



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2009년 2월
석사학위논문

경량화용 CFRP 사이드부재의
충격압괴 특성

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

황 우 체

경량화용 CFRP 사이드부재의
충격압괴 특성

The Impact Collapse Characteristics of CFRP side
Member for Lightweight

2009 년 2 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

황 우 체

경량화용 CFRP 사이드부재의 충격압괴 특성

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2008 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

황 우 체

황우채의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 정 낙 규 인

위 원 우석대학교 교수 임 광 희 인

위 원 조선대학교 교수 양 인 영 인

2008 년 11 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	V
ABSTRACT	VIII
제 1 장 서 론	1
1-1 연구배경	1
1-2 연구목적 및 방법	4
제 2 장 시험편 및 실험방법	5
2-1 시험편	5
2-2 실험방법	11
제 3 장 압궤실험	16
3-1 적층각 변화에 따른 CFRP 사이드부재의 압궤실험	17
3-2 계면수 변화에 따른 CFRP 사이드부재의 압궤실험	23
3-3 단면적 변화에 따른 CFRP 사이드부재의 압궤실험	34
3-4 혼성 AI/CFRP 사이드 부재의 압궤실험	41
제 4 장 결과 및 고찰	47

4-1 압궤모드	47
4-2 적층각 변화가 에너지흡수에 미치는 영향	51
4-3 계면수 변화가 에너지흡수에 미치는 영향	53
4-4 단면적 변화가 에너지흡수에 미치는 영향	56
4-5 혼성 Al/CFRP 사이드 부재의 에너지흡수특성	59
제 5 장 결 론	61

참 고 문 헌

LIST OF TABLES

Table 1 Characteristics and use of the aluminum and CFRP	8
Table 2 Material properties of the aluminum	9
Table 3 Material properties of the CFRP prepreg sheet	9
Table 4 Impact collapse test results for CFRP side member according to fiber orientation angle of CFRP	51
Table 5 Impact collapse test results for CFRP side member according to interface number(Outer angle 0°)	53
Table 6 Impact collapse test results for CFRP side member according to interface number(Outer angle 90°)	54
Table 7 Impact collapse test results for CFRP side member according to sectional area ratio(Outer angle 0°)	56
Table 8 Impact collapse test results for CFRP side member according to sectional area ratio(Outer angle 90°)	57
Table 9 Impact collapse test results for Al/CFRP side member	59

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Configuration of CFRP side member	7
Fig. 2 Curing cycle of CFRP stacking specimen	10
Fig. 3 Impact testing setup for crushing	14
Fig. 4 Diagram of measurement system	15
Fig. 5 Load–displacement curve of CFRP side member, $[+15/-15]_4$ (Impact, 15° fiber orientation angle)	18
Fig. 6 Load–displacement curve of CFRP side member, $[+45/-45]_4$ (Impact, 45° fiber orientation angle)	19
Fig. 7 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90]_8$ (Impact, 90° fiber orientation angle)	20
Fig. 8 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_4$ (Impact, $0^\circ / 90^\circ$ fiber orientation angle)	21
Fig. 9 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_4$ (Impact, $90^\circ / 0^\circ$ fiber orientation angle)	22
Fig. 10 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0_2/90_2]_S$ (Impact, 2 interface number)	24
Fig. 11 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90_2/0_2]_2$ (Impact, 3 interface number)	25
Fig. 12 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_{S2}$ (Impact, 4 interface number)	26
Fig. 13 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_{2S}$ (Impact, 6 interface number)	27
Fig. 14 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_4$ (Impact, 7 interface number)	28
Fig. 15 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90_2/0_2]_S$	

	(Impact, 2 interface number)	29
Fig. 16	Load–displacement curve of CFRP side member, $[0_2/90_2]_2$ (Impact, 3 interface number)	30
Fig. 17	Load–displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_{S2}$ (Impact, 4 interface number)	31
Fig. 18	Load–displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_{2S}$ (Impact, 6 interface number)	32
Fig. 19	Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_4$ (Impact, 7 interface number)	33
Fig. 20	Load–displacement curve of CFRP side member, (Impact, $\varnothing/\theta : 1.05/0^\circ$)	35
Fig. 21	Load–displacement curve of CFRP side member, (Impact, $\varnothing/\theta : 2.11/0^\circ$)	36
Fig. 22	Load–displacement curve of CFRP side member, (Impact, $\varnothing/\theta : 5.27/0^\circ$)	37
Fig. 23	Load–displacement curve of CFRP side member, (Impact, $\varnothing/\theta : 1.05/90^\circ$)	38
Fig. 24	Load–displacement curve of CFRP side member, (Impact, $\varnothing/\theta : 2.11/90^\circ$)	39
Fig. 25	Load–displacement curve of CFRP side member, (Impact, $\varnothing/\theta : 5.27/90^\circ$)	40
Fig. 26	Load–displacement curve of Al/CFRP side member, $[+15/-15]_4$ (Impact, 15° fiber orientation angle)	42
Fig. 27	Load–displacement curve of Al/CFRP side member, $[+45/-45]_4$ (Impact, 45° fiber orientation angle)	43
Fig. 28	Load–displacement curve of Al/CFRP side member, $[90]_8$ (Impact, 90° fiber orientation angle)	44
Fig. 29	Load–displacement curve of Al/CFRP side member, $[0/90]_4$ (Impact, $0^\circ /90^\circ$ fiber orientation angle)	45

Fig. 30 Load–displacement curve of Al/CFRP side member, [90/0] ₄ (Impact, 90° /0° fiber orientation angle)	46
Fig. 31 Crushing process of continuous fiber reinforced composite members	47
Fig. 32 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)	51
Fig. 33 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)	53
Fig. 34 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)	54
Fig. 35 Relationship between sectional area ratio and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)	56
Fig. 36 Relationship between sectional area ratio and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)	57
Fig. 37 Relationship between fiber orientation angle of Al/CFRP and absorbed energy for Al/CFRP side member (Impact)	59

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave	10
Photo. 2 Shape of collapsed CFRP side member, $[+15/-15]_4$ (Impact, 15° fiber orientation angle)	18
Photo. 3 Shape of collapsed CFRP side member, $[+45/-45]_4$ (Impact, 45° fiber orientation angle)	19
Photo. 4 Shape of collapsed CFRP side member, $[90]_8$ (Impact, 90° fiber orientation angle)	20
Photo. 5 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_4$ (Impact, $0^\circ / 90^\circ$ fiber orientation angle)	21
Photo. 6 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_4$ (Impact, $90^\circ / 0^\circ$ fiber orientation angle)	22
Photo. 7 Shape of collapsed CFRP side member, $[0_2/90_2]_S$ (Impact, 2 interface number)	24
Photo. 8 Shape of collapsed CFRP side member, $[90_2/0_2]_2$ (Impact, 3 interface number)	25
Photo. 9 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_{S2}$ (Impact, 4 interface number)	26
Photo. 10 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_{2S}$ (Impact, 6 interface number)	27
Photo. 11 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_4$ (Impact, 7 interface number)	28
Photo. 12 Shape of collapsed CFRP side member, $[90_2/0_2]_S$ (Impact, 2 interface number)	29
Photo. 13 Shape of collapsed CFRP side member, $[0_2/90_2]_2$ (Impact, 3 interface number)	30

Photo. 14 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_{S2}$ (Impact, 4 interface number)	31
Photo. 15 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_{2S}$ (Impact, 6 interface number)	32
Photo. 16 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_4$ (Impact, 7 interface number)	33
Photo. 17 Shape of collapsed CFRP side member, (Impact, section area ratio: $1.05-0^\circ$)	35
Photo. 18 Shape of collapsed CFRP side member, (Impact, section area ratio: $2.11-0^\circ$)	36
Photo. 19 Shape of collapsed CFRP side member, (Impact, section area ratio: $5.27-0^\circ$)	37
Photo. 20 Shape of collapsed CFRP side member, (Impact, section area ratio: $1.05-90^\circ$)	38
Photo. 21 Shape of collapsed CFRP side member, (Impact, section area ratio: $2.11-90^\circ$)	39
Photo. 22 Shape of collapsed CFRP side member, (Impact, section area ratio: $5.27-90^\circ$)	40
Photo. 23 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[+15/-15]_4$ (Impact, 15° fiber orientation angle)	42
Photo. 24 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[+45/-45]_4$ (Impact, 45° fiber orientation angle)	43
Photo. 25 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[90]_8$ (Impact, 90° fiber orientation angle)	44
Photo. 26 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[0/90]_4$ (Impact, $0^\circ /90^\circ$ fiber orientation angle)	45
Photo. 27 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[90/0]_4$ (Impact, $90^\circ /0^\circ$ fiber orientation angle)	46

Photo. 28 Typical collapse modes CFRP side member 50

ABSTRACT

The Impact Collapse Characteristics of CFRP side Member for Lightweight

Hwang, Woo-Chae

Advisor : Prof. Yang, In-Young, Ph. D.

Dept. of advanced Part & Materials
Engineering

Graduate School of Chosun University

The ability to protect passengers on an automobile accident depends on the condition of the collision, structural integrity, etc. The front-end members of vehicles must absorb the impact energy effectively to ensure passenger's safety in front-end collision. Therefore, the designing vehicles should be more concerned on the aspect of securing safety performance, the while, it also should consider reducing weight of vehicle structural member. CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 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.

In the study, experimental investigations are carried out for CFRP side members in order to study the effect of various stacking condition and shape of section. Impact collapse tests were performed with change of the stacking condition, such as fiber orientation angle, interface number and

shape of section. Collapse mode and energy absorption characteristics were analyzed.

Following the above study, conclusions are drawn as below;

1. The CFRP side member was collapsed according to the different orientation angles by compounding of the 4 different modes: transverse shearing, laminar bending, brittle fracture, and local buckling. When the fiber orientation angle is small, the member absorbed energy by laminar bending. As the fiber orientation angle increases, the member was absorbed energy by local buckling and matrix crack due to transverse shearing.
2. As the fiber orientation angle increases, as shown the total absorbed energy increases linearly. energy absorption was most effective when the fiber orientation angle of CFRP was 15°.
3. The total absorbed energy increases to the 6 interface number with increasing interface number. However, decreasing trend is observed on moving to the 7 interface number.
4. The total energy absorption capability of the members increases as the sectional area ratio (sectional area ratio of flat member to "∩" shaped member) increase due to stress concentration on their edges.
5. The total absorbed energy of Al/CFRP side member assumed slightly lower than that of combined effect of the CFRP member and the aluminum member alone. The interaction effect was not shown because inner aluminum member applied load to the outer CFRP member in the form of hoop stress therefore the aluminum and the CFRP member were split each other.

제 1 장 서 론

1-1 연구배경

차량의 기본적인 역할은 탑승자를 안전하고 쾌적하게 원하는 위치로 이동시키는 것이라 할 수 있다. 차량의 설계에 있어서 가장 중요한 목표는 안전에 대한 측면과 친환경적인 측면으로 집약될 수 있다. 친환경 측면에서는 지구환경에 대한 중요성 점점 부각되면서, 특히 차량으로부터 배출되는 CO₂ 감소 및 차량 효율 향상이 세계적으로 긴요한 과제로 인식되고 있다. 따라서 CO₂ 감소 및 차량 효율 향상에 직접적으로 연관되는 차량 경량화는 피할 수 없는 과제라는 인식이 세계 보편적으로 자리 잡고 있다.

자동차의 연비 개선 대책은 엔진의 효율향상, 경량화 등이 있으나 엔진의 효율 향상은 기술적으로 한계에 도달하였으며 대폭적인 효율 향상은 기대하기 어려운 실정이며 구조변경, 경량재료 사용, 부품합리화 등에 의한 경량화가 연비개선에 기여도가 높다. 이로 인해서 경량재료 변경에 의한 연비개선이 기대되고 있다. 연비 향상을 위한 경량화 방안으로는 차체 및 자동차 부품에 기존의 소재를 고 장력강판, 알루미늄, 플라스틱 등으로 대체를 고려할 수 있고 안정성 향상의 방안으로는 안전벨트 착용, 에어백 장착, 차량 내의 구조강화, 내 충격 에너지흡수 구조재료의 대체 등으로 요약할 수 있다.¹⁻³⁾

또한, 환경 보호적 측면에서 심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있는 실정이며 우리나라에서도 저공해 자동차 배기 규제를 더욱 강화하고 있다. 이러한 환경 보호 관련 자동차 기술개발의 동향은 무공해자동차, 전기자동차에 대한 연구와 함께 기존 자동차의 연비향상 뿐 아니라 차체 수명연장, 배기가스의 정화, 소음방지, 그리고 자원재활용을 위한 리사이클링 등을 위한 폭넓은 연구개발 투자가 이루어지고 있으며, 이를 위한 방법으로 엔진효율향상, 공기저항감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 소재의 경량화 등을 들 수 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로

인해 연비향상을 도모할 수 있어서 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다.⁴⁻⁶⁾

자동차의 설계개발이란 승차감, 안정성, 정숙성, 쾌적성 등의 요건을 만족하면서 법규로 정해진 규격에 적합하도록 설계되어야 한다. 이러한 성능 중 충돌 시에 승객을 보호하는 능력을 충돌안전성능이라 하는데 충돌조건, 차량구조, 승객구속장치 등의 요건으로 결정된다. 특히, 자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 70% 정도로써 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다.⁷⁻¹¹⁾

더불어 충돌법규와 안전규제의 강화로 인하여 구조부재와 충돌부재를 위한 경량신소재 등을 적용한 고안전 경량 차량 및 부품 개발 또한 필수요소로 인식되고 있다. 하지만, 차량 대수의 증가와 함께 고성능화, 고안전화 및 쾌적성 측면에서 차량에 부착되는 기능성 부품의 수와 중량 증가 요인은 점차 확대되어지고 있는 실정이다.

이러한 문제점들을 개선하기 위하여 재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속 되고 있으며, 새로운 재료가 계속적으로 발명되고 있다. 구조물과 기계기구 등의 제작에 이용되고 있는 재료는 다양 하지만, 이들 중에서 복합재료의 응용분야가 급속히 진보하고 있다. 현재 우리가 사용하는 재료는 그 사용 조건이 가혹해지고, 복잡화 되는 동시에 매우 다종다양하다. 이 같은 요구를 가능한 많이 만족시키는 것은 단독의 재료로는 매우 곤란하다는 사실은 말할 필요가 없으며, 각각의 요구조건에 맞는 적합한 재료를 이용함으로써 구조물 및 기계기구의 안정성 향상 및 효율증대를 꾀할 수 있을 것이다.¹²⁻¹⁷⁾

차체 구조의 경량화를 위한 연구는 최적 구조설계 기술과 재료 및 소재개발 기술이라는 두 가지 측면으로 추진되고 있다. 복잡한 형상을 가지고 있는 차체 구조의 최적설계를 위한 강성해석이나 충돌해석 등을 위해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며,¹⁸⁻²²⁾ 경량재료의 개발을 통한 차체 중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비개선 방안으로 평가되고 있어 기존의 철강부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다.²³⁻³³⁾ 따라서

이러한 경량화용 구조부재의 충돌안전성능 평가에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

지금까지의 차체구조부재의 압괴에 관한 연구동향을 살펴보면, 실제 차체구조부재인 점용접 모자형 단면부재에 대하여 seam용접상태에 있다는 가정하에서 Ohkubo 등³⁴⁻³⁶⁾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. 특히, 차량의 초기설계 단계에서는 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압괴거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

1-2 연구목적 및 방법

차체의 강도부재로 사용되고 있는 구조부재의 압괴특성에 대한 연구는 충돌안전성의 측면과 경량화 측면에서 여러 가지 재질과 다양한 단면형상에 대해서 행해지고 있다.

