



## 탄소섬유복합재와 강재의 재질과 형상변화에 따른 구조부재의 압괴 특성

곽영환<sup>a</sup>, 차천석<sup>b\*</sup>

## Collapse Characteristics of Structural Members based on Materials and Section Shape Changes in Carbon Fiber Composites and Steels

Young-Hwan Kwak<sup>a</sup>, Cheon-Seok Cha<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical System Engineering, Chosun University Graduate School<sup>b</sup> Department of Fire Safety, Donggang University

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	10	March	2021
Revised	22	March	2021
Accepted	26	March	2021

## Keywords:

Vehicle collision  
Structural member  
CFRP  
Collision energy  
Collapse mode  
Energy absorption characteristics

## ABSTRACT

In the event of a vehicle collision, the kinetic energy of the colliding vehicles can cause severe injuries to the passengers if the vehicle body is too strong and the passengers bounced out of the vehicle due to inertia. If the vehicle body absorbs considerable collision energy, the passengers might get trapped inside, causing their death. Therefore, when a vehicle crashes, the structural members of its body must efficiently absorb the collision energy and secure space. In this study, a single hat-shaped cross-section member and a double-hat cross-section member has been used for the side member of an automobile that absorbs most of the collision energy during a vehicle collision event. Following the designing and manufacturing of the steel and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) material structural members, the axial collapse test was performed to investigate the collapse mode and energy absorption characteristics based on their shape and material changes.

## 1. 서론

차량수가 급격히 증가함에 따라 교통사고에 의한 많은 사상자가 발생하여 사회적으로 큰 문제가 되고 있다. 따라서 차량 설계 시 최우선적으로 승객의 안전을 고려한 설계가 되어야 한다.

차량의 충돌 사고시 차체의 강도가 너무 크면 충돌시 관성에 의해서 승객이 차량 밖으로 튕겨나가 사망하게 되고, 차체가 충돌에너지를 너무 많이 흡수하면 승객이 차량 내에 끼워져 사망하게 된다. 따라서 차량 구조부재의 최적설계는 차체 구조부재가 적절히 에너지를 흡수하면서 큰 강도를 가지고 탑승공간을 확보하도록 설계되어야 한다<sup>[1-2]</sup>.

차량의 증가에 따른 안전문제와 더불어 사회적 문제가 되고 있는 미세먼지의 피해, 탄소저감 대책, 환경오염방지 및 연료저감 대책으로 자동차 경량화의 문제가 필수적인 문제가 되고 있다<sup>[3]</sup>. 경량화 차량의 설계에서 중요한 것은 차량 중량을 줄이기 위한 차량 경량화용 재료를 개발하여 차량 충돌시 차체 구조부재가 적절히 에너지를 흡수하면서 탑승공간이 확보될 수 있도록 설계하는 것이다. 현재까지의 차량 경량화 재료로는 마그네슘, 알루미늄, 고장력강 등과 플라스틱과 같은 비 금속 재료가 대부분이다.

따라서 차량충돌시 차체 구조부재가 적절히 충돌에너지를 흡수하면서 탑승공간을 확보할 수 있고 관성에너지를 줄일 수 있는 정량적인 경량화용 차체의 충돌안전성능의 평가가 절실히 요구되고

\* Corresponding author. Tel.: +82-62-520-2520

E-mail address: cha7170@donggang.ac.kr (Cheon-Seok Cha).

있다.

또한, 내환경성 개선 요구가 높아지면서 항공기에서와 같이 자동차도 경금속에서 보다 경량이면서 고강도, 고강성인 CFRP (carbon fiber reinforced plastic)와 같은 복합재료로 재료 전환이 일어나고 있다<sup>4,7)</sup>. 동시에 자동차는 하이브리드 차에서 전기자동차로 동력원도 크게 전환되고 있어, 차체구조를 근본부터 재검토해야 하는 시기라는 점도 CFRP와 같은 복합재료의 본격 적용의 시기가 된 것 같다.

