

경량화용 CFRP 모자형 구조부재의 적층각도 변화에 따른 압괴특성

황우채*, 양용준⁺, 양인영⁺⁺

(Manuscript received: Jul, 23, 2012 / Revised: Oct, 30, 2012 / Accepted: Nov, 8, 2012)

Collapse Characteristics of CFRP hat Shaped Structural Member with Various Orientation Angle for a Use of Lightweight

Woochae Hwang*, Yongjun Yang⁺, Inyoung Yang⁺⁺

Abstract

CFRP 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 compared with conventional materials. This study is to investigate the energy absorption characteristics and collapse mode of CFRP single and double hat shaped structural member under the axial static collapse test. The CFRP single and double hat shaped structural members stacked at different angles ($\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $90^\circ/0^\circ$ and $0^\circ/90^\circ$ where the direction on 0° coincides with the axis of the member). The axial static collapse tests were carried out for each member. Collapse mode and energy absorption characteristics of the each member were analyzed.

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastic(탄소섬유강화플라스틱), Collapse mode(압괴모드), Energy absorbed characteristics(에너지 흡수특성), Single hat shaped(단일 모자형), Double hat shaped(이중 모자형)

1. 서론

최근 차량의 연비개선과 CO₂ 배출량 삭감이라는 자동차에 대한 요구가 많아지면서 차량의 설계시 안전성이 희생되지 않고 차량의 무게를 경량화 하는 요구가 증대되고 있다. 차량은 대단히 큰 운동에너지를 가지고 이동하며 충돌 시에는 에너지의 대부분을 바디 변형에 의해 흡수된다.

따라서 충돌 시에는 범퍼 및 바디 변형에 의한 에너지 흡수를 이용하여 탑승자에 작용하는 충격을 완화하는 동시에, 탑승자의 생존 공간의 확보를 위하여 차실 부분은 강고하여 변형이

잘 안되게 하는 것이 필요하다⁽¹⁻³⁾.

특히, 사이드 멤버 또는 엔진 멤버 등의 종방향 부재는 성변형으로 대부분의 에너지를 흡수하게 되며 굽힘에 의한 변형보다 압괴에 의한 변형으로 많은 에너지를 흡수한다. 이러한 차체 구조부재의 경량화는 차량의 연비향상과 이를 통한 대기 오염 저감을 위하여 중요한 연구과제가 되고 있으며, 기존의 금속재료를 이용한 최적화 설계 방법에 의한 경량화는 한계가 있으므로 최근에는 알루미늄, 플라스틱 등 경량화 재료를 이용한 설계가 연구의 초점이 되고 있다⁽⁴⁻⁷⁾. 따라서 이러한 경량화용 부재의 충돌안전 평가에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

* 조선대학교 BK21 첨단소재부품금형기술인력양성사업단

+ 동강대학교 소방안전관리과

++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동

✉ Corresponding Author E-mail: iyyang@chosun.ac.kr

지금까지의 차체구조부재의 압괴에 관한 연구동향을 살펴보면, 실제 차체구조부재인 점용접 모자형 단면부재에 대하여 seam-용접상태에 있다는 가정하에서 Ohkubo 등^(8,9)은 모자형 단면부재의 정적 평균압괴하중을 동역학적 분석을 활용하였으며, Wang 등은 알루미늄 폼이 충전된 모자형 단면부재의 알루미늄 폼의 변형에 의한 상호효과와 평균압괴하중을 이론적으로 해석하였다.

차체의 강도부재로 사용되고 있는 구조부재의 압괴특성에 대한 연구는 충돌안전성의 측면과 경량화 측면에서 여러 가지 재질과 다양한 단면형상에 대해서 행해지고 있다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 특히 복합재료는 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 우수하고 설계요건에 따라 적층조건을 적절히 선정할 수 있어 다양한 재료와 단면 형상에 따른 에너지 흡수 능력에 관하여 폭넓은 연구가 진행 중이다^(13,14).

