

저속충격에 의한 복합재료 적층판의 손상

안석환* · 김진욱** · 도재윤*** · 김현수* · 남기우*
*부경대학교 공과대학, **한국기계연구원, ***부산기능대학

Damage of Composite Laminates by Low-Velocity Impact

SEOK-HWAN AHN*, JIN-WOOK KIM**, JAE-YOON DO***, HYUN-SOO KIM* AND KI-WOO NAM*

*College of Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon, Korea

***Busan Polytechnic college, Busan, Korea

KEY WORDS: Low-velocity Impact 저속충격, Composite Laminate 복합재료 적층판, Elastic Wave Velocity 탄성과 속도, Ultrasonic Scans 초음파 주사, Damaged Area 손상영역, Delamination 박리

ABSTRACT: The study investigated the nondestructive characteristics of damage, caused by low-velocity impact, on symmetric cross-ply laminates, composed of [0_o/90_o]_s16s, 24s, 32s, 48s. The thickness of the laminates was 2, 3, 4 and 6 mm, respectively. The impact machine used, Model 8250 Dynatup Instron, was a drop-weight type that employed gravity. The impact velocities used in this experiment were 0.75, 0.90, 1.05, 1.20 and 1.35 m/sec, respectively. Both the load and the deformation increased when the impact velocity was increased. Further, when the load increased with the laminate thickness in the same impact velocity, the deformation still decreased. The extensional velocity was quick, as the laminate thickness increased in the same impact velocity and the impact velocity increased in the same laminate thickness. In the ultrasonic scans, the damaged area represented a dimmed zone. This is due to the fact that the wave, after the partial reflection by the defects, does not have enough energy to touch the opposite side or to come back from it. The damaged laminate areas differed, according to the laminate thickness and the impact velocity. The extensional velocities are lower in the 0_o direction and higher in the 90_o direction, when the size of the defect increases. However, it was difficult to draw any conclusion for the extensional velocities in the 45_o direction.

1. 서 론

섬유강화플라스틱(FRP)의 특징은 상온·상압에서 성형이 가능하여, 특히 금형을 필요로 하지 않으며, 난연성일 뿐만 아니라 해수 등에 내식성이 좋은 장점을 가지고 있어, 건축재료, 요트·소형선박의 선체, 육조·컨테이너·헬멧 등에 쓰인다. 탄소섬유·케블라 등과 에폭시수지의 복합재료는 유리섬유 복합재에 비해서 가볍기 때문에, 단위 무게당의 강도(이것을 비강도라고 한다)가 다른 재료와 비교해서 매우 크다. FRP는 내구성이 좋고 가벼우며 강성 및 내수성이 좋아 대형선박을 제외한 선박의 일반적인 선박재료로 널리 사용되고 있다. 제트스키와 낚시보트 같은 소형선박도 대부분 FRP로 제작된다. 파워보트나 요트에는 무게를 줄이고 항해환경을 좋게하기 위하여 코아재와 함께 샌드위치 구조로 건조하며 균합정에는 케블라 및 카본 등을 유리섬유대신 사용하여 방탄특성을 개선하기도 한다. 그러나 이러한 해양 구조물은 사용중에 다양한 환경을 접하게 되므로 손상을 받게된다. 특히 소형 선박은 운항중에 충돌하여 선체에 손상을 주게되고, 구조물의 수명을 단축하게 된다. 이와같이 저속충격을 받는 복합재료 적층판의 거동 또는 손상 문제를 규명하고자

