



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2016년 8월
박사학위논문

에너지의 변화에 따른 경량화용
CFRP구조부재의 충돌 안전 특성

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

(정밀기계설계공학전공)

최 주 호

에너지의 변화에 따른 경량화용 CFRP구조부재의 충돌 안전 특성

Collision Safety Characteristics of CFRP Structural
Members for a Use of Lightweight according to
Different Energies

2016 년 8 월 25 일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

(정밀기계설계공학전공)

최 주 호

에너지의 변화에 따른 경량화용 CFRP구조부재의 충돌 안전 특성

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2016 년 4 월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

(정밀기계설계공학전공)

최 주 호

최주호의 박사학위 논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	이동기	인
위원	전북대학교	교수	김선규	인
위원	우석대학교	교수	임광희	인
위원	조선대학교	부교수	김지훈	인
위원	조선대학교	교수	양인영	인

2016 년 6 월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	v
LIST OF PHOTOGRAPHS	ix
ABSTRACT	x
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 방법	6
제 2 장 CFRP부재의 에너지 흡수 이론	9
제 1 절 복합 박육부재의 압괴모드	9
제 2 절 복합 박육부재의 압괴이론	18
제 3 장 실험방법	25
제 1 절 시험편	25
제 2 절 충격 실험장치	30
제 3 절 충격 압괴실험	34
제 4 장 에너지 변화에 따른 충격압괴 실험결과	36
제 1 절 원형단면 CFRP부재의 충격실험결과	36

제 2 절 사각단면 CFRP부재의 충격실험결과	45
제 5 장 실험결과 및 고찰	54
제 1 절 원형 CFRP부재의 충격압괴특성	54
제 2 절 사각형 CFRP부재의 충격압괴특성	69
제 3 절 충격 압괴모드	83
제 6 장 결 론	88
참 고 문 헌	

LIST OF TABLES

Table 1	Material properties of the CFRP prepreg sheet	25
Table 2	Impact collapse test result for circular members with outer angle 0° according to interface number and impact energy	43
Table 3	Impact collapse test result for circular members outer angle 90° according to interface number and impact energy	44
Table 4	Impact collapse test result for Square members with outer angle 0° according to interface number and impact energy	52
Table 5	Impact collapse test result for Square members with outer angle 90° according to interface number and impact energy	53
Table 6	Collapse length for circular members according to interface number and impact energy	56
Table 7	Maximum collapse load for circular members according to interface number and impact energy	59
Table 8	Absorbed energy for circular members according to interface number and impact energy	62
Table 9	Total absorbed energy for circular members according to interface number and impact energy	65
Table 10	Impact Characteristics for CFRP circular members according to interface number of CFRP(E=611.52J)	66
Table 11	Impact Characteristics for CFRP circular members according to interface number of CFRP(E=529.0J)	67
Table 12	Impact Characteristics for CFRP circular members according to interface number of CFRP(E=419.44J)	68
Table 13	Collapse length for Square members according to interface number and impact energy	71
Table 14	Maximum collapse load for Square members according to	

interface number and impact energy	74
Table 15 Absorbed energy for Square members according to interface number and impact energy	77
Table 16 Total absorbed energy for Square members according to interface number and impact energy	80
Table 17 Impact Characteristics for CFRP square members according to interface number of CFRP(E=372.4J)	81
Table 18 Impact Characteristics for CFRP square members according to interface number of CFRP(E=274.4J)	82
Table 19 Impact Characteristics for CFRP square members according to interface number of CFRP(E=223.44J)	82

LIST OF FIGURES

Fig. 1 The key factor of CFRP laminates	4
Fig. 2 Composite structures for boeing 787	5
Fig. 3 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes	11
Fig. 4 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode ·	12
Fig. 5 Sketch of crack propagation modes	12
Fig. 6 Crushing characteristics of laminar bending crushing mode	14
Fig. 7 Friction related energy-absorption mechanisms	14
Fig. 8 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode	16
Fig. 9 Crushing characteristics of local buckling crushing mode	17
Fig. 10 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load	21
Fig. 11 Configuraion of Specimens	27
Fig. 12 Autoclave vacuum bag degassing	28
Fig. 13 Processing of vacuum bag degassing	29
Fig. 14 Curing cycle of CFRP stacking specimen	29
Fig. 15 Impact testing setup for crushing	32
Fig. 16 Diagram of measurement system	33
Fig. 17 Load-displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J)	37
Fig. 18 Load-displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J)	38
Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J)	39
Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP Circular members with	

orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J)	40
Fig. 21 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J)	41
Fig. 22 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J)	42
Fig. 23 Load–displacement curve of CFRP Square members with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J)	46
Fig. 24 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J)	47
Fig. 25 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J)	48
Fig. 26 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J)	49
Fig. 27 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J)	50
Fig. 28 Load–displacement curve of CFRP Circular members with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J)	51
Fig. 29 Relationship between interface number and collapse length for circular CFRP member according to Impact energy(Outer layer 0°)	55
Fig. 30 Relationship between interface number and collapse length for circular CFRP member according to Impact energy(Outer layer 90°)	55
Fig. 31 Relationship between interface number and max collapse load for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)	58
Fig. 32 Relationship between interface number and max collapse load for circular CFRP member according to Impact energy	

	(Outer layer 90°)	58
Fig. 33	Relationship between interface number and absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)	61
Fig. 34	Relationship between interface number and absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)	61
Fig. 35	Relationship between interface number and total absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)	64
Fig. 36	Relationship between interface number and total absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)	64
Fig. 37	Relationship between interface number and collapse length for square CFRP member according to Impact energy(Outer layer 0°)	70
Fig. 38	Relationship between interface number and collapse length for square CFRP member according to Impact energy(Outer layer 90°)	70
Fig. 39	Relationship between interface number and max collapse load for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)	73
Fig. 40	Relationship between interface number and max collapse load for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)	73
Fig. 41	Relationship between interface number and absorbed energy for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)	76

Fig. 42 Relationship between interface number and absorbed energy
for square CFRP member according to Impact energy
(Outer layer 90°) 76

Fig. 43 Relationship between interface number and total absorbed energy
for square CFRP member according to Impact energy
(Outer layer 0°) 79

Fig. 44 Relationship between interface number and total absorbed energy
for square CFRP member according to Impact energy
(Outer layer 90°) 79

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section	18
Photo. 2 Autoclave	28
Photo. 3 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J)	83
Photo. 4 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J)	84
Photo. 5 Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J)	85
Photo. 6 Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J)	85

ABSTRACT

Collision Safety Characteristics of CFRP Structural Members for a Use of Lightweight according to Different Energies

Choi, Ju-Ho

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

Dept. of Mechanical Design Engineering

Graduate School of Chosun University

In the present study, the impact properties of a CFRP structural member under an impact load were intensively investigated for passenger safety protection under assuming the commercial use of carbon fibers reinforced plastic (CFRP) structural members in lightweight cars; in addition, the superiority of the impact properties depending on its layer configuration was experimentally investigated. Especially, the impact properties and collapse modes depending on the cross-sectional shape of the CFRP material, the outermost layer angle, and interlaminar number were studied to obtain the optimum data for lightweight vehicular body design with improved fuel efficiency and passenger safety performance. The obtained results from this research are the following:

1. With an impact energy of 611.52 J, the smallest collapse length of CFRP material with a circular cross-section was 54.7 mm when the outermost layer angle was at 0° however, at 90° , the smallest collapse length was 34 mm, which is approximately 60% shorter.

Hence, in order to secure the internal space for guaranteed passenger safety after a collision, the outermost layer angle of the CFRP material with a circular cross-section is 90° , and the impact property seems to be the most outstanding when the interlaminar number is 6.

2. For an impact energy of 372.4 J, for CFRPs with a rectangular cross-section, the smallest collapse length of 64.0 mm occurred with an outermost layer angle of 0° however, the length decreases to 59.5 mm at an angle of 90° , which is about 8% shorter. Therefore, in order to secure the internal space for guaranteed passenger safety after a collision, the outermost layer angle of CFRP material with a rectangular cross-section is 90° , and the impact property seems to be the most outstanding when the interlaminar number is 2.
3. When the outermost layer angle was 0° , the CFRP member with a circular cross-section collapsed due to the gradual propagation of interlaminar and intralaminar cracks, followed by the outwardly expanding Spline phenomenon in the member. Moreover, the laminar flexure caused by the propagation of interlaminar and intralaminar cracks, the movement accompanied with the collapsed surface, and the packaged-laminar friction at the load surface mainly absorbed the energy, and it was collapsed in a brittle fracture mode of combined transverse shear and fiber flexural modes along the fiber direction. However, in the case of the outermost layer angle of 90° , longitudinal fibers at 0° tried to expand outward in the member at impact collapse, but the members, along with the fibers at 90° , broke and collapsed in a ductile fracture mode.
4. For the CFRP members with a rectangular cross-section, when the outermost layer angle is at 0° , the laminar flexure due to the propagation of interlaminar and intralaminar cracks in the plate member, the packaged-laminar and matrix rupture due to the transverse shear

mode in the corner member, the flexure of packaged–laminar, and the rupture of fibers absorbed most of the energy. Moreover, the plate members expanded outward with progressive propagation of interlaminar and intralaminar cracks when the outermost layer angle is at 90° but the corner member collapsed into a combined form of the packaged laminar fiber and matrix rupture and the laminar flexure due to transverse shear mode.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

최근 자동차에 적용되는 핵심기술은 차량의 고안전도 및 편의성 향상기술과 사회적인 측면에서 새로운 해결과제로 부각되고 있는 환경보호를 위한 차량기술로 집약될 수 있다.

자동차의 정보화 시장조사에 의하면 자동차 구매 시의 중요 포인트로써 안전성은 연비와 유지비, 환경에 대한 배려보다 높은 순위로 선정되었다. 최근에는 자동차에 센서, 카메라 등을 장착하여 운전자의 인지와 판단을 지원하며 운전조작의 용이성 및 각종 주행 조건에서의 차량의 운동성능 향상을 위한 능동개념의 안전기술을 개발하여 충돌사고를 미리 예방하는 예방안전 기술이 개발되고 있어 이로 인해 훨씬 보강된 차체설계가 요구되며 다기능화에 필수적인 여러 가지 부품의 장착은 무게 증가의 요인으로 작용되고 있다.¹⁻⁴⁾

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 배기규제를 더욱 강화하고 있다. 이러한 환경보호 관련 자동차 기술개발의 동향은 무공해 자동차, 전기자동차에 대한 연구와 함께 기존 자동차의 연비향상 뿐 아니라 차체수명연장, 배기가스의 정화, 소음방지 그리고 자원재활용을 위한 리사이클링 등을 위한 폭넓은 연구개발 투자가 이루어지고 있으며, 이를 위한 방법으로 엔진 효율향상, 공기저항 감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 소재의 경량화 등을 들 수 있다. 고안전 및 편의성을 위한 차량의 개발은 차량의 무게 증가가 요구되고 있는 반면, 환경보호 차원에서 요구되는 차량의 기술적 요구사항은 차량의 경량화를 요구하고 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다. 따라서, 자동차의 설계는 안전성이 확

보된 상태에서 차량의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다.⁵⁻¹⁶⁾

최근의 차체구조의 경량화를 위한 연구결과들은 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 유한 요소해석을 수행하고 있으며,¹⁷⁻²²⁾ 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.²³⁻³⁸⁾ 1990년대 접어들면서 자동차의 플라스틱화는 의장과 내장부품을 벗어나 구조나 기능부품영역까지 확대 적용되면서 보다 고성능화된 수지-엔지니어링 플라스틱, Plastic Alloy, 복합재료(Composite Material) 등의 제품 적용 요구가 증대하고 있다. 최근에는 차량 중량의 경감, 연료소비 효율의 증대, 안전성 및 승차감의 증대, 온실가스(CO₂)의 저감, 코스트 저감, 고성능화, 생산성 증대, 스타일의 개량 등 자동차 관련 모든 영역에서 플라스틱은 중요한 역할과 다른 부품과의 결합에서도 큰 영향을 주고 있다.

최근 급속히 각광을 받고 있는 저탄소 녹색 성장을 위한 그린 자동차의 개발은 연비 향상을 위한 친환경 자동차 개발에 집중되어 있는 것이 현실이다. 그러나 차량의 경량화를 통한 연비향상, 친환경 소재 적용을 통한 환경규제 대응 및 나날이 증가하는 자동차 소비자의 감성적 요구를 만족시키기 위해서는 새로운 소재개발이 필수적으로 수반되어야 한다. 기존 금속은 물론이고 고비중의 플라스틱 소재를 대체함으로써 경량성과 고기능성을 함께 부여할 수 있는 새로운 소재가 요구되고 있으며, 이러한 요구를 만족할 수 있는 차세대 개념의 섬유 소재 개발은 자동차 내·외장 부품 분야에서 가장 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

Fig. 1은 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 특성을 결정하는 인자들을 나타낸 그림이다. 나타낸 인자 중에 가장 중요한 것은 충격에 의한 충격손상, 파손, 흡수에너지, 섬유 및 기지의 파단인데, 그 이유는 이물충격에 의한 손상에 매우 취약하고 CFRP 적층판의 특성 때문이다. 즉, CFRP 적층판에 있어 섬유로서 강화된 면내 강도에 비해 층간의 강도가 현저히 낮기 때문이다.³⁹⁻⁴¹⁾ 또한 이물 충격손상 부분에 압축하중이 작용하면 층간박리가 일어나고, 국소적인 좌굴이 발생하여 더욱 더

그박리가 불안정하게 전파되고 결국에는 전체적인 파괴에 이른다. 따라서 적층복합재 구조를 실용화함에 있어서 금속재와 다른 설계변수는 이 재료가 두께 방향인 횡방향 충격하중(Transverse impact load)에 약하다는 점이다.⁴²⁻⁴⁵⁾

수많은 복합재료 중 섬유강화복합재료(FRP)는 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 우수하고 특히 설계요건에 따라 적층배향을 적절히 선정할 수 있는 유용성 때문에 경량화 및 고 강도가 요구되는 자동차, 항공기 및 우주비행체의 구조물에 널리 응용되고 있다. 잠수함, 항공기, 자동차 등의 구조물에 높은 비강성과 비강도 및 낮은 열팽창률 등의 우수한 성질을 갖는 섬유강화 복합재료의 사용이 급격히 확산되고 있으며 금속재료에 비해서 상당한 중량감소 효과를 얻을 수 있는 Graphite, Carbon, Glass 등과 같은 복합재료는 금속재료를 대체해 나가는 추세이며, Fig. 2에 Boeing 787에 사용되는 Hybrid, Carbon, Glass의 적용 실 예를 나타내었으며, 자동차용 복합재료에 사용되는 보강섬유는 유리섬유가 대부분 사용되고 있다.

이상과 같이 탄소 섬유는 자동차의 경량화를 통해 연비를 개선할 수 있는 금속 대체 소재로서 많은 관심이 집중되고 있으며, 탄소섬유를 이용한 플라스틱 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastic: 이하 CFRP라 부름)는 금속재료보다 강도가 약 30%이상 우수하고 20~50%정도의 경량화가 가능하여 최근에는 미국, 일본의 자동차 업계에서 경량화 효과를 증대시키기 위하여 탄소섬유를 사용한 복합재료부품의 사용을 추진 중에 있다. 예를 들면, 미국의 Ford 사에서는 100% CFRP 시작차를 제조하여 SAEC(The Annual Society of Automotive Engineers Convention)에 전시 한 바 있으며, 이 차의 무게 감소율은 같은 형의 Ford TD에 비해 약 51.5%였다.⁴⁶⁻⁵⁰⁾

상기에서 살펴본 바와 같이 고안전 및 편의성을 위한 차량의 개발은 차량의 무게 증가를 요구하고 있는 반면, 환경보호 차원에서 요구되는 차량의 기술적 요구사항은 차량의 경량화를 요구하고 있다. 따라서 자동차의 설계는 안전성이 확보된 상태에서 차량의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다.

차체 앞부분은 엔진이나 현가장치를 지지하고 여러 보조장치를 격납하는 역할도 하지만, 전면 충돌시 에너지를 흡수할 수 있는 구조로 되어야 한다. 많은 차량에서

는 차체 앞부분의 내판을 모자형 단면형상의 강도부재로 구성하여 충돌사고시 전면부 골격부재는 소성변형하여 충돌에너지를 흡수하도록 설계하고 있다. 또한, 차실을 감싼 구조부재는 차체 앞부분이 소성변형하면서 에너지를 흡수하는 동안에 그 자체는 변형되지 않고 차실내의 공간을 유지하도록 설계하고 있다. 즉, 차실내의 구조부재는 에너지흡수라고 하는 관점과 차체 앞부분으로 부터 전달된 하중을 흡수·분산을 통하여 차실의 변형이 적게 되도록 설계된다. 특히, 차량의 초기설계 단계에서는 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압궤거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다. 그러나 이제까지의 차량이 충돌했을 경우를 상정하여 경량화 차체 구조부재인 CFRP부재가 충격하중을 받을때의 승객의 안전을 담보할 수 있는 최적의 내충격 특성을 정량적으로 고찰한 연구 결과들은 별로 찾아보기 힘들다.

