

복합적층 구조부재의 계면수 변화에 따른 에너지흡수특성

황우채*, 이길성⁺, 차천석⁺⁺, 정종안⁺⁺⁺, 한길영⁺⁺⁺⁺, 양인영⁺⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2010. 5. 10, 심사완료일 2010. 11. 5)

Energy Absorption Characteristics of Composite Laminated Structural Member According to the Interface Number

Woochae Hwang*, Kilsung Lee⁺, Cheonseok Cha⁺⁺, Jongan Jung⁺⁺⁺, Gilyoung Han⁺⁺⁺⁺, Inyoung Yang⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract

Ultimate goals in vehicle design can be summarized as environment-friendliness and safety. Along with these requirements, the importance of natural environment conservation has been focused lately. Therefore, reduced emission from vehicle and improved efficiency has become the top priority projects throughout the world. CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) of the advanced composite materials as structure materials for vehicles, has a widely application in lightweight structural materials of air planes, ships and automobiles because of high strength and stiffness. This study is to investigate the energy absorption characteristics of CFRP hat-shaped section members under the axial impact collapse test. The CFRP hat-shaped section members which manufactured from unidirectional prepreg sheets were made of 8plies. The axial impact collapse tests were carried out for each section members. The collapse mode and energy absorption characteristics were analyzed for CFRP hat-shaped section member according to the interface numbers(2, 3, 4, 6 and 7)

Key Words : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), Collapse mode(압궤모드), Energy absorption(에너지흡수), Impact collapse(충격압궤), Interface number(계면수), Hat-shaped section(모자형단면부재)

1. 서론

차량은 전자화, 고급화, 안전화 등에 대한 수요자들의 다양한 요구로 인하여 차량의 부품 및 기타 부대장비가 늘어나는 반면, 차량의 중량은 지속적으로 증가하는 추세이다. 이와 더불어 지구환경에 대한 중요성 또한 점점 부각되면서 차량 배기

가스 규제 강화에 대비하여 연비 개선이 절실히 요구되고 있다. 연비향상을 위한 경량화 방안으로는 차체 및 자동차 부품에 기존의 소재를 고 장력강판, 알루미늄, 플라스틱 등으로 대체를 고려할 수 있고 안정성 향상의 방안으로는 안전벨트 착용, 에어백 장착, 차량 내의 구조강화, 내 충격 에너지흡수 구조재료의 대체 등으로 요약할 수 있다⁽¹⁾. 또한, 환경 보호적

* 조선대학교 첨단부품소재공학과
+ (주)테크 기술연구소
++ 동강대학 소방안전관리과
+++ 송원대학 자동차과
++++ 조선대학교 기계공학과
+++++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (iyyang@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동

측면에서 심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있는 실정이며 우리나라에서도 저공해 자동차 배기 규제를 더욱 강화하고 있다. 이러한 환경 보호 관련 자동차 기술개발의 동향은 무공해자동차, 전기자동차에 대한 연구와 함께 기존 자동차의 연비향상뿐 아니라 차체 수명연장, 배기가스의 정화, 소음방지, 그리고 자원재활용을 위한 리사이클링 등을 위한 폭넓은 연구개발 투자가 이루어지고 있으며, 이를 위한 방법으로 엔진효율향상, 공기저항감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 소재의 경량화 등을 들 수 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다⁽²⁾. 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속 되고 있으며, 새로운 재료가 계속적으로 발명되고 있다. 구조물과 기계기구 등의 제작에 이용되고 있는 재료는 다양 하지만, 이들 중에서 복합재료의 응용분야가 급속히 진보하고 있다. 현재 우리가 사용하는 재료는 그 사용 조건이 가혹해지고, 복잡화 되는 동시에 매우 다종다양하다. 이 같은 요구를 가능한 많이 만족시키는 것은 단독의 재료로는 매우 곤란하다는 사실은 말할 필요가 없으며, 각각의 요구조건에 맞는 적합한 재료를 이용함으로써 구조물 및 기계기구의 안정성 향상 및 효율증대를 꾀할 수 있을 것이다⁽³⁻⁶⁾. 차체 구조의 경량화를 위한 연구는 최적 구조설계 기술과 재료 및 소재개발 기술이라는 두 가지 측면으로 추진되고 있다. 복잡한 형상을 가지고 있는 차체 구조의 최적설계를 위한 강성 해석이나 충돌해석 등을 위해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며⁽⁷⁻⁹⁾, 경량재료의 개발을 통한 차체 중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비개선 방안으로 평가되고 있어 기존의 철강부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾. 따라서 이러한 경량화용 구조부재의 충돌안전성능 평가에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

