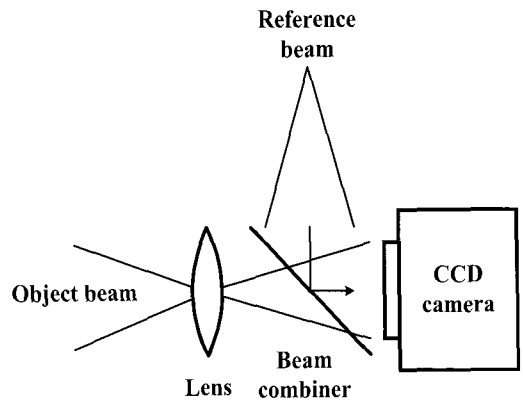
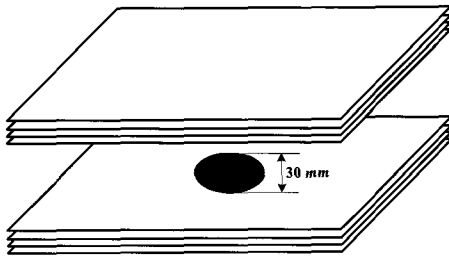


Fig. 2 Combination of reference with object beam

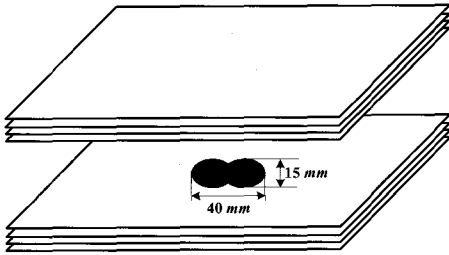
### 3. 실험장치구성

#### 3.1. 복합재 시험편

복합재 시험편은 탄소섬유 강화플라스틱 (CFRP, carbon fiber reinforced plastic)의 내부에 테프론 필름을 이용한 내부 인공결합 시험편을 제작하였으며, 실제 충격시험편은 충격시험기를 이용하여 시험편의 중앙에 충격을 가하였다. 인공결합은 층간 분리를 모델링하기 위해 원형 모양의 직경 30 mm, 두께 0.04 mm의 테프론 필름과 충격결합을 모사한 땅콩모양의 길이 40 mm, 높이 15 mm, 두께 0.04 mm의 인공결합을 복합재 성형 시 내부에 삽입하였다. Fig. 3은 인공결합의 형상을 나타내었다.



(a) Circular artificial defect



(b) Peanut-type artificial defect

Fig. 3 Artificial defects inside of composite plate

#### 3.2. ESPI 시스템 구성 및 검출방법

ESPI 시스템은 독일 Ettemeyer 사의 3D ESPI 시스템을 사용하였으며, 장비의 사양을 Table 1에 표시하였다. 측정은 시험편의 면외변위(out-of-plane displacement)를 측정하여 결함을 정량화 하였다. 실험에서는 복합재료가 온도에 약한 성질을 이용하

여 열전구를 약 2 분동안 후면에서 가열하고 전면에서 열전대(thermocouple)를 이용하여 온도를 측정하였다. 시험편은 45℃까지 가열 후 공기 중에서 냉각하면서 변형상태를 연속으로 모니터링하여, 변형전후의 온도변화가 약 5℃일때 ESPI시스템으로 결함을 검출하였다. 이 시험기법은 현장에서 적용이 용이할 뿐만 아니라 제어가 간단하여 현장활용 기술로 사용이 가능하다. 즉, 온도변화는 충격손상에 의해 내부 박리가 발생한 곳과 정상인 곳에서 열변형이 다르게 일어나며, 이 열변형을 고분해능의 ESPI 시스템으로 측정함으로써 결함의 위치 및 크기를 결정할 수 있다.