이와 같은 다양한 요구에 부응하기 위하여 구조부재에 대하여 여러 가지 재질과 단면형상의 변화에 의한 압괴특성에 대한 연구가 행해지고 있다<sup>8-13)</sup>.

그러나 아직까지는 구조부재의 압괴가 진행되는 과정에서 압괴 모드와 하중-변위에 의한 에너지흡수를 고려한 경량화 구조부재에 대한 연구결과는 찾아보기 힘들다. 또한 복합재료는 적층조건에 따른 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이기 때문에, 자동차 충돌시 자동차 경량화와 승객의 안전을 적절히 보호 할 수 있는 설계변수를 적절히 선정하여 요구조건에 맞는 최적설계 개념이 요구된다.

따라서 실제 차량의 사이드부재에 상용되는 강재와 CFRP재 구조부재의 형상 및 재질의 변화에 따른 정량적인 압괴특성을 예측할 수 있는 최적의 경량화 차체 구조부재에 대한 실차 설계에 적용 가능한 압괴특성을 파악할 수 있는 연구와 개발이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 Kwak<sup>[14]</sup>의 학위논문의 일부분을 요약 정리한 것으로, 차량의 사이드부재에 Single hat 단면 구조부재와 Double hat 단면 구조부재가 사용될 것으로 상정하여 강재 및 CFRP재를 설계 제작 및 성형한 후 재료시험기를 이용하여 축 압괴실험을 행하여 압괴특성에 관해 고찰함으로써 차량의 사이드 부재의 재질 및 형상변화에 따른 최적의 구조부재를 개발하는데 활용될 수 있는 설계데이터를 얻고자 한다.

## 2. 시험편 및 압괴실험

### 2.1 CFRP재 시험편

경량화의 대표적인 재료인 CFRP/EPOXY 프리프레그 시트를 이용하여 차량 전면부 사이드부재의 기본형상인 Single hat 단면 구조부재와 Double hat 단면 구조부재를 제작하여 시험편으로 사용하였으며, CFRP재 시험편의 성형은 다음과 같이 조선대학교 충격공학실험실에서 성형한 방법을 이용하였다<sup>14)</sup>.

CFRP재 시험편의 제작은 알루미늄 사각 구조부재에 CFRP/EPOXY프리프레그 시트를 원하는 방향으로 적층한 후 오토클레이브에서 성형하였으며, CFRP/EPOXY 프리프레그 시트를 시험

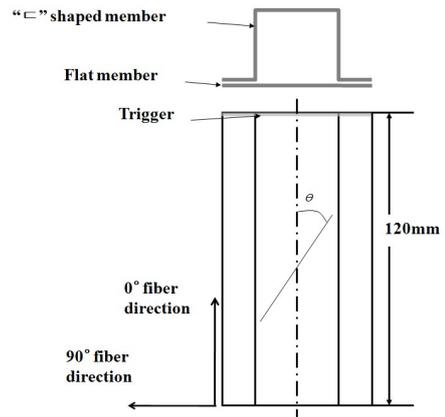


Fig. 1 Shape of CFRP single hat member

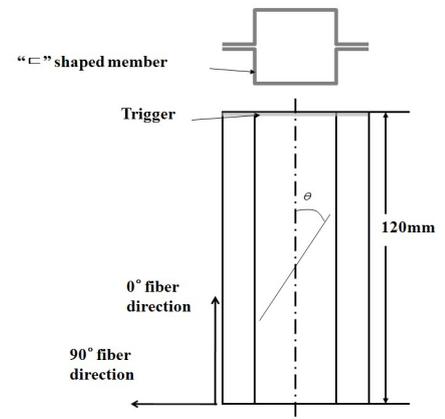


Fig. 2 Shape of CFRP double hat member

편의 0°를 축 방향으로 하여  $[+\theta_n/-\theta_n]$ 의 적층구성으로 시험편을 제작하였다.

여기서  $n$ 은 프리프레그 시트의 수이며,  $\theta$ 는 축 하중 작용 시 압괴특성이 가장 우수한 15°로 적층하였으며, 적층 플라이 수  $n$ 은 8플라이며 시험편의 두께는 1 mm로 하였다.