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 사이드 부재를 제작한 후 최외층각 변화, 계면수 변화 및 단면 형상 변화에 따른 압괴특성 및 에너지흡수특성을 고찰함으로써 최적의 수송기계용 구조부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계데이터를 얻고자 한다. 또한 경량화 차원에서 알루미늄 사각 부재의 외측에 CFRP로 감싼 혼성 AL/CFRP 사이드 부재를 제작하여 에너지흡수특성을 고찰하였다.

연구방법으로는 먼저, 프리프레그(Prepreg)를 금형위에 적절히 적층한후 Autoclave 내에서 압력과 열을 가하여 경화시키는 기술인 Autoclave 성형법을 이용하여 CFRP 사이드 부재에 최외층각, 계면수 변화 및 단면적을 변화 시켜 제작한 후 공기압식 수직충격시험장치를 이용하여 축방향 하중을 받는 경우의 충격실험을 행하였다.

또한, CFRP 사이드 부재의 기본적인 설계데이터를 얻기 위해 에너지흡수특성에 미치는 변수인 최외층각 변화, 계면수 변화 및 단면 형상변화에 따른 압괴특성을 비교분석 하였다.

제 2 장 시험편 및 실험방법

2-1 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 CFRP를 이용하여 차량용 사이드멤버의 기본 형상인 모자형 부재를 제작하여 시험편으로 사용하였으며, 알루미늄과 CFRP의 일반적인 특성 및 용도를 Table 1에 나타냈다.

알루미늄 부재는 서울메탈(주)에서 가공한 6063-T5계열로서 두께는 1.0mm이며, 사각부재는 한 변의 길이가 30mm인 정사각형 단면이다. 알루미늄의 기계적 성질을 Table 2에 나타냈다. CFRP 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 3에 나타냈다.

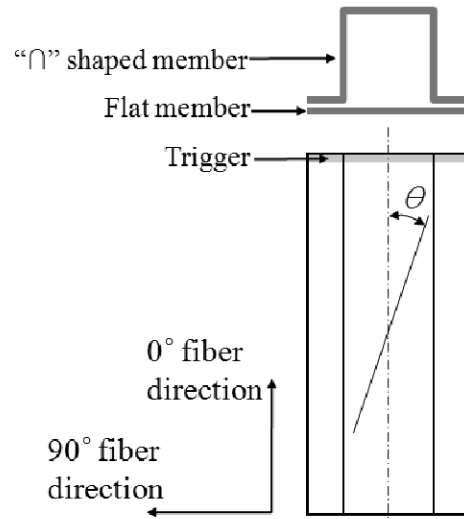
CFRP 사이드부재는 알루미늄 사각부재에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며, 실제 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 "∩"자 단면부재와 평판부재를 결합하여 제작하였다. 적층구성의 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압괴모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압괴특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$ 의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ 는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 적층수 n 을 2, 3, 4, 6 및 7계면수에 맞추어 적층하여 제작하였다. 또한, 강도부재가 축 하중을 받을 때 응력분포는 모서리부에서 대부분이 집중되면서 압괴되며 모자형 단면부재의 경우 일반적으로 "∩"자 단면측보다 평판측의 좌굴하중이 낮기 때문에 평판측의 좌굴이 계기가 되어 압괴된다. 따라서 모리서 부분의 단면적을 변화시키기 위해 평판부재와 "∩"자형 부재의 단면적을 변화시켜 시험편을 제작하였다. 단면적비는 평판 부재의 단면적에

대한 "∩"자형 부재의 단면적으로 정의하고 1.05, 2.11 및 5.27(이하 θ 라 한다)의 단면적비에 대하여 평판 부재와 "∩"자형 부재의 프리프레그 적층수를 각각 12ply:6ply(1.5mm : 0.75mm), 8ply:8ply(1mm : 1mm) 및 4ply:10ply(0.5mm : 1.25mm)로 적층하여 각 부재에 대한 적층수(두께)에 따른 단면형상을 변화시켰으며, 전체 단면적은 비슷하게 하여 제작하였다. 또한 최외층 적층각을 0° 와 90° (이하 θ 라 한다)로 변화 시켜 시험편을 제작 하였다. 그리고 CFRP의 취성과 파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강한 모자형 혼성부재 형태의 시험편을 제작하였다.

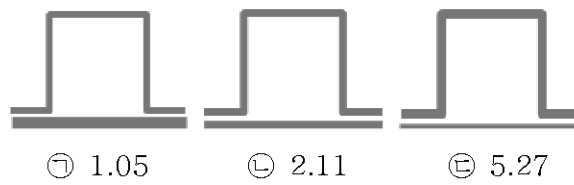
알루미늄과 CFRP를 결합한 혼성 Al/CFRP 사이드 부재는 알루미늄 사각부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 특히, CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이므로 적층구성에 따른 에너지흡수 능력과 압괴모드를 고찰하기 위하여 적층각도 변화에 따른 시험편을 제작하였다. 제작된 모자형 부재의 각각의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

CFRP의 가장 취약한 특성은 취성문제이며, 압괴초기에 최대하중이후 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 하는데, 본 연구에서는 시험편의 하중이 작용하는 끝단을 45° 로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다.

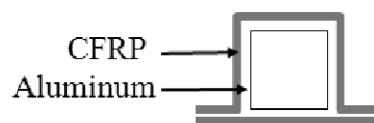
시험편의 성형은 Photo. 3과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C , 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 3은 시험편 제작시 성형 사이클을 나타냈다. 시험편 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험시 압괴가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.



(a) CFRP side member



(b) Section of specimen according to change of sectional area ratio(\varnothing)



(c) Section of Al/CFRP side member

Fig. 1 Configuration of CFRP side member

Table 1 Characteristics and use of the aluminum and CFRP

분 류	특 성	사 용 범 위
Aluminum (6063계)	열처리 합금 내식성 표면처리성 성형가공성	새시 등의 건축용재, 토목용재, 가구, 가전제품 등
CFRP	비강성 비탄성	항공기(1차, 2차부재), 우주기기(태양열발전 설비), 미사일, 로켓, 인공위성, 자동차, 고 속차량, 경주용차, 오토바이, 보트, 자전거, 섬 유기계, 스포츠용품, 낚시대, 등산용구, 카메 라, 원심분리기, 플라이휠, 그라인더 휠, 타이 어, 벨트, 회전 프로펠러, 제지기 로울러 등
	비강성 감쇠성	오디오 기기, 악기, 공작기계, 진동 컨베어 스 프링, 자동차(drive shaft, leaf spring) 등
	강성 비크리프성	FRP배, 탱크, 저장고(싸이로) 등
	강성 비열팽창	우주기기 안테나, 밀리파 안테나, 마이크로메 타, 타이밍 벨트, 저온 탱크, 체도기기 등
	x선 투과성 강도, 강성	X선 카세트, X 선의료기기 등
	전기전도성 발열	약품 탱크, 대전방지 로울러, 정전도장 벽직 류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패킹, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로켓트 노즐, 항공기 엔진 등

Table 2 Material properties of the aluminum

Density	Poisson's ratio	Young's modulus	Yield stress	Tensile stress
2.68 [kg/m ³]	0.31	67.2 [GPa]	165 [MPa]	192 [MPa]

Table 3 Material properties of the CFRP prepreg sheet (CU125NS)

Types Characteristics	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density	1.83×10 ³ [kg/m ³]	1.24×10 ³ [kg/m ³]	-
Poisson's ratio	-	-	0.3
Young's modulus	240 [GPa]	3.60 [GPa]	132.7 [GPa]
Tensile stress	4.89 [GPa]	0.08 [GPa]	1.85 [GPa]
Breaking elongation	2.1 [%]	3.0 [%]	1.3 [%]
Resin content	-	-	33 [% Wt]

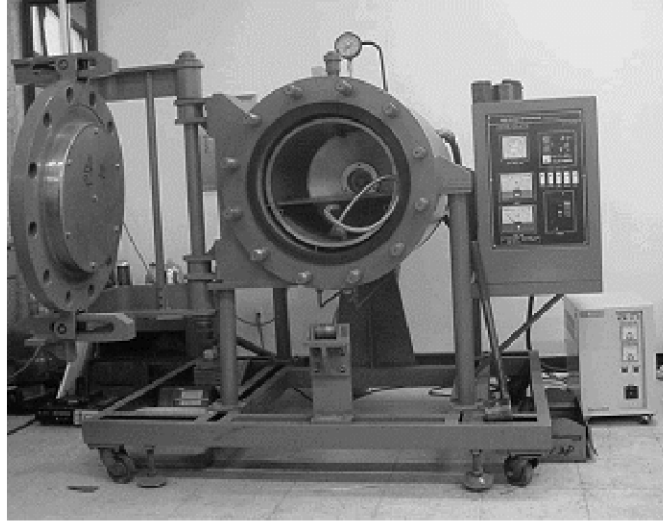


Photo. 1 Autoclave

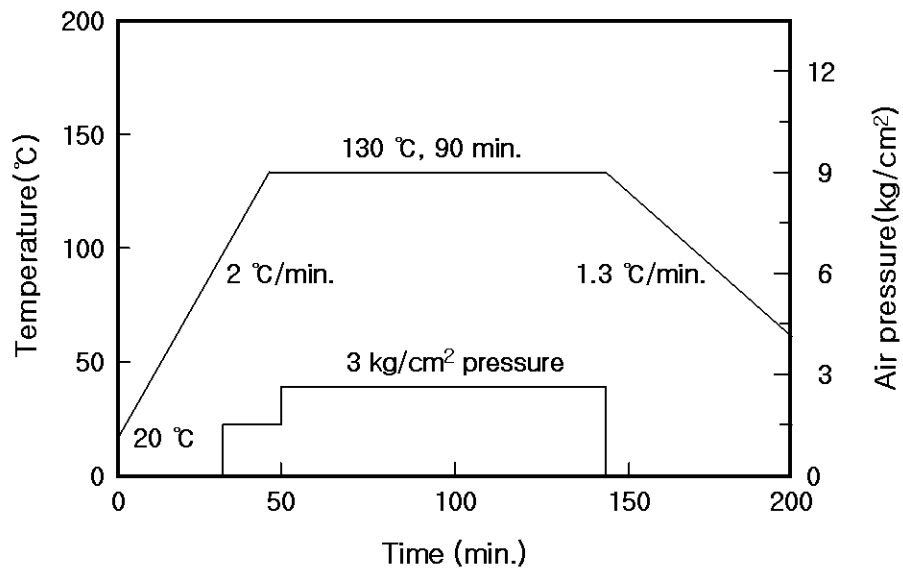


Fig. 2 Curing cycle of CFRP stacking specimen

2-2 실험방법

충격압케실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 에 나타냈으며, Fig. 는 실험장치의 계측시스템의 구성도를 나타냈다.

시험기는 공기압 가속장치인 에어건과 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 충격압케실험을 할 수 있도록 하였다. 그 결과 신뢰성 있는 충격압케실험을 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 축방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여 굽힘과 비틀림의 영향을 제거하여 구하였으며, 스트레인게이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다. 충돌시에 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 압케 시간변화 즉, 변위의 측정은 압케가 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.

충격압계 실험은 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위 내에서 자유낙하를 하였다. 또한 각 시험편에 대하여 4~5회의 충격 압계실험을 행하였고, 압계과정에서 시간에 대한 하중 및 변위를 측정하였다. 측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격압계가 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 구하였으며 흡수에너지 E_a , 전체흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수 특성에 대하여 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압계길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압계되었다고 가정하여 식 (1)과 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압계 효율의 역수³⁷⁾를 사용하여 식(2)를 이용하여 총흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (1)$$

여기서, ρ_0 는 압계효율, L은 시험편의 길이, δ_f 는 충격압계 실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (2)$$

여기서, E_T 는 전체흡수에너지, E_a 는 흡수에너지 이다.

또한, 단위질량당 총흡수에너지를 비교하기 위하여 식(3)을 이용하여 총흡수에너지를 구하였다.

$$E_m = E_T/kg \quad (3)$$

여기서 E_m 은 단위질량당 총흡수에너지, kg은 각 시험편의 질량이다.

로드셀 위의 시험편이 흡수하는 이론적인 충격에너지 E_1 는 식(4)와 같이 크로스

헤드의 위치에너지와 같으므로 시험편에 따라 시험편의 압괴형상을 관찰하기 가장 적절한 충격에너지 419.44J를 가하였다. 하지만 CFRP적층각이 90° , 단면적비가 1.05인 시험편의 경우 419.44J의 충격에너지를 가했을 경우 시험편이 파괴가 되어 데이터가 획득되지 않았다. 때문에 해석에 필요한 충분한 압괴가 이루어지도록 341.04J의 충격에너지를 가하였다. 또한 혼성 AI/CFRP 사이드 부재의 경우는 충격에너지 419.44J를 가했을 경우 충분한 압괴가 이루어지지 않아 해석에 필요한 충분한 압괴가 이루어지는 611.52J의 충격에너지를 가하였다.

$$E_I = mgh \quad (4)$$

여기에서 E_I 는 충격에너지, m 은 크로스헤드의 질량, g 는 중력 가속도, h 는 시험편에 가해진 크로스헤드의 높이이다.

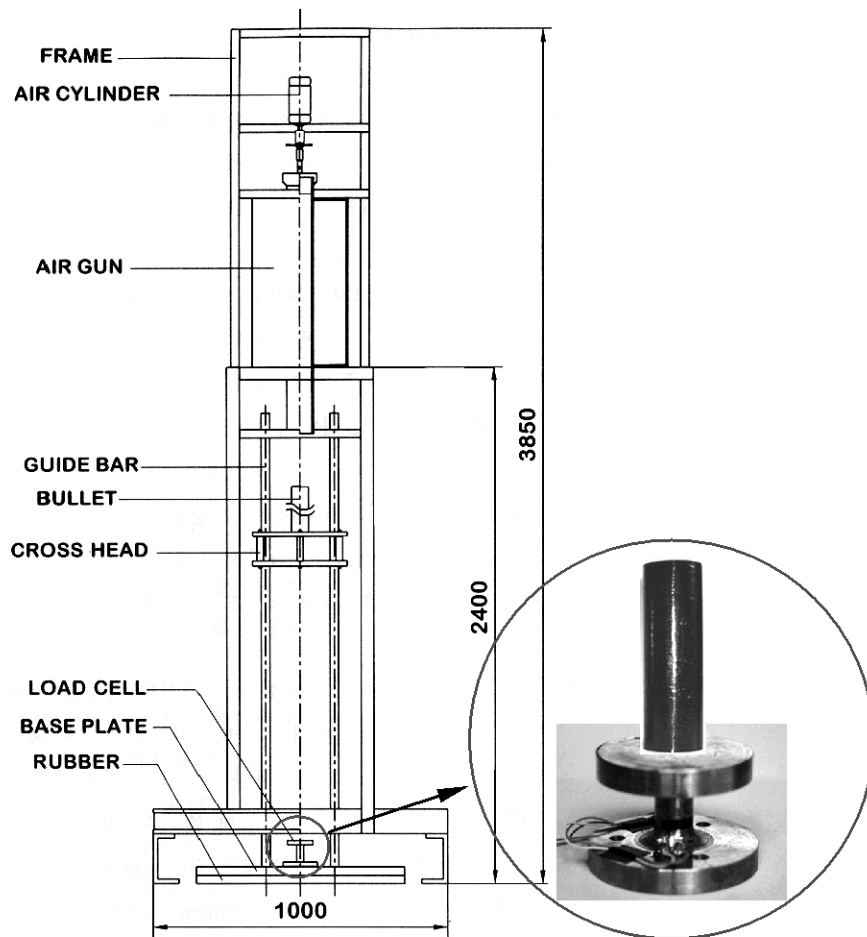


Fig. 3 Impact testing setup for crushing

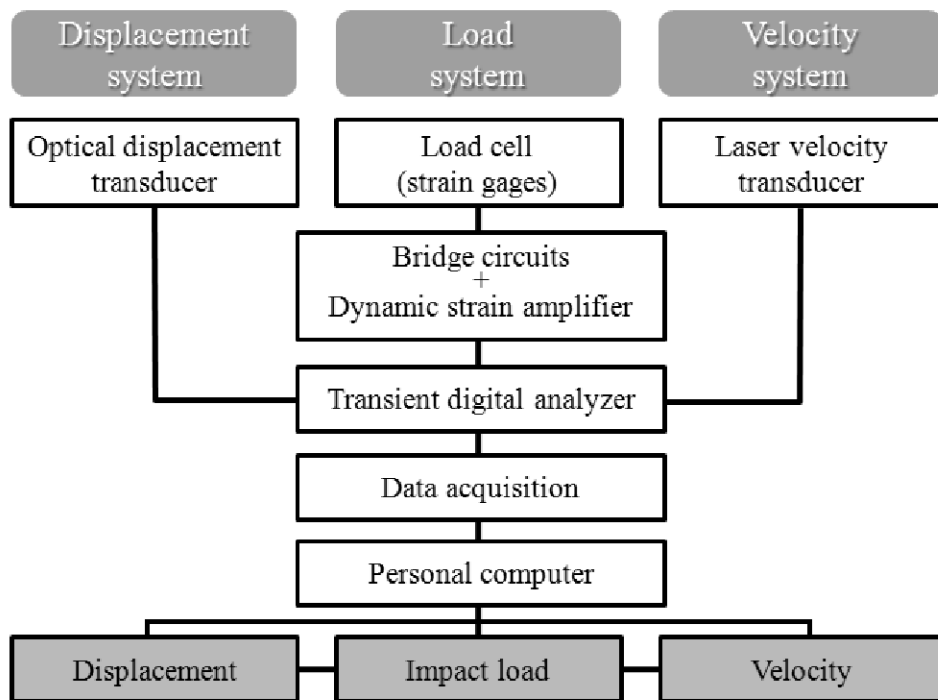


Fig. 4 Diagram of measurement system

3 장 압괴실험

본 장에서는 차량 전면부 사이드 부재의 기본형상인 단일모자형 단면을 갖는 CFRP 사이드부재에 대하여 충격압괴실험을 행하고, 압괴과정에서의 하중 및 변형을 측정하였다.

