

적층조건에 따른 혼성 원형 박육부재의 충격압괴거동

이길성*, 박으뜸⁺, 양인영⁺⁺

(논문접수일 2009. 12. 7, 심사완료일 2010. 2. 9)

Impact Collapse Behavior of Hybrid Circular Thin-walled Member by Stacking Condition

Kil-sung Lee*, Eu-ddeum Park⁺, In-young Yang⁺⁺

Abstract

The recent trend of vehicle design aims at crash safety and environmentally-friendly aspect. For the crash safety aspect, energy absorbing members should be absorbed with collision energy sufficiently. But vehicle structure must be light weight for the environmentally-friendly aspect, in order to improve fuel efficiency and to reduce tail gas emission. Therefore, the light weight of vehicle must be achieved in a status of securing safety of crash. An aluminum or CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) is representative one among the light-weight materials. In this study, impact collapse behavior of circular hybrid thin-walled member is evaluated. The hybrid members are manufactured by wrapping CFRP prepreg sheets outside the aluminum circular members in the autoclave. Because the CFRP is an anisotropic material whose mechanical properties change with its stacking condition, special attention is given to the effects of the stacking condition on the collapse behavior evaluation of the hybrid thin-walled member. Collapse mode and energy absorption capability of the hybrid thin-walled member are analyzed with change of the fiber orientation angle and interface number.

Key Words : Hybrid thin-walled member(혼성부재), CFRP(탄소섬유 강화복합재료), Fiber orientation angle(섬유적층각도), Interface number(계면수), Collapse mode(압괴모드), Energy absorption capability(에너지흡수능력)

* 조선대학교 BK21 첨단소재부품 금형기술 인력양성사업단

+ 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과

++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (iyyang@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동

1. 서론

최근 세계적으로 자동차 업계에서는 에너지 절약, 자원절약, 친환경이라는 사회적 요구에 따라 신차에 대한 경쟁이 매우 치열한 가운데 신기술 개발이라는 화두가 자동차 산업에 있어서 그 비중이 커져가고 있고 이러한 요구에 적합한 자동차를 만들기 위하여 소재 또한 발전해 가고 있다.

소재의 고강도화와 경량화를 통하여 차체의 경량화 및 운전자 보호를 강화하고 소재 및 부품 재활용기술 개발을 통하여 보다 낮은 가격으로 소비자의 욕구를 충족시키며 친환경 이미지의 차량을 개발하게 되었다.

차량충돌 발생 시 운전자가 충돌에너지를 모두 받게 되면 매우 위험한데 이를 방지하기 위한 안전대책으로 차체구조부재의 재료를 바꿈으로써 충돌에너지를 완화시킬 수 있다. 최근 각광받는 자동차 부품 경량화 및 에너지 흡수 재료로 알루미늄, 마그네슘 등의 비철금속 합금, 유리섬유강화 복합재(GFRP : Glass Fiber Reinforced Composites), 탄소섬유강화 복합재(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Composites) 등이 사용 또는 연구되고 있다. 이 중 섬유 강화 복합재료로 만든 충격 에너지 흡수재는 높은 내구성과 경량화 차원에서 자동차와 항공기에 적용되는 폭넓은 분야에서 사용되는 요소이며,^(1,2) 무게에 비해 탁월한 내구성으로 충격 에너지 흡수에 뛰어난 재료로 증명되었다.^(3,4)

본 연구에서는 경량화용 강도 부재를 개발하기 위하여 알루미늄 부재의 외면을 CFRP로 강화시킨 혼성부재 형태의 강도부재를 제작하여 충격압괴 실험을 행하였다. 알루미늄과 CFRP는 대표적인 경량재료이지만, 축 하중을 받을 때 알루미늄 부재는 CFRP 부재에 비하여 압괴하중은 낮으나 안정적인 소성변형에 의해 에너지를 흡수하고,⁽⁵⁻⁹⁾ CFRP 부

재는 알루미늄 부재에 비하여 강성과 강도는 매우 높지만 불안한 취성파괴에 의해서 에너지를 흡수한다.^(10,11) 이처럼 서로 다른 특성을 가진 두 재료의 결합에 의해 각각의 단점을 없애고 장점이 부각된 효과를 가질 수 생각했다.

