

## CFRP 구조 부재의 시뮬레이션 동적 거동에 관한 연구<sup>§</sup>

김정호\* · 방정민\* · 김지훈\*\*†

\* 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, \*\* 조선대학교 기계설계공학과

### The Study of Simulation Dynamic Behavior of CFRP Structural Members

Jung Ho Kim\*, Jung Min Bang\* and Ji Hoon Kim\*\*†

\* Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering, Graduate School, Chosun Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chosun Univ.

(Received December 10, 2010 ; Revised January 28, 2011 ; Accepted February 24, 2011)

**Key Words:** CFRP(탄소 섬유 복합재료), Finite Element Analysis(유한 요소 해석), LS-DYNA

**초록:** 최근 수송기계 등의 구조물에 사용되는 구조부재는 대부분이 일정 형상을 지닌 형강 혹은 중공부재를 사용한다. 특히 자동차에 사용되는 구조부재는 여러 가지 부품을 지지하고, 충돌 시 충격 에너지를 흡수하여 승객을 보호하는 역할을 한다. 최근 구조부재는 이러한 특징들로 인해 경량화와 안정성을 고려하여 개발되고 있다. 본 논문에서는 CFRP 부재의 파괴 형상과 에너지 흡수특성을 예측하기 위해 CFRP의 사각부재 형상을 만들어 충격 실험을 하고 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 CFRP 사각부재의 충격 시뮬레이션을 행하였다. 실험 후, FEA 프로그램의 결과와 실제 실험의 결과를 비교하여 CFRP 부재의 복잡한 파괴 거동과 에너지 흡수 특성을 고찰하였다.

**Abstract:** The structural vehicles are steel members of square or circle tube with definite shape. These members support various components and absorb impact energy to protect passengers during accidents when crash happen. Structural members need to be lightweight and stable. In this study, we do an impact simulation of a CFRP square member using finite element analysis program Ls-Dyna in order to predict fracture shape and energy absorb feature of CFRP member. Also, we make square member shape of CFRP and do an impact experiment. We compare the analytical and experimental results and consider the fracture shape and energy features of CFRP members.

## 1. 서론

최근 자동차 산업분야는 친환경적인 면, 즉 연비개선, 배기가스 규제를 목표로 하고 있다. 이와 더불어 최근 수송기계의 설계 동향은 석유자원의 고갈과 환경 문제 등의 이유로 차량의 경량화를 통하여 에너지사용의 효율성을 증가 시켜 배출가스를 감소시키고 수송원가를 절감하려는 노력이 이루어 지고 있다. 이러한 이유로 인하여 자동차 산업분야에서 경량화 재료로 많이 사용하는 알루미늄을 대신하여 강도와 강성이 높고 중량이 가벼운 복합재료의 수요가 증가하는 추세이다.

복합재료 중 하나인 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic: 이하 CFRP 라고 한다.)는 비 강도와 비 강성이 높고 중량이 가벼워 여러 산업 분야에서 주목 받고 있다. 하지만 CFRP 부재는 복잡한 파괴 거동을 보여 에너지 흡수 특성 및 파괴 형상을 예측하기가 어려워<sup>(1)</sup> 아직까지 1 차 부재에 적용을 하지 못하고 있는 실정이다.

이러한 CFRP 부재를 1 차 부재에 적용하기 위하여 파괴 형상과 에너지 흡수 특성을 예측하기 위해 유한 요소 해석 프로그램(Finite Element Analysis Program: 이하 FEA Program 이라고 한다.)을 이용한 연구가 진행되고 있다. 아직까지 FEA Program의 해석 결과와 실제 결과에서 많은 차이가 있지만, 이러한 프로그램을 이용한 수치적 접근은 각종 충돌실험에서 충분히 역할을 수행한다고 보편적으로 인식이 되어있다.<sup>(2)</sup> 하지만 CFRP 부재의 압괴 현상은 기하학적 변형이 크고

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, kjh@chosun.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

비선형 거동을 하기 때문에 실험적 해석에 의존하고 있는 것이 현실이다. 특히, CFRP 부재를 이용한 설계 또는 연구 시에 시간과 비용의 증가로 개발비용의 상승으로 이어진다.