차량의 설계 단계에서는 차량전체의 전면 충돌을 예측하기 전에 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지흡수가 크고, 간단한 구조부재에 대해서 압괴거동과 에너지흡수특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 경량화 물질인 CFRP를 사용하여 시험편을 제작하였다. CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변하는 이방성 재료이기 때문에 적층조건을 변경하여 모자형 단면부재의 압괴특성과 에너지흡수 특성을 비교분석 및 고찰하였다.

2. 시험편

자동차 전면 충돌시 가장 많은 에너지를 흡수하는 차량 전면

부 사이드부재는 두께 1.22~1.8mm 고장력 강판의 “ㄷ”자형과 평판을 접합한 것으로서 폭 = (100~140) × (50~100)mm, 길이 = (500~700)가 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 실제 전면부 사이드부재의 1/4크기인 폭 = 30 × 30mm, 플랜지 길이 = 12mm로 “ㄷ”자형과 평판부재가 결합된 CFRP 모자형 단면부재를 제작하였다.

CFRP 모자형 단면부재는 CFRP 프리프레그시트(한국화이버, CU125NS, Carbon fiber unidirection 125g/m²)를 사용하여 오토클레이브에서 진공 압축 성형하여 제작하였다. Table 1은 시험편에 사용된 재료의 물성치를 나타내었고, Fig. 1은 시험편의 형상을 나타내었다.

CFRP 모자형 단면부재의 에너지흡수는 적층조건에 따라 영향을 받기 때문에 계면(CFRP를 적층할 때 각도가 변화함에 따라 생기는)면수 변화에 따른 에너지흡수특성을 비교 고찰하고자 계면수(2, 3, 4, 6, 7)를 변화시켜 성형 하였다. 또한 최 외층 각도 변화에 따른 에너지흡수특성을 비교 고찰하였다.

CFRP의 가장 취약한 문제점은 취성문제이며, 압괴초기에 최대하중이후 급격한 파괴가 진행되어 하중이 급격히 떨어지게 되고, 이로 인해 층간 및 층내 크랙이 성장하게 되어 초기 압괴하중 이후 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 한쪽 끝단에 Initiator 또는 트리거를 주어 순차적으로 압괴를 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 한다^(15,16). 본 연구에서는 하중이 작용하는 부분에 45°로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet

	Fiber (Carbon)	Resin(Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density[kg/m ³]	1.83×10 ³	1.24×10 ³	—
Poisson's	—	—	0.3
Young's modulus[GPa]	240	3.60	132.7
Tensile[GPa]	4.89	0.08	0.3
Resin content[%Wt]	—	—	33

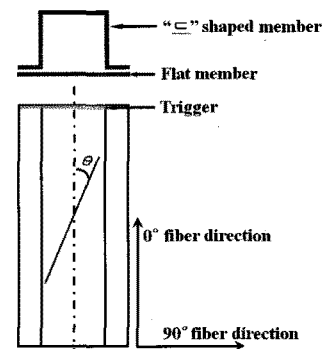


Fig. 1 Configuration of CFRP Hat-shaped section member

제작하였다. 또한 시험편의 길이는 120mm로 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다.