특히, 이 실험에서는 이방성 재료인 CFRP의 설계 변수로 적층각도와 계면수의 변화에 따른 축 압괴 특성을 중점적으로 고찰하였다.

2. 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 CFRP를 혼성하여 자동차 사이드 부재의 기본구조인 원형 부재를 제작하여 시험편으로 사용하였다. 혼성부재를 제작하는데 사용되는 알루미늄 6063-T5계열을 사용하였고 원형 부재의 두께는 1.0mm, 외경 38mm이다. CFRP는 한국 화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 사용하였다.

알루미늄 원형 부재의 외측을 Fig. 1과 같이 CFRP로 적층하였으며 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압괴 특성을 고찰하기 위하여 축 방향을 0°로 하여 $[+\theta/-\theta]_4$ 의 적층구성으로 적층각 θ 를 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90°로 하여 적층각도를 변화시켜 적층하였다. 또한, 실험 결과와 에너지 흡수에 가장 효과적인 특성을 나타낸 0°와 90°의 적층각도로 각각 4매씩 8장을 사용하여 적층한 $[0/90]$ 시험편의 적층구성을 최외층이 90°가 되도록 2, 3, 4, 6 및 7계면으로 계면수를 변화시켜 적층한 뒤 오토클레이브로 성형하였다.

시험편의 성형은 Fig. 2와 같이 오토클레이브를 이용하여 챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C,

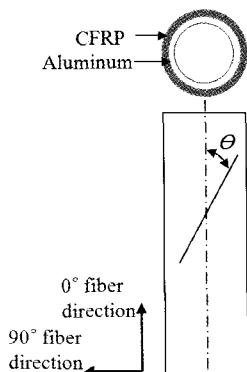


Fig. 1 Configuration of specimens

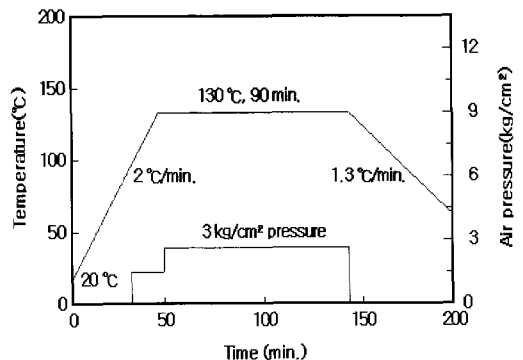


Fig. 2 Curing cycle of specimens

경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 열 수축 테이프에 의한 압력으로 수지흐름(resin flow)을 유도하였으며, 진공펌프에 의하여 진공백 속을 10⁻¹Pa까지 진공 시킨 후 압축기에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵Pa 정도 가압시켜 제작하였다.

제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 다이아몬드 커터를 이용하여 길이가 120mm로 절단하였다.

3. 압계 실험

충격압계실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 3에 나타냈으며, Fig. 4는 실험장치의 계측시스템의 구성도를 나타냈다.⁽¹²⁾

충격속도는 0.5MPa의 공기압에서 충격속도 7.584m/sec로 충격 압계실험을 행하였다. 단, 적층각도 15°인 시험편의 경우 시험편이 흡수 할 수 있는 에너지의 한계로 자유낙하상태에서 충격속도 4.82m/sec로 충격에너지를 가하여 실험을 하였다. 충격에너지는 크로스헤드의 운동에너지와 동일하므로 속도 4.82m/sec에서는 약 465.96J, 속도 7.584m/sec에

서는 약 1136.64J이다.

측정된 하중 및 변형의 이력곡선에서 시간을 소거하여 충격압계가 진행하고 있는 과정의 하중-변위선도(압계선도)를 Fig. 5와 같이 구하여 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위 선도를 식 (1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지를 구하였다.

