

경량화용 Al/CFRP 사각 구조부재의 압괴 특성에 관한 연구

황우채*, 심재기⁺, 양인영⁺⁺

(논문접수일 2010. 12. 27, 심사완료일 2011. 03. 03)

A Study on the Collapse Characteristics of Al/CFRP Square Structural Member for Light Weight

Woo-Chae Hwang*, Jae-Ki Sim⁺, In-Young Yang⁺⁺

Abstract

Aluminum or CFRP is representative one of the lightweight materials. Collapse behavior of Al/CFRP square structural member was evaluated in this study based on the respective collapse behavior of aluminum and CFRP member. Al/CFRP square structural members were manufactured by wrapping CFRP prepreg sheets outside the aluminum hollow members in the autoclave. Because the CFRP is an anisotropic material with mechanical properties, The Al/CFRP square 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) and interface numbers(2, 3, 4, 6 and 7). The axial impact collapse tests were carried out for each section members. Collapse mode and energy absorption characteristics of the each member were analyzed.

Key Words : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), Collapse mode(압괴모드), Al/CFRP Square structural member(Al/CFRP 사각 구조부재), Collapse characteristics(압괴특성)

1. 서론

탄소를 함유한 복합 재료는 강철보다 다섯 배나 강하면서도 20% 이상 가볍다. 3000°C 고온에 견딜 뿐더러 부식 방지에 탁월한 특성을 갖고 있다. 탄소 복합 재료의 이러한 특성은 전투기·장갑차 등 각종 무기 체계의 경량화로 기동을 향상시키고 극한 환경에서도 생존성을 보장, 핵심 소재로 주목을 끌고 있다. 탄소 섬유 복합 재료는 미래 무기체계의 혁신적인 요구 성능을 충족할 수 있는 전략적 소재로서 그 중요성이 더욱 커질 전망이다. 게다가 이 탄소섬유강화 고분자 복합재료는 차량의 외판과 현재 강판소재를 적용 중인 일부 차체, 새시의 필러나

프레임 부위에 적용될 것이다⁽¹⁾. 이러한 적용 증대를 위해서 경량재료의 개발을 통한 차체 중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비개선 방안으로 평가되고 있어 기존의 철강 부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다⁽²⁻¹⁰⁾. 따라서 이러한 경량화용 부재의 충돌안전 평가에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 사각 알루미늄의 외면을 비강도, 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재료 감싸 강화시킨 혼성부재 형태의 구조부재를 제작하여 에너지흡수 및 압괴모드를 고찰한다. 알루미늄 부재는 CFRP 부재에 비하여 비강성, 비강도는 낮지만 안정적인 소성변형에 의해 에너지를 흡수

* 조선대학교 첨단부품소재공학과
+ 조선대학교 메카트로닉스 공학과
++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (iyyang@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동

하며, CFRP 부재는 불안정한 취성 파괴에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 따라서 알루미늄과 CFRP 부재의 단점을 상호 보완하고, 알루미늄 부재의 안정적인 소성변형에 의한 에너지 흡수와 CFRP 부재의 높은 비강성, 비강도에 의한 에너지 흡수라는 장점이 결합하여 효과적인 충격 흡수용 경량화 차체 부재를 개발하고자한다.

2. 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 CFRP를 이용하여 사이드멤버의 기본 형상인 사각형상의 부재를 제작하여 시험편으로 사용하였다.

알루미늄 부재는 서울메탈(주)에서 가공한 6063-T5계열로서 한 변의 길이가 30mm인 정사각형 단면이다. 알루미늄 사각구조부재는 동일한 성분으로 동일한 제작과정을 거쳐 기계적 성질이 일치하였으며, CFRP 부재는 한국 화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet and aluminum

	Aluminum	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy#2500)	Prepreg sheet
Density [kg/m ³]	2680	1830	1240	—
Poisson's Ratio	0.31	—	—	0.3
Young's modulus[GPa]	67.2	240	3.6	132.7
Tensile stress [MPa]	192	4890	80	1850
Resin content [%Wt]	—	—	—	33

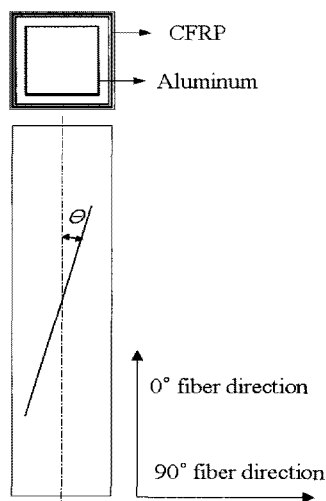


Fig. 1 Configuration of Al/CFRP square structural member

(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. Table 1은 시험편에 사용된 CFRP 프리프레그 시트와 알루미늄의 물성치를 나타내고 있다.