Table 1 ESPI system specifications

Manufacturer	Ettemyer Co., Germany	Model		3D-ESPI system
Measuring sensitivity	0.03 $\mu\text{m}$	Measuring range		1~20 $\mu\text{m}$
Operation modes	static, dynamic 1D-, 2D-, 3D-operation	Data acquisition speed		2.5 sec for 3D-analysis

### 4. 결과분석

#### 4.1. 인공결합 검사

인공결합검사 결과를 ESPI phase map(좌)과 unwrapping된 결과를 gray scale(우)로 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 unwrapping 결과로부터 line profile를 구하여 직경 30 mm의 원형 결함을 29 mm로 측정하였으며, 40 mm, 15 mm의 땅콩모양의 결함에 대해서 39 mm와 13 mm로 측정하였다.

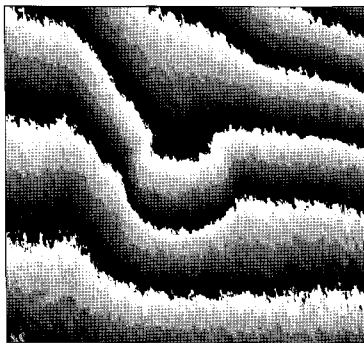
#### 4.2. 실제 충격손상 결함검사

실제 충격손상 결함시험편의 적층구성은  $[0^\circ / 90^\circ]_s$  으로 구성하였으며, 충격에 의한 복합재료 구조물의 층간분리를 만들기 위하여 충격시험기 (Instron Dynatup-8250)를 이용하여 적층판에 실제 충격을 가하였다. 충격에너지는 2.4 J을 가하였으며,

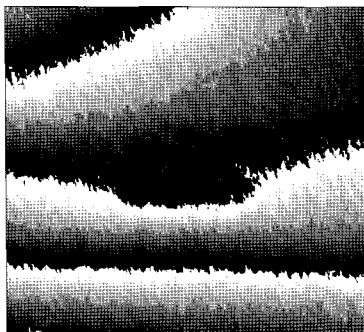
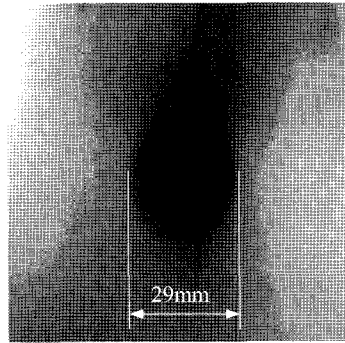
시험편의 크기는 100 mm × 100 mm, 두께는 약 1.8 mm로 하였다. 실제 충격결함도 인공결함 검사방법과 동일하게 열변형을 이용하여 검사하였으며, 충격 손상 표면과 손상부 후면을 각각 검사하였다. 실제 충격손상실험 결과에서는 충격손상부가 테프론처럼 경계가 일정하지 않아 정확히 결함을 산정하는데 주관적인 판단이 개입될 가능성이 발생하였다. Fig. 5는 실제 충격을 받은 면에서 검사한 결과이며, Fig. 6은 충격면의 후면에서 검사한 결과이다. 정량분석을 위해 표면변위를 측정하고 결함부분에서 line profile를 구하여 결정할 수 있으나, 결함경계가 불명확하였다. 이 문제를 해결하기 위해 측정변위값을 미분하여 기울기를 구하고, 기울기의 최고점을 찾아 결함의 크기로 산정하였다. 충격 손상면에서 결함은 9.94 mm, 7.38 mm로 검사되었으며, 그 후면에서는 13.03 mm, 6.87 mm로 측정되었다. 검출결과는 Fig. 7과 같이 각 층을 벗겨내어 육안 검사하는 방법으로 결과를 비교하였으며, 육안검사결과와의 비교에서 5%이내로 잘 일치하였다. Table 2는 ESPI 측정결과와 육안검사결과와의 비교를 나타내었다.

