

# CFRP 복합재 압력용기의 충격 후 잔류강도저하특성 평가

박재범\* · 김동륜\* · 황태경\*

## Evaluation of the Residual Strength of CFRP Composite Pressure Vessel After Low Velocity Impact

Jaebeom Park\* · Dongryun Kim\* · Taekyung Hwang\*

### ABSTRACT

In this study, the residual strength of CFRP filament winding pressure vessel after low velocity impact was evaluated quantitatively. After impact test, the pressure vessel was sectioned to produce 25 mm-wide ring specimen and the bursting pressure of this specimen was measured. A finite element model was also fabricated to investigate the deformation and stress distribution characteristics of the impacted CFRP vessel. The degradation of the residual strength along with the increase of impact energy was successfully measured and reviewed.

### 초 록

본 논문에서는 CFRP 복합재 압력용기의 저속충격 후 잔류강도 저하량의 정량적인 연구 결과에 대해 논한다. 낙하식 충격시험을 이용하여 복합재 압력용기에 다양한 충격에너지별 충격하중을 가한 후, 압력용기를 원환시험편으로 가공하여, 각 시험편의 원주방향 파열압력이 측정되었다. 또한, 유한요소모델을 구축하여 충격에너지별 변형거동과 응력분포에 대해서도 고찰하였다. 본 연구결과 저속 충격 후 CFRP 복합재 압력용기의 잔류강도 저하량을 정량적으로 평가할 수 있는 실험기법이 개발되었다.

Key Words: CFRP Composite (탄소섬유복합재), Pressure Vessel (압력용기), Residual Strength (잔류강도), Low Velocity Impact (저속충격)

### 1. 서 론

우주항공구조물의 압력용기로서 개발되어, 현재 그 사용이 증대되고 있는 필라멘트와인딩 탄소섬유강화 복합재 (Carbon Fiber Reinforced

Plastic, 이하 CFRP) 압력용기는 강도 및 중량 측면에서 많은 이점을 갖고 있으나, 탄소섬유 및 모재인 에폭시 수지의 취성으로 인해 내 충격 특성 면에서 취약성을 갖고 있으나, 이에 대한 국내의 체계적이고 정량적인 연구결과는 찾아보기 어려우며, 외국의 경우에 있어서도 시험에 소요되는 막대한 비용 및 충격 후 잔류강도의 적절한 측정하는 방법의 부재 등의 문제로 인해

\* 국방과학연구소 제1기술연구본부 6부  
연락처, E-mail: jaebeompark@hanmail.net

제한된 연구결과 만이 발표되고 있다[1,2]. 본 연구에서는 실 적층구조를 적용하여 제작한 표준 압력용기에 대해서 저속충격시험을 실시한 후, 이에 대한 유한요소모델을 구성하여 충격하중시의 변형 및 응력 분포 등에 대한 검토를 실시하였다. 또한, 충격하중을 받은 표준압력용기를 충격부위를 중심으로 하는 폭 25 mm의 원환 시편을 제작하여, Ring에 내압하중을 가하는 방식을 적용하여 잔류 내압강도를 구함으로써, 복합재 압력용기의 저속 충격 후 잔류 내압강도를 각 충격 에너지별로 측정하는 것에 성공하였다.

## 2. 저속충격시험 결과

### 2.1 표준압력용기 형상 및 시험장치

본 연구에 사용된 표준압력용기의 형상은 Fig.1과 같다. 사용된 탄소섬유강화 복합재료는 T700S 탄소섬유/에폭시수지이며, 헬리칼 와인딩이 종료된 후, 별도로 제작한 복합재 스커트를 삽입하고, 원주방향과 헬리칼 와인딩을 병행하여 표준압력용기를 완성하였다. 완성된 표준압력용기의 적층구조는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 공구 및 부착물 등이 충격가속도에 의해 자유낙하하여 복합재 구조물에 충격하중을 가하는 저속충격에 주목하였다. 특히, 날카로운 모서리를 갖는 물체가 최외곽층에 위치한 Hoop방향 탄소섬유에 충격을 가하여 탄소섬유가 절단되는 경우를 고려하여, Fig.2와 같이 삼각형 끝단을 갖는 충격자를 제작하여 적용하였다. Figure 3은 시험모습을 나타낸다.