위와 같은 이유로 인하여 본 논문에서는 CFRP 부재의 압괴 특성을 이해하고 수치적으로 접근하기 위하여 유한요소 프로그램 중 하나인 LS-Dyna 를 이용하여 CFRP 의 충격 시뮬레이션을 행하고, 실제 충격실험과 비교 분석 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 충격 압괴 실험

실험에 사용된 시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Pre-preg sheet 를 사용하여 Auto Clave 를 통해 진공 압축 성형 한 것이다. 시험편은 시험편의 길이방향을 0° 기준으로 적층하고 크기는 실제 사이드 부재의 1/4 크기의 30x30mm 의 크기로 하고 시험편의 길이는 오일러 좌굴이 발생하지 않고 압괴가 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm 로 제작하였다. 그리고 잔류응력이 발생하지 않도록 성형이 끝난 시험편은 다이아몬드 커터기를 이용하여 절단하였다. 시험편은 [15°, 45°, 90°, 0° /90° ]<sub>8</sub>로 적층하고 두께 1mm 로 제작하여 충격 실험을 행하였다.

### 2.2 충격 시뮬레이션

본 연구에서 FE Model 의 CAD 모델링 작업은 Simens NX4 를 이용하였으며 Pre-Processor 는 Simens FEMAP 10.02 와 ETA VPG 3.1.1 을 이용하였다. LS-Dyna3D 를 통해 도출된 결과의 확인은 Post-Processor 인 LS-PrePost 2.1 을 이용하였다. 일반적으로 CFRP 부재가 파괴 되는 동안 Mode I, Mode

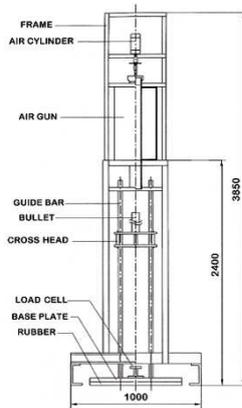


Fig. 1 Impact test device

II, 국부좌굴, 층간크랙 및 층내크랙이 발생한다. Mode I, ModeII, 층간크랙은 거의 대부분 중간계면을 중심으로 발생하므로 Fig. 2 와 같이 2 개의 Shell Model 을 이용해 구현 할 수 있도록 하였다. 그리고 본 연구에서 사용된 Damage Model 은 Chang-Chang failure criteria 에 기반 한 MATERIAL TYPE 054 를 이용하였다. Chang-Chang failure criteria 에 기반 한 MATERIAL TYPE 054 의 failure criterion 은 다음과 같다.<sup>(3,4)</sup>

Tensile fiber mode 의 경우

$$\sigma_{aa} > 0 \text{ then } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right) + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{X_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_a = E_b = G_{ab} = v_{ba} = v_{ab} = 0$$

Compressive fiber mode 의 경우

$$\sigma_{aa} < 0 \text{ then } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_a = v_{ba} = v_{ab} = 0$$

Tensile matrix mode 의 경우

$$\sigma_{bb} > 0 \text{ then } e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

Compressive matrix mode 의 경우

$$\sigma_{bb} < 0 \text{ then } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_b = v_{ba} = v_{ab} = 0. \rightarrow G_{ab} = 0$$

여기서  $\sigma_{aa}$  는 Fiber 에 대한 응력이고,  $\sigma_{bb}$  는 Matrix 에 대한 응력 값이다. 이와 아울러 CFRP 의 취성적 특성을 구현하기 위해 TFAIL Parameter 를 조정하였다. TFAIL Parameter 는 Time step 에 기초해 Element 를 삭제하는 역할을 한다. 그리고 여기에 사용한 parameter 들의 설명과 입력한 값들은 Table 1 과 같다. 그리고 Cross Head 의 질량은 40kg 이고 0.5mm 떨어진 곳에서 충격임계속도 4.5m/s 로 정의하였다.

