

## 論文

## 저속충격 하에서 CFRP 복합적층판의 낙추 충격특성과 파괴기구

임광희<sup>+</sup>, 박노식<sup>\*\*</sup>, 김영남<sup>\*\*</sup>, 김선규<sup>\*\*\*</sup>, 심재기<sup>\*\*</sup>, 양인영<sup>\*\*</sup>

## Fracture Mechanism and Characterization of Falling Weight Impact in CF/Epoxy Composite Plates Under Low-Velocity Impact

Kwang-Hee Im<sup>+</sup>, No-Sick Park<sup>\*\*</sup>, Young-Nam Kim<sup>\*\*</sup>, Sun-Kyu Kim<sup>\*\*\*</sup>, Jae-Ki Sim<sup>\*\*</sup> and In-Young Yang<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper describes a method for a falling weight impact test to estimate the impact energy absorbing characteristics and impact strength of CFRP laminate plates based on considerations of stress wave propagation theory. The absorbed energy of T300 orthotropic composites is higher than that of quasi-isotropic specimen over impact energy 6.8J, but in case of using T700 fiber, much difference does not show. Also, absorbed energy of T300 orthotropic composites, which are composed of the same stacking number and orientation became more than that of T700 fiber specimen; however there was no big difference in case of quasi-isotropic specimens. The delamination areas of the impacted specimen were measured with the ultrasonic C-scanner to find correlation between impact energy and delamination area. The fracture surfaces were observed by using the SEM (scanning electron microscope) through a low-velocity impact test in order to confirm the fracture mechanism.

## 초 록

본 연구에서는 1차원 파동방정식을 적용한 낙추충격시험 시스템을 제작하여 CFRP 적층판의 충격흡수특성 및 충격강도평가를 하였으며 그 결과가 유효함을 보였다. 충격흡수에너지에 대해서는 충격에너지가 대략 6.8J이상에서는 동일한 T300 섬유와 적층배향으로 구성된 직교이방성 시험편이 의사등방성(quasi-isotropic)보다 높게 나타났으나 T700 섬유의 경우에는 크게 차이가 나타나지 않았다. 또한 동일한 T300 섬유와 적층수로 구성된 시험편이 T700 섬유로 된 시험편보다 높게 나타났으나 T700 섬유인 의사등방성 시험편의 경우에는 크게 차이가 나타나지 않았다. 초음파 C-스캐너를 이용하여 내부손상영역을 관찰하여 시험편의 손상면적과 흡수에너지의 상관관계를 평가하였다. 또한 저속충격손상으로 인한 파면을 파괴메카니즘을 규명하기 위해 주사전자현미경으로 관찰하였다.

**Key Words:** 복합재료(composites), 낙추(falling weight), 충격손상(impact damage), 파괴메카니즘(fracture mechanism)

## 1. 서 론

항공기 우주기기 등 우주구조용 재료로서 가장 주목받고 있는 선진복합재료 중에서도 탄소섬유강화수지(carbon

\*+ 우석대학교 반도체전기자동차공학부, 교신저자(e-mail: khim@woosuk.ac.kr)

\*\* 조선대학교 기계공학부

\*\*\* 익산대학 자동차과

fiber reinforced plastics, CFRP)는 비강도 비강성이 높기 때문에 경량화가 요구되는 여러 분야 즉, 원심분리기의 회전동, 항공기의 압축기동익, 헬리콥터의 회전익 등 항공우주 산업을 시작으로 여러 분야에서 응용이 시도되고 있다. 그러나 CFRP 적층재의 결점의 하나는 충격에 대해서 약하다고 하는 것이 지적되어[1] 충격문제로 대두되고 있는 실정이다. 탄소섬유와 수지를 복합한 재료이기 때문에 파괴현상이 아주 복잡하여 해석하기 어렵다는 점이다. 또한 CFRP 적층판이 항공기 구조부재로 이용될때 정비중의 공구낙하(tool drop)나 비행중 날으는 새와의 충돌(bird strike)[2], 이착륙시의 작은돌이나 파편 등 여러종류 재질의 충돌체에 의한 이물충격손상(foreign object damage, FOD)을 피할수가 없으며 [3] 표면으로부터는 거의 보이지 않는 지속충격손상이 적층판 내부에 발생하여 이것에 의해 강도가 저하하게 되는 것이 중요한 문제로 지적되고 있다[4].