본 연구에서는 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 안정성능 및 연비 개선을 위한 경량화에 대한 방안으로 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastic; 이하 CFRP라 한다)를 이용하여 CFRP 단일 모자형 및 CFRP 이중 모자형 구조부재를 제작한 후 적층 각 변화에 따른 압괴특성 및 에너지흡수특성을 고찰함으로써 최적의 수송기계용 구조부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계데이터를 얻고자 한다.

2. 시험편

자동차 전면 충돌시 가장 많은 에너지를 흡수하는 차량 전면부 사이드부재는 두께 1.22~1.8mm 고장력 강판의 “ㄷ” 자형과 평판을 점용접한 것으로서 폭 = (100~140) × (50~100)mm, 길이 = (500~700)mm가 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 실제 전면부 사이드부재의 1/4크기인 폭 = 30 × 30mm, 플랜지 길이 = 12mm로 “ㄷ” 자형과 평판부재가 결합된 CFRP 단일 모자형 구조부재와 두 개의 “ㄷ” 자형 부재가 결합된 CFRP 이중 모자형 구조부재를 CFRP 프리프레그시트(한국화이버, CU125NS, Carbon fiber unidirection 125g/m²)를 사용하여 제작하였다. Table 1은 시험편에 사용된 CFRP 프리프레그시

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet and aluminum

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy#2500)	Prepreg sheet
Density[kg/m ³]	1830	1240	—
Poisson's Ratio	—	—	0.3
Young's modulus[GPa]	240	3.6	132.7
Tensile stress[MPa]	4890	80	1850
Resin content[%Wt]	—	—	33

트의 물성치를 나타내었고, Fig. 1과 Fig. 2는 시험편의 형상을 나타내었다.

특히, CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이므로 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압괴특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 [+θ_n/-θ_n]의 적층구성으로 적층각도 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하여 적층각도를 변화시켜 제작하였다.

시험편의 성형은 autoclave를 이용하여 camber 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형 시에 열 수축 테이프에 의한 압력으로 수지흐름(resin flow)을 유도하였으며, 진공펌프에 의하여 진공팩 속을 10⁻¹Pa까지 진공 시킨 후 Compressor에 의해서 진공팩의 외측으로부터 3×10⁵Pa 정도 가압시켜 제작하였다.

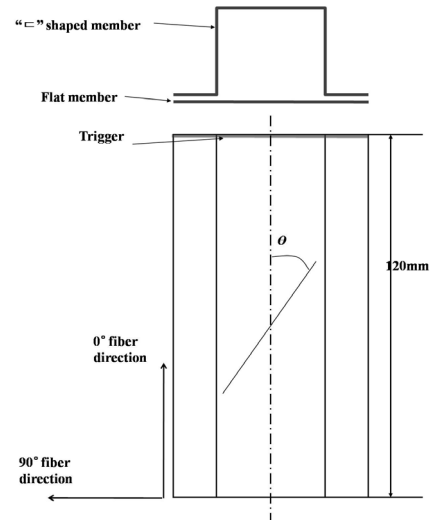


Fig. 1 Configuration of CFRP single hat shaped structural member

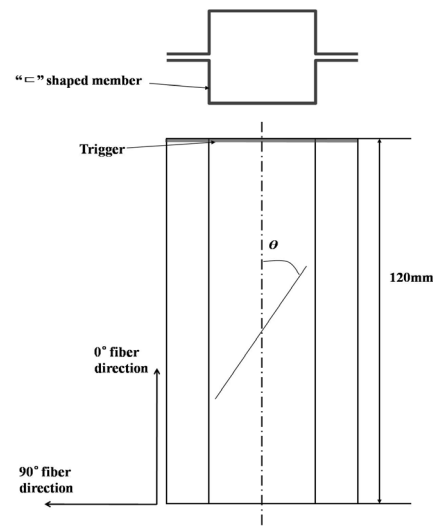


Fig. 2 Configuration of CFRP single hat shaped structural member

CFRP의 가장 취약한 특성은 취성문제이며, 압괴초기에 최대 하중이후 급격한 파괴로 인한 층내 및 층간 등의 크랙 성장으로 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 일반적으로 한쪽 끝단에 Initiator 또는 고의의 결함을 주어 순차적이고 국부적인 압괴를 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 한다^(15,16). 본 연구에서는 시험편의 하중이 작용하는 끝단을 45°로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다. 또한 시험편에 잔류응력이 발생하지 않게 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 120mm로 시험편을 절단하였다.

