



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](#)

2017년 2월
석사학위논문

고온고습 환경하에서 차량용 CFRP 구조부재의 충격강도평가

조선대학교 산업기술융합 대학원

융합자동차공학과

박 수 철

고온고습 환경하에서 차량용 CFRP 구조부재의 충격강도평가

Impact Strength Evaluation of CFRP Hat Shaped Sectional
Members for Vehicle Materials under the Hygrothermal

2017 년 2 월 25 일

조선대학교 산업기술융합 대학원

융합자동차공학과

박 수 철

고온고습 환경하에서 차량용 CFRP 구조부재의 충격강도평가

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2016 년 10 월

조 선 대 학 교 산 업 기 술 용 합 대 학 원

용 합 자 동 차 공 학 과

박 수 철

박수철의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 박 설 현 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 지 훈 ㉠

위 원 조선대학교 교수 양 인 영 ㉠

2016 년 11 월

조 선 대 학 교 산 업 기 술 융 합 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES	i
LIST OF FIGURES	ii
LIST OF PHOTOGRAPHS	v
ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 연구방법	5
제 2 장 압괴이론	7
제 1 절 복합 박육부재의 압괴모드	7
제 2 절 복합 박육부재의 압괴이론	13
제 3 장 실험방법	18
제 1 절 시험편	18
제 2 절 열습실험	23
제 3 절 충격실험장치	25
제 4 절 충격압괴실험	27
제 4 장 실험결과	28
제 1 절 CFRP 박육부재의 흡습거동	28
제 2 절 CFRP 박육부재의 축압괴실험 결과	31
2-1. 무흡습 CFRP 박육부재의 정적/충격압괴 특성	31
2-2. 흡습 CFRP 박육부재의 충격압괴 특성	41

제 5 장 실험 결과 및 고찰	46
제 1 절 CFRP 박육부재의 정적/충격 압괴강도	46
제 2 절 흡습/무흡습 CFRP 박육부재의 압괴모드	51
제 6 장 결 론	57
참 고 문 헌	59

LIST OF TABLES

Table 1	Characteristics and use of the CFRP	2
Table 2	Material properties of the CFRP prepreg sheet	18
Table 3	Types of CFRP hat-shaped sectional members.....	19
Table 4	Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members (s tacking angles).....	29

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Composite structures for the Airbus A320	3
Fig. 2 The goal of automobile technology development	4
Fig. 3 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes	8
Fig. 4 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode	9
Fig. 5 Sketch of crack propagation modes	9
Fig. 6 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode	10
Fig. 7 Friction related energy-absorption mechanisms	11
Fig. 8 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode	12
Fig. 9 Crushing characteristics of local buckling crushing mode	12
Fig. 10 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load	15
Fig. 11 Configuration of CFRP single hat shaped member	20
Fig. 12 Stacking conditions of CFRP single hat shaped member	21
Fig. 13 Curing cycle of CFRP stacking specimen	22
Fig. 14 Impact testing setup for crushing	26
Fig. 15 Diagram of measurement system	27
Fig. 16 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles)	28
Fig. 17 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for variation of stacking angles	29
Fig. 18 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ (Static)	31
Fig. 19 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$ (Static)	32

Fig. 20 Collapse processing and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ]_8$ (Static)	33
Fig. 21 Collapse processing and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0^\circ/90^\circ]_4$ (Static)	34
Fig. 22 Collapse processing and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ/0^\circ]_4$ (Static)	35
Fig. 23 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ (Dry specimen, Impact)	36
Fig. 24 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$ (Dry specimen, Impact)	37
Fig. 25 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ]_8$ (Dry specimen, Impact)	38
Fig. 26 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0^\circ/90^\circ]_4$ (Dry specimen, Impact)	39
Fig. 27 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ/0^\circ]_4$ (Dry specimen, Impact)	40
Fig. 28 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ (wet specimen, Impact)	41
Fig. 29 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$ (wet specimen, Impact)	42
Fig. 30 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ]_8$ (wet specimen, Impact)	43
Fig. 31 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0^\circ/90^\circ]_4$ (wet specimen, Impact)	44
Fig. 32 Collapse shape and Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ/0^\circ]_4$ (wet specimen, Impact)	45
Fig. 33 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (static experiment)	46
Fig. 34 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (impact experiment)	47
Fig. 35 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (static experiment)	48
Fig. 36 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (impact experiment)	48
Fig. 37 Relationship between absorbed energy and variation	

	stacking angles (static experiment)	49
Fig. 38	Relationship between absorbed energy and variation	
	stacking angles (impact experiment)	49
Fig. 39	Relationship between collapsed length and variation	
	stacking angles (impact experiment)	50

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1	The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section	13
Photo. 2	Autoclave	22
Photo. 3	Hot waterbath	25
Photo. 4	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members	52
Photo. 5	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (wet specimen)	54
Photo. 6	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members $[+15^{\circ}/-15^{\circ}]_4$	55
Photo. 7	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_4$	55
Photo. 8	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members $[90^{\circ}]_8$	56
Photo. 9	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members $[0^{\circ}/90^{\circ}]_4$	56
Photo. 10	Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$	56

ABSTRACT

Impact Strength Evaluation of CFRP Hat Shaped Sectional Members for Vehicle Materials under the Hygrothermal

Park, Soo-Chul

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

Dept. of Automotive Engineering

Graduate School of Industrial Technology

The recent trend in vehicle design is aimed at improving the aims at environment- friendliness and collision safety requirements of the vehicles. For the former, the trend is toward light-weight off vehicles to improve fuel efficiency and reduce tail gas emission due to the heavier restriction on exhaust levels. For the latter, however, the trend is toward higher safety performance, comfort level, high-efficiency and multi-functional programs which all increase the weight demands. Therefore, the light weight of vehicle must be achieved in a status of securing safety of collision.

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.

However, CFRP composite materials have the weakness in hygrothermal environment and shock resistance. Especially, moisture ingress into composite material under hygrothermal environment can change molecule arrangement and chemical properties.

The purpose of this study is to evaluate of the crashworthiness for

lightweight impact energy absorbing vehicle members under hygrothermal environment .

Following the above study, conclusions are drawn as below;

1. It is found that the moisture absorption characteristics depend on the stacking sequences in the CFRP hat structural members. For the hygrothermals in CFRP hat structural materials, at approximately 0.45~0.55% of moisture absorption rate, the most absorption rate appears at the beginning time.
2. Through testing both moisturized-absorption sample and non-moisturized sample, at initial collapsing time, the decreasing phenomena appears because of the ductile characteristics of moisture ingress in the brittle CFRP composite materials; however, stable collapsing phenomena, i.e. the characteristics of bending made the mean loading and absorbed energy higher.
3. When 15⁰ of CFRP prepreg orientation angle, there are interlaminar cracks, intralaminar cracks and central cracks. In the case of 15⁰ orientation angle, Maximum impact collapse load is increased more than 50% others orientation angles through performing of both static and impact collapsing testing.
4. Collapsing properties of CFRP hat-shaped members with 15 degree stacking shows the progress of collapsing along with fiber direction for “ㄷ” shaped member due to brittle fracture with transverse shear and laminar bending. For the members with 45 degree stacking, the similar collapsing mode for 15 degree stacking is achieved. Members with 90 degree stacking is collapsed in crush mode due to basal fracture in transverse direction for “ㄷ” shaped member and flange under hygrothermal environment.

제 1 장 서 론

제 1 절. 연구배경

탄소섬유강화복합재는(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP 라 한다.) 비강성(탄성계수/밀도), 비강도(인장강도/밀도) 및 역학적 특성이 우수하여 항공우주기 등 우주구조물, 자동차 산업, 스포츠 레저 분야등 각종 산업분야에 널리 이용이 확대되고 있다.

그러나 CFRP는 정적 강도특성은 아주 우수하나 충격손상에 취약하다는 것이 지적되어^{1~2)} 이에 대한 대책이 중요한 문제가 되고 있다.

특히, 최근 제주항공기의 이륙시 발생한 Bird strike에서 알 수 있듯이 CFRP는 항공기용으로 사용되는 경우 새와의 충돌, 이착륙시의 작은 파편등 여러재질의 충돌에 의해서 이물충격손상(FOD : foreign object damage)을 피할 수가 없어³⁾ 이에 대한 문제점이 명확히 해결되어야 한다.

CFRP의 일반적인 특성 및 용도를 Table 1에 나타냈으며 Fig. 1에 Airbus A320에 사용되는 Graphite, Carbon, Glass의 적용 실례를 나타냈다.

또한, 최근에는 전 세계적으로 환경오염, 중국발 미세먼지의 확산, 화석연료의 과다 사용에 의한 대기오염 등 환경보호 차원에서 친환경 자동차 및 경량화 자동차의 연구개발에 박차를 가하고 있으며 실용화에 대해 적극적인 연구개발이 요구되고 있으며 연비향상을 위한 자동차의 경량화 방안이 중요한 과제이다.

연비향상을 위한 자동차의 경량화 방안으로는 차체 및 자동차 부품에 기존의 소재를 고장력강판, 알루미늄, 플라스틱 등으로 대체를 고려할 수 있고 안정성 향상의 방안으로는 차량내의 구조강화, 내 충격 에너지흡수 구조재료의 대체 등으로 요약할 수 있다.^{4~6)}

또한, 최근에는 국내에서 교통사고에 의해 연간 1만명 내외의 사망자가 발생하여 큰 사회적 문제로 대두 되고 있으며, OECD 국가 중 교통사고에 의한 사망율이 최고라는 불명예를 갖게 되었다.

자동차의 설계개발이란 승차감, 조정 안정성, 정속성, 쾌적성 등의 요건을 만족하면서 법규로 정해진 규격에 적합하도록 종합성능을 실현하는데 있다. 이러한 성능 중 충돌시에 승객을 보호하는 능력을 충돌안전성능이라 하는데 충돌조건, 차량구조, 승객 구속장

Table 1 Characteristics and use of the CFRP

분 류	특 성	사 용 범 위
CFRP	비강성 비탄성	항공기(1차, 2차부재), 우주기기(태양열발전설비), 미사일, 로켓, 인공위성, 자동차, 고속차량, 경주용차, 오토바이, 보트, 자전거, 섬유기계, 스포츠용품, 낚싯대, 등산용구, 카메라, 원심분리기, 플라이휠, 그라인더 휠, 타이어, 벨트, 회전 프로펠러, 제지기 로울러 등
	비강성 감쇠성	오디오 기기, 악기, 공작기계, 진동 컨베어 스프링, 자동차(drive shaft, leaf spring) 등
	강성 비크리프성	FRP배, 탱크, 저장고(싸이로) 등
	강성 비열팽창	우주기기 안테나, 밀리파 안테나, 마이크로메타, 타이밍 벨트, 저온 탱크, 제도기기 등
	x선 투과성 강도, 강성	X선 카세트, X 선의료기기 등
	전기전도성 발열	약품 탱크, 대전방지 로울러, 정전도장 벽직류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패키징, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로켓 노즐, 항공기 엔진 등

치 등의 요건으로 결정된다.

특히, 자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 70% 정도로서 측면이나 후면으로 부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다.^{7~9)}

또한, 최근 국제적으로 승용차의 구조경량화에 대한 요구가 급증하여 하이브리드자동차, 친환경 그린자동차, 전기 자동차등의 개발에 국가의 역량을 집중하고 있는 실정이다. 환경 및 에너지절감 차원에서 심각한 환경오염과 에너지절감을 통해 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 강화하고 있는 실정이며 저공해 자동차 배기 규제를 더욱 강화하고 있다.

이를 위한 방법으로 엔진효율향상, 공기저항 감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 소재의 경량화 등을 들 수 있으나, 특히 소재의 경량화는 연료효율을 높임과 동시에 자동차의 성능향상을 극대화시킬 수 있어서 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다.^{10~12)}

경량화 자동차 차체 설계법으로는 자동차 충돌시 외부로부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 승객의