현재까지의 CFRP 적층재의 FOD에 관한 연구는 충격후의 잔류인장강도[5], 복합적층재 구조를 활용함에 있어 두께 방향인 횡충격에 의한 graphite/epoxy 및 graphite/PEEK의 잔류압축강도[6]를 평가하였다. 특히, 곡률을 갖은 적층복합재 구조에서의 지속충격손상평가를 실시하였으며[7], 복합재의 충격손상개시를 평가하는데 압전필름센서[8]를 이용하여 평가하였다. 이때 대부분이 충격강도 평가법으로 낙추를 이용한 샤르피, 아이조트 충격시험과 다이네틱 등을 이용하여 금속재료뿐만 아니라 복합재료에 적용을 하고 있으나 특히, 이방성을 갖는 복합재료에 있어서는 충격에 대한 정확한 계측 및 평가가 절실히 요구되며 충격손상에 의한 강도저하의 원인은 아직 해명되지 못한 부분이 많이 있다. 지속충격손상에 의해 강도가 저하하는 파괴메카니즘에 관한 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 섬유강성 및 적층구성이 다르고 수지가 같은 CFRP 복합적층판에 지속충격손상을 가한 후 CFRP 복합적층판의 충격하중과 변위를 평가할 수 있는 낙추저속충격 시스템을 구축하여 CFRP 복합적층판의 충격특성을 파악하고, 초음파 C-스캐너를 이용하여 내부 손상영역을 관찰하여 CFRP 적층판의 흡수에너지와 손상면적의 상관관계를 평가하였으며 또한 충격손상파면을 주사전자현미경으로 관찰하여 손상진전에 의한 파괴메카니즘을 규명하고자 한다.

연구방법으로는 충격시험장치로서 낙추식 충격시험시스템을 제작하고 낙추 중의 응력과 전파현상을 고려한 정확한 충격하중과 변위를 측정하는 방법을 개발하고 낙추 충격시스템을 이용하여 성형된 CFRP 적층판의 적층배향 구성, 낙추질량 및 충격에너지의 차에 따른 CFRP 적층판의 충격특성을 평가한다. 또한 낙추충격에 의해 발생된 시험편 계면내의 손상영역을 초음파 탐사하여 평가하고 이때 지속충격손상에 의해 강도가 급격히 저하하는 충격손상이 있는 적층판에 대한 파괴메카니즘을 규명하기 위하여 주사전자현미경으로 파면을 관찰하였다.

## 2. 기본측정원리 및 방법

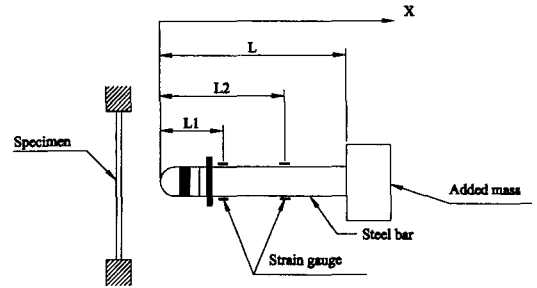


Fig. 1 Diagram of falling weight impactor.

CFRP 적층판의 충격 특성을 평가하는 데는 우선 충격점에 있어서 충격 하중을 정확히 측정할 필요가 있다. 가장 일반적으로 이용되는 스트레인 게이지를 이용한 낙추식 충격시험법으로 CFRP 적층판에 충격을 가하여 낙추중의 응력과 전파를 고려하여 낙추 선단부의 하중이력을 정확히 측정하는 방법을 제안한다.

먼저 Fig. 1에 나타 낸 바와 같이 하중 및 변위를 구하기 위해 봉중에 전달되는 응력파를 해석한다. 여기에서  $l$ 은 낙추의 길이이며  $l_1$ 은 낙추선단에서 첫 번째 스트레인게이지 까지 길이이며,  $l_2$ 는 낙추선단에서 두번째 스트레인게이지 까지 길이이다. 충격체인 봉의 2부분의 변형률을 측정하고 역으로 경계조건을 파동이론에 적용하여 결정한다. 부가 질량을 충격체인 봉의 후단부에 설치한다. 봉중에서는 응력파가 1차원의 파동 전파 이론에 따르는 것으로 한다. 스트레인 게이지를 붙인 환봉을 자유 낙하시켜 CFRP 적층판에 충돌시키고 스트레인 게이지의 출력으로부터 적층판에 가한 하중과 적층판의 변위를 산출한다. 충격체인 낙추 봉의 지배 방정식은 1차원 파동전파 이론으로부터 다음과 같이 된다[9].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서,

$$c^2 = E / \rho \quad (2)$$

여기에서  $C$ 는 전파속도이며  $E$ 는 탄성계수이며  $\rho$ 는 밀도이다.