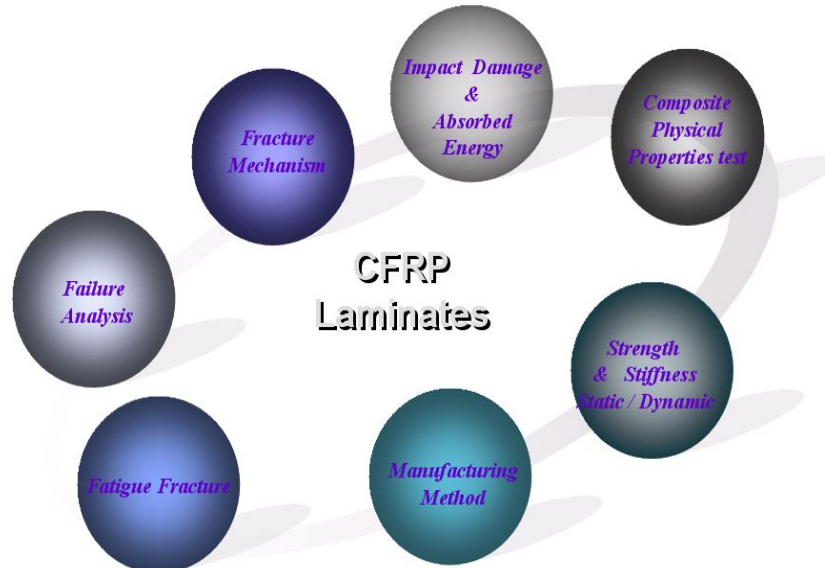


Fig. 1 The key factors of CFRP laminates

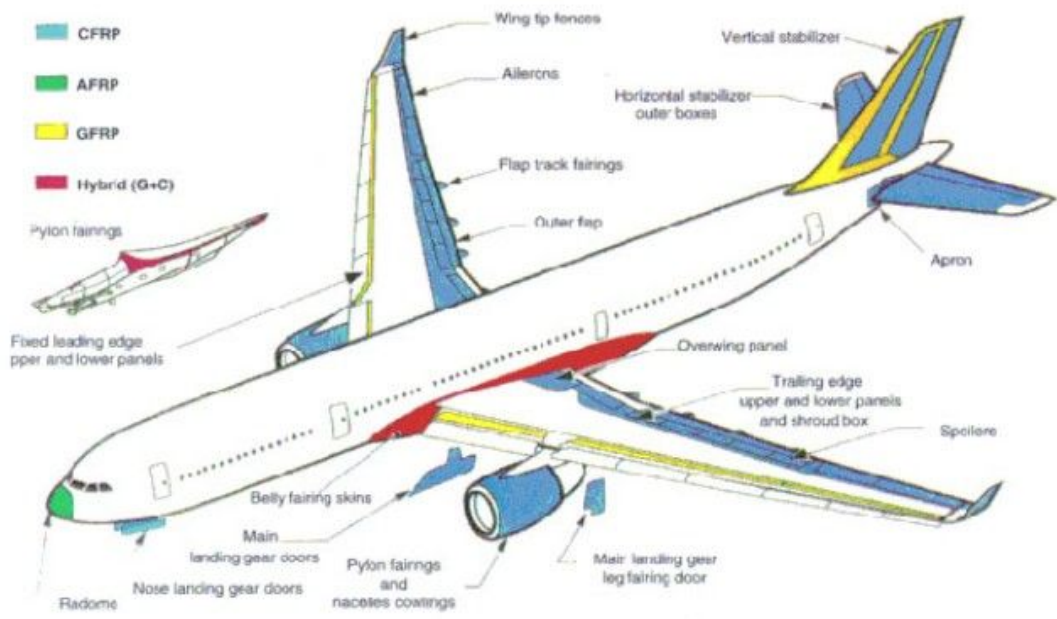


Fig. 2 Composite structures for boeing 787

제 2 절 연구목적 및 방법

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

자동차 충돌 시 외부로부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 승객이 안전 보호 공간의 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 최종적으로 승객상해 정도와 직결되는 최대가속도 크기를 최소화시킬 수 있는 안정된 축방향 접힘좌굴 모드를 유도하려는 설계의 개념이 차체 구조부재 설계에 이용되고 있다. 이러한 역할을 하는 것이 프런트 사이드 멤버로 정면충돌 시 충돌에너지의 50~70%를 흡수하며 박판 사각 및 원형 빔 형상을 가지고 있다. 특히, 프런트 사이드 멤버는 소성 변형으로 대부분의 에너지를 흡수하게 되며 굽힘에 의한 변형보다 압괴에 의한 변형으로 많은 에너지를 흡수한다. 이러한 차체구조부재의 경량화는 차량의 연비향상과 이를 통한 대기 오염 저감을 위하여 중요한 연구과제가 되고 있으며, 기존의 금속재료를 이용한 최적화 설계 방법에 의한 경량화는 어려움이 있으므로 최근에는 알루미늄, 플라스틱 등 경량화 재료를 이용한 설계가 연구의 초점이 되고 있다. 이러한 신소재를 사용하여 차체구조를 설계하면 경량화 이외에도 차량의 수동 안전도 향상, 소음 저감, 부식 방지, 내구성 증가 등 부수적으로 많은 장점을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있고 안전성능 및 연비 개선을 위한 경량화 방안으로 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 CFRP재의 구조부재가 차체의 사이드부재로 사용될 것을 상정하여 구조부재의 가장 기본적인 형상인 원형/사각형 CFRP구조부재에 충격하중을 가하여 형상의 변화, 계면수의 변화 등 적층구성의 차이가 압괴길이, 최대압괴하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지 등 충격특성에 어떻게 변화하는지를 정량적으로 고찰하고 최적의 충격특성을 갖는 구조부재를 설계할 수 있는 기본적인 설계 Data를 얻고자 한다. CFRP 구조부재의 성형은 autoclave를 이용하여 알루미늄 원형/사각부재에 CFRP 프리프레그 시트를

적층하여 Autoclave 내에서 압력과 열을 가하여 경화시키는 기술인 Autoclave 성형법을 이용 하여 제작하였고, 충격실험은 공기압식 수직충격시험장치를 이용하여 압력실험을 행하였다.

연구방법으로는 CFRP 구조부재의 가장 기본적인 원형/사각형 CFRP구조부재가 적층구성에따라 충격압력실험을 행하여 CFRP 구조부재의 적층구성에 따른 충격특성을 평가하였다.

제 1 장에서는

본 연구와 관련된 경량화 자동차, 우주항공분야등의 국제적인 연구동향, 본 연구에서의 연구 목적 및 연구방법에 관하여 기술하였다.

제 2 장에서는

CFRP 구조부재에 충격하중이 작용할 경우 발생하는 압력형상인 횡방향전단 압력모드, 라미나 굽힘 압력모드 및 취성과괴 압력모드와 국부좌굴 압력모드의 조합등을 알 수 있도록 압력모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하고, 각 압력모드의 조합으로 발생하는 압력길이, 최대압력하중, 흡수에너지 및 총흡수 에너지등을 수식할 수 있는 기존의 압력이론을 서술하였다.

제 3 장에서는

원형/사각형 형상을 갖는 CFRP 구조부재의 축압축 충격하중에 가장 에너지를 많이 흡수 할 수 있는 적층구성방법, 오토클레이브법에 의한 진공성형법, 원형/사각형 CFRP 시험편의 형상과 계면수 변화에 따른 실험 및 충격시험장치, 충격 압력실험 방법을 기술하였다.

제 4 장에서는

적층구성 변화에 따른 원형/사각형 형상을 갖는 CFRP시험편의 충격 압력특성 실험결과에 관해 기술하였다.

제 5 장에서는
원형/사각형 CFRP 구조부재의 형상과 계면수 변화에 따른 충돌이 가해질 경우
의 충격특성 및 압溃모드에 관해 정량적으로 고찰하였다.

제 6 장에서는 본 연구의 결과를 나타내었다.

제 2 장 CFRP부재의 에너지 흡수이론

제 2장에서는 CFRP 복합재 박육부재의 압괴특성(평균압괴하중, 평균압괴응력, 흡수에너지 등)에 관한 이론을 서술하였다. 기존의 복합재 박육부재의 정적 및 충격압괴에 관한 연구는 대부분 실험적 방법에 그치고 있으며, 그 실험 또한 실험을 수행한 연구자 및 실험환경에 따라 크게 좌우된다. 따라서 본 장에서는 축 압괴하중시 발생하는 압괴모드의 이해와, 모드해석을 이용한 이론해석을 다룸으로써 복합재 박육부재의 정량적인 이론해석을 위한 기본적인 데이터를 얻고자하며, 기존의 연구결과⁵¹⁾를 토대로 하여 정적 및 충격압괴 실험결과와 비교·고찰하고자 한다.

제 1 절 복합 박육부재의 압괴모드

섬유강화 복합재 박육부재에 축 압축하중이 작용 시 발생하는 압괴형상은 횡방향전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드 및 취성파괴 압괴모드와 국부좌굴 압괴모드의 조합으로 나타난다.^{52~54)} 본 절에서는 이러한 각각의 압괴모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하였으며, 각 압괴모드의 조합으로 발생하는 복합재 박육부재의 평균압괴응력을 수식화 하였다.

연속섬유 강화 복합재 박육부재의 압괴과정은 Fig. 3과 같다. 즉 하중이 압괴 Initiator의 끝단에 작용할 때 재료의 국부파손은 발생하고 미소한 층내/층간 크랙이 형성되며, 횡방향전단, 라미나 굽힘 또는 이러한 모드의 조합(취성파괴)에 의해 층내/층간 크랙의 길이, 라미나 묽음 파괴 및 압괴모드가 결정된다. 또한 모든 복합재 박육부재가 점진적으로 압괴 되는 것은 아니며, 박육부재가 점진적으로 압괴되는지의 여부는 박육부재의 구조형상과 섬유, 기지의 조합에 의존하게 된다. 따라서 이러한 복합재 박육부재에 축하중이 작용할 경우 발생하는 압괴모드를 이해하기 위해서는 4가지의 기본적인 압괴모드의 이해가 선행되어야 한다.

첫째, 횡방향전단 압케모드는 Fig. 4와 같이 일부분의 라미나 뒹뒹으로 형성된 종방향 크랙과 하나 또는 다중의 짧은 층간 크랙에 의존하며, 박육부재의 압케 면은 하중이 박육부재의 표면을 따라 일정치 않게 전과되는 것과 같은 부채꼴 모양의 형태를 갖는다. 횡방향전단 압케모드의 주요 에너지 흡수메카니즘은 Fig. 4와 같이 라미나 뒹뒹의 파괴이며 크랙의 수, 위치, 길이는 시험편의 구조형상과 성분 재료특성의 함수이다. 층간크랙 성장과 라미나 뒹뒹파괴는 횡방향전단 압케모드의 압케과정을 제어한다. 층간크랙 성장은 기지의 역학적 특성, 라미네이트의 섬유배향각과 원주방향으로 적층된 섬유의 파손변형율 및 인장강성에 의해 제어된다. 층간크랙은 Fig. 5에 나타난 것 같이 Mode I(opening) 또는 Mode II(forward shear)로 성장하게 되고 이때 크랙성장의 능력은 크랙이 성장하기까지 기지의 파괴인성과 라미나 뒹뒹의 배향각의 함수로 나타낼 수 있다. 원주방향으로 적층된 섬유(축 방향의 90° 로 적층된 섬유)는 층간 크랙성장에 주요한 영향을 미친다. 원주방향으로 적층된 섬유의 강성과 파손변형율은 라미나 뒹뒹에 존재하는 굽힘에 영향을 미친다. 원주방향으로 적층된 섬유의 강성과 파손변형율이 높을수록 층간 크랙은 줄어들는다. 라미나 뒹뒹의 파괴는 횡방향전단 압케모드가 존재하는 박육부재의 압케과정의 에너지 흡수에 많은 기여를 한다. 라미나 뒹뒹은 횡방향 굽힘 모멘트를 발생시키며, 라미나 뒹뒹의 파괴는 라미나 뒹뒹의 인장면에 대한 응력이 재료의 강도를 초과할 때 발생한다.

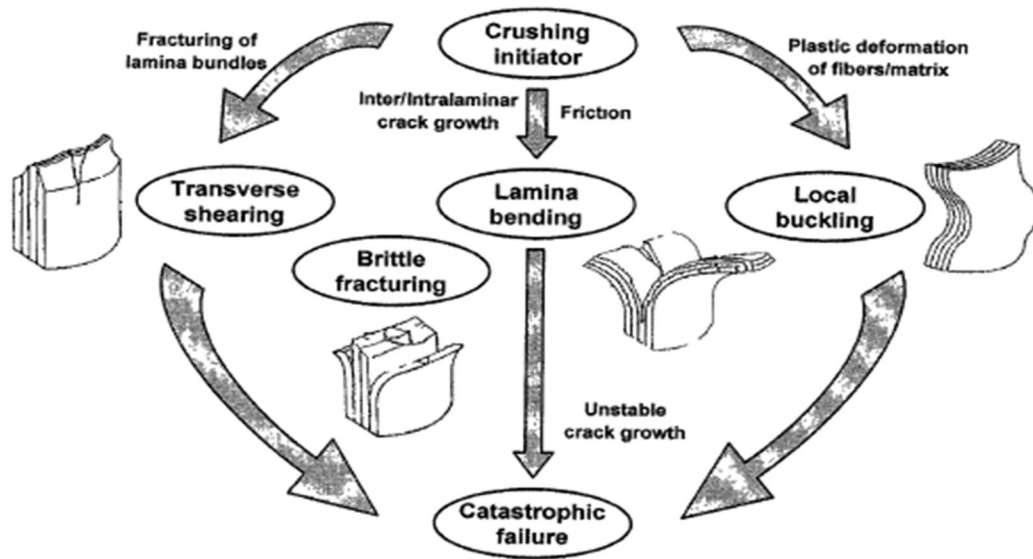


Fig. 3 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes⁵⁵⁾

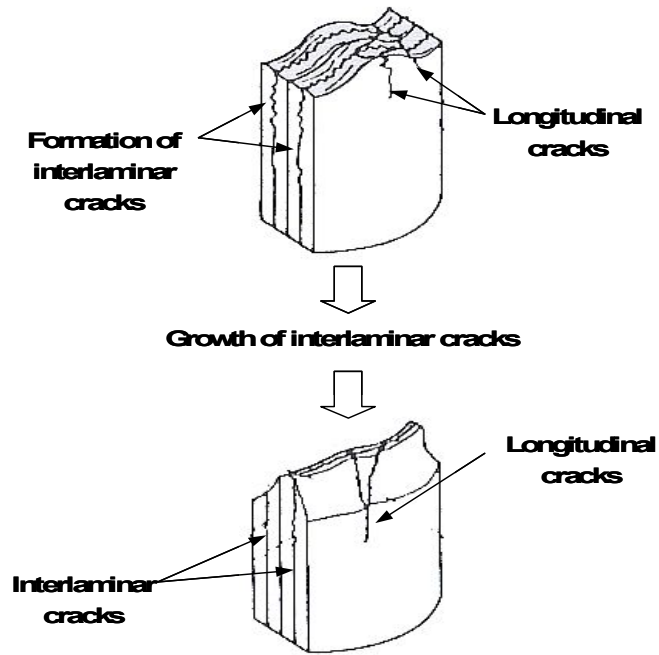


Fig. 4 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode

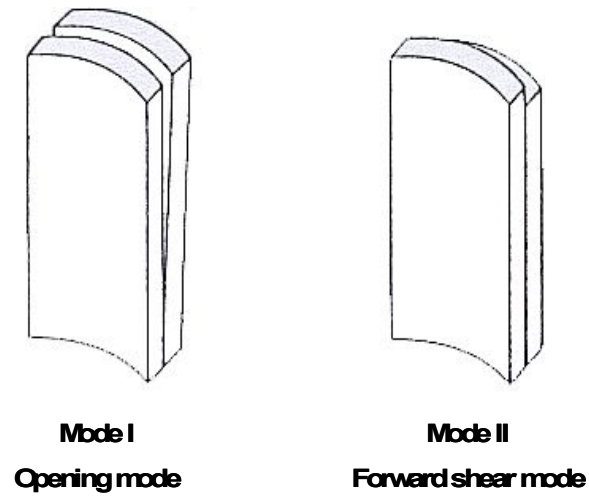


Fig. 5 Sketch of crack propagation modes

둘째, 라미나 굽힘 압케모드는 Fig. 6과 같이 매우 긴 층간크랙 및 층내크랙과 섬유와 평행한 크랙이 나타나지만 라미나 묶음은 파괴되지 않는다. 즉, 주요 에너지 흡수메카니즘은 크랙성장이며 층간 크랙이 인접한 층의 상호관계로써 진전하고 형성되는 반면 층내 크랙은 개개의 층에서 성장한다. 섬유와 평행한 크랙은 일반적인 섬유배향을 갖는 다수의 인접한 라미나 또는 플라이 하나의 섬유방향에 평행하게 전파하며 라미나 묶음은 굽힘 변형을 수반하지만 파괴되지는 않는다. 또한 마찰과 관계된 에너지 흡수메카니즘은 슬라이딩하는 다수의 라미나 묶음들 사이의 상대운동에 의한 저항으로 나타난다.

층간/층내 크랙 및 섬유의 수평방향 크랙의 성장과 마찰은 라미나 굽힘 압케모드에 있어 압케과정을 제어한다. 라미나 굽힘모드에 나타나는 크랙 진전은 횡방향전단 모드와 유사하고, 라미나 묶음은 파괴되지 않으며 단지 압케 면에 대한 저항으로 굽어질 뿐이다. 압케표면을 따라 수반된 운동과 하중 면에 대한 라미나 묶음의 굽힘은 마찰력을 통해 에너지 흡수메카니즘으로 나타나며, 마찰력은 Fig. 7과 같이 인접한 라미나 묶음의 상대운동으로부터 나타난다. 복합재료와 압케표면사이에서 마찰계수와 근접한 라미나 묶음들간의 마찰계수는 압케속도의 함수라 할 수 있다. 그러므로 에너지 흡수능력은 압케속도 변화에 따른 영향을 받는다.

