

< 논문 >

경량화용 사이드부재의 적층구성 및 단면형상 변화에 따른 에너지흡수 특성

이길성* · 서현경* · 양인영** · 심재기†
(2007년 1월 30일 접수, 2007년 5월 18일 심사완료)

Energy Absorption Characteristics of Side Member for Light-weight Having Various Stacking Condition and Shape of Section

Kilsung Lee, Hyeonkyeong Seo, Inyoung Yang and Jaeki Sim

Key Words: CFRP Side Member(CFRP 사이드부재), Spot Welded Side Member(점용접사이드부재), Stacking Condition(적층구성), Shape of Section(단면형상), Energy Absorption Characteristics(에너지흡수특성)

Abstract

Front-side members of automobile, such as the hat shaped section members, are structures with the greatest energy absorbing capability in a front-end collision of vehicle. This paper was performed to analyze energy absorption characteristics of the hat shaped section members, which are basic shape of side member. The hat shaped section members consisted of the spot welded side member which was utilized to an actual vehicle and CFRP side member for lightweight of vehicle structural member. The members were tested under static axial loading by universal testing machine. Currently, stacking condition related to the collapse characteristics of composite materials is being considered as an issue for the structural efficiency and safety of automobiles, aerospace vehicles, trains, ships even elevators during collision. So, energy absorption characteristics were analyzed according to stacking condition and shape of section and compared the results of spot welded side member with those of CFRP side member.

1. 서론

최근 자동차 설계에 있어서의 가장 중요한 목표는 친환경적인 측면과 안전성능에 대한 측면으로 집약될 수 있다. 친환경적인 문제는 연비개선, 배기가스 규제에 대해 차량의 경량화에 초점이 맞추어져 있는 반면에 고안전, 승차감, 고성능 및

다기능화에 대한 안전성의 문제는 여러 가지 부품 장착 등으로 인해 무게 증가의 요인으로 작용되고 있다. 따라서 자동차의 설계는 안전성이 확보된 상태에서 차체의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다.⁽¹⁻¹¹⁾

충돌 시에 승객을 보호하는 능력을 충돌 안전성능이라 하는데 이것은 차체 구조부재가 충돌시 얼마나 많은 충돌에너지를 흡수하느냐에 달려있으며, 충돌조건, 차량구조, 승객 구속장치 등의 요건으로 결정된다.

자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태

† 책임저자, 회원, 조선대학교 메카트로닉스공학과

E-mail : jgsim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7840 FAX : (062)222-7705

* 회원, 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과

** 회원, 조선대학교 기계설계공학과

이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량 설계에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다.

자동차가 전면 충돌할 경우, 차체 부재중 사이드부재가 충돌에너지의 대부분을 부재의 연속적인 대변형에 의한 소성에너지에 의해 흡수하며, 사이드부재는 주로 단일 모자형 단면형상을 갖는 강도부재로 구성되어 있다. 이와 같은 사이드부재가 많은 충돌에너지를 흡수하기 위해서는 강성이 큰 강도부재가 요구되며, 탑승자에 가해지는 충격을 적게 하기 위해서는 차체 감속도를 낮게 하기 위해 강도부재가 안정적인 접합이 이루어져야 한다.

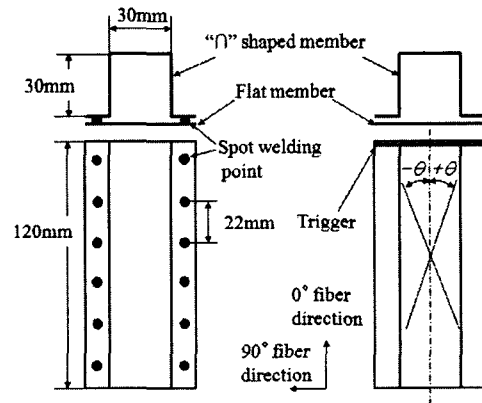
이러한 강도부재로 사용되고 있는 구조부재의 압溃특성에 대한 연구는 여러 가지 재질과 다양한 단면형상에 대해서 행해지고 있다.⁽³⁻¹¹⁾ 실제 수송기계의 강도부재인 점용접 사이드부재에 대하여 압溃 특성 및 다양한 단면형상에 따른 연구가 진행되고 있으며,⁽²⁻⁵⁾ 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 복합재료를 이용한 균일 단면 구조부재의 에너지 흡수 능력에 대한 연구가 행해지고 있다.⁽⁶⁻¹¹⁾ 특히 복합재료는 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 우수하고 설계요건에 따라 적층배향을 적절히 선정할 수 있어 다양한 재료와 단면형상에 따른 에너지 흡수 능력에 관하여 폭넓은 연구가 진행 중이다.⁽⁹⁻¹¹⁾

