

판형 복합재료의 충격 손상에 대한 비파괴시험적 고찰

나성엽*, 김재훈**, 최용규*, 류백능*

The Study of Nondestructive Test about Impact Damage of Plate Composite Materials

Sung-Youb Na*, Jae-Hoon Kim**, Yong-Kyu Choi*, Baek-Neong Ryu*

ABSTRACT

This study represents the Nondestructive Test about impact damage of composite materials made by different lay-up patterns and degrees. For this study, they were examined by the drop test on composite materials of two type lap-up patterns with fabric and unidirectional prepreg and examined nondestructive test of those. Nondestructive methods were X-ray test with ZnI₂ penetrant and Ultrasonic C-scan. The defect detectability of X-ray and Ultrasonic test was compared according to defect species. And the amounts of damage on impacted zone were compared according to impact energy on two type test specimens. At results, Ultrasonic test was more effective to detect delamination and Penetrant X-ray test was more effective to detect matrix crack and fiber fracture. There were some differences in defect shapes and grades according to lay-up patterns and degrees, and the trend appeared that matrix crack, delamination, fiber fracture occurred and increasing defects sizes according to increasing impact energy.

초 록

본 연구는 적층각 및 적층구성이 다른 판형 복합재료의 충격 손상에 대하여 비파괴시험적 관점에서 고찰하였다. 연구를 위하여 직조 및 단일방향 프리프레그로 만든 두가지 형식의 복합재료에 낙하식 충격을 가한 후 비파괴검사를 수행하였다. 비파괴검사는 ZnI₂를 침투한 X-ray 검사 그리고 초음파 C-scan 검사를 수행하였고 결함의 종류에 따라 이들 검사에 대한 검출효과를 비교하였다. 그리고 두가지 형식의 복합재료 시험편에 대하여 충격 에너지별 결함의 발생정도를 비교하였다. 시험결과, 결함의 검출효과에 대하여서는 층간 분리 검출은 초음파 검사가 효과적이고 기지 크랙 및 섬유 파단은 침투제를 적용한 X-ray 검사가 효과적이었다. 그리고 적층각 및 적층구성에 따라 결함의 형상 및 발생 정도에 상당한 차이가 있었으며, 충격 에너지가 증가할수록 기지 크랙, 층간 분리, 섬유 파단의 순으로 결함이 발생하였고 그 크기도 대체적으로 증가하는 경향을 보였다.

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**충남대학교(Chungnam University)

1. 서 론

항공, 우주, 추진기관 분야에 널리 사용되고 있는 섬유강화 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 비강도와 비강성이 높은 경량화 재료로 우수한 피로특성과 내마모성, 내열성, 절연성 등의 특성을 가지고 있으며, 적층각 및 적층 순서에 따라 적절한 강도와 강성을 갖는 재료로 설계 제작할 수 있는 장점이 있다. 그러나 섬유강화 복합재료는 재료의 특성상 층과 층 사이의 경계, 섬유와 기지 사이의 경계가 약하고 판에서 두께 방향으로의 보강섬유가 존재하지 않으므로 금속재료에 비하여 낮은 에너지의 충격에서도 손상이 발생하기 쉽다. 따라서 충격에너지에 따른 복합재료의 손상정도를 예측하고 충격 손상 부위에 대한 다양한 비파괴검사 기법을 적용하여 발생한 결함을 효과적으로 검출하는 것이 절실히 요구된다.[1,2,3]

복합재료는 강화섬유를 각도에 따라 여러겹 적층하고 이들 섬유사이를 기지가 충전 및 접착되어 고정시켜 주기 때문에 비등방성 구조를 가지고 있다. 따라서 충격을 받을시 적층 패턴에 따라 여러 형태의 다양한 결함이 발생할 수 있으며 그 방향도 불규칙적이다. 이들 중 대표적 결함으로는 표면 찌힘(Dent), 기지 크랙(Matrix Crack), 층간 분리(Delamination), 섬유 파단(Fiber Fracture) 등이 발생할 수 있다. 표면 찌힘은 일반적으로 충격자에 의하여 일정 충격 에너지 이상에서 쉽게 일어날 수 있으며, 찌힘의 형상은 충격자의 형태에 주로 의존된다. 충격을 받는 순간 복합재료는 일차적으로 변형이 일어나며 탄성한계를 벗어나면 기지 크랙이 발생되고, 충격 에너지가 증가할수록 크랙의 크기가 점차 진전되며 강화섬유 층간에서는 수평적으로 기지 크랙이 발생되고 곧이어 층간 분리를 일으킨다. 충격 에너지가 좀 더 높은 단계에서는 강화섬유의 탄성 한계를 건디지 못하고 과도한 층간 분리와 섬유 파단이 일어난다.[3,4]

본 연구에서는 적층각 및 적층패턴을 달리한 2종류의 판형 복합재료에 대하여 충격 에너지를

다양하게 주고, 육안검사 및 초음파 C-scan, X-ray 검사를 통하여 충격 부위에 대한 손상 정도를 고찰하였으며, 결함의 종류에 따라 이들 결함을 효과적으로 검출하기 위한 비파괴검사 방법을 제시하였다.

2. 실험

2.1 시편 제작

시편은 강화재와 모재가 탄소섬유/에폭시로 구성된 두께 0.14mm의 단일 방향 프리프래그와 두께 0.19mm의 직조된 프리프래그를 사용하여 A, B 두가지 시편을 Table 1과 같은 방식으로 제작하였으며, A 시편은 적층 구성을 $[(\pm 45)(0/90)_2]_s$ 로 하여 모두 직조된 프리프래그로 6층 구성하였고, B 시편은 적층 구성을 $[(\pm 45)(0)_3(90)(0)_3(\pm 45)]$ 로 하여 외곽 2층은 직조된 프리프래그로 내부 7층은 단일방향 프리프래그로 구성하였다. 적층된 시험편은 오토클레이브 에서 125oC, 3bar의 환경에서 2시간 유지시킨 뒤 서서히 냉각시켜 제작하였다. 제작된 시편은 BSS 7260[5]에 따라 가로 150mm x 세로 100mm로 절단하여 시험에 사용하였다.

