

## 적층각도변화에 따른 CFRP & 혼성 모자형 구조부재의 굽힘 특성

김지훈\*, 김정호<sup>+</sup>, 차천석<sup>++</sup>, 양인영<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2007. 10. 30, 심사완료일 2008. 3. 13)

### Bending Characteristic of CFRP & Hybrid Shaped Hat Structure Member According to Stacking Orientation Angle

Ji Hoon Kim\*, Jung Ho Kim<sup>+</sup>, Cheon Seok Cha<sup>++</sup>, In Young Yang<sup>+++</sup>

#### Abstract

In this study, CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) that has high specific strength and elastic modulus and low thermal strain was used as a material for the lightweight structural member. CFRP is a fiber material as anisotropic material. The anisotropic material is characterized by the change of its mechanical properties according to stacking orientation angle. CFRP orientation angle was oriented in  $[A/B]_s$  in order to examine the effect of CFRP orientation angle on the characteristics of energy absorption. CFRP is very weak to the impact from the outside. So, when impact is applied to CFRP, its strength is rapidly lowered. The hybrid material was manufactured by combining CFRP to aluminum which is lightweight and widely used for structural members of the automobile. The hybrid member was shaped as a side member that could support the automobile engine and mount and absorb a large amount of impact energy at the front-end in case of automobile collision. The bending test device was manufactured in accordance with ASTM standard, and mounted to UTM for bending test. For comparing bending characteristics of the hybrid member with those of Aluminum and CFRP member, tests were performed for aluminum, CFRP and hybrid member, respectively.

**Key Words** : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)(탄소 섬유 강화 플라스틱), anisotropic(이방성), orientation angle(적층각도), hybrid(혼성), bending test(굽힘실험)

\* 조선대학교 기계설계공학과  
+ 조선대 대학원 첨단부품소재공학과  
++ 동강대학 소방안전관리과  
+++ 교신저자, 조선대 기계설계공학과 (iyyang@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

## 1. 서론

현대사회에서 재료 성질에 대한 요구는 그 사용조건이 가혹해지고, 복잡화되는 동시에 매우 다양하다. 예를 들면 강도, 강성, 내식성, 경량성, 내구성, 내열성, 차음성, 미관 등에 부합되는 특성을 바라고 있다. 이와 같은 요구를 가능한 많이 만족시키는 단일 재료는 거의 없다고 해도 과언이 아니다. 각각의 요구조건에 맞는 적합한 재료를 이용함으로써 구조물 및 기계기구의 효율증대 및 안정성을 꾀할 수 있을 것이다. 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics)은 복합적층구조재료로서 비강도 및 비강성이 높아 경량화가 요구되는 구조물, 기계기구등에 널리 이용되고 있다. 복합적층구조재료는 기계적 특성이 뛰어난 구조경량재료이며, 높은 강성을 부여하기 위한 적층구조이고 현재는 고강성의 경량재료로서 복합적층구조재료를 폭넓게 이용되어지고 있다. 이러한 적층구조부재재료로 널리 알려져 있고 비강도 및 비강성 특징을 가지고 있는 CFRP재료가 기존 구조재료의 대체 재료로 사용이 증가되고 있는 추세이다. 그러나 CFRP는 이방성 섬유재료의 특징을 가지고 있어서 적층각도와 적층두께의 변화에 따라 기계적 특성이 변하는 특징을 가지고 있다<sup>(1,2)</sup>. CFRP적층두께의 변화와 적층각도의 변화에 대한 연구가 많이 진행되었다<sup>(3-5)</sup>. 본 연구에서는 연료효율증대와 배기가스 감소를 이유로 경량화 되고 있는 자동차 구조물에 CFRP재료를 적용하였고 자동차 구조물과 같은 형상으로 모자형 단면부재를 제작하여 이를 CFRP 모자형 구조부재라고 칭하였다.

또한 CFRP의 단점으로 외부충격에 대해 매우 취약하여 외부 충격하중의 작용이후 강도가 급격히 저하되는 이러한 단점을 보완하기 위해 경량화 재료이면서 자동차 구조부재 재료로 많이 사용되는 사각 알루미늄 튜브에 CFRP를 접착하여 제작하였고, 이를 혼성 모자형 구조부재라고 칭하였다.

자동차 구조 부재에 충격을 가하면 압축, 굽힘, 비틀림이 동시에 작용하게 되는데 CFRP재료와 혼성재료를 적용한 자동차 구조 부재의 압축특성에 대한 연구<sup>(6-8)</sup>는 많이 이루어 졌으나, 굽힘하중에 대한 복합재료특성 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 CFRP 단일재료를 사용한 CFRP 모자형 구조부재와 알루미늄, CFRP 혼성재료를 적용한 혼성모자형 구조부재의 굽힘특성에 대해 비교·고찰한다.

## 2. 시험편

### 2.1 물성치

혼성 모자형 구조부재를 제작하기 위해 탄소 섬유 강화 플라스틱 프리프레그 시트(CFRP prepreg sheet) (HANKUK carbon Cu125NS, Carbon fiber uni-direction 125g/m<sup>2</sup>)와 사각 알루미늄 튜브(Al6063, 가로×세로 : 30×30, t : 1mm)를 사용하였다. 각 재료에 대한 물성치는 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 시험편

사각 알루미늄 튜브에 CFRP 프리프레그 시트(CFRP prepreg sheet)를 붙이기전 접착력을 높이고 접합면을 넓게 하기 위해 사포를 사용하여 알루미늄 표면에 이물질(녹, 먼지 등)을 제거하고 메탄올로 세척하였다. 본 연구에 사용된 시험편의 모양은 실제 자동차의 사이드 부재를 1/4로 축소하여 플랜지 길이가 12mm인 시험편을 제작하고 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1과 같이 적층한 후 모자형 부재모양이 성형될 수 있도록 여러 지그들을 엮고 진공팩을 덮어 autoclave를 사용하여 압축진공성형을 하였다.