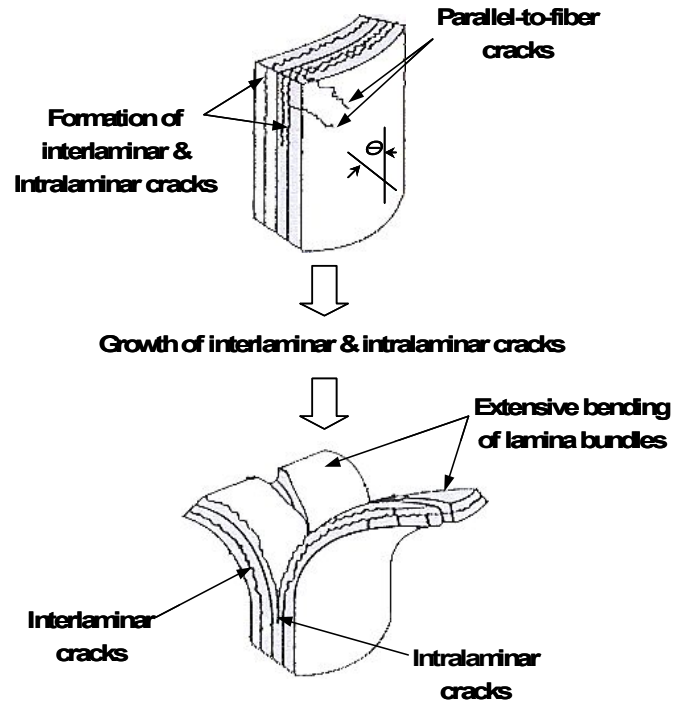


Fig. 6 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode

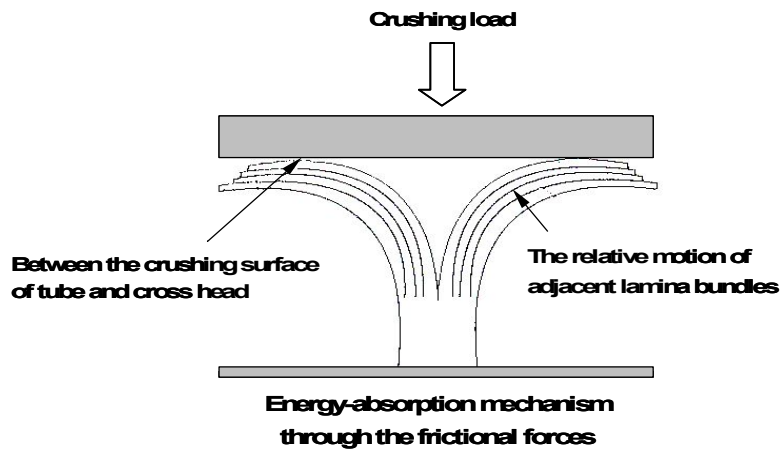


Fig. 7 Friction related energy-absorption mechanisms

셋째, 취성과파괴 압력모드는 횡방향전단과 라미나 굽힘 압력모드의 조합이며, 취성섬유 강화 복합재 박육부재의 보고된 압력결과의 대부분은 취성과파괴 압력모드이다. Fig. 8과 같은 취성과파괴 압력모드의 경우 라미나 뒤틀림은 약간의 굽힘이 존재하고 파단에 가까우며, 라미나 뒤틀림이 파단될 때 하중은 박육부재에 가해지고 크랙성장과 라미나 뒤틀림의 굽힘/파괴가 반복된다.

넷째, 취성 및 연성 섬유강화 복합재에 존재하는 국부좌굴 모드는 연성 금속에 존재하는 것과 유사하다. 이러한 압력모드는 Fig. 9과 같이 재료의 소성변형에 의해 국부좌굴의 변형으로 구성되며, kevlar섬유와 같은 연성 섬유 강화 복합재 박육부재는 좌굴된 섬유의 압축면을 따라 좌굴영역에서 소성적으로 변형된다. 또한 섬유는 좌굴된 섬유의 인장면을 따라 분리되고 각 플라이 사이에서 국부적인 층간분리(local delamination)를 발생한다. 연성 섬유강화 복합재는 압력된 후 손상되지 않은 부분이 존재하게 되며, 이는 섬유의 분리와 섬유 파손이 없는 기지의 소성변형에 의한 결과이고 섬유가 파단되지 않을 때 박육부재는 횡방향전단과 취성과파괴 압력모드에 존재하는 재료의 점진적인 파손의 저항으로 인해 손상 없이 국부좌굴형상으로 압력된다.

따라서 취성섬유 강화 복합재는 1) 층간 응력이 기지의 강도보다 작을 경우, 2) 기지가 섬유보다 더 높은 파손변형율을 가질 때, 3) 기지가 고 응력 하에서 소성 변형을 할 경우에만 국부좌굴 압력모드를 나타낸다. 또한 섬유와 기지의 소성항복은 국부좌굴 압력모드의 압력과정을 제어한다. 국부좌굴 모드로 압력되는 연성 섬유강화 복합재료는 섬유와 지지 모두의 항복으로 나타나며, 취성 섬유강화 복합재료는 단지 기지의 항복만 있는 국부좌굴 모드로 압력된다.

만약 섬유 또는 기지의 역학적 특성이 변형률의 함수라면 복합재 박육부재의 에너지 흡수능력은 압력속도의 변화에 의해 영향을 받는다.

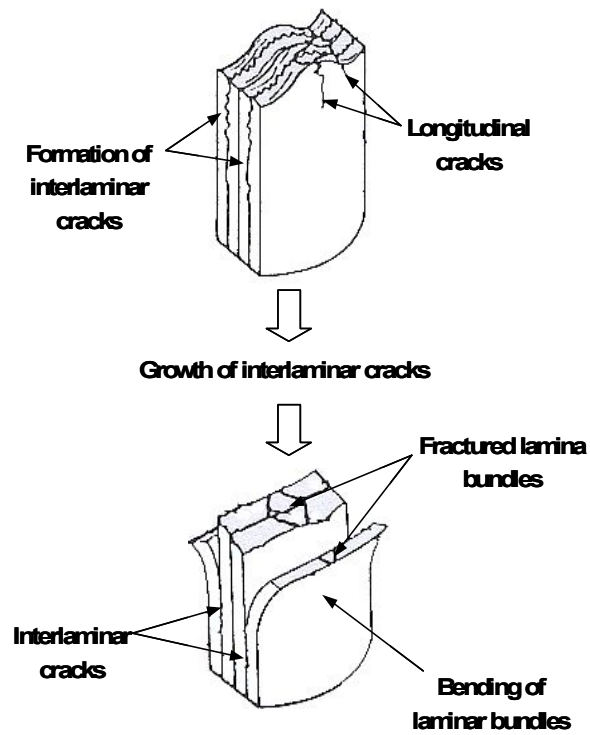


Fig. 8 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode

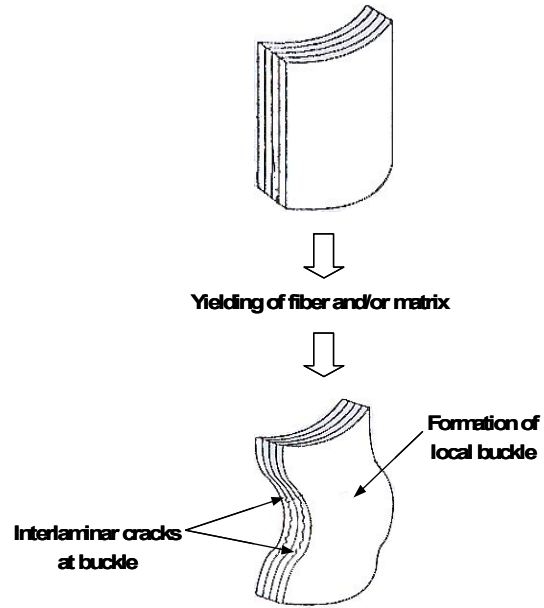


Fig. 9 Crushing characteristics of local buckling crushing mode

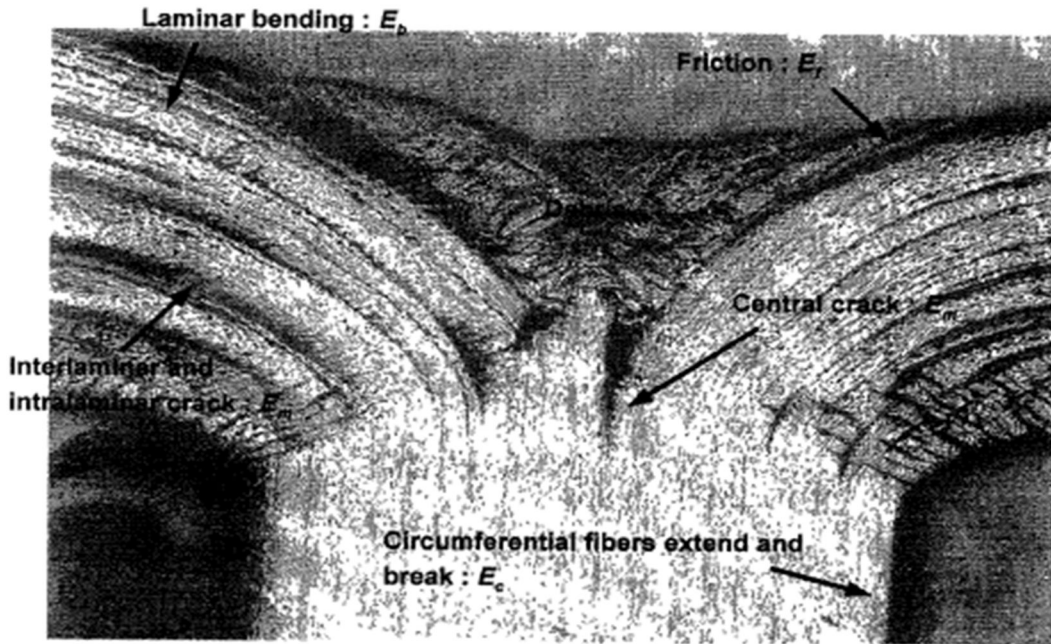


Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section⁵⁶⁾

제 2 절 복합 박육부재의 압괴이론

복합재 원통박육부재가 압괴될 때 에너지 흡수특성을 지배하는 인자는 Photo. 1 과 같이 기지(matrix)에 의해 흡수되는 에너지(E_m), 스플라인 형상으로 압괴되면서 흡수되는 굽힘 에너지(E_b)와 압괴되는 축 방향에 직각으로 발생하는 원주방향 에너지(E_c) 및 충격 판과 시험편에서 발생하는 마찰에너지(E_f)이다. 이들 중 대부분의 충격에너지는 기지에 의해 흡수되어지며 가장 큰 영향을 미치는 인자는 기지의 크랙 진전이라 할 수 있다. 따라서 2절에서는 에너지 흡수특성을 지배하는 각 인자에 관한 모드를 이해하고, Gupta^{57~58)}의 기본적인 압괴이론 수식에 계면

수 변화의 함수 $g(k)$ 를 보정함으로써 복합재 박육부재의 압케이론 수식을 유도하고자 한다.

먼저 튜브에 가해지는 압케 에너지는 앞에서 제시한 횡방향전단 모드에 의한 변형에 의해 흡수되어지며, 기지의 전단응력(τ_{my})과 크랙진전 위치까지의 전단변형율(γ)과 체적 및 계면수에 의존한다.

$$\begin{aligned}
 E_m &= \tau_{my} \cdot \gamma \cdot V \cdot g(k) = \tau_{my} \left(\frac{\delta_r}{l} \right) 2\pi R t l \cdot g(k) \\
 &= 2\pi R t \cdot \tau_{my} \delta_r \cdot g(k)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, τ_{my} 는 기지의 전단응력(항복강도의 45%), γ 와 V 는 중심크랙이 진전한 위치까지의 전단변형율과 체적, $g(k)$ 는 계면수 변화 함수이며 δ_r 은 섬유 원주방향 변위, l 은 중심크랙 길이(Length of Central crack)를 나타낸다.

이때 계면수 변화 함수 $g(k)$ 는 다음과 같으며, α , β 는 보정계수이다.

$$g(k) = \frac{\beta^{k-2}}{\alpha} \tag{2}$$

또한 복합재 원통 박육부재의 대표적인 압케형상은 Fig. 10(a)와 같은 원통벽의 단면 중앙에 생긴 썩기형 크랙의 점진적인 진전과 함께 원통벽의 내측과 외측으로 확장하는 형상으로 압케되어진다. 이러한 압케모드는 라미나 묶음의 굽힘에 의한 에너지를 수반하며, 반지름(R)과 작용 모멘트(M) 및 썩기형 크랙의 축 경사각(θ)에 비례한다.

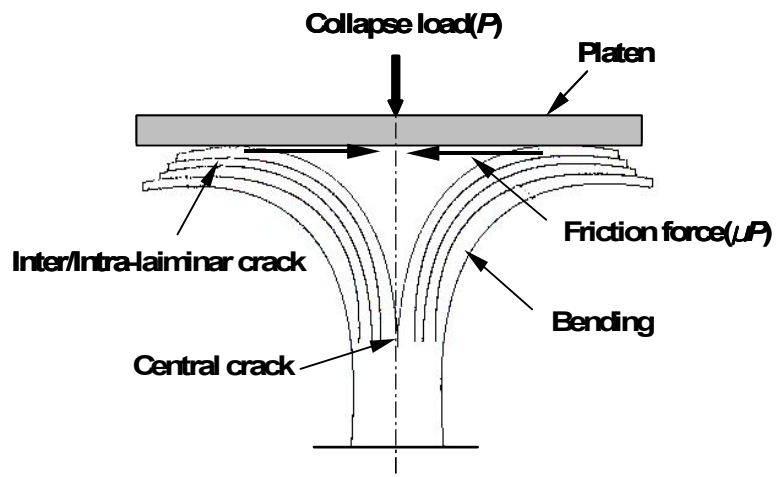
$$E_b = 4\pi R M \theta \tag{3}$$

라미네이트의 최대 굽힘 모멘트(M)는 다음과 같다.

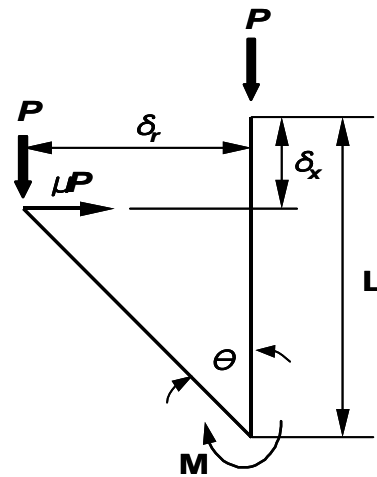
$$M = \frac{\left\{ f_y \left(\frac{t}{2} \right)^2 \right\}}{4} \quad (4)$$

여기서, f_y 는 축 방향 인장시험에 얻어진 라미네이트의 인장강도이며, 그 결과 굽힘 에너지는 다음과 같다.

$$E_b = \pi R \left[\frac{f_y \cdot t^2 \cdot \theta}{4} \right] \quad (5)$$



(a) Actual collapse pattern



(b) Ideal collapse pattern

Fig. 10 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load

튜브의 반지름과 관계된 굽힘에 의한 외측확장 즉, 원통 박육부재의 원주방향 확장에 관한 에너지 흡수는

$$E_c = \int \sigma_\theta \cdot d\varepsilon \cdot dV \quad (6)$$

δ_r 의 변형량에 의한 후프 스트레인(hoop strain), $d\varepsilon$ 은

$$d\varepsilon = \frac{2\pi(R + \delta_r) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{\delta_r}{R} = \frac{l \sin \theta}{R} \quad (7)$$

σ_θ 는 원주방향에 대한 레이어의 강도이며, 그 결과 원주방향의 확장에 의한 흡수 에너지는

$$E_c = \pi l^2 t \cdot \sigma_\theta \cdot \sin \theta \quad (8)$$

튜브와 압축판의 마찰에 의해 흡수되어지는 에너지는

$$E_f = \mu P \delta_r \quad (9)$$

여기서, μ 는 시험장치 압축판의 마찰계수이다.

총 흡수에너지는 기지에 의해 흡수되어지는 에너지와 굽힘 에너지, 원주방향 에너지 및 마찰에너지의 합으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} E_t &= E_m + E_b + E_c + E_f \\ &= 2\pi R t (\tau_{my} \delta_r + \frac{1}{8} f_y t \theta + \frac{l^2}{2R} \sigma_\theta \cdot \sin \theta) + \mu P \delta_r \end{aligned} \quad (10)$$

또한 총 흡수에너지는 평균압력하중과 압력된 길이의 곱으로 나타낼 수 있으며,

$$E_t = P_{av} \delta_x \quad (11)$$

$P_{av} = P$ 이며, 위에서 나타낸 식 (10)과 (11)을 같다고 놓고 이항하여 정리하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{av} \delta_x - \mu P \delta_r &= 2\pi R t \left(\tau_{my} \delta_r + \frac{1}{8} f_y t \theta + \frac{l^2}{2R} \sigma_\theta \cdot \sin \theta \right) \\
 P_{av} &= \frac{\tau_{my} \delta_r \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t \theta + \frac{l^2}{2R} \sigma_\theta \cdot \sin \theta}{\delta_x - \mu \delta_r} 2\pi R t \quad (12)
 \end{aligned}$$

본 연구에서 구하고자하는 평균 압케응력은 식 (12)를 정리하여 구한 평균압케하중을 시험편의 단면적으로 나누어줌으로써 얻을 수 있다. 단, $\sin \theta = \delta_r / l = d\varepsilon R / l$, θ 는 0° 에서 90° 가 될 때까지 압케되며 그 결과 $\theta = \pi/2$, $l = \delta_r = \delta_x$ 가 된다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{av} &= \frac{P_{av}}{A} = \frac{P_{av}}{2\pi R t} \\
 &= \frac{\tau_{my} \delta_r \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t \theta + \frac{l^2}{2R} \sigma_\theta \sin \theta}{\delta_x - \mu \delta_r} \\
 &= \frac{1}{\delta_x - \mu \delta_r} \left(\tau_{my} l \sin \theta \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t \frac{\pi}{2} + \frac{l^2}{2R} \sigma_\theta \frac{d\varepsilon R}{l} \right) \\
 &= \frac{l}{\delta_x - \mu \delta_r} \left(\tau_{my} \sin \theta \cdot g(k) + f_y \frac{\pi t}{16l} + \sigma_\theta \frac{d\varepsilon}{2} \right) \\
 &= \frac{1}{1-\mu} \left(\tau_{my} \sin \theta \cdot g(k) + f \left(\frac{\pi t}{16l} + \frac{d\varepsilon}{2} \right) \right) \quad (13)
 \end{aligned}$$

여기에서 f 는 라미네이트의 인장강도로서 축 방향의 인장강도(f_y)와 원주방향 응력(σ_θ)과 같다.