다음 초기조건을 이용하면 식(3)이 된다.

$$t = 0 : u = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -v_0 \quad (3)$$

여기에서  $t$ 는 시간이며  $u$ 는 변위이다.

충격체가 시험편에 가하는 충격하중은 충격체의 환봉 부분과 시험편이 접하는 위치 ( $x = 0$ )에 있어서 압축력  $F(t)$ 이다. 또 하중점의 변위  $W(t)$ 는 낙추의 환봉의 선단부분과 시험편이 접하는 위치의 이동량이기 때문에 결국  $F$  및  $W$ 을 정의하여 라플라스변환 영역에 있어서의 식(4)와 같이 충격하중  $F$  및 변형  $W$ 가 구해진다.

$$\begin{aligned} \bar{F}(p) &= AE \frac{-\bar{\epsilon}_1 \sinh(p l_2 / c) + \bar{\epsilon}_2 \sinh(p l_1 / c)}{\sin h(p(l_2 - l_1) / c)} \\ \bar{W}(p) &= \frac{c}{p} \frac{-\bar{\epsilon}_1 \cos h(p l_2 / c) - \bar{\epsilon}_2 \cos h(p l_1 / c)}{\sin h(p(l_2 - l_1))} + \frac{v_0}{p^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $\epsilon_1(t)$ 는 낙추의 선단으로부터 첫 번째의 스트레인이며  $\epsilon_2(t)$ 는 두 번째 스트레인이다.

충격체의 충격하중 및 변위를 구하기 위하여 봉의 변형률  $\epsilon_1(t)$ 와  $\epsilon_2(t)$ 의 측정 데이터를 라플라스 변환하고 또한  $\bar{F}(p)$  및  $\bar{W}(p)$ 를 라플라스 역변환을 하였고, 연산의 고속화를 하기 위하여 고속 푸리에변환(FFT)의 알고리즘을 이용한 수치라플라스 변환법 및 역변환법을 적용하였다. 라플라스 변환 및 역변환식은 식 (5)에 나타냈다. 여기서  $p$ 는 라플라스 변환 파라메타이다.

$$\begin{aligned} \bar{F}(p) &= \int_0^{\infty} F(t) \exp(-pt) dt \\ F(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \bar{F}(\gamma+iw) \exp\{t(\gamma+iw)\} i dw \end{aligned} \quad (5)$$

이산 푸리에 변환법에 의해 라플라스 변환식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{F}(\gamma+i n \Delta\omega) &= \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} [F(k\Delta t) \exp(-\gamma k \Delta t)] \\ &\quad \exp(-i(2\pi/N)nk) \\ F(k\Delta t) &= \frac{\exp(\gamma k \Delta t)}{T} \sum_{n=0}^{N-1} [\bar{F}(\gamma+i n \Delta\omega)] \\ &\quad \exp\{i(2\pi/N)nk\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서  $\omega=n\Delta\omega$ ,  $t=k\Delta t$ ,  $N$ 는 분할 수,  $\Delta\omega=2\pi/T$  및  $\Delta t=T/N$ .

### 3. 실험방법

#### 3.1 낙추시험장치

본 실험에서 이용한 CFRP 적층 시험편은 CF/epoxy로

Table 1 Materials properties of the carbon fibers

	Carbon T-300	Carbon T-700
Tensile Strength	3.41[GPa]	4.81[GPa]
Tensile Modulus	232.5[GPa]	229[GPa]
Breaking Elongation	1.7%	2.1%
Mass Density	1.70[g/cm]	1.80[g/cm]

Table 2 Specification of the test specimens

	CU125NS(T-300)	CU125NS(T-700)
Tensile strength	1.85[GPa]	2.53[GPa]
Tensile modulus	132.7[GPa]	138[GPa]
Compressive strength	1.03[GPa]	1.54[GPa]
Compressive modulus	107[GPa]	112.2[GPa]
Poisson's ratio	0.30	0.30

Table 3 Fiber stacking sequences of specimens

TYPE	Prepreg	Fiber carbon/matrix	Fiber stacking sequences
A	CU125NS(T700)	T-700/Epoxy#2500	[0 <sub>4</sub> /90 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>
B	CU125NS(T700)	T-700/Epoxy#2500	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /-45 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>
C	CU125NS(T300)	T-300/Epoxy#2500	[0 <sub>4</sub> /90 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>
D	CU125NS(T300)	T-300/Epoxy#2500	[0 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> /-45 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>