본 연구에서는 경량화 차원에서 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP라 한다.)로 단일 모자형태의 사이드부재를 제작하여 축방향 정적압溃실험을 행하였으며, 실제 자동차 사이드부재로 주로 사용되고 있는 단일 모자형의 점용접 사이드부재와 에너지 흡수 특성에 관하여 비교·고찰하고자 한다. 특히, CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이므로, 적층각도를 변화시켜 에너지흡수 특성을 고찰하고, 모서리 부분의 단면적을 변화시켜 강성을 증가시킨 단면형상의 변화에 따른 에너지흡수특성을 고찰하고자 한다. 이와 같은 압溃현상의 메카니즘을 분석하여 구조부재의 압溃특성을 이해하고, 최적의 차체구조설계에 이용 가능한 정보와 데이터를 얻고자 한다.

2. 시험편

자동차 전면 충돌 시 가장 많은 에너지를 흡수

하는 차량 전면부 사이드부재는 두께 1.2~1.8mm 고장력 강판의 “∩”자형과 평판을 점용접한 것으로 폭(가로×세로) = (100~140) × (50~100)mm, 길이 = (500~700)mm가 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 실제 전면부 사이드부재의 1/4크기인 폭(가로×세로) = 30 × 30mm, 플랜지 길이 = 12mm로 “∩”자형과 평판부재가 결합된 점용접 사이드부재와 CFRP 사이드부재를 제작하였다. 점용접 사이드부재는 자동차 바디에 주로 사용되고 있는 SCP1 냉간압연 강판을 점용접하여 제작하였으며 CFRP 사이드부재는 CFRP 프리프레그시트(한국화이버, CU125NS, Carbon fiber Unidirection 125g/m²)를 사용하여 오토클레이브에서 진공 압축 성형하여 제작하였다. Table 1에 시험편에 사용된 재료의 물성치를 나타냈다.



(a) Spot welded side member (b) CFRP side member
Fig. 1 Configuration of the side members

Table 1 Material properties of the specimens

	Fiber (carbon)	Resin (Expoxy #2500)	Prepreg sheet	SCP1
Density [kg/m ³]	1.83×10 ³	1.24×10 ³		7.80×10 ³
Poisson's ratio	-	-	0.3	0.31
Young's Modulus [Gpa]	240	3.60	132.7	207
Tensile stress [Gpa]	4.89	0.08	1.85	0.30
Resin content [% Wt]	-	-	33	-

점용접 사이드부재는 이론적 접합길이(국부좌굴)가 22mm인 것을 감안하여,⁽⁹⁾ 점용접간격을 22mm로 하여 시험편의 끝부분으로부터 5mm 떨어진 위치에서 시작하였고, 점용접 타점은 직경 6mm로 하여 상하 대칭이 되도록 하였다.

CFRP 사이드부재의 에너지흡수특성은 적층조건에 영향을 받기 때문에 적층각도가 에너지 흡수 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 적층구성을 $[\theta/\theta]_4$ 로 하여 성형하였다.