Table 1. Lay-up Patterns of Impact Test Composite Specimen

| Specimen | Lay-up Pattern | Lay-up number | Measured Thickness |
|----------|------------------------------|---------------|--------------------|
| A | $[(+45)(0/90)_2]_s$ | 6 layers | 1.32mm |
| B | $[(+45)(0)_3(90)(0)_3(+45)]$ | 9 layers | 1.48mm |

2.2 시험장치 및 시험방법

본 시험에 사용한 시험장비는 충격시험 장치, X-ray 장비와 초음파 장비이다. 이들에 대한 각각의 시험장치와 시험방법에 대하여 기술하면 다음과 같다.

저속 충격 시험에 사용된 시험장치는 낙하식 충격시험기인 Dynatup 8250을 사용하였으며,

이 시험장치의 구성도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 본 실험에 사용한 충격자는 Indenter의 모양이 실린더 형태이고 끝부분의 직경이 15.7mm인 반구형이며 무게는 3.7kg이다. 충격 에너지는 1.51~13.55 Joule까지 변화시켜 시험하였다.

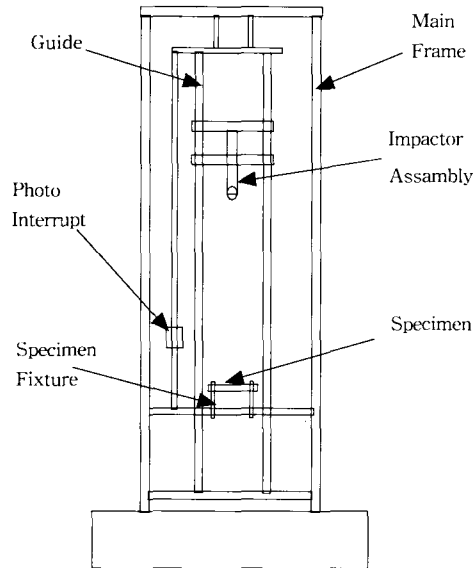


Fig. 1. The schematic diagram of Impact Tester

충격 시편에 대한 X-ray 실험은 초점 크기가 0.2mm인 고분해능 160KVP X-ray 장비로써 시험하였으며 시편의 평면방향으로 촬영하였다. X-ray 에너지는 60KeV이고 선원과 필름간의 거리는 각각 1000mm로 하였으며, 노출전류 및 시간은 2.5mA, 55초였다. 필름은 양쪽에 납스크린이 삽입된 Paper 팩 형식의 Agfa D3 필름을 사용하였으며 X-ray 촬영이 끝난 필름은 자동현상기로 5분간 자동 현상하였다. 표면손상이 있는 시편은 침투제의 밀도 차이 효과를 이용하여 ZnI_2 수용액(ZnI_2 60g + M.E.K. 250ml)을 침투제로 하여 1시간 이상 침투시켜 내부결함으로 충분히 침투제가 침투할 수 있도록 하고 건조 후 표면은 M.E.K.를 묻힌 가제로 세척한 후 X-ray 촬영하였다.

초음파 장비는 미국 Matec사의 제품으로 A-scan 및 C-scan이 가능한 초음파 시험장치로써 탐촉자를 움직이는 구동부위, 그리고 초음파

를 송수신할 수 있는 초음파 송수신부 및 데이터 분석 장치, 출력부로 구성되어 있다. 시험에 사용된 방식은 수침법으로 반사파법을 적용하였으며, 탐촉자는 5MHz, 직경 0.5", 비초점식을 사용하였고 스캔 속도는 150mm/sec, 스캔 증분은 0.5mm였다.

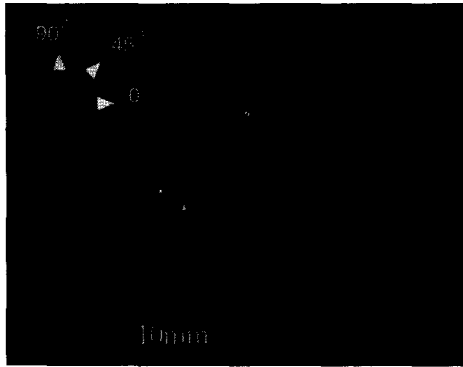
3. 결과 및 고찰

3.1 육안 검사 결과

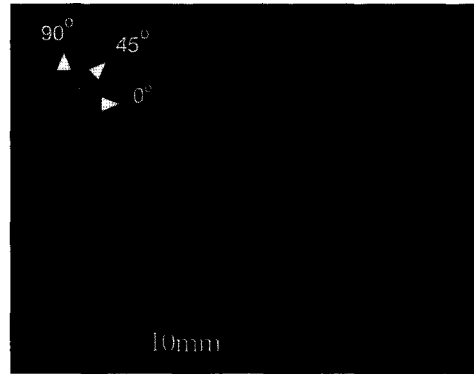
충격을 받은 복합재료 시편의 표면을 육안으로 관측하면 표면 손상에 대한 정도를 관측할 수 있다. Fig. 2, 3은 충격 손상 부위에 대한 현미경 확대 사진이다. A 시편의 경우는 직접 충격을 받은 면에서는 충격자에 의한 원형의 압흔이 보이며, 배면에서는 $\pm 45^\circ$ 대각선 방향으로 섬유 파단에 의한 크랙이 존재하며 전체적인 파손의 형태는 사각형에 가깝다. 이렇게 손상이 국부적인 이유는 적층재에 사용된 프리프래그가 모두 직조된 프리프래그이기 때문이며, 전체적인 파손 형상이 사각형인 이유는 내부 4층에 사용된 직조된 프리프래그의 적층각이 ($0^\circ/90^\circ$)이기 때문이다. B 시편의 경우에서는 직접 충격을 받은 면에서는 충격자에 의한 원형 압흔이 존재하며 0° 방향으로 땅콩 형상의 층간 분리가 발생하였음을 알 수 있으며 이는 $\pm 45^\circ$ 층 아래에 3층의 0° 방향의 단일 방향 프리프래그들이 사용되었으며 프리프래그 경계면에서의 층간 분리는 경계면 아래쪽에 존재하는 프리프래그의 기지 크랙 방향과 일치하기 때문이다. 그리고 그 배면으로는 0° 방향으로 긴 크랙이 발생하였음을 관측할 수 있으며 마찬가지로 경계면에서의 단일 방향 프리프래그의 기지 크랙에 의한 영향 때문으로 판단된다.