CFRP재 시험편의 성형은 성형할 시험편을 원하는 방향으로 적층 후 챔버내부에 넣고 히터에 의해 경화시간을 90분, 경화점 온도 130°C로 하여 성형 제작하였다.

시험편의 치수는 한 변의 길이가 30 mm, 플랜지 길이가 12 mm로 “C”자형 단면 구조부재와 평판부재를 결합하였으며, 시험편 길이는 120 mm로 시험편 내부에 잔류응력이 발생하지 않도록 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다.

제작된 CFRP Single hat 단면 구조부재와 Double hat 단면 구조부재의 형상을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다.

### 2.2 강재 시험편

강재 시험편 제작방법은 조선대학교 충격공학실험실의 제작방법<sup>[2]</sup>을 이용하였다. 냉간 압연강판을 이용하여 Single hat 단면 및

**Table 1 Definition of specimens**

Specimen name	Materials	Specimen shape	Fiber stacking
CFS	CF/Epoxy	Single hat	[+15/-15] <sub>4</sub>
CFD	CF/Epoxy	Double hat	[+15/-15] <sub>4</sub>
STS	Steel	Single hat	
STD	Steel	Double hat	

Double hat 단면구조를 갖도록 평판과 “ㄷ”자 단면으로 절단, 프레스가공 후 점 용접하여 제작하였다.

강재 Single hat 단면 및 Double hat 단면 구조부재 시험편 모두 CFRP재 시험편의 치수와 동일하게 플랜지 길이 12 mm, 두께 1 mm, 점용점 지름 6 mm, 점용점 간격은 22 mm로 하였으며, 점용점 시작점은 점용점을 용이하게 하기 위하여 시험편의 가장자리로부터 5 mm 떨어진 위치로 하였으며 점용점 점이 좌우대칭이 되도록 하였다.

Table 1에 압괴실험에 이용한 CFRP재 및 강재 Single hat 단면 및 Double hat 단면구조의 시험편을 정의하였으며, 시험편 CFS 질량은 30.0 g, CFD 질량은 29.5 g, STS 질량은 153.7 g, STD 질량은 149.8 g이었다.

**2.3 압괴실험**

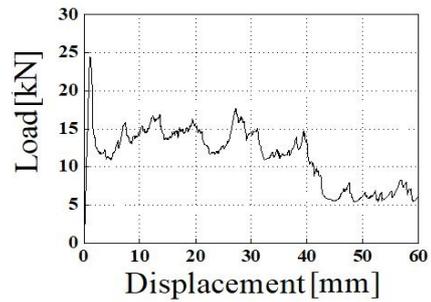
만능재료시험기(AG-1S, 100 kN)를 사용하여 균일한 압축하중이 가해지도록 10 mm/min.로 변위제어를 하여 압괴실험을 실시하였다. 압괴 실험시 강재 시험편의 변형은 축 방향 길이(120 mm)의 70 mm까지 변형되도록, CFRP재 시험편의 경우는 60 mm까지 변형되도록 연속적으로 변위를 제어하면서 압괴실험을 하였고, 각각의 시험편당 4~5회 수행하여 5%내 오차범위 데이터의 평균값을 취하였다.

CFRP재 CFS와 CFD 구조부재의 압괴실험 결과를 강재 STS와 STD 구조부재의 압괴특성과 비교하기 위하여 Hwang<sup>[4]</sup>의 실험결과를 이용하였다.

Fig. 3에 CFS 구조부재의 압괴실험 결과 얻은 하중-변위선도를 나타내며, Fig. 4에 압괴실험후의 압괴형상을 나타냈다. 그리고 Fig. 5에 CFD 구조부재의 압괴실험 결과 얻은 하중-변위선도를, Fig. 6에 압괴실험후의 압괴형상을 나타냈다.

또한, 강재 STS, STD 구조부재의 압괴실험 결과를 CFRP재 CFS, CFD 구조부재의 압괴특성과 비교하기 위하여 Park<sup>[15]</sup>의 실험결과를 이용하였다.