여기서 θ 는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하였다. 0°로 적층한 시험편의 경우 축방향과 평행한 섬유 방향의 영향으로 초기 매우 높은 하중에서 파괴가 시작됨과 동시에 층간크랙 진전에 의해 시험편이 분리되고 마지막까지 압축이 진행되지 않아 에너지흡수 측면에서 효과적이지 못해 제외하였다. 또한, 강도부재가 축하중을 받을 때 응력분포는 대부분 모서리 부분에서 집중되면서 압축된다. 따라서 모서리 부분의 단면적을 변화시키기 위하여 평판부재에 대한 “ \cap ”자형 부재의 단면적을 변화시킨 단면형상 변화에 따른 압축특성을 고찰하였다. 단면적비는 평판 부재의 단면적에 대한 “ \cap ”자형 부재의 단면적으로 정의하고 1.05, 2.11 및 5.27의 단면적비에 대하여 평판부재와 “ \cap ”자형 부재의 프리프레그 적층수를 각각 12ply:6ply, 8ply:8ply 및 4ply:10ply로 적층하여 각 부재에 대한 적층 수(두께)에 따른 단면형상을 변화시켰으며, 전체 단면적은 비슷하게 하여 제작하였다.

CFRP의 가장 취약한 특성은 취성문제이며, 압축초기에 최대하중이후 급격한 파괴가 발생하여 하중이 급격히 떨어지게 되고, 그로 인해 층내 및 층간 등의 크랙이 성장하게 되어 초기 압축하중 후의 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 일반적으로 한쪽 끝단에 Initiator 또는 고의의 결함(트리거)을 주어 순차적이고 국부적인 압축을 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 하는데,^(9,10) 본 연구에서는 시험편 하중이 작용하는 끝단을 45°로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다. 모든 시험편의 길이는 다이몬드 커터를 이용하여 120mm로 절단하였다.

3. 압축실험

만능재료시험기를 사용하여 10mm/min의 변형

률 속도로 제어하면서 균일한 압축하중이 가해지도록 준정적 압축실험을 행하였다. 또한, 시험편 압축길이는 단부효과(End effects)가 나타나지 않고 순차적인 압축이 주기적으로 발생하도록 전체 길이 (120mm)의 58.3% (60mm)까지 축 방향으로 변위를 제어하면서 연속적으로 압축실험을 행하였다.

압축실험은 각 시험편당 5~7회 수행하여 데이터의 평균값을 취하였다. 압축실험 후 얻어진 5~7회의 데이터의 오차는 4% 이내였다.

시험편에 흡수된 에너지량의 계산은 Figs 3~7에서와 같이 압축실험에서 얻은 하중-변위선도의 면적을 흡수에너지로 하여, 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 구하였다.

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

여기서, E_a 는 흡수에너지, P 는 압축하중, S 는 시험편의 압축된 길이를 나타낸다.

단위체적당 흡수에너지와 단위질량당 흡수에너지는 각각 압축된 부분의 체적과 질량으로 나누어 식 (2), (3)과 같이 구하였다.

$$E_V = \frac{E_a}{AS} \quad (2)$$

$$E_M = \frac{E_a}{\rho AS} \quad (3)$$

여기서, E_V 와 E_M 는 각각 단위 체적당 흡수에너지와 단위 질량당 흡수ener지를 나타내며, ρ 와 A 는 각각 밀도와 단면적을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압축모드

Fig. 2는 압축실험 후 시험편의 압축모드를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서와 같이 점용접 사이드부재는 축하중이 작용될 때 “ \cap ”자형 부재에 응력이 집중되고, 상대적으로 좌굴하중이 낮은 평판부재의 좌굴이 계기가 되어서 압축이 된다. 평판부재가 부재의 내부로 변형될 때 마주보는 “ \cap ”자형 부재는 부재의 외부로 변형되면서 규칙