조합된 일방향 탄소섬유 프리프레그 테이프(한국화이버, CU125NS-carbon fiber unidirection 125g/m<sup>2</sup>, no scrim)를 적층한 후, 오토클레이블를 이용하여 제작하였다. 필요한 시험편 크기에 따라 제작한 시그(200×200mm)를 사용하여 CFRP 적층판을 성형하였으며 경화온도인 125℃로 90분 경화하였다. 또한, 성형 후 다이아몬드 커터를 이용하여 180×180 mm의 정방형으로 절단했다. 그리고 시험편은 A : T700 [0<sub>4</sub> / 90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>, B : T700 [0<sub>2</sub> /45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>]<sub>s</sub>, C : T300 [0<sub>4</sub> / 90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>, D : T300 [0<sub>2</sub> /45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>]<sub>s</sub>의 4종류를 사용했다. 그리고 시험편의 물성치는 Table 1 및 2에 나타냈으며 시험편의 적층구성은 Table 3에 나타냈다.

낙추식 충격시험 장치는 낙추의 정확한 충격 위치와 양호한 재현성을 확보하는 것이 중요하기 때문에 낙추식 충격시험 장치에 2개의 가이드 바를 수직으로 설치하고, 2개의 플라스틱 판을 붙여 낙추가 가이드 바를 따라서 일정한 자유낙하와 낙하속도를 얻을 수 있도록 했다. 낙추시험을 위한 시스템장치를 Fig. 2에 나타냈으며 그리고 Fig.3은 낙추 충격체이다. 이 충격체는 낙추 I (0.48kg), 낙추 II (0.74kg), 낙추 III(1.29kg), 낙추 IV(1.57kg)의 4종류로 ø10×600mm의 연강 환봉을 사용하고 선단부는 지름 14mm곡면으로 했다. 또한, 하중 검출부에 스트레인 게이지를 낙추 I에서는 길이를 2등분한 부분에, 낙추 II,III,IV에서는 길이를 3등분한 2개 부분에 중심축에 대칭되도록 2매 붙이고, 압력 변형의 영향이 없도록 하기 위해서 직렬로 연결시켰다.

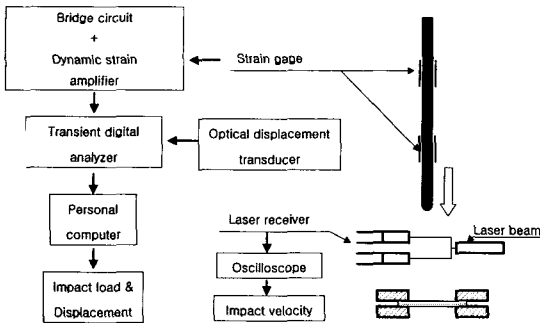


Fig. 2 System diagram of falling weight tester.



Fig. 4 Photo of optical displacement transducer(Zimmer, 100F).

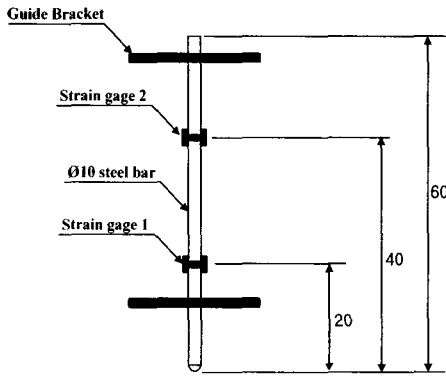


Fig. 3 Details of the drop-weights.

Fig. 4는 광학식변위계이며 충돌시 나타나는 스트레인 게이지의 저항변화는 실드선으로부터 브리지 회로를 통하여 동적변형 측정기로 입력되어 전압변화를 증폭하고 기억된 파형을 PC에 의해 데이터 처리하여 변형률로 환산한다. 충격 낙추가 CFRP 적층판에 충돌할 때 낙추의 선단부와 시험편이 접하는 위치의 이동량 즉, 변위의 측정에는 낙추에 부착한 표적의 이동을 광학식 변위계(Zimmer, 100F)를 사용하여 측정한다. 광학식 변위계는 광학 렌즈를 이용하여 표적의 백색부와 흑색부의 경계선의 변위량을 전압변화로 환산하는 것이며, 렌즈를 교환하여 측정 가능한 변위량을 변화시킬 수 있다. 충격에너지는 낙추의 질량과 충격속도를 이용하여 구하였고 이때 낙추의 충격속도는 시험장치에 설치된 레이저에 의해 시간을 체크해서 측정한다. Fig. 5는 낙추충격 시험장치의 사진을 나타냈다.