3.2 X-ray 검사 결과

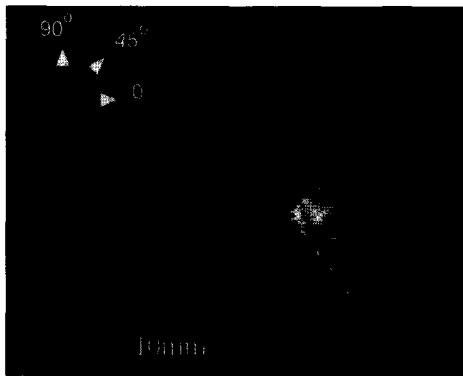
X-ray 검사에서는 ZnI_2 침투제를 침투시켜 촬영하였으며 Fig. 4, 5는 A 시편과 B 시편의 X-ray 영상이다. A 시편에서는 9.48Joule과



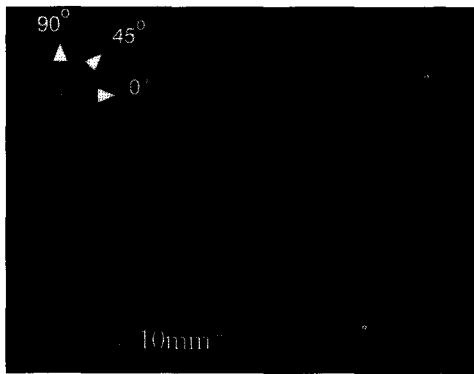
(a) Front view



(a) Front view



(b) Backward view



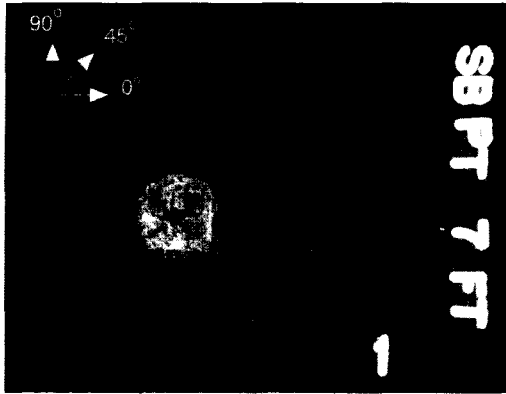
(b) Backward view

Fig 2. Photograph of Impact test specimen
(A specimen, 9.48Joule)

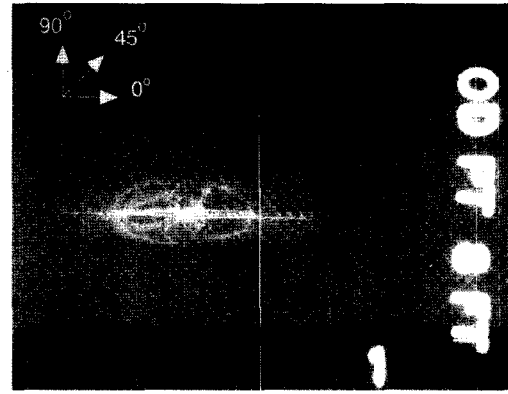
Fig 3. Photograph of Impact test specimen
(A specimen, 13.55Joule)

10.84Joule의 충격에너지를 받은 영상이며 기지 크랙과 섬유 파단이 주로 발생하였음을 알 수 있다. 기지 크랙은 사각형 형태로 충격부위에 집중적으로 존재하며 0° 와 90° 가 교차되는 방향으로 섬유 파단이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 육안검사로 관찰되었던 배면에서의 $\pm 45^\circ$ 대각선 방향의 섬유 파단 형상과 일치하지 않음을 보였다. 그 이유는 배면에서의 $\pm 45^\circ$ 대각선 방향의 섬유 파단은 최외곽층에서의 현상이고 그 내부층에서는 0° 와 90° 가 교차되는 방향으로 섬유 파단이 우세하게 일어난 때문이다. A 시편에서 섬유 파단이 0° , $\pm 45^\circ$, 90° 로 발생하는 이유는 직조된 프리프레그가 0° , $\pm 45^\circ$, 90° 로 적층되어 있기 때문

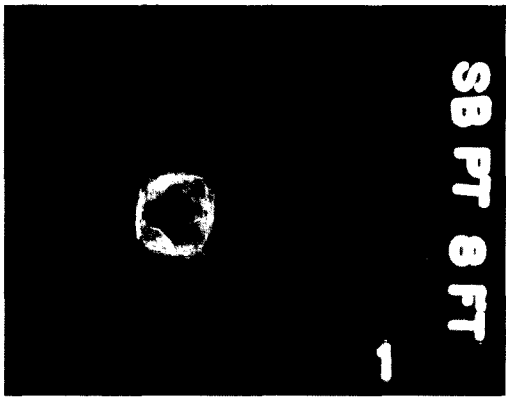
에 결합이 적층면과 평행한 방향으로 진전되기가 어렵고 국부적으로 충격을 흡수하면서 기지 크랙과 섬유 파단이 발생한 때문으로 판단된다. 그리고 충격에너지가 높아져도 파손의 정도만 진전될 뿐 파손 면적에는 거의 변화가 없음을 보인다. B 시편에서는 10.84Joule과 13.55Joule의 충격에너지를 받은 영상이며 층간 분리와 기지 크랙이 주로 발생하였고 섬유 파단도 관측된다. 손상된 전체적인 형상은 원반형 땅콩 형상이다. 층간 분리는 주로 0° 방향으로 발생하였고 기지 크랙은 충격부의 중앙부에서는 방사형이고 하단부에서는 0° 방향으로 길게 발생하였다. 또한



