

적층구성이 CFRP 사이드 부재의 충돌안전성에 미치는 영향

황우채 · 양인영*

조선대학교 기계설계공학과 · *조선대학교 기계시스템공학과
(2014. 2. 7. 접수 / 2014. 5. 16 채택)

Influence of Stacking Condition on Collision Safety of CFRP Side Member

Woo Chae Hwang · In Young Yang^{†*}

Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University

^{*}Department of Mechanical System Engineering, Chosun University

(Received February 7, 2014 / Accepted May 16, 2014)

Abstract : The global demand for reduction in the weight of automobiles has led many countries to focus on the development of hybrid, eco-friendly, and electric cars. Reduction in the weight of materials can both increase fuel efficiency and maximize automobile performance. Therefore, the design of automobile should be inclined towards the safety aspects. but at the same time, it also consider reducing the structural weight of an automobile. In this study, CFRP side members with circular and double hat shaped section was manufactured. The impact collapse tests performed with change of the stacking condition, such as variation of interface number and outerlayer angle. The impact collapse load and absorbed energy were quantitatively analyzed according to the changes in section shapes and stacking condition. This analysis was performed to obtain design data that can be applied in the development of optimum lightweight members for automobiles.

Key Words : CFRP, collision safety, impact collapse, interface number, stacking condition

1. 서론

연비향상을 위한 자동차의 경량화 방안으로는 차체 및 자동차 부품에 기존의 소재를 고장력강판, 알루미늄, 플라스틱 등으로 대체를 고려할 수 있고 안정성 향상의 방안으로는 차량 내의 구조강화, 내 충격 에너지 흡수 구조재료의 대체 등으로 요약할 수 있다¹⁻²⁾.

자동차 충돌시 외부로부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 승객의 안전 보호 공간의 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 최종적으로 승객 상해정도와 직결되는 최대가속도 크기를 최소화시킬 수 있는 안정된 축방향 접합 좌굴 모드를 유도하려는 설계의 개념이 차체 구조부재 설계에 이용되고 있다³⁻⁴⁾. 이러한 역할을 하는 것이 프런트 사이드 멤버로서 정면 충돌시 충돌에너지의 50~70%를 흡수하며 단면형상은 약 0.8~1.2mm의 모자

형 또는 박판 사각 및 원형 빔 형상을 가지고 있다.

따라서 자동차의 경량화 문제도 차량 설계 시 승객의 안전성이 확보된 상태에서 차량의 무게를 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다.

자동차 경량화를 위한 수많은 재료 중 섬유강화복합재료(FRP)는 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 우수하고 특히 설계요건에 따라 적층배향을 적절히 선정할 수 있는 유용성 때문에 경량화 및 고강도가 요구되는 자동차, 항공기 및 우주비행체의 구조물에 널리 응용되고 있다. 최근에는 높은 비강성과 비강도 및 낮은 열팽창률 등의 우수한 성질을 갖는 섬유강화 복합재료의 사용이 급격히 확산되고 있으며 금속재료에 비해서 상당한 중량감소 효과를 얻을 수 있는 Graphite, Carbon, Glass등과 같은 복합재료는 금속재료를 대체해 나가는 추세이다⁵⁻⁷⁾.

차량의 설계개발이란 상품으로써의 요건을 만족하면서 충돌 시에 승객을 보호하는 성능을 갖춰야 한다.

[†] Corresponding Author : In Young Yang, Tel : +82-62-230-7840, E-mail : iyyang@chosun.ac.kr
Department of Mechanical System Engineering, Chosun University, 375, Seosuk-dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea

이러한 성능을 충돌안전성능이라 하는데, 자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 70% 정도로서 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다⁸⁻¹⁰⁾.

하지만, 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압괴거동과 에너지 흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 구조부재가 경량화 자동차의 사이드부재로 사용될 것을 상정하여 이중 모자형 및 원형단면 CFRP 부재를 적층구성을 달리하여 성형 제작한후 충격압괴 실험을 행했다. 또한 계면수의 변화 및 최외층각의 변화에 따른 이중 모자형 및 원형단면 CFRP 부재의 충격압괴하중, 흡수에너지 등을 정량적으로 파악하여 경량화 자동차 설계 시 충돌안전성능을 평가할 수 있는 기초 설계 자료를 얻고자 하였다.