3.2 충격 흡수에너지 산출법

측정 방법으로부터 측정된 하중 및 변위에 대하여 평가 파라메타를 검토하였다. 하중과 변위 선도로부터 적층판의

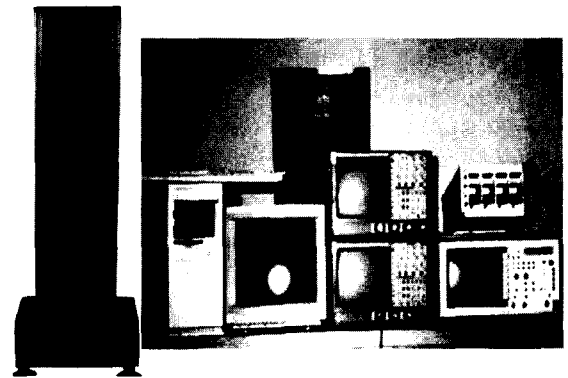
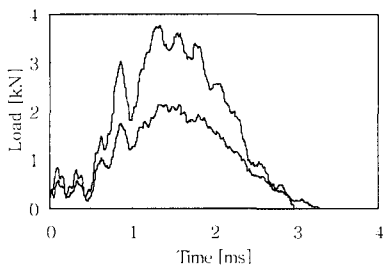


Fig. 5 Photo of falling weight tester system.

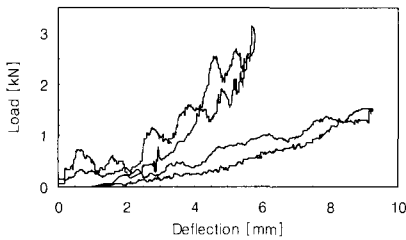
충격 특성을 알 수 있다. 우선 시험 결과를 간편하게 비교하는 방법으로서 하중-변위 선도에서 적절한 대표 값을 산출하여 하중-변위 선도를 나타내는 파라메타로서 Fig. 6의 시간과 하중, 시간과 변위 선도에서 시간을 소거하여 하중-변위 선도의 폐곡선으로 둘러싸인 부분의 면적을 시험편이 파괴될 때 소비된 에너지(흡수에너지)로 간주해서 하나의 평가 파라메타로 나타냈다. 이때 폐곡선의 면적은 엑셀 프로그램으로 구하였다.

이 평가 방법은 여러 FRP 적층판에 대한 강도 평가에 적용되고 있어서 타당하다고 생각되지만, 흡수 에너지만을 이용하여 충격 특성을 표현하는 것은 무리가 있기 때문에 하중 이력의 최대하중  $F_{max}$ 에 의한 평가 등도 고려되어야 한다. 그리고 충격체인 낙추로 부터 CFRP 적층판에 충격 특성을 평가하기 위하여 C++ Builder로 작성하였다.

3.3 손상영역 관찰방법



(a) Load history



(b) Load-displacement curve

Fig. 6 Relation between time and deflection vs. load.

조음과 C-스캔 이미지는 품질관리와 신뢰성 등을 부여하기 위하여 재료의 결함을 평가하는데 유용한 비파괴검사 기법이다. 초음파 측정방법은 Fig. 7과 같이 펄스에코우 모드방법이 수직조내에서 모두 행해졌다. C-스캔장치는 시험편의 전면과 배면의 에코우 진폭을 이미지로 나타낼수 있다. 이때 진폭변화를 그레이상과 칼라상으로하여 비디오상에서 0에 250까지 나타낼 수 있다. 이때 복합적층판의 손상영역을 C-스캔으로 관찰하기 위하여 주파수가 50MHz 트랜스듀서가 사용되었다. 이 트랜스듀서는 시험편의 수조내에서 표면과 수직탐상 하였으며 모델명이 5052PR의 펄서/리시버가 이용이 되었다. 그리고 Fig. 7은 낙추 충격에 의해 발생된 시험편의 손상 영역을 관찰하기 위한 게이트 기법을 나타냈다. 파괴된 후 파면은 주사전자현미경(日本電子 JSM-T200, 배율 35-100,000)을 이용하여 관찰하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 저속충격특성

Fig. 8은 T300 섬유 종류와 적층수가 같고 적층방향이 다른 CFRP 적층판의 낙추 충격시험 결과를 나타냈다. 그림 중 ○표는 직교이방성 적층재 시험편 C, ●표는 의사등방성

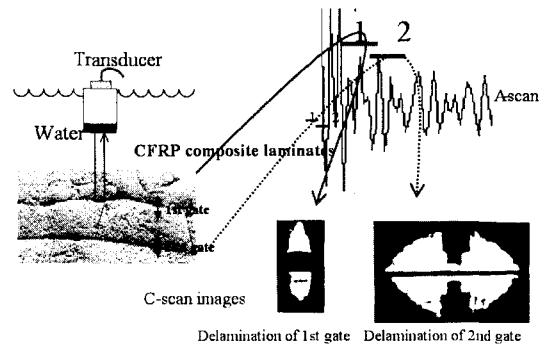


Fig. 7 Inspection method of composite laminated damages using ultrasonic C-scanner.