측정된 하중 및 변형에서 시간을 소거하여 충격압괴가 진행하고 있는 과정의 하중-변위 선도 즉, 압괴선도를 구하여 CFRP 사이드부재 및 AI/CFRP 사이드부재의 에너지 흡수특성에 관하여 고찰하였다.

3-1 적층각 변화에 따른 CFRP 사이드부재의 압괴실험

본 절에서는 CFRP 사이드부재의 적층각 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 5~9에 적층수 8ply를 갖는 CFRP 사이드부재에 대하여 15° , 45° , 90° , $0^\circ/90^\circ$ 및 $90^\circ/0^\circ$ 의 적층각의 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 2~6에 각 시험편에 대하여 충격압괴실험후 시험편의 형상을 나타내었다.

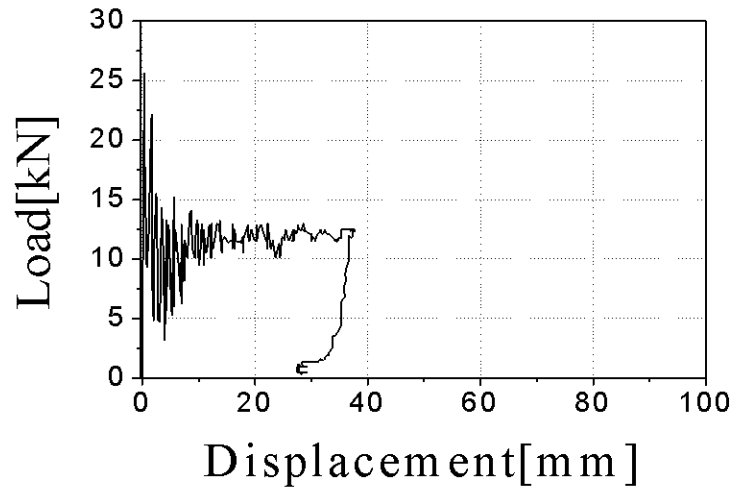


Fig. 5 Load-displacement curve of CFRP side member, $[+15/-15]_4$
 (Impact, 15° fiber orientation angle)

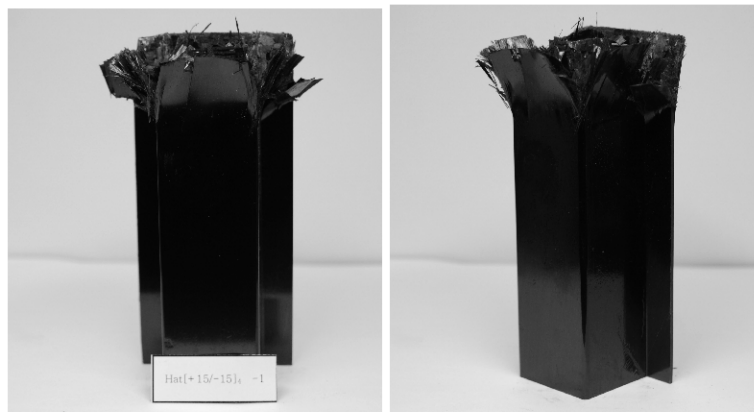


Photo. 2 Shape of collapsed CFRP side member, $[+15/-15]_4$
 (Impact, 15° fiber orientation angle)

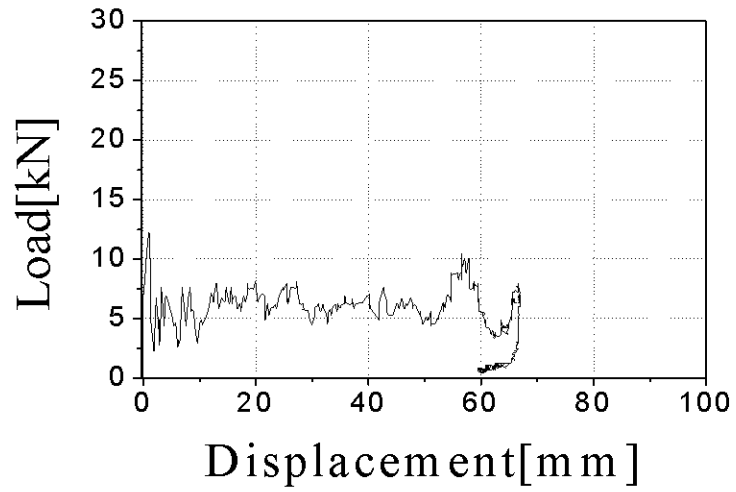


Fig. 6 Load-displacement curve of CFRP side member, $[+45/-45]_4$
(Impact, 45° fiber orientation angle)

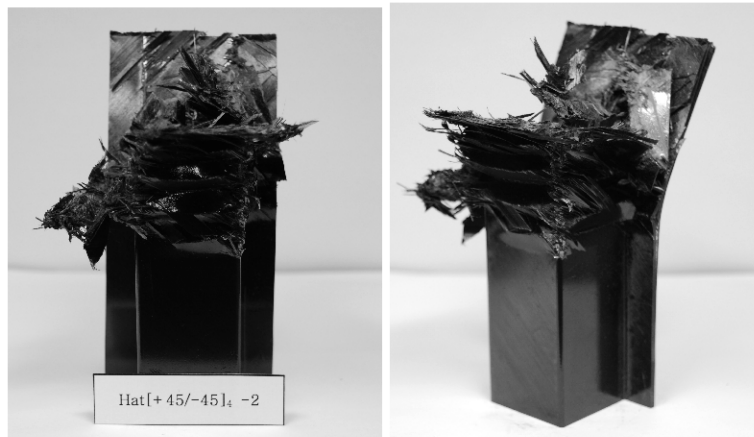


Photo. 3 Shape of collapsed CFRP side member, $[+45/-45]_4$
(Impact, 45° fiber orientation angle)

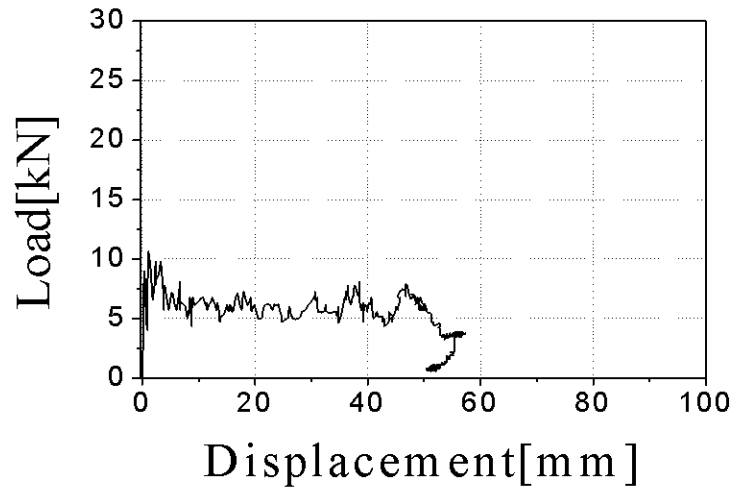


Fig. 7 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90]_8$
 (Impact, 90° fiber orientation angle)

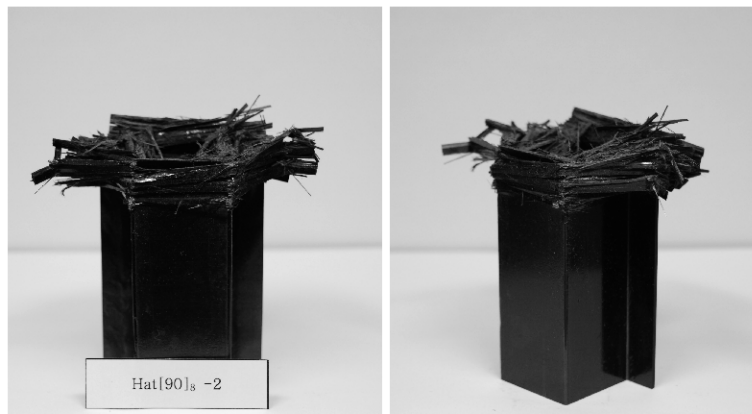


Photo. 4 Shape of collapsed CFRP side member, $[90]_8$
 (Impact, 90° fiber orientation angle)

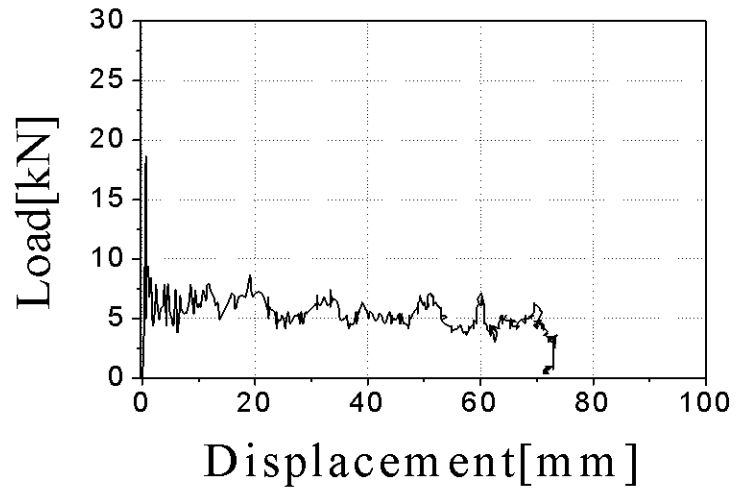


Fig. 8 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_4$
 (Impact, $0^\circ / 90^\circ$ fiber orientation angle)

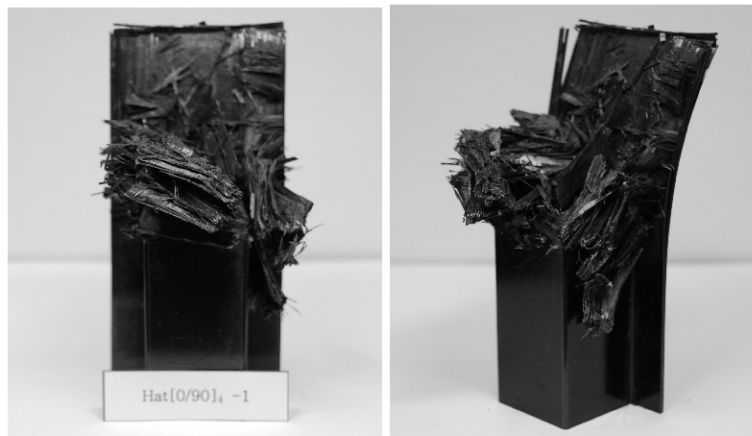


Photo. 5 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_4$
 (Impact, $0^\circ / 90^\circ$ fiber orientation angle)

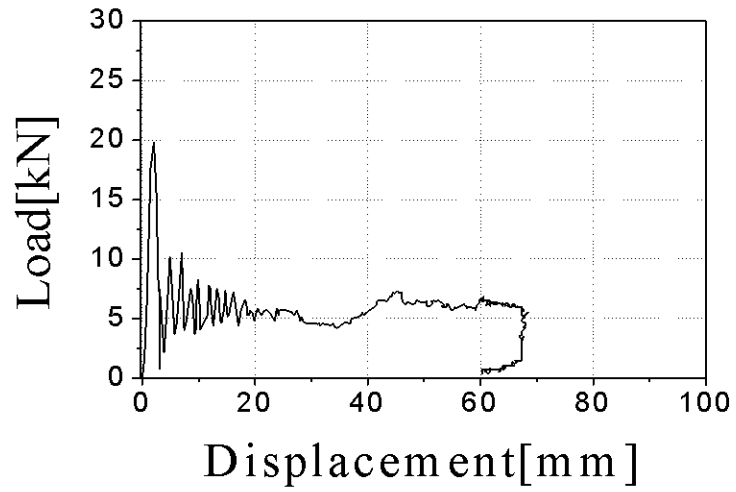


Fig. 9 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_4$
 (Impact, $90^\circ / 0^\circ$ fiber orientation angle)

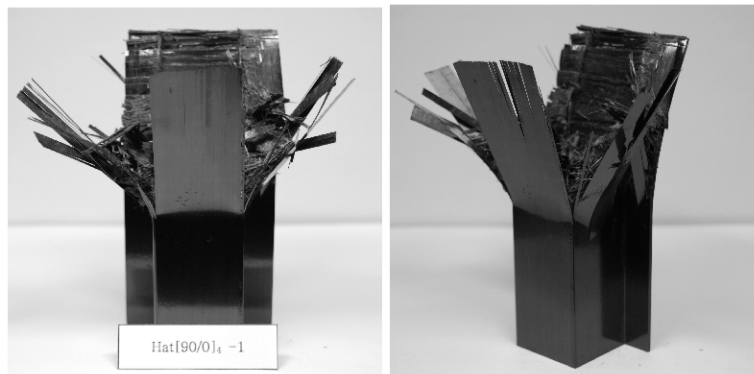


Photo. 6 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_4$
 (Impact, $90^\circ / 0^\circ$ fiber orientation angle)

3-2 계면수 변화에 따른 CFRP 사이드부재의 압괴실험

본 절에서는 CFRP 사이드부재에 대하여 계면수의 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 10~14에 최외층각이 0° 인 적층각도 $0^\circ / 90^\circ$ 의 CFRP 사이드부재에 대하여 2, 3, 4, 6 및 7계면의 계면수 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 7~11에 각 시험편에 대하여 충격압괴실험후 시험편의 형상을 나타내었다. 또한 Figs. 15~19에 최외층각이 90° 인 적층각도 $0^\circ / 90^\circ$ 의 CFRP 사이드부재에 대하여 2, 3, 4, 6 및 7계면의 계면수 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 12~16에 각 시험편에 대하여 충격압괴실험후 시험편의 형상을 나타내었다.