2. 시험편

본 연구에서는 첨단소재인 CFRP구조부재가 향후 자동차의 축압축 부재로 사용될 것을 상정하여 구조부재의 기본 형상인 원형단면 CFRP 부재와 이중 모자형단면 CFRP 부재를 시험편으로 사용하였다.

CFRP 프리프레그 시트는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 이용 하였으며, 원형단면 CFRP 부재 및 이중모자형단면 CFRP 부재는 원형 및 사각 알루미늄 부재에 CFRP 프리프레그 시트를 적층한 후 오토클레이브(Autoclave) 성형으로 하였고 제작한 후 알루미늄 파이프를 제거하였다. 적층구성이 다른 원형·이중 모자형단면 CFRP구조부재의 충격특성을 고찰하기 위하여 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 또한, 최외각층 적층각을 0°와 90°로 변화 시켰고, 계면수는 2,3,4,6,7계면으로 시험편을 제작 하였다. 제작된 원형단면CFRP 부재 및 이중 모자형단면 CFRP 부재의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 원형부재는 외경이 38mm인 원형 단면이며, 이중 모자형 CFRP 단면부재는 텡핑(tapping)된 맨드릴(mandrel)에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 성형했고 실제 자동차 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 2개의 “ㄷ”자 단면부재를 결합하여 제작하였다.

시험편의 성형은 오토클레이브성형법을 이용하여

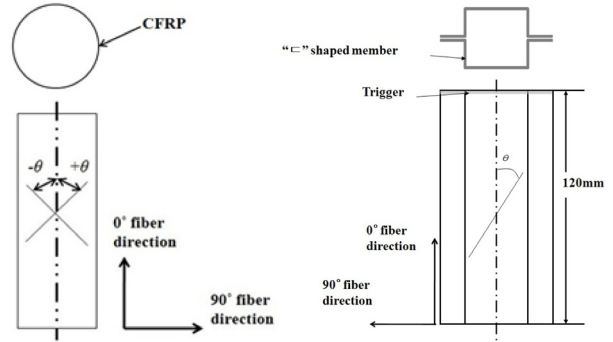


Fig. 1. Configuration of CFRP member

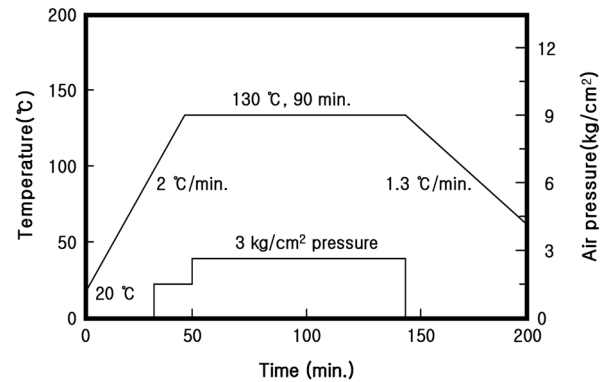


Fig. 2. Curing cycle of CFRP stacking specimen

챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10⁻¹ Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵ Pa 정도 가압시켜 제작하였다.

시험편 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였으며 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않을 충분한 길이인 120mm로 하였다.

3. 충격실험

충격압괴실험시 편심하중이 작용하지 않도록 성형된 시험편을 연마가공 하여 시험편의 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과 재현성이 좋도록 하였다. 충격압괴실험은 실험실에서 자체 설계 제작한 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 3에 나타냈으며, Fig. 4는 실험장치의 계측시스템의 구성도를 나타냈다.