3. 압괴실험

충격 압괴 실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였고, 시험기는 공기압 가속장치인 에어건과 에어실린더, 시험편에 직접적인 충격을 가하는 크로스헤드, 충격하중을 계측할 수 있는 로드셀 및 가이드 바, 베이스 플레이트, 방진고무 및 프레임 등으로 구성되어 있고, 충격실험기의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 가이드 바를 4개로 구성하고 크로스헤드를 2층 구조(위쪽 판의 두께 18 mm, 아래쪽 판의 두께 23 mm, 측면 길이 320 mm)로 제작하여 크로스헤드가 시험편에 편심 되어 충격이 가해지는 것을 방지하였다. 여기서 크로스헤드의 무게는 40kgf 이다.

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-5-120-1-11LIM2R)를 중심축을 중심으로 각각 축 방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여 굽힘과 비틀림의 영향을 제거 하였다. 충돌시에 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 사용하여 측정하였다. 시험편의 변위 측정은 압괴가 진행되

고 있는 사이 시험편의 변위량과 크로스헤드의 이동량이 일치한다고 보고 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식변위계(Zimmer OHG사, 100f)로 비접촉 계측하여 변위 데이터를 구하였다. 여기서 사용된 광학식변위계는 광학렌즈를 사용하여 렌즈 측정범위 내에 있는 표적의 백색부와 측색부의 경계선(edge)의 이동량을 전압 변화로 측정하는 것이다. 그리고 시험편에 가해진 충격에너지는 419.44J이다.

충격압괴실험은 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위 내에서 자유낙하를 하였다. 또한 각 시험편에 대하여 4-5회의 충격압괴실험을 행하였고, 압괴과정에서 시간에 대한 하중 및 변위를 측정하였다. 측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격압괴가 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 구하였으며 흡수에너지 E_a , 전체흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ_f 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다.

그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴 길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압괴되었다고 가정하여 식 (1)과 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압괴율의 역수를 사용하여⁽¹⁷⁾ 식 (2)를 이용하여 총 흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (1)$$

여기서, ρ_0 는 압괴효율, L 은 시험편의 길이, δ_f 는 충격압괴 실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (2)$$

여기서, E_T 는 총 흡수에너지, E_a 는 흡수에너지 이다.

Fig. 3은 최 외층 각도가 0°와 90°인 CFRP 모자형 단면부재

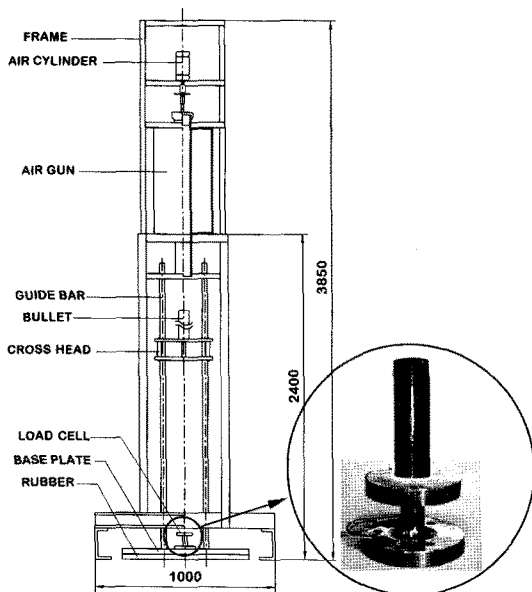


Fig. 2 Impact testing device set up

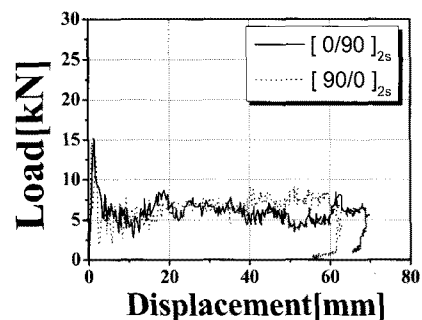


Fig. 3 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped section members([0/90]_{2s}, [90/0]_{2s})

의 하중-변위 선도를 나타내고 있다. 또한 압괴실험후의 결과 값을 Table 2에 나타내었다.

3.1 압괴모드

본 연구에서는 CFRP 모자형 단면부재의 계면수(2, 3, 4, 6, 7)변화와 최 외층 각도(0°, 90°)의 변화에 따라 충격압괴실험을 행하였다. Photo. 1과 Photo. 2는 충격실험후 시험편의 압괴 형상을 나타내고 있다.