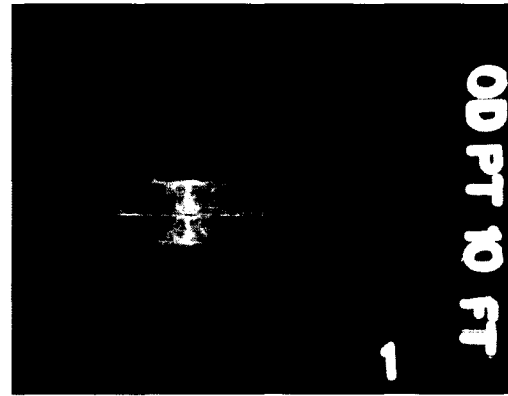
(a) A specimen, 9.48Joule



(a) B specimen, 10.84Joule



(b) A specimen, 10.84Joule



(b) B specimen, 13.55Joule

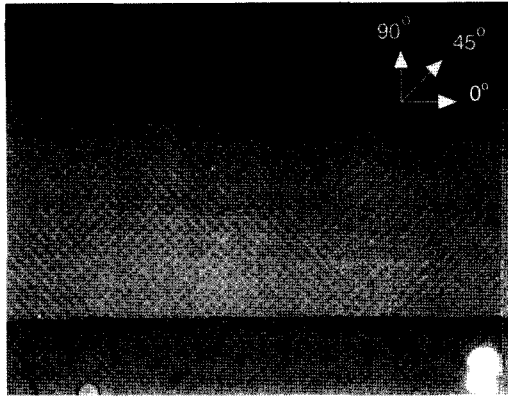
Fig 4. X-ray Images of Impact test specimen (A specimen)

섬유 파단은 10.84Joule에서 $\pm 45^\circ$ 방향으로 미세하게 검출되며 에너지가 좀 더 높은 13.55Joule에서는 $\pm 45^\circ$ 방향외에 0° 와 90° 방향으로 우세하게 발생하였음을 보인다. B 시편에서 층간 분리가 0° 방향으로 발생한 이유는 $\pm 45^\circ$ 아래에 3층의 0° 방향의 단일 방향 프리프레그가 적층되어 있으므로 기지 크랙이 진전하다 프리프레그 적층 방향과 일치하면서 생긴 때문이다. 낮은 충격 에너지에서 $\pm 45^\circ$ 방향으로 발생한 섬유 파단은 외곽의 $\pm 45^\circ$ 방향 직조된 프리프레그에 의한 것이고, 높은 충격 에너지에서 $0, 90^\circ$ 방향의 섬

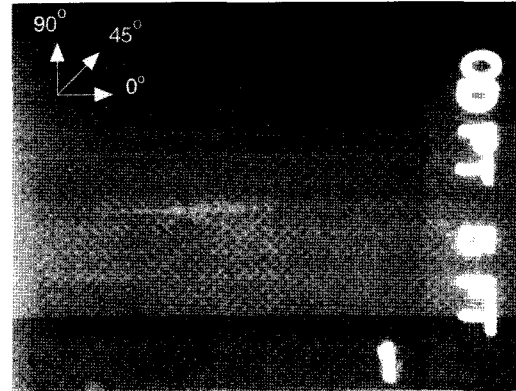
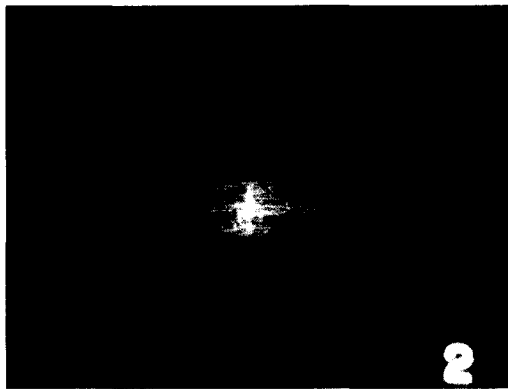
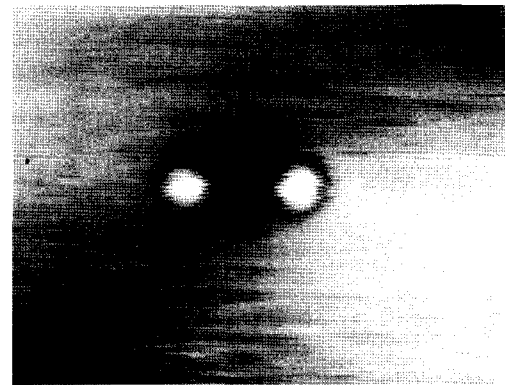
Fig 5. X-ray Images of Impact test specimen (B specimen)

유 파단이 우세하게 발생한 이유는 높은 충격 에너지에서 $0, 90^\circ$ 의 단일 방향 프리프레그의 섬유 파단에 기인된 것으로 판단된다.