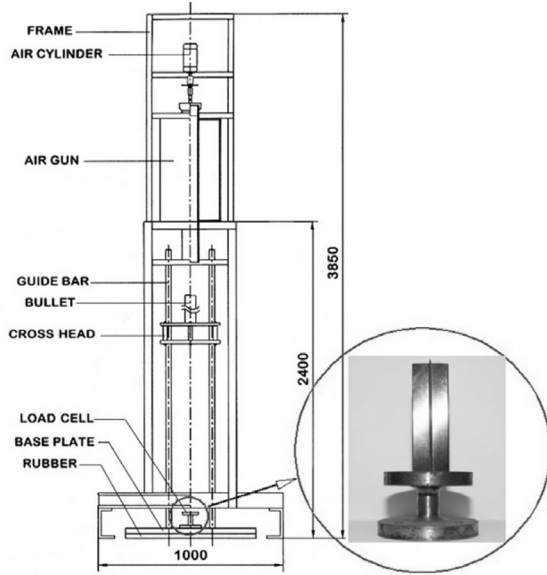


Fig. 3. Impact testing setup for crushing

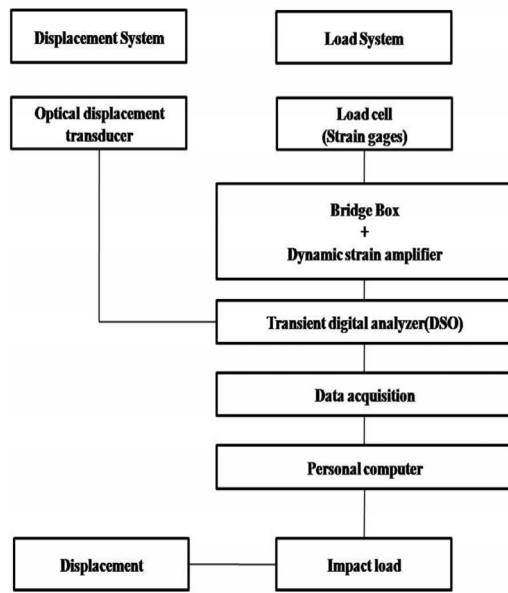


Fig. 4. Diagram of measurement system

시험기는 공기압 가속장치인 에어건과 에어실린더, 시험편에 직접적인 충격을 가하는 크로스헤드, 충격하중을 계측할 수 있는 로드셀 및 가이드 바, 베이스 플레이트, 방진고무, 프레임 등으로 구성되어있다. 특히, 가이드 바를 4개로 구성하고 크로스헤드를 2층 구조로 제작하여 크로스헤드가 시험편에 편심되어 충격이 가해지는 것을 방지하였으며, 재현성 있는 충격압궤실험을 할 수 있도록 하였다. 또한, 로드셀은 2개의 원판을 원주로 연결한 형태로서 연강환봉을 절삭하여 제작하였으며, 위쪽 원판 위에 시험편을 위치시키고, 아래쪽

원판에 3개의 볼트구멍을 만들어 베이스 플레이트에 고정하였다. 시험편에 작용하는 충격하중의 계산은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 스트레인게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 중심축을 중심으로 각각 축 방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여 굽힘과 비틀림의 영향을 제거하여 구하였으며, 스트레인게이지의 저항변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다. 충돌 시에 나타나는 스트레인게이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스(Bridge circuits)와 동적변형증폭기(Dynamic strain amplifier)를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO(Digital Storage Oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다.

시험편의 압궤 시간변화 즉, 변위의 측정은 압궤가 진행하고 있는 사이 시험편의 변위량과 크로스헤드의 이동량이 일치한다고 보고 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식 변위계(Zimmer OHG사, 100F)로 비접촉 계측하여 변위 데이터를 구하였다. 광학식 변위계는 광학렌즈를 이용하여 렌즈 측정범위 내에 있는 표적의 백색부와 흑색부의 경계선(edge)의 이동량을 전압변화로 측정하는 것이며, 렌즈의 교환에 따라 측정범위를 달리할 수 있다. 여기서는 초점거리가 1080 mm이며 최대 100 mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다.

충격압궤실험시 각각의 원형단면 CFRP 부재 시험편, 이중 모자형단면 CFRP 부재 시험편의 충격저항 능력을 고려하여 충격에너지의 크기를 611J로 결정하였다.