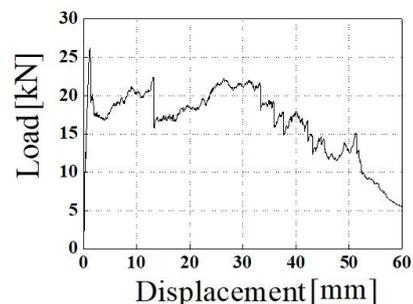
Fig. 7는 STS 시험편의 압괴실험에 의한 하중-변위 선도를 나타내며, Fig. 8은 압괴 후의 형상을 나타냈다. 그리고 Fig. 9는 STD 시험편의 하중-변위 선도를 나타내며, Fig. 10은 압괴 후의 시험편의 형상을 나타냈다.



**Fig. 3 Load-displacement curve of CFS specimen**



**Fig. 4 Shape of collapsed CFS specimen**



**Fig. 5 Load-displacement curve of CFD specimen**



**Fig. 6 Shape of collapsed CFD specimen**

압괴실험 후 얻은 하중-변위선도의 면적이 시험편의 흡수에너지이므로, 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 계산하여 흡수에너지를 구하였다.

**Table 2 Static Collapse test results (Mean value)**

Specimen Classification	CFS	CFD	STS	STD
$E_a$ [J]	680.0	968.0	1056.0	1764.6
$P_m$ [kN]	11.3	16.1	17.6	29.4
$P_{max}$ [kN]	23.7	24.9	43.5	58.6
$E_{am}$ [kJ/kg]	22.7	32.8	6.9	11.8

$$E_a = \int_{l_0}^l P(l) dl \quad (1)$$

여기서,  $E_a$ 는 흡수에너지이며,  $P(l)$ 은 압괴하중을 나타낸다. 그리고 단위질량당 흡수에너지는 흡수에너지를 압괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 구하였고, 평균압괴하중은 흡수에너지를 압괴된 길이로 나누어 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

차량 사이드 구조부재로 CFRP재 및 강재 Single hat 단면 구조부재와 Double hat 단면 구조부재가 사용될 것을 상정하여 CFRP재 및 강재의 형상변화에 의한 압괴특성을 고찰하였다.

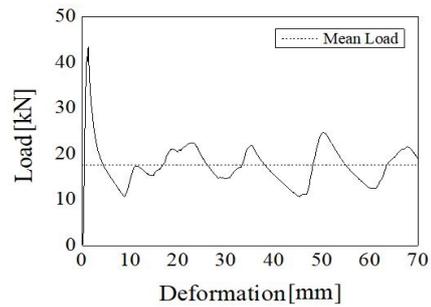
CFS, CFD, STS 그리고 STD 시험편의 압괴실험 결과를 Table 2에 나타냈다.

압괴실험 결과의 평균값으로 흡수에너지를  $E_a$  [J], 평균압괴하중  $P_m$  [kN], 최대압괴하중을  $P_{max}$  [kN], 단위 질량당의 흡수에너지를  $E_{am}$  [kJ/kg] 구하여 나타냈다. 흡수에너지는 CFRP재 및 강재 시험편 모두 60 mm까지 변형된 값으로 계산하였다.

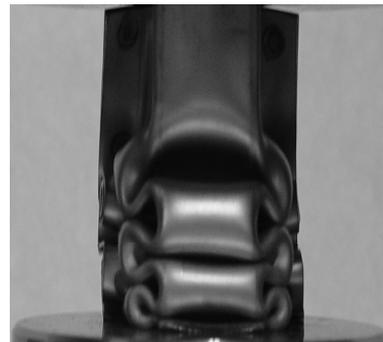
Fig. 11은 압괴실험에 의한 CFS, CFD 및 CTS, STD 시험편의 흡수에너지의 비교결과를 나타냈으며, Fig. 12는 CFS, CFD 및 CTS, STD 시험편의 평균압괴하중의 비교결과를 나타냈고, Fig. 13은 CFS, CFD 및 CTS, STD 시험편의 최대압괴하중의 비교결과를 나타냈다. 그리고 Fig. 14는 CFS, CFD 및 CTS, STD 시험편의 단위질량당의 흡수에너지의 비교결과를 나타냈다.