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

여기서, E_a 는 시험편에 흡수된 에너지, P 는 압계하중, l 은 압계과정에서 압계된 시험편의 길이를 나타낸다. 그리고 경량화 차원에서 흡수에너지를 고찰하고자 흡수에너지를 압계

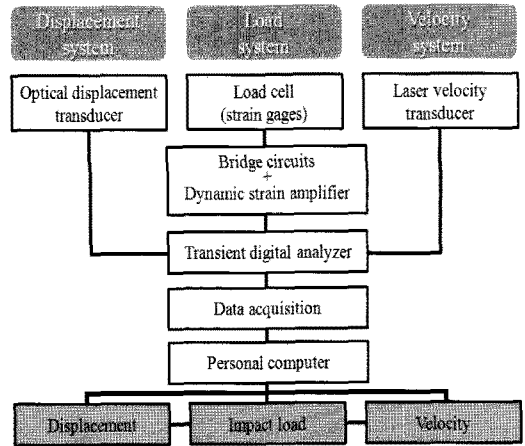


Fig. 4 Diagram of measurement system

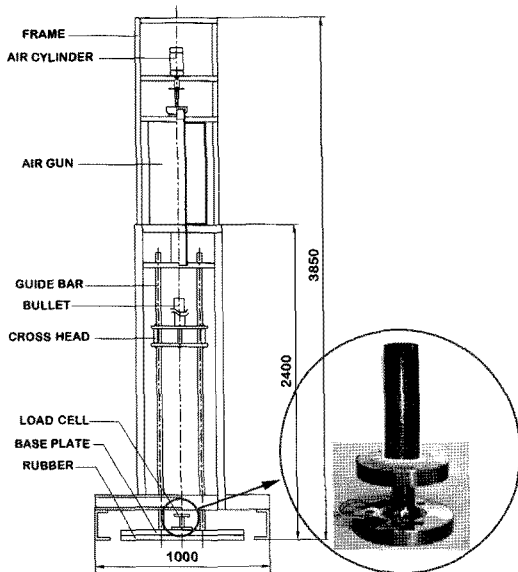


Fig. 3 Impact testing device

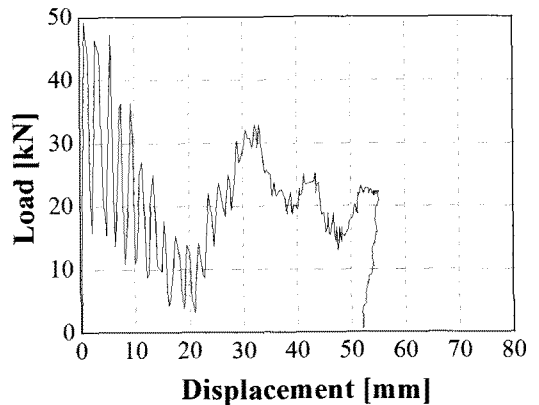


Fig. 5 Load-displacement curve of specimens, [90/0]4

된 부분의 질량으로 나눈 단위질량당 흡수에너지를 구하였다.

$$E_m = \frac{E_a}{\rho A \Delta l} \quad (2)$$

여기서, E_m 은 단위질량당 흡수에너지, ρ 는 시험편의 밀도를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압괴모드

본 연구에서 혼성 원형 박육부재는 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압괴모드가 결합된 4가지 형태의 압괴모드로 압괴되었다. 이는 CFRP 적층각도에 의해서 주로 결정되어진다. Fig. 6은 혼성 원형 박육부재의 적층각도에 따른 충격압괴실험 후 압괴된 시험편의 압괴형상을 나타낸 그림이다.

분열 모드(split mode) : Fig. 6(a)와 같이 CFRP 적층각도가 15°로 적층된 시험편인 경우에 나타나며, 내부 알루미늄 부재는 축대칭 모드로 압괴되지만 외부 CFRP 부재의 지지파단으로 인해 알루미늄 부재와 분리되면서 압괴되었다. 분열 모드의 압괴형상은 주로 섬유가 축 방향과 비슷하게 적층된 경우에 나타나며, 축 방향 섬유의 영향으로 축 하중이 작용되면 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 분리되는 현상이 나타난다.