### 2.2 시험결과

Figure 4에 시험을 통해 얻어진 충격시간-하중 곡선을 나타내었다. Table 2는 충격시험기의 충격자에서 측정된 각 에너지별 최대하중, 흡수에너지, 충격속도 등을 정리한 것 것으로, 특히 충격에너지 증가를 대비 최대하중의 증가율,  $DP_{max}/DE$ 을 각 에너지 구간별로 나타내었다. 충격에너지 값이 15 Joule에서 30 Joule로 증가함에 따라  $DP_{max}/DE$ 의 값이 50%정도의 급격한 감소를 보이고 있으며, 75 Joule에서 90 Joule로 증

Table 1. Laminate construction of STEB

Position	Lay-up Sequence
Dome	$[(\pm 27)_3]$
Skirt	$[(\pm 45)_3/(90)_3]$
Cylinder	$[(\pm 27)_3/(90)_3]$

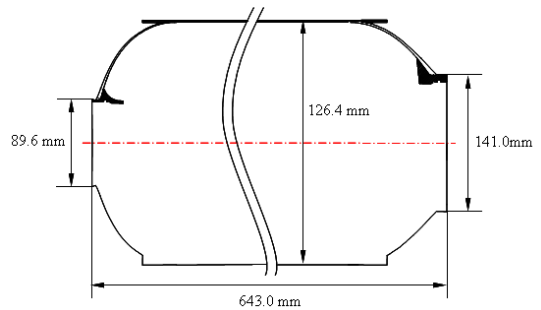


Fig. 1. Shape and dimensions of CFRP STEB.

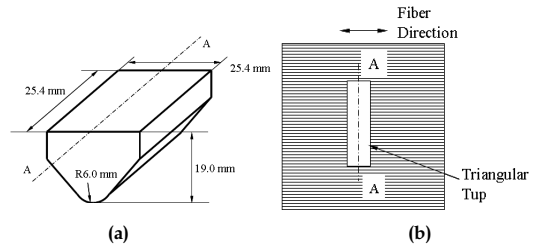


Fig. 2. Impactor tup shape and impact loading direction; (a) Tup, (b) Loading direction.

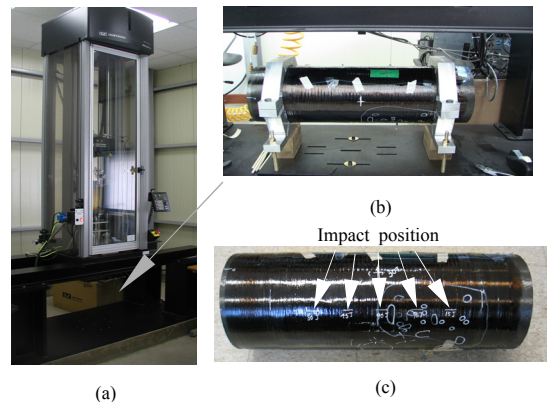
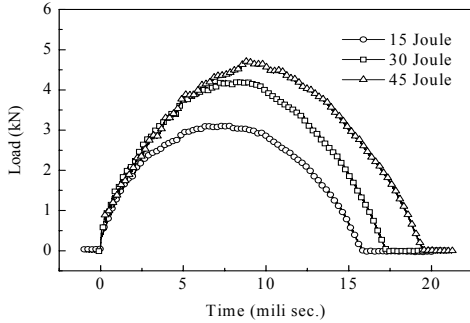
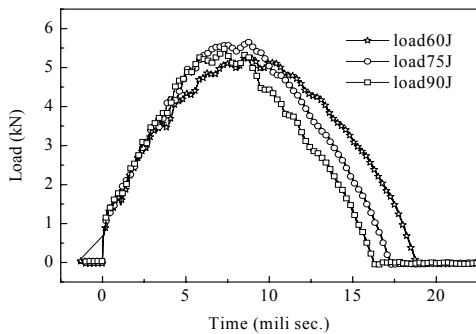