Table 2 및 Fig. 11로부터 흡수에너지는 CFD가 CFS보다 약 42% 높게 나타났으며, STD가 STS보다 약 67% 높게 나타났다. 즉, CFRP재나 강재 모두 Double hat 단면 구조부재가 Single hat 단면 구조부재 보다 크게 나타났으며, CFRP재 보다 강재가 크게 나타남을 알 수 있었다.

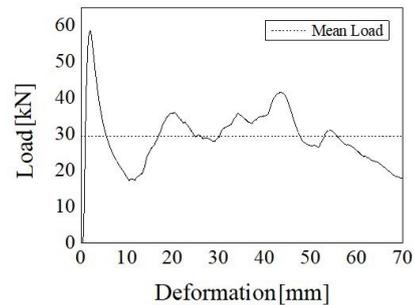
압괴모드측면에서 CFRP재 구조부재를 살펴보면, Fig. 4의 CFD는 Fig. 6의 CFS와 달리 채널형 구조부재와 평판 구조부재간의 편심에 의한 플랜지 부분에서 찢겨짐 현상이 발생하지 않고 모서리 4곳이 안정적으로 외부에너지를 흡수하면서 압괴되기 때문에



**Fig. 7 Load-displacement curve of STS specimen**



**Fig. 8 Shape of collapsed STS specimen**



**Fig. 9 Load-displacement curve of STD specimen**



**Fig. 10 Shape of collapsed STD specimen**

더욱 많은 에너지가 흡수되는 것으로 사료된다.