서론에서 말했던 것과 같이 CFRP는 적층두께와 적층각도에 따라 기계적 성질이 달라진다. 적층두께에 대한 연구는 많이 진행되었으며, 8ply(2mm) 7계면이 흡수 에너지면에서 가장 우수함을 참고 문헌에서 얻을 수 있었다<sup>(9,10)</sup>. 그래서 적층두께는 8ply 7계면으로 하였고 적층표현은 [A/B]<sub>4</sub>으로 표시하였고 적층각도는 +15/-15, +45/-45, +90/-90, 90/0, 0/90 5종류 4개씩 제작하였다.

Autoclave에 의해 만들어진 시험편의 길이는 규격에 따라 500mm으로 하였다. 잔류응력이 생기지 않도록 다이아몬드 커터를 사용하여 절단하였다.

혼성 모자형 부재와 비교를 하기 위해 CFRP 모자형 부재

Table 1 Characteristics of CF/EPOXY prepreg sheet

Characteristics	Type	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg Sheet (CU125NS)
Density[kg/m <sup>3</sup> ]		1.83×10 <sup>3</sup>	1.24×10 <sup>3</sup>	
Tensile Strength[GPa]		4.89	0.08	2.53
Elastic Modulus		240	3.6	138
Breaking Elongation		21	3	1.7
Poisson's ratio		-	-	0.3
Resin Content		-	-	37[%Wt]
Curing Temperature			130	130

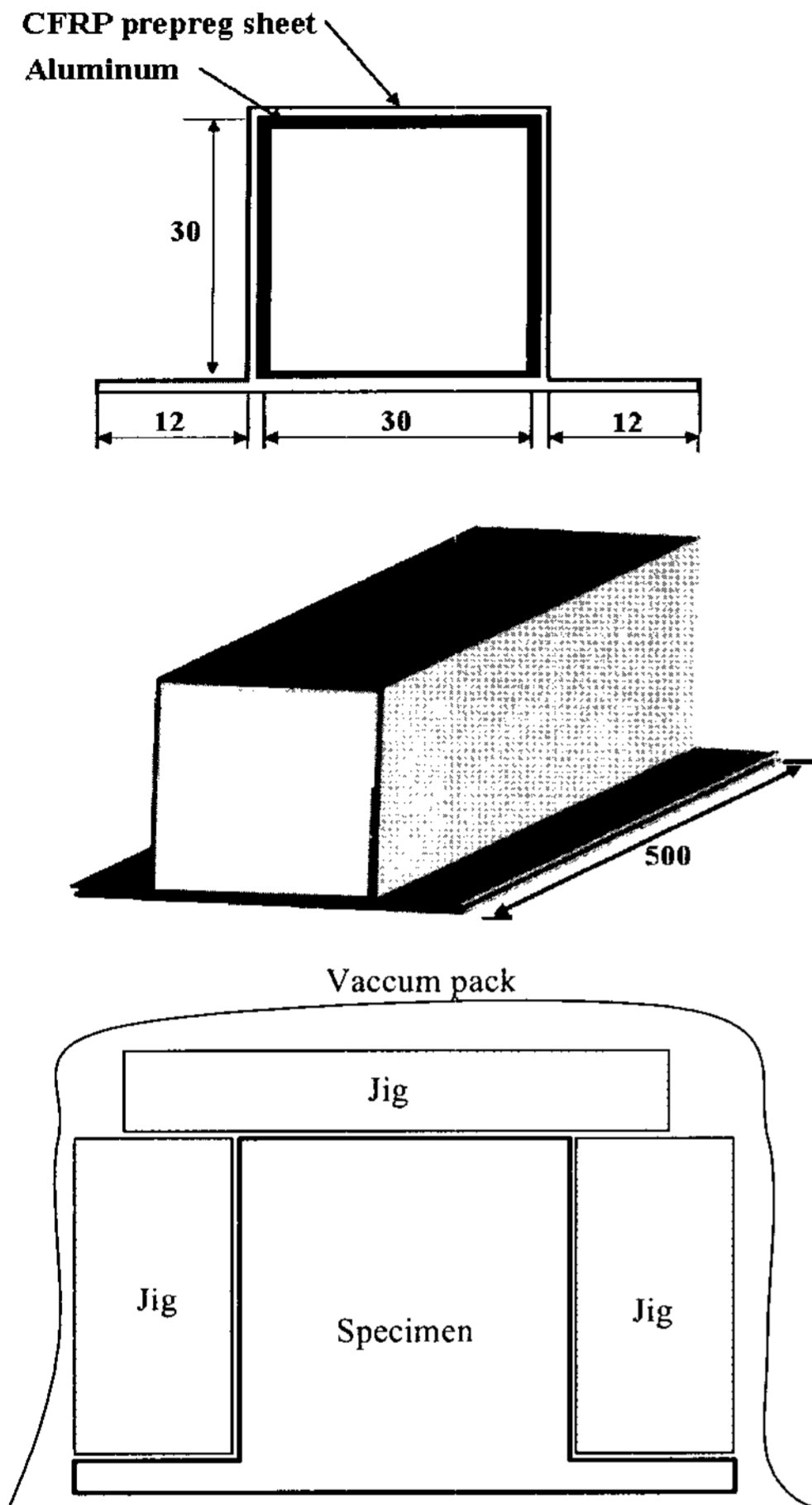


Fig. 1 Configuration of the test specimen

를 같은 방법으로 제작하였다.