Fig. 3. Test Apparatus and STEB specimen



(a) 15, 30, 45 Joule



(b) 60, 75, 90 Joule

Fig. 4. Impact response curve obtained from low velocity impact test

Table 2. Summary of the measured results

Energy (Joule)	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	90.0
Absorbed E.(Joule)	5.7	8.3	12.9	26.0	57.5	86.2
Impact Vel. (m/s)	1.70	2.39	2.91	3.37	3.76	4.11
Max.Load (kN)	3.14	4.25	4.73	5.26	5.68	5.48
DP/DE (kN/Joule)		0.074	0.032	0.035	0.028	-0.013

Table 3. Material properties of T700S/epoxy

$E_{11}$	137.2 GPa	$G_{23}$	2.88 GPa	$S_{22ult,c}$ ( $Y_C$ )	23 MPa
$E_{22}$	7.8 GPa	$S_{11ult,t}$ ( $X_T$ )	1950 MPa	$t_{2ult}$ (S)	45.1 MPa
$n_{12}$	0.298	$S_{11ult,c}$ ( $X_C$ )	1000 MPa	$a^{*1}$	$2.44 \times 10^{-8}$
$G_{12}$	3.75 GPa	$S_{22ult,t}$ ( $Y_T$ )	23 MPa		

\*1. Non-linear stress strain relation coefficient

가하는 경우에는 -값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 충격 하중에 의해 복합재의 하중저항성이 저하되어 더 이상 충격하중을 지지할 수 없는 상태임을 나타내는 것으로 판단된다.

### 3. 유한요소법을 이용한 변형거동 해석

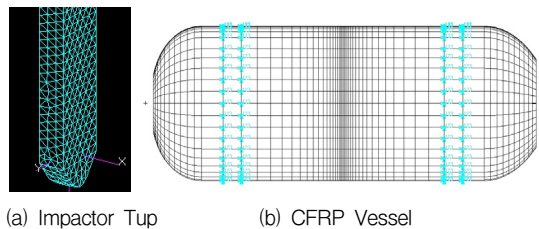
#### 3.1 복합재 압력용기와 충격자에 대한 유한요소모델

본 연구에서는 상용 Implicit 유한요소해석 Code인 MSC-DYTRAN™을 사용하였다. Figure 5에 삼각형 충격자와 복합재 연소관의 유한요소 모델을 나타내었다. 복합재 연소관은 복직층 Shell요소[3]를 사용하였으며, Table 3의 직교 이방성 물성치를 사용하였다. Table 3에서 1방향은 섬유방향을, 2방향은 섬유직각방향을 의미하며,  $s_{ult}$ 는 인장강도,  $t_{ult}$ 는 전단강도를 나타낸다. 또한 아래침자  $c$ 는 압축,  $t$ 는 인장을 나타낸다. 복합재 손상을 모사하기 위해, Table 4와 5와 같이 각 파손항목별 판정식과 파손발생시의 물성저하를 반영하였다. 삼각형 충격자는 사면체 3차원 Solid요소로 모델링하였고, 물성치는 Steel의 일반적인 물성 ( $E=203.8$  GPa,  $n=0.3$ )을 사용하였다.

#### 3.2 복합재 압력용기와 충격자에 대한 유한요소모델

Figure 6은 15 Joule로 타격시 유한요소해석으로 구한 충격시간-하중곡선과 실험결과를 비교한 것이다. 두가지 결과가 잘 일치하고 있어, 충격에 따른 굽힘 변형 및 타격부의 응력분포 등이 유한요소해석 결과를 통해 예측이 가능하다. 충격 에너지 값은 Eq.(1)과 같이 충격자의 초기속도를 조정하여 조절하였다.

$$\text{initial velocity, } v = \sqrt{(2 \times \text{Joule}) / \text{mass}} \quad (1)$$



(a) Impactor Tup

(b) CFRP Vessel

Fig. 5. F.E. Models of impactor tup and STEB.