조합 모드(combination mode) : Fig. 6(b)와 같이 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편에서 나타나며, 내부 알루미늄 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유가 끼어 들어가지만 알루미늄 부재의 비축대칭 압괴로 나머지 섬유는 끼어 들어가지 못하고 파단 되는 접힘과 파단이 조합된 형태로 압괴되었다.

파쇄 모드(fragmentation mode) : Fig. 6(c)와 같이 CFRP 적층각도가 90°로 적층된 시험편에서 나타나며, 내부 알루미늄

부재의 접힘을 외부의 CFRP 부재가 방해하면서 비축대칭 모드로 압괴되고 CFRP 부재의 섬유는 대부분 절단되는 모드 압괴되었다. 이 모드는 CFRP 적층각도가 원주 방향으로 적층된 경우, 즉 적층각도가 큰 경우에 나타나며 원주 방향으로 적층된 섬유가 내부의 알루미늄 부재의 접힘을 방해하면서 파단 되어 압괴가 된다.

파쇄 확장 모드(fragmentation and splaying mode) : Fig. 6(d)와 (e)와 같이 0°와 90°의 CFRP 적층각도가 조합된 시험편에서 볼 수 있으며, 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단 되면서 압괴되었다. 파쇄 확장 모드는 축 방향 0°의 섬유가 부재의 외측으로 확장되어 알루미늄 부재와 분리되려 하지만 90°의 섬유의 영향으로 확장되면서 파단 되면서 압괴된다. Fig. 6(d)의 최외각 0°인 시험편의 경우 최외각 0°와 인접한 90°사이의 계면에서 층간 분리되어 최외각 0°섬유는 지지파단으로 확장되고 내측 섬유들은 취성파괴로 압괴되었다. 또한 Fig. 6(e)의 최외각 90°인 시험편의 경우 최외각 90°섬유의 영향으로 섬유파단이 크게 일어나며 압괴되었다.

CFRP의 계면수 변화에 따른 원형 부재의 경우, 최외각층의 적층각도가 90°인 시험편의 압괴형상 Fig. 6(e)와 같이 길이 방향 섬유와 원주 방향의 섬유가 절단되면서 알루미늄 부재의 접힘 사이로 내측 섬유의 일부가 끼어 들어가지만 빠른 압괴속도 때문에 외측 섬유는 끼어들어가지 않고 최외각 일부 섬유는 밖으로 분열되면서 파단 되었으며, 에너지 흡수는 대부분 섬유의 파단에 의해서 이루어졌으며 일부 크랙 진전에 의해서도 이루어졌다.

4.2 에너지 흡수 특성

Table 1은 적층각도 변화에 따른 충격압괴실험 결과의 평균값으로 최대하중, 압괴된 길이 및 단위 질량당 흡수에너지를 나타내었으며, Fig. 7은 Table 1의 데이터 값 중 단위 질량당 흡수에너지를 비교한 그래프를 나타내었다.

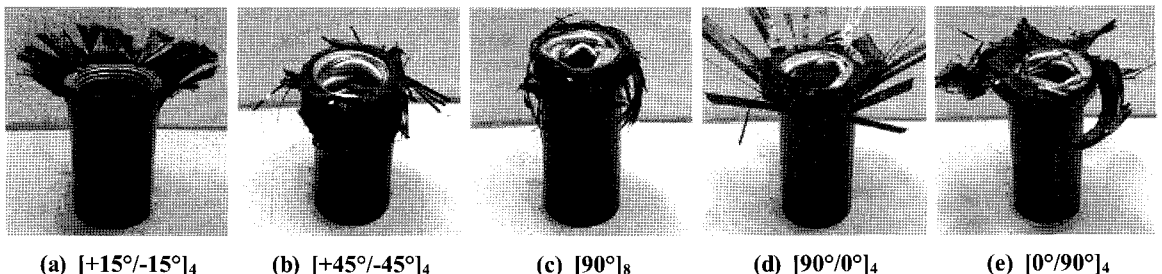


Fig. 6 Shapes of collapsed specimens according to fiber orientation angle of CFRP after impact collapse test