### 3. 굽힘 실험

굽힘 실험법에는 3점 굽힘법과 4점 굽힘법이 있다. 특히 3점 굽힘법은 실험하기가 간단하여 많이 사용되었으나 접촉점에서 응력집중으로 인해 순수 굽힘 파괴가 아닌 압괴파괴가 일어나기 쉽고, 전단에 의해 파괴강도의 저하 및 처짐 증가를 가져오는 등 많은 문제점이 있다. 균일한 하중이 작용되는 4점 굽힘법이 옳다고 여겨 4점 굽힘법을 선택하였다. ASTM D6272-02<sup>(11)</sup>의 4점 굽힘 장치에도 1/3 써포트 스패와 1/4 써포트 스패 두 종류가 있다 일반적으로 쓰이는 1/3 써포트 스패를 선택하였고 규격에 따라 반지름 5mm인 반원형으로 된 4점 굽힘 장치(하중점장치, 지지점장치)를 제작하

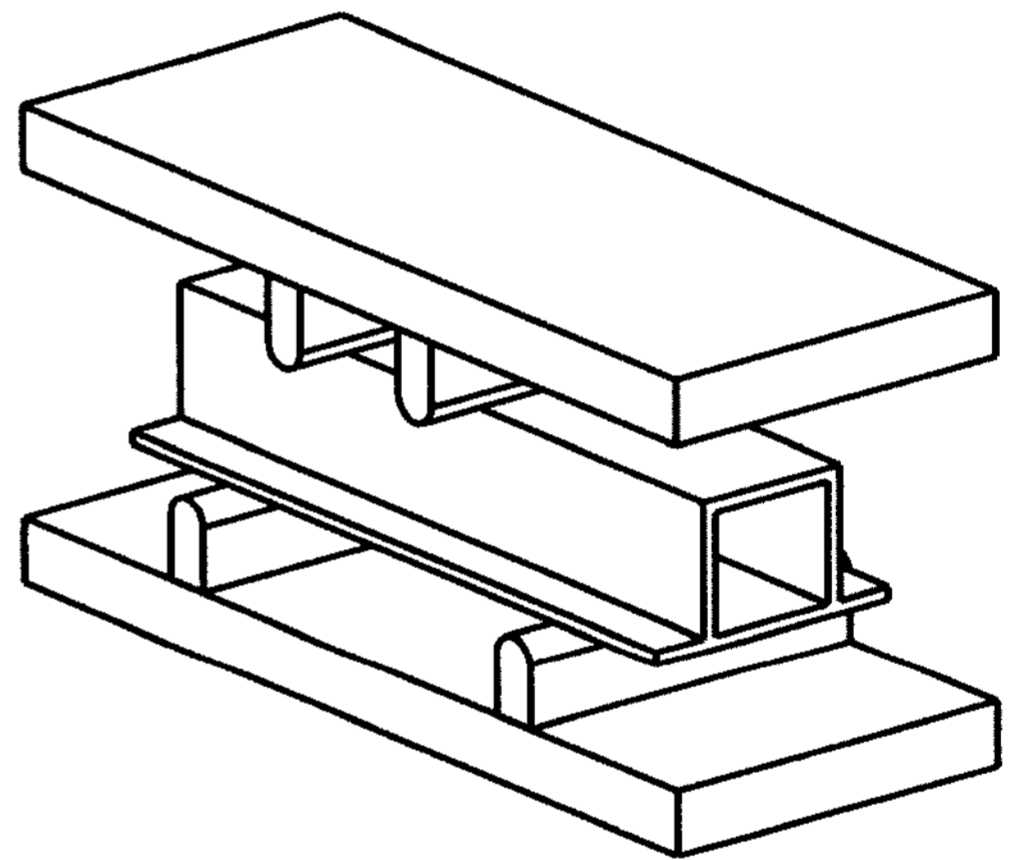
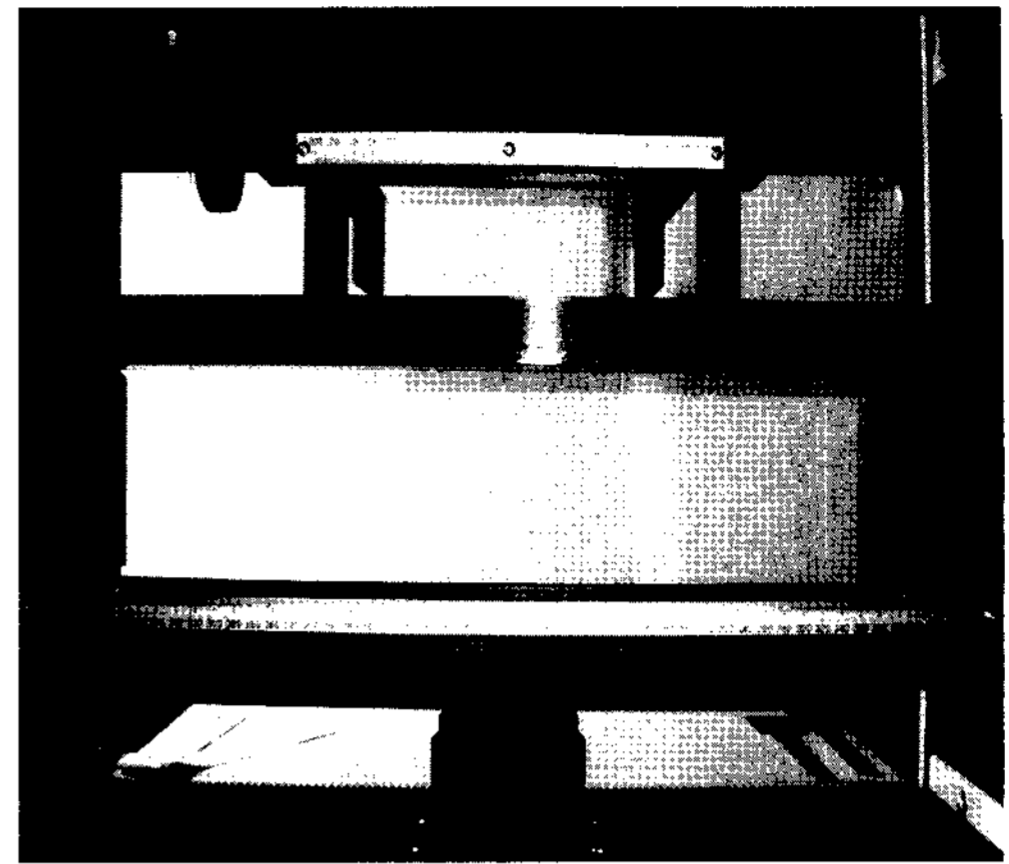