제 3 장 실험방법

제 1 절 시험편

본 연구에서는 친환경, 저탄소 배출, 에너지 절약, 하이브리드 자동차, 그린 디젤 자동차등 최근에 국제적으로 주요 이슈가 되는 첨단소재인 CFRP구조부재가 자동차의 축압축 부재로 사용될 것을 상정하여 자동차의 구조부재의 기본 형상인 원형 CFRP 부재(Circle CFRP member), 사각부재(Square CFRP member)를 오토클레이브(Autoclave)에서 성형 제작하여 시험편으로 사용하였다.

CFRP 원형 및 사각형 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet

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]

CFRP 원형부재 및 사각형 부재 시험편은 원통 및 사각통 알루미늄 부재에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형한 후 알루미늄 파이프를 제거하여 제작하였다.

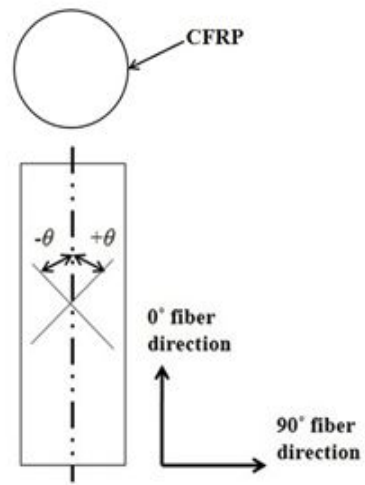
적층구성의 변화와 충격속도 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압력모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 또한, 이방성 재료인 CFRP 적층재의 적층구성의 변화에 따른 압력특성을 평가하고자 CFRP 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0° 로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$ 의 적층구성으로 적층각, 계면수 및 충격에너지의 변화에 따라 충격 압력 실험용 시험편을 제작하였다.

적층은 최외층각을 0° , 90° 로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 계면수를 2, 4 및 6계면 3종류로 변화시켜 제작하였다. CFRP 원형부재 및 사각형 부재의 적층방법을 Fig. 11에 나타내었다.

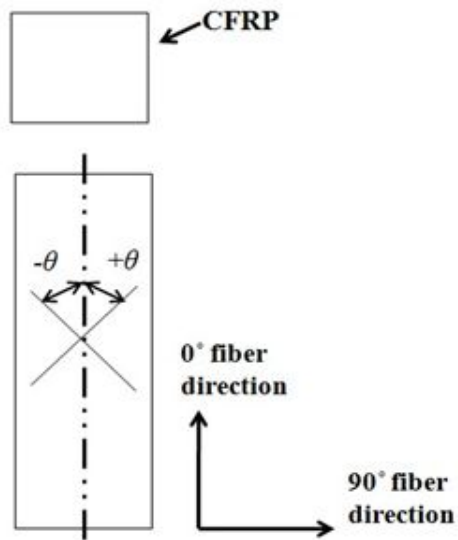
충격하중이 가해 질 때 순차적이고 국부적인 압력을 유도하여 높은 에너지 흡수 특성을 갖게 하기 위해 시험편의 하중이 작용하는 끝단을 45° 로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다.

시험편의 성형은 Photo. 2와 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 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 정도 가압시켜 제작하였다.

Fig. 12에 오토클레이브의 진공과정을, Fig. 13에 진공백 성형공정을 나타냈으며 Fig. 14는 시험편 제작 시 성형 사이클을 나타냈다. 시험편 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압력이 수주기 반복하여 나타나는 데 충분한 길이인 120mm로 하였다.



(a) Circular member



(b) Square member

Fig. 11 Configuration of Specimens



Photo. 2 Autoclave

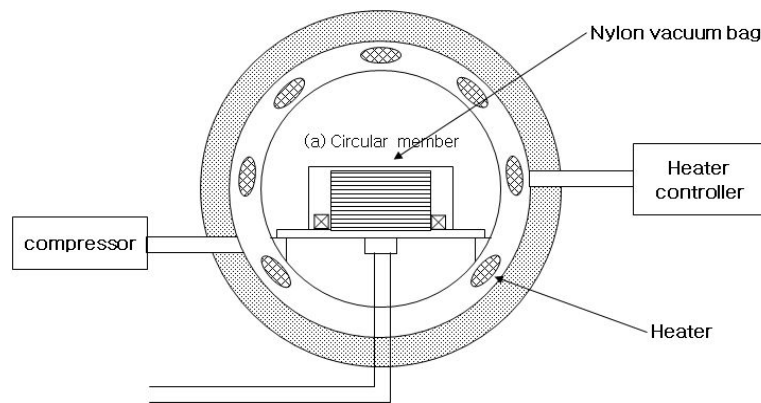


Fig. 12 Autoclave vacuum bag degassing

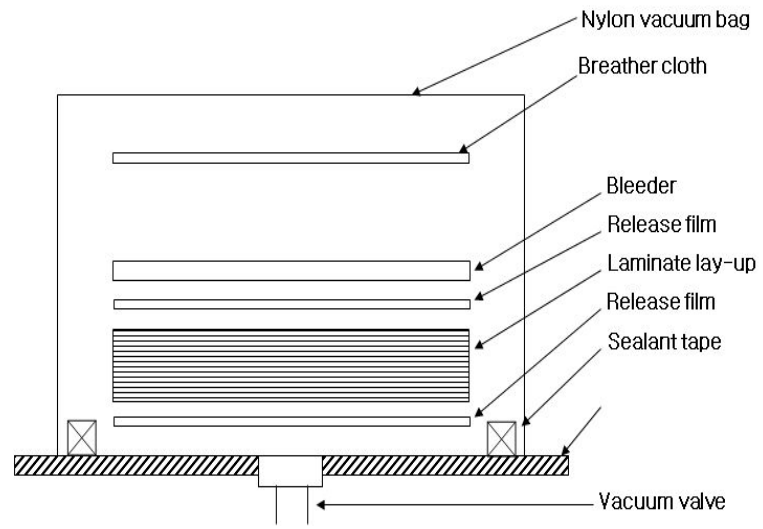


Fig. 13 Processing of vacuum bag degassing

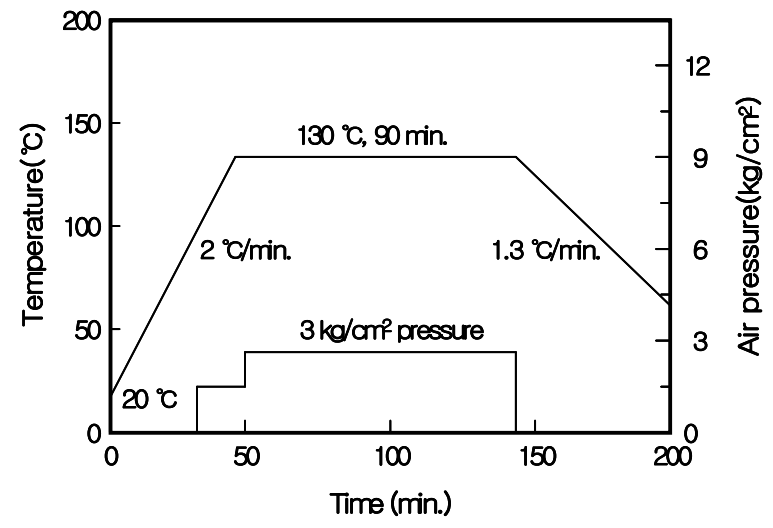


Fig. 14 Curing cycle of CFRP stacking specimen

제 2 절 실험장치

본 절에서는 CFRP 구조부재의 단면의 형상 변화와 충격속도 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압케모드를 고찰하기 위하여 충격압케실험을 행하였다.

각 시편마다 3회이상의 예비실험을 하여 실험결과의 재현성이 좋도록 하였고 실험결과에 단부효과(end effects)가 나타나지 않고 순차적인 압케가 주기적으로 발생하도록 변위를 제어하면서 연속적으로 압케실험을 행하였다. 또한 시험편의 길이는 압케현상이 오일러의 좌굴의 영향을 받지 않을 범위로 충분하도록 120mm로 하였다.

충격압케실험은 실험실에서 자체적으로 설계 제작한 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험 장치로서 크로스헤드를 수직 하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 정량적인 충격특성을 고찰하기 위하여 충격에너지를 제어할수 있는 위치 컨트롤러를 설계, 제작하여 충격실험을 행했다.

강관으로 제작된 크로스헤드 위치 컨트롤러는 충격시험기의 사이트에 고정되어 공기압을 통해 크로스헤드의 높이를 제어함으로써 자동으로 일정한 위치에너지를 가지게 하는 장치이다. 작동은 스위치를 통하여 공기압을 주입하거나 뺄 때 자동으로 제어되기 때문에 최소한의 오차 손실을 줄이기 위함이다. 충격시험기의 개략도를 Fig. 15에 나타냈으며, Fig. 16은 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. 또한, 로드셀은 2개의 원판을 원주로 연결한 형태로서 연강환봉을 절삭하여 제작 하였으며, 위쪽 원판 위에 시험편을 위치시키고, 아래쪽 원판에 3개의 볼트구멍을 만들어 베이스 플레이트에 고정하였다. 시험편에 작용하는 충격하중의 계산은 로드셀의 검

출부인 원주의 중앙에 스트레인게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 중심축을 중심으로 각각 축 방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여 충격시험시 발생할수 있는 굽힘과 비틀림의 영향을 제거하였다. 충격하중의 크기는 로드셀에 접촉된 스트레인게이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다. 충돌시에 나타나는 스트레인게이지의 저항변화는 리드선 을 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.

충격시험시 시험편의 압력 시간변화 즉, 변위의 측정은 압력이 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 표적의백색부와 흑색부의 경계선(edge)의 이동량을 전압변화로 측정하는 것이며, 렌즈의 교환에 따라 측정범위를 달리할 수 있다. 여기서는 초점거리가 1080mm이며 최대100mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다. 충격속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 레이저를 이용하여 측정하였다.

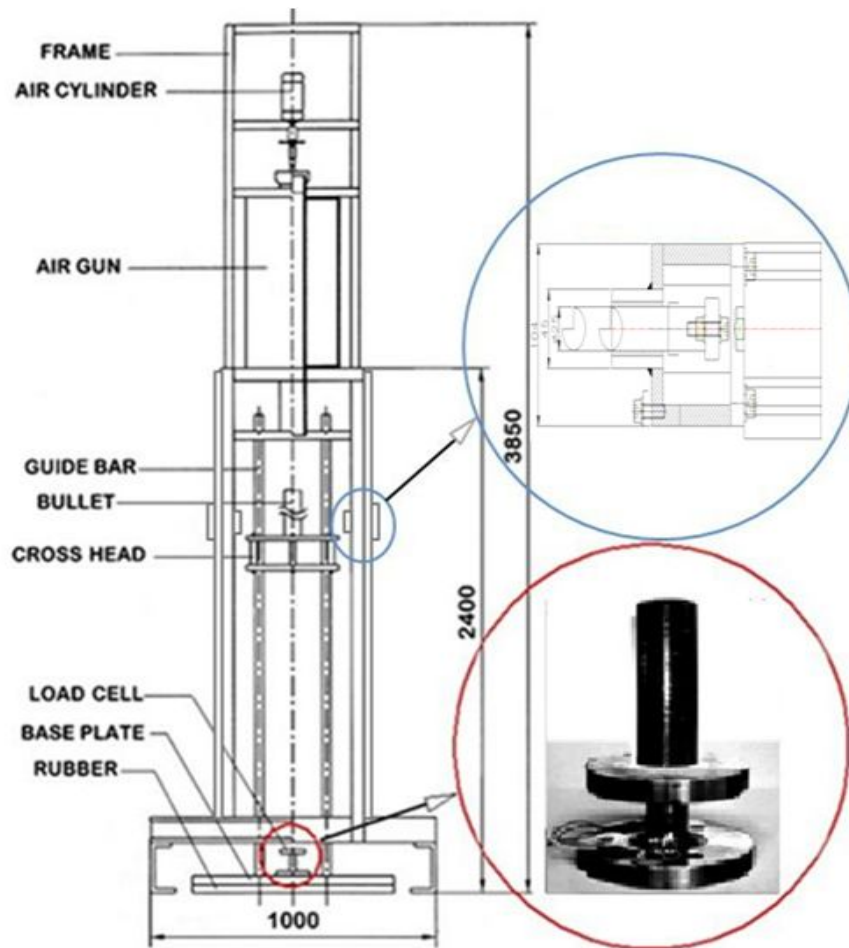


Fig. 15 Impact testing setup for crushing

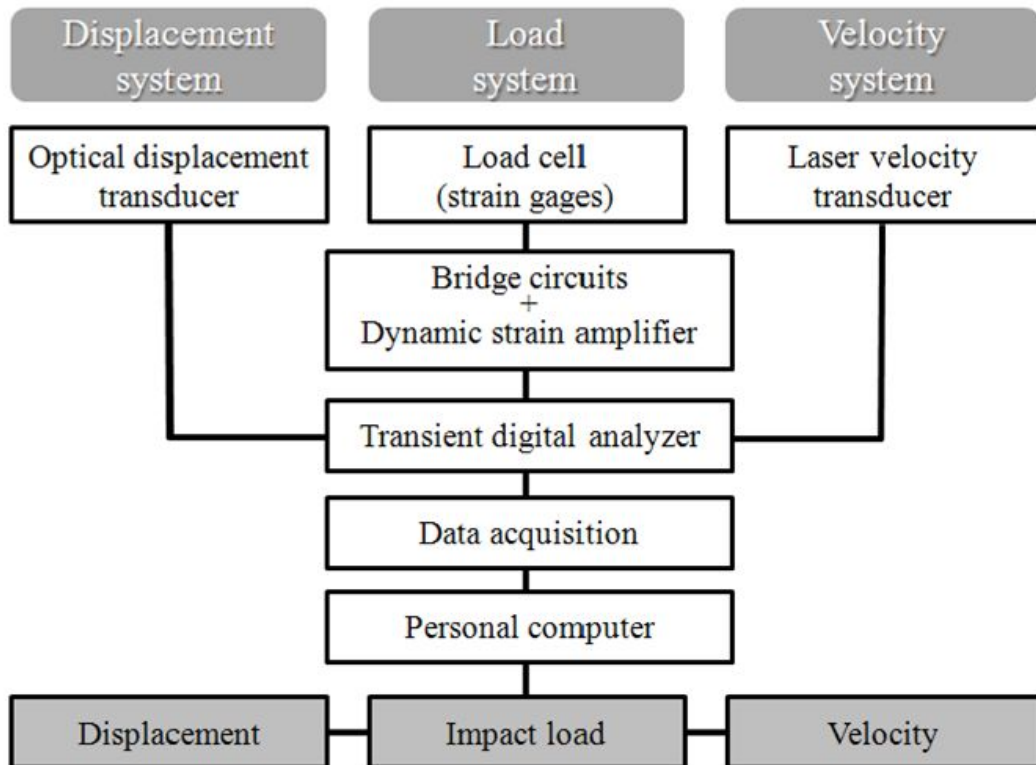


Fig. 16 Diagram of measurement system

제 3 절 압괴실험

충격 압괴실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(14)와 같이 적분하여 시험편 에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_0^{\delta} P dS \quad (14)$$

여기서 E_a 는 총 흡수에너지, P 는 압괴하중, S 는 압괴과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

충격압괴 실험은 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위를 결정하여 낙하범위를 결정한후 자유낙하를 하였다. 충격압괴실험은 압괴과정에서 시간에 대한 하중 및 변위를 측정하였다.

충격실험으로부터 얻은 하중-변위선도에서 흡수에너지 E_a , 전체흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지흡수특성에 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압괴되었다고 가정하여 총 흡수에너지를 구하였다.

충격에너지 E_m 은 식 (15)를 이용하여 구하였다.

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 \quad (15)$$

여기서, m 은 크로스헤드의 질량(40kg)이며, v 는 충격압괴속도이다.

충격흡수시설은 구성부재가 파손 또는 변형됨으로 인해 차량의 충돌에너지를 소

산시키는 Sacrificial Structure(차체의 파손을 전제로 하는 구조물)이므로 적절한 변형거리를 확보하여야 한다. 또한 충격흡수시설의 구조적 강성과 구성부재의 재료에 따라 다양한 충돌거동을 보이며 충돌시험 결과에도 많은 영향을 준다. 충돌 모델은 매우 다양한 충돌 모델을 사용하는데, 본 논문에서는 식(16)과같이 단순하게 충격에너지를 계산하였다.

$$E_m = E_T/kg \quad (16)$$

여기서, E_m 은 단위질량당 총흡수에너지, kg 은 각 시험편의 질량이다.

로드셀 위의 시험편이 흡수하는 이론적인 충격에너지 E_I 는 식(17)과 같이 크로스헤드의 위치에너지와 같으므로 시험편에 따라 시험편의 압괴형상을 관찰하기 가장 적절한 충격에너지에서 충격 실험을 행했다.

사각단면 CFRP 부재 시험편에서는 충격에너지가 372.4J, 274.4J 및 223.44J에서, 원형 단면 CFRP 부재 시험편에서는 충격에너지가 611J, 529.0J 및 419.44J에서 충격 실험을 행했다.

충격에너지의 크기는 본 연구에서 제작한 CFRP 부재의 특성을 고려하여 수차례의 예비실험을 통하여 최적의 에너지의 크기를 결정 하였다.

$$E_I = mgh \quad (17)$$

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

충격압괴실험시 충격에너지의 크기는 각각 형상이 다른 시험편의 충격저항 능력에 따라 충격에너지의 크기를 결정하여 실험을 행했다.

제 4 장 에너지 변화에 따른 충격압계 실험결과

본 장에서는 단면형상이 서로 다른 원형 CFRP 부재, 사각형 CFRP 부재가 경량 화용 차량 전면부 사이드 부재로 사용될 것을 상정하여 각각 최외층각 및 계면수가 다르고 형상이 다른 부재에 대하여 충격 압계 실험을 통하여 최외층각의 차, 계면수의 차 및 단면의 형상의 차에 따른 에너지흡수 능력과 압계모드를 고찰하여 CFRP 부재의 충돌안전성능을 평가하였다. 특히, 충격에너지의 변화에 따른 동적특성에 관해 고찰하고자 하였다.