Table 2 ESPI measurement results for the impact damaged composite plate

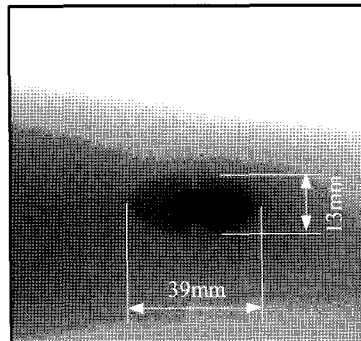
	Frontside(mm)		Backside(mm)	
	x	y	x	y
Visual inspection	x	10.50	x	13.50
	y	7.00	y	6.50
ESPI inspection	x	10.1	x	12.90
	y	7.86	y	6.88
	x	9.87	x	13.02
	y	7.60	y	6.71
	x	9.89	x	12.29
	y	7.14	y	6.72
	x	9.88	x	13.45
	y	7.30	y	7.73
	x	10.05	x	13.47
	y	7.30	y	6.84
ESPI result Average	x	9.94	x	13.03
	y	7.38	y	6.87
Error(%)	x	5.3	x	3.5
	y	5.4	y	5.7



(a) Circular artificial defect

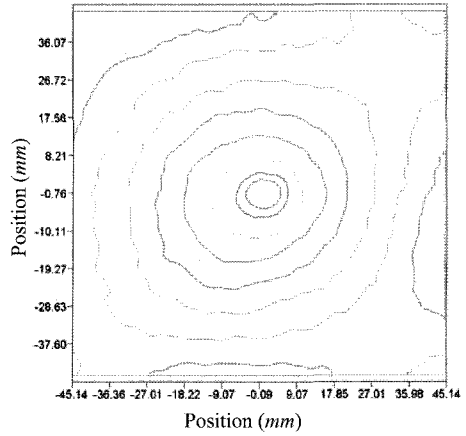
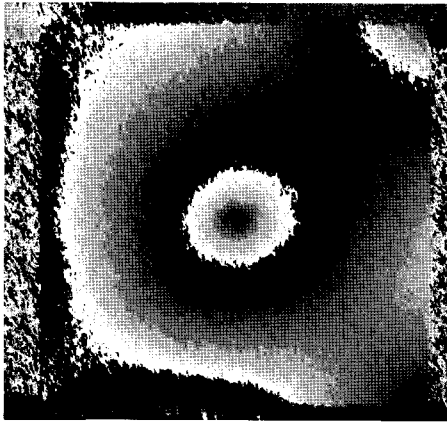


(a) Circular artificial defect

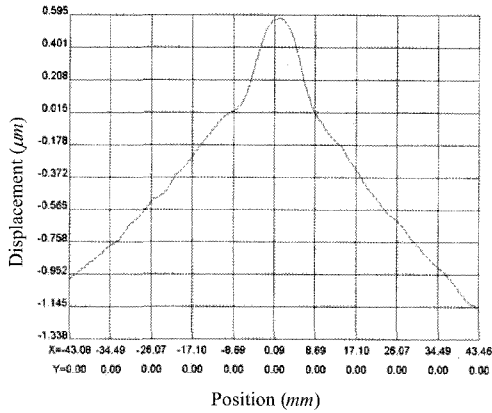


(b) Peanut-type artificial defect

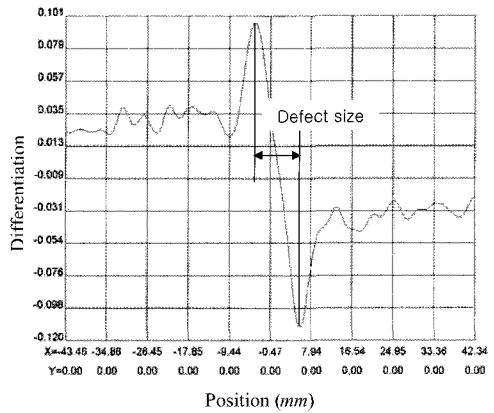
Fig. 4 Detection of defects inside of composite plate



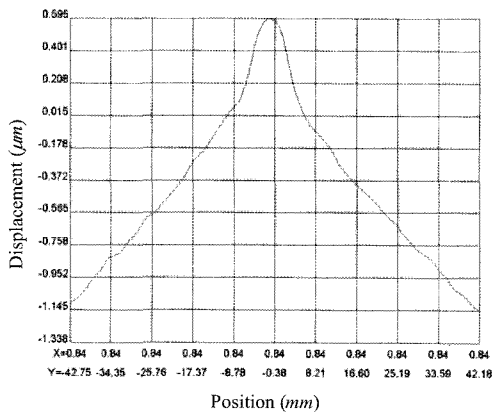
(a) phase map and out-of-plane displacement distribution