Fig. 2 Picture of four bending test

였고 Fig. 2와 같이 하중점장치와 지지점장치를 만능재료시험기에 설치하여 4점 굽힘 실험 준비하였다. 사각 알루미늄 튜브, CFRP 모자형 부재 그리고 혼성 모자형 부재를 굽힘 실험을 하였고, 실험 후 하중-변위 그래프를 얻었다.

굽힘 실험에서는 최대하중을 넘어서게 되면 하중이 급격히 저하됨을 볼 수 있다. 이것은 전단력에 의해 mode II로의 층간파괴가 발생된 것으로 이점까지의 에너지를 흡수 에너지로 보고 특성을 해석하였다.

굽힘 강도와 흡수에너지는 각 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$\sigma = \frac{My}{I} \tag{1}$$

$\sigma$ 는 굽힘 강도이며 단위는  $kPa$ 이고,  $M$ 는 굽힘 모멘트이며 단위는  $N \cdot mm$ 이고,  $y$ 는 도심이다. 그리고  $I$ 는 단면2차모

멘트이고 단위는  $mm^4$ 이다.

$$E_a = \int_0^S P dS \quad (2)$$

$E_a$ 는 흡수에너지이며 단위는  $kPa$ 이고,  $S$ 는 최대하중까지의 길이이며  $P$ 는 하중이고 단위는  $kN$ 이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

4점 굽힘 실험을 한 사각 알루미늄, CFRP 모자형 부재와 혼성 모자형 부재의 하중-변위선도 그래프를 Fig. 3에 나타내었다.