Fig. 6은 동일 시편에 대하여 일반적 X-ray 검사와 ZnI_2 침투제를 적용한 X-ray 검사의 영상을 비교한 것이다. 일반적 X-ray 영상에서는 기지 크랙이 일부 검출되며 결합 영상이 뚜렷하지 못하다. 반면 침투제를 적용한 X-ray 영상에서는 기지 크랙, 층간 분리, 섬유 파단이 양호하게 검출되며 결합의 형상이 뚜렷하다. 따라서 침투제를 적용한 X-ray 검사가 효과적이다.



(a) General X-ray Image

(a) ZnI₂ Penetrant X-ray Image(b) ZnI₂ Penetrant X-ray Image

(b) Ultrasonic C-scan Image

Fig 6. General X-ray and ZnI₂ X-ray Images of Impact test specimen. (B specimen, 10.84Joule)

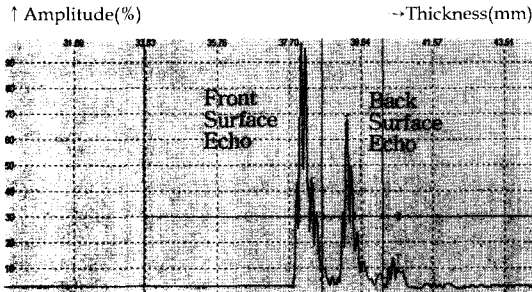
Fig 7. X-ray and Ultrasonic C-scan Images of Impact test specimen. (B specimen, 6.77Joule)

3.3 초음파 검사 결과

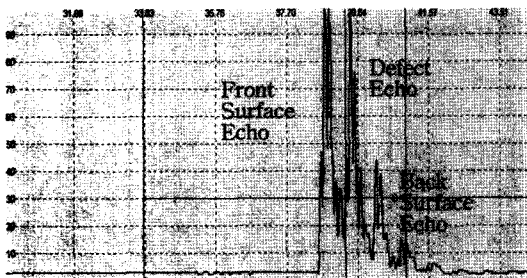
초음파 C-scan 검사에서는 시편에서의 A-scan 신호에 Gate를 설정하여 C-scan함으로써 유효한 신호를 위치 데이터와 함께 연산하여 평면 도형화했다. Fig. 7은 6.77Joule의 충격 에너지를 받은 B 시편의 ZnI₂ 침투 X-ray 영상과 C-scan 영상을 비교한 것이다. X-ray 영상에서는 0° 길이 방향으로 기지 크랙이 주로 검출됨을 보였으나 C-scan 영상에서는 땅콩 형상의 층간 분리가 가운데 검은색의 충격지점을 대칭으로 쌍둥이 형태로 발생하였음을 보인다. C-scan 영상의 가운데

검은색 부분은 충격 지점 부근에 집중되어 있는 미세 기지 크랙에 의한 영상으로 판단된다.

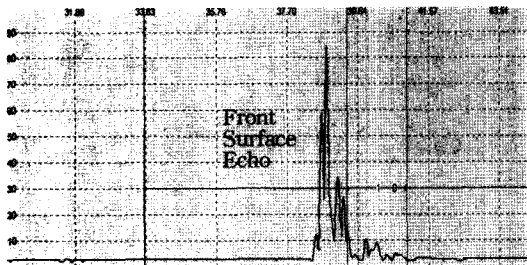
C-scan 영상에 대하여 이들 각 영상의 특이 부분에 대한 A-scan 신호를 분석하면 Fig. 8과 같다. 층간 분리 부위에서의 A-scan 신호는 정상신호에 비하여 표면과 저면 신호 사이에 반사되는 높은 진폭의 결함 신호가 있고, 기지 크랙 부위에서는 불규칙한 방향으로 존재하는 미세 기지 크랙에 의한 초음파의 산란으로 인하여 전체적으로 신호 감쇄가 일어남을 알 수 있다.



(a) Normal



(b) Delamination



(c) Matrix Crack

Fig. 8. Ultrasonic A-scan signal depend on defect species

따라서 층간 분리의 검출에 있어서는 초음파 C-scan이 매우 유리함을 알 수 있다.

3.4 X-ray 및 초음파 검사 결과 비교

복합재료 충격 손상 부위에서 발생한 결함이 검출되는 정도를 X-ray 및 초음파 검사 방법에 따라 비교하면 다음과 같다.

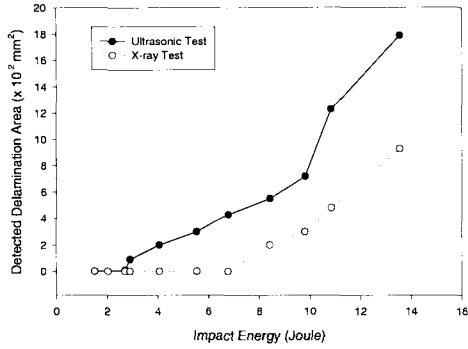
Fig. 9의 (a)는 층간분리의 검출에 대한 X-ray

및 초음파 검사 결과를 비교한 것이다. 충격 에너지가 증가할수록 검출되는 결함의 크기는 증가하며 초음파 검사에서는 낮은 충격 에너지에서 발생하는 작은 크기의 층간 분리를 쉽게 검출할 수 있다. 반면 X-ray 검사에서는 중간단계의 충격에너지까지에서도 검출이 되지 않고 높은 단계의 충격 에너지에서 검출되며 그 크기도 초음파 검사에 비하여 1/2~1/3배 정도에 불과하다. 따라서 층간 분리의 검사에 있어서는 초음파 검사가 효과적이다.

Fig. 9의 (b)는 기지 크랙 검출에 대한 X-ray 및 초음파 검사 결과를 비교한 것이다. 중간단계의 충격 에너지에서 X-ray 검사가 초음파 검사에 비하여 비슷하거나 약간 우세하며, 높은 단계의 충격 에너지에서는 X-ray가 초음파 검사보다 검출효과가 우수함을 보였다. 이는 기지크랙이 심하게 진전될수록 X-ray용 침투제의 침투가 용이한 때문이며, 반면 초음파는 산란효과에 의하여 결함으로 검출할 수 있는 충분한 크기의 신호 검출이 어려운 때문으로 판단된다.