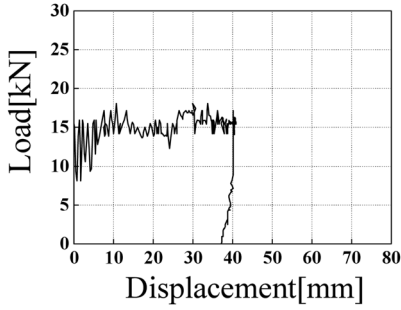
충격압궤실험의 시험편은 시험편과 계면수마다 3~4회 정도의 충격실험을 행하여 실험결과의 재현성을 높였다.

Fig. 5에 충격 압궤실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 이중 모자형단면 CFRP 부재의 하중-변위선도 및 압궤형상을 나타냈고 선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_0^{\delta} Pds \tag{1}$$

여기서 E_a 는 흡수에너지, P 는 압궤하중, S 는 압궤과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 고찰하였다.



(a) Load-displacement



(b) Shape of collapse

Fig. 5. Experimental result of CFRP double hat shaped member, [90° / 0°]_{2s}(Impact energy 611J, 6 interface number).

4. 결과 및 고찰

4.1. 충격압괴특성

이중 모자형단면 CFRP 부재가 차량 사이드 부재로 사용될 것을 상정하여 제작한 CFRP 부재에 충격 압괴 실험을 행하여 CFRP 부재의 충격특성을 평가하였다. 또한, CFRP 박육 구조부재의 가장 기본형상인 원형단면 CFRP 부재와 비교 고찰하여 향후 CFRP 부재가 경량화 자동차의 사이드부재로 적용 가능한 설계 데이터를 얻고자 하였다. 평균 압괴하중(P_m [kN])은 충격압괴 실험으로부터 얻은 하중이력과 변위이력에서 시간을 소거하여 얻은 Fig. 5(a)의 P-W 선도의 각각 위치에서 피크부의 크기를 합하여 피크수를 나누는 방법으로 구했으며 흡수에너지(E_a [J])는 Fig. 5(a)의 P-W 선도의 면적을 나타낸다.

Fig. 6과 7에 최외층각이 각각 0°, 90° 인 원형단면과 이중 모자형 CFRP 부재시험편을 충격에너지의 크기 611J 로 충격을 가했을 때의 계면수의 변화에 따른 평균 압괴하중의 변화 관계를 나타냈다.

Fig. 6은 최외층각이 0°일 때 이중 모자형단면 CFRP 부재는 6 계면 까지는 계면수가 증가할수록 평균압괴 하중이 증가하지만 원형단면 CFRP 부재의 경우는 평균압괴하중이 계면수에 별로 관계가 없었다. Fig. 7은

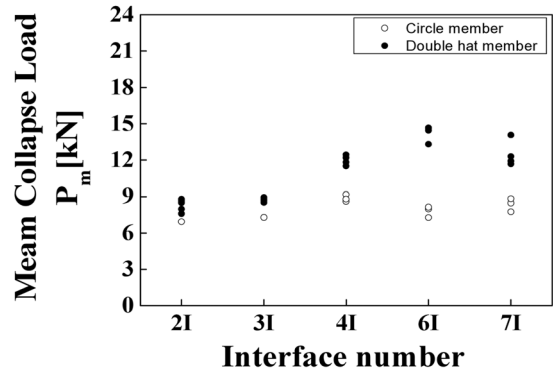


Fig. 6. Relationship between interface number and mean collapse load for circle and double hat shaped CFRP member(Outerlayer 0°, Impact Energy 611J).

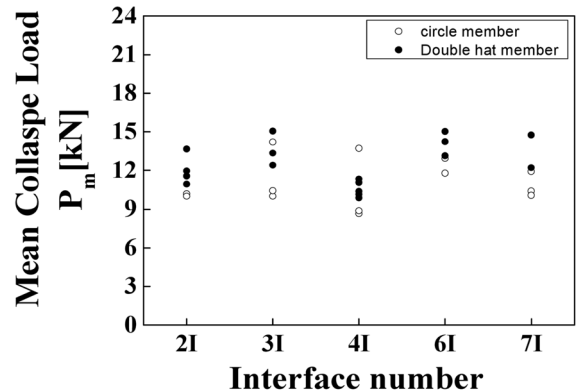


Fig. 7. Relationship between interface number and mean collapse load for circle and double hat shaped CFRP member(Outerlayer 90°, Impact Energy 611J).