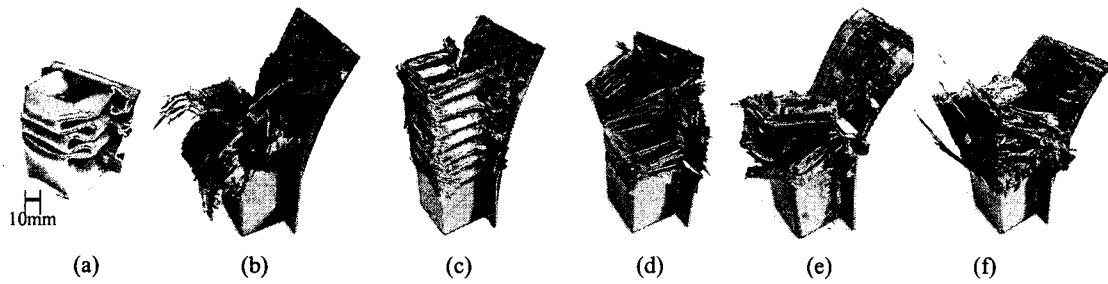


Fig. 2 The Collapse mode of specimens: (a) spot welded member (b) CFRP side member, [+15/-15]₄ (c) CFRP side member, [+45/-45]₄ (d) CFRP side member, [90]₈ (e) CFRP side member, [0/90]₄ (f) CFRP side member, [90/0]₄

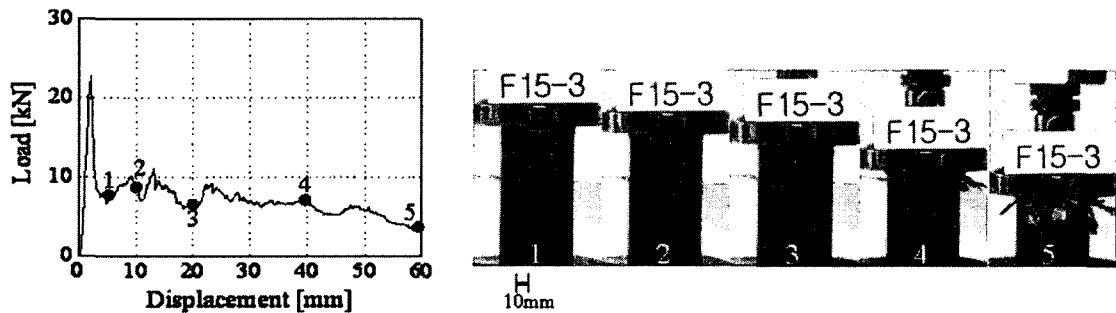


Fig. 3 Load-displacement curve of CFRP side member and deformation histories, [+15/-15]₄

적이고 안정적인 평형모드의 형태로 압괴된다.

연속섬유강화 복합재 박벽부재(Thin-wall member)에 축 압축하중이 작용시 발생하는 압괴유형은 횡방향전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드 및 취성파괴 압괴모드와 국부좌굴 압괴모드의 4가지 모드의 조합으로 나타나며,⁽¹⁰⁾ 본 연구에서 사용된 CFRP 사이드부재는 Fig. 2의 (b)~(f)와 같이 적층각에 따라 4가지의 압괴모드가 조합된 형태로 압괴되었다.

±15°로 적층된 부재에서는 Fig. 2의 (b)와 같이 층간크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압괴되었으며, 이러한 압괴모드는 층간 크랙 진전에 의한 라미나 굽힘과 섬유 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. ±45°로 적층된 부재에서는 (c)와 같이 평판부재는 부재의 외측으로 확장되지만, “∩”자형 부재는 접합모드의 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 층간 크랙의 진전 및 국부좌굴에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 90°로 적층된 부재에서는 (d)와 같이 횡방향의 기지 파단에 의한 파쇄모드의 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 주로 횡방향 전단모드에 의한

기지의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 0°/90°로 적층된 부재에서는 (e)와 같이 평판부재는 부재의 외측으로 확장되지만, “∩”자형 부재는 대부분의 섬유와 기지가 불규칙적으로 절단되는 파쇄모드의 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 주로 평판부재의 층간 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 “∩”자형 부재의 횡방향 전단모드에 의한 섬유 및 기지의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 90°/0°로 적층된 부재에서는 (f)와 같이 평판부재는 부재의 외측으로 확장되지만, “∩”자형 부재는 최외층 0°의 섬유는 외부로 확장되지만 내부에 있는 섬유는 확장되는 섬유의 사이로 절단되면서 압괴되는 썩기형 모드의 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 주로 평판부재의 층간 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 “∩”자형 부재의 횡방향 전단모드에 의한 섬유 및 기지의 파단과 함께 층간 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘에 의해서 에너지를 흡수한다.