Fig. 9의 (c)는 섬유 파단 검출에 대한 X-ray 및 초음파 검사 결과를 비교한 것이다. 섬유 파단은 중간단계까지의 충격 에너지에서는 발생하지 않았으며, 그 이상의 높은 단계의 충격에너지에서 점차 발생한 섬유 크랙을 X-ray 검사에서는 쉽게 검출할 수 있었으며 반면 초음파에서는 섬유 파단을 거의 검출하지 못하였다. 이는 초음파의 특성상 기지 크랙과 섬유 크랙을 구별하여 검출할 수 없기 때문으로 판단된다.

일반적 X-ray 검사법과 ZnI₂ 침투제를 적용한 X-ray 검사법의 비교는 기지 크랙 검출에 대한 검출 효과로 대별될 수 있으며 Fig. 10은 일반적 X-ray 검사법과 ZnI₂ 침투제를 적용한 X-ray 검사법을 비교한 것이다. 일반적 X-ray 검사는 중간단계의 충격 에너지 이하에서는 기지 크랙이 거의 검출되지 않고 높은 단계의 충격에너지에서 검출이 되고 있으며 그 크기도 상대적으로 작다. 반면 침투제 X-ray 검사법은 낮은단계의 충격 에너지에서도 검출효과가 우수하다. 이는 기지 크랙으로 침투한 고밀도 침투제인 ZnI₂의



(a) Delamination Detection

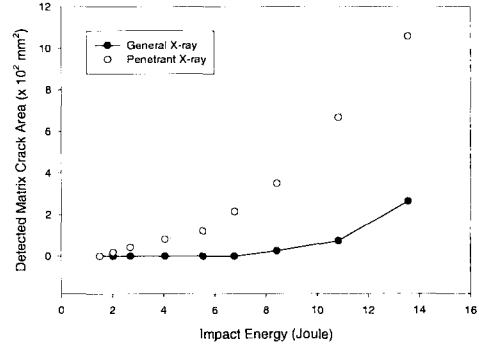
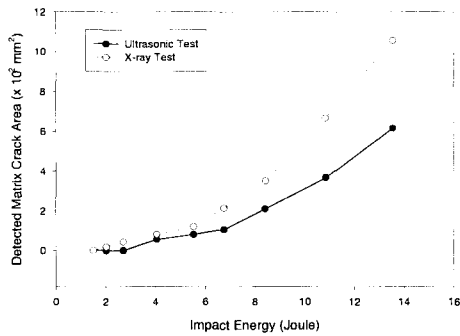
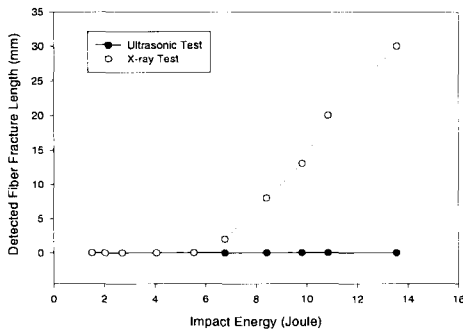


Fig 10. Comparison of Defect Detectability of General and ZnI₂ penetrant X-ray test(B specimen)



(b) Matrix Crack Detection



(c) Fiber Fracture Detection

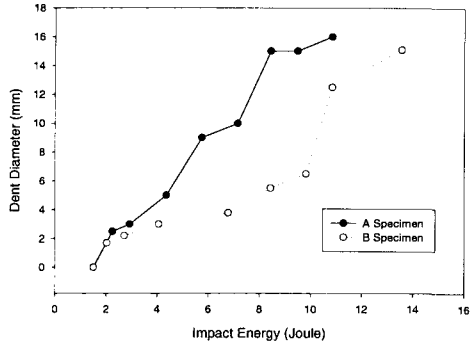
Fig 9. Comparison of Defect Detectability of X-ray and Ultrasonic (B specimen)

X-ray 영상이 주변 물질의 영상에 비하여 보다 효과적으로 검출되기 때문에 판단된다.

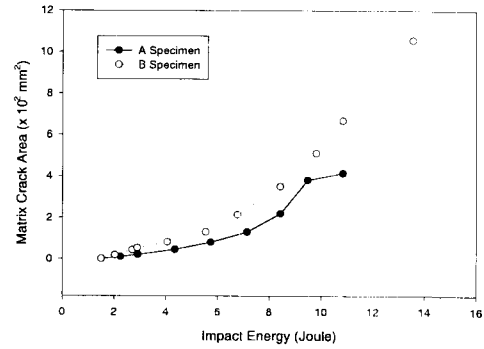
3.5 충격에너지에 따른 손상 정도

비파괴 검사 방법을 최적화하여 충격 에너지에 대한 결함의 발생 정도를 각 결함의 종류별로 분석하면 다음과 같다.