1980년대 이후 많은 연구자들에 의하여 시도되었으며, 이러한 연구결과들을 분석하고 연구방법들을 비교 검토한 논문도 상당수 보고되었다(Mal and Rajapakse, 1990; Abrate, 1994; 2001; Cantwell and Morton, 1991). 저자들은 복합재료의 적층 형태에 따른 인장파괴에서의 음향방출 신호특성(남기우와 문창권, 2002), 기지재 균열, 섬유 파단, 층간분리, 박리, 섬유 pull-out 등의 음향방출과 초음파 특성을 규명하였다(남기우 등, 2001; 안석환과 남기우 2001). 그러나 저속충격된 복합재료 적층판의 손상영역을 비파괴적인 방법에 의하여 손상 특성을 규명한 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 저속 충격을 받은 복합재료 적층판의 손상 특성을 비파괴적인 방법에 의하여 규명하였다. 충격에 의한 적층판의 손상특성은 충격동안에 검출된 파형, ultrasonic scans, 손상영역의 속도 및 내부적인 결함영역을 관찰하기 위한 현미경 관찰을 통하여 특성을 규명하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 두께 0.125 mm인 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(Hercules; AS4/3502)를 사용하였고, Table 1에 기계적특성을 나타낸다.

제1저자 남기우 연락처: 부산시 남구 용당동 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

이와 같은 재료를 핸드레이업(Hand Lay-up)법을 사용하여 최종 두께가 2, 3, 4 및 6 mm의 적층판이 되도록 $[0^\circ/90^\circ]_s$ 로 적층하였다. 적층시에는 프리프레그를 한 장씩 등근 유리병으로 적당하게 압력을 가하면서 적층하고 실리콘 오일의 이형제가 칠하여진 금형에 넣은 후 진공상태로 30분간 유지시켰다.

Table 1 Mechanical properties of prepreg

Material	AS4/3502
0°Tensile strength	1.932 MPa
0°Tensile modulus	131 GPa
Fiber volume fraction	62 vol %

그리고 열 프레스에서 130°C, 2.88기압의 압력하에서 90분간 유지하여 잔류기공을 제거한 후, 성형이 완료된 후 적층판을 실온상태에서 120분간 냉각하여 30°이하로 떨어진 상태에서 개방하였다. 성형된 CFRP 적층판은 100 x 100 mm의 크기로 각 조건당 10개의 시험편을 충격시험에 사용하였다.

2.2 실험방법

복합재료 적층판의 충격에 의한 특성을 평가하기 위한 저속 충격장치는 1회 충격후 제동장치가 부착된 drop-weight type(Dynatup Instron model 8250)를 사용하였다. 충격속도는 중력모드에서 0.61~3.87 m/sec범위에서 가능하며, 본 연구에서는 5종류의 충격속도(0.75, 0.90, 1.05, 1.20, 1.35 m/sec)에서 실험을 실시하였다. 시험편을 장치에 고정된 후, 추를 낙하하여 저속충격에 의한 복합재료의 변형상태를 측정하고, 복합재료 적층판의 하중-변위선도와 탄성파의 검출에는 Fracture Wave Detector(FWD)를 사용하였다. 그리고, C-scan에 의하여 손상된 영역의 면적을 구하였으며, 단면을 절단하여 충격에 의한 균열 발생 상황을 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

저속 충격시험에서 얻어진 대표적인 하중-변위선도를 Fig. 1에 나타낸다. 이 그림은 충격속도 $V = 0.75$ m/sec에서 시험편 두께가 (a) 2mm와 (b) 6mm에서 얻어진 것이다. 같은 충격속도에서, 시험편의 두께가 큰 것이 더 큰 충격하중을 받지만, 변위는 작은 것을 알 수 있다.

저속 충격속도에 대하여 모든 적층판의 하중-변형 선도에서 얻어진 최대하중과 최대변형을 정리하여 Fig. 2에 나타낸다. 이 그림에서 충격속도가 빠를수록 하중과 변형은 크게 나타났다. 그리고 같은 충격속도에서 적층판의 두께가 두꺼워질수록 하중은 증가하지만, 변형은 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 두께가 두꺼워질수록 충격강도가 증가하고, 충격에너지를 많이 흡수하기 때문이라 판단된다.