4.2 적층각도에 따른 에너지흡수 특성

Figs. 3~7은 적층각도의 변화에 따른 각각의 시험편에 대한 정적 압괴실험 후 얻어진 하중변위

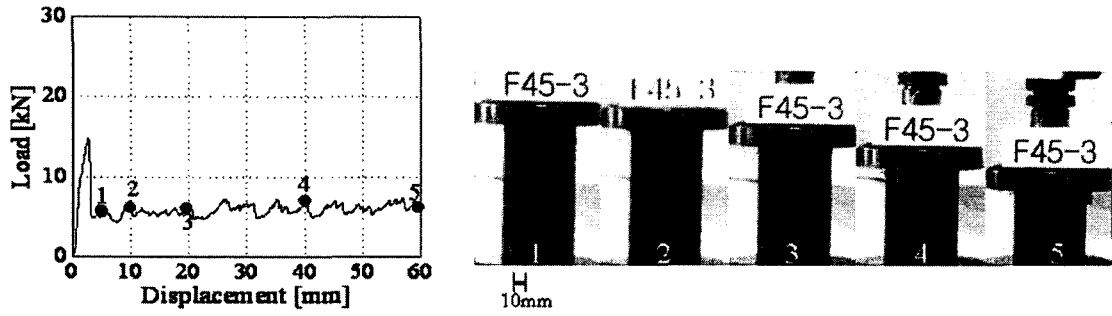


Fig. 4 Load-displacement curve of CFRP side member and deformation histories, [+45/-45]₄

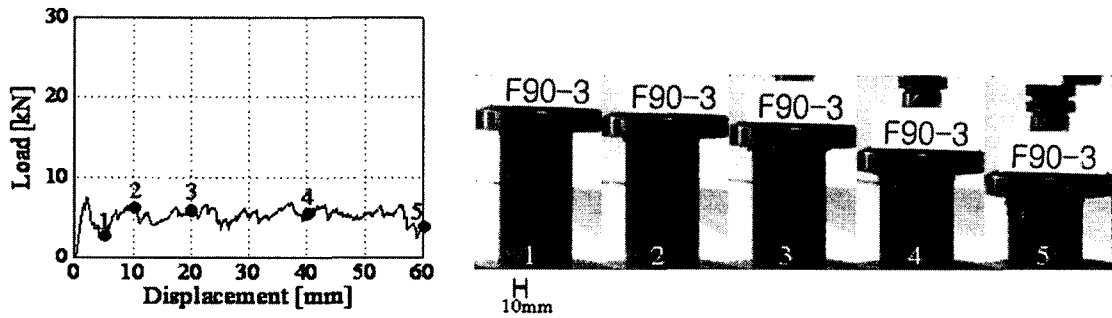


Fig. 5 Load-displacement curve of CFRP side member and deformation histories, [90]₈

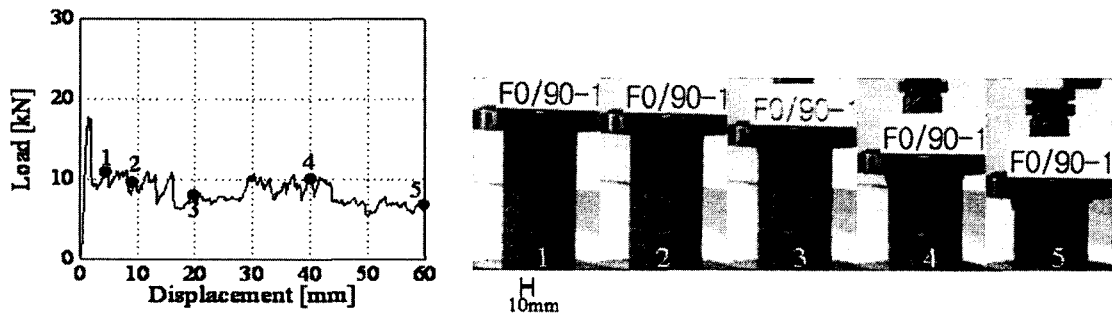


Fig. 6 Load-displacement curve of CFRP side member and deformation histories, [0/90]₄