3. 압괴실험

정적압괴실험은 SHIMADZU사의 만능재료시험기(AG-1S, 100kN)를 사용하였으며, 로드셀과 액추에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min의 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해지도록 실험을 행하였다. 실험 시 편심하중이 작용하지 않도록 시험편 제작 시 연마가공을 통하여 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과와 재현성이 좋도록 하였으며, 실험결과에 단부효과(end effects)가 나타나지 않고 순차적인 압괴가 주기적으로 발생하도록 전체 축 방향 길이(120mm)의 50%(60mm)까지 변형되도록 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 행하였다.

Fig. 3은 압괴실험 후 얻어진 데이터 중 CFRP 단일 모자형 구조부재와 CFRP 이중 모자형 구조부재의 15°의 적층구성을 갖는 하중-변위선도를 나타냈다.

시험편에 흡수된 에너지 량의 계산은 압괴실험에서 얻은 하중-변위선도의 면적을 흡수에너지로 하여, 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 구하였다.

$$E_a = \int_0^l PdS \quad (1)$$

또한, 흡수에너지의 값을 압괴길이(60mm)로 나눔으로서

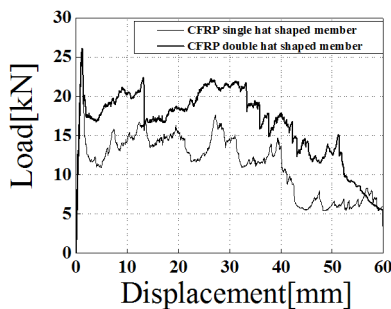


Fig. 3 Load-displacement curve of CFRP single and double hat shaped structural member(15°)

식 (2)와 같이 평균압괴하중을 구하였다.

$$P_{mean} = \frac{E_a}{l-l_0} \quad (2)$$

여기서, E_a 는 흡수에너지, P 는 압괴하중, P_{mean} 는 평균압괴하중을 나타낸다. 압괴실험은 각 시험편당 3~4회 수행하여 데이터의 평균값을 취하였다.

3.1 압괴모드

본 연구에서는 CFRP 단일 모자형 및 CFRP 이중 모자형 구조부재의 적층각도 변화에 따라 정적 압괴실험을 행하였다.

CFRP 부재의 경우는 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 결정되며, Farley and Jones¹⁷⁾가 정의한 연속섬유강화 복합재 튜브의 세가지 압괴모드는 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴로 압괴된다. 대부분의 취성 섬유 강화 복합재는 횡방향 전단 및 라미나 굽힘 모드의 조합으로 압괴된다. Fig. 5와 Fig. 6은 CFRP 단일 모자형 구조부재와 CFRP 이중 모자형 구조부재의 정적압괴실험후 시험편의 형상을 보여주고 있다.

CFRP 단일 모자형 구조부재에서 15°로 적층된 부재에서는 Fig. 4(a)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압괴되었으며, “ㄷ”자형 부재는 섬유 방향을 따라 압괴가 진행되며 이는 횡방향 전단과 라미나(lamina) 굽힘모드가 조합된 취성파괴 모드로 압괴 되었다. 45°로 적층된 부재에서는 Fig. 4(b)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인