적층판의 충격시험에서 얻어진 대표적인 파형을 Fig. 3에 나타낸다. 이 그림은 충격속도 $v = 0.7$ m/sec에서 얻어진 것으로, (a)는

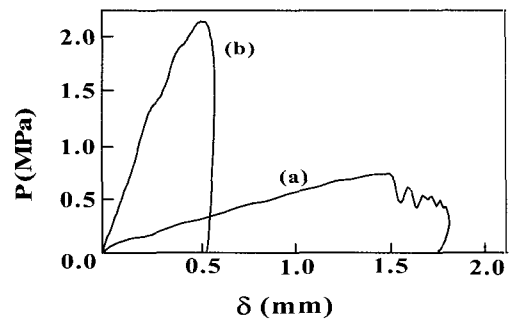


Fig. 1 Load-displacement curve from impact velocity $V = 0.75$ m/sec. (a) $t = 2$ mm, (b) $t = 6$ mm

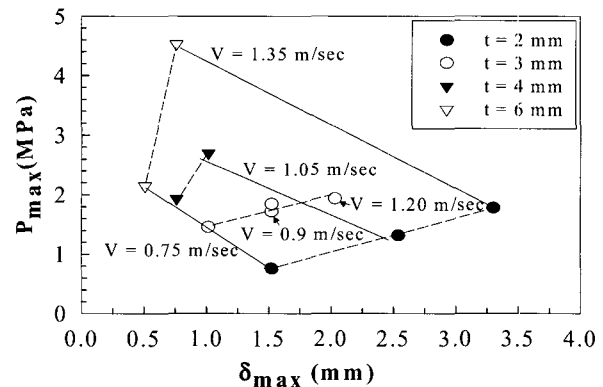


Fig. 2 Relation of maximum load and maximum displacement with impact velocity

$t = 2$ mm 적층판이고, (b) $t = 6$ mm 적층판이다. 파형은 충격지점으로부터 15 mm(실선)와 30 mm(점선)에 부착한 센서에서 검출하였다. 검출된 파형은 그림(a), (b)에서와 같이 2부분으로 나눌 수 있었다(Prosser, 1996). 파형의 첫부분은 적층판의 굽힘에 의하여 해방되는 팽창 모드(extensional mode)이고, 뒷부분은 장치 또는 적층판의 모서리에서 반사되는 노이즈인 굽힘 모드(flexural mode)이다. $t = 2$ mm 적층판에서는 팽창 모드와 굽힘 모드의 검출에 시차가 많이 있으나, $t = 6$ mm 적층판에서는 팽창 모드와 굽힘 모드가 거의 연속하여 나타나고 있다. 이와 같이 두께가 얇은 것은 팽창모드가 지배적이고, 모서리 등에서 반사되는 굽힘모드의 검출에 시차가 있기 때문이다. 그러나, 두꺼운 것은 팽창모드가 나타나고, 두께 방향과 모서리 등에서 반사되는 굽힘모드가 바로 이어서 나타나기 때문에 검출에 시차가 없다.

Fig. 3과 같은 파형에서 얻어진 팽창모드의 평균 속도를 Fig. 4에 나타낸다. 같은 충격 속도에서는 두께가 두꺼워질수록 팽창속도가 빨라지고 있으며, 같은 두께에서도 충격속도가 빨라질수록 팽창 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 이것은 두께가 얇은 적층판은 주로 판파가 지배적이지만, 두꺼워 질수록 판파 등 복합적인 파형이 나타나기 때문이다(Chang and Mal, 1998).

두께 2 mm의 적층판에 0.75 m/sec²로 충격한 후의 ultrasonic scans을 Fig. 5에 나타낸다. (a)와 (b)는 적층판 뒷면의 중앙에서 주사한