Fig. 1과 같이 알루미늄과 CFRP를 결합한 Al/CFRP 사각구조부재는 알루미늄 사각부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압계특성을 평가하고자 프리 프레그 시트 8매를 축 방향을 0°로 하여 [+θn/−θn]의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 적층수 n을 2, 3, 4, 6 및 7계면수에 맞추어 적층하여 제작하였다.

시험편의 성형은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형 시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10⁻¹ Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레서에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵ Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압계가 반복하여 나타나는 데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

3. 압계실험

충격압계실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험 장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

시험기는 공기압 가속장치인 에어진과 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 충격압계실험을 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 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하

여 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 압괴 시간변화 즉, 변위의 측정은 압괴가 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 1080mm이며 최대 100mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다.

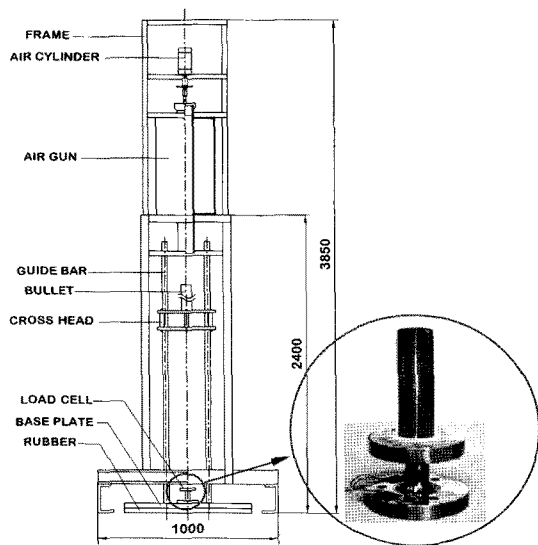


Fig. 2 Impact testing device set up

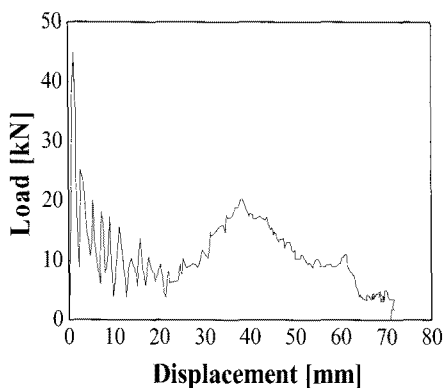


Fig. 3 Load-displacement curve of Al/CFRP square structural member([0°/90°]4)

충격속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 레이저를 이용하여 측정하였다.

충격 압괴실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 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 에너지이며, $P(l)$ 은 압괴하중을 나타낸다. 그리고 단위질량당 흡수에너지는 흡수에너지를 압괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식(2)과 같이 구할 수 있다.

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

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

충격실험은 공기압 0.3Mpa에서 충격속도 6.45m/sec로 약 833.07J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다. 단, 적층각도가 15°인 시험편의 경우 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 한계로 인하여 자유낙하상태에서 충격속도 4.82 m/sec로 약 465.96J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다.

충격에너지 E_I 는 식(3)를 이용하여 구했으며, 크로스헤드의 운동에너지와 동일하므로 속도 4.82m/sec에서는 약 465.96J, 6.45m/sec에서는 약 833.07J이다.

$$E_I = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

여기서, m 은 크로스헤드의 질량(40kg)이며, v 는 충격압괴 속도이다. Fig. 3은 대표적으로 적층구성이 [0°/90°]4인 시험편의 하중-변위 선도를 나타내고 있다.

3.1 압괴모드

본 연구에서는 Al/CFRP 사각 구조부재의 적층각도 변화 및 계면수 변화에 따라 충격 압괴실험을 행하였다.

알루미늄 사각 부재는 크게 축대칭 모드와 비축대칭 모드를 이루면서 순차적이고 안정적으로 압괴된다^(11~15). 그러나 CFRP 부재의 경우는 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 결정되며, Farley and Jones⁽¹⁶⁾가 정의한 연속 섬유강화 복합재 튜브의 세가지 압괴모드는 횡방향 전단, 라미

나 굽힘 그리고 국부 좌굴로 압괴된다. 대부분의 취성 섬유 강화 직물 부재는 횡방향 전단 및 라미나 굽힘 모드의 조합으로 압괴된다. 이러한 조합된 압괴모드는 취성파괴 압괴로 불린다.