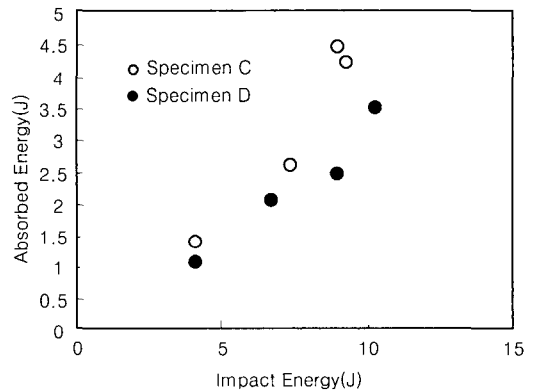


Fig. 8 Relation between absorbed energy and impact energy (C, D).

(quasi-isotropic) 적층재 시험편 D를 나타냈다. 대략 충격에너지가 4J에서 6.8J까지의 흡수에너지는 크게 차이는 나타나지 않았지만 6.8J 이상에서는 다소 직교이방성 시험편 C가 크게 증가 하였다. Fig. 9는 T700 섬유 종류와 적층수가 같고 적층방향이 다른 CFRP 적층판의 낙추 충격시험 결과를 나타냈다. Fig. 10으로부터 탄소섬유의 압축강도가 다른 T300 섬유와 T700 섬유를 사용하였다. T300 섬유를 이용한 시험편 C가 T700 섬유를 이용한 시험편 A와 같이 충격에너지와 흡수에너지관계가 대략 7J까지는 크게 나타나지는 않았지만 대략 8J 상에서는 시험편 C가 흡수에너지가 크게 증가 하였다. 이는 섬유의 강성(stiffness)이 흡수에너지에 영향을 미쳤기 때문이라 생각된다. Fig. 11로 부터 초기에는 T700 섬유를 이용한 시험편 B의 흡수에너지가 T300 섬유를 이용한 시험편 D보다 크게 나타났지만 충격에너지가 증가함에 따라서 크게 나타나지 않음을 알 수 있었다. Fig. 12는 시험편 A와 B의 충격에너지와 박리면적관계를 나타냈다. 특히 여기에서 CFRP 적층판의 압축강도가 동일하고 적층구성이 다른 시험편을 사용하였으나 박리면적에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 섬유방향의 강성이 박리면적에 다소 영향을 미쳤기 때문이라 생각된다.

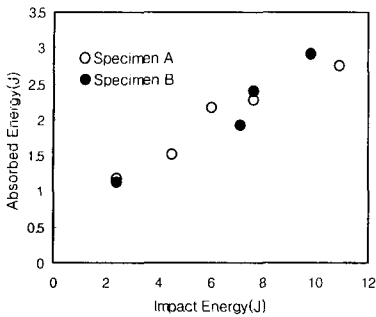


Fig. 9 Relation between absorbed energy and impact energy (A, B).

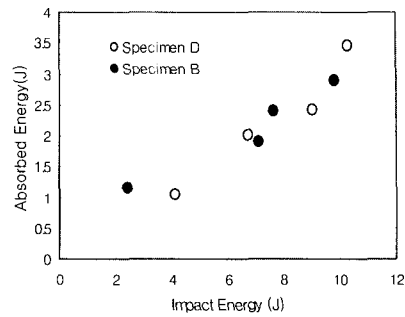


Fig. 11 Relation between absorbed energy and impact energy (D, B).

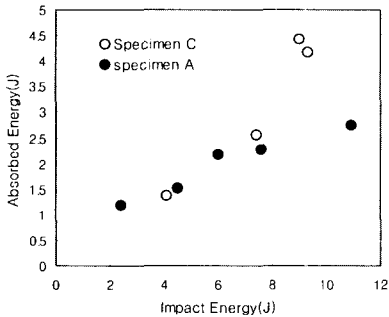


Fig. 10 Relation between absorbed energy and impact energy (C, A).