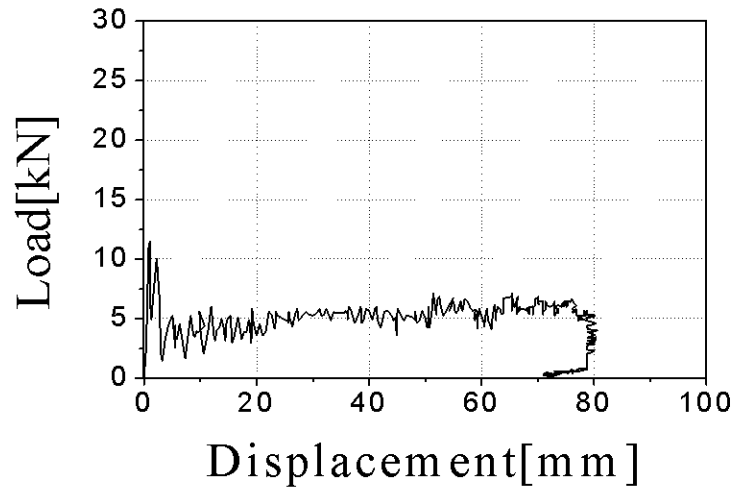


Fig. 10 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact, 2 interface number)

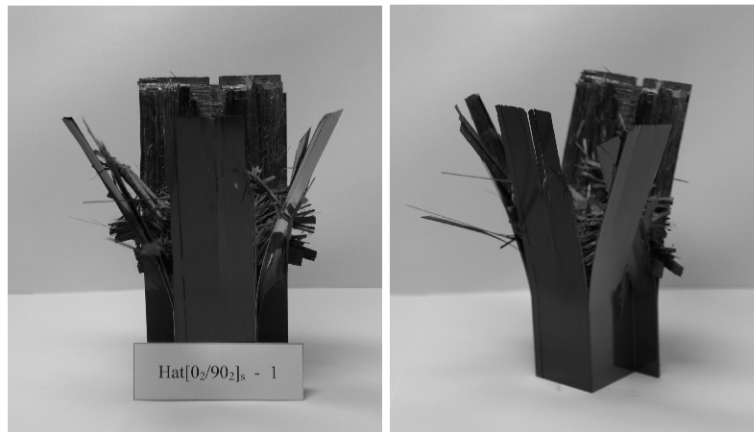


Photo. 7 Shape of collapsed CFRP side member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact, 2 interface number)

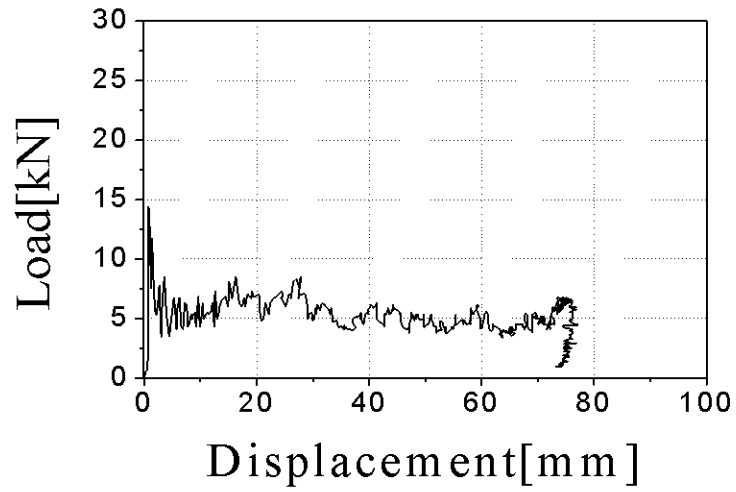


Fig. 11 Load-displacement curve of CFRP side member, $[90_2/0_2]_2$
(Impact, 3 interface number)

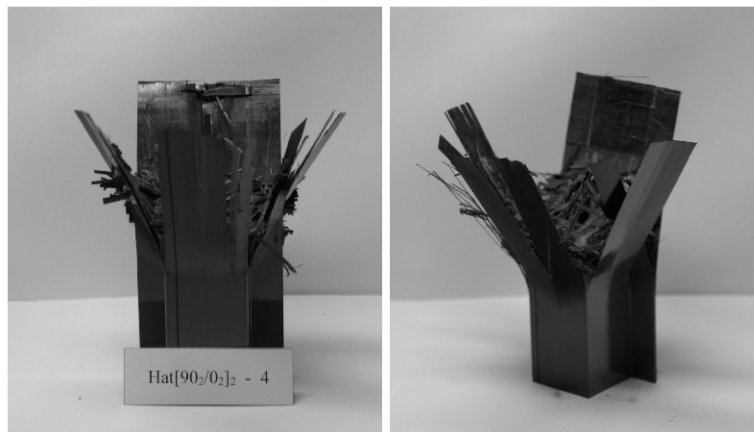


Photo. 8 Shape of collapsed CFRP side member, $[90_2/0_2]_2$
(Impact, 3 interface number)

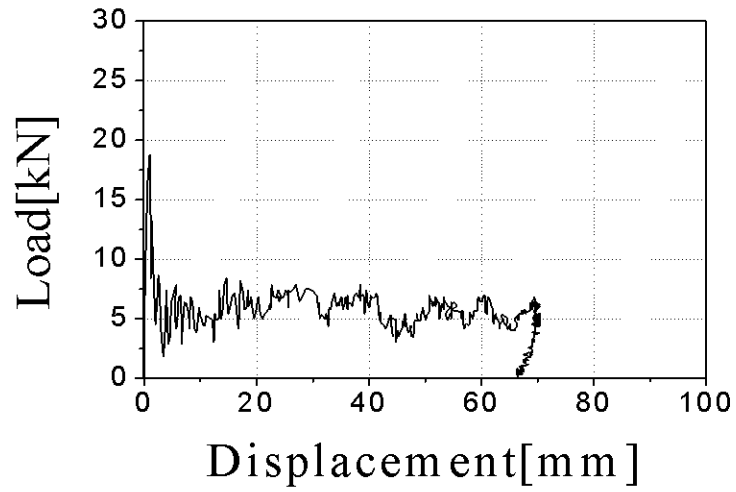


Fig. 12 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_{S2}$
(Impact, 4 interface number)

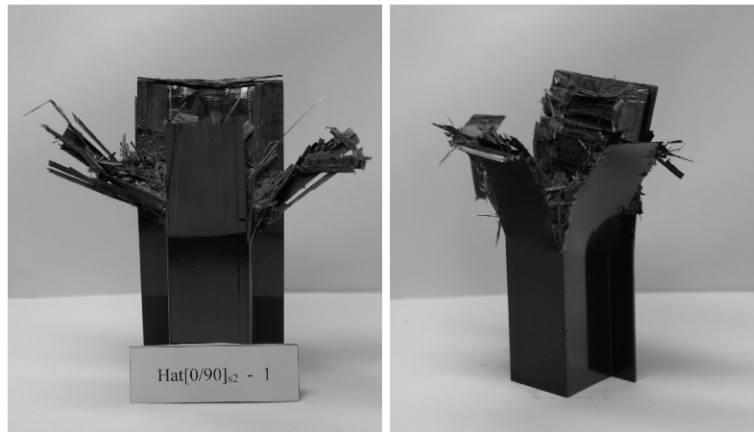


Photo. 9 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_{S2}$
(Impact, 4 interface number)

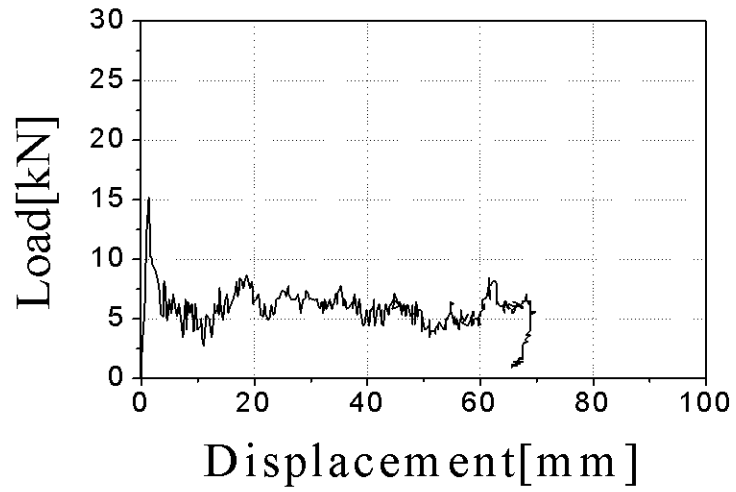


Fig. 13 Load-displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_{2S}$
(Impact, 6 interface number)

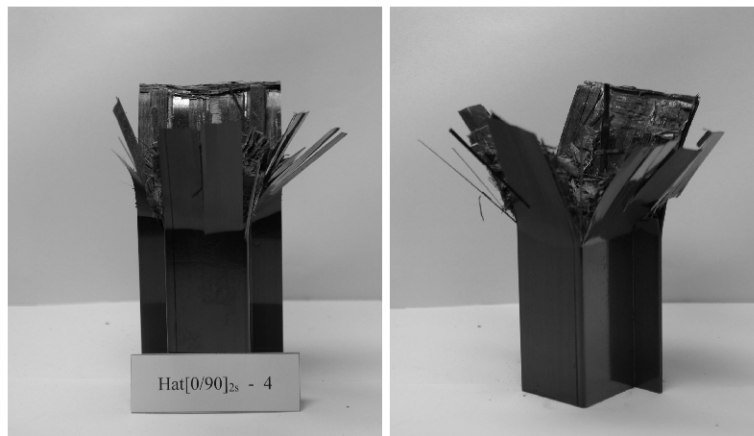


Photo. 10 Shape of collapsed CFRP side member, $[0/90]_{2S}$
(Impact, 6 interface number)

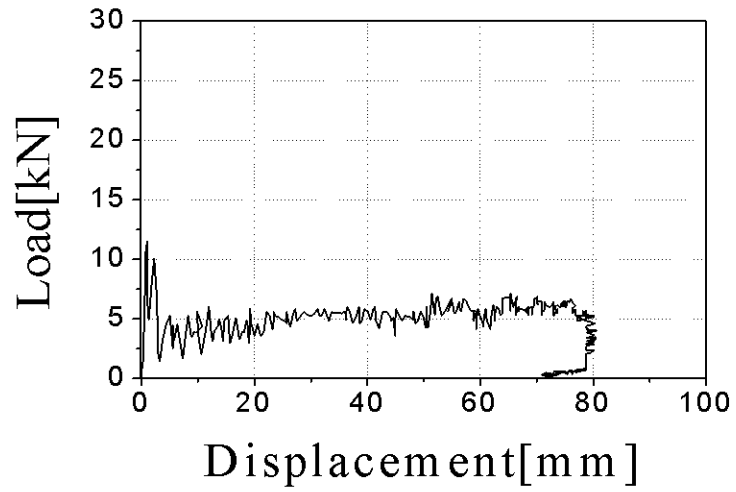


Fig. 14 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_4$
(Impact, 7 interface number)

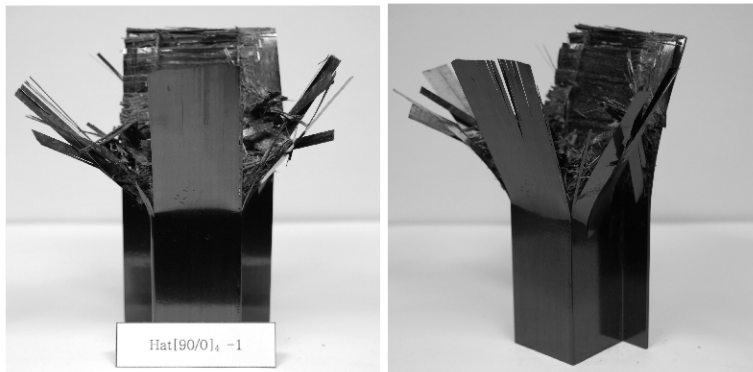


Photo. 11 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_4$
(Impact, 7 interface number)

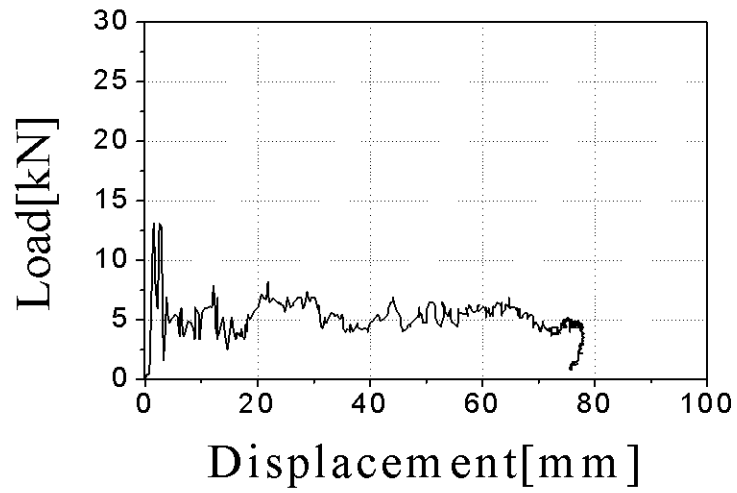


Fig. 15 Load–displacement curve of CFRP side member, $[90_2/0_2]_s$
(Impact, 2 interface number)

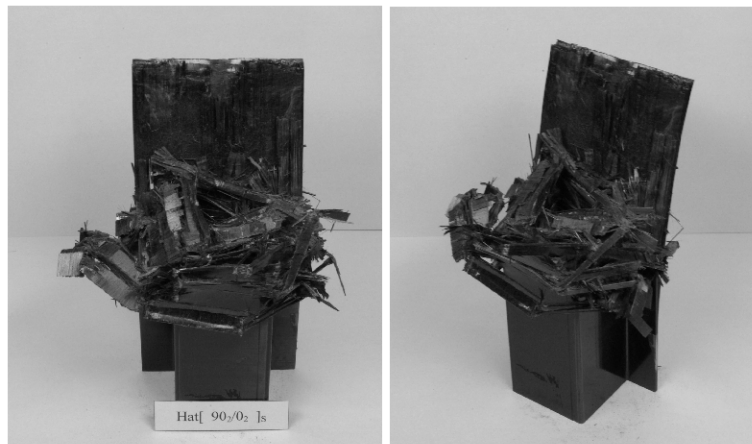


Photo. 12 Shape of collapsed CFRP side member, $[90_2/0_2]_s$
(Impact, 2 interface number)

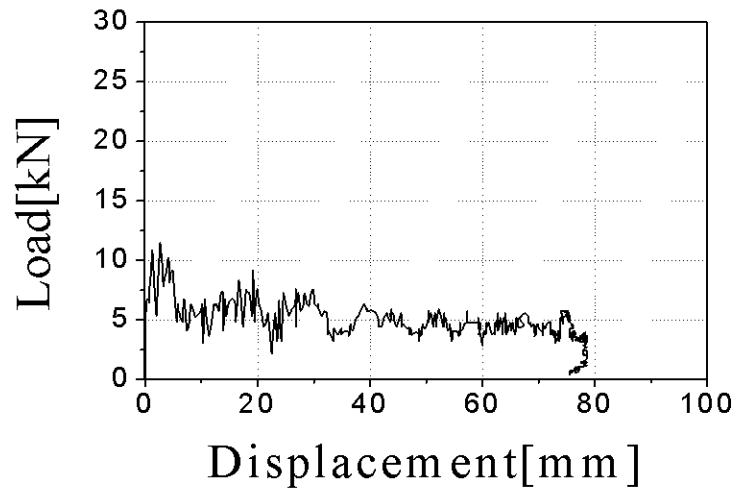


Fig. 16 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0_2/90_2]_2$
(Impact, 3 interface number)