최외층각이 90° 일 때 계면수의 변화에 따른 평균 압괴하중과의 관계를 나타냈다. 원형단면과 이중 모자형 단면 CFRP 부재 모두 4계면일 때를 제외하고 평균압괴하중의 크기는 계면수에 크게 영향을 미치지 않았다. 따라서 최외층각이 90° 인 경우가 최외층각이 0° 인 경우보다 압괴하중의 크기가 안정적임을 알 수 있었다.

또한, Fig. 8과 9에 최외층각이 각각 0°, 90° 인 원형 단면과 이중 모자형단면 CFRP 부재 시험편을 충격에너지의 크기 611J 로 충격을 가했을 때의 계면수의 변화에 따른 흡수에너지의 변화 관계를 나타냈다.

Fig. 8은 최외층각이 0° 일 때 계면수의 변화에 따른 흡수에너지와의 관계를 나타냈다. 이중 모자형단면 CFRP 부재의 경우 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 안정적으로 증가하였으나 원형단면 CFRP 부재의 경우는 6계면의 경우 흡수에너지가 크게 나타났다. 이는 충격실험후 압괴길이가 2계면의 경우 60.2mm 이나 6계면의 경우가 72.3mm로서 6계면의 경우가 압괴가 많이 되므로 흡수에너지 또한 크게 나타난 것으로 사

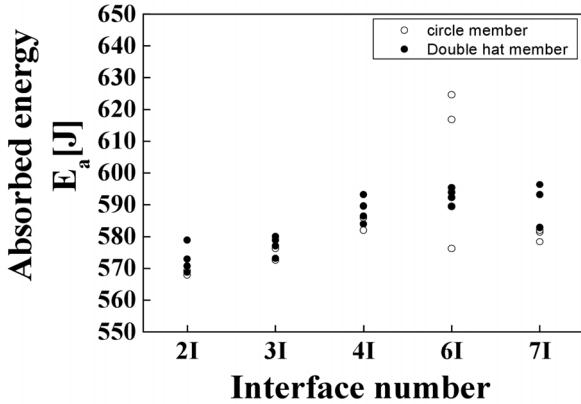


Fig. 8. Relationship between interface number and mean collapse load for circle and double hat shaped CFRP member(Outerlayer 0°, Impact Energy 611J).

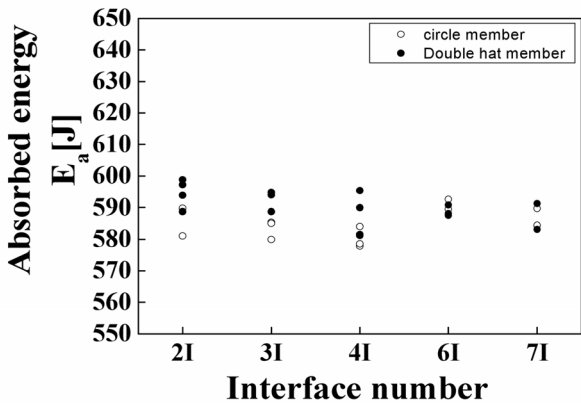


Fig. 9. Relationship between interface number and mean collapse load for circle and double hat shaped CFRP member(Outerlayer 90°, Impact Energy 611J).

료된다.

Fig. 9은 최외층각이 90° 일 때 계면수의 변화에 따른 흡수에너지와의 관계를 나타냈으며 Fig. 7과 비교해보면 최외층각이 90° 일 때가 최외층각이 0° 일 때 보다 흡수에너지가 크게 나타났으며 계면수에 크게 좌우되지 않고 안정적 이었다.