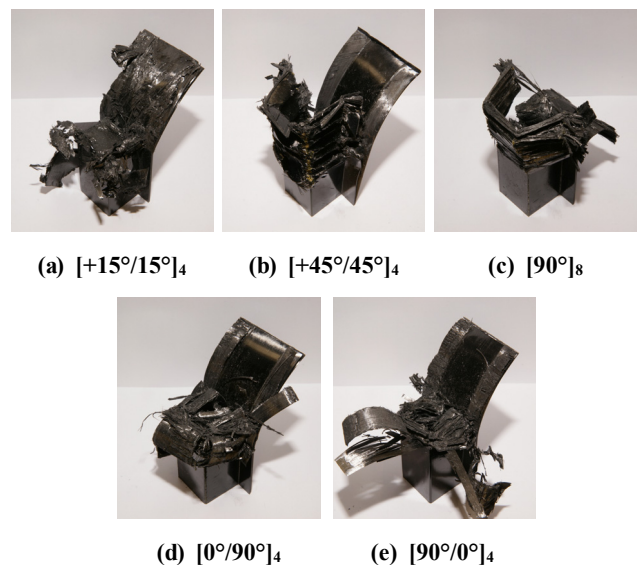


Fig. 4 Collapse modes of CFRP single hat shaped structural member

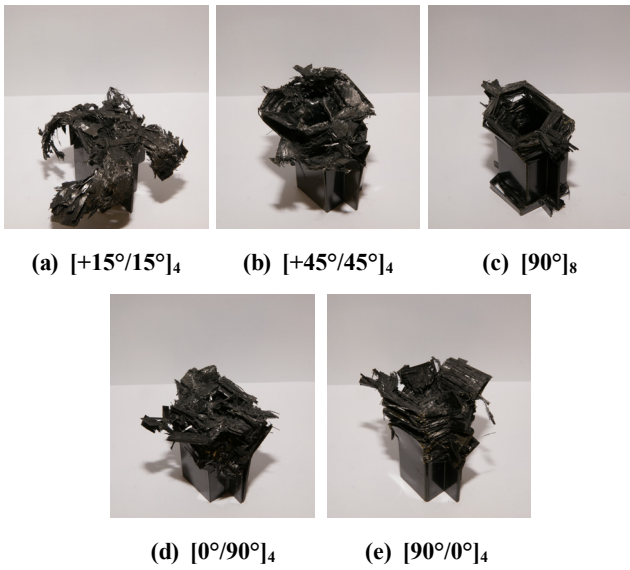


Fig. 5 Collapse modes of CFRP double hat shaped structural member

진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, “ㄷ”자형 부재는 연성 금속에 존재하는 것과 유사한 접힘모드의 형상으로 압괴되었다. 90°로 적층된 부재에서는 Fig. 4(c)와 같이 횡방향의 기지 파단으로 인한 파쇄모드의 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 주로 횡방향 전단모드에 의한 라미나(lamina) 묽음의 기지 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 0°/90°로 적층된 부재에서는 Fig. 4(d)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, “ㄷ”자형 부재는 횡방향 전단과 라미나 묽음의 파단이 조합된 취성파괴 모드의 형상으로 압괴되었다. 90°/0°로 적층된 부재에서는 Fig. 4(e)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, “ㄷ”자형 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나(lamina) 묽음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압괴되었다.

CFRP 이중 모자형 구조부재에서 15°, 45°, 90°(Fig. (a), (b), (c))로 적층된 부재의 “ㄷ”자형 부재는 CFRP 단일 모자형 부재의 압괴모드와 유사하게 압괴 되었다. 하지만, CFRP 단일 모자형 부재에 나타났던 평판부재와 “ㄷ”자형 부재의 갈라짐 현상은 발생하지 않았다. 이는 CFRP 단일 모자형 부재가 하중을 받을 때 “ㄷ”자형 부재와 평판부재의 비대칭으로 인하여 플랜지 부분에서 갈라짐 현상이 발생 하지만, CFRP 이중 모자형 부재의 경우에는 “ㄷ”자형 부재의 대칭으로 인하여 플랜지 부분에서 갈라짐 현상이 발생하지 않았다.