각각의 하중-변위에 의해 굽힘 강도와 흡수에너지를 식

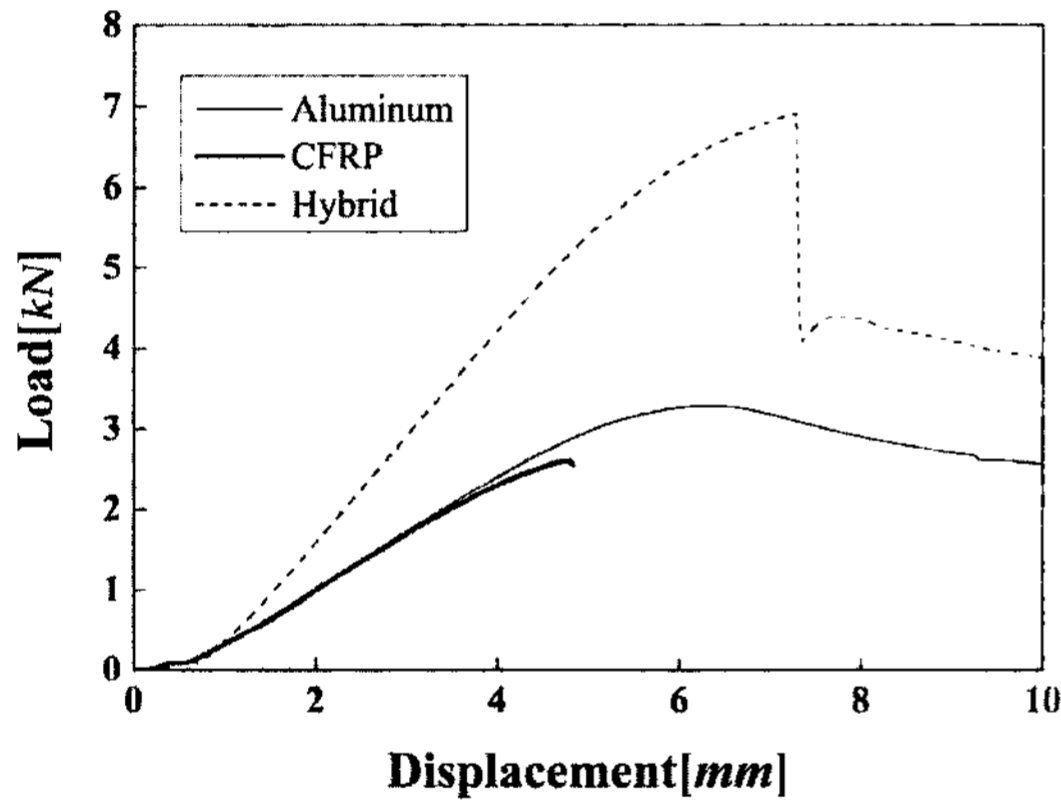


Fig. 3 Load-displacement diagram by four points bending test

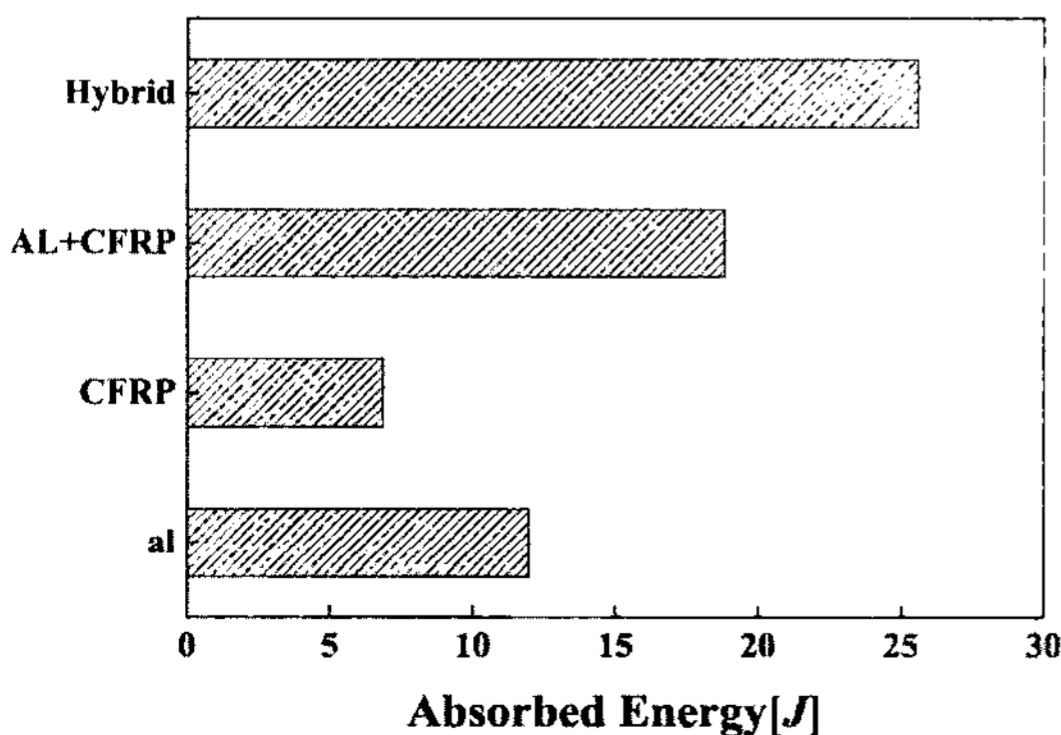


Fig. 4 Comparison absorbed energy - hybrid, CFRP and aluminum

(1)과 (2)에 의해 구하였고 사각 알루미늄과 CFRP 모자형 부재의 각각의 흡수에너지를 합한 흡수에너지와 혼성 모자형 부재의 흡수에너지를 서로 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 알루미늄부재와 CFRP 모자형 구조부재의 흡수에너지를 합한 값보다 혼성 모자형 부재의 흡수에너지가 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 알루미늄과 CFRP를 복합하여 만든 혼성 모자형 구조부재가 각 두가지 부재의 흡수에너지를 합한 것보다 더 높은 효과를 얻을 수 있어 경량화 구조부재로서 적합하다는 것을 증명할 수 있었다.

굽힘 실험한 CFRP 모자형 부재와 혼성 모자형 부재에서 얻은 굽힘 강도와 흡수에너지를 Fig. 5 ~ 8에 각각 나타내었다. Fig. 5에서는 적층각도 변화에 따른 CFRP 모자형 부재는 적층각도가  $15^\circ$ 에서  $90^\circ$ 로 변할수록 굽힘 강도가 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 적층각도가 축 방향에 가까울수록( $0^\circ$ 에 가까울수록) 섬유파단과 기지파괴의 복합작용으로 굽힘 강도가 높아지지만, 적층각도가 축 방향과 수직에 가까울수록 섬유파단 없이 기지파단만 작용되기 때문임을 알 수 있고 굽힘 강도는 기지의 강성보다는 섬유강도에 의존함을 알 수 있다.

적층각도 변화에 따른 혼성 모자형 부재의 굽힘 강도를 나타낸 Fig. 6에서는 적층각도가  $15^\circ$ 에서  $90^\circ$ 로 변할수록 굽힘 강도가 낮아져 CFRP 모자형 부재의 굽힘강도특성과 유사함을 보였고,  $0/90$ ,  $90/0$ ,  $+15/-15$ 부재의 굽힘강도가 서로 비슷하고 제일 높았다.