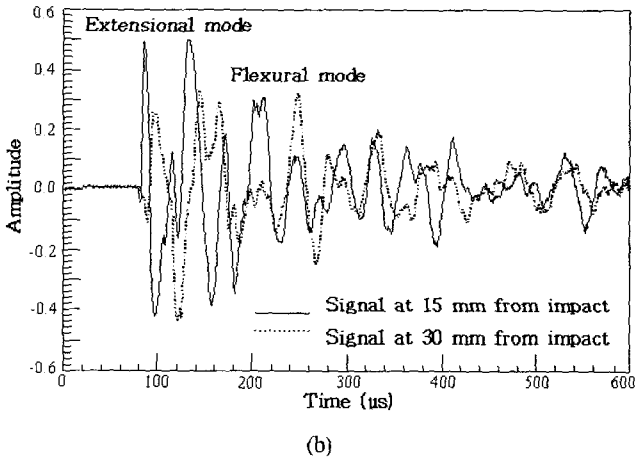
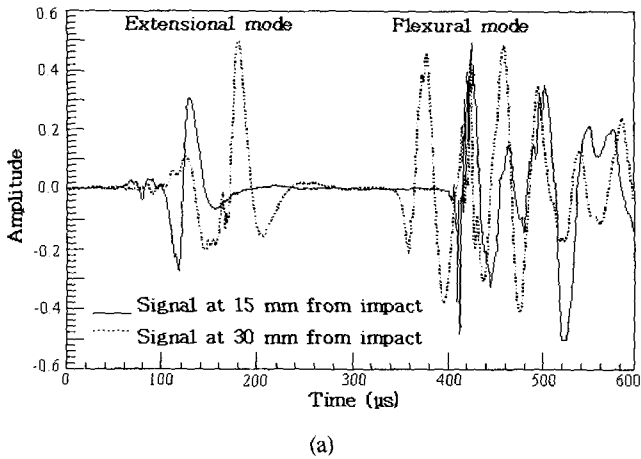


Fig. 3 Waveforms of the composite laminate impacted at $V = 0.75 \text{ m/s}$, (a) $t = 2 \text{ mm}$, (b) $t = 6 \text{ mm}$

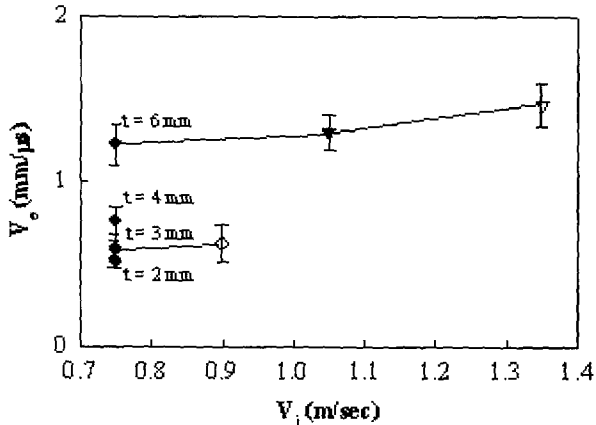


Fig. 4 Extensional velocity versus impact velocity in thickness of composite plate

B-scan으로, (a)는 수평방향이고, (b)는 수직방향을 나타낸다. (a)와 (b)의 중앙부에 희미한 영역을 볼 수 있다. 이것은 충격된 손상영역에서 반사된 파형이 되돌아오는 에너지가 충분하지 못하기 때문이다. 이 영역은 실 손상 면적을 계산하는데 사용되며, 시각 손

상 면적과 비교할 수 있다. 그리고, (c)~(f)는 C-scan을 나타낸다. (c)와 (d)는 각각 앞면과 뒷면의 중앙에서 주사한 최대 진폭값을 나타낸다. 뒷면의 손상 영역은 앞면의 손상영역보다 작은 것을 볼 수 있다. 따라서 실 손상 면적을 결정하기 위해서는 앞면에서 주사된 것을 사용하였다. (e)는 적층판의 충격된 앞면 직하의 손상된 면적으로 (c)보다 상세하게 나타낸다. (f)는 적층판의 뒷면 직하의 손상된 영역으로 (d)보다 상세하게 나타낸다.

Fig. 5와 같은 ultrasonic scans에서 측정된 적층판의 손상 면적 결과를 Table 2에 나타낸다. 동일한 두께에서 충격 속도의 증가와 동일한 충격 속도에서 두께의 증가는 시각 손상 면적과 실 손상 면적의 증가를 초래하였다. 이것은 두께 및 속도에 따라서 충격에 의하여 손상된 적층판의 박리면적이 다르다는 것을 의미한다.