최 외층 각도가 0°인 CFRP 모자형 단면부재의 압괴모드는 거의 모든 시험편에서 평판부재는 외측으로 확장되는 압괴모드를 보였고, “ㄷ”형 부재는 외측의 0°는 외측으로 확장되면서 내부의 90°는 파단 되는 압괴의 형태를 보였다.

Table 2 Impact collapse test results for CFRP hat-shaped section members

specimen	L (mm)	δ_f (mm)	E_a (J)	E_T (J)
2계면-0°	120	78.16	419.44	647.86
3계면-0°	120	76.88	419.44	663.42
4계면-0°	120	67.02	419.44	757.11
6계면-0°	120	65.83	419.44	767.66
7계면-0°	120	69.56	419.44	728.11
2계면-90°	120	75.36	419.44	671.66
3계면-90°	120	75.63	419.44	670.39
4계면-90°	120	74.66	419.44	676.27
6계면-90°	120	60.01	419.44	847.05
7계면-90°	120	74.02	419.44	679.04

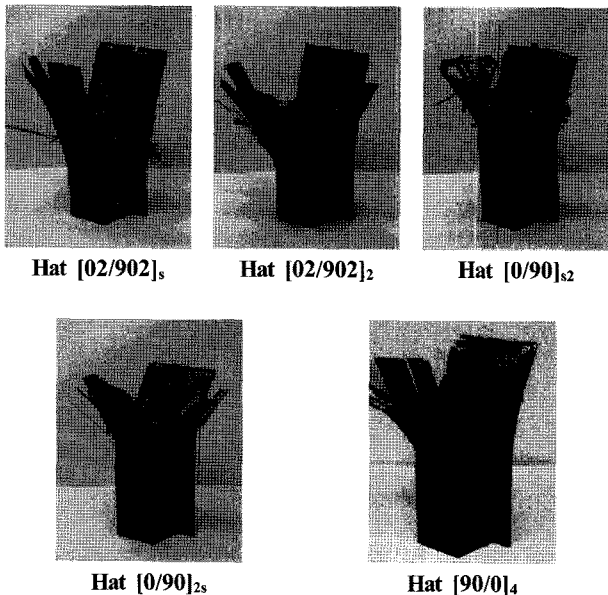


Photo. 1 Collapse modes CFRP hat-shaped section members after impact test(outer angle 0°)

최 외층 각도가 90°인 CFRP 모자형 단면부재의 압괴모드는 평판부재는 최 외층 각도가 0°인 부재와 비슷한 압괴모드를 보였다. 하지만 “ㄷ”형 부재는 외측의 90°방향의 CFRP가 내측의 0°를 외측으로 확장되지 못하도록 하면서 함께 파단 되었다.

3.2 에너지흡수 특성

Fig. 5는 계면수 변화와 최 외층 각도에 따른 시험편의 총 흡수에너지를 보여주고 있다. Fig. 5(a)를 보면 알 수 있듯이 최 외층 각이 0°일 때 계면수가 증가 할수록 총 흡수에너지는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 하지만 7계면에서는 총에너지 흡수가 감소하고 있다. Fig. 4에서 보면 알 수 있듯이 CFRP의 주요 에너지흡수 메커니즘은 크랙 진전이며, 크랙은 크게 층간 크랙(interlaminar crack)과 층내크랙(intralaminar crack) 및 중심크랙(central crack)으로 나눌 수 있다⁽¹⁸⁾. 따라서 계면수가 증가한다는 의미는 층간크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가한다는 의미이다. 이로 인해서 평균압괴응력은 증가하게