적층각도 변화에 따른 CFRP 모자형 부재의 흡수에너지를 나타낸 Fig. 7은  $+45/-45$ 부재가 가장 높았고  $+15/-15$ 부

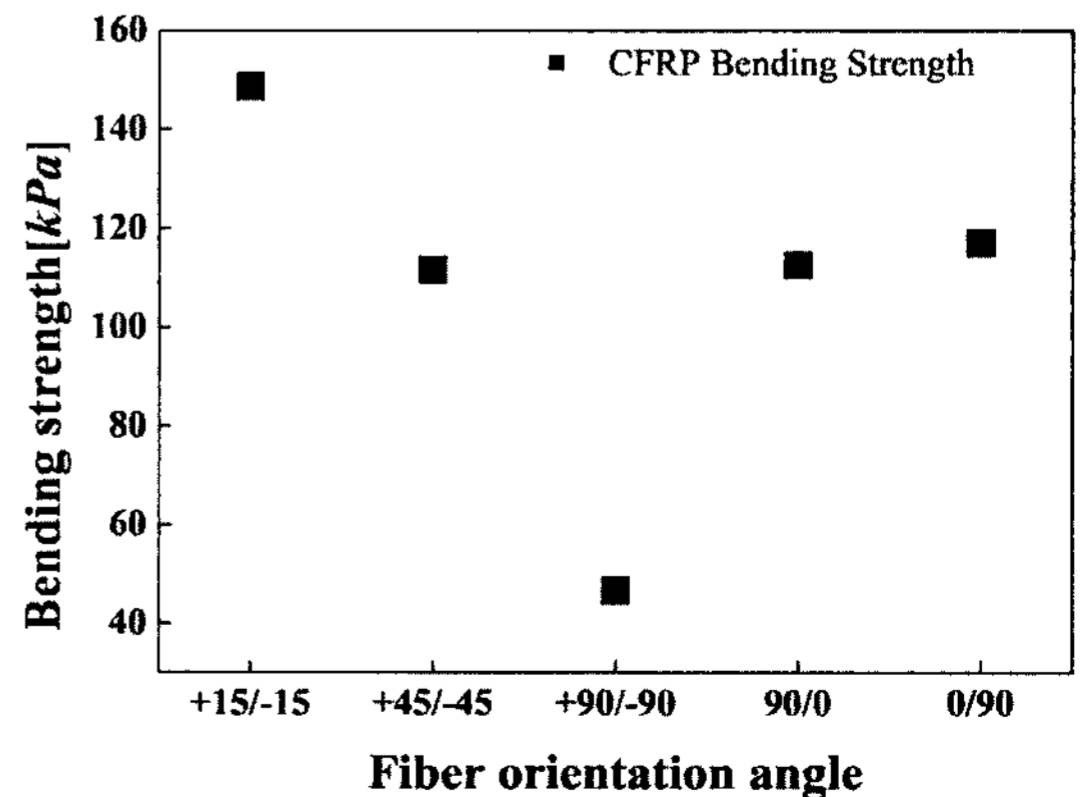


Fig. 5 CFRP bending strength with change of fiber orientation angle by four bending test

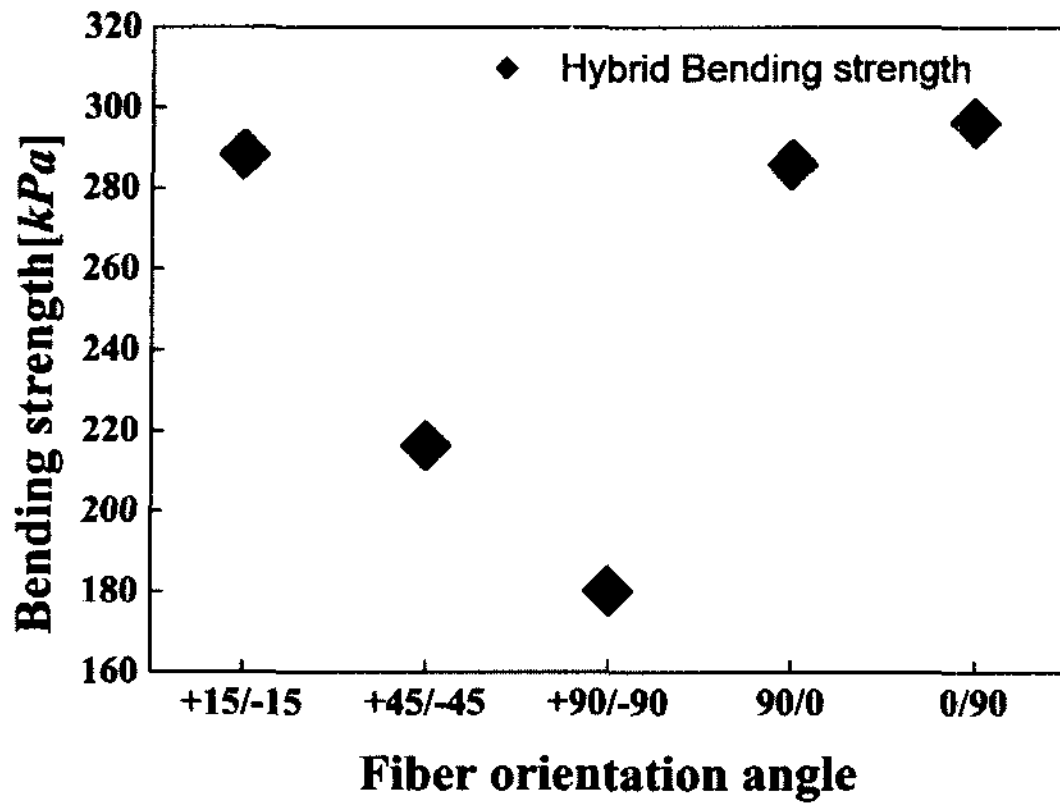


Fig. 6 Hybrid bending strength with change of fiber orientation angle by four bending test