강재 구조부재의 경우는 모서리부재가 2개인 Fig. 8의 STS는 압괴시 최초에 생긴 최대 피크하중에 의해 최초의 접힘 현상이 생기

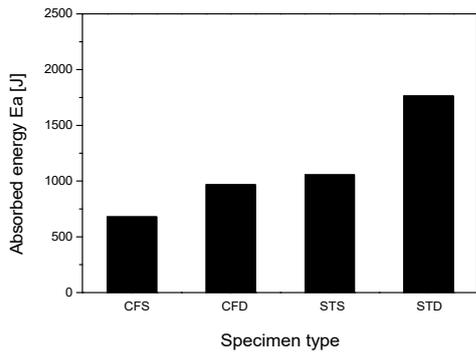


Fig. 11 Relationship between specimen type and absorbed energy

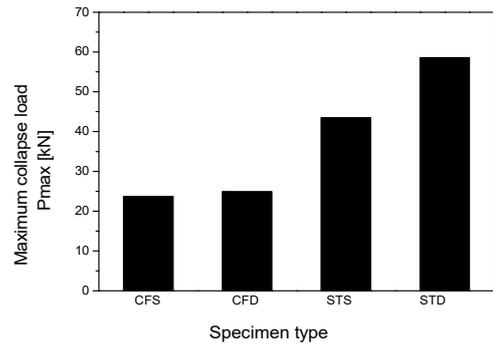


Fig. 13 Relationship between specimen type and maximum collapse load

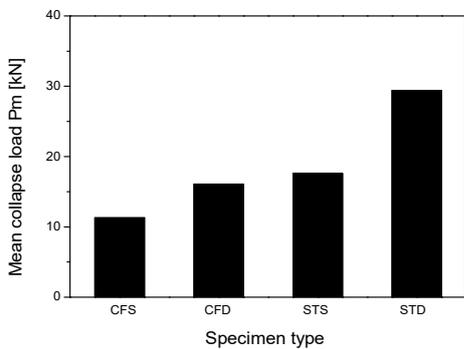


Fig. 12 Relationship between specimen type and mean collapse load

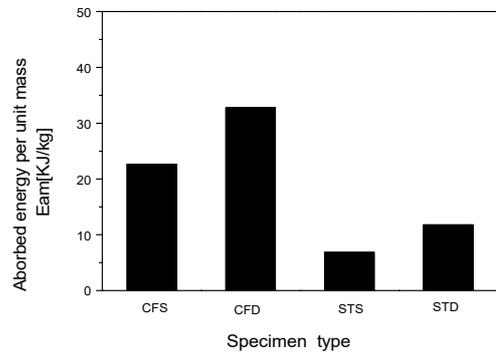


Fig. 14 Relationship between specimen type and absorbed energy per unit mass

고 순차적으로 생긴 피크하중마다 연속적인 접힘이 생기는 규칙적이고 안정적인 압괴모드가 나타났고, 모서리부가 4개인 Fig. 10의 STD는 단면이 서로 대칭이고 도심이 한 중앙에 있어 모서리부가 2개인 STS와 달리 축 압축하중을 받을 경우 채널형 구조부재보다 양쪽이 점 용접되어 있는 플랜지부가 가장 큰 축 압축하중을 받기 때문에 채널형 구조부재는 전후면 대칭으로 불안정한 대칭모드로 압괴되었다. 즉 모서리 수의 증가에 의해서 STD의 경우가 더욱 많은 에너지가 흡수되는 것으로 사료된다.

Fig. 12의 평균압괴하중은 Fig. 11의 흡수에너지와 유사하게 나타났다. 이는 흡수에너지의 크기를 압괴된 길이로 나누어 계산하기 때문이다.

Fig. 13의 최대 압괴하중은 CFS나 CFD 모두 최대 압괴하중은 거의 유사하게 나타났다. 이는 CFS 및 CFD의 압괴후의 압괴형상인 Fig. 4, Fig. 6으로부터 알 수 있다. CFRP재 구조부재는 압괴시 일정 공간은 원형대로 유지되지만 압괴되는 부분은 강재 구조부재에서와는 달리 순차적인 압괴가 아니라 취성재가 갖는 특성인 탄소섬유의 파단, 파쇄에 의한 붕괴 때문이라 생각된다. 즉, CFRP재 구조부재의 최대압괴하중은 단면의 형상에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 강재 구조부재에서는 최대압괴하중은 STD가 STS보다 약 34.7% 높게 나타났다.

Fig. 14의 단위질량당 흡수에너지는 CFD가 CFS보다 약 44.7% 높게 나타났으며, 강재 구조부재의 경우는 STD가 STS보다 약 71.5% 높게 나타났다.

이상으로부터 자동차 경량화 설계의 관점에서 연구결과를 고찰하면, 단위 질량당 흡수에너지는 CFD가 가장 높았으며 다음으로 CFS, STD, STS 순으로 낮게 나타났다. 결론적으로 자동차 경량화 설계의 관점에서 CFRP재 Double hat 단면 구조부재가 가장 우수함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

강재 및 CFRP재 Single hat 단면 구조부재와 Double hat 단면 구조부재를 축 압괴실험을 행하여 압괴특성에 관해 고찰한 결과 흡수에너지는 CFRP재 Double hat 단면 구조부재가 Single hat 단면 구조부재보다 약 42% 높게 나타났으며, 강재의 경우는 Double hat 단면 구조부재의 흡수에너지가 Single hat 단면 구조부재의 흡수에너지보다 약 67% 높았다. 즉, 흡수에너지가 CFRP재와 강재 모두 Double hat 단면 구조부재가 Single hat 단면 구조부재보다 높았다. 또한 평균압괴하중은 흡수에너지의 결과와 유사하였다.

CFRP재 구조부재의 최대 압궤하중은 Single hat 단면 구조부재와 Double hat 단면 구조부재가 거의 유사하게 나타났다. 그러나 강재에서는 최대압궤하중은 Double hat 단면 구조부재에서 Single hat 단면 구조부재보다 약 34.7% 높게 나타났다.