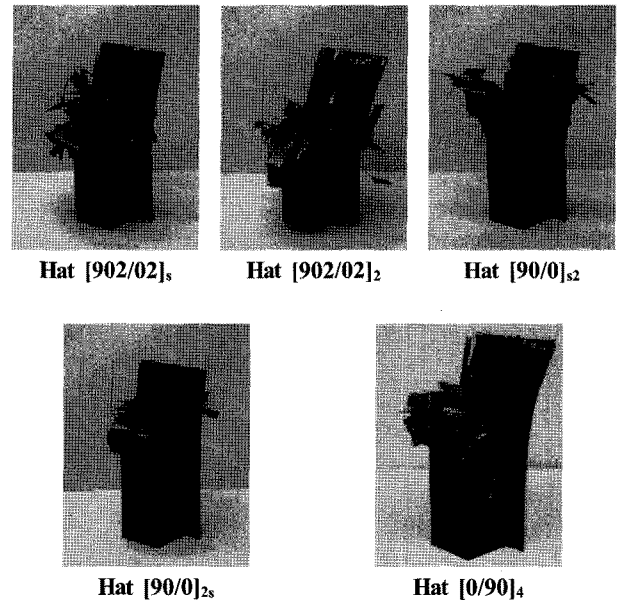


Photo. 2 Collapse modes CFRP hat-shaped section members after impact test(outer angle 90°)

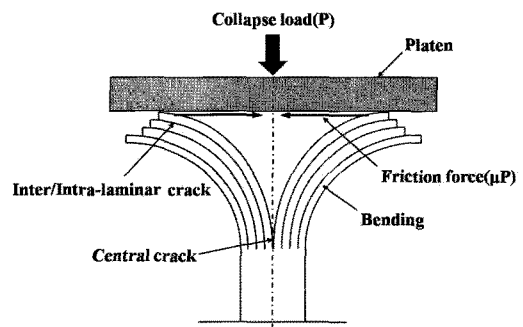
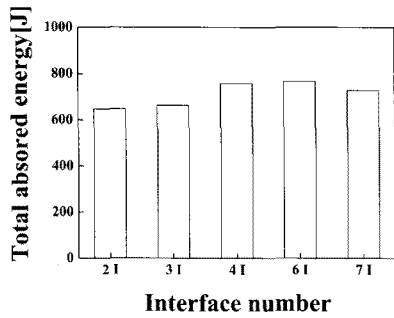
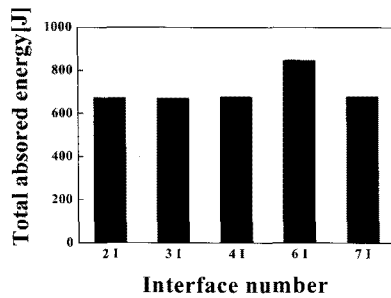


Fig. 4 Actual collapse pattern⁽¹⁸⁾



(a) outer angle 0°



(b) outer angle 90°

Fig. 5 Total absorbed energy according to the interface numbers

되는 것이다. 그러나 7계면이 되면, 층간크랙수가 증가함에 따라 층 두께의 감소로 인하여 층내크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수는 감소하게 된다. 결국, 층간크랙 수의 증가로 인하여 다소 평균압괘응력은 증가하나 이와 더불어 층내크랙 수의 감소로 인하여 층내크랙 진전이 충분히 일어나지 않아 결국 평균압괘응력은 감소하게 된다고 사료된다. 이와 마찬가지로 최 외층 각이 90°인 CFRP 모자형 단면부재도 계면수가 증가 할수록 총 흡수에너지가 증가하다가 7계면에서 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 최 외층 각이 90°일 때 계면수 변화에 따른 에너지흡수를 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 대표적인 경량화 물질인 CFRP를 사용하여 모자형 단면부재를 성형 하여 계면수(2, 3, 4, 6, 7) 변화 및 최 외층 각도(0°, 90°)에 따른 에너지흡수특성을 비교 고찰하였다

- (1) 최 외층 각도가 0°인 CFRP 모자형 단면부재의 압괘모드는 대부분의 시험편에서 평판부재는 외측으로 확장되었고, “ㄷ”형 부재에서는 최 외층의 0°는 바깥쪽으로 확장되면서 내부의 90°는 파단 되는 압괘의 형태를 보였다.