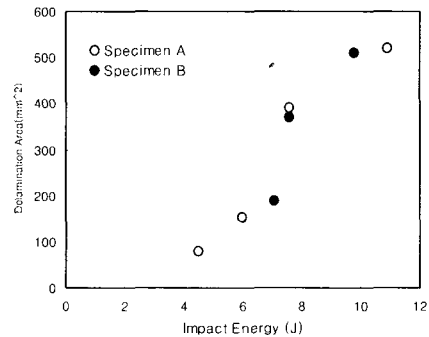


Fig. 12 Relation between delamination area and impact energy (A, B).

## 4.2 저속충격손상에 의한 파괴기구

우선 낙추충격손상에 의해 발생한 CFRP 적층판의 손상 진전을 평가하기 위해 강도저하가 심하고 2개의 계면수를 갖는 시험편 B를 선택하여 초음파 C-스캔하였다. Fig. 13은 시험편 B와 A의 충격에너지가 대략 7.6J에서의 충격손상으로 인해 전형적인 C-스캔 박리면적을 나타냈다. 이때 충격손상을 받은 시험편의 파괴메카니즘을 고찰하기 위하여 충격손상 박리면적을 초음파 C-스캔으로 관찰하였다.

박리부의 파면 관찰위치는 충격손상이 있는 CFRP 적층판의 계면박리 및 파괴 진전현상을 관찰하기 위하여 박리 및 파괴 진전부분을 다이아몬드 커터로 절단하여 주사 전자현미경을 이용하였고, 파면 관찰용 시험편의 절단은 내부 박리면적이 절단되지 않도록 하였으며, 박리면 및 파면을 스프레이 처리하였다.

Fig. 14(a)는 박리부의 파면의 주사전자현미경의 사진을 나타내고 있으며 Fig. 14(b)는 파괴메카니즘과 현미경사진의 관찰위치를 나타냈다. Fig. 14(b)로부터 알 수 있는 바와 같이 충격손상에 의해 강도가 급격히 저하하는 시험편의 충격면

을 압축한 경우는 충격점에서 생긴 모재크랙(transverse crack)을 기점으로 하여 인장축인 ( $90^\circ/0^\circ$ ) 계면(B계면)의 박리손상이 진전하여 파괴에 이른다. 또 손상진전중에는 계면 B의 박리의 폭이 넓어져 있다. Fig. 14(a)는 충격면이 압축을 받을경우의 계면 B의 박리면 및 파면의 관찰사진을 나타낸다. 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 충격면을 압축한 경우의 파면은 충격점에서 생긴 모재크랙(transverse crack)을 기점으로 하여 인장축인 ( $90^\circ/0^\circ$ ) 계면(B계면) 전체의 박리에 의하여 파괴된다. 진단파괴할 때 생기는 수지모양을 나타내는 허클방향[10]로부터 진단방향을 쉽게 추측할 수가 있는데 허클방향을 보면 박리면 중앙(point B)의 박리 진전방향은 계면 B의  $0^\circ$  방향 박리단을 향하고 있으며, 박리폭 방향( $90^\circ$  방향)으로 갈수록 시험편 길이방향( $0^\circ$ )에 대해 약  $20\sim 30^\circ$  정도 기울어져 감을 알 수 있다. 계면 A의 파면(point C)은  $90^\circ$  방향으로 진전하며 모재크랙 근방에서는 폭 방향에 대하여  $30^\circ$  정도의 각도로 진전함을 알 수 있고, 계면 B의 파면(point A)은 충격손상에 의한 박리와는 구별이 되나, 이 역시 박리방향과 같은 방향으로 파괴가 진전됨을 알 수 있었다.

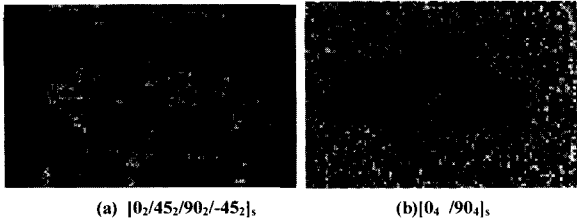
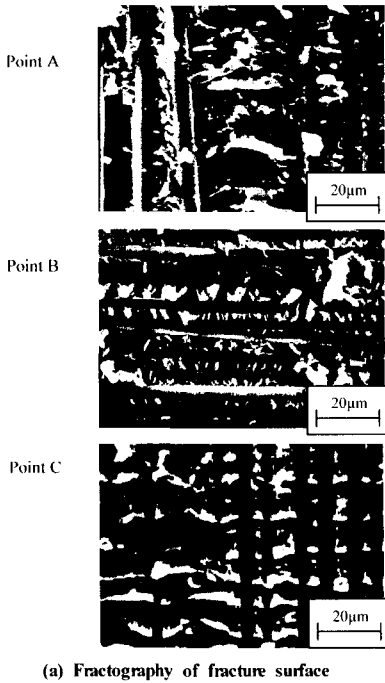
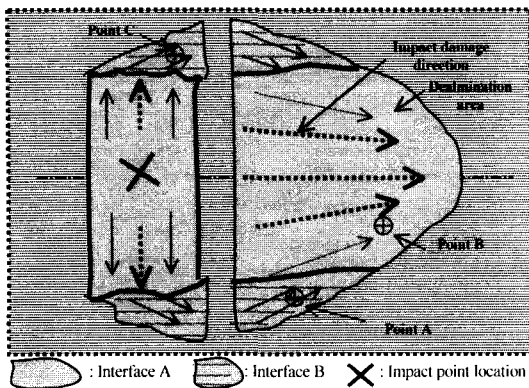