Table 1 Test results according to fiber orientation angle

Fiber orientation angel	Maximum collapse load P_{max} [kN]	Collapsed length $l-l_0$ [mm]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]
15	41.96	44.10	18.44
45	35.40	72.81	30.46
90	32.66	56.76	39.39
90/0	50.45	55.32	41.02
0/90	49.93	51.95	43.19

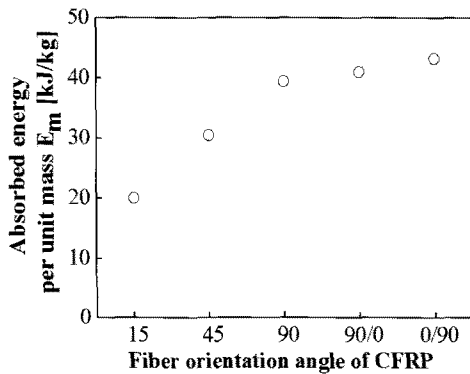


Fig. 7 Relationship between the absorbed energy per unit

단일 각도로 적층된 경우는 90°로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며 0°와 90°섬유로 조합된 최외각 90°의 시험편이 적층각의 변화에 따라 가장 많은 에너지를 흡수하였다. 이는 원형혼성부재의 CFRP 적층각이 적을 경우, 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 분리되면서 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 결합으로 인한 상호작용이 크게 나타나지 않았기 때문이다. 그러나 CFRP 적층각이 클수록 CFRP 부재의 섬유가 원환응력(hoop stress)의 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄 부재의 접힘을 방해하면서 전체적으로 높은 하중에서 접힘 이루어지며, 이때 CFRP 부재의 원주방향으로 적층된 섬유는 내부 알루미늄 부재의 접힘에 의해서 파단 되면서 많은 에너지를 흡수하였다. 또한 0°와 90°섬유로 조합된 시험편의 경우, 0°섬유의 높은 압괴 하중과 90°섬유의 알루미늄 부재 접힘 방해로 인해 높은 하중에서 접힘이 이루어지면서 압괴가 되어 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외각 90°인 경우가 내부 0°섬유의 외측으로 확장하려는 라미나 굽힘을 방해하면서 0°섬유가 파단이 되어 더 많은 섬유의 파단으로 인해 가장 많은

Table 2 Test results according to interface number

Interface number	Maximum collapse load P_{max} [kN]	Collapsed length $l-l_0$ [mm]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]
2	52.01	57.10	38.29
3	46.53	58.43	37.84
4	48.18	54.99	40.06
6	52.37	54.98	40.65
7	49.93	51.95	43.19

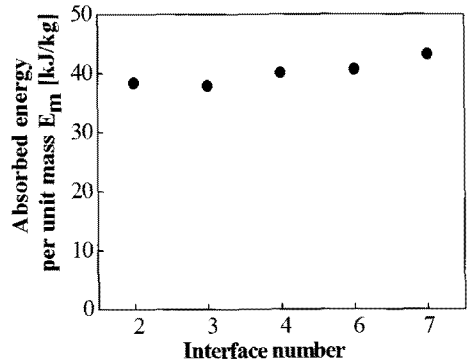


Fig. 8 Relationship between the absorbed energy per unit

에너지를 흡수하였다.

또한, Table 2는 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 에너지흡수 특성을 보인 시험편의 계면수의 변화에 따른 실험 결과의 평균값을 나타내었으며, Fig. 8은 계면수를 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그래프이다.