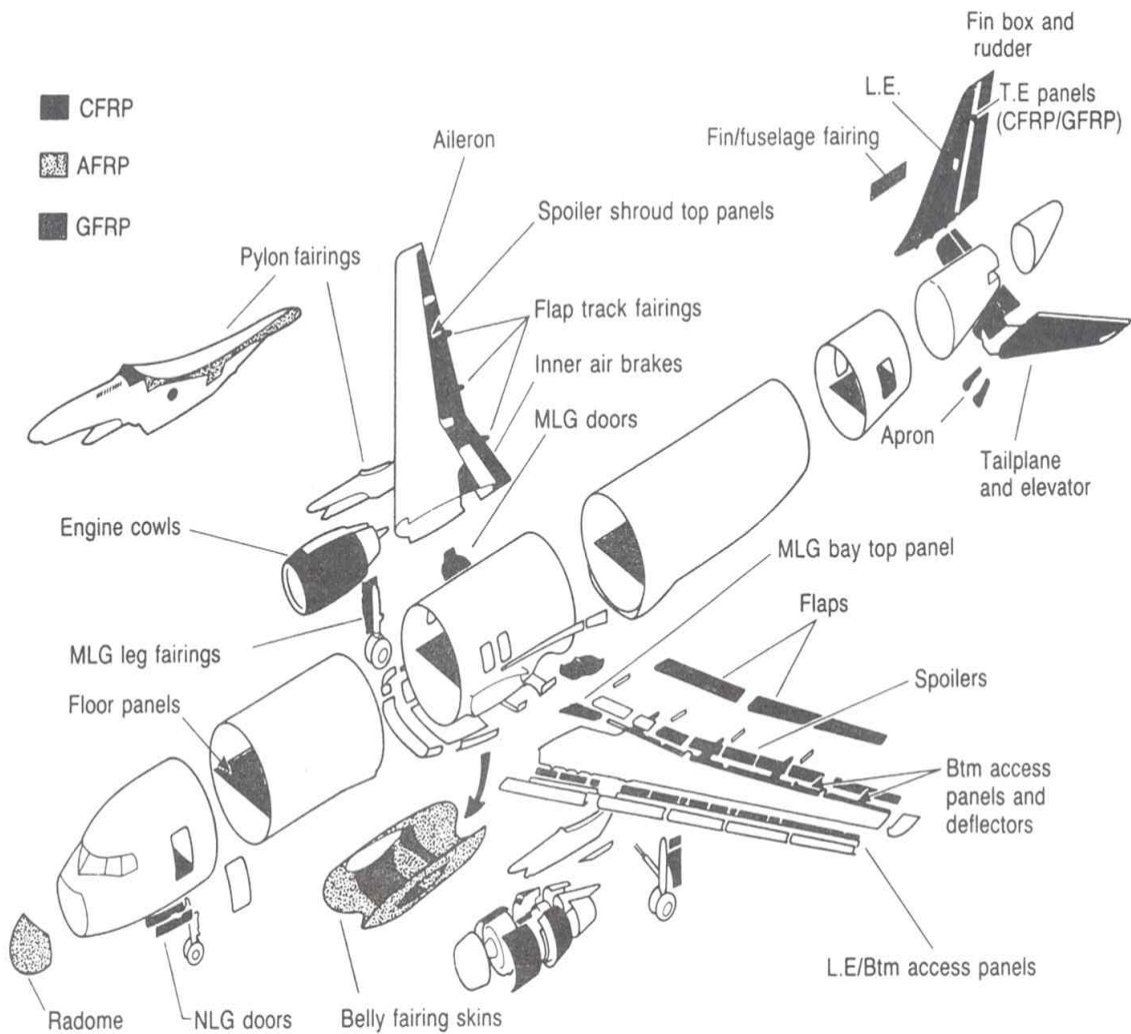


Fig. 1 Composite structures for the Airbus A320

안전 보호 공간의 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 최종적으로 승객 상해정도와 직결되는 최대가속도 크기를 최소화시킬 수 있는 안정된 축방향 접힘좌굴 모드를 유도하려는 설계의 개념이 차체 구조부재 설계에 이용되고 있다.^{13~14)}

이러한 역할을 하는 것이 프런트 사이드 멤버로서 정면충돌시 충돌에너지의 50~70%를 흡수하며 단면형상은 약 0.8~1.2mm의 모자형 또는 박판 사각 및 원형 빔 형상을 가지고 있다.

이상으로 부터, 자동차의 경량화 문제도 차량 설계시 승객의 안전성이 확보된 상태에

서 차량의 무게를 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 함을 알 수 있다.

특히, 차량의 초기설계 단계에서는 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압력 거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

Fig. 2에 최근의 자동차 기술개발의 목표를 나타냈다.

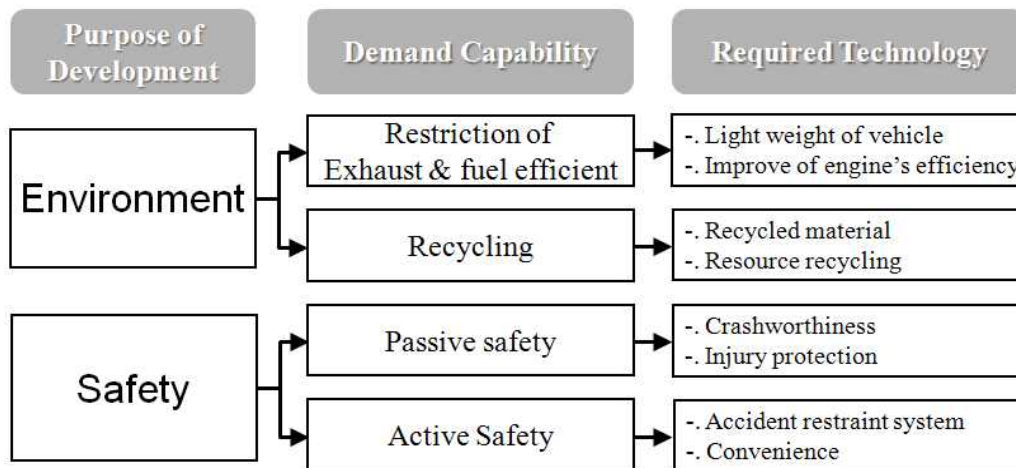


Fig. 2 The goal of automobile technology development

이상과 같은 자동차 사고시 승객의 안전을 보호하고 연비개선을 위한 경량화 차체설계법 이외에도 CFRP재의 단점중의 하나인 고온고습 상태에서 취약한 문제점을 해결해야 한다.

CFRP 구조부재는 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위 환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 열습과 같은 상황에서 수분이 복합재 내부로 침투함으로써 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질을 저하시킴으로써 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있으며^{15~17)}, 고온과 습기가 작용 하는 열습 환경과 충격하중을 받는 환경에서는 높은 역학적 특성을 기대하기가 매우 어렵게 되며, 더욱이 고온고습 상태에서 외부로부터 충격 손상을 받았을 경우는 CFRP 복합재는 모재크랙, 배면크랙 및 층간 박리가 발생함으로써 잔류강도가 크게 저하하게 된다.¹⁸⁾

따라서 고온고습 환경하에서 외부에서의 충격하중을 받았을 경우 CFRP 복합 구조재에 대한 강도저하에 따른 보완방법 등의 연구가 절실히 필요하며, CFRP구조부재를 최적 충격 특성을 갖는 친환경 자동차의 경량화 구조부재로 사용할 것을 상정한 연구가 절대적으로 필요하게 된다.

제 2 절. 연구목적 및 연구방법

CFRP 는 비강성, 비강도 및 역학적 특성이 우수하여 항공우주기기등 우주구조물, 자동차 산업, 스포츠 레저분야 등 각종 산업분야에 널리 이용이 확대되고 있다. 그러나 CFRP는 정적 강도특성은 아주 우수하나 충격손상에 취약하다는 것이 지적되어 이에 대한 책이 중요한 문제가 되고 있다.

또한, CFRP재는 고온과 습기가 작용하는 열습 환경에서 충격하중을 받는 경우에는 높은 역학적 특성을 기대하기가 매우 어렵게 되며, 더욱이 고온고습 상태에서 외부로부터 충격 손상을 받았을 경우는 CFRP 복합재는 모재크랙, 배면크랙 및 층간 박리가 발생함으로써 잔류강도가 크게 저하하게 된다.

또한, 고온고습 상태에서 외부로부터 충격 손상을 받았을 경우 차량의 초기설계 단계에서는 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압케거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

따라서, 본 연구에서는 경량화용 자동차 구조부재로 사용되는 CFRP 복합재 구조부재가 고온고습 상태에서 외부로부터 충격 손상을 받았을 경우를 상정하여 자동차 충돌시 승객의 안전을 보호할 공간 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 충돌시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 최적의 충격특성을 갖는 구조부재를 개발하여야 한다.

본 연구에서는 모자형 단면의 형상을 갖는 CFRP 구조부재를 경량화 차체구조부재로 상용화 할 것을 상정하여, 고온고습상태에서 모자형 단면형상의 CFRP 구조부재가 충돌이 가해질 경우의 충격 축압특성 및 압케 모드에 관해 정량적으로 고찰함으로써 최적의 경량화용 자동차 구조부재를 개발하는데 적용 가능한 설계데이터를 얻고자 한다. 특히, 충격 축압특성이 우수한 적층배향각을 찾기위한 정량적인 설계 데이터를 얻고자 한다.

연구방법으로는 CFRP 복합재가 고온 고습상태에서 충격하중을 받을 것으로 설정하여 고온 고습상태에서 충격 압케실험을 행하여 CFRP 복합재의 흡습 유무 및 적층각 변화에 따른 내충격특성 및 축 압축강도 저하 현상을 평가하였다.

제 1 장에서는

본 연구와 관련된 경량화 자동차, 우주항공분야등의 국제적인 연구동향, 고온 고습상태

에서 충격하중은 CFRP 복합재의 연구동향, 본 연구에서의 연구 목적 및 연구방법에 관하여 기술하였다.

제 2 장에서는

CFRP 복합재 박육부재에 충격하중이 작용할 경우 발생하는 압괴형상인 횡방향전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드 및 취성과괴 압괴모드와 국부좌굴 압괴모드의 조합등을 알 수 있도록 압괴모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하고, 각 압괴모드의 조합으로 발생하는 복합재 박육부재의 최대하중, 평균하중 및 평균 압괴응력을 수식할 수 있는 기존의 압괴이론을 서술하였다.

제 3 장에서는

모자형 단면 형상을 갖는 CFRP시험편의 축압축 충격하중에 가장 에너지를 많이 흡수할 수 있는 최적의 적층각, 오토클레이브법에 의한 진공성형법, 고온고습 상태에서의 모자형 CFRP시험편의 각도 변화에 따른 흡습특성 실험 및 충격시험장치, 충격 압괴실험 방법을 기술하였고,

제 4 장에서는

적층각도 변화에 따른 모자형 단면 형상을 갖는 CFRP시험편의 고온 고습상태에서의 흡습거동, 흡습/무흡습 CFRP 박육부재의 충격 압괴특성 실험결과에 관해 기술하였다.

제 5 장에서는

모자형 단면형상의 CFRP 구조부재의 적층각도 변화와 고온 고습상태에서 충돌이 가해질 경우의 축압괴특성 및 압괴 모드에 관해 정량적으로 고찰하였고,

제 5 장에서는 본 연구의 결과를 나타냈다.

본 연구에서 실험적으로 설정한 가혹한 환경으로는

고온과 수분이 작용하는 열습 환경상태를 유지하기 위해 항온항습기를 사용하여 온도와 습기가 오랜 시간 유지가 되는 열습실험을 실시하였고, 흡습된 후의 적층각이 다른 CFRP 모자형 단면부재를 대상으로 충격 압괴실험을 실시하였다.

열습실험은 항온수조 내부의 온도를 CFRP 복합재의 매트릭스 변화가 가장 적으며 실제 차량의 구조부재로 사용할 것을 가정하여 차량의 엔진룸 내부의 고온 환경으로 평가될 수 있는 60℃로 설정하였고, 온도와 수분이 항상 일정하게 유지가 되도록 하였다.

제 2 장 압괴이론

제 2장에서는 CFRP 복합재 박육부재의 압괴특성(평균압괴하중, 평균압괴응력, 흡수 에너지 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 압괴 모드의 이해와, 모드해석을 이용한 이론해석을 다룸으로써 복합재 박육부재의 정량적인 이론해석을 위한 기본적인 데이터를 얻고자하며, 기존의 연구결과¹³⁾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 취성과괴 압괴모드와 국부좌굴 압괴모드의 조합으로 나타난다.^{19~21)} 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(취성과괴)에 의해 층내/층간 크랙의 길이, 라미나 묽음 파괴 및 압괴모드가 결정된다. 또한 모든 복합재 박육부재가 점진적으로 압괴 되는 것은 아니며, 박육부재가 점진적으로 압괴 되는지의 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 압괴모드는 Fig. 4와 같이 일부분의 라미나 묽음으로 형성된 종방향 크랙과 하나 또는 다중의 짧은 층간 크랙에 의존하며, 박육부재의 압괴 면은 하중이 박육부재의 표면을 따라 일정치 않게 전파되는 것과 같은 부채꼴 모양의 형태를 갖는다. 횡방향전단 압괴모드의 주요 에너지 흡수메카니즘은 Fig. 4와 같이 라미나 묽음의 파괴이며 크랙의 수, 위치, 길이는 시험편의 구조형상과 성분 재료특성의 함수이다. 층

간크랙 성장과 라미나 묶음파괴는 횡방향전단 압괴모드의 압괴과정을 제어한다. 층간크랙 성장은 기지의 역학적 특성, 라미네이트의 섬유배향각과 원주방향으로 적층된 섬유의 파손변형률 및 인장강성에 의해 제어된다. 층간크랙은 Fig. 5에 나타낸 것 같이 Mode I(opening) 또는 Mode II(forward shear)로 성장하게 되고 이때 크랙성장의 능력은 크랙이 성장하기까지 기지의 파괴인성과 라미나 묶음의 배향각의 함수로 나타낼 수 있다. 원주방향으로 적층된 섬유(축 방향의 90° 로 적층된 섬유)는 층간 크랙성장에 주요한 영향을 미친다. 원주방향으로 적층된 섬유의 강성과 파손변형률은 라미나 묶음에 존재하는 굽힘에 영향을 미친다. 원주방향으로 적층된 섬유의 강성과 파손변형률이 높을수록 층간 크랙은 줄어든다. 라미나 묶음의 파괴는 횡방향전단 압괴모드가 존재하는 박육부재의 압괴과정의 에너지 흡수에 많은 기여를 한다. 라미나 묶음은 횡방향 굽힘 모멘트를 발생시키며, 라미나 묶음의 파괴는 라미나 묶음의 인장면에 대한 응력이 재료의 강도를 초과할 때 발생한다.