3.2 에너지흡수 특성

Fig. 6은 적층각도 변화에 따른 CFRP 단일 모자형 구조부재와 CFRP 이중 모자형 구조부재의 단위질량당 흡수에너지를

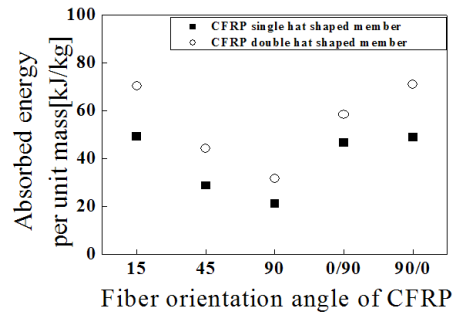


Fig. 6 Absorbed energy per unit mass according to the orientation angle

비교하였다. Fig. 6을 보면 CFRP 단일 모자형 구조부재에서 단일 각도로 적층된 경우 적층각도가 15°에서 90°로 적층각이 증가할수록 단위질량당 흡수에너지가 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 축 하중이 작용될 때 적층각이 적은 경우는 라미나(lamina) 굽힘과 섬유의 파단에 의하여 에너지를 흡수하지만 각도가 증가할수록 섬유의 파단이 없이 횡방향 전단모드로 인한 기지의 파단에 의해 에너지를 흡수한다. 따라서 적층각이 적은 경우 섬유의 파단을 동반하여 더 많은 에너지를 흡수하는 것으로 사료된다. 또한 0°와 90°섬유로 조합된 0°/90°와 90°/0°의 적층각을 갖는 시험편의 경우의 에너지 흡수는 비슷하게 나타났다.

CFRP 이중 모자형 구조부재에서도 CFRP 단일 모자형 구조부재와 마찬가지로 적층각도가 15°에서 90°로 적층각이 증가할수록 단위질량당 흡수에너지가 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 0°와 90°섬유로 조합된 0°/90°와 90°/0°의 적층각을 갖는 시험편의 경우 에너지 흡수에서는 90°/0°의 적층각을 갖는 시험편이 좀더 많은 에너지를 흡수한 것을 알 수 있다. 이는 0°/90°의 시험편의 경우 “ㄷ” 부재는 횡방향 전단모드로 에너지를 흡수하지만 90°/0°의 시험편의 경우 “ㄷ” 부재는 횡방향 전단모드와 최외각층 0°가 외측으로 확장되지 않고 90°인 부재가 횡방향 전단모드로 파단 될 때 0°부재는 섬유의 파단으로 인해서 더 많은 에너지를 흡수 하는 것으로 사료 된다. 또한, CFRP 단일 모자형 구조부재와 CFRP 이중 모자형 구조부재의 에너지흡수에서는 CFRP 이중 모자형 구조부재가 에너지흡수 특성이 더 좋은 것을 알 수 있다. 이는 CFRP 단일 모자형 부재가 하중을 받을 때 “ㄷ”자형 부재와 평판부재의 비대칭으로 인하여 플랜지 부분에서 갈라짐 현상이 발생하지만, CFRP 이중 모자형 부재의 경우에는 “ㄷ”자형 부재의 대칭으로 인하여 플랜지 부분에서 갈라짐 현상이 발생하지 않았다. 따라서 CFRP 단일 모자형 부재에서는 평판부재가 하중을 받을 때 “ㄷ”자형 부재와 평판부재가 분리되어 충분한 하중을 받지 못하는 반면에 CFRP 이중 모자형 부재의 경우에는 “ㄷ”자형 부재가 분리 되지 않았으며, 이로 인하여 플랜지 부분의 두

계의 영향과 모서리 수 증가로 에너지흡수특성이 더 좋은 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 안전성능 및 연비 개선을 위한 경량화에 대한 방안으로 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재를 이용하여 CFRP 단일 모자형 부재와 CFRP 이중 모자형 부재를 제작한 후 적층각도 변화에 따른 정적압괴 실험을 통하여 압괴모드 및 에너지흡수 특성을 파악하였다.