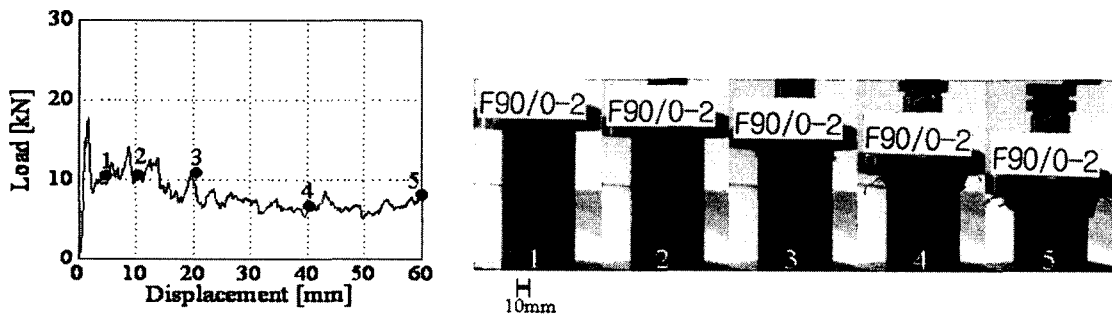


Fig. 7 Load-displacement curve of CFRP side member and deformation histories, [90/0]₄

선도와 압제과정을 나타낸 그림이다. 압제되는 동안 변형과정을 살펴보면, $\pm 15^\circ$ 로 적층된 시험편(Fig. 3)은 축방향과 비슷하여 매우 높은 하중에서 파괴가 시작되며 스플라인 형상으로 외부로 확장되어 라미나 굽힘에 의해서 압제되며 $\pm 45^\circ$ 로 적층된 시험편(Fig. 4)은 주로 금속재료에서 보이는 압제형상과 같이 일부 기지의 파단을 동반한 국부좌굴 형태의 굽힘모드로 압제되었으며 축방향과 직각인 90° 로 적층된 시험편(Fig. 5)은 초기 파괴에 섬유가 거의 영향을 미치지 않아 매우 낮은 하중에서 파괴가 시작되고 섬유의 파단이 아닌 기지의 파단에 의해 압제되었다. 또한 $0^\circ/90^\circ$ 로 적층된 시험편(Fig. 6)은 축방향과 직각인 최외층 90° 섬유의 영향으로 내부 0° 의 섬유가 외부로 확장되지 못하고 섬유와 기지의 파단에 의해 압제되었으며 $90^\circ/0^\circ$ 로 적층된 시험편(Fig. 7)은 최외층 0° 의 섬유가 외부로 확장되고 내부의 섬유는 파단되면서 압제되었다.

Fig. 8은 정적 압제과정중의 흡수에너지를 각각 비교한 그림이다. Fig. 8을 보면 적층각도가 $\pm 15^\circ$ 에서 90° 로 적층각이 증가할수록 흡수에너지가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 축하중이 작용될 때 적층각이 적은 경우는 라미나 굽힘과 섬유의 파단에 의하여 에너지를 흡수하지만 각도가 증가할수록 섬유의 파단이 없이 횡방향 전단 모드로 인한 기지의 파단에 의해 에너지를 흡수한다. 따라서 적층각이 적은 경우 섬유의 파단을 동반하여 더 많은 에너지를 흡수하는 것으로 사료된다. 또한 $90^\circ/0^\circ$ 와 $0^\circ/90^\circ$ 의 적층각을 갖는 시