Photo. 13 Shape of collapsed CFRP side member, $[0_2/90_2]_2$
(Impact, 3 interface number)

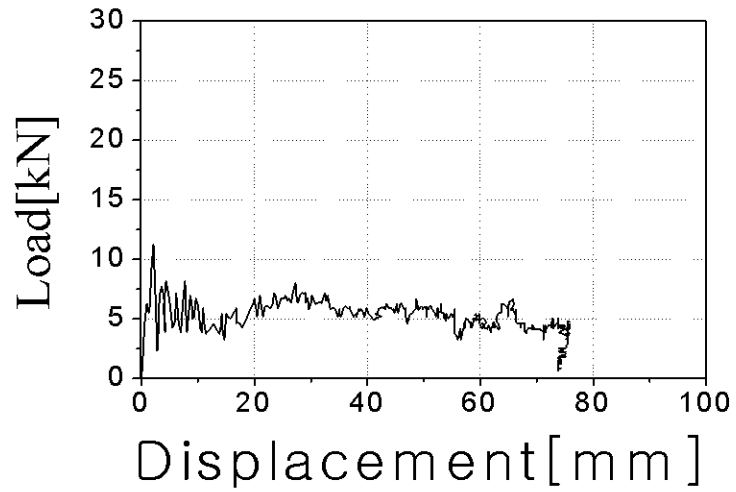


Fig. 17 Load-displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_{S2}$
(Impact, 4 interface number)

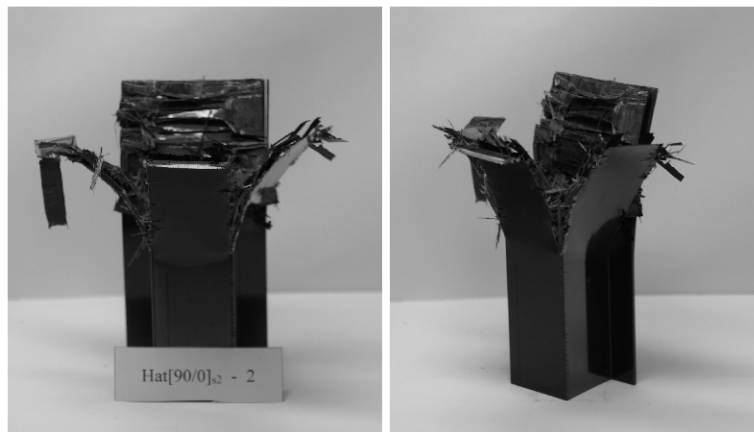


Photo. 14 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_{S2}$
(Impact, 4 interface number)

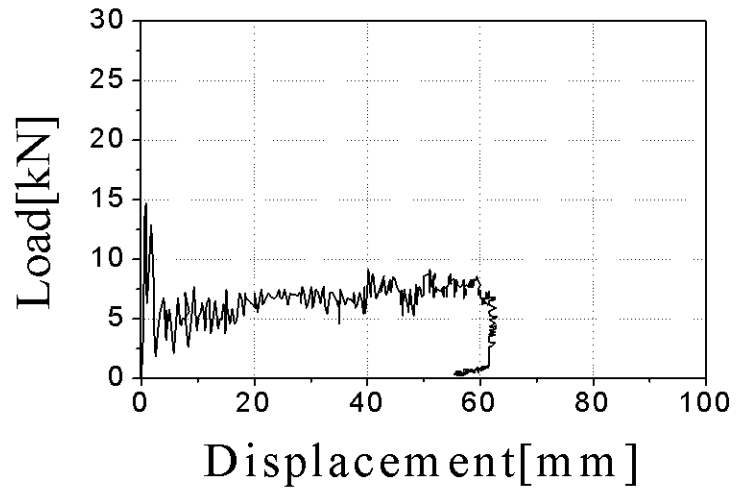


Fig. 18 Load-displacement curve of CFRP side member, $[90/0]_{2S}$
 (Impact, 6 interface number)

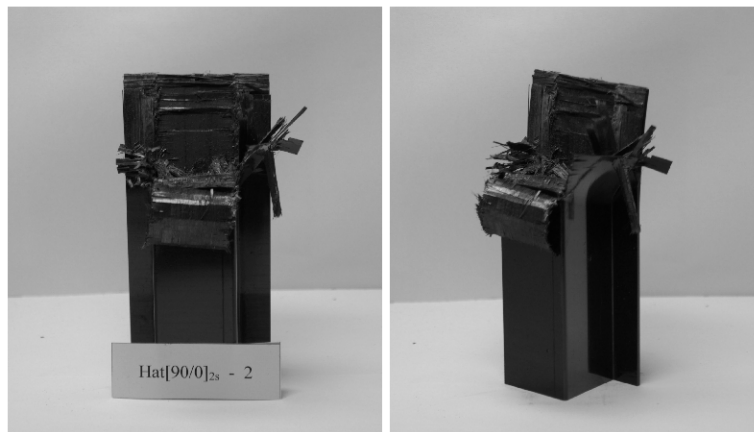


Photo. 15 Shape of collapsed CFRP side member, $[90/0]_{2S}$
 (Impact, 6 interface number)

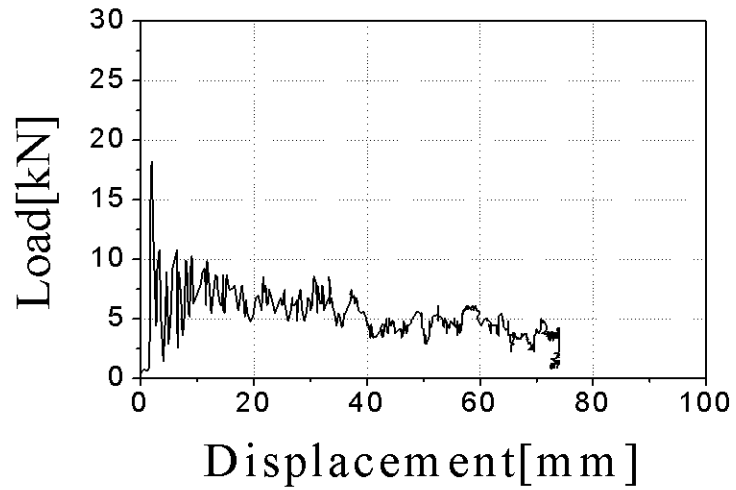


Fig. 19 Load–displacement curve of CFRP side member, $[0/90]_4$
(Impact, 7 interface number)

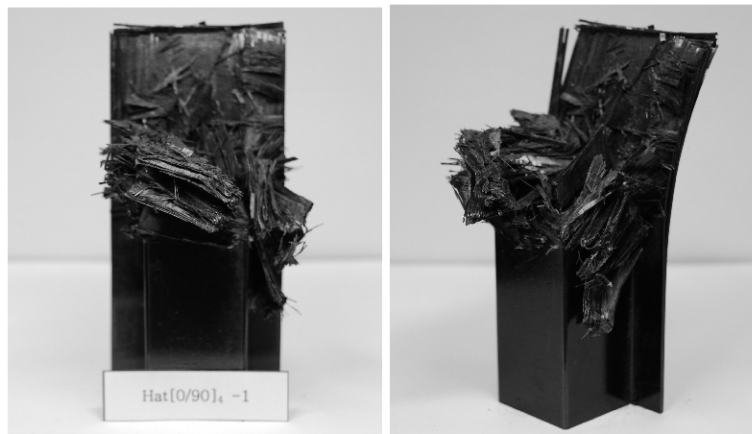


Photo. 16 Shape of collapsed CFRP side member. $[0/90]_4$
(Impact, 7 interface number)

3-3 단면적 변화에 따른 CFRP 사이드부재의 압괴실험

본 절에서는 CFRP 사이드부재에 대하여 모서리 부분의 단면적을 변화시켜 강성을 증가시키기 위해 평판 부재에 대한 "∩"자형 부재의 단면적을 변화시킨 단면형상 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 20~22에 최외층각이 0° 인 적층각도 $0^\circ / 90^\circ$ 의 CFRP 사이드부재에 대하여 단면적비를 1.05, 2.11 및 5.27로 변화시켜 충격압괴실험을 행한 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 17~19에 각 시험편에 대하여 충격압괴실험후 시험편의 형상을 나타내었다. 또한, Figs. 23~25에 최외층각이 90° 인 적층각도 $0^\circ / 90^\circ$ 의 CFRP 사이드부재에 대하여 단면적비를 1.05, 2.11 및 5.27로 변화시켜 충격압괴실험을 행한 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 20~22에 각 시험편에 대하여 충격압괴실험후 시험편의 형상을 나타내었다.

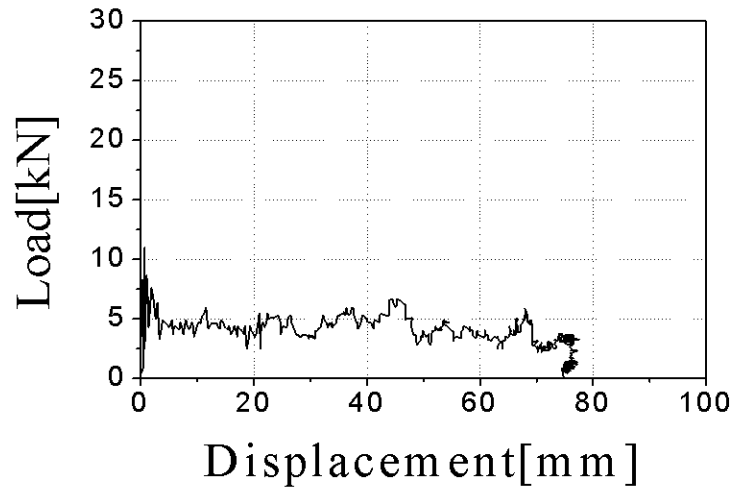


Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 1.05/0^\circ$)

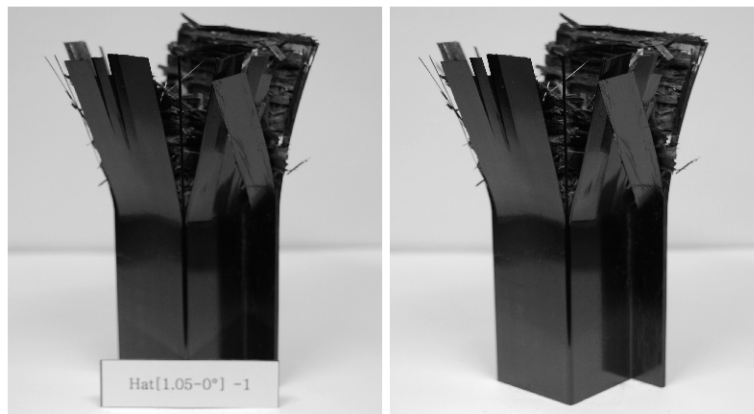


Photo. 17 Shape of collapsed CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 1.05/0^\circ$)

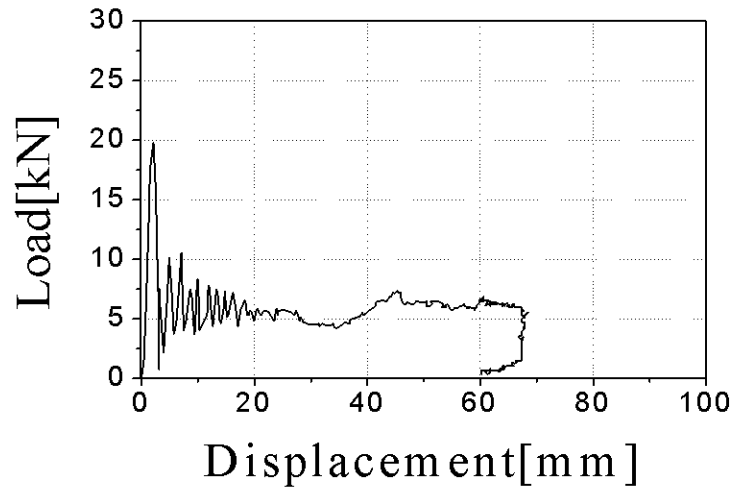


Fig. 21 Load-displacement curve of CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 2.11/0^\circ$)

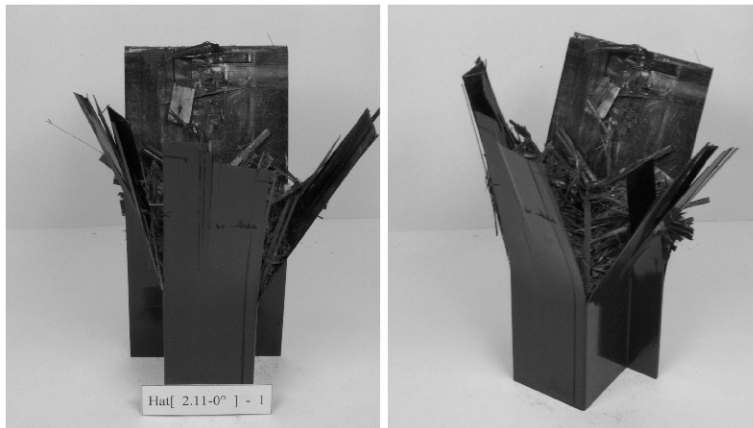


Photo. 18 Shape of collapsed CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 2.11/0^\circ$)

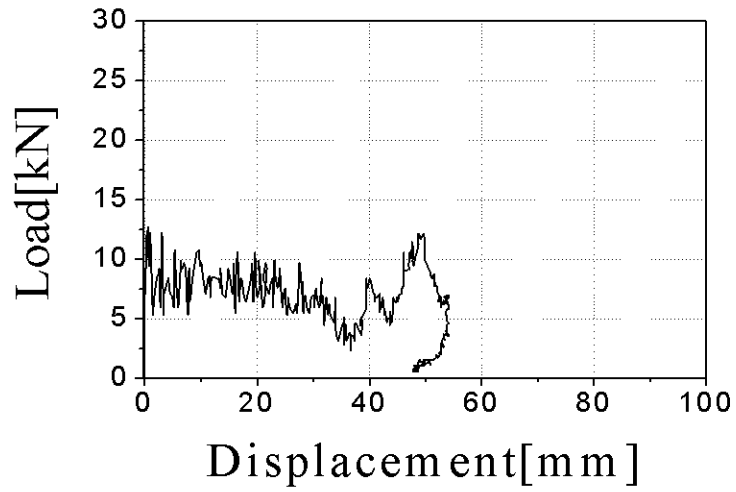


Fig. 22 Load-displacement curve of CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 5.27/0^\circ$)

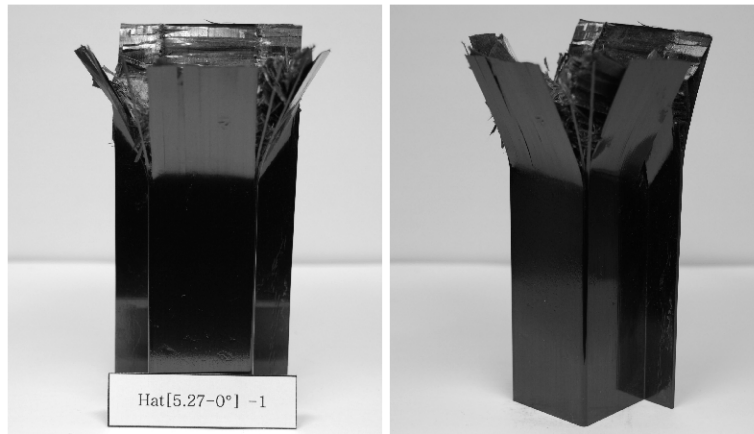


Photo. 19 Shape of collapsed CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 5.27/0^\circ$)