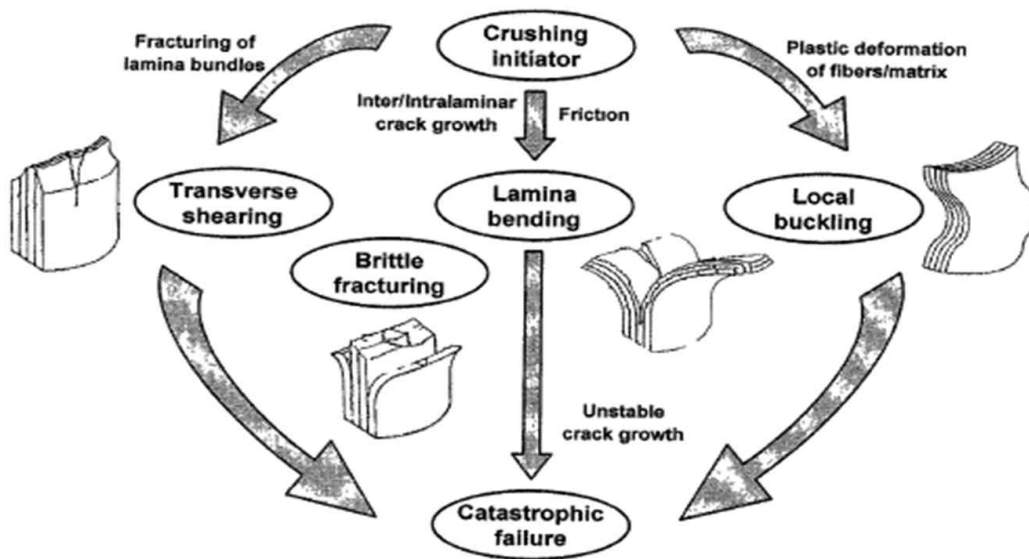


Fig. 3 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes²²⁾

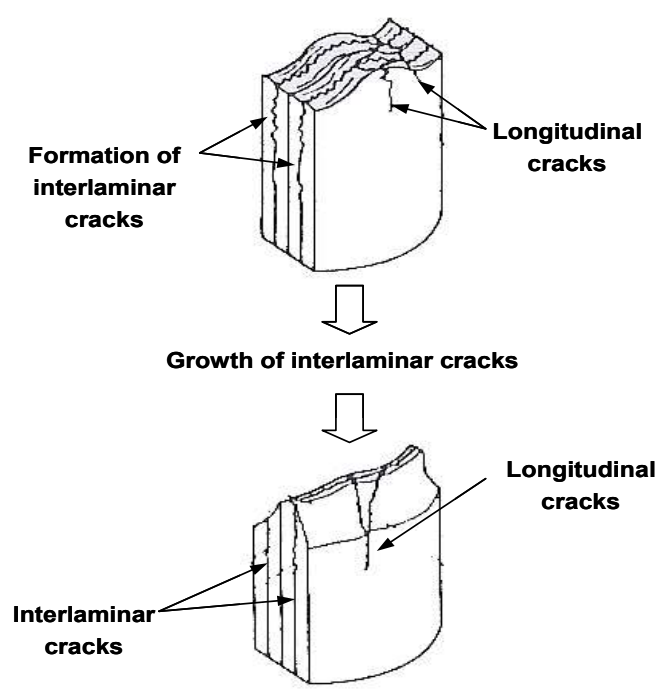


Fig. 4 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode

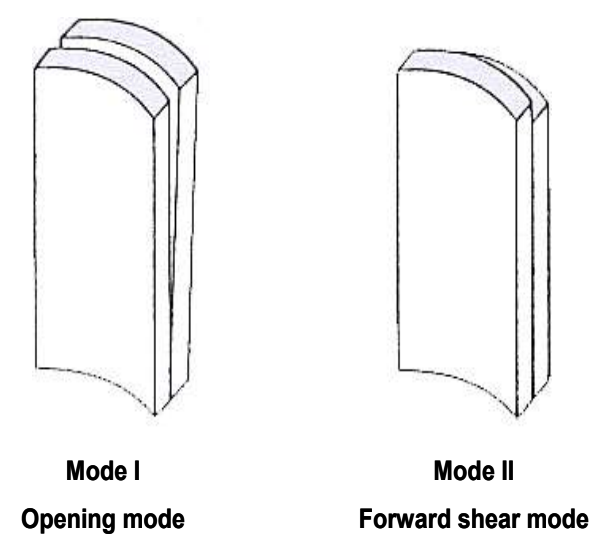


Fig. 5 Sketch of crack propagation modes

둘째, 라미나 굽힘 압축모드는 Fig. 6과 같이 매우 긴 층간크랙 및 층내크랙과 섬유와 평행한 크랙이 나타나지만 라미나 묶임은 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.

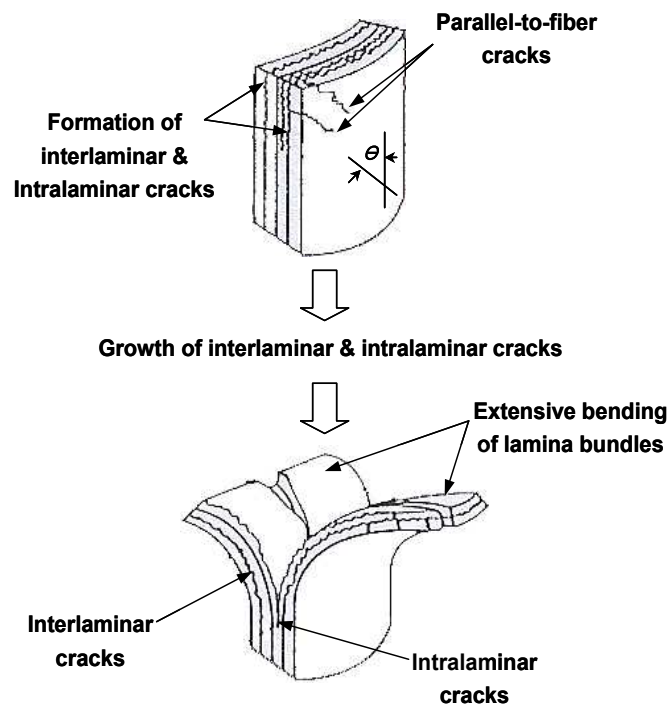


Fig. 6 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode

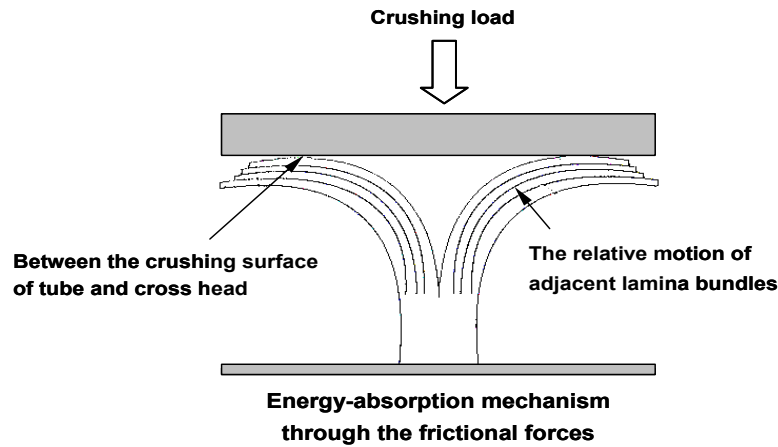


Fig. 7 Friction related energy-absorption mechanisms

셋째, 취성파괴 압재모드는 횡방향전단과 라미나 굽힘 압재모드의 조합이며, 취성섬유 강화 복합재 박육부재의 보고된 압재결과의 대부분은 취성파괴 압재모드이다. Fig. 8과 같은 취성파괴 압재모드의 경우 라미나 묶음은 약간의 굽힘이 존재하고 파단에 가까우며, 라미나 묶음이 파단될 때 하중은 박육부재에 가해지고 크랙성장과 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복된다.

넷째, 취성 및 연성 섬유강화 복합재에 존재하는 국부좌굴 모드는 연성 금속에 존재하는 것과 유사하다. 이러한 압재모드는 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 압재된 후 손상되지 않은 부분이 존재하게 되며, 이는 섬유의 분리와 섬유 파손이 없는 기지의 소성변형에 의한 결과이고 섬유가 파단되지 않을 때 박육부재는 횡방향전단과 취성파괴 압재모드에 존재하는 재료의 점진적인 파손의 저항으로 인해 손상 없이 국부좌굴 형상으로 압재된다.

따라서 취성섬유 강화 복합재는 1) 층간 응력이 기지의 강도보다 작을 경우, 2) 기지가 섬유보다 더 높은 파손변형율을 가질 때, 3) 기지가 고 응력 하에서 소성변형을 할 경우에만 국부좌굴 압재모드를 나타낸다. 또한 섬유와 기지의 소성항복은 국부좌굴 압재모드의 압재과정을 제어한다. 국부좌굴 모드로 압재되는 연성 섬유강화 복합재료는 섬유와 지지 모두의 항복으로 나타나며, 취성 섬유강화 복합재료는 단지 기지의 항복만 있는 국부좌굴 모드로 압재된다.

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

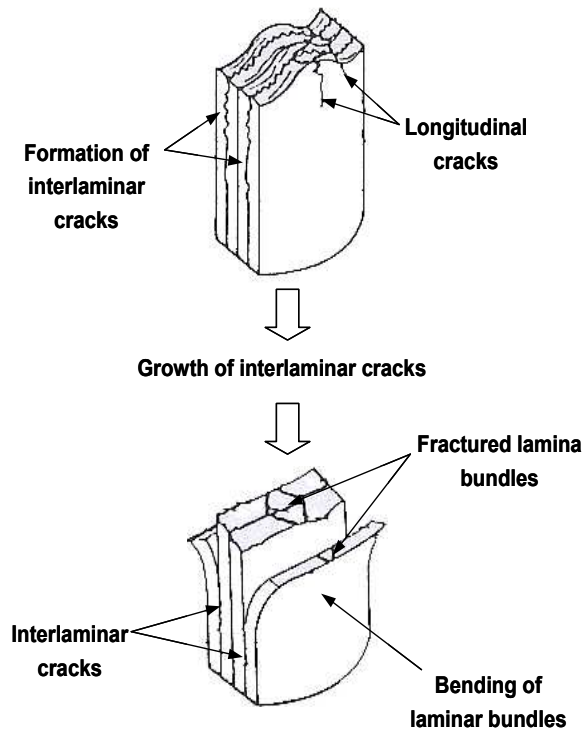


Fig. 8 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode

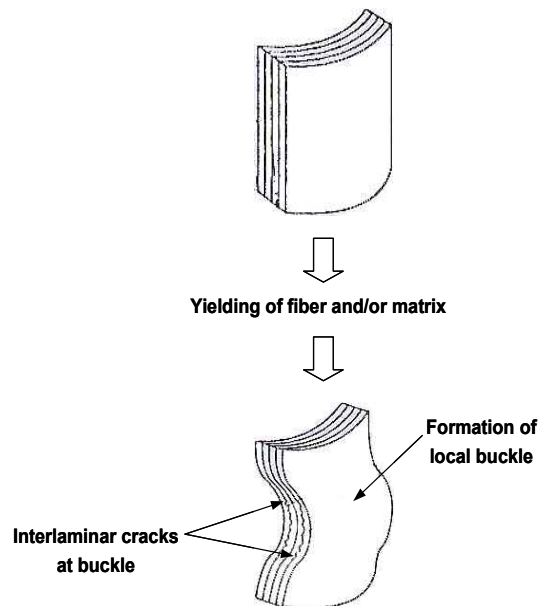


Fig. 9 Crushing characteristics of local buckling crushing mode

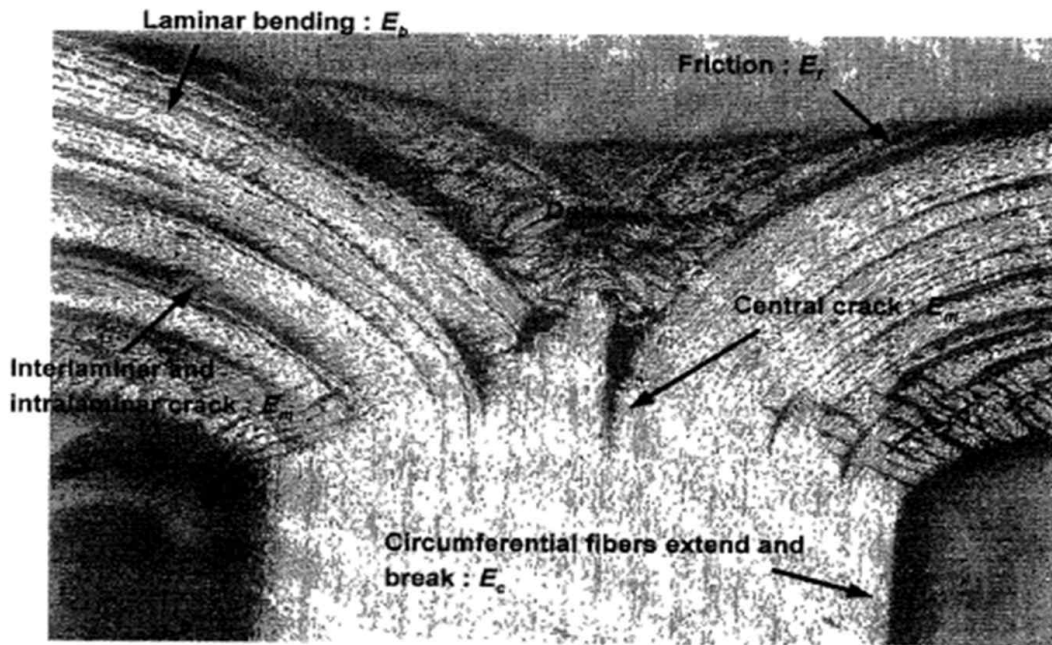


Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section²³⁾

제 2 절 복합 박육부재의 압괴이론

복합재 원통박육부재가 압괴될 때 에너지 흡수특성을 지배하는 인자는 Photo. 1과 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, Gupta²⁴⁻²⁵⁾의 기본적인 압괴이론 수식에 계면수 변화의 함수 $g(k)$ 를 보정함으로써 복합재 박육부재의 압괴이론 수식을 유도하고자 한다.