본 연구에서는 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압괴모드가 결합된 4가지 형태의 압괴모드로 압괴되었다. 이는 CFRP 적층각에 의해서 주로 결정되어진다. Fig. 3에 Al/CFRP 사각 구조부재의 압괴실험 후 나타난 압괴형상을 나타내었다.

Fig. 4(a)는 CFRP 적층각도가 15°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재는 축대칭모드로 압괴되지만 알루미늄의 접힘으로 인한 확장각 외부 CFRP 부재의 모서리 부분에서 기지와 섬유의 파단과 분열을 계기로 알루미늄 부재와 분리되면서 압괴되는 분열 모드(split mode)의 형태로 압괴되었다. 분열 모드의 압괴현상은 주로 섬유가 축 방향과 비슷하게 적층된 경우에 나타나며, 축 방향 섬유의 영향으로 축 하중이 작용되면 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 서로 분리되는 현상이 나타난다.

Fig. 4(b)는 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 대부분 섬유가 끼어 들어가지만 일부 섬유는 끼어 들어가지 못하고 파단 되는 조합 모드(combination mode)의 형태로 압괴되었다. Fig. 4(c)는 CFRP 적층각도가 90°로 적층된 시험편으로 CFRP 부재의 섬유가 알루미늄 부재의 접힘 사이로 대부분 끼어 들어가면서 압괴되는 접힘 모드(folding mode)의 형태로 압괴되었다. 접힘 모드는 주로 CFRP 적층각도가 원주 방향으로 적층된 경우, 즉 적층각도가 큰 경우에 나타나며, 알루미늄 부재와 결합하여 매우 안정적인 압괴모드를 보이며 압괴되었다. Fig. 4(b)의 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편과 Fig. 4(c)는 CFRP 적층각도가 90°로 적층된 시험편의 경우 접힘 모드로 비슷해 보이지만 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편은 알루미늄 접힘 사이로 들어간 섬유가 좌굴과 파단을 이루는

조합 모드이며 CFRP 적층각도 90°로 적층된 시험편은 알루미늄 접힘 사이로 좌굴되는 접힘 모드로 압괴되었으며 최외각층 일부는 계면이 분리되어 모서리에서 파단 되기도 했다. Fig. 4(d)와 (e)는 CFRP 적층각도가 0°와 90°로 조합된 시험편으로 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단 되면서 압괴되는 파쇄 확장 모드(fragmentation and splaying mode)의 형태로 압괴되었다. 파쇄 확장 모드는 축 방향 0°의 섬유가 부재의 외측으로 확장되어 알루미늄 부재와 분리되려하지만 90°의 섬유의 영향으로 확장되면서 90°의 섬유와 함께 파단 되면서 압괴된다.

3.2 에너지흡수 특성

Fig. 5는 은 적층각 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 비교하였다. Fig. 5로 부터 단일 각도로 적층된 경우는 CFRP 적층각이 클 때 즉, 90°로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며, 0°와 90°섬유로 조합된 최외각층 90°의 시험편이 적층각도 변화에 따라 가장 많은 에너지를 흡수하였다.

이는 혼성 사각 부재의 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 hoop stress 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄 부재의 접힘을 방해하면서 전체적으로 높은 하중에서 접힘 이루어지며, 이때 CFRP 부재의 섬유는 알루미늄 부재의 접힘 사이로 끼어들어가면서 두 부재의 결합에 의한 상호작용이 효과적으로 발휘가 되어 안정적인 압괴를 보이며 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, 최외각층 90°인 경우가 내부 0°섬유의 외측으로 확장하려는 라미나 굽힘을 방해하면서 0°섬유가 파단이 되어 더 많은 섬유의 파단으로 인해 가장 많은 에너지를 흡수하였다.

Fig. 6은 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압괴특성을 보인 최외각층 각도가 90°인 0°/90°의 Al/CFRP 사각 구조부재의 계면수 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다. Fig. 6로 부터 압괴하중과 에너지 흡수는 계면수의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 CFRP 부재의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 섬유의 파단 및 크랙 진전이며, 크랙 진전은 크게 층간 크랙(interlaminar cack)과 층내 크랙(intralaminar crack) 및 중심 크랙(central crack)으로 나눌 수 있다. 따라서 CFRP 부재의 경우, 계면수의 증가에 따라 층간 크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가하여 에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났