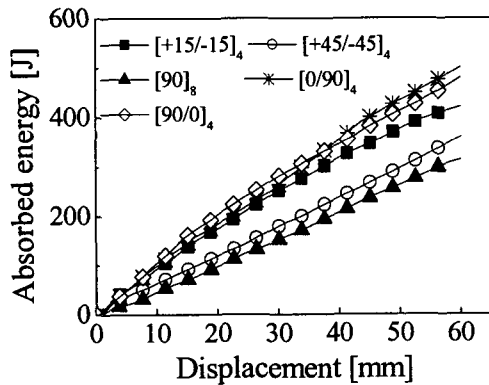


Fig. 8 Absorbed energy of the CFRP side member with change of the fiber orientation angle

험편의 경우, 축방향 0° 가 외부로 확장하면서 동반되는 섬유의 파단과 라미나 굽힘을 90° 의 섬유가 방해하여 더 높은 하중에서 섬유파단과 라미나 굽힘이 일어나므로 가장 효과적인 에너지 흡수특성을 보였다.

Figs. 9와 10은 점용접 사이드부재와 $90^\circ/0^\circ$ 와 $0^\circ/90^\circ$ 의 적층각을 갖는 CFRP 사이드부재의 압제과정중의 단위체적당 흡수에너지 및 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다. Fig. 9를 보면 CFRP 사이드부재의 단위체적당 흡수에너지는 서로 비슷하며, 안정적으로 에너지를 흡수한다. 반면에 점용접 사이드부재는 초기에 많은 에너지를 흡수하지만 압제가 진행되는 동안 단위체적당 흡수에너지가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 체적에서는 점용접 사이드부재가 더 많은 에너지를 흡수하지만 불안정적으로 압제된다는 것을 알 수 있다. 그러나 점용접 사이드부재가 CFRP 사이드부재에 비하여 밀도가 크기 때문에 경량화 차원에서 본다면, Fig. 10과 같이 CFRP 사이드부재의 단위질량당 흡수에너지가 점용접 사이드부재에 비해 현저하게 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 경량화측면에서 CFRP 사이드부재가 자동차 사이드부재와 같이 축하중이 작용될 때 더욱 효과적으로 에너지를 흡수할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 차체구조용 전면부 사이드부재에 점용접 사이드부재와 동일한 흡수에너지를 갖는 CFRP 사이드부재가 적용된다면 약 58~74.3% 정도까지 경량화 효과를 볼 수 있을 것으로 사료된다.

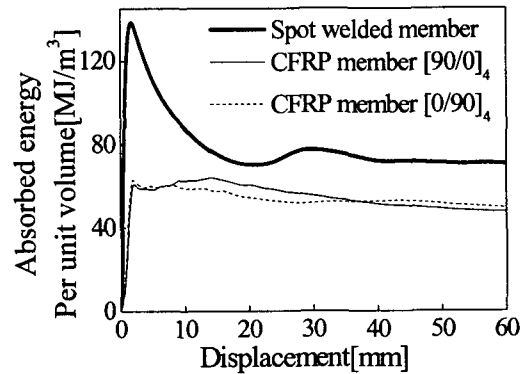


Fig. 9 Variation of the absorbed energy per unit volume during collapsed process of specimens

5. 결론

대표적인 경량화 재료인 CFRP를 이용하여 제작한 단일 모자형 사이드부재의 적층구성 및 단면형상 변화에 따른 압축특성을 평가하고, 실제 자동차 사이드 부재에 적용되고 있는 점용접 사이드부재와 비교·고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CFRP 사이드부재에 축 압축하중이 작용시 발생하는 압축형상은 적층각에 따라 횡방향전단 압축모드, 라미나 굽힘 압축모드 및 취성파괴 압축모드와 국부좌굴 압축모드의 4가지의 압축모드가 조합된 형태로 압축되었다.

(2) CFRP 부재는 적층각이 적은 경우 섬유와 판단을 동반하여 더 많은 에너지를 흡수하였으며, 90°/0°와 0°/90°의 적층각으로 적층 되었을 때 가장 효과적인 에너지 흡수특성을 보였다.