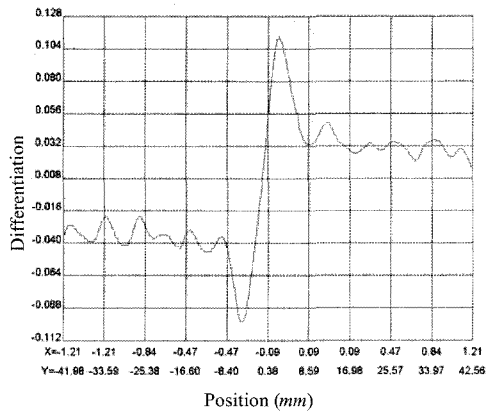
(b) Out-of-plane displacement to x-axis



(c) Differentiation of out-of-plane displacement ( $\frac{dz}{dx}$ ) to x-axis

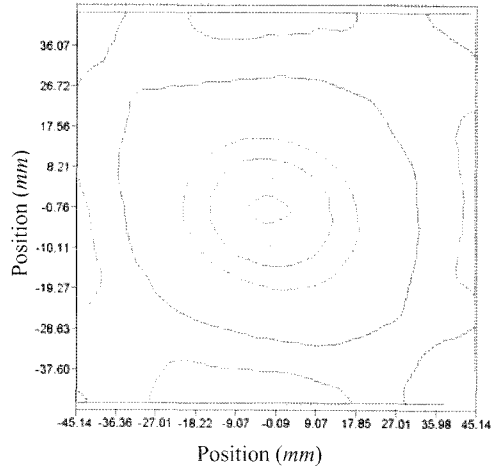
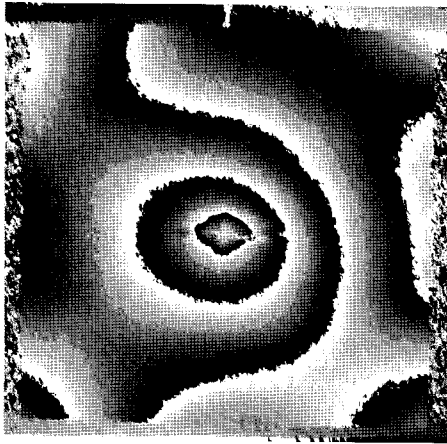


(d) Out-of-plane displacement to y-axis

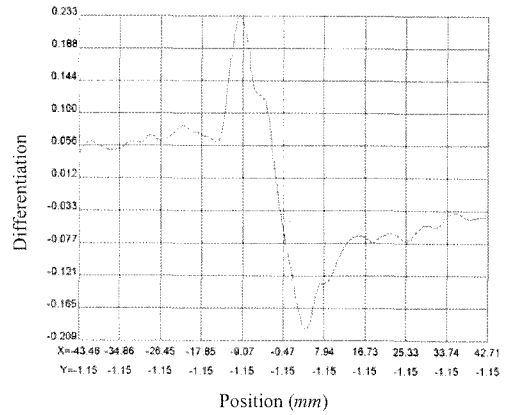
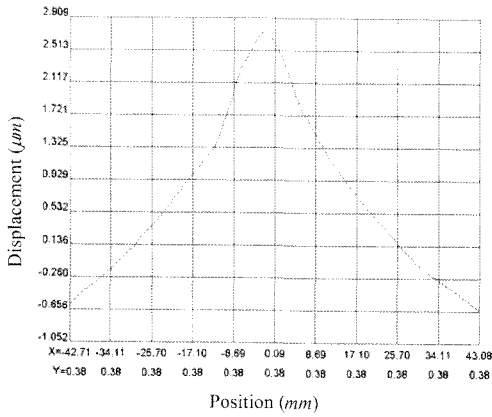