먼저 튜브에 가해지는 압괴 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 방향 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 압괴형상은 Fig. 10(a)와 같은 원통벽의 단면 중앙에 생긴 썩기형 크랙의 점진적인 진전과 함께 원통벽의 내측과 외측으로 확장하는 형상으로 압괴되어진다. 이러한 압괴모드는 라미나 묶음의 굽힘에 의한 에너지를 수반하며, 반지름(R)과 작용 모멘트(M) 및 썩기형 크랙의 축 경사각(θ)에 비례한다.

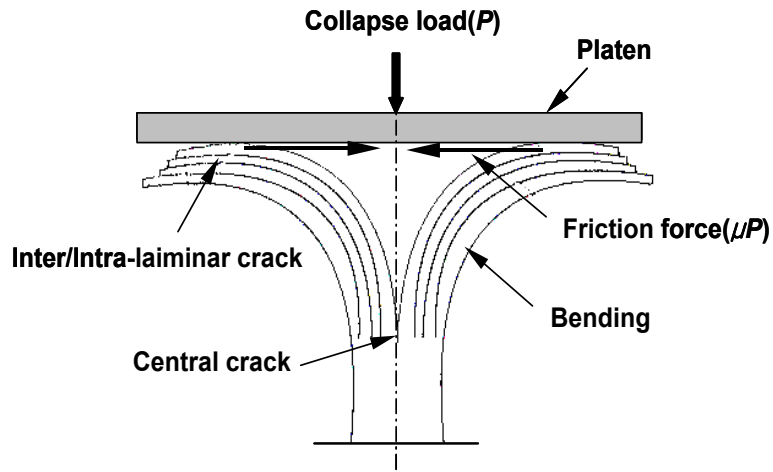
$$E_b = 4\pi R M \theta
 \tag{3}$$

라미네이트의 최대 굽힘 모멘트(M)는 다음과 같다.

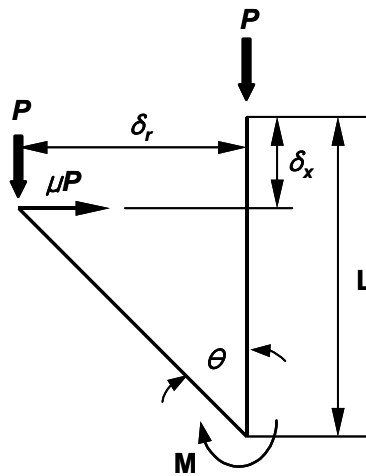
$$M = \frac{\left\{ f_y \left(\frac{t}{2} \right)^2 \right\}}{4}
 \tag{4}$$

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

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



(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

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

δ_r 의 변형량에 의한 후프 스트레인(hoop strain), $d\epsilon$ 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.

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

또한 총 흡수에너지는 평균압케하중과 압케된 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.

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

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 압제되며 그 결과 $\theta = \pi/2$, $l = \delta_r = \delta_x$ 가 된다.

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

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 대표적인 경량화 재료인 CFRP를 이용하여 사이드멤버의 기본 형상인 단일 모자형부재를 제작하여 시험편으로 사용하였으며, 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 필요로 하는 적층각도로 적층한 후 오토클레이브를 사용하여 성형하였다.

CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 2에 나타냈다.

단일 모자형 CFRP 부재는 알루미늄 사각부재에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며, 실재 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 "ㄷ"자 단면부재와 평판부재를 결합하여 제작하였다. 적층구성의 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압력모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다.

이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압력특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0° 로 하여 $[\theta_n / -\theta_n]$ 의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다.

Table 2 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]

Table 3은 본 연구에 사용된 시험편의 적층각 및 시험조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Types of CFRP hat-shaped sectional members

Specimens	Stacking conditions	Experiments conditions	
15°	[+15°/-15°] ₄	Wet / Dryt	Impact/ collapse
45°	[+45°/-45°] ₄		
90°	[90°] ₈		
90°/0°	[90°/0°] ₄		
0°/90°	[0°/90°] ₄		

여기서 적층각 θ 는 15°, 45°, 90°로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 적층수 n 을 7계면수에 맞추어 적층하여 제작한 후 고온고습 상태에서 흡습 실험 후 시험편이 무흡습/흡습상태에서 충격압력실험을 행하여 압력특성을 고찰하였다. 제작된 CFRP 단일 모자형 부재의 형상을 Fig. 11에 나타내었다. 또한, Fig. 12는 CFRP 단일 모자형 부재의 15°, 45°, 90°의 적층 조건에 대한 형상을 보여주고 있다.

본 연구에서는 한쪽 끝단에 Initiator 또는 고의의 결함을 주어 순차적이고 국부적인 압력을 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 하는데, 본 연구에서는 시험편의 하중이 작용하는 끝단을 45°로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다.

시험편의 성형은 Photo. 2와 같은 오토클레이브를 이용하여 챔버내부 들레에 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. 13은 시험편 제작시 성형 사이클을 나타냈다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압력이 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

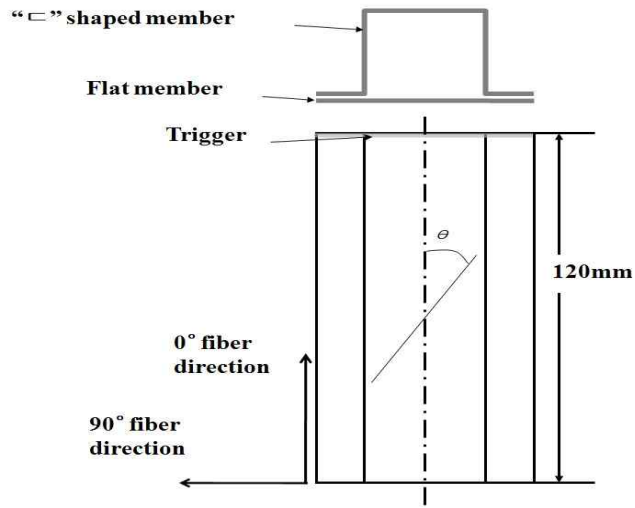
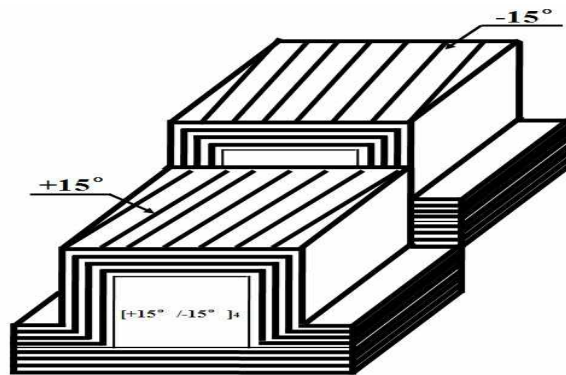
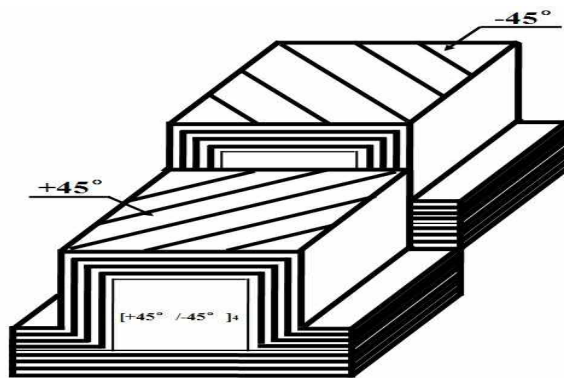


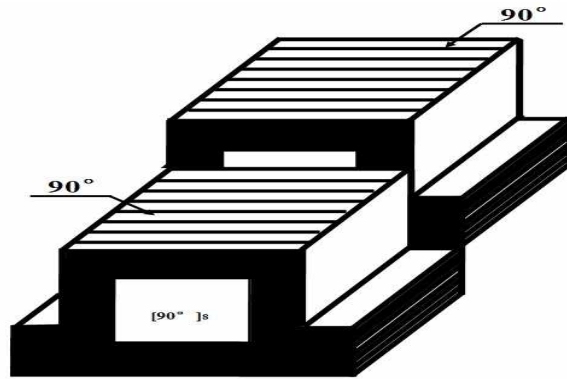
Fig. 11 Configuration of CFRP single hat shaped member



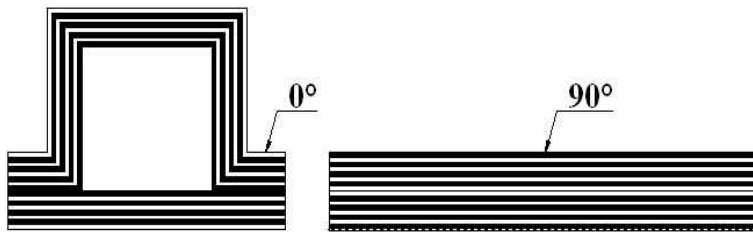
(a) 15°



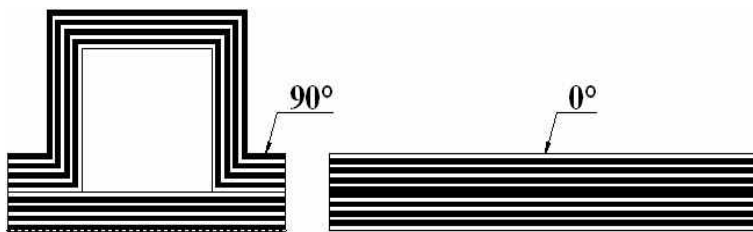
(b) 45°



(c) 90°



(d) $90^\circ/0^\circ$



(e) $0^\circ/90^\circ$

Fig. 12 Stacking conditions of CFRP single hat shaped member



Photo. 2 Autoclave

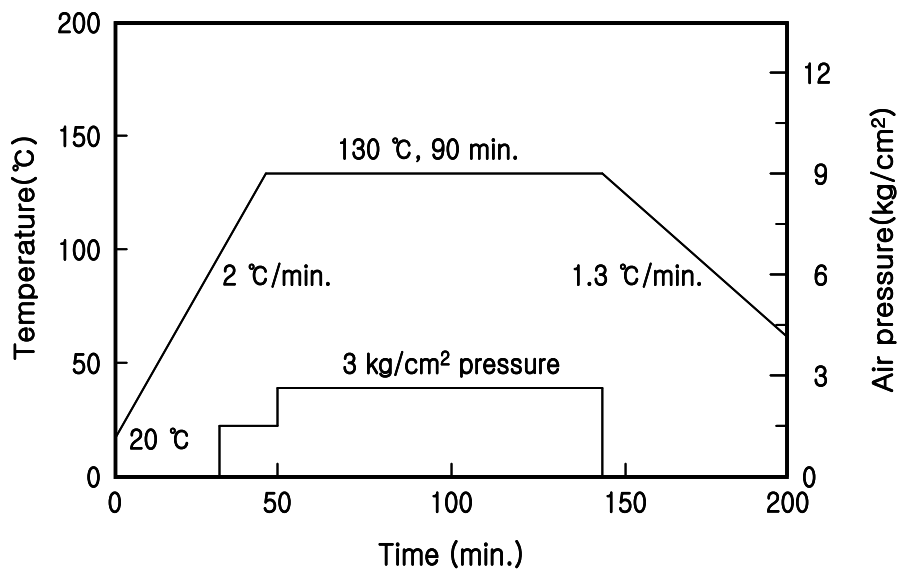


Fig. 13 Curing cycle of CFRP stacking specimen

제 2 절 열습실험

CFRP 복합재는 충격하중을 받거나 열습의 가혹한 환경하에서는 그 우수한 역학적 특성을 기대하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 설정된 가혹한 환경하에서 CFRP 복합재의 충격 강도특성을 비교 평가하였다.

본 연구에서 설정한 열습 환경은 Photo. 3의 항온항습기(Waterbath WNB 7-45)를 사용하여 장시간 일정한 온도와 수분이 유지가 될 수 있도록 하였다.

고온의 환경은 CFRP 모자형 단면부재의 제작 목적상 차량 엔진룸 내부의 온도로 평가될 수 있으면서 매트릭스의 변화가 적은 온도인 60°로 설정하였으며, 차량 사용 시 동반되는 수분의 영향을 평가하기 위해 항온항습기 내부를 증류수를 사용하여 권장 최고 수심까지 설정한 후 제작된 CFRP 모자형 단면부재를 각각 30개씩 시험편 지지대를 이용하여 장시간 잠기게 하였다.

흡습실험은 장시간 열습 환경에 노출 되었을 때 CFRP 복합재 내부의 수분 흡습거동을 파악하기 위하여 복합재 내부에 수분이 포화상태가 될 때까지 흡습률을 측정하였다.

흡습률 측정은 항온항습기에 침전시킨 시험편의 외부 물기를 완전히 제거한 후 1/10,000g까지 측정이 가능한 전자정밀저울을 사용하여 측정하였다.

흡습률에 사용한 식은 0°와 90°가 대칭하는 적층 복합재료 내의 시간에 따른 수분의 변화를 나타내는 다음 식으로 표현할 수 있다.¹⁸⁾

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (14)$$

여기서 M : 재료내의 수분농도

D_x, D_y, D_z : x, y, z 방향의 확산계수

t : 시간 (sec)

재료를 무한 판으로 가정하면 수분의 흡수는 재료의 두께 방향으로만 일어나므로 식 (14)는 다음 같이 된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (15)$$

식(15)의 경계조건은

$t = 0$ 이고 $0 < z < h$ 일때, $M = M_i$

$t > 0$ 이고 $z = 0, z = h$ 일 때, $M = M_\infty$ 이다.