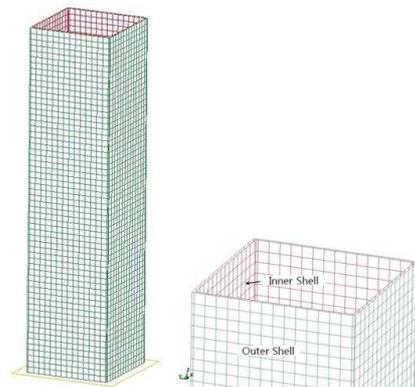
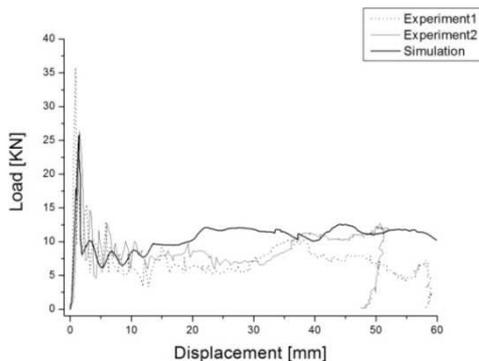


Fig. 2 Shell model for FEA

**Table 1** The parameters of MAT\_054

Parameter	Explanation	Value
ALPH	Nonlinear shear stress parameter	0.0
BETA	Weighting factor for shear term in tensile fiber mode	0.0
FBRT	Reduction factor for tensile strength in fiber direction after matrix compressive failure	1.0
YCFAC	Reduction factor for compressive fiber strength after matrix compressive failure	3.0
TFAIL	Time step size criteria for element deletion	0.4
SOFT	Softening reduction factor for material strength in crash front elements	0.8
EFS	Effective failure strain	0.95

**Fig. 3** The collapse shape of 15° member in simulation**Fig. 4** The load-displacement curve of simulation result and experiment of 15°

### 3. 실험방법

#### 3.1 하중-변위 선도 고찰

실제 충격 실험과 Ls-Dyna3D 를 통하여 얻은 하중-변위 선도를 측정하여 비교하였다.

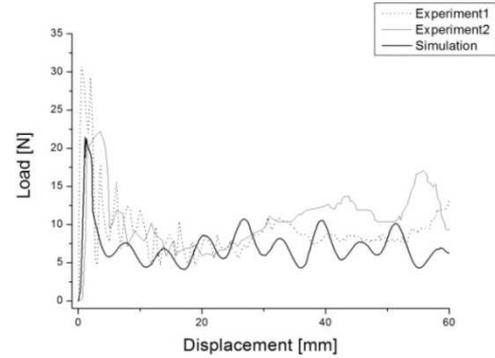
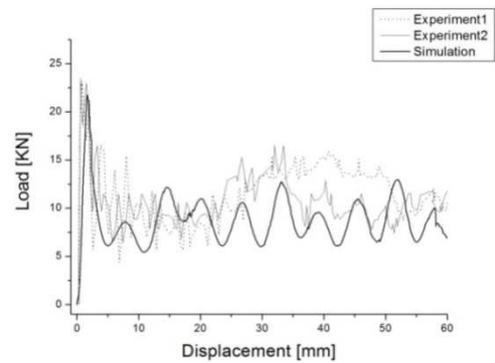
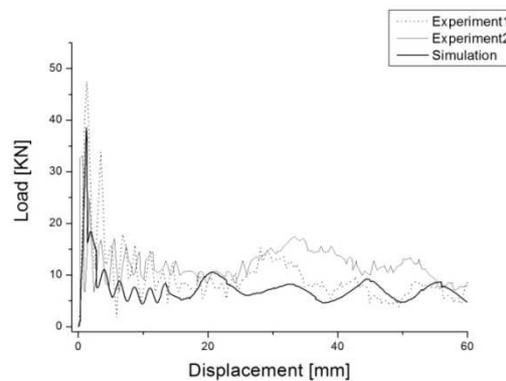
**Fig. 5** The load-displacement curve of simulation result and experiment of 45°**Fig. 6** The load-displacement curve of simulation result and experiment of 90°**Fig. 7** The load-displacement curve of simulation result and experiment of 90°/0°

Fig. 3 은 15° 로 적층한 시험편의 Time Step 별 변형 형상을 나타낸 것이다. 실제 실험과 Fig. 3 에 나타낸 GUI(Graphical User Interface)상의 형상은 비슷하게 나타났다. Fig. 4, 5, 6, 7 은 실제 충격 실험과 시뮬레이션의 하중-변위 선도를 비교 분석 한 것이다. 시뮬레이션 결과의 하중-변위 선도의 경향은 실제 실험과 비슷하게 나타났다. 하지만 시뮬레이션의 하중-변위 선도가 실험의 하중-변위 선도보다 변동의 폭이 큰 것은 TFAIL Parameter 가 Time Step 에 기초해 Element 를 삭제하는 것이 하중에 영향을 준 것이라고 사료된다.