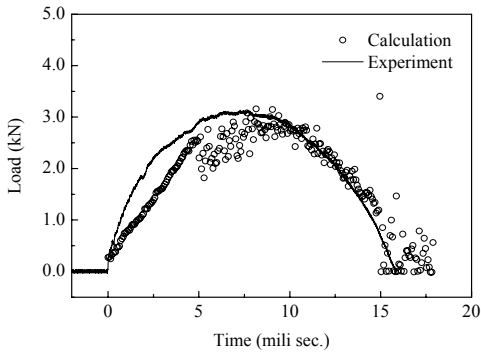


Fig. 6. Comparison of experiment and calculation.

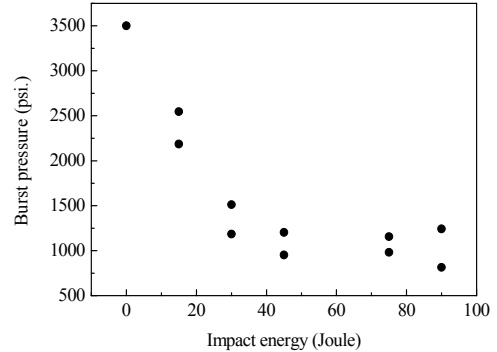


Fig. 8 Residual strength measurement result.

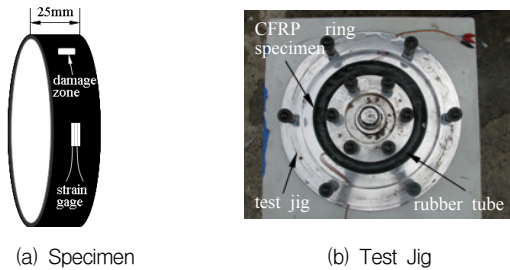


Fig. 7. The schematic of CFRP ring specimen and the photograph of test jig.

#### 4. 충격후 잔류 내압강도 평가

Figure 7에 시험장치와 시험편을 나타내었다. 사용하였다. 시험편의 중앙부에 충격부가 위치하도록 표준압력용기의 원통부를 원환형상으로 가공하여 시험편을 제작하였다. Figure 8은 각 충격에너지별 잔류 내압강도를 나타낸 것이다. 45 Joule까지는 내압강도가 급격하게 감소하나, 그 이상에서는 내압강도가 일정한 값을 유지하고 있다. 이는 45 Joule까지는 충격에너지가 표면 Hoop층의 완전한 파단까지는 이르지 못하고 있으나, 45 Joule이상에서는 표면 Hoop층의 섬유가 모두 파단되고 이후에는 내부의 헬리컬층의 층간분리 등의 발생 및 진전으로 충격에너지가 흡수되기 때문인 것으로 판단된다[4].

#### 5. 결 론

본 연구에서는 표준형 시험평가 복합재 압력용기에 대한 저속충격시험 및 해석을 실시하여, 충격거동 특성 분석, 충격 후 잔류 내압강도의 정량적 평가 등에 관해 고찰하였다. 특히 저속 충격을 받은 복합재 압력용기의 잔류 내압강도를 효과적으로 평가할 수 있는 방안을 제시하였고, 그 결과를 제시하였다.

#### 참 고 문 헌

1. C. C. Poe Jr., *J. of Spacecraft and Rockets*, "Impact Damage and Residual Tension Strength of a Thick Graphite/Epoxy Rocket Motor Case," *J. of Spacecraft and Rockets*, Vol.29, No.3, May-June, 1992, pp.394-404.
2. S. Kobayashi, T. Imai and S Wakayama, "Burst Strength Evaluation of the FW-CFRP Hybrid Composite Pipes Considering Plastic Deformation of the Liner," *Composites A*, Vol.38, 2007, pp.1344-1353.
3. MSC DYTRAN REFERENCE MANUAL.
4. W. J. Stronge, "Impact Mechanics," *Cambridge University Press*, 2000.