여기서 h : 시험편의 두께

z : 시험편의 두께방향

시험편의 흡습률은 식(15)의 조건을 만족하는 1차원 문제로 가정할 수 있으며, 재료 내에 함유된 수분함량 G 는 식(15)를 재료 두께에 대하여 적분하면 얻을 수 있다. 즉,

$$G = \int_0^h M(z, t) dz \quad (16)$$

식(15)와 (16)을 풀어 정리하면

$$G = \frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp^{[-7.3(D_z \frac{t}{h^2})^{0.75}]} \quad (17)$$

여기서 M : 임의의 시간에서 재료내부의 수분 흡습률

M_∞ : 포화 흡습률

M_0 : 초기 흡습률

흡습률은 다음과 같은 결과식을 이용하였다.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (18)$$

여기서 M : 흡습률 (%)

W_d : 흡습전의 재료의 무게 (g)

W_m : 흡습후의 재료의 무게 (g)

CFRP 복합재 내부의 흡습거동을 파악하기 위한 흡습률 측정은 열습실험을 실시하기 전의 시험편 무게와 전자정밀저울로 측정된 흡습시험편의 무게와의 차를 백분율로 환산

하는 식(18)를 이용하여 측정하였다.



Photo. 3 Hot waterbath

제 3 절 충격실험장치

충격압력실험은 본 실험실에서 자체 설계 제작한 공기압 수직식 충격장치를 사용하였으며 공기압 가속장치를 부착한 장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 14에 나타냈으며, Fig. 15는 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 충격압력실험을 할 수 있도록 하였다. 또한, 로드셀은 2개의 원판을 원주로 연결한 형태로서 연강환봉을 절삭하여 제작하였으며, 위쪽 원판 위에 시험편을 위치시키고, 아래쪽 원판에 3개의 볼트구멍을 만들어 베이스 플레이트에 고정하였다. 시험편에 작용하는 충격하중의 계산은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 스트레인게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 중심축을 중심으로 각각 축 방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여 굽힘과 비틀림의 영향

을 제거하여 구하였으며, 스트레인게이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다. 충돌 시에 나타나는 스트레인게이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스과 동적변형증폭기(Dynamic strain amplifier)를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO(Digital Storage Oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다.

시험편의 압괴 시간변화 즉, 변위의 측정은 압괴가 진행하고 있는 사이 시험편의 변위량과 크로스헤드의 이동량이 일치한다고 보고 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식 변위계(Zimmer OHG사, 100F)로 비접촉 계측하여 변위 데이터를 구하였다. 광학식 변위계는 광학렌즈를 이용하여 렌즈 측정범위 내에 있는 표적의 백색부와 흑색부의 경계선(edge)의 이동량을 전압변화로 측정하는 것이며, 렌즈의 교환에 따라 측정범위를 달리할 수 있다. 여기서는 초점거리가 1080mm이며 최대 100mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다.

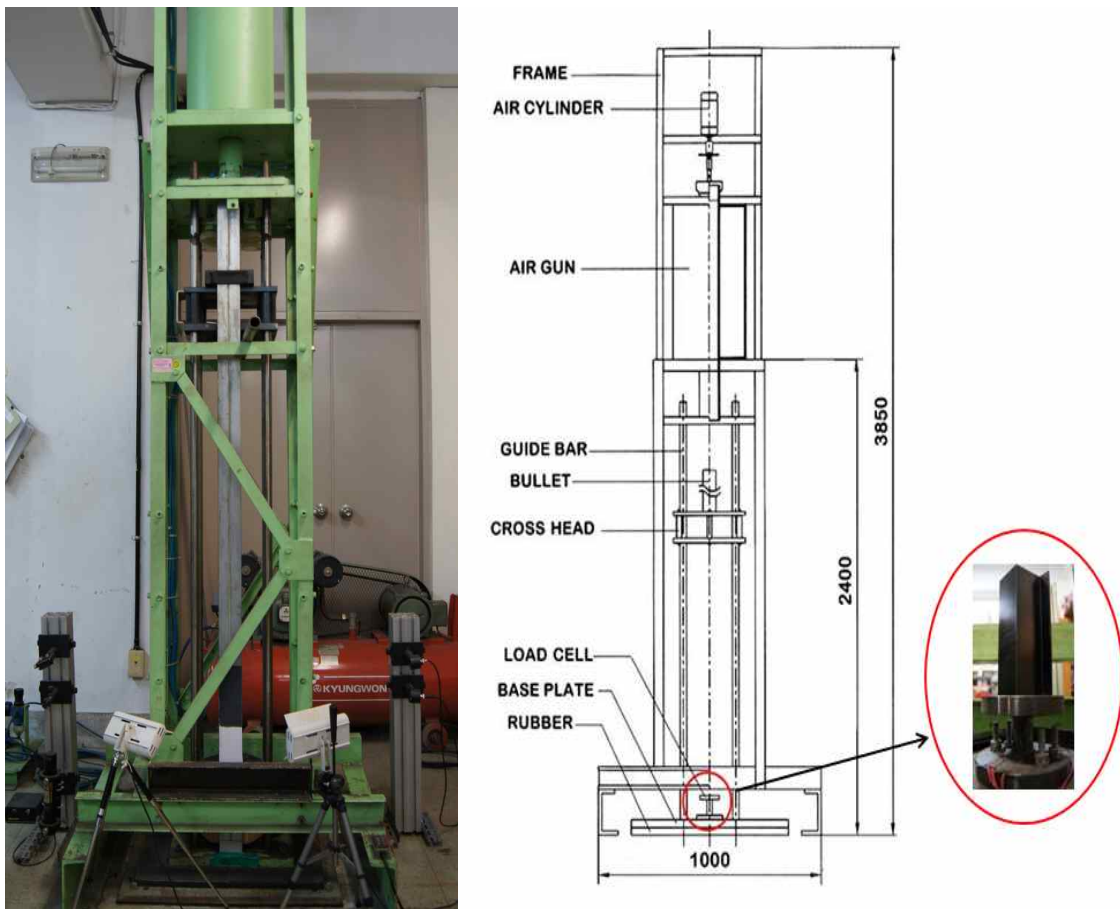


Fig. 14 Impact testing setup for crushing

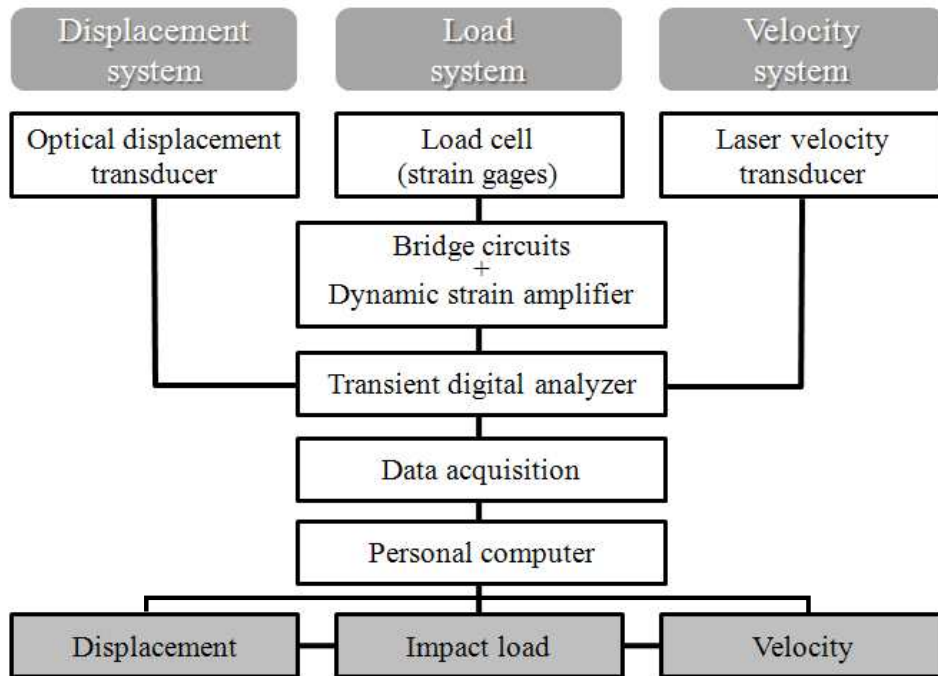


Fig. 15 Diagram of measurement system

제 4 절 충격압괴실험

충격압괴실험은 무흡습 및 흡습 모자형 CFRP 적층재를 충격압괴실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(19)와 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l P(l)dl \quad (19)$$

여기서, E_a 는 시험편에 흡수된 에너지이며, $P(l)$ 은 압괴하중을 나타낸다.

로드셀 위의 시험편이 흡수하는 이론적인 충격에너지 E_I 는 식(20)과 같이 크로스헤드의 위치에너지와 같으므로 시험편에 따라 시험편의 압괴형상을 관찰하기 가장 적절한 충격에너지 419J를 가하였다. 충격에너지의 크기는 본 연구에서 제작한 CFRP 부재의 특성을 고려하여 수차례의 예비실험을 통하여 최적의 에너지의 크기를 결정 하였다.

$$E_I = mgh \quad (20)$$

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

제 4 장 실험결과

제 1 절 CFRP 박육부재의 흡습거동

CFRP 모자형 박육단면 부재의 흡습률을 측정된 결과 시간이 경과함에 따라 대부분 시험편에서의 흡습은 일정하게 됨을 알 수 있었다. 시험편 섬유방향에 수분에 노출되는 방향으로 0°의 섬유배향을 가질 때 수분의 흡수가 이루어짐을 알 수 있었으며, 시험편 적층 시 0°와 90°로 적층되는 조건에 따라서 그 흡습률의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 본 절에서의 흡습실험 결과는 양¹⁸⁾의 실험결과를 참고하였다.

항온항습조를 이용하여 매 72시간마다 시험편의 흡습률을 측정된 결과 계면수 변화에 따라 초기 수분 흡수 증가치의 차이가 발생하였지만, 점차 시간이 경과하다 포화상태에 이르는 시점에서 대부분의 시험편이 일정한 흡습률을 보이는 것을 알 수 있었다.

적층구성에 따른 수분의 흡습거동에 따른 강도저하 현상을 평가하기 위하여 적층각도가 서로 다른 시험편을 적층 성형한 후 고온·고습 환경 하에서의 실험을 실시하였다.

시험편의 제작에는 CFRP 프리프레그 시트의 섬유배향각을 시험편 축방향을 중심으로 [+n/-n]₄의 구성을 갖도록 하였다.

흡습거동은 측정시마다 흡습된 시험편 무게 및 흡습률 증가를 시험편 내부의 흡습거동으로 생각하여 흡습 증가의 그래프로 나타냈다.

Figs. 16은 적층각도 변화를 갖는 시험편이 포화상태에 달했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 흡습률 변화 및 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

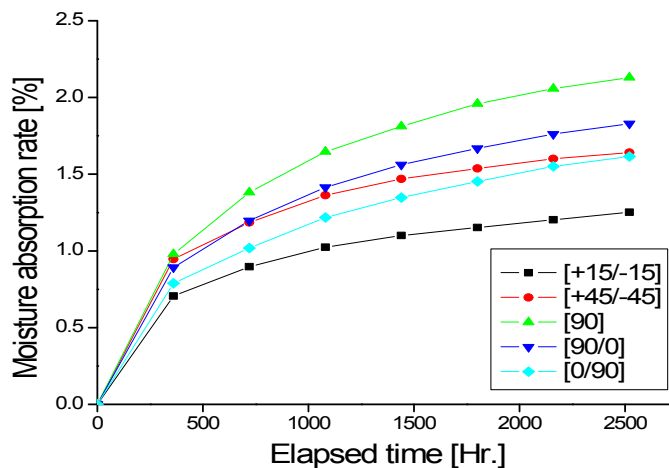


Fig. 16 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles)

Table 4와 Fig. 17은 적층각도 변화에 따른 흡습률을 나타낸 것이다.

Table 4 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles)

Specimen		<i>M</i> [%]
15°	[+15°/-15°] ₄	1.988
45°	[+45°/-45°] ₄	1.548
90°	[90°] ₈	1.634
90°/0°	[90°/0°] ₄	1.702
0°/90°	[0°/90°] ₄	1.614

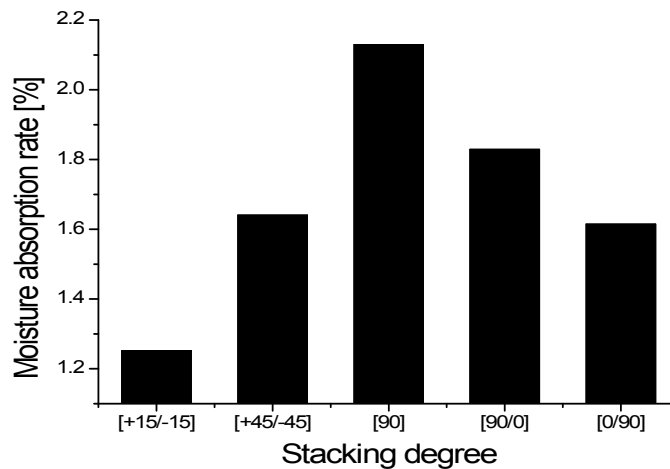


Fig. 17 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for variation of stacking angles

Figs. 16~17로부터 알 수 있는 바와 같이 적층각도의 변화에 따라 CFRP 모자형 단면부재의 흡습률의 차이가 나타남을 알 수 있었다.