제 1 절 원형단면 CFRP부재의 충격실험결과

본 절에서는 CFRP 원형부재에 대하여 충격하중을 가하여 원형단면 CFRP부재의 충격에너지의 크기에 따른 충격 압계특성을 살펴보고자 최외층각이 0° 인 경우와 90° 인 경우 계면수의 차에 따른 충격압계특성 실험을 행 하였다.

Figs. 17~19 에 최외층각이 0° 인 경우 원형 CFRP부재의 충격압계특성 실험을 행하여 얻은 하중-변위관계를 나타냈으며 Figs. 20~22 에 최외층각이 90° 인 경우 원형 CFRP부재의 충격압계특성 실험을 행하여 얻은 하중-변위관계를 나타냈다. 선도의 면적을 적분함으로써 흡수에너지를 산출하였다.

충격압계실험은 시험편의 충격흡수능력에 따라 압계 mode 해석이 용이한 범위를 충격에너지의 크기로 정하여 실험하였다. 특히, 본 연구에서는 원형단면 CFRP 부재의 경우 수십회의 충격 실험후에 압계모드 해석이 용이한 충격에너지 범위를 선정하여 충격 실험을 행했다.

원형단면 CFRP부재의 경우 충격압계실험은 충격에너지의 크기가 611.52J, 529.0J, 419.44J 에서 행했다.

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 17 Load–displacement curve of CFRP Circular members
with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 18 Load–displacement curve of CFRP Circular members
with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 19 Load–displacement curve of CFRP Circular members
with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J,)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 20 Load–displacement curve of CFRP Circular members
with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 21 Load–displacement curve of CFRP Circular members
with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 22 Load–displacement curve of CFRP Circular members
with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J)

Table 2 에 최외층 각도가 0° 인 원형 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충돌한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대압력 하중, 압력길이, 흡수에너지 및 총흡수에너지의 값을 나타냈다.

또한 Table 3에 최외층 각도가 90° 인 원형 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충돌한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대압력 하중, 압력길이, 흡수에너지 및 총흡수에너지의 값을 나타냈다.

Table 2 Impact collapse test result for circular members with outer angle 0° according to interface numbers and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Collapse length L[mm]	Pmax [kN]	Ea [N.m]	E _T [N.m]
circular	0°	611.52	2	56.5	14.23	568.61	680.43
		529.00	2	71.3	14.21	500.82	1048.12
		419.44	2	61	9.98	385.66	1058.6
		611.52	4	54.7	16.38	583.99	1331.99
		529.0J	4	44.8	15.43	504.74	1382.12
		419.44	4	33.5	14.57	400.43	1398.54
		611.52	6	69.2	12.74	576.25	975.09
		529.00	6	59.1	11.51	499.13	1038.22
		419.44	6	47	11.01	399.74	1080.5

Table 3 Impact collapse test result for circular members outer angle 0° according to interface numbers and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Collapse length L[mm]	Pmax [kN]	Ea [N.m]	E _T [N.m]
circular	90°	611.52	2	39	18.97	585.41	1762.48
		529.00	2	37	17.49	511.19	1796.51
		419.44	2	24.3	19.15	407.71	1800.95
		611.52	4	54.7	15.12	578.17	1078.72
		529.00	4	54	12.12	503.79	1094
		419.44	4	49.5	12.13	399.88	1293.37
		611.52	6	34	19.38	586.79	1695.01
		529.00	6	31.2	17.17	513.04	1729.5
		419.44	6	22.5	17.45	403.84	1815.96

Table 2,3에 압계길이를 L[mm]로, 최대압계하중을 P_{max} [kN], 흡수에너지를 E_a [J], 총흡수에너지를 E_T [J]로 나타내었다.

제 2 절 사각단면 CFRP부재의 충격실험결과

본 절에서는 사각형 CFRP 부재에 대하여 충격하중을 가하여 사각형 단면 CFRP부재의 충격에너지의 크기에 따른 충격 압계특성을 살펴보고자 최외충각이 0° 인 경우와 90° 인 경우 계면수의 차에 따른 충격압계특성 실험을 행하였다.

Figs. 23~25 에 최외충각이 0° 인 경우 사각형 CFRP부재의 충격압계특성 실험을 행하여 얻은 하중-변위관계를 나타냈으며 Figs. 26~28 에 최외충각이 90° 인 경우 사각형 CFRP부재의 충격압계특성 실험을 행하여 얻은 하중-변위관계를 나타냈다. 선도의 면적을 적분함으로써 흡수에너지를 산출하였다.

충격압계실험은 사각형 CFRP 시험편의 충격흡수능력에 따라 압계 mode 해석이 용이한 범위를 충격에너지의 크기로 정하여 실험하였다. 사각단면 CFRP 부재의 경우는 원형 CFRP 부재보다도 충격에 약하여 보다 큰 충격에너지 범위에서는 가시적인 압계형상을 파악하기 어려워 본 연구에서 이용한 수직식 충격시험장치에서 충격시험이 용이하고 사각 CFRP 부재의 온전한 압계형상을 얻기 위한 충격범위를 조사하였다. 이상의 예비 실험 결과를 바탕으로 본 연구에서의 사각 CFRP 부재의 충격압계실험은 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 에서 행했다.

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 23 Load–displacement curve of CFRP Square members
with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 24 Load–displacement curve of CFRP Square members
with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 25 Load–displacement curve of CFRP Square members
with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 26 Load–displacement curve of CFRP Square members
with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 27 Load–displacement curve of CFRP Square members
with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J)

(a) Interface number 2

(b) Interface number 4

(c) Interface number 6

Fig. 28 Load–displacement curve of CFRP Square members
with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J)

Table 4에 최외층 각도가 0° 인 사각형 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충돌한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대압력 하중, 압력길이, 흡수에너지 및 총흡수에너지의 값을 나타냈다.

또한 Table 5에 최외층 각도가 90° 인 사각형 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충돌한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대압력 하중, 압력길이, 흡수에너지 및 총흡수에너지의 값을 나타냈다.

Table 4 Impact collapse test result for square members with outer angle 0° according to interface numbers and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E [J]	Interface number (No.)	Collapse length L [mm]	Pmax [kN]	Ea [N.m]	E _T [N.m]
Square	0°	372.40	2	64	9.66	367.63	400.74
		274.40	2	62.5	7.41	297.78	408.83
		223.44	2	51.3	9.37	236.53	440.52
		372.40	4	72.2	8.5	378.68	451
		274.40	4	68.5	8.98	270.23	496.33
		223.44	4	62.5	10.85	218.73	506.35
		372.40	6	74.8	10.4	374.64	449.99
		274.40	6	60.5	9.01	275.66	449.98
		223.44	6	72	9.51	224.56	470.74

Table 5 Impact collapse test result for square members with outer angle 90° according to interface numbers and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E [J]	Interface number (No.)	Collapse length L [mm]	Pmax [kN]	Ea [N.m]	ET [N.m]
Square	90°	372.40	2	59.5	10.98	357.49	500.55
		274.40	2	54	9.13	273.76	473.65
		223.44	2	33	10.11	213.95	570.03
		372.4	4	83	3.94	365.21	456.19
		274.4	4	81	8.94	249.38	393.1
		223.44	4	59.2	8.87	223.77	492.48
		372.40	6	66	8.47	367.66	514.44
		274.40	6	36.8	6.25	266.01	504.75
		223.44	6	66	6.93	222.81	532.71

Table 4,5에서 압계길이를 L [mm]로, 최대압계하중을 P_{max} [kN], 흡수에너지를 E_a [J], 총흡수에너지를 E_T [J]로 나타내었다.

제 5 장 결과 및 고찰

본 장에서는 차량 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 안정성능 및 연비 개선을 위한 경량화에 대한 방안으로서, 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재가 차량 전면부 사이드 부재로 사용될 것을 상정하여 적층각, 계면수 및 충격에너지의 크기가 다른 CFRP 부재의 충격후의 압케길이의 변화, 흡수에너지의 크기, 총흡수에너지의 크기 등 충격압케특성을 고찰하였다.

원형 및 사각형 CFRP 부재가 자동차 사이드부재의 기본형상으로 사용 될것으로 상정하고 충격 압케 실험을 행하여 CFRP 부재의 충격특성과 압케모드를 고찰하여 안전성능을 평가하였다.

또한, 적층구성의 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압케모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였고 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압케특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$ 의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다.

제 1 절 원형 CFRP 부재의 충격압케특성

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 원형 단면 CFRP 부재를 제작한 후 계면수 변화, 최외층각도 및 충격에너지의 크기의 변화에 따른 충격압케특성 고찰하였다.

Fig. 29에 최외층각도가 0° 인 원형 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압케 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 압케길이의 값을 나타냈으며, Fig. 30에 최외층각도가 90° 인 원형 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 가 작용한 경우의 충격압케 실험결과 얻은 압케길이의 값을 나타냈다.

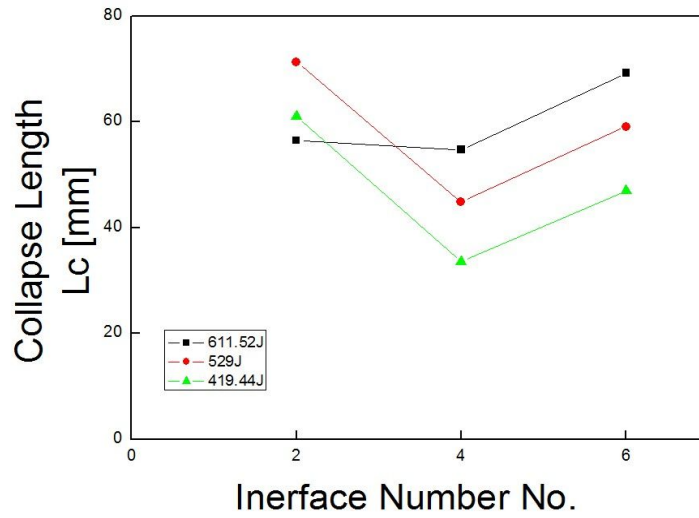


Fig. 29 Relationship between interface number and collapse length for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

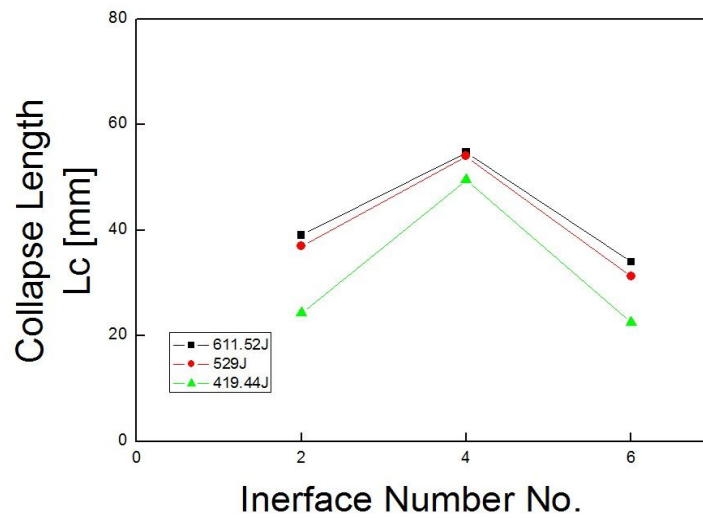


Fig. 30 Relationship between interface number and collapse length for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Figs. 29, 30으로 부터 최외층각이 0° 인 원형 단면 CFRP부재의 압괴길이는 충격에너지가 클수록 길게 나타났고, 4계면일 때 압괴길이가 가장 짧았다. 반면에, 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재는 계면수가 6계면일 때 가장 짧고 계면수가 4계면일 때 가장 길게 나타났다. 원형 단면 CFRP부재는 충격에너지가 611.52J 기준으로 최외층각이 0° 일 때는 최저 압괴길이가 54.7mm 였으나 최외층각이 90° 일 때는 최저 압괴길이가 34mm 로 약 60%정도 압괴길이가 짧게 나타났다.

이상으로 부터 충돌 후 승객의 안전을 담보하기 위한 내부공간 확보의 차원에서 원형 단면 CFRP 부재는 최외층각이 90° 이고 계면수가 6계면일 경우가 가장 충격특성이 우수한 것으로 사료된다.

Table 6에 원형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° , 90° 인 경우의 압괴길이를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재의 압괴길이이다.

Table 6 Collapse length for circular members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Collapse length Lc [mm]
circular	0° (90°)	611.52	2	56.5(39.0)
		529.00	2	71.3(37.0)
		419.44	2	61.0(24.3)
		611.52	4	54.7(54.7)
		529.0J	4	44.8(54.0)
		419.44	4	33.5(49.5)
		611.52	6	69.2(34.0)
		529.00	6	59.1(31.2)
		419.44	6	47.0(22.5)

Fig. 31에 최외층 각도가 0° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압케 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대 압케하중의 값을 나타냈으며, Fig. 32에 최외층 각도가 90° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 가 작용한 경우의 충격압케 실험결과 얻은 최대 압케하중의 값을 나타냈다. 이상의 Figs. 31, 32로 부터 최외층각이 0° 인 원형단면 CFRP부재의 최대 압케하중은 4계면 일 때 가장 크게 나타났고 그다음으로 2계면, 6계면 순으로 작게 나타났다. 그러나 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재의 경우는 계면수가 4계면일 때 최대압케하중이 가장 낮았으며 2계면, 6계면의 최대압케하중은 거의 유사했다. 또한 최대압케하중은 원형단면 CFRP부재의 경우 최외층각이 0° 와 90° 일 때 정반대의 현상이 나타남을 알 수 있었다.

원형 단면 CFRP부재는 충격에너지가 611.52J 기준으로 최외층각이 0° 일 때는 최대압케하중은 16.38KN 이었으나, 최외층각이 90° 일 때는 최대압케하중은 19.38KN 으로 약 18%정도 크게 나타났다.

이상으로부터 충돌후 발생하는 최대압케하중은 원형단면 CFRP부재의 경우 최외층각이 90° 인 경우가 최외층각이 0° 인 경우보다 크게 나타남을 알 수 있었다.

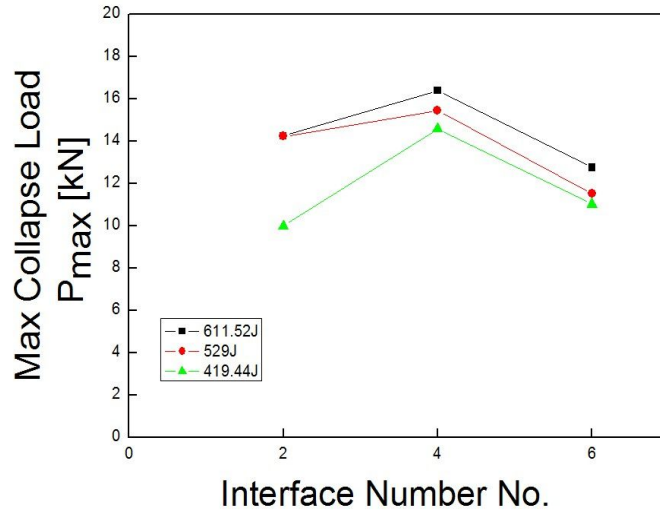


Fig. 31 Relationship between interface number and max collapse load for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

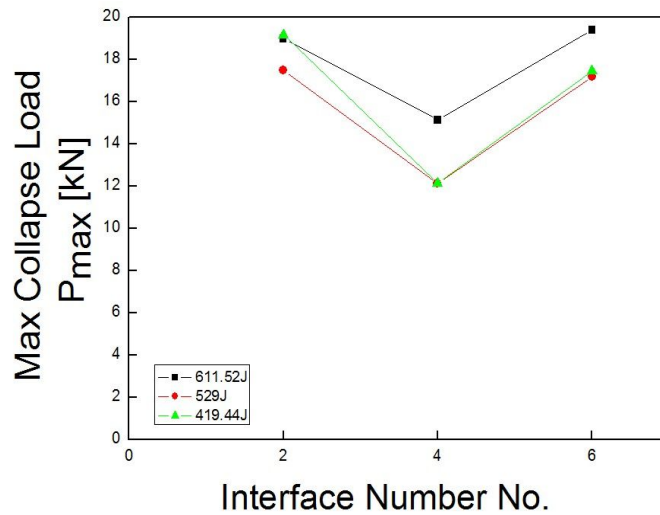


Fig. 32 Relationship between interface number and max collapse load for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 7에 충격하중을 받은 원형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° 90° 인 경우의 최대압괴하중의 크기를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재의 최대 압괴하중 이다.

Table 7 Maximum collapse load for circular members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E [J]	Interface number No.	Pmax [kN]
circular	0° (90°)	611.52	2	14.23(18.97)
		529.00	2	14.21(17.49)
		419.44	2	9.98(19.15)
		611.52	4	16.38(15.12)
		529.0J	4	15.43(12.12)
		419.44	4	14.57(12.13)
		611.52	6	12.74(19.38)
		529.00	6	11.51(17.17)
		419.44	6	11.01(17.45)

Fig. 33에 최외층 각도가 0° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 흡수에너지의 값을 나타냈으며, Fig. 34에 최외층 각도가 90° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 가 작용한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 흡수에너지의 값을 나타냈다.

이상의 Figs. 33,34로 부터 충격후 부재에 생기는 흡수에너지는 원형단면 CFRP 부재의 경우 최외층각이 0° , 90° 어느 경우나 계면수에 관계없이 유사했으며, 충격에너지의 크기에 따라 변화하였다.

이상으로부터 CFRP부재의 흡수에너지는 CFRP부재의 형상 및 최외층각의 변화에 관계없이 충격에너지의 크기에 따라 변화함을 알 수 있었다.