(e) Differentiation of out-of-plane displacement ( $\frac{dz}{dy}$ ) to x-axis

Fig. 5 Front side of impact damage

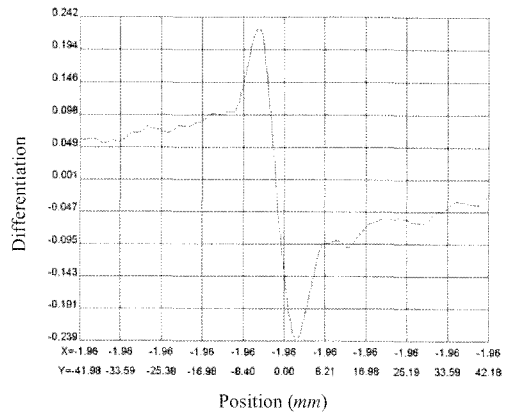
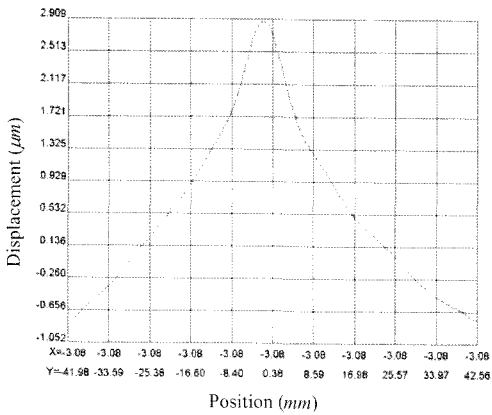


(a) phase map and out-of-plane displacement



(b) Out-of-plane displacement to x-axis

(c) Differentiation of out-of-plane displacement ( $\frac{dz}{dx}$ ) to x-axis



(d) Out-of-plane displacement to y-axis

(e) Differentiation of out-of-plane displacement ( $\frac{dz}{dy}$ ) to x-axis

Fig. 6 Back side of impact damage

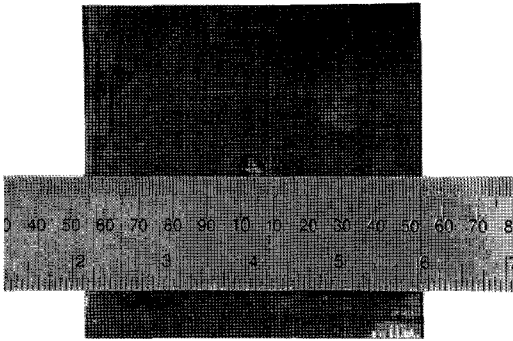


Fig. 7 Visual inspection

## 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 다른 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 결정하는 검사기법을 개발하였다. 결과비교를 위해 시험편의 각 층을 벗겨내어 육안검사를 하여 검증하였으며, 5%이내의 오차율로 검출하였다. ESPI를 이용한 복합재 결합검사는 복합재의 적층구성을 고려하지 않고 비접촉으로 검사할 수 있으며, 또한 전면검사 방식으로 검사시간을 획기적으로 줄일 수 있다.

## 후기

이 논문은 2004년도 조선대학교 연구보조비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] S. R. Swanson, Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials, pp. 22-24, Prentice Hall., (1997)
- [2] C. A. Dostal, ASME International and ASM, Composites (Engineered Materials Handbook, Vol. 1), ASME International, pp. 799-845, (1997)
- [3] I. M. Daniel and O. Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, Vol. 2, pp. 10-11, Oxford University Press, Oxford, (1994)
- [4] O. J. Løkberg and J. T. Malmo, "Detection of Defects in Composite Materials by TV Holography," NDT International, Vol. 21, No. 4, pp. 223-228, (1988)
- [5] C. Wykes, "Use of Electronic Speckle Pattern Interferometry in the Measurement of Static and Dynamic Surface Displacement," Optical Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 400-406, (1982)
- [6] A. J. Moore and R. Tyrer, "An Electronic Speckle Pattern Interferometer for complete In-plane Displacement Measurement," Measurement Science and Technology, Vol. 1, pp. 1024-1030, (1990)
- [7] J. N. Butters and J. A. Leendertz, "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology," Optical and Laser Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 26-30, (1971)
- [8] Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis," pp. 477-491, Cambridge University Press, Cambridge, (1990)