CFRP적층재이 수분 흡수는 시험편의 섬유방향이 수분에 노출되는 방향으로 관찰할 때 90° 방향으로 흡수가 일어나지 않고 +15°, -15°, +45°, -45°, 0°의 섬유배향에서 수분의 흡수가 이루어짐을 알 수 있었다. 특히 0° 적층 방향의 경우에는 초기에 수분의 흡수가 크게 발생하여 시간이 지남에 따라서 흡습률이 평형을 이룰 때까지의 수치 또한 높음을 알 수 있었다.

또한 시험편의 단면부분 보다는 플랜지 부분에서 수분의 흡수가 가장 큼을 알 수 있었고 흡습률 증가가 가장 큰 시험편은 적층방향 [90°]를 갖는 90° 시험편임을 알 수 있

었다. 이는 수분이 가장 많이 흡수될 수 있는 시험편의 측면, 즉 플렌지 부분에서 모자형과 평판이 모두 8ply로 적층방향 0° 를 가짐으로써 수분에 완전히 노출되었기 때문으로 사료된다.

흡습률 증가가 가장 낮은 시험편은 적층방향 $[+15^\circ/-15^\circ]$ 를 갖는 15° 시험편으로서 시험편 단면부분에서는 0° 방향의 섬유배향으로 인한 수분의 흡수가 용이하였으나 플렌지 부분에는 적층 각도가 점차 90° 에 가깝게 구성이 되면서 수분의 흡수가 거의 발생하지 못하였기 때문에 다른 적층 각도 시험편에 비해 흡습률이 가장 낮았던 것으로 사료된다.

$0^\circ/90^\circ$ 시험편과 45° 시험편은 2500시간이 경과가 되는 시점에서는 수분 흡습률이 거의 근사함을 알 수 있었다. 다만 초기 0.5%, 약 200시간이 경과되는 시점부터 흡습률 증가가 다소 차이가 남을 알 수 있었는데, 이는 수분 흡수가 가장 많이 발생하는 부분인 플렌지 부분에서 45° 의 각도 보다는 0° 의 각도가 흡습에 용이 하였던 것으로 사료된다.

또한 시험편의 최외각층 각도만 다르게 적층하였던 $90^\circ/0^\circ$ 시험편과 $0^\circ/90^\circ$ 시험편의 경우 $[0^\circ/90^\circ]$ 로 적층한 시험편이 흡습률 증가가 낮음을 알 수 있었다.

동일한 적층 구성이었지만 초기 적층방향의 차이로 인하여 $0^\circ/90^\circ$ 시험편 최외각층의 섬유 적층 각도는 수분 흡수가 가장 많이 발생하는 플렌지 부분에서 90° 를 이루고 있고, 단면부분에 수분이 흡수될 수 있는 적층각도 0° 를 이루고 있기 때문에 같은 적층각도 배향 일지라도 수분의 흡수가 차이가 나타남을 알 수 있었다.

제 2 절 CFRP 박육부재의 축압괴실험 결과

2- 1. 무흡습 CFRP 박육부재의 정적/충격압괴 특성

무흡습 모자형 CFRP 부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 정적 압괴특성을 살펴보고자 정적 압괴실험에서 얻은 하중-변위관계와 압괴현상을 나타내었다.

Figs. 18~22에 적층수 8ply를 갖는 모자형 CFRP 부재에 대하여 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[0^\circ/90^\circ]_4$ 및 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 의 적층각의 변화에 따른 정적압괴실험 결과와 얻은 하중-변위선도와 각각의 모자형 CFRP 부재의 압괴과정을 나타내었다.

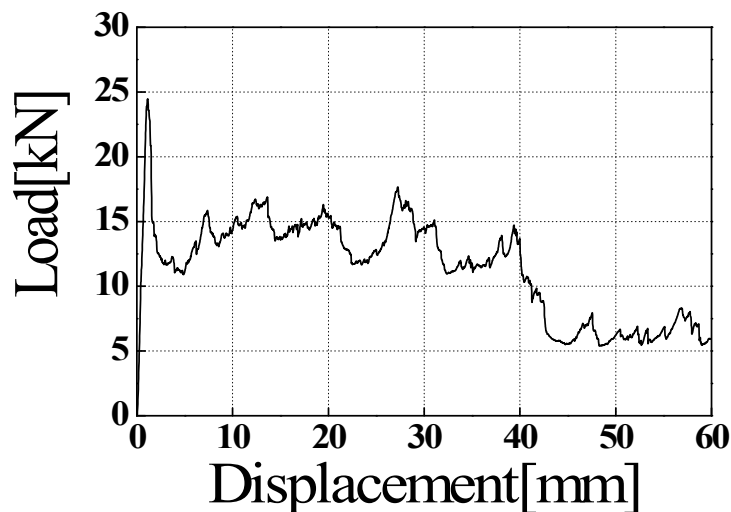
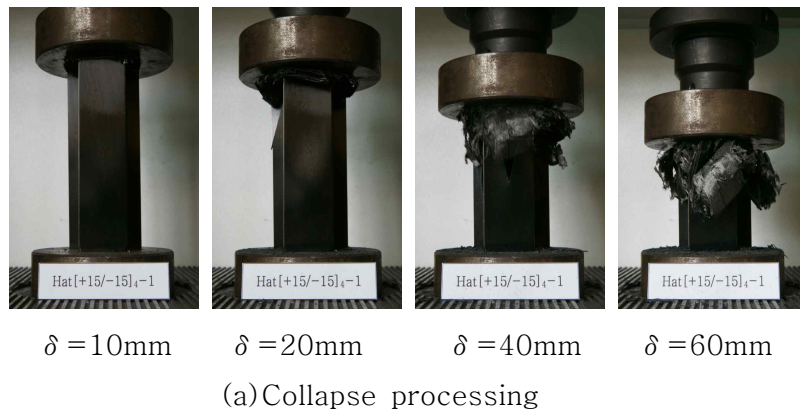
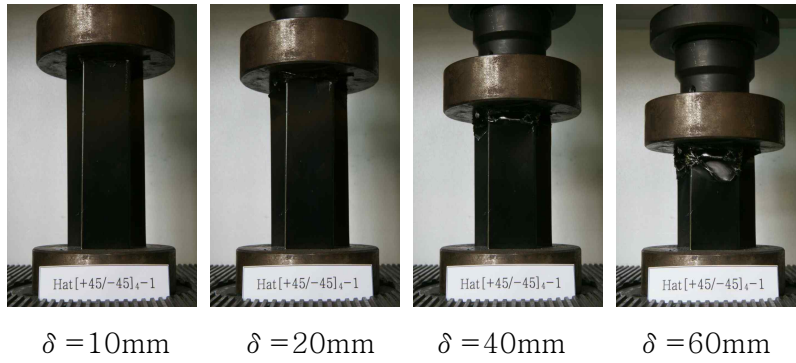
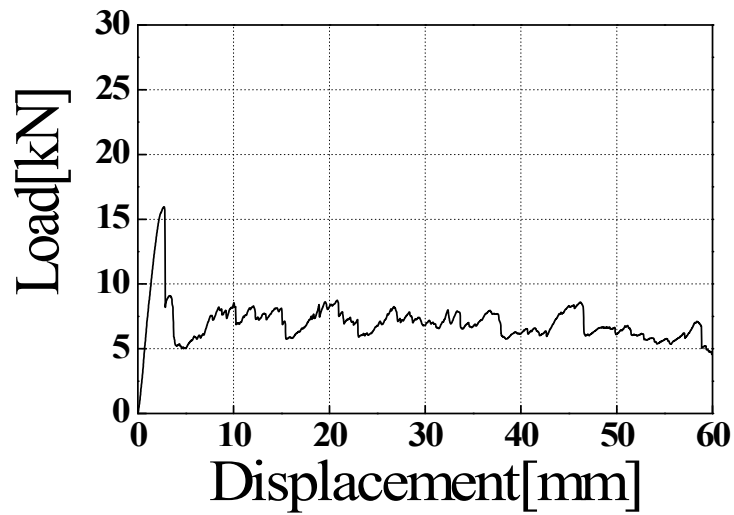


Fig. 18 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ (Static)

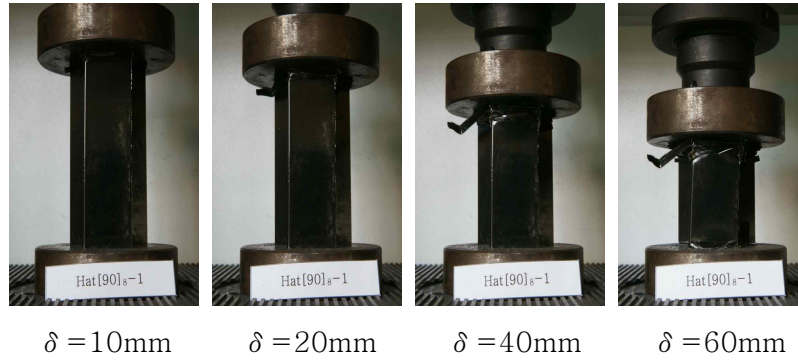


(a) Collapse processing

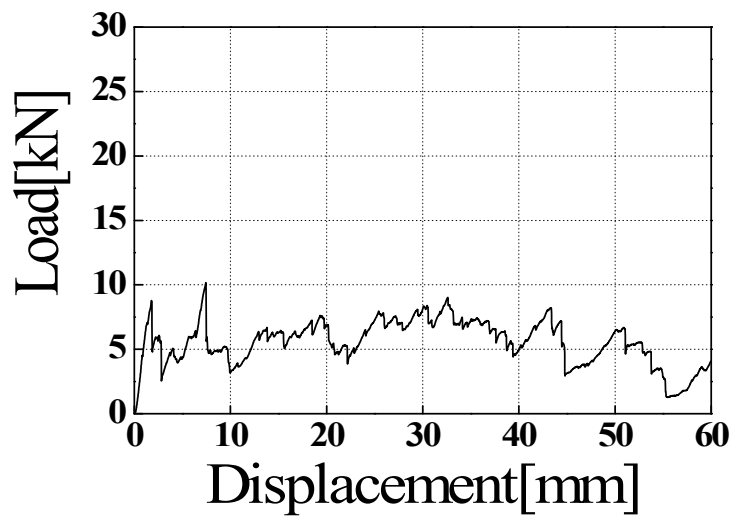


(b) Load-displacement curve

Fig. 19 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$ (Static)

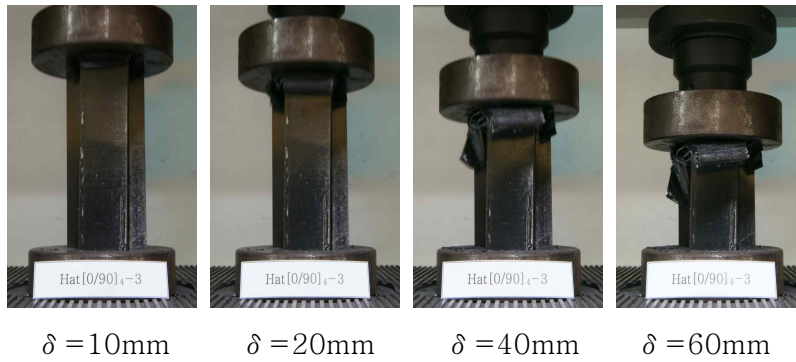


(a) Collapse processing

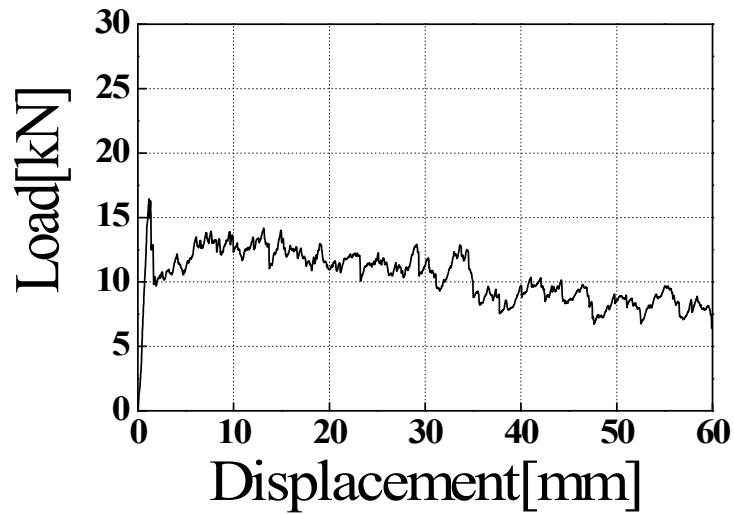


(b) Load-displacement curve

Fig. 20 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ]_8$ (Static)