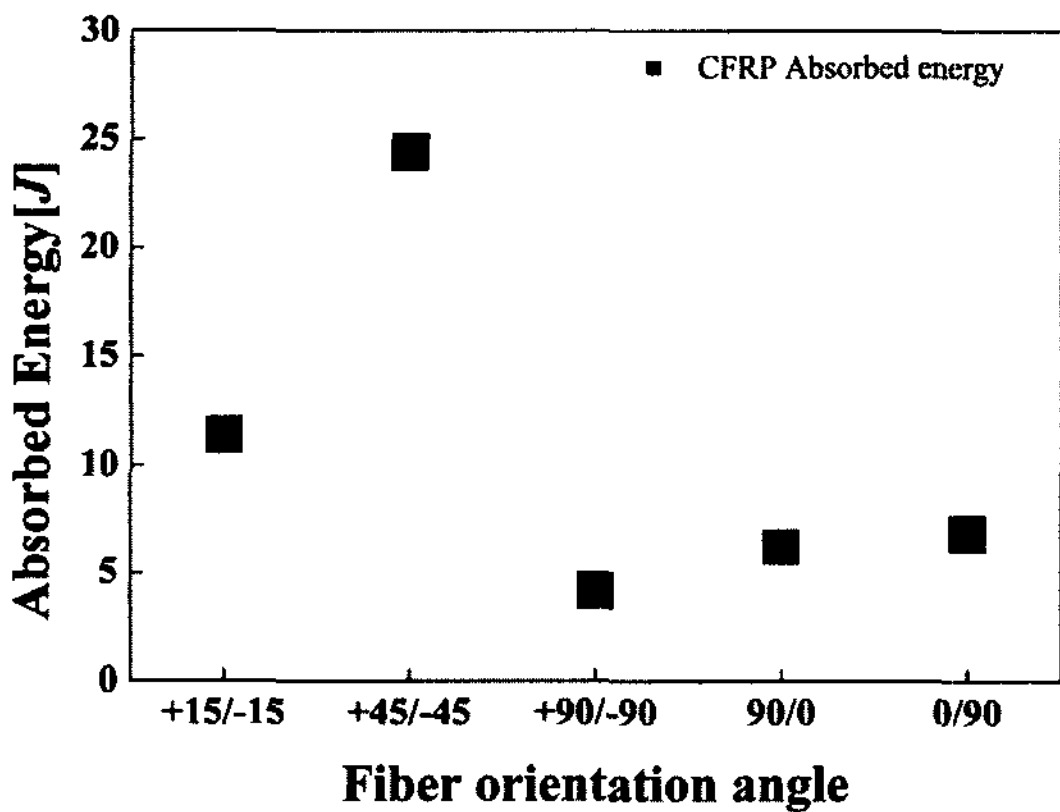


Fig. 7 CFRP absorbed energy with change of fiber orientation angle by four bending test

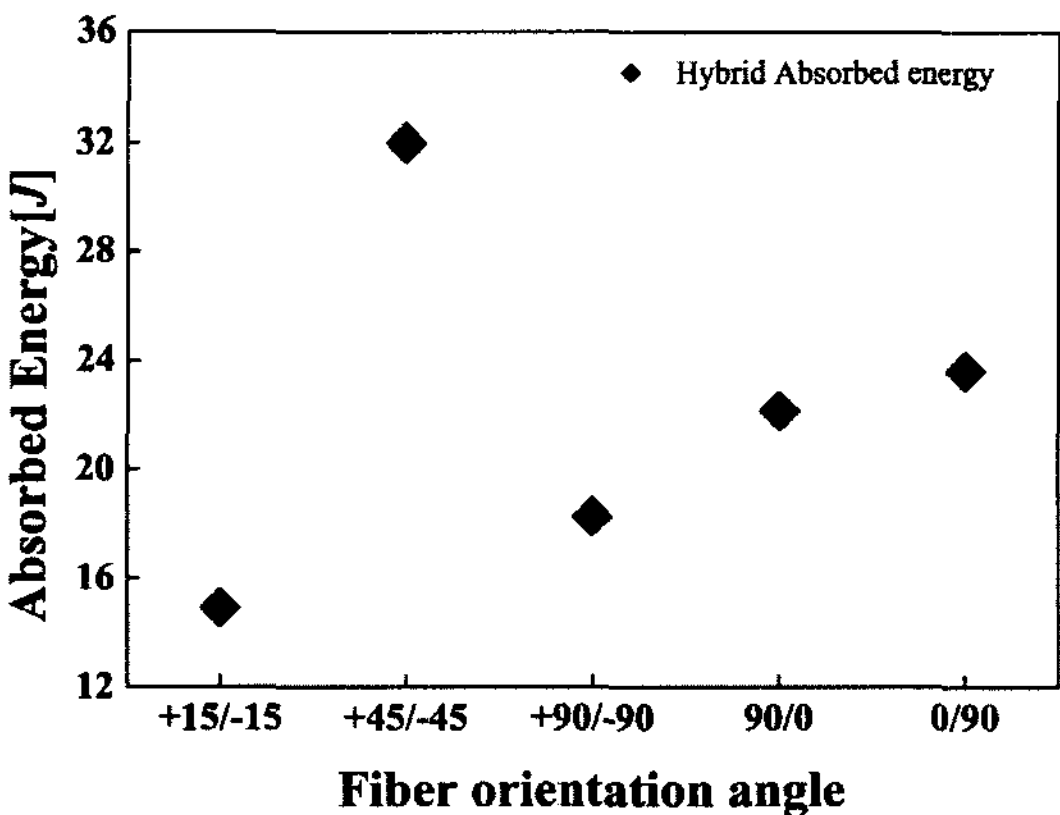


Fig. 8 Hybrid absorbed energy with change of fiber orientation angle by four bending test

재가 두번째로 높았다. +45/-45부재에 굽힘 하중이 받으면, 굽힘작용면의 상하좌우에서 섬유와 기지파단 작용이 평균적으로 높게 나타나 흡수에너지가 가장 높음을 알 수 있다.