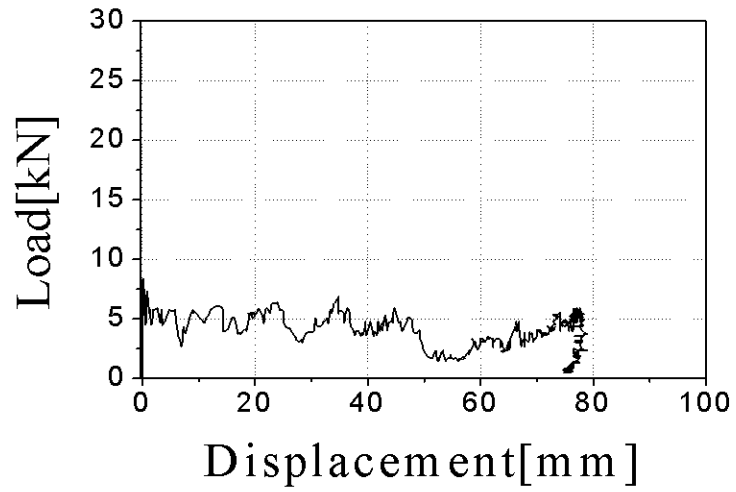


Fig. 23 Load-displacement curve of CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 1.05/90^\circ$)



Photo. 20 Shape of collapsed CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 1.05/90^\circ$)

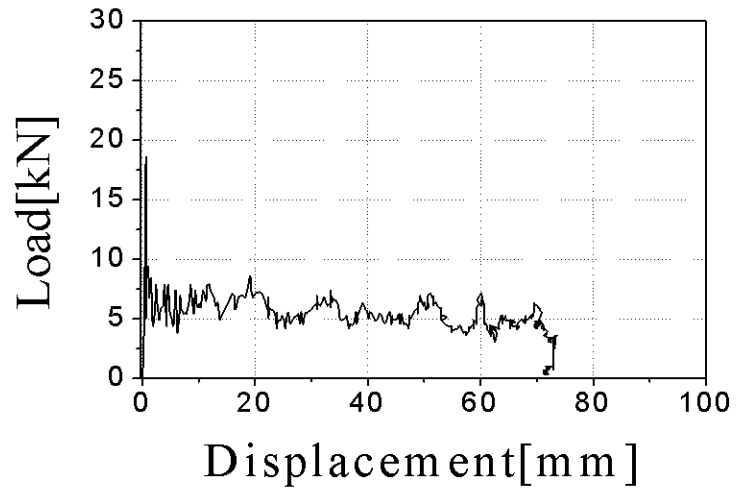


Fig. 24 Load-displacement curve of CFRP side member.
 (Impact, ϕ/θ : 2.11/90°)

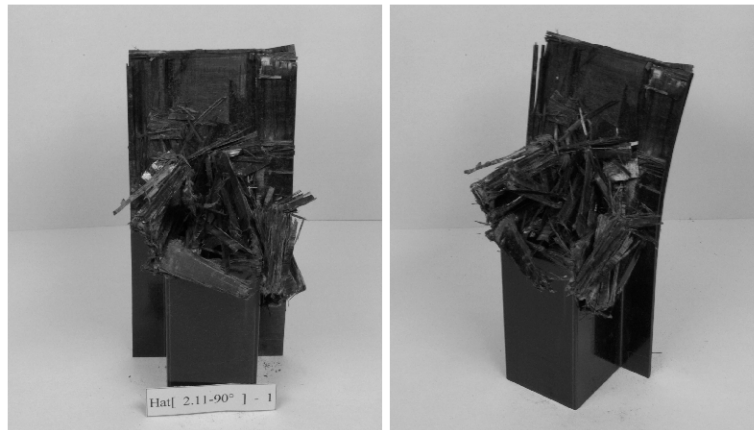


Photo. 21 Shape of collapsed CFRP side member.
 (Impact, ϕ/θ : 2.11/90°)

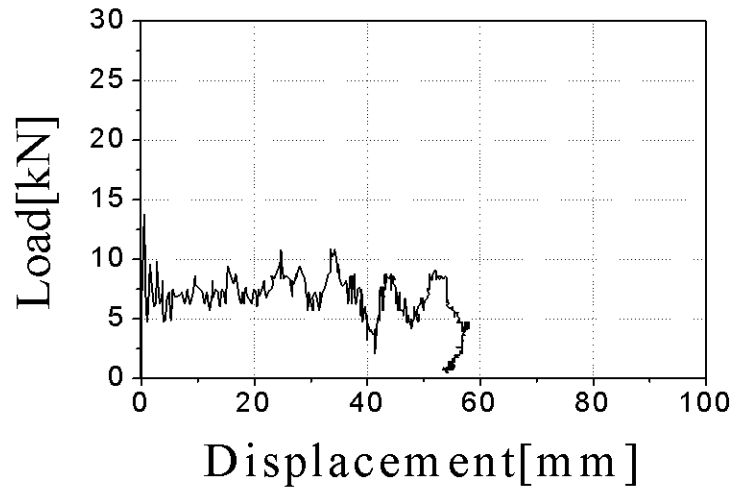


Fig. 25 Load-displacement curve of CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 5.27/90^\circ$)



Photo. 22 Shape of collapsed CFRP side member.
 (Impact, $\phi/\theta : 5.27/90^\circ$)

3-4 혼성 Al/CFRP 사이드부재의 압괴실험

본 절에서는 CFRP의 취성과파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강한 혼성 A/CFRP 사이드부재에 대한 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 27~30에 적층수 8ply를 갖는 Al/CFRP 사이드부재에 대하여 15° , 45° , 90° , $0^\circ/90^\circ$ 및 $90^\circ/0^\circ$ 의 적층각의 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 23~27에 각 시험편에 대하여 충격압괴실험후 시험편의 형상을 나타내었다.

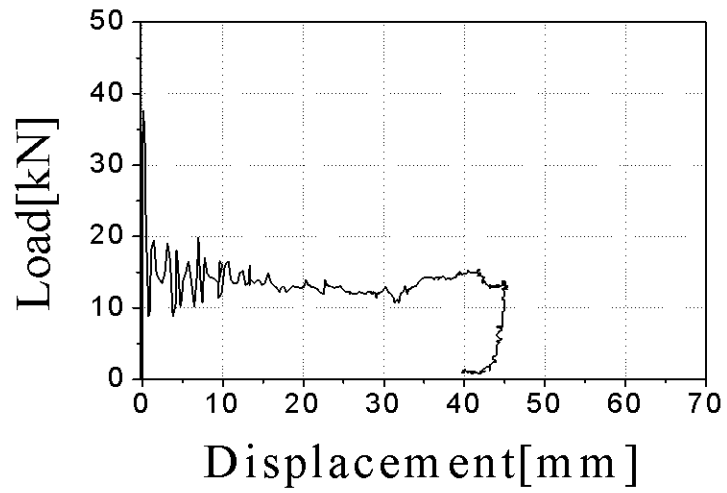


Fig. 26 Load-displacement curve of Al/CFRP side member, [+15/-15]₄
(Impact, 15° fiber orientation angle)



Photo. 23 Shape of collapsed Al/CFRP side member, [+15/-15]₄
(Impact, 15° fiber orientation angle)

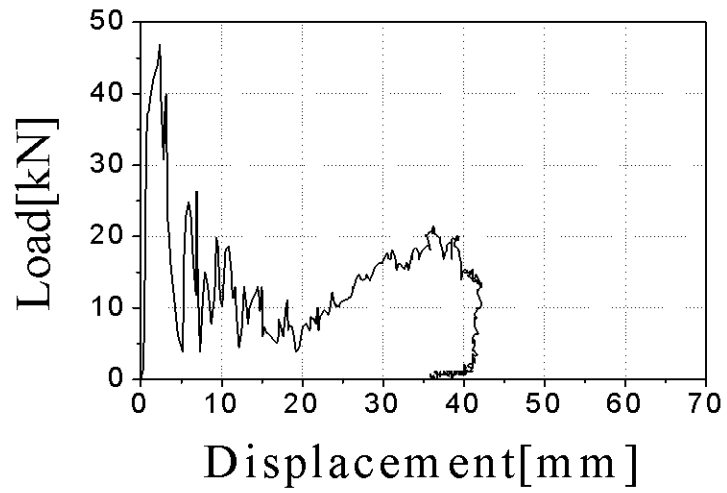


Fig. 27 Load-displacement curve of Al/CFRP side member, $[+45/-45]_4$
 (Impact, 45° fiber orientation angle)

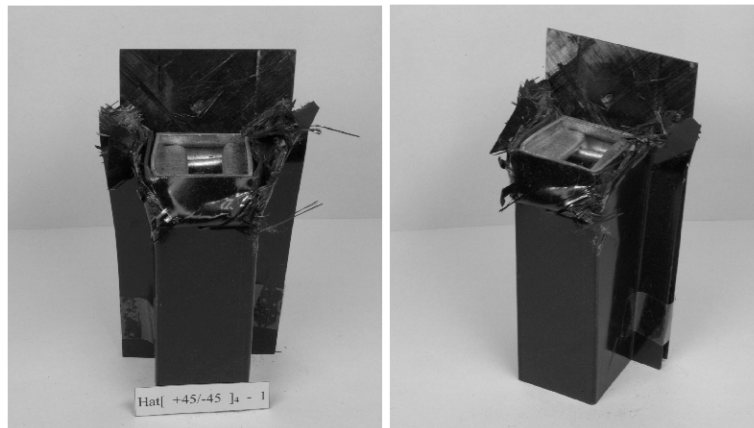


Photo. 24 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[+45/-45]_4$
 (Impact, 45° fiber orientation angle)

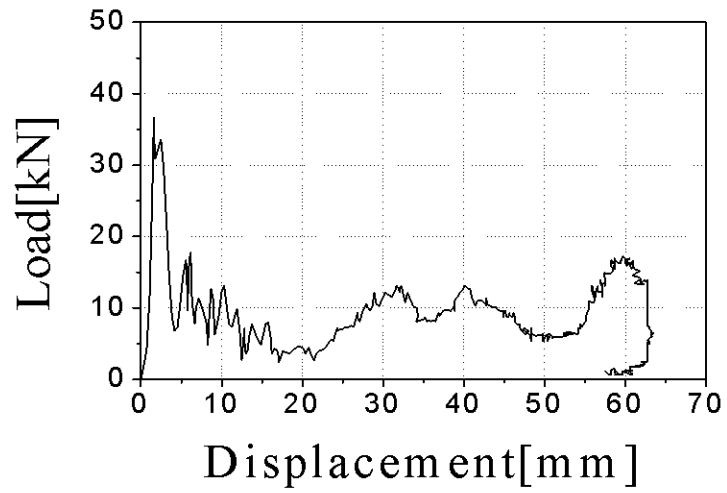


Fig. 28 Load-displacement curve of Al/CFRP side member, $[90]_8$
 (Impact, 90° fiber orientation angle)

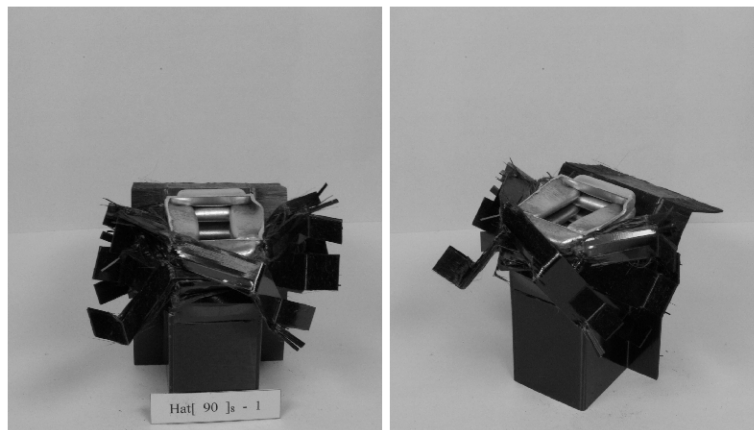


Photo. 25 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[90]_8$
 (Impact, 90° fiber orientation angle)

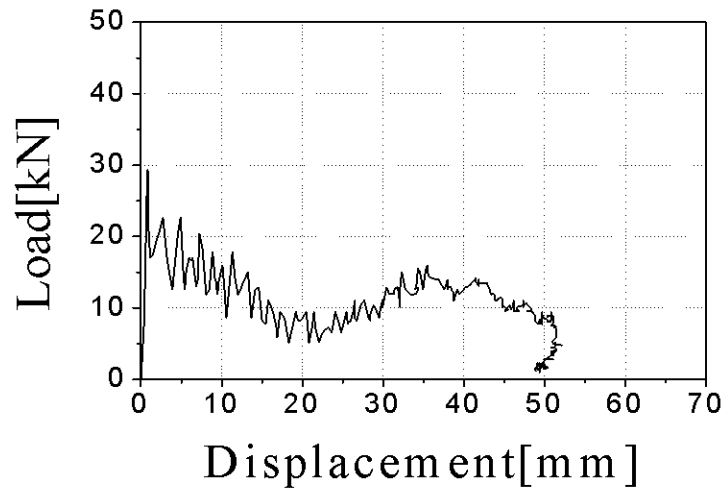


Fig. 29 Load-displacement curve of Al/CFRP side member, $[0/90]_4$
 (Impact, $0^\circ / 90^\circ$ fiber orientation angle)

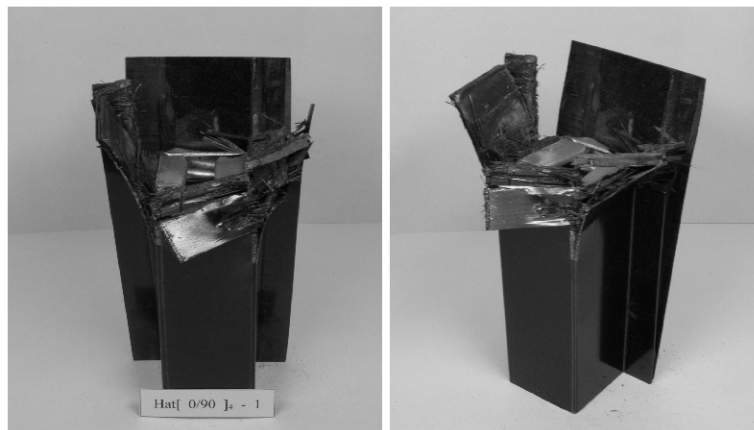


Photo. 26 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[0/90]_4$
 (Impact, $0^\circ / 90^\circ$ fiber orientation angle)

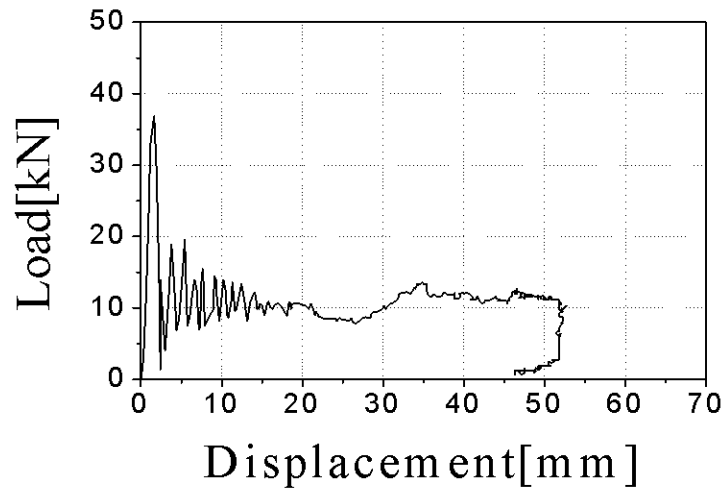


Fig. 30 Load–displacement curve of Al/CFRP side member, $[90/0]_4$
 (Impact, $90^\circ / 0^\circ$ fiber orientation angle)

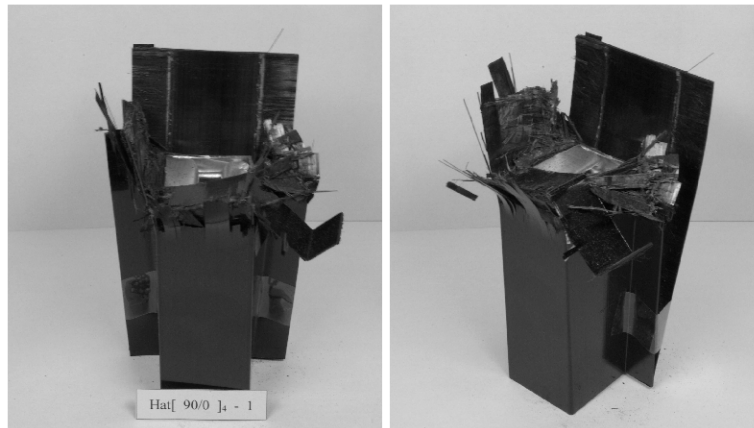


Photo. 27 Shape of collapsed Al/CFRP side member, $[90/0]_4$
 (Impact, $90^\circ / 0^\circ$ fiber orientation angle)

제 4 장 결과 및 고찰

본 장에서는 CFRP 사이드부재에 대하여 최외층각도, 계면수변화 및 단면형상변화에 따른 충격실험을 행하여 압괴모드와 에너지흡수특성에 대하여 고찰하였다. 또한 알루미늄 사각 부재의 외측에 CFRP로 감싼 혼성 AL/CFRP 사이드부재의 압괴모드와 에너지흡수특성을 고찰하였다.