Fig. 13 Typical delamination shapes of specimens  $[0_2/45_2/90_2/-45_2]_x$  and  $[0_4 / 90_4 ]_x$  on the rear side of impact point.



(a) Fractography of fracture surface



(b) Direction of impact damage

Fig. 14 Fracture mechanism.

### 5. 결론

본 연구에서는 CFRP 적층판의 충격시험장치로 낙추식 충격시험장치를 제작하고, 적층방향과 섬유강도를 변화시킨 각각의 적층판에 따른 저속충격실험을 행한 후, 초음파 C-스캐너를 이용하여 박리면적을 관찰하여 적층판의 흡수 에너지와 박리면적의 상관관계를 고찰을 통하여 주사전자 현미경을 통하여 파괴메카니즘을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1차원 파동방정식을 적용한 낙추충격시험 시스템을 제작하여 CFRP 적층판의 충격흡수특성 및 충격강도평가를 하였으며 그 결과가 유효함을 보였다.
- 2) 적층구성이 같은 직교 이방성 적층재의 경우 섬유강도가 낮은 시험편이 섬유강도가 높은 시험편보다 흡수 에너지가 크게 나타났으나 의사 등방성 적층재의 경우는 섬유강도의 대, 소에 따라서는 큰 차이가 없었다.
- 3) 낙추 충격손상을 받은 시험편 경우에 대해서 주사전자 현미경의 파면사진 및 C-스캐너 사진으로부터 충격접근방에 생긴 모재크랙(transverse crack)을 따라서 계면 A, B의 박리가 진전하며 진전폭이 넓은 박리는 인장측 계면에 있는 계면 B의 박리임을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) 炭素纖維懇談會便:炭素纖維の應力技術,シ-エムシ-社, 1984, p. 116.
- 2) 田中吉 文助, 黒川知明ら, “横衝撃を受ける CFRP板の損傷と残留曲げ強度”, 日本航空宇宙學會誌 第37卷 第25號, 1989, pp. 29-36.
- 3) C.C.M Ma, Y. H. Huang and M. J. Chang, Hygrothermal effect on the PEEK/C.F. and PPS/C.F. under Impact Loading(1), ANTEC. 1991, pp. 2029-2096.
- 4) 武田 展雄, “複合材料の 衝撃應答と 破壊(1)”, 日本複合材料學會誌, 11, 4, 1985, pp. 151-161.
- 5) E. T. Camponeschi Jr., “Compression of Composite Materials : A Review, Composite Materials : Fatigue and Fracture (Third Volume),” ASTM STP 1110, Philadelphia, 1991, pp. 550-578.

- 6) 최익현, 최윤록, 홍창선, "Graphite Epoxy 및 Graphite/PEEK 복합적층판의 저속충격후 잔류압축강도에 대한 실험적 해석," 한국복합재료학회지, 제6권, 제2호, 1993, pp. 69-79.
- 7) 전정규, 권오양, 이우식, "곡률을 가진 적층복합재 구조에서의 저속충격손상평가," 한국복합재료학회지, 제14권, 제2호, 2001, pp. 22-32.
- 8) 박찬익, 김인걸, 이영신, "압전필름센서를 이용한 복합재평판의 저속충격 손상개시 모니터링," 한국복합재료학회지, 제15권, 제2호, 2002, pp. 11-17.
- 9) T. Adachi, S. Ujihashi, and H. Matsumoto, "Impulsive Response to a Finite Circular Cylindrical Shell Subjected to Waterhammer Waves," *Bulletin of JSME*, Vol. 29, No. 249, 1986, pp. 737-742.
- 10) S. B. W. Smith and R. A. Grove, "Determination of Crack Propagation Directions in Graphite/Epoxy Structures," *Composites and Metals, ASTM STP*. 948, 1987, pp. 154-173.