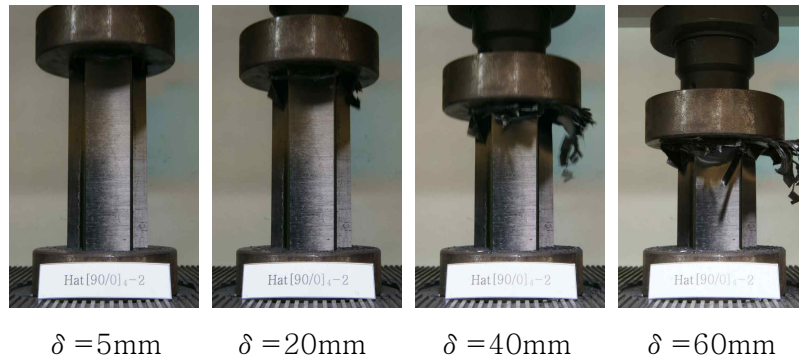


(a) Collapse processing

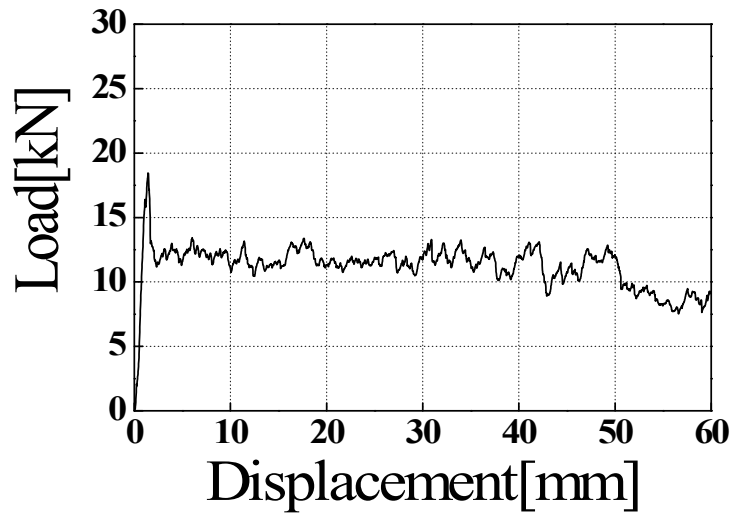


(b) Load-displacement curve

Fig. 21 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0^{\circ}/90^{\circ}]_4$ (Static)



(a) Collapse processing



(b) Load-displacement curve

Fig. 22 Collapse processing and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$ (Static)

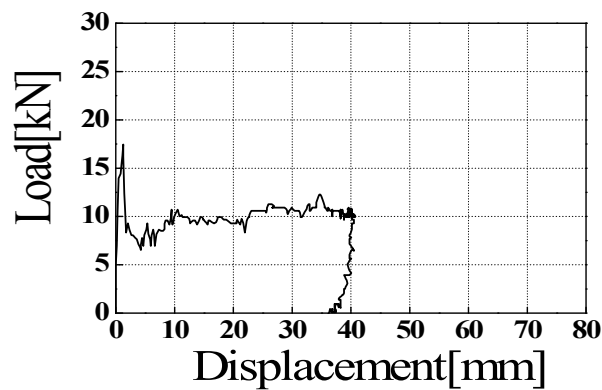
또한 무흡습 CFRP 단일 모자형 부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 충격압괴특성을 살펴보고자 충격압괴실험에서 얻은 압괴형상과 하중-변위관계를 나타내었다.

Figs. 23~27에 적층수 8ply를 갖는 단일 모자형 부재에 대하여 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[0^\circ/90^\circ]_4$ 및 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 의 적층각도의 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 충격압괴실험 후 시험편의 형상과 하중-변위선도를 나타냈다.

충격에너지의 크기는 본 실험장치의 실험 한계를 벗어나지 않고 충격실험 후 압괴형상을 잘 알 수 있는 범위인 419J 로 하였다.



(a) Collapse shape

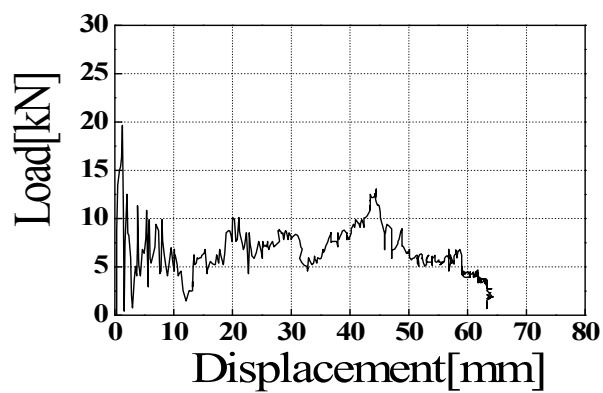


(b) Load-displacement curve

Fig. 23 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ (Dry specimen, Impact)

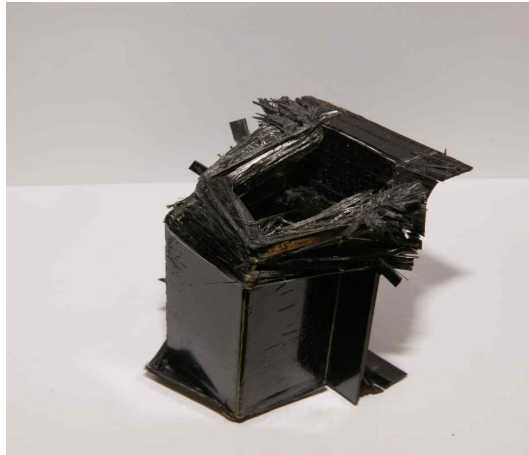


(a) Collapse shape

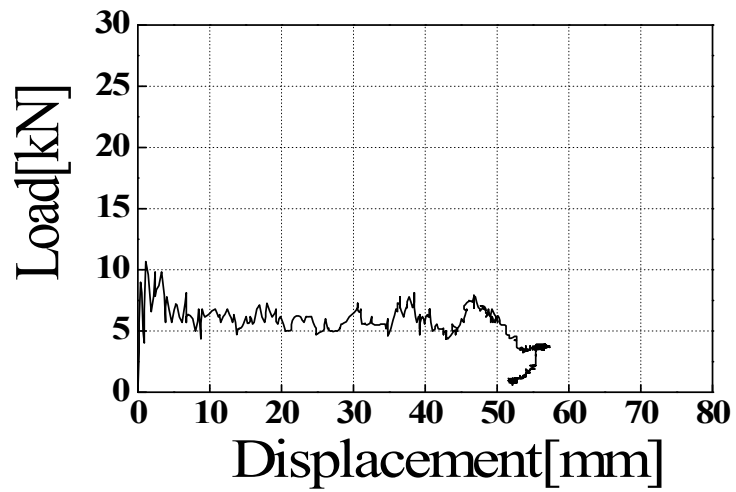


(b) Load-displacement curve

Fig. 24 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_4$ (Dry specimen, Impact)



(a) Collapse shape

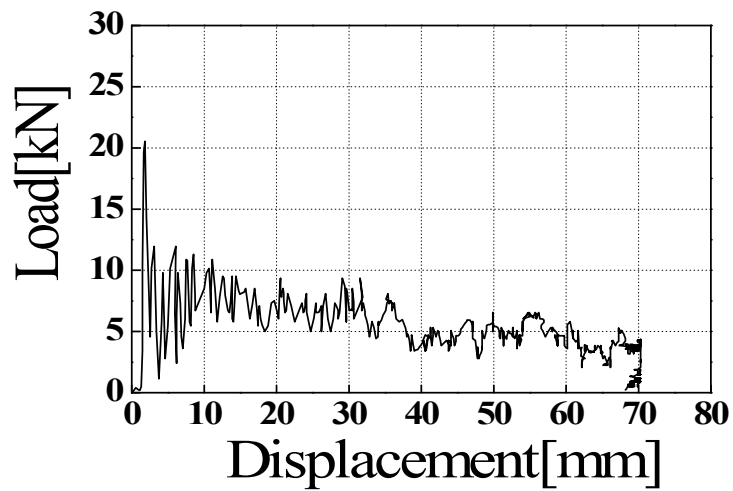


(b) Load-displacement curve

Fig. 25 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^{\circ}]_8$ (Dry specimen, Impact)

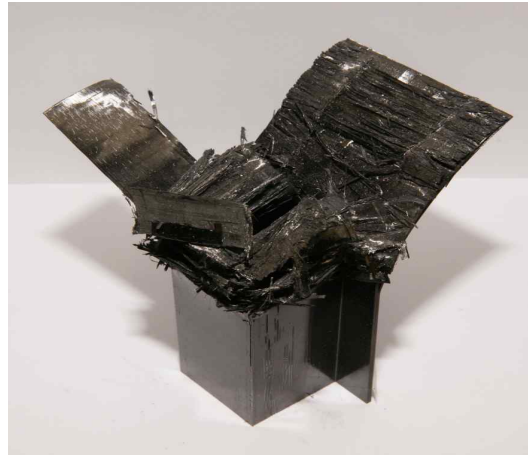


(a) Collapse shape

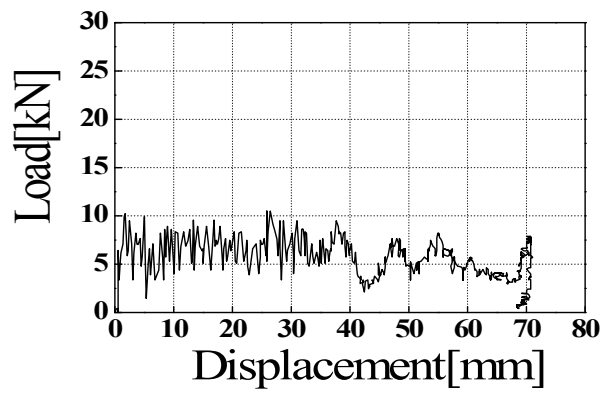


(b) Load-displacement curve

Fig. 26 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0^\circ/90^\circ]_4$ (Dry specimen, Impact)



(a) Collapse shape



(b) Load-displacement curve

Fig. 27 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$ (Dry specimen, Impact)

2- 2. 흡습 CFRP 박육부재의 충격압괴 특성

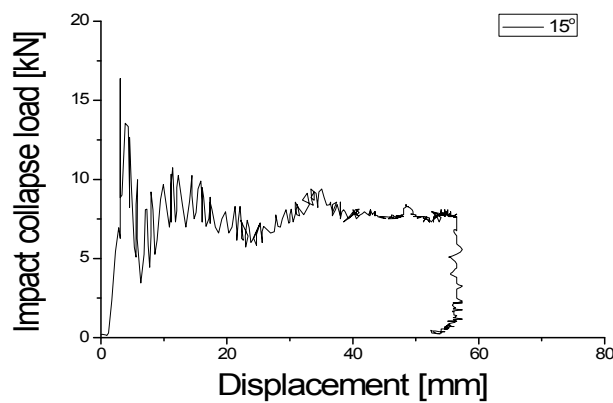
수분의 흡수로 인한 압괴특성의 변화를 고찰하기 위하여 흡습 시험편에 대해 충격 압괴실험을 실시하였다.

본 절에서 사용된 시험편은 축방향을 중심으로 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$, $[0^\circ/90^\circ]_4$ 의 변화를 갖도록 적층하였고, 정적 압괴실험에서와 똑 같이 모든 시험편은 모자형과 평판을 8ply가 되도록 적층하였다.

Figs. 28~32는 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$, $[0^\circ/90^\circ]_4$ 인 시험편의 충격 압괴실험 후의 압괴형상 과 하중-변위 선도를 나타냈다.



(a) Collapse shape

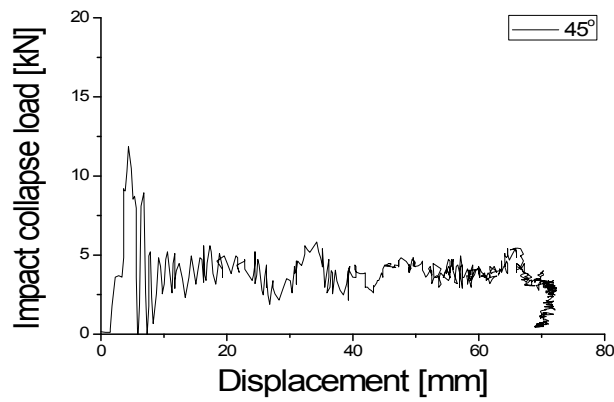


(b) Load-displacement curve

Fig. 28 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ (wet specimen, Impact)



(a) Collapse shape

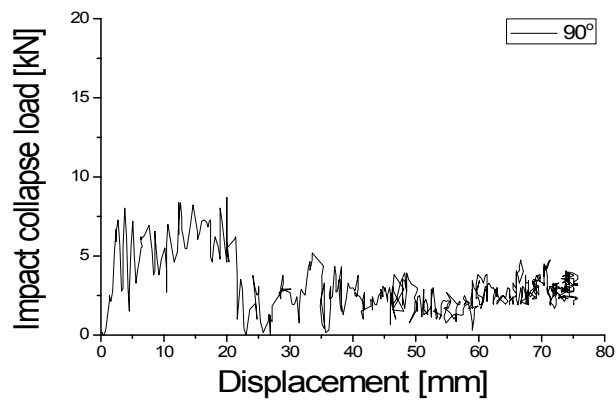


(b) Load-displacement curve

Fig. 29 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_4$ (wet specimen, Impact)



(a) Collapse shape

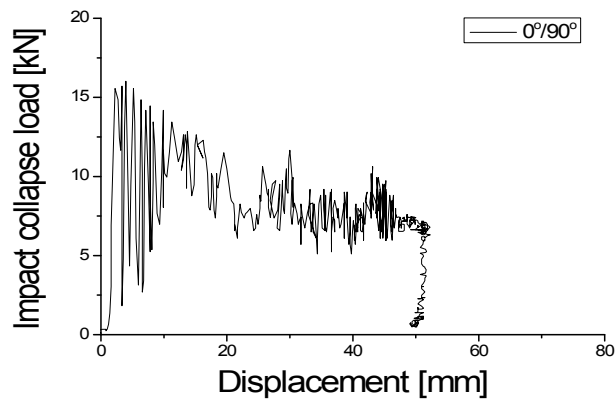


(b) Load-displacement curve

Fig. 30 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^\circ]_8$ (wet specimen, Impact)



(a) Collapse shape

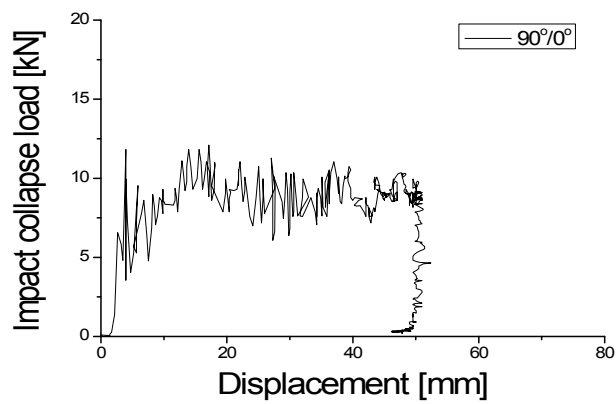


(b) Load-displacement curve

Fig. 31 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0^\circ/90^\circ]_4$ (wet specimen, Impact)



(a) Collapse shape



(b) Load-displacement curve

Fig. 32 Collapse shape and Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$ (wet specimen, Impact)

제 5 장 실험결과 및 고찰

본 장에서는 CFRP 복합재 내부에 수분이 흡수 되었을 경우 와 무흡습 CFRP 박육부재를 UTM으로 정적 압괴실험하여 얻은 하중-변위선도와 고속 낙하식 충격시험장치를 이용하여 충격 압괴실험하여 얻은 하중-변위로부터 정적압괴강도와 충격압괴강도를 구했다. 특히, 무흡습/흡습 상태에서의 실험결과를 비교하여 흡습에 따른 강도 저하현상을 고찰하였다. 압괴실험 결과는 양¹⁸⁾의 실험결과를 참고하였다.