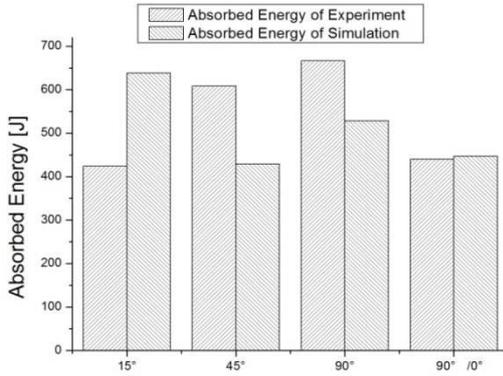


Fig. 8 Comparing the absorbed energy of the experiment and simulation result

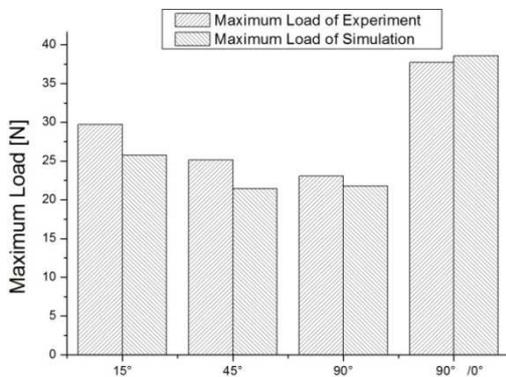


Fig. 9 Comparing the maximum load of the experiment and simulation result

### 3.2 흡수에너지 비교 고찰

Fig. 8 은 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 흡수 에너지를 비교한 것이다. 가장 큰 오차를 보인 결과는 15° CFRP 부재이다. 실험의 결과 값은 423.79J 이었고 시뮬레이션의 결과는 638.6J 로 시뮬레이션의 결과가 약 33.63% 정도 높게 나타났다. 가장 작은 오차를 보인 결과는 90° / 0° CFRP 부재로서, 실험 결과는 440.41J 이고 시뮬레이션 결과는 446.96J 로 시뮬레이션의 결과가 약 1.4% 정도 높게 나왔다. 나머지 45° CFRP 부재와 90° CFRP 부재는 각각 178.92J, 137.96J 정도 낮은 결과를 보이며 약 29.41%, 20.66% 정도의 오차를 보였다.

### 3.3 최대 하중 비교 고찰

Fig. 9 는 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 최대하중을 비교한 것이다. 45° CFRP 부재의 실험 결과가 가장 큰 오차를 보였고, 실험결과는 25.13KN, 시뮬레이션 결과는 21.46KN 로 시뮬레이션의 결과가 약 14.61% 정도 낮게 나왔다. 가장 적은 오차를 보인 결과는 90° / 0° CFRP 부재로 실험 결과는 37.73KN 이었고 시뮬레이션 결과는 38.55KN 으로 시

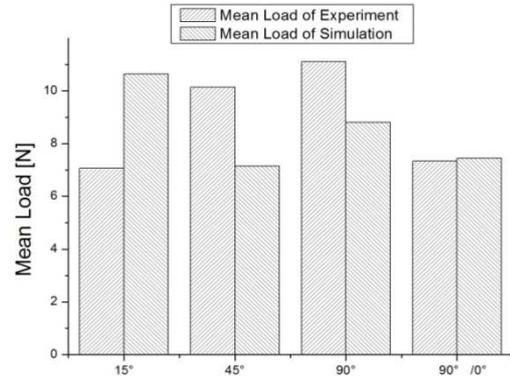


Fig. 10 Comparing the mean load of the experiment and simulation result

뮬레이션의 결과가 약 2.1% 정도 높게 나왔다. 나머지 15°, 90° CFRP 부재는 각각 4KN, 1.3KN 정도 낮은 결과를 보이며 각각 약 13%, 5.6% 정도의 오차를 보였다.