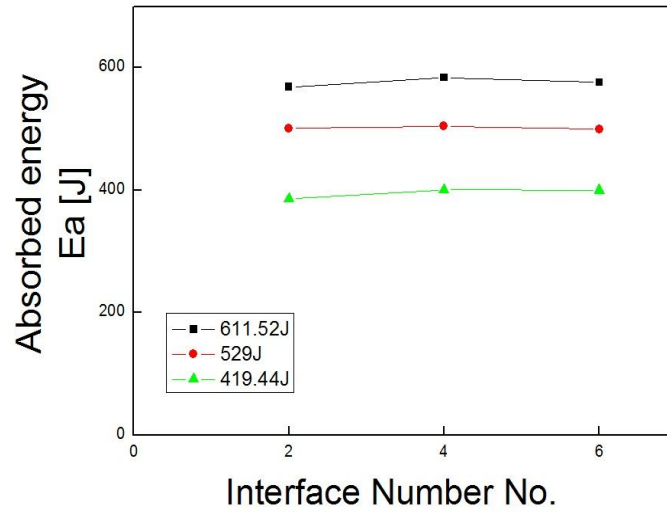


Fig. 33 Relationship between interface number and absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

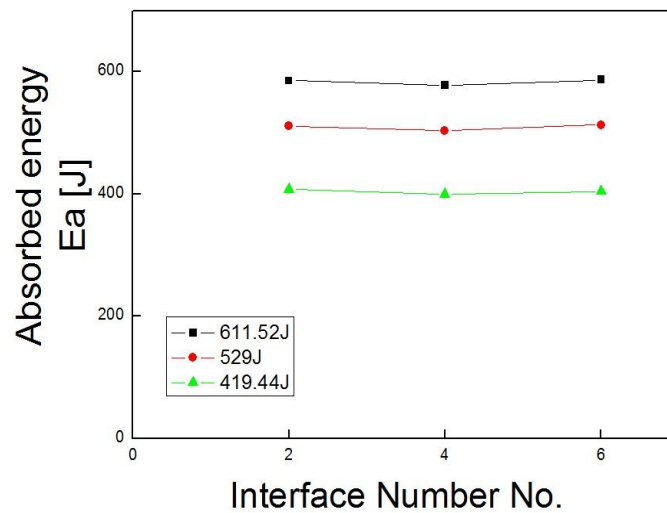


Fig. 34 Relationship between interface number and absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 8에 충격하중을 받은 원형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° 90° 인 경우의 흡수에너지의 크기를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재의 흡수에너지 이다.

Table 8 Absorbed energy for circular members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Absorbed energy Ea [J]
circular	0° (90°)	611.52	2	568.62(585.41)
		529.00	2	500.82(511.19)
		419.44	2	385.66(407.71)
		611.52	4	583.99(578.17)
		529.0J	4	504.74(503.79)
		419.44	4	400.43(399.88)
		611.52	6	576.25(586.79)
		529.00	6	499.13(513.04)
		419.44	6	399.74(403.84)

Fig. 35에 최외층 각도가 0° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대 총흡수에너지의 값을 나타냈으며, Fig. 36에 최외층 각도가 90° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J, 529.0J, 419.44J 가 작용한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 총흡수에너지의 값을 나타냈다.

여기서 총흡수에너지 E_T 란 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압력 길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압력되었다고 가정하여 구한 총 흡수에너지이다.

이상의 Figs. 35, 36으로부터 최외층각이 0° 인 원형단면 CFRP부재의 총흡수 에너지는 4계면 일 때 가장 크게 나타났고 그다음으로 2계면, 6계면 순으로 작게 나타났다. 그러나 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재의 경우는 계면수가 4계면일 때 총흡수에너지가 가장 낮았으며 2계면, 6계면의 총흡수에너지가 거의 유사했다. Fig. 35, 36으로부터 총흡수에너지는 원형단면 CFRP부재의 경우 최외층각이 0° 와 90° 일 때 정 반대의 현상이 나타남을 알 수 있었다.

이상으로부터 충돌후 원형단면 CFRP부재가 흡수하는 총흡수에너지는 최외층각이 90° 이고 계면수가 2계면, 6계면 일 때가 최외층각이 0° 인 모든계면 부재보다 약 30% 정도 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있었다.

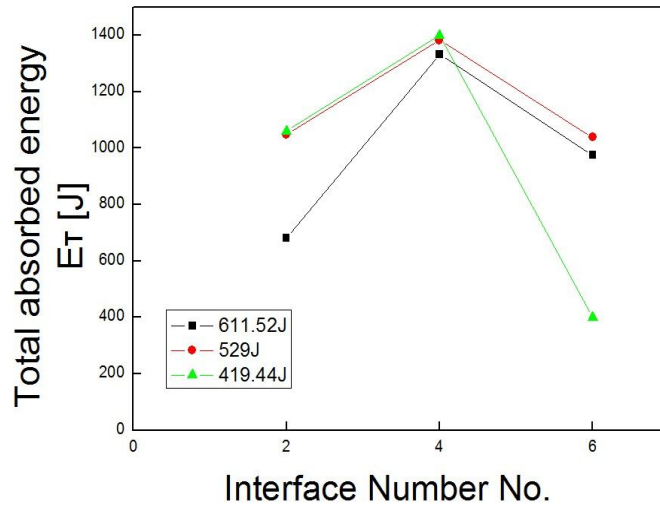


Fig. 35 Relationship between interface number and total absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

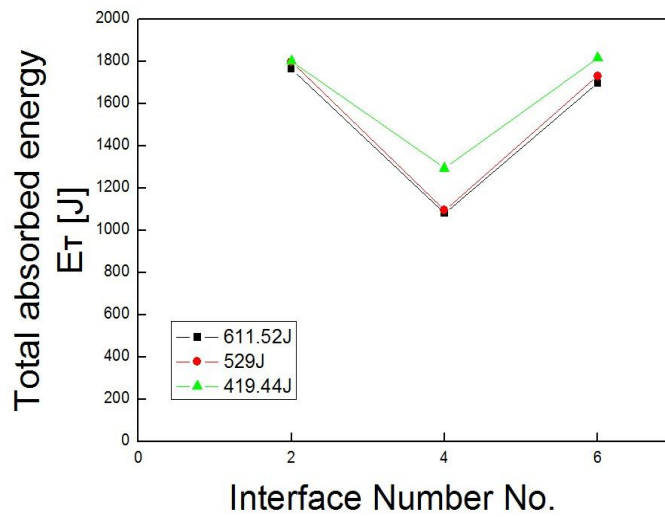


Fig. 36 Relationship between interface number and total absorbed energy for circular CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 9에 충격하중을 받은 원형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° 90° 인 경우 CFRP부재가 흡수하는 총흡수에너지의 크기를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 원형단면 CFRP부재가 흡수한 총흡수에너지 이다.

Table 9 Total absorbed energy for circular members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Total absorbed energy E_T [J]
circular	0° (90°)	611.52	2	680.43(1762.48)
		529.00	2	1048.12(1796.51)
		419.44	2	1058.6(1800.95)
		611.52	4	1331.99(1078.72)
		529.0J	4	1382.12(1094.00)
		419.44	4	1398.54(1293.37)
		611.52	6	975.09(1695.01)
		529.00	6	1038.22(1729.50)
		419.44	6	1080.5(1815.96)

이상과 같이 Table 6~9 의 충격압케 실험결과로 부터 원형CFRP 부재의 에너지 크기, 최외층각의 변화 및 계면수의 변화에 따른 최적의 압케특성을 Table 10~12에 나타냈다. Table 10에 적층각과 계면수가 다른 8ply로 적층된 원형단면 CFRP 부재의 충격압케실험 결과의 평균값인 평균압케길이(L_c [mm]), 최대 압케하중(P_{max} [kN]), 흡수에너지(E_a [J]) 및 총흡수에너지(E_L [J]) 데이터 값을 나타내었다. 표중의 ()는 최외층각이 90° 인 경우의 값을 나타냈다. Table 10으로부터 본 연

구에서의 실험 범위인 611.52J 의 충격에너지 에서는 원형단면 CFRP 부재의 최
 외층각이 0° 와 90° 인 각각의 경우 계면수의 변화에 따른 압쇄길이, 최대압쇄하
 중, 흡수에너지 및 총흡수에너지값의 최대치를 1로 하였을 때의 원형단면 CFRP
 부재의 충격특성 값을 나타냈다. Table 10으로부터 원형단면 CFRP 부재의 최외
 층각이 0° 인 경우 평균압쇄길이는 4계면수일 때가 가장 낮았고 그 다음으로는 2
 계면 일 때가 낮았다. 최외층각이 90° 인 경우는 6계면수일 때가 가장 낮았으며,
 최대압쇄하중 과 흡수에너지는 최외층각이 0° 인 경우는 4계면수일 때가 높았고
 최외층각이 90° 인 경우는 6계면수일 때가 가장 높게 나타났다.

이상으로부터 원형단면 CFRP 부재는 충돌에의 승객의 안전을 위한 공간확보의
 차원에서 동일 충격에너지를 받을 경우 최외층각이 90° 일때는, 계면수가 6계면일
 때가 가장 우수하였고, 최대압쇄하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지는 최외층각이 0°
 이고 계면수가 4 계면 인 경우가 가장 우수하였다.

Table 10 Impact characteristics for CFRP circular members according to
 interface number of CFRP(E = 611.52J)

Impact characteristics	Outer Layer	Interface number (No.)		
		2	4	6
Collapse length L_c [mm]	0°(90°)	0.82(0.71)	0.79(1)	1(0.62)
Maximum collapse load P_{max} [kN]	0°(90°)	0.87(0.98)	1(0.78)	0.78(1)
Absorbed energy E_a [J]	0°(90°)	0.97(0.99)	1(0.98)	0.98(1)
Total absorbed energy E_T [J]	0°(90°)	0.51(1)	1(0.61)	0.73(0.96)

Table 11에 529.0J 의 충격에너지로 충격을 가했을 때, 원형단면 CFRP 부재의
 최외층각이 0° 와 90° 인 각각의 경우 계면수의 변화에 따른 압쇄길이, 최대압쇄
 하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지 값의 최대치를 1로 하였을때의 원형단면 CFRP

부재의 충격특성 값을 나타냈다. Table 11로 부터 원형단면 CFRP 부재의 최외층각이 0° 인 경우 평균압쇄길이는 4계면수일 때가 가장 낮았고 그 다음으로는 6계면 일 때가 낮았다. 최외층각이 90° 인 경우는 6계면수일 때가 가장 낮았으며, 최대압쇄하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지는 최외층각이 0° 인 경우는 4계면수일 때가 높았고 최외층각이 90° 인 경우는 2계면수일 때가 가장 높게 나타났다.

이상으로부터 충격에너지의 크기가 변화하더라도 원형단면 CFRP 부재에서는 충돌후의 승객의 안전을 위한 공간확보의 차원에서 최외층각이 90° 일때는, 계면수가 6계면일 때가 가장 우수하였고 최대압쇄하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지는 최외층각이 0° 이고 계면수가 4 계면인 경우가 가장 우수함을 알 수 있었다.

Table 11 Impact characteristics for CFRP circular members according to interface number of CFRP(E = 529.0J)

Impact characteristics	Outer Layer	Interface number No.		
		2	4	6
Collapse length L_c [mm]	0°(90°)	1(0.66)	0.63(1)	0.83(0.58)
Maximum collapse load P_{max} [kN]	0°(90°)	0.92(1)	1(0.69)	0.75(0.98)
Absorbed energy E_a [J]	0°(90°)	0.99(0.99)	1(0.98)	0.99(1)
Total absorbed energy E_T [J]	0°(90°)	0.76(1)	1(0.61)	0.75(0.96)

Table 12에 419.44J 의 충격에너지로 충격을 가했을 때의 원형단면 CFRP 부재의 최외층각이 0° 와 90° 인 각각의 경우 계면수의 변화에 따른 압쇄길이, 최대압쇄하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지 값의 최대치를 1로 하였을 때의 원형단면 CFRP 부재의 충격특성 값을 나타냈다. 419.44J 의 충격에너지로 충격을 가했을 때도 611.52J, 529.0J로 충격을 가했을 때와 유사하게 나타났다.

Table 12 Impact characteristics for CFRP circular members according to interface number of CFRP(E = 419.44J)

Impact characteristics	Outer Layer	Interface number (No.)		
		2	4	6
Collapse length L_c [mm]	$0^0(90^0)$	1(0.49)	0.55(1)	0.77(0.45)
Maximum collapse load P_{max} [kN]	$0^0(90^0)$	0.68(1)	1(0.633)	0.76(0.91)
Absorbed energy E_a [J]	$0^0(90^0)$	0.96(1)	1(0.98)	0.99(0.99)
Total absorbed energy E_T [J]	$0^0(90^0)$	0.76(0.99)	1(0.712)	0.77(1)

제 2 절 사각형 CFRP 부재의 충격압괴특성

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 사각형 단면 CFRP 부재를 제작한 후 계면수 변화, 최외층각도 및 충격에너지의 크기의 변화에 따른 충격압괴특성 고찰하였다.

Fig. 37에 최외층각도가 0° 인 사각단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압괴 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 압괴길이의 값을 나타냈으며,

Fig. 38에 최외층 각도가 90° 인 사각단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 작용한 경우의 충격압괴 실험결과 얻은 압괴길이의 값을 나타냈다. 이상의 Figs. 37, 38로 부터 최외층각이 0° 인 사각단면 CFRP부재의 압괴길이는 2, 4, 6계면으로 계면수가 증가 할수록 증가하는 경향을 보였으며, 최외층각이 90° 인 사각단면 CFRP부재는 계면수가 2계면일 때 가장 짧고 그 다음으로 4계면일 때 짧게 나타났다. 사각형단면 CFRP부재는 충격에너지가 372.4J 기준으로 최외층각이 0° 일 때는 최저압괴길이가 64.0mm 였으나 최외층각이 90° 일 때는 최저 압괴길이가 59.5mm 로 약 8%정도 압괴길이가 짧게 나타났다.

이상으로부터 충돌후 승객의 안전을 담보하기 위한 내부공간 확보의 차원에서 사각형 단면 CFRP 부재는 최외층각이 90° 이고 계면수가 2계면일 경우가 가장 충격특성이 우수한 것으로 사료된다.

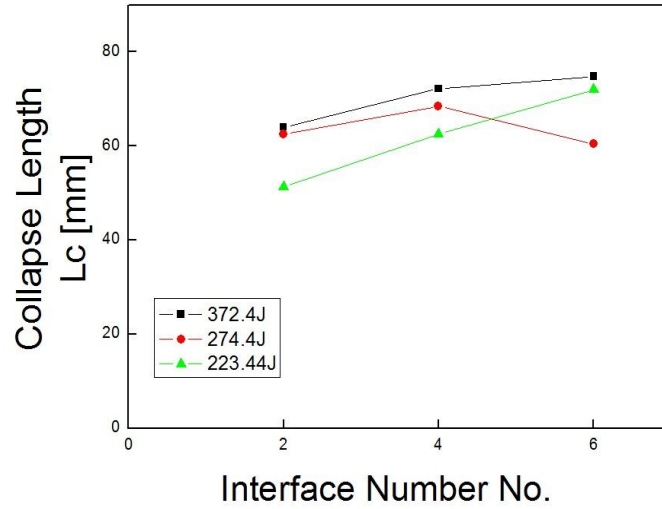


Fig. 37 Relationship between interface number and collapse length for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

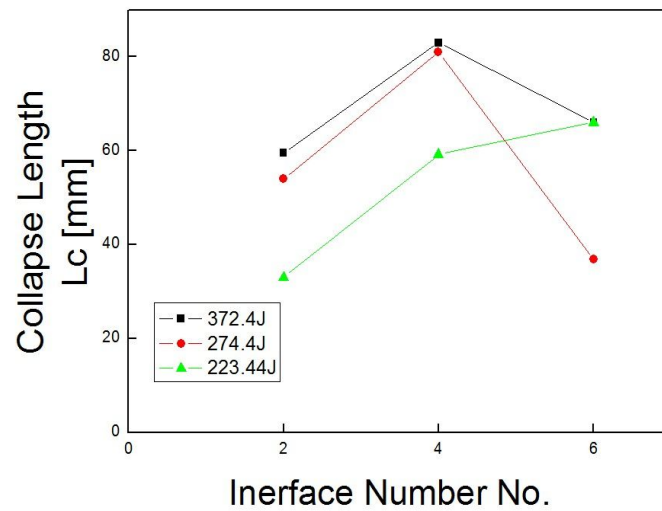


Fig. 38 Relationship between interface number and collapse length for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 13에 사각단면 CFRP부재의 최외층각이 0° 90° 인 경우의 압괴길이를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 사각형 단면 CFRP부재의 압괴길이이다.

Table 13 Collapse length for Square members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Collapse length Lc[mm]
Square	0° (90°)	372.40	2	64.0(59.5)
		274.40	2	62.5(54.0)
		223.44	2	51.3(33.0)
		372.40	4	72.2(83.0)
		274.40	4	68.5(81.0)
		223.44	4	62.5(59.2)
		372.40	6	74.8(66.0)
		274.40	6	60.5(36.8)
		223.44	6	72.0(66.0)

Fig. 39에 최외층각도가 0° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압괴 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대 압괴하중의 값을 나타냈으며,

Fig. 40에 최외층각도가 90° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 작용한 경우의 충격압괴 실험결과 얻은 최대 압괴하중의 값을 나타냈다.

이상의 Figs. 39, 40으로 부터 최외층각이 0° 인 사각형단면 CFRP부재의 최대 압궤하중은 4계면 일 때 가장 크게 나타났고 그다음으로 2계면, 6계면 순으로 작게 나타났다. 최외층각이 90° 일 때는 2계면에서 가장 높은 최대압궤하중을 보였으며 4계면, 6계면으로 갈수록 낮아졌다. 이는 원형단면 CFRP부재에서는 압궤하중이 작용할 때 대칭적으로 압궤되는 반면에 사각형단면 CFRP부재에서 모서리의 영향에 의한 것이라 생각된다.