Fig. 8로부터 압괴하중과 에너지 흡수는 계면수의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났고 그 이유는 CFRP 부재의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 섬유의 파단 및 크랙 진전이다. 따라서 CFRP 부재의 경우, 계면수의 증가에 따라 층간 크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가하여 에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났지만,¹³⁾ 알루미늄과 CFRP가 결합된 혼성 부재의 경우는 계면수의 변화에 따라 발생하는 크랙진전에 의한 에너지 흡수량의 변화가 알루미늄 부재의 압괴에 의한 에너지 흡수량에 비해 미세하여 크랙 진전보다 알루미늄 부재의 소성변형과 섬유의 파단에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 같은 적층각도를 갖는 혼성 부재의 경우 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 생각된다.

5. 결론

알루미늄 부재의 외측을 CFRP로 강화시킨 혼성 원형 박육부재를 제작하여 CFRP 적층각도와 계면수 변화에 따른 축 방향 충격 압괴실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CFRP 적층각이 0°와 가까울수록 적층된 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 서로 분리되면서 알루미늄 부재의 순차적인 압괴와 CFRP 부재의 라미나 굽힘에 의해서 에너지를 흡수하지만, CFRP 적층각이 커질수록 알루미늄 부재의 접힘으로 인한 섬유와 판단과 접힘 사이로 끼어 들어가는 국부 좌굴에 의해서 에너지를 흡수하였다.
- (2) 단일 각도로 적층된 경우는 90°로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며, 0°와 90° 섬유로 조합된 최외각 90°의 부재가 적층각의 변화에 따라 가장 많은 에너지를 흡수하였다.
- (3) 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 나타났다. 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수량의 변화가 알루미늄 부재의 압괴에 의한 에너지 흡수량에 비해 미세하고 알루미늄 부재의 소성 변형과 섬유의 판단에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 같은 적층각도를 갖는 혼성 부재의 경우에 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) Mamalis, A. G., Robinson, M., Manolacos, D. E., Demosthenous, G. A., Ioannidis, M. B., and Carruthers J., 1997, "Crashwoolhy capability of composite material structur D. EComposite structure, Vol. 37, pp. 109~34.
- (2) Thorton, P. H. and Jeryan. R. A., 1988, "Crash energy management in composite automotive structures," *Int J Impact Eng.*, Vol. 7, pp. 167~180.
- (3) Hull, D., 1991, "A unified approach to progressive crushing of fiber reinforced tubes.," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 40, pp. 377~421.
- (4) Farley, G. L. and Jones R., 1992, "Crushing characteristics of continuous fiber reinforced composite tubes.," *J. Compos. Mater.*, Vol. 26, pp. 37~50.
- (5) 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. 233~236, pp. 239~244.
- (6) Li, S. and Reid, S. R., 1990, "Relationship Between the Plastic Bucking of Square Tubes and Rectangular plates.," *International journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 969~973.
- (7) 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, pp. 59~64.
- (8) Singace, A. A., 1999, "Axial crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Mode," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 41, pp. 865~890.
- (9) Yang, Y. J. and Yang, I. Y., 2008, "Energy Absorbing Control Characteristics of Al Thin-walled Tubes," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 86~91.
- (10) Kim, J. H., Kim, J. H., Cha, C. S., and Yang, I. Y., 2008, "Bending Characteristics of CFRP & Hybrid Shaped Hat Structure Member According to Stacking Orientation Angle," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 34~39.
- (11) Warrior, N. A., Turner, T. A., Robitaille, F., and Rudd, C. D., 2004, "The effect of interlaminar toughening strategies on the energy absorption of composite tubes," *Composites Part A*, Vol. 35, pp. 431~437.
- (12) Cha, C. S. and Yang, I. Y., 2000, "A Study on the Collapse Characteristics of Hat-shaped Members with Spot Welding under Axial Compression(Ⅱ)," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 195~201.
- (13) Kim, Y. N., Kim, J. H., and Yang, I. Y., 2001, "Influence of Stacking Sequence Conditions on the Absorbed Energy Characteristics of Composite Tubes," *Journal of the korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 34~41.