4-1 압괴모드

연속섬유강화 복합재 박육부재(Thin-walled member)에 축 압축하중이 작용할 때 발생하는 압괴유형은 횡방향 전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드 및 국부좌굴 압괴모드와 횡방향 전단과 라미나 굽힘 모드가 조합된 취성파괴모드의 4가지의 압괴모드로 압괴된다.¹⁰⁾ Fig. 31은 복합재 부재의 충돌압괴 과정을 보여주고 있다.

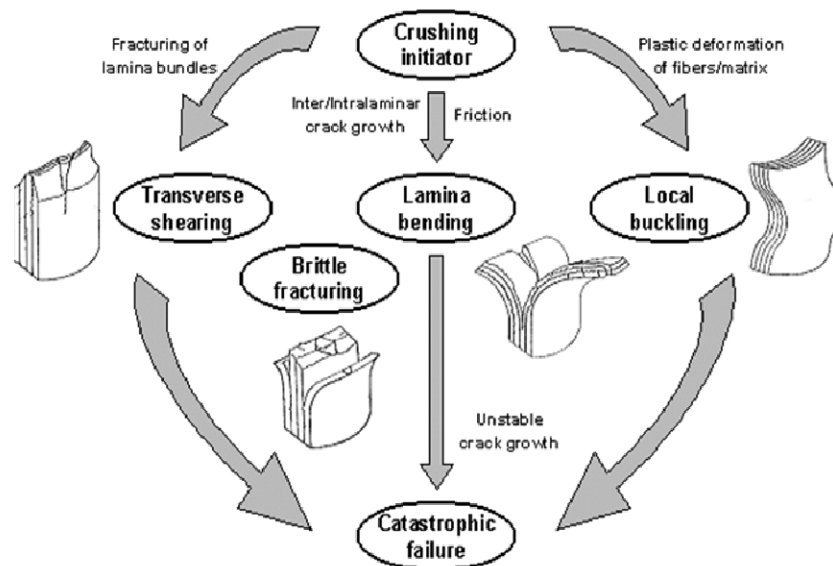


Fig. 31 Crushing process of continuous fiber reinforced composite members

CFRP 사이드부재의 압케모드는 적층각에 따라 Farley and Jones¹⁾가 정의한 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태의 압케모드로 압케 되었다. Photo. 53에 모자형 부재의 압케실험 후 나타난 압케모드를 나타내었다.

15° 로 적층된 부재에서는 Photo. 28의 (a)와 같이 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되는 형상으로 압케되었으며, 이러한 압케모드는 층간 크랙 및 층내 크랙 진전에 의한 라미나 굽힘과 압케표면을 따라 수반된 운동과 하중면에 대한 라미나 묶음의 마찰에 의하여 주로 에너지를 흡수하며, 모서리 부분에서는 섬유와 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 45° 로 적층된 부재에서는 Photo. 28의 (b)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "∩"자형 부재는 접힘모드의 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 섬유와 파손이 없이 기지의 소성변형에 의해 국부좌굴의 변형으로 구성되며, 섬유는 좌굴된 섬유의 인장면을 따라 분리되고 각 계면 사이에서 국부적인 층간분리를 발생한다. 90° 로 적층된 부재에서는 Photo. 28의 (c)와 같이 횡방향의 기지 파단으로 인한 파쇄모드의 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 주로 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 기지 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 0° /90° 로 적층된 부재에서는 Photo. 28의 (d)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "∩"자형 부재는 취성과파괴 모드의 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 주로 평판부재의 층간 크랙 및 층내 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 "∩"자형 부재의 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 묶음의 굽힘과 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 이는 0° 로 적층된 라미나 묶음은 층간 크랙 및 층내 크랙 진전에 의해 부재 외측으로의 라미나 굽힘을 발생시키지만 축 방향에 대하여 90° 로 적층된 섬유는 0° 로 적층된 라미나 묶음의 라미나 굽힘을 방해하면서 파단 된다. 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "∩"자형 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 최외각층

에 0° 로 적층된 라미나 묶음에 의해 나타나는 라미나 굽힘이 두드러지게 나타났으며, 상대적으로 $0^\circ / 90^\circ$ 에서 주로 나타났던 섬유 파단은 적게 나타났다. $90^\circ / 0^\circ$ 로 적층된 부재에서는 Photo. 28의 (e)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "∩"자형 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 최외각층에 0° 로 적층된 라미나 묶음에 의해 나타나는 라미나 굽힘이 나타났다.



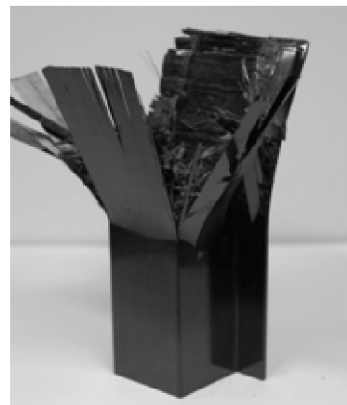
(a) $[+15/-15]_4$

(b) $[+45/-45]_4$

(c) $[90]_8$



(d) $[0/90]_4$



(e) $[90/0]_4$

Photo. 28 Typical collapse modes of CFRP side member

4-1 적층각 변화가 에너지흡수에 미치는 영향

Tables 4는 8ply로 적층된 CFRP사이드 부재의 적층각 변화에 따른 충격압케실험을 행한 결과의 평균값으로 압케길이, 총흡수에너지, 단위질량당 총흡수에너지 및 최대압케하중의 데이터 값을 나타냈다. Fig. 32은 Table 4의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 4와 Fig. 32를 보면 단일 각도로 적층된 경우 적층각도가 15° 에서 90° 로 적층각이 증가할수록 단위질량당 총흡수에너지가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 축하중이 작용될 때 적층각이 적은 경우는 라미나 굽힘과 섬유 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 0° 와 90° 섬유로 조합된 $0^\circ / 90^\circ$ 와 $90^\circ / 0^\circ$ 의 적층각을 갖는 시험편의 경우, 축하중 90° 섬유의 파단과 0° 섬유의 라미나 굽힘을 90° 의 섬유가 방해하여 더 높은 하중에서 섬유파단과 라미나 굽힘이 동시에 일어나면서 에너지를 흡수하였다. 최외층각의 영향을 보면, 최외층각이 90° 인 경우와 0° 인 경우의 에너지 흡수는 비슷하게 나타났다.

Table 4. Impact collapse test results for CFRP side member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angel of CFRP	Collapse Length L [mm]	Total absorbed energy E_T [J]	Toatal absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	39.27	1281.71	42.95	28.04
45°	67.67	748.94	25.10	12.88
90°	61.21	670.44	22.47	11.88
0°/90°	72.78	690.59	23.14	16.26
90°/0°	69.90	723.07	24.23	19.41

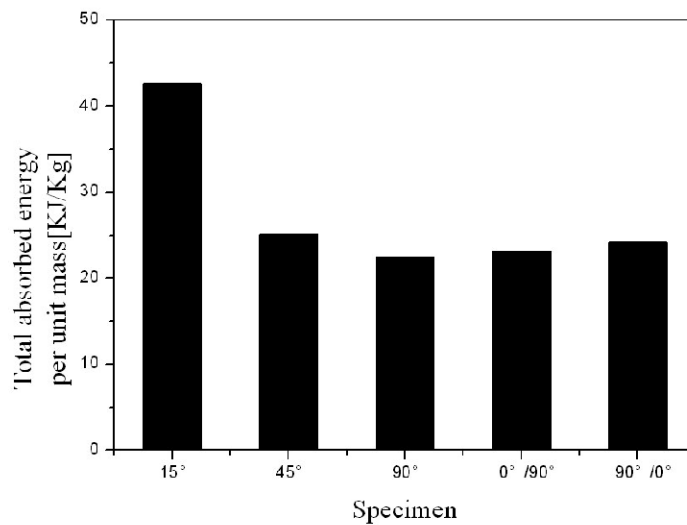


Fig. 32 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)

4-2 계면수 변화가 에너지흡수에 미치는 영향

Table 5은 최외층각이 0° 인 $0^\circ/90^\circ$ 로 적층된 CFRP 사이드 부재에 대하여 계면수를 변화시켜 충격 압괴실험을 행한 결과의 평균값으로 압괴길이, 총흡수에너지, 단위질량당 총흡수에너지 및 최대압괴하중의 데이터 값을 나타냈다. Fig. 33는 Table 5의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 5과 Fig. 33를 보면 계면수가 증가함에 따라 6계면을 갖는 시험편까지는 증가하다가 7계면을 갖는 시험편에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 CFRP 부재의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 크랙 진전이며, 크랙은 크게 층간 크랙(interlaminar crack)과 층내 크랙(intralaminar crack) 및 중심 크랙(central crack)으로 나눌 수 있다. 따라서 계면수가 증가한다는 의미는 층간 크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수가 증가한다는 의미이며, 결국 흡수에너지는 증가하게 된다. 그러나 7계면이 되면, 즉 어느 한계를 넘어서게 되면 층간 크랙수가 증가함에 따라 층 두께의 감소로 인하여 층내 크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수는 감소하게 되며, 결국 층간 크랙 수의 증가로 인하여 다소 흡수에너지는 증가하나 이와 더불어 층내 크랙 수의 감소로 인하여 층내 크랙 진전이 충분히 일어나지 않아 결국 단위질량당 흡수에너지는 감소하게 된다고 사료된다. 따라서 층간 크랙과 층내 크랙 진전이 충분히 일어날 수 있는 계면수 및 층 두께를 고려한다면 충격압괴 하중 하에서 최적의 압괴특성을 갖는 CFRP 부재의 제작이 가능할 것이라 사료된다.

Table 6은 최외층각이 90° 인 $0^\circ/90^\circ$ 로 적층된 CFRP 사이드 부재에 대하여 계면수를 변화시켜 충격 압괴실험을 행한 결과의 평균값으로 압괴길이, 총흡수에너지, 단위질량당 총흡수에너지 및 최대압괴하중의 데이터 값을 나타냈다. Fig. 34는 Table 6의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 6과 Fig. 34를 보면 2, 3, 4 계면에서는 총에너지흡수가 차이가 없는 반면 6계면을 갖는 시험편에서 증가하다가 7계면을 갖는 시험편에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 5. Impact collapse test results for CFRP side member according to interface number(Outer angle 0°)

Interface number	Collapse Length L [mm]	Total absorbed energy E_T [J]	Toatal absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
2	78.16	647.86	21.71	9.18
3	76.88	663.42	22.23	11.18
4	67.02	757.11	25.37	16.53
6	65.83	767.66	25.73	16.78
7	69.56	728.11	24.40	9.38

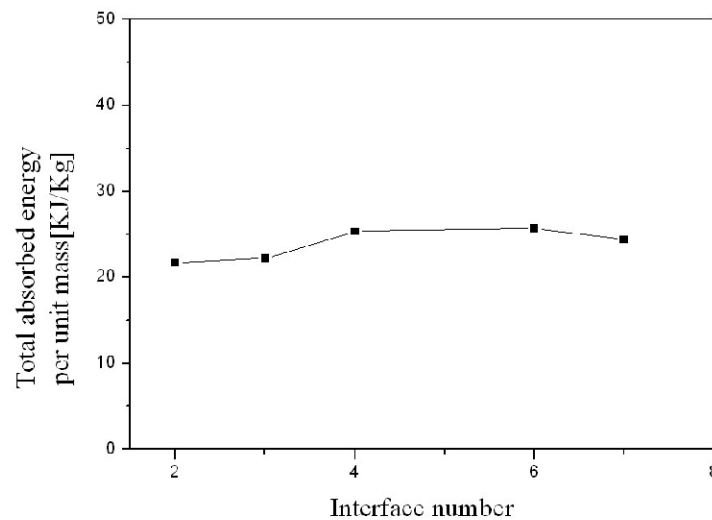


Fig. 33 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)

Table 6. Impact collapse test results for CFRP side member according to interface number(Outer angle 90°)

Interface number	Collapse Length L [mm]	Total absorbed energy E_T [J]	Toatal absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
2	75.36	671.66	22.51	10.72
3	75.63	670.39	22.47	13.29
4	74.66	676.27	22.66	10.19
6	60.04	847.05	28.39	11.97
7	74.02	679.04	22.76	17.77

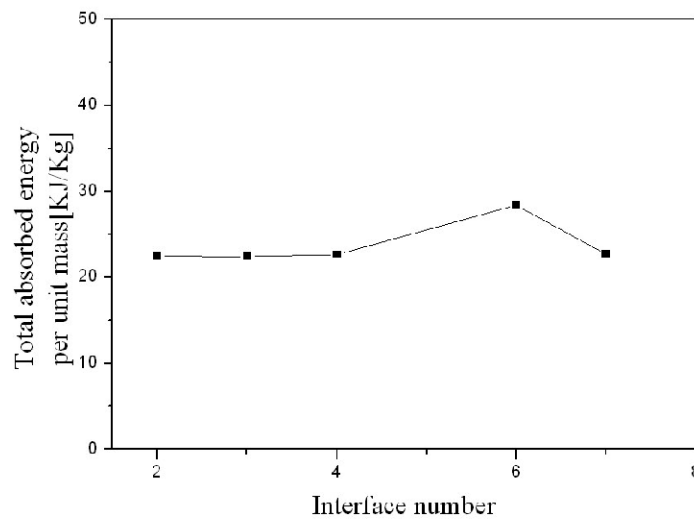


Fig. 34 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)

4-3 단면적 변화가 에너지흡수에 미치는 영향

본 절에서는 CFRP 사이드부재에 대하여 모서리 부분의 단면적을 변화시켜 강성을 증가시키기 위해 평판 부재에 대한 "∩"자형 부재의 단면적을 변화시킨 단면형상 변화에 따른 압괴특성 및 에너지흡수특성을 살펴보고자 한다.