(3) 동일한 체적에서는 점용접 사이드부재가 CFRP 사이드부재에 비해 더 많은 에너지를 흡수하지만 경량화 차원에서 CFRP 사이드 부재가 자동차 사이드부재와 같이 축하중을 받는 부재에 적용이 된다면 더욱 효과적으로 에너지를 흡수할 수 있다는 것으로 사료된다.

(4) 평판부재에 대한 “ \cap ”자형 부재의 단면적이 증가할수록 모서리 부분에서 더 많은 응력이 집중이 되어 전체적으로 많은 에너지를 흡수하면서 압축되었다.

후 기

이 논문은 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참고문헌

- (1) Lee, J. S., Kim, Y. R. and Lee, K. S., 1996, "Sensitivity Analysis and Optimal Design of Plane Vehicle Frame Structures," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp. 74~81.
- (2) Chol, G. H., 1999, "A Study on the Lightweight Design of a Seat Frame in Automotive Vehicles," *Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 5, pp. 83~89.

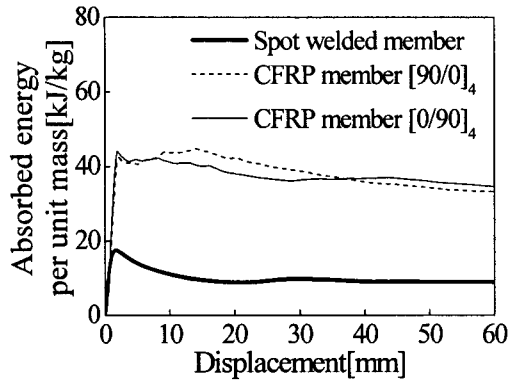


Fig. 10 Variation of the absorbed energy per unit mass during collapsed process of specimens

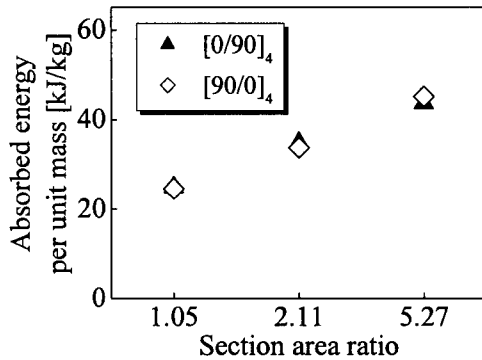


Fig. 11 Absorbed energy per unit mass with change of the section area ratio

4.3 단면적비에 따른 에너지흡수 특성

Fig. 11은 에너지 흡수에 우수한 특성을 보인 0°/90°와 90°/0°의 적층각도를 갖는 CFRP 사이드 부재에 대하여 평판부재와 “ \cap ”자형 부재의 단면적비의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다. Fig. 11을 보면 단면적비가 증가할수록 단위질량당 흡수에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 강도부재가 축하중을 받을 때 응력 분포는 모서리 부분에서 대부분 집중되면서 압축된다. 따라서 평판부재에 대한 “ \cap ”자형 부재의 단면적이 증가할수록 모서리 부분에서 더 많은 응력이 집중이 되어 높은 하중에서 압축이 시작되고 전체적으로 많은 에너지를 흡수하면서 압축되는 것으로 사료된다.

- (3) Mahmood, H. F. and paluzny, A., 1981, "Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management-Their Strength and Model of Collapse," *Proc. 4th International Conference on Vehicle Structural Mechanics*, pp. 7~18.
- (4) Cha, C. S., Kang, J. Y. and Yang, I. Y., 2001, "Axial Impact Collapse Analysis of Spot Welded Hat Shaped Section Members," *KSME International Journal*, Vol. 15. pp. 180~191.
- (5) 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, pp. 209~233.
- (6) 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, pp. 575~583.
- (7) 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, pp. 969~973.
- (8) Singace, A. A., 1999, "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Mode," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, pp. 865~890.
- (9) 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, pp. 48~56.
- (10) Farley, G. L. and Jones., R. M., 1992, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," *Journal of composite Materials*, Vol. 26, pp. 37~50
- (11) 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*, Vols. 233-236, pp. 245~250.