또한 사각형단면 CFRP부재의 최대 압궤하중은 에너지가 클수록 실험 데이터의 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 이상의 실험 결과로부터 최대압궤하중은 사각형단면 CFRP부재보다 원형단면 CFRP부재가 훨씬 안정적임을 알 수 있었다.

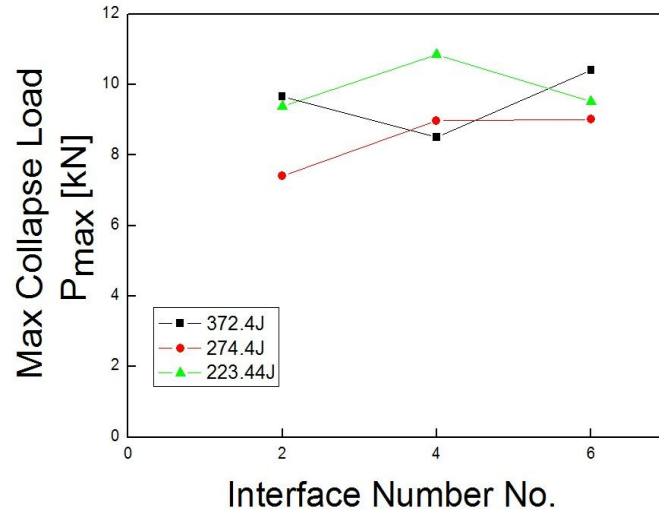


Fig. 39 Relationship between interface number and max collapse load for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

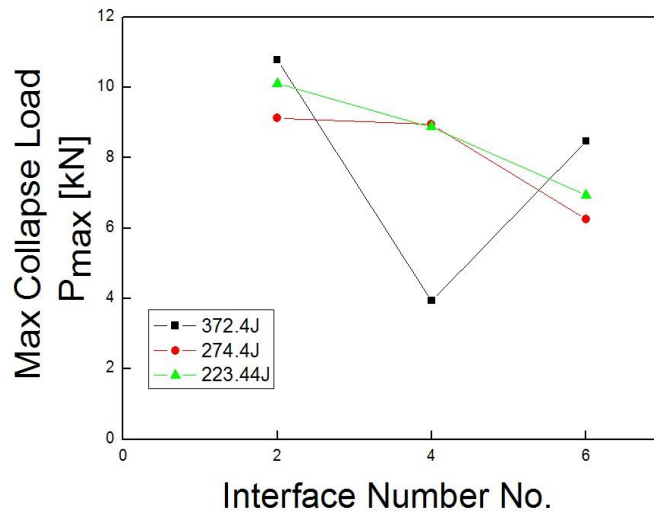


Fig. 40 Relationship between interface number and max collapse load for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 14에 충격하중을 받은 사각형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° , 90° 인 경우의 최대압괴하중의 크기를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 사각형단면 CFRP부재의 최대 압괴하중 이다.

Table 14 Maximum collapse load for Square members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Pmax [kN]
Square	0° (90°)	372.40	2	9.66(10.98)
		274.40	2	7.41(9.13)
		223.44	2	9.37(10.1)
		372.40	4	8.5(3.94)
		274.40	4	8.98(8.94)
		223.44	4	10.85(8.87)
		372.40	6	10.4(8.47)
		274.40	6	9.01(6.25)
		223.44	6	9.51(6.93)

Fig. 41에 최외층 각도가 0° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압괴 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 흡수에너지의 값을 나타냈으며, Fig. 42에 최외층

각도가 90° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 작용한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 흡수에너지의 값을 나타냈다.

이상의 Figs. 41~42로 부터 충격후 부재에 생기는 흡수에너지는 사각형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° , 90° 어느 경우나 계면수에 관계없이 유사했으며, 충격에너지의 크기에 따라 변화하였다.

이상으로부터 CFRP부재의 흡수에너지는 CFRP부재의 계면수 및 최외층각의 변화에 관계없이 충격에너지의 크기에 따라 변화함을 알 수 있었다.

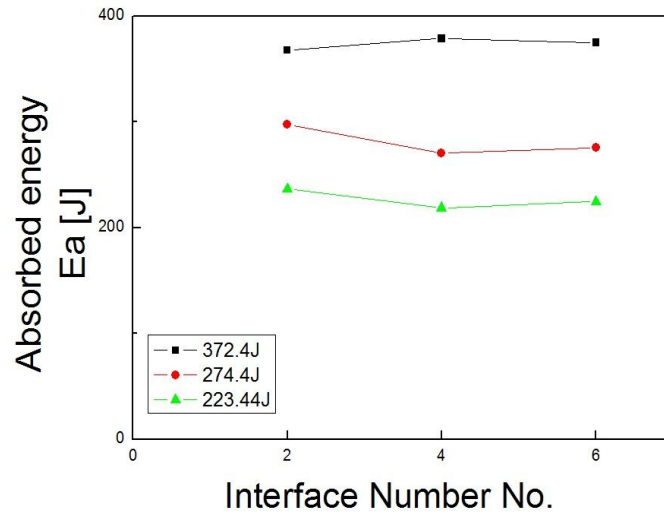


Fig. 41 Relationship between interface number and absorbed energy for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

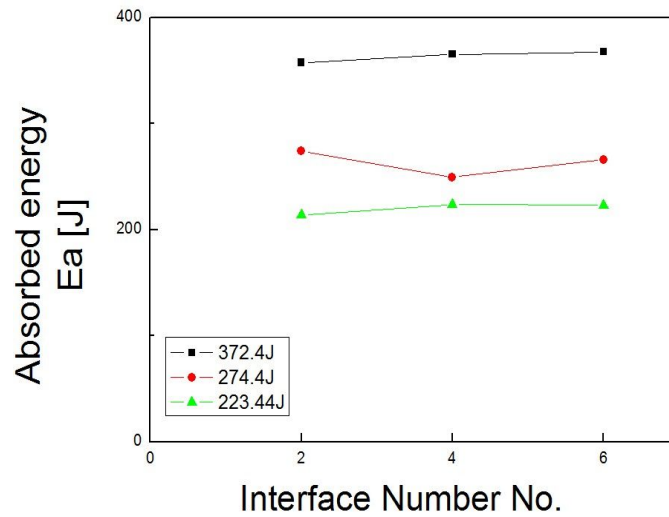


Fig. 42 Relationship between interface number and absorbed energy for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 15에 충격하중을 받은 사각형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° 90° 인 경우의 흡수에너지의 크기를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 사각형단면 CFRP부재의 흡수에너지이다. 사각형 단면 CFRP 부재의 경우 충격에너지에 비해 흡수에너지가 높게나온 이유는 사각형의 모서리부분에서는 섬유의 파단에 의해 대부분 에너지를 흡수하는데 변위를 측정하는 광학식변위계인 Zimmer가 이러한 모서리부분의 미세한부분까지 측정하는데는 약간의 미흡한 부분이 있어서 흡수에너지의 크기를 구할 때 충격에너지의 크기보다 흡수에너지가 크게 나타나는 것으로 사료된다.

Table 15 Absorbed energy for Square members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Absorbed energy Ea[J]
Square	0° (90°)	372.40	2	367.63(357.49)
		274.40	2	297.78(273.76)
		223.44	2	236.53(213.95)
		372.40	4	378.68(365.21)
		274.40	4	270.23(249.38)
		223.44	4	218.73(223.77)
		372.40	6	374.64(367.66)
		274.40	6	275.66(266.01)
		223.44	6	224.56(222.81)

Fig. 43에 최외층 각도가 0° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 충격이 가해질 때의 충격압력 실험결과 얻은 충격에너지의 크기 및 계면수의 변화에 따른 최대 총흡수에너지의 값을 나타냈으며, Fig. 44에 최외층 각도가 90° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J, 274.4J, 223.44J 로 작용한 경우의 충격압력 실험결과 얻은 총흡수에너지의 값을 나타냈다.

Figs. 43, 44로 부터 최외층각이 0° 인 사각형단면 CFRP부재의 총흡수에너지는 4계면 일 때가 2, 6 계면보다 컸고, 최외층각이 90° 인 사각형단면 CFRP부재의 총흡수에너지는 2계면 일 때가 가장 컸고 4, 6 계면순으로 작았다.

이상의 Figs. 43 ~ 44로 부터 충돌후 CFRP부재가 흡수하는 총흡수에너지는 사각형 CFRP부재는 계면수에 따라 크게 변화하지 않음을 알 수 있었다.

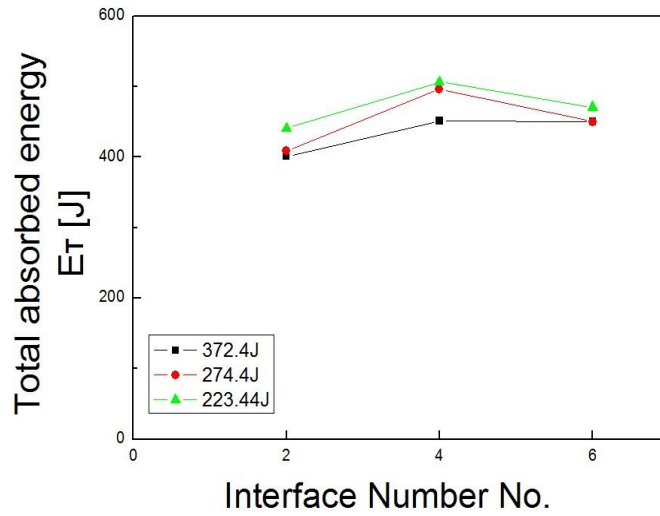


Fig. 43 Relationship between interface number and total absorbed energy for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 0°)

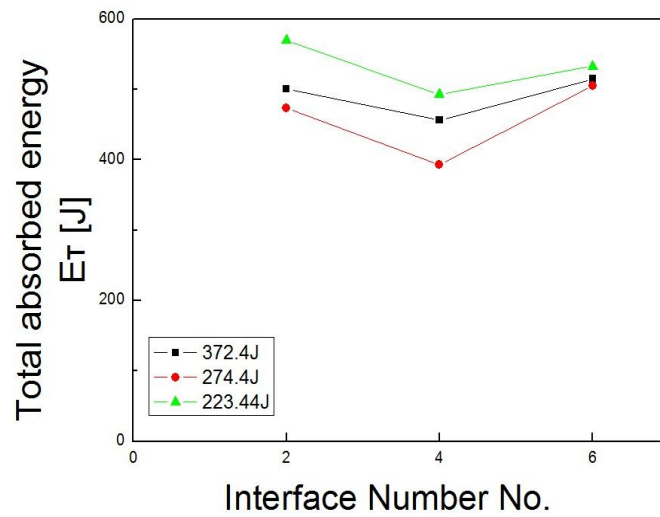


Fig. 44 Relationship between interface number and total absorbed energy for square CFRP member according to Impact energy (Outer layer 90°)

Table 16에 충격하중을 받은 사각형단면 CFRP부재의 최외층각이 0° 90° 인 경우 CFRP부재가 흡수하는 총흡수에너지의 크기를 나타냈다. () 속의 숫자는 최외층각이 90° 인 사각형단면 CFRP부재가 흡수한 총흡수에너지 이다.

Table 16 Total absorbed energy for Square members according to interface number and impact energy

Specimen	Outer layer	Impact energy E[J]	Interface number (No.)	Total absorbed energy E_T [J]
Square	0° (90°)	372.40	2	400.74(500.55)
		274.40	2	408.83(473.65)
		223.44	2	440.52(570.03)
		372.40	4	451.00(456.19)
		274.40	4	496.33(393.10)
		223.44	4	506.35(492.48)
		372.40	6	449.99(514.44)
		274.40	6	449.98(504.75)
		223.44	6	470.74(532.71)

이상과 같이 Table 13 ~ 16 의 충격압력 실험결과로 부터 사각형CFRP 부재의 충격에너지의 크기, 최외층각의 변화 및 계면수의 변화에 따른 최적의 압력특성을 Table 17~19에 나타냈다.

Table 17에 사각형단면 CFRP 부재의 충격압괴실험 결과의 평균값을 나타내었다. 표중의 ()는 최외층각이 90° 인 경우의 값을 나타냈다. Table 17로 부터 본 연구에서의 사각형단면 CFRP 부재의 실험 범위인 372.4J의 충격에너지 에서는 사각형단면 CFRP 부재의 최외층각이 0° 와 90° 인 각각의 경우 계면수의 변화에 따른 압괴길이, 최대압괴하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지값의 최대치를 1로 하였을때의 사각형단면 CFRP 부재의 충격특성 값을 나타냈다. Table 17로 부터 사각형단면 CFRP 부재의 최외층각이 0° 인 경우 평균압괴길이는 2계면수일 때가 가장 낮았고 그 다음으로는 4계면 일때가 낮았다. 최외층각이 90° 인 경우도 2계면수일 때가 가장 낮았으며, 최대압괴하중은 최외층각이 0° 인 경우는 계면수가 6 계면일 때, 최외층각이 90° 인 경우는 계면수가 2계면일 때가 가장 높았고, 흡수 에너지와 총흡수에너지는 최외층각이 0° 인 경우는 4계면수일 때가 높았고 최외층각이 90° 인 경우는 6계면수일 때가 가장 높게 나타났다.

이상으로 부터 사각형단면 CFRP 부재는 충돌후의 승객의 안전을 위한 공간확보의 차원에서 동일 충격에너지를 받을 경우 최외층각이 0° , 90° 모두 계면수가 2 계면일 때가 강 우수하였고, 흡수에너지 및 총흡수에너지는 최외층각이 0° 이고 계면수가 4 계면인 경우나, 최외층각이 90° 이고 계면수가 6 계면인 경우가 가장 우수 하였다.

Table 17 Impact characteristics for CFRP square members according to interface number of CFRP(E = 372.4J)

Impact characteristics	Outer Layer	Interface number (No.)		
		2	4	6
Collapse length L_c [mm]	0°(90°)	0.86(0.72)	0.96(1)	1(0.79)
Maximum collapse load P_{max} [kN]	0°(90°)	0.93(1)	0.82(0.36)	1(0.77)
Absorbed energy E_a [J]	0°(90°)	0.97(0.97)	1(0.99)	0.99(1)
Total absorbed energy E_T [J]	0°(90°)	0.89(0.97)	1(0.87)	0.99(1)

Table 18, 19에 274.4J, 223.44J 로 충격을 가했을 때의 사각형단면 CFRP 부재의 최외층각이 0° 와 90° 인 각각의 경우 계면수의 변화에 따른 압괴길이, 최대 압괴하중, 흡수에너지 및 총흡수에너지 값의 최대치를 1로 하였을때의 사각형단면 CFRP 부재의 충격특성 값을 나타냈다.

Table 18 Impact characteristics for CFRP square members according to interface number of CFRP(E = 274.4J)

Impact characteristics	Outer Layer	Interface number (No.)		
		2	4	6
Collapse length L_c [mm]	0°(90°)	0.91 (0.67)	1 (1)	0.88 (0.45)
Maximum collapse load P_{max} [kN]	0°(90°)	0.82 (1)	0.99 (0.98)	1 (0.68)
Absorbed energy E_a [J]	0°(90°)	1 (1)	0.91 (0.91)	0.93 (0.97)
Total absorbed energy E_T [J]	0°(90°)	0.82 (0.94)	1 (0.78)	0.91 (1)

Table 19 Impact characteristics for CFRP square members according to interface number of CFRP(E = 223.44J)

Impact characteristics	Outer Layer	Interface number (No.)		
		2	4	6
Collapse length L_c [mm]	0°(90°)	0.71 (0.50)	0.87 (0.89)	1 (1)
Maximum collapse load P_{max} [kN]	0°(90°)	0.86 (1)	1 (0.88)	0.87 (0.68)
Absorbed energy E_a [J]	0°(90°)	1 (0.95)	0.92 (1)	0.95 (0.99)
Total absorbed energy E_T [J]	0°(90°)	0.87 (1)	1 (0.86)	0.93 (0.93)

제 3 절 충격 압괴모드

본 연구에서는 경량화 자동차의 구조부재로 CFRP 구조부재가 상용될 것을 상정하여 CFRP 구조부재가 충돌하중을 받을 경우 승객의 안전보호 차원에서의 충격특성을 파악하고 어떠한 적층구조의 CFRP 부재가 충격특성이 우수한가를 실험적으로 고찰하였다. 특히, CFRP 부재의 단면의 형상, 최외층각도의 변화 및 계면수의 변화에 따른 충격특성과 충격압괴모드를 고찰하여 경량화 자동차 설계시 많은 에너지를 흡수할 수 있고 승객의 안전성능 및 연비 개선을 위한 경량화 차체 설계의 최적의 데이터를 얻고자 하였다.

Photo. 3에 최외층 각도가 0° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J로 충격이 가해질 때의 계면수의 변화에 따른 압괴형상을 나타냈으며



(a)Interface number 2 (b)Interface number 4 (c)Interface number 6

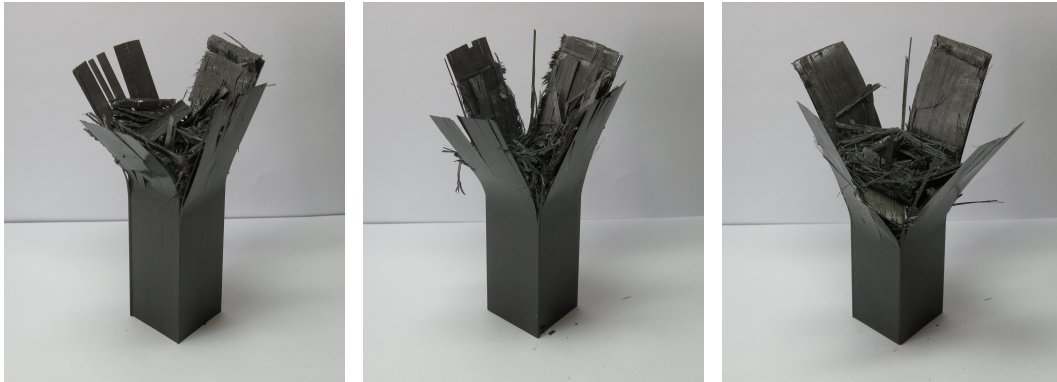
Photo. 3 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J)

Photo. 4에 최외층 각도가 90° 인 원형단면 CFRP부재에 충격에너지가 611.52J 로 충격이 가해질 때의 계면수의 변화에 따른 압괴형상을 나타냈다. 또한, Photo. 5에 최외층 각도가 0° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J 로 충격이 가해질 때의 계면수의 변화에 따른 압괴형상을 나타냈으며, Photo. 6에 최외층 각도가 90° 인 사각형단면 CFRP부재에 충격에너지가 372.4J 로 충격이 가해질 때의 계면수의 변화에 따른 압괴형상을 나타냈다.