Table 7은 최외층각이 0° 인 $0^\circ/90^\circ$ 로 적층된 CFRP 사이드부재에 대하여 평판부재와 "∩"자형 부재의 단면적비를 1.05와 2.11 및 5.27로 변화시켜 충격압괴실험을 행한 결과의 평균값으로 압괴길이, 총흡수에너지, 단위질량당 총흡수에너지 및 최대압괴하중의 데이터 값을 나타냈다. Fig. 35는 Table 7의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 7와 Fig. 35을 보면 단면적비가 증가할수록 단위질량당 흡수에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 강도부재가 축 하중을 받을 때 응력분포는 모서리 부분에서 대부분 집중되면서 압괴되며 모자형 단면부재의 경우 일반적으로 "∩"자 단면측보다 평판측의 좌굴하중이 낮기 때문에 평판측의 좌굴이 계기가 되어 압괴된다. 따라서 평판부재에 대한 "∩"자형 부재의 단면적이 증가할수록 모서리 부분에서 더 많은 응력이 집중이 되고 높은 하중에서 압괴가 시작되고 전체적으로 많은 총흡수 에너지를 흡수하면서 압괴되는 것으로 사료된다.

Table 8은 최외층각이 90° 인 $0^\circ/90^\circ$ 로 적층된 CFRP 사이드 부재에 대하여 평판부재와 "∩"자형 부재의 단면적비를 1.05와 2.11 및 5.27로 변화시켜 충격압괴실험을 행한 결과의 평균값으로 압괴길이, 총흡수에너지, 단위질량당 총흡수에너지 및 최대압괴하중의 데이터 값을 나타냈다. Fig. 36은 Table 8의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

최외층각이 90° 인 CFRP 사이드부재는 최외층각이 0° CFRP 사이드부재와 마찬가지로 평판부재에 대한 "∩"자형 부재의 단면적이 증가할수록 더 높은 총에너지 흡수를 흡수한다.

Table 7. Impact collapse test results for CFRP side member according to sectional area ratio(Outer angle 0°)

Sectional area ratio	Collapse Length L [mm]	Total absorbed energy E_T [J]	Toatal absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
1.05	75.32	546.38	18.31	12.87
2.11	69.90	723.07	24.23	19.41
5.27	53.41	945.37	31.68	13.52

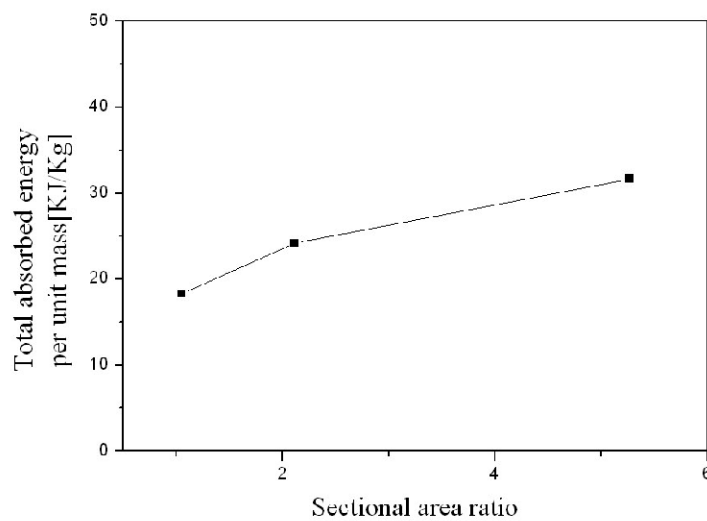


Fig. 35 Relationship between sectional area ratio and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)

Table 8. Impact collapse test results for CFRP side member according to sectional area ratio(Outer angle 90°)

Sectional area ratio	Collapse Length L [mm]	Total absorbed energy E_T [J]	Toatal absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
1.05	77.08	532.40	17.84	10.09
2.11	72.78	690.59	23.14	16.26
5.27	56.05	902.49	30.24	13.68

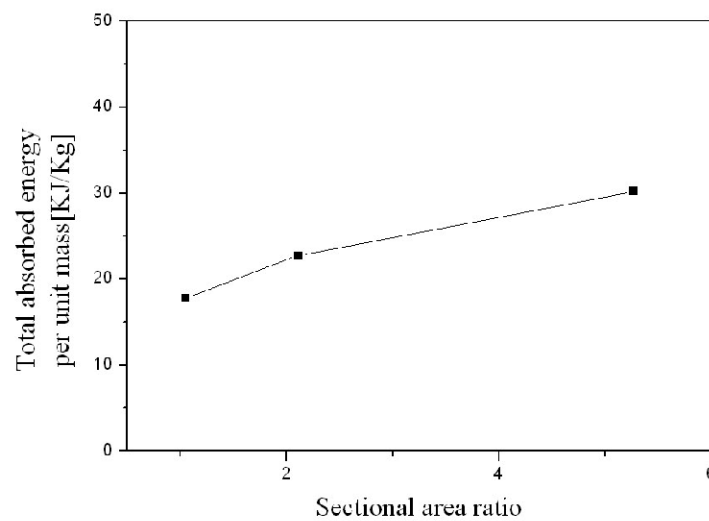


Fig. 36 Relationship between sectional area ratio and absorbed energy per unit mass for CFRP side member (Impact)

4-4 혼성 AI/CFRP 사이드부재의 에너지흡수특성

본 절에서는 CFRP의 취성과파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강한 혼성 AI/CFRP 사이드부재에 대한 압축특성 및 에너지흡수특성을 살펴보고자 한다.

Table 9는 CFRP의 취성과파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강하여 CFRP를 15° , 45° , 90° , $0^\circ/90^\circ$ 및 $90^\circ/0^\circ$ 로 적층한 혼성 AI/CFRP 사이드부재에 대하여 실험을 행한 결과의 평균값으로 압축길이, 총흡수에너지, 단위질량당 총흡수에너지 및 최대압축하중의 데이터 값을 나타냈다. 또한 알루미늄 보강에 의한 상호작용으로 인한 흡수에너지의 상승효과를 고찰하기 위하여 압축실험을 행한 결과의 평균값은 나타내었다. Fig. 37은 Table 9의 데이터 값 중 단위질량당 총흡수энер지를 비교한 그림이다.

Table 9와 Fig. 37를 보면 혼성 AI/CFRP 사이드부재의 흡수에너지는 CFRP사이드부재와 비슷한 경향을 보였다. 이는 내부 알루미늄 부재가 접힘(국부좌굴)을 일으키며 외부로 돌출되면서 "ㄴ"자형 단면부재와 평판부재가 결합된 외부의 CFRP 부재를 서로 분리시키면서 알루미늄 부재와 CFRP 사이드부재의 결합으로 인한 상호작용이 발휘가 되지 않았기 때문으로 사료된다. 그러나 서로 분리 되지 않고 압축이 진행되도록 한다면 두 재료의 부재 결합으로 인한 상호작용이 효과적으로 발휘되어 총흡수에너지의 상승효과가 나타날 것으로 사료된다.

Table 9. Impact collapse test results for Al/CFRP side member

Fiber orientation angel of CFRP	Collapse Length L [mm]	Total absorbed energy E_T [J]	Toatal absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	43.03	1697.28	7.83	38.91
45°	41.72	1758.19	8.11	39.74
90°	63.31	1149.44	5.30	34.21
0°/90°	50.55	1433.53	6.61	45.48
90°/0°	52.25	1394.27	6.43	43.87

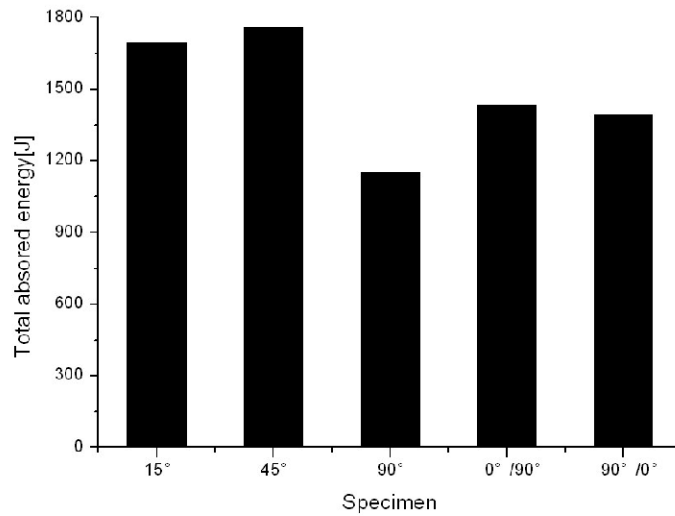


Fig. 37 Relationship between fiber orientation angle of Al/CFRP and absorbed energy for Al/CFRP side member (Impact)

제 5 장 결 론

본 연구에서는 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 안정성능 및 연비 개선을 위한 경량화에 대한 방안으로 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재를 이용하여 CFRP 사이드부재를 제작한 후 최외층각 변화, 계면수 변화 및 단면 형상 변화에 따른 압계특성을 고찰하였다. 또한 경량화 차원에서 알루미늄 튜브의 외측에 CFRP로 감싼 혼성 AL/CFRP 사이드부재를 제작하여 에너지흡수특성을 고찰하였다. 차체구조부재의 기본 형상인 모자형 단면의 CFRP 사이드부재에 대하여 CFRP 최외층각 변화, 계면수 변화 및 단면 형상 변화에 따라 충격압계실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFRP 사이드부재는 적층각에 따라 횡방향 전단, 라미나 굽힘, 취성과파괴 및 국부좌굴 압계모드가 조합된 형태의 압계모드로 압계되었다. 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 사이드부재의 적층각이 90° 에서 15° 로 작아질수록 총흡수에너지가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 축하중이 작용될 때 적층각이 작은 경우는 라미나 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 총에너지를 흡수하였다.
3. 0° 와 90° 섬유층으로 조합된 CFRP 사이드부재의 계면수 영향에서는 계면수가 증가함에 따라 6계면을 갖는 시험편 까지는 증가하다가 7계면을 갖는 시험편에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 0° 와 90° 섬유로 조합된 CFRP 사이드부재의 단면적비 영향에서는 평판부재에 대한 "∩"자형 부재의 단면적비가 증가할수록 모서리 부분에서 더 많은 응력이 집중이 되고 높은 하중에서 압괴가 진행되어 전체적으로 많은 에너지를 흡수하였다.
5. 알루미늄 보강에 의한 혼성 Al/CFRP 사이드부재는 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 분리되면서 상호작용이 발휘되지 않아 효과적인 에너지 흡수 특성이 나타나지 않았다.

참 고 문 헌

1. 한국자동차공학회지 , 『자동차 기술 핸드북 ; 시험평가편』 SAE Korea, 1996, pp. 339-350.
2. 이대길 · 오박균 “복합재료 자동차 부품의 설계 및 제조방법.” 『자동차공학회지』 **16**:45-53, 1994.
3. Donald F. Adams. "Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes." *Technomic Publishing Company*, 1990.
4. 광규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 『자동차경제』 , 24-29, 1997
5. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (VI)." 『자동차공학회지』 **26**:30-35, 2004.
6. Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H. and Park, G. G.. "Light weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments." *Transactions of KSAE* **10**:125-132, 2002.
7. White, M. D. and Jones, N.. "Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections." *Int. J. Mech. Sci.* **41**:179-208, 1999.
8. Ohkubo Y, Akamatsu T. and Shirasawa K.. "Mean Crushing strength of closed-hat section members." *Society of Automotive Engineers paper* No. 740040, 1974.
9. Wang, Q., Fan, Z. and Gui, L.. "Theoretical analysis for axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections." *Int. J. Mech. Sci.* **49**:515-521, 2007.
10. 차천석. "박육단면 차체구조부재의 충격압괴 특성평가." 조선대학교 박사논문, 2000.
11. Song, H, Fan, Z., Yu, G., Wang, Q. and Tobota, A.. "Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections." *Int.*

J. Solids and Structures **42**:2575-2600, 2005.

12. Kim, S. K., Im, K. H., Kim, Y. N., Park, J. W., Yang, I. Y. and Adachi, T.. "On the characteristics of energy absorption control in thin-walled members for the use of vehicular structures." *Key Engineering Materials* **233-236**:239-244, 2003.
13. Minoru, Y., Manabu, G. and Yasuhiko S.. "Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections numerical simulation and experiment." *Journal of Materials Processing Technology* **140**:59-64, 2003.
14. 황창숙. "축압케 하중을 받는 Al 박육부재의 에너지흡수제어특성." 조선대학교 석사논문, 2003.
15. Farley, G. L. and Jones, R. M.. "Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes", *Journal of Composite Materials*, **26**:388-404, 1991.
16. Farley, G. L.. "Relationship between mechanical-property and energy-absorption trends for composite tubes." *NASA Technical paper, OMB* 0704-0188, 1992.
17. 이길성. "충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가" 조선대학교 박사논문, 2008.
18. Huh, H., Kim, K. P., kim, S. H., Song, J. H., and Hong, S. K.. "Crashworthiness assessment of frond side members in an auto-body considering the fabrication histories." *Int. J. Mech. Sci.* **45**:1645-1660, 2003.
19. 김기풍·송정한·허훈·김현섭·홍석길. "성형 효과를 고려한 차체 구조 부재의 충돌 특성." 『한국정밀공학회논문집』 **12**:91-98, 2004.
20. Kim, B. J. and Heo, S. J.. "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles" *International Journal of Automotive Technology* **4**:141-147, 2003.

21. 김범진·허승진. "알루미늄 경량 차체의 충돌에너지 흡수 성능 향상을 위한 설계 개선 연구." 『자동차공학회 논문집』 *11*:155-160, 2003.
22. Hanssen, A. G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S.. "Optimum design for energy absorption of square aluminum columns with aluminium foam filler." *Int. J. Mech. Sci.* *43*:153-176, 2001.
23. 김천욱·한병기·원종진·임채홍. "자동차 충돌특성 연구동향." 『자동차공학회지』 *18*:1-17, 1996.
24. Li, S. and Reid, S. R.. "Relationship Between the Elastic Buckling of Square Tubes and Rectangular Plates." *International Journal of Applied Mechanics* *57*:969-973, 1990.
25. Singace, A. A.. "Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-mode." *Int. J. Mech. Sci.* *41*:865-890, 1999.
26. 김영남·차천석·양인영. "CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘에 관한 실험적 연구." 한국자동차공학회논문집』 *10*:149-157, 2002.
27. Kim, Y. N., Im, K. H., Kim, S. K., and Yang, I. Y.. "Energy absorption characteristics of CFRP composite tubes under axial compression load." *Key Engineering Materials* *233-236*:245-250, 2003.
28. Kim, Y. N., Hwang, J. J., Baek, K. Y., Cha, C. S., and Yang, I. Y.. "Impact collapse characteristics of CF/Epoxy composite tubes for light-weights." *KSME International Journal* *17*:48-56, 2003.
29. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압괴특성." 조선대학교 박사논문, 2002
30. Andre Laoie, J., and Kellas, S.. "Dynamic crush tests of energy-absorbing laminated composite plates." *Composite : part A* *27A*:467-475, 1996.
31. Broughton, J. G., Beevers, A. and Hutchinson, A. R.. "Carbon-fibre-reinforced Plastic(CFRP) strengthening of aluminum extrusions." *Int. J. Adhesion and adhesives* *17*:269-278, 1997.

32. Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M. and Du, X. W.. "Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes." *International Journal of Impact Engineering* **24**:385-401, 2000.
33. 김정호. "경량화용 차체 구조부재의 충격 압괴특성에 관한 연구." 조선대학교 박사논문, 1996.
34. Aya N. and Takahashi K.. "Energy absorption characteristics of vehicle body structure." *Japan Society of Automotive Engineers Bulletin* **7**:65-74, 1976.
35. Tani M. and Funahashi A.. "Energy absorption by the plastic deformation of body structural members." *Paper 783068 presented at S.A.E. Annual Meeting, Detroit, February 1978.* 2002.
36. Cha, C. S., Chung, J. O., Park, J. W., Kim, Y. N., and Yang, I. Y.. "Collapse analysis of spot welded thin section members in a vehicle body structure at various impact velocities." *KSME International Journal* **17**:501-510, 2003.
37. M.D. White, N. Jones, W. Abramowicz, 1999," A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, 99. 209-233.