적층각도 변화에 따른 혼성 모자형 부재의 흡수에너지를 나타낸 Fig. 8에서 +45/-45부재가 제일 높고, CFRP 모자형 부재의 흡수에너지에서의 경향과 다르게 +15/-15부재보다 +90/-90부재가 높았다. 이는 사각 알루미늄에 힘이 발생할 때 90°방향의 CFRP가 힘작용을 방해하여 +15/-15부재보다 흡수에너지가 높게 나타났다.

90/0부재와 0/90부재의 굽힘 강도와 흡수에너지가 거의 비슷하나 약간의 차이가 보이는 것은 사각 알루미늄에 굽힘 하중이 작용될 때 가장 근접한 섬유방향의 영향으로 인해 약간의 차이 때문이다.

## 5. 결론

본 연구에서 사각 알루미늄과 CFRP를 접합한 경량화용 구조부재인 혼성 모자형 부재를 제작하여, 경량화용 구조부재로서 적합유무를 판단하고, 적층변화에 따른 굽힘 실험을 하였다. 그리고 굽힘 강도와 흡수에너지를 측정·분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 사각 알루미늄과 CFRP를 복합하여 만든 혼성 모자형 구조부재가 이들 각 두가지 부재의 흡수 에너지를 합한 것보다 더 높은 효과를 얻을 수 있어 경량화 구조부재로서 적합하다는 것을 증명할 수 있었다.
- (2) CFRP 모자형 부재의 굽힘 강도는 적층각도가 15°에서 90°로 변할수록 굽힘 강도가 낮아진다. 이는 적층각도가 축 방향에 가까울수록(0°에 가까울수록) 섬유파단과 기지파단의 복합작용으로 굽힘 강도가 높지만, 축방향이 수직에 가까울수록 섬유파단 없이 기지파단만 작용되어 굽힘 강도 낮아진다.
- (3) 혼성 모자형 부재의 굽힘 강도는 15°에서 90°로 변할때의 굽힘 강도 경향은 CFRP 모자형 부재의 굽힘 강도 특성과 유사함을 보였고, 0/90, 90/0, +15/-15부재의 굽힘 강도가 서로 비슷하고 제일 높았다.
- (4) CFRP 모자형 부재의 흡수에너지는 +45/-45부재가 가장 높았고 +15/-15부재가 두번째로 높았다. +45/-45부재의 경우에 굽힘 하중이 받으면, 굽힘작용면의 상하좌우에서 섬유와 기지파단 작용이 평균적으로 높게 나타나 흡수에너지가 가장 높음을 알 수 있다.
- (5) 혼성 모자형 부재의 흡수에너지는 +45/-45부재가 제일

높고, CFRP 모자형 부재의 흡수에너지에서의 경향과 달리 +15/-15부재보다 +90/-90부재가 높았다. 이는 사각 알루미늄에 힘이 발생할 때 90°방향의 CFRP가 휨작용을 방해하여 +15/-15부재보다 흡수에너지가 높게 나타났다.

## 후 기

이 논문은 2008년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim J. H., Yang I. Y., and Sim J. K., 2003, "Evaluation of Fracture Toughness of Dynamic Interlaminar for CFRP Laminate Plates by Resin Content," *KSMTE*, Vol. 12, No. 4, pp. 43~49
- (2) Im K. H., Park N. S., Ra S. W., Kim Y. N., Lee H., Sim J. K., and Yang I. Y., 2001, "Characteristics of Low Velocity Impact Responses due to Interface Number and Stacking Sequences of CFRP Composite Plates," *KSMTE*, Vol. 10, No. 6, pp. 48~56.
- (3) Kim Y. N., Im K. H., Park J. W., and Yang I. Y., 2000, "Experimental approach on the collapse mechanism of CFRP composite tube," *Reviews of progress in QNDE*, pp. 369~376.
- (4) Lee K. S. and Yang I. Y., 2006, "Influence of stacking Conditions on the Collapse Characteristics of CFRP Side Member," *KSMTE spring conference*, Vol. 20, No. 5, pp. 397~402.
- (5) Cha C. S., Lee K. S., Kim S. H., Ching J. O., and Yang I. Y., 2005, "Axial Collapse Characteristics of Aluminum/CFRP Compound circular Tube," *Key Engineering materials*, Vols. 297~300, pp. 166~171.
- (6) Shin K. C., Lee J., Kim K. H., Song M. C., and Huh J. H., 2002, "Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid tube and its energy absorption capability," *Composite structure*, Vol. 57, pp. 279~287.
- (7) Mamalis A. G., Manolacos D. E., Ioannidis M. B., and Papapostolou D.P., 2004, "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tube: experimental," *Composite structure*, Vol. 63, pp. 347~360.
- (8) Robert M. J., 1992, "Crushing characteristics of continuous fiber-reinforced composite tubes," *Journal of composite materials*, Vol. 26, No. 1.
- (9) Lee K. S., Cha C. S., and Yang I. Y., 2005, "A Study on the Axial Crushing Behavior of Aluminum CFRP Circle Members for Light Weight," *transactions of KSAE*, Vol. 13, No.5, pp. 50~56.
- (10) Yang I. Y., Lee K. S., Kim Y. N., Chung J. O., and Cha C. S., 2006, "Axial Crushong Behavior and Energy Absorption Capability of Al/CFRP Square tubes for Light Weights," *Key Engineering materials*, Vols. 306~308, pp. 297~302.
- (11) ASTM, 2003, *Standard Test Method for Flectural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical including Materials*, ASTM D6272-02:2003, American Society for Testing and Materials.