### 3.4 평균하중 비교

Fig. 10 은 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 평균하중을 비교한 것이다. 가장 큰 오차를 보인 결과는 15° CFRP 부재로 실험 결과는 7.06KN 이고 시뮬레이션 결과는 10.63KN 으로 시뮬레이션의 결과가 약 33.63% 정도 높게 나왔다. 가장 적은 오차를 보인 결과는 90° / 0° CFRP 부재로 실험 결과는 7.34KN 이었으나 시뮬레이션의 결과는 7.44KN 으로 시뮬레이션의 결과가 약 1.46% 정도 높게 나왔다. 나머지 45°, 90° CFRP 부재는 각각 2.982KN, 2.295KN 정도 낮은 결과를 보이며 각각 29.41%, 20.66% 정도의 오차를 보였다.

## 4. 결론

본 논문에서는 CFRP 부재의 파괴 형상과 에너지 흡수 특성을 예측하기 위하여 실제 충격 실험과 FE Model 을 작성하여 시뮬레이션을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시뮬레이션 결과에서 모서리부의 찢어짐 계면간 박리 등이 일어나며 파괴가 진행 되었고, 이것으로 2 개의 Shell Model 을 이용해 Mode I, Mode II, 층간크랙을 구현하는 해석에 타당성이 있음을 확인했다.

(2) 시뮬레이션 결과의 하중-변위 선도 경향은 실제 실험과 비슷하게 나타났지만 시뮬레이션의 하중-변위 선도가 실험의 하중-변위 선도보다 변동이 폭이 더 크게 나타났다. 이것은 본 연구에서 사용한 TFAIL Parameter 가 Time step 에 기초해

Element 를 삭제하는 것이 하중에 영향을 준 것이라고 사료된다.

(3) 시뮬레이션의 결과 흡수에너지는 약 1.4~33.63%, 최대 하중은 약 2.6~14.61%, 평균하중은 약 1.4~33.63% 정도의 차이를 보였다.

## 후 기

본 과제(결과물)은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

## 참고문헌

- (1) Farley, G.L and Jones, R.M., 1992, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol.26, No.1, pp. 37~50.
- (2) Min., H.-K., 2003, "A Study on The Dynamic Behavior of Frame Type Vehicled Using Computer Simulation," *Chosun University Doctor Study*.
- (3) LS-DYNA3D Theory Manual, 1998, LSTC, Livemore, California.
- (4) LS-DYNA Keyword User's Manual, 1998, LSTC, Livemore, California.
- (5) Han, H., 2007, "A Numerical Study on the Axial Crushing Response of Hybrid Pultruded and  $\pm 45^\circ$  Braided Tubes," *Composite Structures* 80, pp. 253~264.
- (6) Zarei, H., 2008, "An Experimental and Numerical Crash Worthiness Investigation of Thermoplastic Composite Crash Boxes," *Composite Structures* 85, pp. 245~257.
- (7) Huang, J., 2009, "Numerical and Experimental Investigation on the Axial Crushing Response of Composite Tubes," *Composite Structures* 91, pp. 222~228.
- (8) Mcgregor, C. J., 2007, "Simulation of Progressive Damage Development in Braided Composite Tubes Under Axial Compression," *Composite: Part A* 38, pp. 2247~2259.
- (9) Xiao, X., 2009, "Progress in Braided Composite Tube Crush Simulation," *International Journal of Impact Engineering* 36, pp. 711~719.
- (10) Xiao, X., "Virtual Testing of Sandwich Core Structures Using Dynamic Finite Element Simulations," *Computational Materials Science*.
- (11) Mamalis, A.G., 2002, "Axial Collapse of Hybrid Square Sandwich Composite Tubular Components with Corrugated Core: Numerical Modeling," *Composite Structures* 58, pp. 571~582.
- (12) Mcgregor, C., 2009, "Finite Element Modelling of the Progressive Crushing of Braided Composite Tubes under Axial Impact," *International Journal of Impact Engineering*, pp. 1~11.