(a)Interface number 2 (b)Interface number 4 (c)Interface number 6

Photo. 4 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J)



(a)Interface number 2 (b)Interface number 4 (c)Interface number 6

Photo. 5 Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J)



(a)Interface number 2 (b)Interface number 4 (c)Interface number 6

Photo.6 Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J)

Photo. 3 ~6 으로부터 연속섬유강화 복합재 박육부재(Thin-walled member)에 축 압축하중이 작용하면 Fig. 3 과 같이 압괴유형은 횡방향 전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드(Lamina bending) 및 국부좌굴 압괴모드(Local buckling)와

횡방향 전단(Transverse shearing)과 라미나 굽힘 모드가 조합된 취성과파괴모드의 4가지의 압괴모드로 압괴됨을 알 수 있었다.

원형단면 CFRP 부재에서는 최외층각이 0° 인 경우 Photo. 3 에서와 같이 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압괴되었으며, 층간크랙(Interlaminar cracks) 및 층내크랙(Intralaminar cracks) 진전에 의한 라미나 굽힘과 압괴표면을 따라 수반된 운동과 하중 면에 대한 라미나 묶음의 마찰에 의하여 주로 에너지를 흡수하며, 섬유 방향을 따라 압괴가 진행되며 이는 횡방향 전단과 라미나 굽힘모드가 조합된 취성과파괴 모드로 압괴되었다. 그러나 최외층각이 90° 인 경우 Photo. 4 에서와 같이 파쇄확장모드(fragmentation and splaying mode)의 형태로 압괴되었다. 파쇄확장모드는 충격 압괴 시 축방향 0° 의 섬유가 부재의 외측으로 확장되려 하지만 90° 의 섬유의 영향으로 확장되면서 90° 의 섬유와 함께 파단 되면서 압괴된다.

이상으로부터 CFRP의 적층각도가 축 방향과 비슷한 방향으로 적층이 되어 있을 때, 축 하중이 작용하면 초기 피크 하중 이후 CFRP부재는 라미나 굽힘에 의해서 에너지를 흡수하고, CFRP 적층각도가 증가할수록 CFRP 섬유는 hoop stress 형태로 하중을 지지함을 알 수 있었다. CFRP 적층각도가 축 방향에 대해 직교하는 방향으로 가까워지면 원주방향으로 적층된 대부분의 섬유가 파단에 의해서 에너지를 흡수하였다.

사각형단면 CFRP 부재에서는 Photo. 5, 6에서와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압괴되었으며, 이러한 압괴모드는 층간크랙 및 층내크랙 진전에 의한 라미나 굽힘과 압괴표면을 따라 수반된 운동과 하중 면에 대한 라미나 묶음의 마찰에 의하여 주로 에너지를 흡수하며, 섬유 방향을 따라 압괴가 진행되며 이는 횡방향 전단과 라미나 굽힘모드가 조합된 취성과파괴 모드로 압괴 되었다. 또한, 모서리 부분에서는 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다.

최외층각이 0° 로 적층된 사각형단면 CFRP 부재에서는 Photo. 5에서와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, 모서리부 부재는 횡방향 전단과 라미나 묶음의 파단이 조합된 취성과파괴

모드의 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 주로 평판부재의 층간 크랙 및 층내 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 모서리부 부재의 횡방향 전단모드에 의한 라미나 뒤틀림의 섬유 및 기지 파단과 라미나 뒤틀림의 굽힘과 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 이는 0° 로 적층된 라미나 뒤틀림은 층간 크랙 및 층내 크랙 진전에 의해 부재 외측으로의 라미나 굽힘을 발생시키지만 축 방향에 대하여 90° 로 적층된 섬유는 0° 로 적층된 라미나 뒤틀림의 라미나 굽힘을 방해하면서 파단 된다. 즉, 섬유는 굽힘이 존재하나 파단에 가까우며 크랙성장과 라미나 뒤틀림의 굽힘/파괴가 반복적으로 나타난다.

최외층각이 90° 로 적층된 사각형단면 CFRP부재에서는 Photo. 6과 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, 모서리 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 뒤틀림의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 최외각층에 0° 로 적층된 라미나 뒤틀림에 의해 나타나는 라미나 굽힘이 두드러지게 나타났다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 경량화 자동차의 구조부재로 CFRP 구조부재가 상용될 것을 상정하여 CFRP 구조부재가 충돌하중을 받을 경우 승객의 안전보호 차원에서의 충격특성을 파악하고 어떠한 적층구조의 CFRP 부재가 충격특성이 우수한가를 실험적으로 고찰하였다. 특히, CFRP 부재의 단면의 형상, 최외층각도의 변화 및 계면수의 변화에 따른 충격특성과 충격압케모드를 고찰하여 경량화 자동차 설계시 승객의 안정성능 및 연비 개선을 위한 경량화 차체 설계의 최적의 데이터를 얻고져 하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 원형 단면 CFRP부재는 충격에너지가 611.52J 기준으로 최외층각이 0° 일 때는 최저 압케길이가 54.7mm 였으나 최외층각이 90° 일 때는 최저 압케길이가 34mm 로 약 60%정도 압케길이가 짧게 나타났다. 따라서 충돌 후 승객의 안전을 담보하기 위한 내부공간 확보의 차원에서 원형 단면 CFRP 부재는 최외층각이 90° 이고 계면수가 6계면일 경우가 가장 충격특성이 우수한 것으로 사료된다.
2. 사각형 단면 CFRP부재는 충격에너지가 372.4J 기준으로 최외층각이 0° 일 때는 최저 압케길이가 64.0mm 였으나 최외층각이 90° 일 때는 최저압케길이가 59.5mm 로 약 8%정도 압케길이가 짧게 나타났다.
따라서, 충돌후 승객의 안전을 담보하기 위한 내부공간 확보의 차원에서 사각형 단면 CFRP 부재는 최외층각이 90° 이고 계면수가 2계면일 경우가 가장 충격특성이 우수한 것으로 사료된다.
3. 최대압케하중은 원형단면 CFRP부재의 경우 최외층각이 0° 와 90° 일 때 정반대의 현상이 나타 났으며 원형 단면 CFRP부재는 충격에너지가 611.52J 기준으로 최외층각이 0° 일 때는 최대압케하중은 16.38KN 이었으나, 최외층각이

90° 일 때는 6계면에서 최대압케하중은 19.38KN 으로 약 18%정도 크게 나타났다. 이상으로부터 충돌 후 발생하는 최대압케하중은 원형단면 CFRP부재의 경우 최외층각이 90° 인 경우가 최외층각이 0° 인 경우보다 크게 나타남을 알 수 있었으며 계면수가 6계면 일 때가 충격에 가장 저항이 컸다.

4. 적층각, 계면수 및 충격에너지의 크기가 다른 CFRP 부재의 충격후의 흡수에너지의 크기를 실험적으로 고찰한 결과 흡수에너지는 원형단면 CFRP부재의 경우나 사각형단면 CFRP부재 모두 최외층각이 0° , 90° 어느 경우나 계면수에 관계없이 유사했으며, 충격에너지의 크기에 따라 선형적으로 변화 하였다.
5. 원형단면 CFRP부재의 시험편의 전체길가 압케되었다고 가정하여 구한 총흡수에너지는 최외층각이 0° 인 경우, 4계면 일 때 가장 크게 나타났고 그 다음으로 2계면, 6계면 순으로 작게 나타났다. 그러나 최외층각이 90° 인 경우는 계면수가 4계면일 때 가장 낮았으며 2계면, 6계면의 총 흡수에너지가 거의 유사했다. 이상으로부터 충돌후 원형단면 CFRP부재가 흡수하는 총 흡수에너지는 최외층각이 90° 이고, 계면수가 2계면, 6계면 일 때가 최 외층각이 0° 인 모든 계면 부재보다 약 30% 정도 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있었다.
6. 사각형단면 CFRP부재의 시험편의 전체길가 압케되었다고 가정하여 구한 총 흡수에너지는 최외층각이 0° 인 경우 4계면 일 때가 2, 6 계면보다 컸고, 최외층각이 90° 인 사각형단면 CFRP부재의 전 흡수에너지는 2계면 일 때가 가장 컸고 4, 6 계면순으로 작았다. 이상의 결과로부터 충돌후 CFRP부재가 흡수하는 총 흡수에너지는 사각형 CFRP부재는 계면수에 따라 크게 변화하지 않으나 원형 CFRP부재는 계면수에따라 크게 변화함을 알 수 있었다.
7. 원형단면 CFRP 부재에서는 최외층각이 0° 인 경우 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압케되었으며, 라미나 굽힘과 압케표면을 따라 수반된 운동과 하중 면에 대한 라미나 묶음의 마찰에 의하여 주로 에너지를 흡수하며, 횡방

향 전단과 라미나 굽힘모드가 조합된 취성파괴 모드로 압케 되었다. 그러나 최외층각이 90° 인 경우는 충격압케 시 축방향 0° 의 섬유가 부재의 외측으로 확장되려 하지만 90° 의 섬유의 영향으로 확장되면서 90° 의 섬유와 함께 파단되면서 압케되는 파쇄확장 모드의 형태로 압케되었다.

8. 사각형단면 CFRP 부재에서는 최외층각이 0° 인 경우 주로 평판부재의 층간 크랙 및 층내 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 모서리부 부재의 횡방향 전단 모드에 의한 라미나 묽음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 묽음의 굽힘과 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수하였으며, 최외층각이 90° 인 경우 평판 부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, 모서리 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묽음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압케 되었다.

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. 오 선·황우채. “차량구조부재의 경량화소재 적용을 위한 Hybrid 부재의 흡수에너지 특성 연구.” 『한국기계기술학회지』 **17**:5:865~870, 2015.
7. 황우채 최영민 임광희 차천석 양용준 양인영. “차체 경량화를 위한 CFRP 복합구조부재의 충격압력모드에 관한 연구” 『한국안전학회』 **29**:5:7~14, 2014.
8. 양인영 차천석 편석범 황우채. “CFRP 이중모자형 복합구조부재의 축 압력 특성에 관한 연구” 『한국생산제조시스템학회 학술발표대회 논문집』 2012.
9. 황우채·심재기·양인영. “경량화용 Al/CFRP 사각 구조부재의 압력 특성에 관한 연구.” 『한국생산제조시스템학회』 **20**:3:219~224, 2011.
10. 이길성·박으뜸·양인영. “적층조건에 따른 혼성 원형 박육부재의 충격압력거동.” 『한국생산제조시스템학회』 **29**:2:235~240, 2010.
11. 광성복·문찬성. "고분자 적용 크래쉬 패드 부품 성형 기술." 『한국자동차공학회 오토저널』 **12**:26-34, 2010.
12. 유승을·정선경. "자동차용 미래 섬유 개발 동향." 『한국자동차공학회 오토저널』 **12**:35-43, 2010.
13. 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.
14. 김구현 · 이정주 · 신금철. “알루미늄/GFRP 혼성 사각튜브의 정적 압축 붕괴 및 에너지흡수특성.” 『한국자동차공학회 논문집』 **8**:208-219, 2000.
 15. A. G. Mamalis, D. E. Manolaks. "Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fibreglass Composite Materials Subjected to Axial Loading." *J. Composite Materials* **24**:72-91, 1990.
 16. C. H. Chiu, C. K. Lu. "Crushing Characteristics of 3-D Braided Composite Square Tubes." *J. Composite Materials* **31**:2309-2327, 1997.
 17. J. H. Choi, Y. J. Yang, C. S. Cha, I. Y. Yang. "Study on Impact Characteristics of CFRP Structural Member According to Stacking Conditions." *Applied Mechanics and Materials* **680**, 2014.
 18. Nakamura, H. Yamamura, Y. Ito, H. Lin, F. "Development of Pre-Tensioning Device for CFRP Strips and Applicability to Repair of Cracked Steel Members." *Advanced in Structural Engineering* **17**:12, 2014.
 19. 황경정·백경욱·오성하. “승용차용 CFRP 구조 적용에 대한 내구신뢰성 평가 예측기술.” 『대한기계학회 춘추학술대회』 **2016**:408-219, 2016.
 20. C. H. Chiu, K. H. Tsai, W. J. Huang. "Effects of Braiding Parameters on Energy Absorption Capability of Triaxially Braided Composite Tubes." *J. Composite Materials* **32**:1964-1983, 1998.
 21. Vistasp M. Karbhari. "Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes." *J. Composite Materials* **31**:1164-1186, 1997.
 22. Jack R. Vinson. *The Behavior of Shells Composed of Isotropic and Composite Materials*: Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-2113-8, 1993.
 23. 원종진·이종선·홍석주. “탄소섬유 복합적층원통셸의 거동해석.” 『한국자동차

- 공학회 추계학술대회 논문집』 1998.
24. 김선규·심재기·양인영. “충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구.” 『한국자동차공학회 논문집』 **3**:74-81, 1995.
 25. 김정호·양인영. “충돌 시 최적 흡수에너지특성을 갖는 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 개발.” 『대한기계학회 논문집』 **22**:1316-1325, 1998.
 26. 이상관·김병선. “섬유강화 복합재료와 자동차.” 『자동차공학회지』 **18**:196-120, 1996.
 27. 차천석. "박육단면 차체구조부재의 충격압력 특성평가." 조선대학교 박사논문, 2000.
 28. 이길성. "충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가" 조선대학교 박사논문, 2008.
 29. 서현경. "경량화용 Al/CFRP 혼성부재의 충격압력특성" 조선대학교 석사논문, 2009.
 30. 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.
 31. Ohkubo Y, Akamatsu T. and Shirasawa K.. "Mean Crushing strength of closed-hat section members." Society of Automotive Engineers paper No. 740040, 1974.
 32. Aya N. and Takahashi K.. "Energy absorption characteristics of vehicle body structure." *Japan Society of Automotive Engineers Bulletin* **7**:65-74, 1976.
 33. 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.
 34. 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.
35. 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.
 36. 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.
 37. 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.
 38. 김기풍·송정환·허훈·김현섭·홍석길. "성형 효과를 고려한 차체 구조 부재의 충돌 특성." 『한국정밀공학회논문집』 **12**:91–98, 2004.
 39. G. L. Farley, R. M. Jones. "Energy–Absorption Capability of Composite Tubes and Beams." NASA TM 101634, 1989.
 40. G. L. Farley. "The Effects of Crushing Speed on the Energy–Absorption Capability of Composite Tubes." *Journal of Composite Materials* .pp.1314–1329, 1991.
 41. G. L. Farley, R. M. Jones. "Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy–Absorption Capability of Composite Tubes." *Journal of Composite Materials*, pp.78–89, 1992.
 42. 심재기·양인영·오택열. "충격하중을 받는 CFRP 적층판의 충격손상과 굽힘 잔류강도." 『대한기계학회집』 pp.2752–2761, 1991.
 43. 최익현·홍창선. "복합적층판의 저속충격실험 및 거동에 대한 실험적 연구." 『대한기계학회논문집』 pp.359–371, 1994.
 44. Hwang, B.. *Damage Initiation During Low–Velocity Impact on Composite Laminates*, Ph.D. Thesis Dept. of Mechanical Engineering: U. of Dayton, Ohio, May 1994.

45. Zhoua, G.. "compressive behaviour of large undamaged and damaged thick laminated panels." *Composite Structures* pp. Issues 1-4, 589-597, 1997.
46. Li, S. and Reid, S. R.. "Relationship Between the Elastic Bucking of Square Tubes and Rectangular Plates." *International Journal of Applied Mechanics* **57**:969-973, 1990.
47. Avalle, M. and Belingardi, G.. "Experimental evaluation of the strain field history during plastic progressive folding of aluminum circular tubes." *Int. J. Mech. Sci.* **39**:575-583, 1997.
48. 양용준·차천석·양인영. "고온·고습 환경 하에서의 계면수 변화에 따른 CFRP 모자형 단면 부재의 압축특성." 『한국공작기계학회지』 **18**:241-247, 2009.
49. 여인구·최주호·양인영. "적층각 및 형상 변화에 따른 CFRP 구조부재의 동적 특성." 『한국생산제조시스템학회』 **22**:3:388~393, 2013.
50. 여인구·최주호·최영민·양용준·황우채·양인영 "적층구성과 충돌에너지의 변화에 따른 CFRP 구조부재의 충격특성." 『한국생산제조시스템학회』 **22**:6:976~981, 2013.
51. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압축특성." 조선대학교 박사논문, 2002.
52. G. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes." *Journal of Composite Materials* 26:37-50,1992.
53. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes." *Journal of Composite Materials* 26:78-80,1992.
54. G. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of composite Tubes with "Near-Elliptical" Cross Sections." *Journal of Composite Materials* 26:1741-1751,1992.
55. G. L. Farley, R.M. Jones."Prediction of Energy-Absorption

- Capability Composite Tubes ."Journal of Composite Materials 26:388-404,1991.
56. H. Hamada, S .Ramakrishna, M. Nakamura, Z. Maekawa, T. Nishiwaki. "Energy-Absorption Characteristics of Composite Tubes with Different Coss-Sectional Shapes. "Proceeding of the 10th Annual ASM/ESD Advanced Composites Conference:523-534, 1994.
57. N. K. Gupta, R. Velmurugan."Consideration of Internal Folding and Non-symmetry in Axi-symmetric Axial Compression of Round Tubes."Int. J. of Solid and Structures, 1996.
58. N. K. Gupta, R. Velmurugan, S. K. Gupta."An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes."Journal of Composite Materials 31: 1262 -1286,1997.