손상된 적층판의 extensional 속도를 측정하여 Table 3에 나타낸다. 여기서 측정방향은 Fig. 6에 나타내며, $V(0^\circ)$, $V(90^\circ)$ 및 $V(45^\circ)$ 는 각각 표면부의 섬유배열방향과 수평, 수직 및 45° 방향의 속도를 나타낸다. $V(0^\circ)$ 는 결합의 치수가 증가할수록 늦어지는 것을 보여준다. 이것은 90° 방향으로 배열된 섬유의 결합이 초음파의 전파를 방해하기 때문이라고 판단된다. $V(90^\circ)$ 는 결합의 치수가 증가할수록 대체적으로 빨라지는 것을 보여준다. 이것은 90° 방향에서 박리가 더 많이 발생한다는 것을 의미한다. $V(45^\circ)$ 는 속도 의존성을 보여주지 못하였다.

Table 2 Results of the ultrasonic scans

t (mm)	V_i (m/s)	A_{vd} (mm ²)	A_{rd} (mm ²)	A_{rd}/A_{vd}
2	0.75	4.5	122.7	27.3
2	1.05	10.2	380	37.3
2	1.35	19.6	433.7	22.1
3	0.75	7.1	152	21.4
3	0.90	9.1	227	24.9
3	1.05	13.9	380	27.3
3	1.20	18.1	490.9	27.1
4	0.75	9.8	250.9	25.6
4	1.05	13.9	397.6	28.6
6	0.75	15.2	252.3	16.6
6	1.35	26.4	454.1	17.2

t : thickness, V_i : impact velocity, A_{vd} : visible damaged area, A_{rd} : real damaged area

Table 3 Extensional velocities from damaged areas

t (mm)	V_i (m/s)	$V(0^\circ)$ (mm/μs)	$V(90^\circ)$ (mm/μs)	$V(45^\circ)$ (mm/μs)
2	0.75	7.69	5.49	3.67
2	1.05	6.02	5.88	3.90
2	1.35	5.31	6.25	2.87
3	0.75	6.94	5.75	3.33
3	0.90	6.49	6.57	4.38
3	1.05	6.49	7.00	4.95
3	1.20	6.02	7.95	5.81
4	0.75	6.58	6.32	4.54
4	1.05	6.32	7.14	4.12
6	0.75	6.23	6.45	4.32
6	1.35	6.51	6.04	4.45