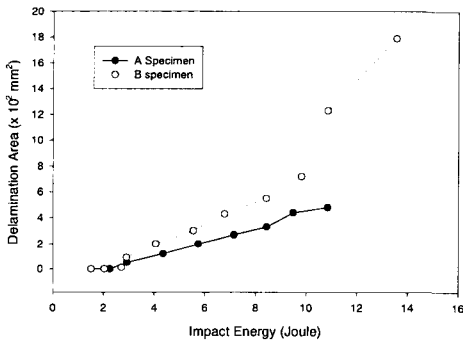
Fig. 11의 (a)는 충격 에너지 대 표면 압흔의 크기를 A 시편과 B 시편으로 구분하여 나타낸 것이다. A 시편에서는 충격에너지 2.25Joule에서 직경 2.5mm 정도의 표면압흔이 발생하기 시작하였으며, 이후 충격 에너지가 증가할수록 비례적으로 표면 압흔의 크기가 증가하다 8.43Joule 이상에서는 직경 15~16mm로 거의 일정한 크기를 보였다. B시편에서는 충격에너지 2.03Joule에서 직경 1.7mm의 표면압흔이 발생하였으며, 이후 충격에너지의 증가에 따라 완만하게 증가하였으며 크기도 A 시편에 비하여 상대적으로 작은 값을 보였다. 10.84Joule에서부터는 급격하게 증가하였으며 크기도 A시편에 근접한 직경 12.5~15.1mm였다. 이와 같이 A 시편에서 표면 압흔의 크기가 충격에너지의 증가에 따라 일정하게 증가하는 것은 직조된 프리프레그가 내부



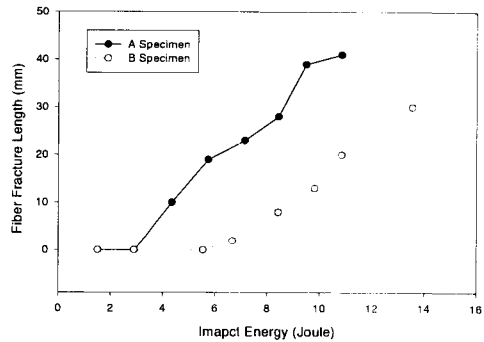
(a) Dent occurrence



(a) Matrix Crack occurrence



(b) Delamination occurrence



(b) Fiber Fracture occurrence

Fig 11. Defect occurrence depend on Impact Energy(A, B Specimens)

Fig 12. Defect occurrence depend on Impact Energy(A, B Specimens)

4층에 0, 90°로 균일하게 교대로 적층되었기 때문에 충격에너지가 국부적으로 잘 전달된 때문으로 판단되며, 높은 에너지 단계에서 에너지의 증가에 상관없이 일정한 이유는 충격자의 크기가 직경 15.7mm로 관통된 때문으로 판단된다. 반면 B 시편에서 같은 크기의 충격 에너지에 비하여 상대적으로 작은 크기의 표면 압흔을 발생하는 이유는 내부 6층의 단일방향 프리프래그의 적층으로 인하여 0° 방향으로 힘을 분산시켜 하부로의 에너지 전달이 작기 때문으로 판단

된다.

Fig. 11의 (b)는 충격 에너지 대 층간 분리의 크기를 A 시편과 B 시편으로 구분하여 나타낸 것이다. A 시편에서는 충격에너지 2.92Joule에서 면적 $0.5 \times 10^2 \text{mm}^2$ 정도의 층간 분리가 발생하기 시작하였으며, 이후 충격 에너지가 증가할수록 층간 분리의 크기가 완만하게 증가하다 9.48Joule 이상에서는 면적 $4.4 \sim 4.8 \times 10^2 \text{mm}^2$ 로 거의 일정한 크기를 보였다. B시편에서는 충격 에너지 2.71Joule에서 면적 $0.1 \times 10^2 \text{mm}^2$ 의 층간

분리가 발생하였으며, 이후 충격 에너지의 증가에 따라 층간 분리의 크기가 비례적으로 증가하다 10.84Joule에서부터는 급격하게 증가하여 면적 $12.3 \sim 17.9 \times 10^2 \text{mm}^2$ 로 A 시편보다는 3배이상의 크기로 발생하였다. B 시편에서 A 시편에 비하여 층간분리가 우세하게 일어나는 이유는 표면의 $\pm 45^\circ$ 적층 아래 6층의 단일방향 프리프래그들의 기지 크랙 방향과 일치하면서 충격 에너지를 층간 분리가 흡수하면서 발생한 때문이며 A 시편에서는 직조된 프리프래그들이 적층되어 있기 때문에 결합의 진전이 어려워 층간 분리의 크기가 제한되는 것으로 판단된다.

Fig. 12의 (a)는 충격 에너지 대 기지 크랙의 크기를 A 시편과 B 시편으로 구분하여 나타낸 것이다. A 시편에서는 충격 에너지 2.25Joule에서 면적 $0.1 \times 10^2 \text{mm}^2$ 정도의 기지 크랙이 발생하기 시작하였으며, 이후 충격 에너지가 증가할수록 기지 크랙의 크기가 완만하게 증가하다 9.48Joule 이상에서는 면적 $3.81 \sim 4.14 \times 10^2 \text{mm}^2$ 로 거의 일정한 크기를 보였다. B시편에서는 충격 에너지 2.03Joule에서 면적 $0.18 \times 10^2 \text{mm}^2$ 의 층간 분리가 발생하였으며, 이후 충격 에너지의 증가에 따라 층간 분리의 크기가 완만하게 증가하다 6.67Joule이상부터 급격하게 증가하여 10.84Joule 이상에서는 면적 $6.68 \sim 10.56 \times 10^2 \text{mm}^2$ 로 A 시편보다는 2배 이상의 크기로 발생하였다. A 시편에서는 직조된 프리프래그들이 적층되어 있기 때문에 결합의 진전이 어려워 기지 크랙의 크기가 제한되고, B시편에서는 단일방향 프리프래그의 영향으로 층사이에서 기지 크랙의 전파가 쉬운 때문으로 판단된다.