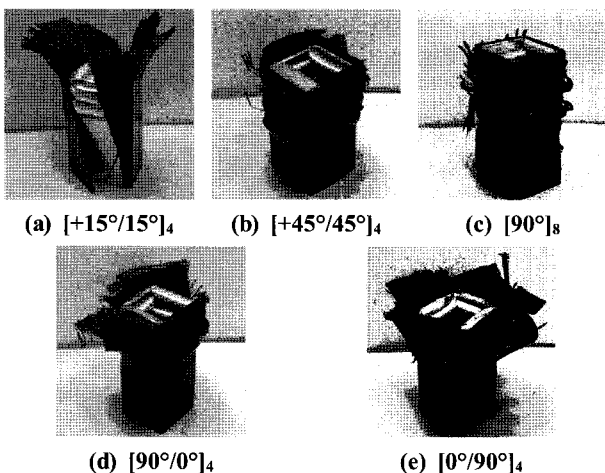


Fig. 4 Collapse modes of Al/CFRP square structural member

지만⁽¹⁷⁾, 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 섬유 파단에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 같은 적층각도를 갖는 혼성 부재의 경우에 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 경량화용 Al/CFRP 사각 구조부재를 제작하여 축 방향 하중을 받을 때의 압괴특성을 고찰하였다.

- (1) Al/CFRP 사각 구조부재는 CFRP 적층각에 따라 분열 모드, 조합 모드, 접힘 모드 및 파쇄 확장 모드로 압괴되었다.
- (2) Al/CFRP 사각 구조부재의 CFRP 적층각이 작을 경우 알

- 루미늄 부재와 CFRP 부재가 서로 분리되면서 알루미늄 부재의 순차적인 압괴와 CFRP 부재의 라미나 굽힘에 의해서 에너지를 흡수하지만, CFRP 적층각이 커질수록 알루미늄 부재의 접힘으로 인한 섬유의 파단과 접힘 사이로 끼어 들어가는 국부 좌굴에 의해서 에너지를 흡수하였다.
- (3) 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 나타났다.
- (4) CFRP 부재의 계면수 변화에 따른 크랙진전에 의한 에너지 흡수량의 변화보다 알루미늄 부재의 소성변형과 섬유의 파단에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 사료된다.

후기

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

참고 문헌

- (1) Kwon, M. S., 2004, "Trend of Korea Automotive Technology (VI)" *Auto Journal*, Vol. 26, No. 6, pp. 30~35.
- (2) 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.
- (3) Yang, Y. J., Cha, C. S., and Yang, I. Y., 2009, "Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped members According to Variation of Interface Numbers under the Hygrothermal Environment," *KSMTE*, Vol. 18, No. 3, pp. 241~247.
- (4) Lee, K. S., Park, E. D., and Yang, I. Y., 2010, "Impact Collapse Behavior of Hybrid Circular Thin-walled Member by Stacking Condition," *KSMTE*, Vol. 19, No. 4, pp. 235~240.
- (5) Avallè, 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,

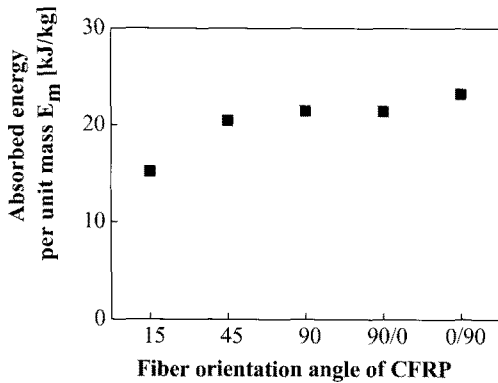


Fig. 5 Absorbed energy per unit mass according to the orientation angle

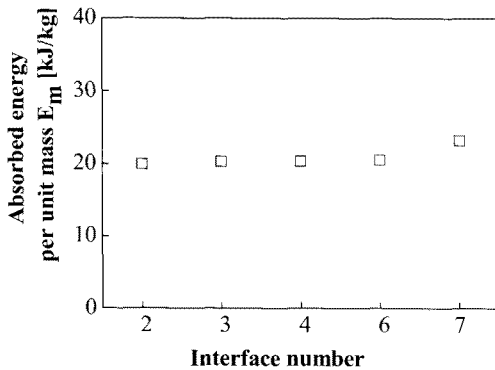


Fig. 6 Absorbed energy per unit mass according to the interface numbers

- 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. 236, pp. 239~244.
- (8) 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.
- (9) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1992, "Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite Tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 3, pp. 388~404.
- (10) Farley, G. L., 1992, "Relationship Between Mechanical-Property and Energy-Absorption Trends for Composite Tubes," *NASA Technical paper.*, OMB No. 0704-0188.
- (11) 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.
- (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) Singace, A. A., 1999, "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-mode," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, pp. 865~890.
- (14) 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. 236, pp. 239~244.
- (15) 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.
- (16) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1992, "Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 3, pp. 388~404.
- (17) Mamilis, A. G., Manolakos, D. E., Demosthenous, G. A., and Johnson, W., 1991, "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating Systems," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 185~196.