$V(90^\circ)$, $V(45^\circ)$: extensional velocity in the each direction

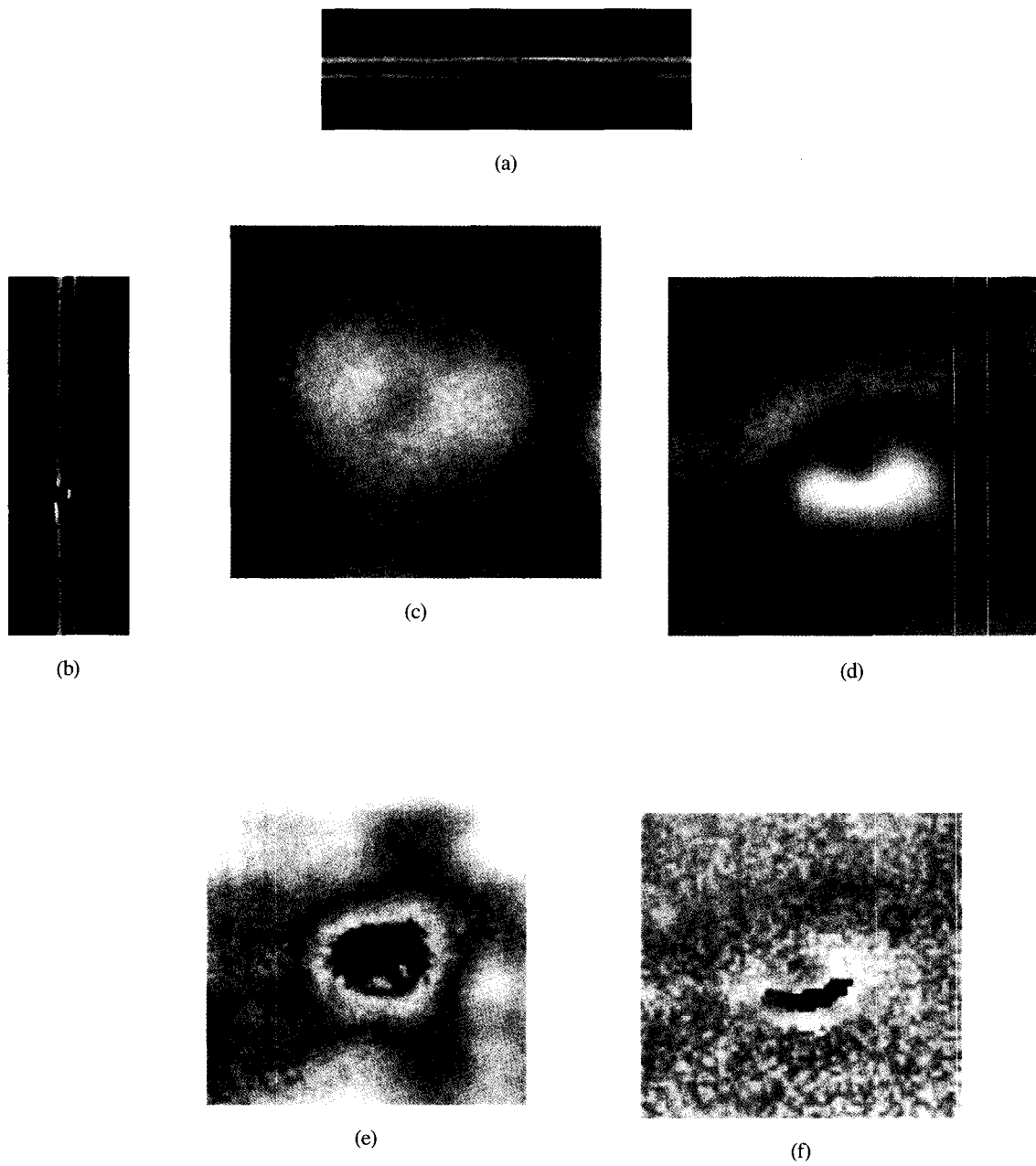


Fig. 5 Ultrasonic scans of $t = 2 \text{ mm}$ laminate impacted at $V = 0.75 \text{ m/s}$

- (a) B-scan of the central damaged area in horizontal direction (x2)
- (b) B-scan of the central damaged area in vertical direction (x2)
- (c) C-scan of the peak amplitude reflection from front side (x2)
- (d) C-scan of the peak amplitude reflection from rear side (x2)
- (e) C-scan of the damaged area just below the top impacted side of the laminate (x1.5)
- (f) C-scan of the damaged area just above the rear side of the laminate (x1.5)

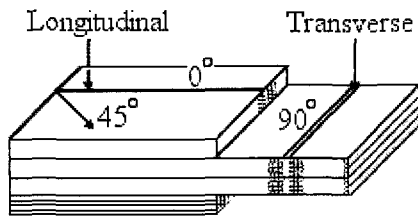


Fig. 6 Direction to measure the extensional velocities

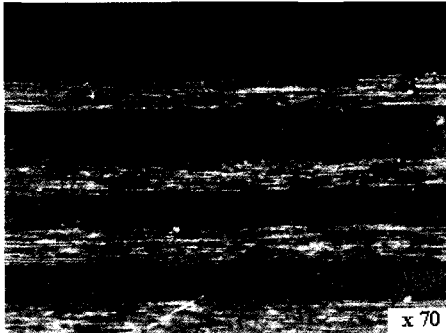


Fig. 7 Microscopic inspection of $t = 4$ mm laminate impacted at $V = 1.35$ m/s

Table 4 Delamination length in 90° direction

t (mm)	V_i (m/sec)	L_D (mm)
2	0.75	1.5
2	1.05	6.0
2	1.35	10.0
3	0.75	0.5
3	0.90	1.0
4	0.75	2.0
4	1.05	10.0
6	0.75	0.8
6	1.35	1.5