Fig. 12의 (b)는 충격 에너지 대 섬유 파단의 크기를 A 시편과 B 시편으로 구분하여 나타낸 것이다. A 시편에서는 충격 에너지 4.35Joule에서 길이 10mm 정도의 섬유 파단이 발생하기 시작하였으며 이후 충격 에너지가 증가할수록 비례적으로 섬유 파단의 크기가 증가하다 9.48Joule 이상에서는 길이 39~41mm로 거의 일정한 크기를 보였다. B 시편에서는 충격 에너지 6.0Joule이하에서는 섬유 파단이 발생하지 않

았으며, 6.67Joule에서 길이 2mm의 섬유 파단이 발생하였고 이후 충격 에너지의 증가에 따라 섬유 파단의 크기도 증가하였으나 A 시편에 비하여 1/3정도의 상대적으로 작은 값을 보였고, 10.84Joule에서부터는 길이 20mm로 그 차이가 1/2로 점차 줄어드는 경향을 보였다. B 시편의 섬유 파단이 A 시편보다 적게 일어나는 이유는 $\pm 45^\circ$ 층 아래 내부의 단일방향 프리프래그가 0° 3층, 90° 1층, 0° 3층으로 각각 적층되어 있기 때문에 연속된 단일방향 적층 섬유를 파단하기에는 더 높은 충격 에너지가 요구되고 일부의 충격 에너지는 기지 크랙 및 층간 분리로 쉽게 흡수되기 때문으로 판단된다.

충격 에너지의 증가에 따라 A 시편에서는 1.51Joule이하에서는 결합이 발생되지 않는 영역, 2.25Joule이상에서는 기지 크랙이 발생하고 2.92Joule이상에서 층간 분리 발생, 그리고 4.35Joule이상에서 섬유 파단이 발생하는 영역으로 구분되었다. B 시편에서는 1.51Joule이하에서는 결합이 발생되지 않는 영역, 2.03Joule이상에서는 기지 크랙이 발생하고 2.71Joule이상에서 층간 분리 발생, 6.67Joule이상에서 섬유 파단이 발생하는 영역으로 구분되었다. 기지 크랙과 층간 분리의 발생은 A와 B시편에서 비슷한 충격 에너지대이고 섬유 파단은 B시편에서 상대적으로 높은 충격에너지대에서 발생하였다.

4. 결론

프리프래그의 적층 각도 및 적층 구성을 달리하여 제작한 복합재료 시편을 충격 시험한 후 비파괴 검사하여 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 복합재료의 충격 손상에 대한 비파괴 검사의 적용은 충격 손상에 의한 결합의 종류에 따라 달리해야 하며 이들 결합중 표면 손상은 육안검사가 우수하고, 기지 크랙 및 섬유 파단은 ZnI_2 등 복합재료보다 밀도가 큰 침투제를 침투시켜 X-ray로 검사하는 방법이 우수하며, 층간 분리는 초음파 검사가 효과적이다. 따라서 복합

재료의 충격손상에 대한 비파괴 검사에는 육안, X-ray, 초음파 검사를 상호 보완적으로 적용함으로써 충격 손상에 의한 결함을 보다 효과적으로 검출할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 복합재료의 적층각 및 적층 구성에 따라 충격 손상에 의한 결함의 발생은 결함의 종류별로 상당한 차이를 보였으며, 직조된 프리프레그로만 적층된 A 시편에서는 기지 크랙과 섬유 파단이 우세하게 발생되고 손상의 형태는 사각형이며 국부적이다. 단일방향 프리프레그가 적층된 B 시편에서는 기지 크랙과 층간 분리가 우세하게 발생되고 손상의 형태는 0° 방향으로 길쭉한 원반형 땅콩 형상이다.

3) 충격 에너지에 따른 결함의 발생정도는 시편 및 결함의 종류에 따라 상당한 차이를 보였으며, 표면 압흔의 크기는 충격 에너지의 증가에 따라 A 시편과 B시편에서 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 기지 크랙과 층간 분리는 A 시편에서는 완만한 증가 추세를 보였으며 B 시편에서는 상대적으로 우세한 증가 추세를 보였다. 섬유 파단은 A 시편에서는 낮은 충격 에너지에서도 발생하였으며 충격 에너지의 증가에 따라 비례적으로 증가하였고, B 시편에서는 상대적으로 높은 충격 에너지에서 결함이 발생되며 그 크기도 A 시편에 비하여 상대적으로 작으나 충격 에너지의 증가에 따라 점차 증가하는 추세를 보였다.

충격 에너지의 증가에 따라 A 시편과 B 시편에서 초기에 결함이 발생되지 않는 영역, 점차 기지 크랙이 발생하여 층간 분리를 일으키는 영역, 그리고 보다 높은 에너지에서 섬유 파손이 발생하는 영역으로 구분되었다.

참고문헌

1. B. T. Smith, "Correlation of the Delay Technique with Ultrasonic Imaging of Impact Damage in Graphite-Epoxy Composites", *Material Evaluation*, No. 47, pp.1408-1415, (1989)
2. Raymond F. Wegman, "Nondestructive Test Methods for Structural Composites", *SAMPE Handbook No. 1*, pp.21-48, (1989)
3. 나성엽, 김형원 "복합재료의 충격 손상에 대한 비파괴검사 기법 연구", 국방과학연구소, TEDC-421-010114, pp.1-29, (2001)
4. 김재훈, 이영신 "통계기 구조용 복합재료 설계개발 시험", 충남대학교, MADC-411-010062, pp.1-83, (2000)
5. Boeing, "BSS 7260, Compressive Properties After Impact of Carbon Laminates", (1979)
6. J. B. Nestleroth, "Physically Based Ultrasonic Feature for Anomaly Classification in Composite Materials" *Material Evaluation*, No. 43, pp.541-546, (1985)
7. Robert C. McMaster, "Nondestructive Testing Handbook Ultrasonic Transducer", *ASNT*, Vol. 2, Section 44, pp.1-21, (1959)
8. H. E. Kautz, "Ultrasonic Evaluation of Mechanical Properties of Thick, Multilayered, Filament-Wounded Composites", *Material Evaluation* No. 45, pp.1404-1412, (1987)
9. 나성엽, 임수용, 이상호, "초음파를 이용한 복합재 연소관의 결함 검출 방법 연구(I)", 국방과학연구소, MSDC-421-980672, pp.1-44, (1998)