- (2) 최 외층 각도가 90°인 CFRP 모자형 단면부재의 압괘모드 또한 평판부재는 최 외층 각도가 0°인 부재와 비슷한 압괘모드를 보였다. 하지만 “ㄷ”형 부재는 최 외층의 90°방향의 CFRP가 내측의 0°를 외측으로 확장되지 못하도록 하면서 함께 파단 되었다.
- (3) 최 외층 각도가 0°일 때 계면수가 증가 할수록 총 흡수에너지는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 하지만 7계면에서는 총에너지흡수가 감소하고 있다.
- (4) 최 외층 각도가 90°인 CFRP 모자형 단면부재도 최 외층 각도가 0°인 부재와 마찬가지로 계면수가 증가 할수록 총 흡수에너지가 증가하다가 7계면에서 다소 감소하는 경향을 보여 주었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Donald F. Adams., 1990, *Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes*, Technomic Publishing Company, USA.
- (2) Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H., and Park, G. G., 2002, “Light Weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments,” *Transactions of KSAE* Vol. 10, No. 1, pp. 125~132.
- (3) Kim, S. K., Im, K. H., Kim, Y. N., Park, J. W., Yang, I. Y., and Adachi, T., 2003, “On the Characteristics of Energy Absorption Control in Thin-Walled Members for the use of Vehicular Structures,” *Key Engineering Materials* Vols. 233, No. 236, pp. 239~244.
- (4) Minoru, Y., Manabu, G., and Yasuhiko S., 2003, “Axial Crush of Hollow Cylindrical Structures with Various Polygonal Cross-Sections Numerical Simulation and Experiment,” *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 140, No. 1-3, pp. 59~64.
- (5) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1991, “Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 388~404.
- (6) Farley, G. L., 1992, “Relationship between Mechanical-Property and Energy-Absorption Trends for Composite Tubes.” *NASA Technical paper*, OMB No. 0704~0188.

- (7) Huh, H., Kim, K. P., kim, S. H., Song, J. H., and Hong, S. K., 2003, "Crashworthiness Assessment of Frond Side Members in an Auto-Body Considering the Fabrication Histories," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 45, pp. 1645~1660.
- (8) Kim, B. J., and Heo, S. J., 2003, "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles," *International Journal of Automotive Technology* Vol. 4, No. 3, pp. 141~147.
- (9) Hanssen, A. G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S., 2001, "Optimum Design for Energy Absorption of Square Aluminum Columns with Aluminium Foam Filler," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 43, pp. 153~176.
- (10) Li, S. and Reid, S. R., 1990, "Relationship Between the Elastic Bucking of Square Tubes and Rectangular Plates," *Journal of Applied Mechanics* Vol. 57, No. 4, pp. 969~973.
- (11) Singace, A. A., 1999, "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Mode." *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 41, pp. 865~890.
- (12) Kim, Y. N., Im, K. H., Kim, S. K., and Yang, I. Y., 2003, "Energy Absorption Characteristics of CFRP Composite Tubes under Axial Compression Load," *Key Engineering Materials* Vol. 233, No. 236, pp. 245~250.
- (13) Kim, Y. N., Hwang, J. J., Baek, K. Y., Cha, C. S., and Yang, I. Y., 2003, "Impact Collapse Characteristics of CF/Epoxy Composite Tubes for Light-Weights," *KSME International Journal* Vol. 17, No. 1, pp. 48~56.
- (14) Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M. and Du, X. W., 2000, "Axial Impact Behavior and Energy Absorption Efficiency of Composite Wrapped Metal Tubes," *International Journal of Impact Engineering* Vol. 24, pp. 385~401.
- (15) Li, S., and Reid, S. R., 1990, "Relationship Between the Elastic Bucking of Square Tubes and Rectangular Plates," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 4, pp. 969~973.
- (16) Singace, A. A., 1999, "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Mode," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, No. 7, pp. 865~890.
- (17) White, M.D. and Jones, N., 1999, "Experimental Quasi-Static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, No. 2, pp. 179~208.
- (18) Kim, Y. N., 2002, *Axial Collapse Characteristics of CFRP Composite Thin-wall Structures for Light Weight of Vehicles*, A Thesis for a Doctroate, Chosun University, Republic of Korea.