L_D : delamination length

$t = 4$ mm의 복합재료 적층판에 $V = 1.05$ m/sec로 충격한 단면 사진을 대표적으로 Fig. 7에 나타낸다. 이것은 Fig. 6에 나타난 것과 같은 적층판의 섬유배향의 90°방향으로 절단한 것이다. 그림에서 충격에 의하여 발생한 적층판의 박리를 관찰 할 수 있다. 이와 같은 단면사진에서 측정된 박리 길이를 Table 4에 나타낸다. 충격속도가 증가함에 따라서 동일한 두께에서 박리 길이가 증가함을 알 수 있었고, 두께가 다른 적층판($V = 0.75$ m/s에서 $t = 2$ mm와 $t = 6$ mm)에서 박리 길이가 동일함에도 불구하고 실 손상 면적은 다르게 나타났다. 이것은, 매트릭스 균열은 $t = 6$ mm에서, 박리는 0°방향에서 더 많이 발생한 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 저속 충격을 받은 복합재료 적층판의 손상 특성을 비파괴적인 방법, 즉, 충격동안에 검출된 파형, ultrasonic

scans, 손상영역의 속도 및 내부적인 결합영역을 관찰하기 위한 현미경 관찰에 의하여 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 저속 충격시험의 충격속도가 빠를수록 하중과 변형은 크게 나타났다. 그리고 같은 충격속도에서 적층판의 두께가 두꺼워질수록 충격하중은 증가하지만, 변형은 작아지는 것을 알 수 있었다.
- 2) 같은 충격 속도에서는 두께가 두꺼워질수록 팽창속도가 빨라졌으며, 같은 두께에서도 충격속도가 빨라질수록 팽창속도가 빨라지는 것을 알 수 있었다.
- 3) 저속 충격된 적층판의 손상된 부분은 반사된 초음파의 되돌아오는 에너지가 충분하지 못하기 때문에 손상된 부분이 희미하게 나타났다. 그리고, 두께 및 속도에 따라서 충격에 의하여 손상된 적층판의 박리면적이 다르게 나타났다.
- 4) 표면부의 섬유 배열 방향과 수평인 $V(0^\circ)$ 는 결합의 치수가 증가할수록 늦어졌으며, 수직인 $V(90^\circ)$ 는 결합의 치수가 증가할수록 대체적으로 빨라지는 것을 보여주었다. 그러나, 45°인 $V(45^\circ)$ 는 속도 의존성을 보여주지 못하였다.

참 고 문 헌

- 남기우, 문창권 (2002). "CFRP적층 형태에 따른 파괴시 음향방출 신호특성", 한국해양공학회지, 제16권, 제2호, pp 67~71.
- 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권(2001). "시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동", 비파괴검사학회지, 제21권, 제1호, pp 39~45.
- 안석환, 남기우 (2001). "음향방출 및 초음파시험을 이용한 CFRP 시험편의 파괴 거동 해석", 비파괴검사학회지, 제21권, 제3호, pp 251~260.
- Abrate, A. (1994). "Impact on Laminated Composite : Recent Advances", Applied Mechanics Review, ASME, Vol 47, No 11, pp 517~544.
- Abrate, A. (2001). "Modeling of Impacts on Composite Structures", Composite Structures, Vol 51, pp 129~138.
- Cantwell, W. J. and Morton, J. (1991). "The Impact Resistance of Composite Materials - A Review", Composites, Vol 22, No 5, pp 347~362.
- Chang, Z. and Mal, A.K. (1998). "Wave Propagation in a Plate with Defects", Review of Progress in QNDE, Vol 17, pp 121~128.
- Mal, A.K. and Rajapakse, Y.D.S. (1990). "Impact Response and Elastodynamics of Composite Materials", ASME Publications, AMD-Vol 116.
- Prosser, W.H. (1996). "Advanced AE Techniques in Composite Materials Research", J. of Acoustic Emission, Vol 14, pp S1~S11.

2004년 3월 10일 원고 접수

2004년 6월 21일 최종 수정본 채택