5. 결론

본 연구에서는 CFRP 구조부재가 경량화 자동차의 사이드부재로 사용될 것을 상정하여 이중 모자형 및 원형단면 CFRP 부재를 계면수의 변화 및 최외층각을 변화시켜 성형 제작한 후 충격압괴 실험을 행했다. 실험결과 계면수의 차 및 최외층각의 변화에 따른 이중 모자형 및 원형단면 CFRP 부재의 충격압괴하중, 흡수 에너지 등을 정량적으로 파악하여 경량화 자동차 설계 시 충돌안전성능을 평가할 수 있는 기초 설계 자료를

얻고자 하였다. 연구결과는 다음과 같다.

1) 최외층각이 0° 일 때 이중 모자형단면 CFRP 부재는 계면수가 증가할수록 평균압괴하중이 증가하지만 원형단면 CFRP 부재의 경우는 평균압괴하중이 계면수에 별로 관계가 없었다.

2) 최외층각이 90° 일 때 원형 및 이중 모자형단면 CFRP 부재 모두 4계면일 때를 제외하고 평균압괴하중의 크기는 계면수에 크게 영향을 미치지 않았으며 최외층각이 90° 인 경우가 최외층각이 0°인 경우보다 압괴하중의 크기가 안정적임을 알 수 있었으며, 최외층각이 90°인 원형 및 이중 모자형단면 CFRP 부재의 4계면이 다른 계면에 비해 평균압괴하중이 낮은 이유를 알아보기 위해서는 추가실험이 필요하다고 사료된다.

3) 최외층각이 0° 일 때 이중 모자형단면 CFRP 부재의 경우 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 안정적으로 증가하였으나 원형단면 CFRP 부재의 경우는 6계면의 경우 흡수에너지가 크게 나타났다. 이는 충격실험 후 압괴길이가 2계면의 경우 60.2mm 이나 6계면의 경우가 72.3mm로서 6계면의 경우가 압괴가 많이 되므로 흡수에너지 또한 크게 나타난 것으로 사료된다.

4) 이중 모자형단면 CFRP 부재의 경우 최외층각이 90° 일 때가 최외층각이 0°일 때 보다 흡수에너지, 압괴하중의 크기가 크게 나타났으며 계면수에 크게 좌우되지 않고 안정적이었다. 즉, 이중 모자형 CFRP 부재가 원형단면 CFRP 부재보다 더 안정적이며 우수한 충돌안전성능을 갖고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글: “이 논문은 2014학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.”

References

- 1) D. G. Lee, and P. K. Oh, “Design and Manufacturing of Composite Automotive Parts.” Journal of KSAE, 16:2 45-54, 1994.
- 2) F. Adams. Donald, “Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes“ Technomic Publishing Company, 1990.
- 3) Y. N. Kim, “Axial Collapse Characteristics of CFRP Composite Thin-wall Structures for Light Weight of Vehicles.” Doctorate Thesis, Chosun University, 2002.
- 4) A. G. Mamilis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous and W. Johnson, “Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating Systems.” International Journal of Impact Engineering, Vol.11, pp.185-196, 1991.

- 5) V. M. Karbhari, "Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes." J. Composite Materials, Vol.31, pp.1164-1186, 1997.
- 6) J. R. Vinson, "The Behavior of Shells Composed of Isotropic and Composite Materials", Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-2113-8, 1993.
- 7) S. K. Kim, J. K. Sim and I. Y. Yang, "An Energy Absorption Characteristics of Thin-walled Structure Members by Crushing Load" Transactions of the KSAE, Vol. 3, pp.74-81, 1995.
- 8) K. S. Lee, "Evaluation of the Crashworthiness for Impact Energy Absorbing Lightweight Vehicle Members." Doctorate Thesis, Chosun University, 2008.
- 9) M. D. White and N. Jones, "Experimental Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections." Int. J. Mech. Sci, Vol. 41, pp. 179-208, 1999.
- 10) C. S. Cha, J. O. Chung, J. W. Park, Y. N. Kim and I. Y. Yang, "Collapse Analysis of Spot Welded thin Section Members in a Vehicle Body Structure at Various Impact Velocities" KSME International Journal, Vol.17, No. 4, pp. 501-510, 2003.