- (1) CFRP 단일 모자형 구조부재와 CFRP 이중 모자형 구조부재는 적층각도에 따라 횡방향 전단, 라미나(lamina) 굽힘, 취성파괴 및 국부좌굴 압괴모드가 조합된 형태의 압괴모드로 압괴되었다. CFRP 적층각도가 적은 경우에는 주로 라미나 굽힘에 의해 에너지를 흡수하는 반면, CFRP 적층각도가 증가 할수록 국부좌굴 및 횡방향 전단모드에 의한 기지 파단에 의해 주로 에너지를 흡수하였다.
- (2) CFRP 단일 모자형 구조부재와 CFRP 이중 모자형 구조부재의 정적압괴특성에서는 적층각이 90°에서 15°로 작아질수록 흡수에너지가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 축하중이 작용될 때 적층각이 작은 경우는 라미나(lamina) 굽힘과 섬유층의 파단에 의하여 에너지를 흡수하지만 각도가 커질수록 섬유층의 파단이 없이 횡방향 전단으로 인한 기지의 파단에 의해 에너지를 흡수하게 된다. 따라서 적층각이 작은 경우 섬유층의 파단을 동반하여 더 많은 에너지를 흡수하였다.
- (3) 0°/90°, 90°/0°로 적층된 부재의 경우 “ㄷ”자형 부재는 CFRP 단일 모자형 부재의 압괴모드와 유사한 횡방향 전단과 라미나(lamina) 굽힘 모드가 조합된 압괴 모드로 압괴되었다. 하지만, 단일 각도로 적층된 경우의 부재에 나타났던 평판부재와 “ㄷ”자형 부재의 갈라짐 현상은 발생하지 않았으며, 플랜지 부분에서는 CFRP 단일 모자형 부재의 플랜지 부분에서 크게 나타나지 않았던 라미나(lamina) 묽음의 섬유 및 기지 파단이 조합된 압괴모드를 보임으로써 에너지흡수특성이 더 좋은 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2012학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- (1) Lee, K. S., Seo, H. K., Yang, Y. J., Hwang, W. C., Im, K. H. and Yang, I. Y., 2011, “Collapse Behavior Evaluation of Hybrid Thin-walled Member by Stacking Condition,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. Chinas*, Vol. 21, No. 1, pp. 135~140.
- (2) Hwang, W. C., Lee, K. S., Cha, C. S., Jung, J. A., Han, G. Y., and Yang, I. Y., 2011, “Energy Absorption Characteristics of Composite Laminated Structural Member According to the Interface Number,” *Journal of KSMTE*, Vol. 20, No. 2, pp. 17~22.
- (3) Lee, K. S., Park, E. D., and Yang, I. Y., “Impact Collapse Behavior of Hybrid Circular Thin-walled Member by Stacking Condition,” *Journal of KSMTE*, Vol. 19, No. 2, pp. 235~240.
- (4) Li, S. and Reid, S. R., 1990, “Relationship Between the Elastic Buckling of Square Tubes and Rectangular Plates,” *International Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 4, pp. 969~973.
- (5) Avalue, M., and Belingardi, G., 1997, “Experimental Evaluation of the Strain Field History during Plastic Progressive Folding of Aluminum Circular Tubes,” *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 39, No. 5, pp. 575~583.
- (6) 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.
- (7) 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*, Vol. 233~236, No. 1, pp. 239~244.
- (8) Aya, N., and Takahashi, K., 1976, “Energy Absorption Characteristics of Vehicles Body Structure,” *Japan Society of Automotive Engineers Bulletin*, Vol. 7, No. 7, pp. 65~74.
- (9) Tani, M., and Funahashi, A., 2002, “Energy Absorption by the Plastic Deformation of Body Structural Members,” *Paper 783068 presented at S.A.E. Annual Meeting*, pp. 1~12. Detroit, February 1978.
- (10) Cha, C. S., Kang, J. Y., and Yang, I. Y., 2001, “Axial Impact Collapse Analysis of Spot Welded Hat Shaped Section Member,” *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 180~191.

-
- (11) White, M. D., Jones, N., and 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.*, Vol. 41, No. 2, pp. 209~233.
- (12) Avalle, M., and Belingardi, G., 1997, "Experimental Evaluation of the Strain Field History during Plastic Progressive Folding of Aluminum Circular Tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 39, No. 5, pp. 575~583.
- (13) Li, S., and Reid, S. R., 1990, "Relationship Between the Elastic Buckling of Square Tubes and Rectangular Plates," *International Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 4, pp. 969~973. pp. 239~244.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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, Issue 1, pp. 153-176.
- (17) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1991, "Prediction of Energy-absorption Capability of Composite tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 3, pp. 388~404.