경량화차원의 단위 질량당 흡수에너지는 CFRP재의 경우 Double hat 단면 구조부재가 Single hat 단면 구조부재보다 약 44.7% 높게 나타났으며, 강재의 경우는 Single hat 단면 구조부재가 Double hat 단면 구조부재보다 약 71.5% 높았다. 이상으로부터 단위 질량당 흡수에너지는 CFRP재 Double hat 단면 구조부재가 가장 높았으며 CFRP재 Single hat 단면 구조부재, 강재 Double hat 단면 구조부재, 강재 Single hat 단면 구조부재 순으로 낮게 나타났다. 결론적으로 자동차 경량화 설계의 관점에서 CFRP재 Double hat 단면 구조부재가 가장 우수함을 알 수 있었다.

### References

[1] Lee, J., Kim, B., Chung, T., 2008, Automotive Body Design, Trans. Korean Soc. Mech. Tool Eng., 17:5 10-22.

[2] Cha, C. S., 2000, Evaluation of Impact Collapse Characteristics in Vehicle Members Having Thin-wall Section, Doctoral Dissertation, Chosun University, Republic of Korea.

[3] Editorial Department, 2012, Current Status and Forecast Report of Automotive Composite Materials, A&D Consultant, Republic of Korea.

[4] Hwang, W. C., 2012, Collision Evaluation of Safety Performance in CFRP Hat Shaped Member a Use of Car Body Structures, Doctoral Dissertation, Chosun University, Republic of Korea.

[5] Kim, H. S., Kim, J. H., 2019, Study on Collapse Characteristics in Composite Structural Member Consisting of Laminate Structures Using FEA, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf., 144.

[6] Hwang, W., Sim, J., Yang, I., 2011, A Study on the Collapse Characteristics of Al/CFRP Square Structural Member for Light Weight, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 20:3 219-224.

[7] Ahn, T., Lee, Y., Lee, S., 2020, A Study on Composite Materials Frame of Electric Vehicles using Impact Analysis, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 19:2 75-80, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.02.075>.

[8] Huh, H., Kim, K. P., Kim, S. H., Song, J. H., Kim, H. S., Hong, S. K., 2003, Crashworthiness Assessment of Front Side Members in an Auto-body Considering the Fabrication

Histories., Int. J. Mech. Sci., 45:10 1645-1660, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2003.09.022>.

[9] Kim, K., Song, J., Huh, H., Kim, H., Hong, S., 2004, Crashworthiness of an Auto-body Member with the Forming Effect, Trans. Korean Soc. Automot. Eng., 12:1 91-98.

[10] White, M. D., Jones, N., 1999, Experimental Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections, Int. J. Mech. Sci., 41:2 179-208, [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00047-2).

[11] White, M. D., Jones, N., Abramowicz, W., 1999, A Theoretical Analysis for the Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections, Int. J. Mech. Sci., 41:2 209-233, [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00048-4).

[12] Go, D. S., Kim, H. S., Park, C. J., Kim, J. H., 2017, Evaluation of Strength Characteristics of Circular Member of CFRP with Same Number of Interface according in Variation of Orientation Angle, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf., 225.

[13] Toshniwal, S. S., Prakash, R. V., 2020, Energy Absorption Characteristics of Single and Double-Walled Square Tubes Subjected to Axial Crushing, Adv. Mech. Eng. Summer Conf., 361-369, [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3639-7\\_42](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3639-7_42).

[14] Kwak, Y. H., 2021, Influence of Collapse Characteristics on Change in Section Shapes and Materials of Vehicle Structural Member, Master Thesis, Chosun University, Republic of Korea.

[15] Park, J. W., 2008, A Study on the Crashworthiness Capacity of Vehicle side Member, Master Thesis, Chosun University, Republic of Korea.

	<p><b>Young-Hwan Kwak</b>                  Master in the Department of Mechanical System Engineering, Chosun University.                  His research interest is Machine.                  E-mail: <a href="mailto:scs@i-scs.com">scs@i-scs.com</a></p>
	<p><b>Cheon-Seok Cha</b>                  Professor in the Department of Fire Safety, Donggang University.                  His research interest is Machine.                  E-mail: <a href="mailto:cha7170@donggang.ac.kr">cha7170@donggang.ac.kr</a></p>