제 1 절 CFRP 박육부재의 정적/충격 압괴강도

CFRP 박육부재의 적층구성은 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 인 무흡습 시험편과 흡습 시험편으로 분류한 후 정적 압괴실험을 통한 정적 압괴특성 및 충격 압괴실험을 통한 충격 압괴특성을 평가하였다.

Fig. 33 ~39 중 최대 압괴하중, 평균압괴하중의 단위는 [kN], 전흡수에너지는 [J] 로 나타냈다. Fig. 33에 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 서로 다른 무흡습 시험편과 흡습 시험편의 정적 압괴실험에서 얻은 최대하중의 관계를 나타냈으며

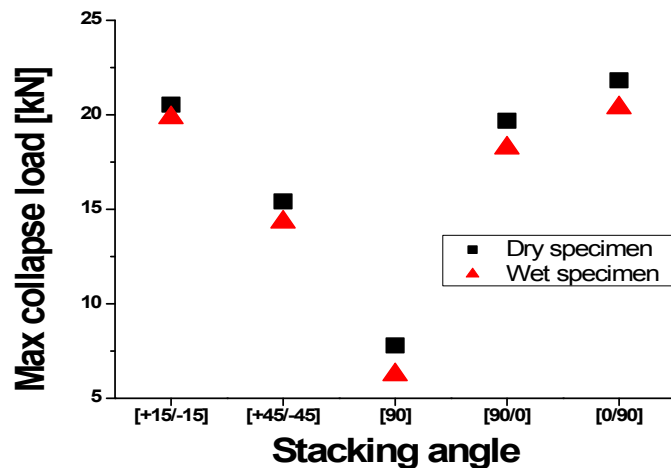


Fig. 33 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (static experiment)

Fig. 34에 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 서로 다른 무흡습 시험편과 흡습시험편의 충격 압괴실험에서 얻은 최대하중의 관계를 나타냈다.

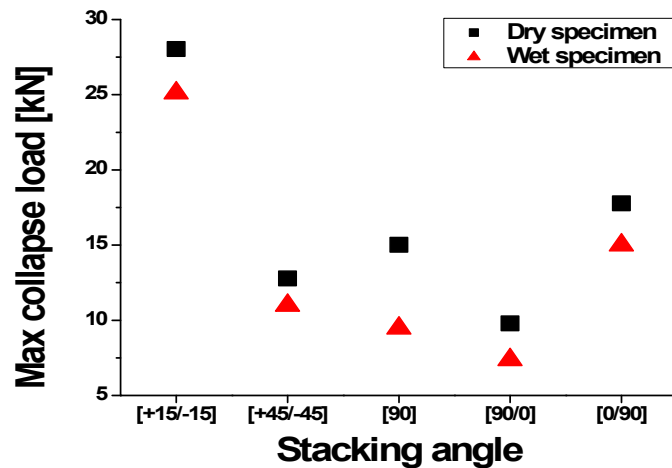


Fig. 34 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (impact experiment)

Fig. 33 으로부터 적층각도 변화에 따른 정적 압괴특성을 살펴보면 적층각도가 15° 로부터 90° 로 적층각도가 증가함에 따라 최대하중은 감소하는 경향을 보였지만, $90^\circ/0^\circ$ 과 $0^\circ/90^\circ$ 의 적층각도 에서는 점차 증가하는 경향이 나타났으며, 정적 최대 압괴하중은 적층각이 어떤 경우나 흡습 시험편이 무흡습 시험편 보다 약 3 ~ 7 % 정도 작게 나타났었다. 그러나 충격압괴하중은 Fig. 34에서와 같이 흡습 시험편이 무흡습 시험편보다 약 11 ~ 20 % 정도 작게 나타났는데 흡습에 의한 강도 저하현상이 충격 압괴일 때가 정적 압괴시 보다 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 정적 압괴의 경우는 $90^\circ/0^\circ$ 는 강도 저하현상이 거의 나타나지 않았으나 충격압괴의 경우 급격히 강도저하 현상이 나타났었다.

특히, 충격압괴의 경우 적층각이 15° 일 때 최대 압괴하중이 가장 컸으며, 그 다음으로 는 $0^\circ/90^\circ$ 가 크게 나타났으나, 정적압괴의 경우는 $0^\circ/90^\circ$ 의 경우가 가장 크게 나타났는데 이는 정적의 경우 0° 방향의 섬유가 15° 방향의 섬유에 비해 축압괴하중에 더 저항력이 크기 때문이라 생각된다.

Fig. 35, 36에 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 서로 다른 무흡습 시험편 과 흡습 시험편의 정적 및 충격 압괴실험에서 얻은 평균하중의 관계를 나타냈다.

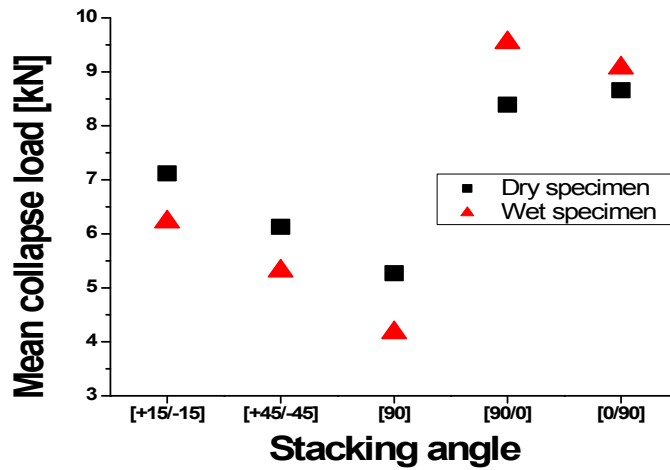


Fig. 35 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (static experiment)

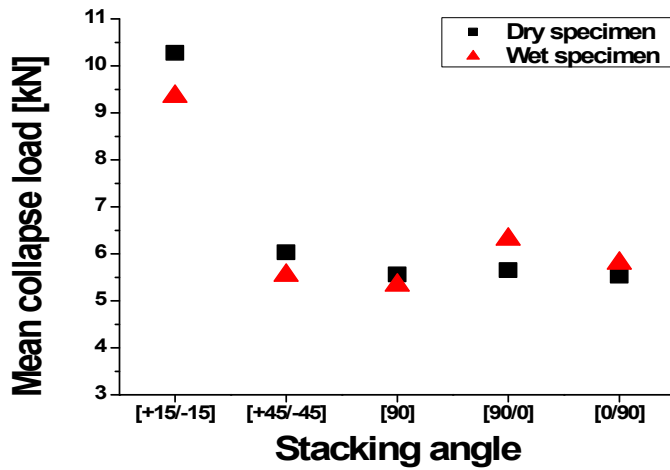


Fig. 36 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (impact experiment)

Fig. 35 으로부터 알 수 있는 바와 같이 Fig. 33 과 비슷한 경향을 보이고 있으나 적층각도가 15°인 경우 정적 평균 압력하중은 최대 압력하중에 비해 크게 감소함을 알 수 있는데 이는 Fig. 18와 같이 정적압력의 경우 초기 압력하중이 25kN 로 급격히 증가 하다가 1mm정도 압력되면서 급격히 감소하기 때문이다.

특히, 충격압력의 경우 Fig. 36 으로부터 알 수 있는 바와 같이 적층각도가

[+15°/-15°]₄ 인 경우가, [+45°/-45°]₄, [90°]₈, [90°/0°]₄ 및 [0°/90°]₄에 비해 약 55%이상 평균압축하중이 컸다.

Fig. 37, 38에 적층각도가 [+15°/-15°]₄, [+45°/-45°]₄, [90°]₈, [90°/0°]₄ 및 [0°/90°]₄ 로 서로 다른 무흡습 시험편 과 흡습 시험편의 정적 및 충격 압축실험에서 얻은 적층각도의 변화와 흡수 에너지와의 관계를 나타냈다.

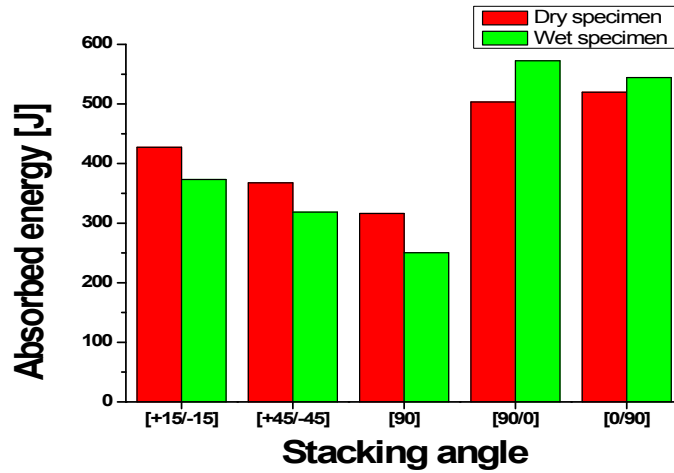


Fig. 37 Relationship between absorbed energy and variation stacking angles (static experiment)

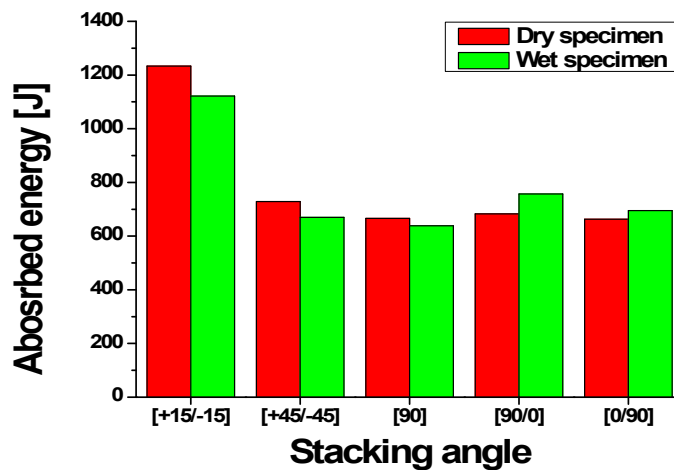


Fig. 38 Relationship between absorbed energy and variation stacking angles (impact experiment)

Fig. 37로부터 흡습/무흡습 시험편의 정적압괴시 흡수에너지는 적층각도가 90°/0° 일 때가 가장 높았으며 그 다음으로 적층각도가 [0°/90°]₄, [+15°/-15°]₄, [+45°/-45°]₄, [90°]₈ 순으로 낮게 나타났다. 그러나 Fig. 38 과 같이 흡습/무흡습 시험편의 충격압괴시 흡수에너지는 적층각도가 15°, 일 때가 가장 높았으며 45° 90°, 90°/0° 및 0°/90° 시험편보다 약 40% 이상 높았다.

Fig. 39에 적층각도가 [+15°/-15°]₄, [+45°/-45°]₄, [90°]₈, [90°/0°]₄ 및 [0°/90°]₄ 로 서로 다른 무흡습 시험편 과 흡습 시험편의 충격 압괴실험에서 압괴길이의 관계를 나타냈다.

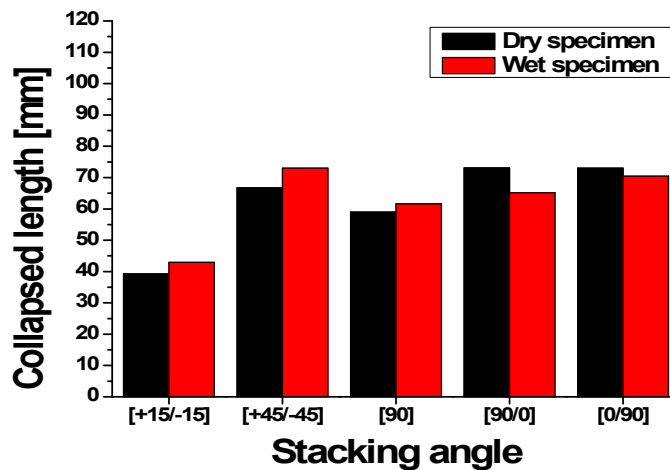


Fig. 39. Relationship between collapsed length and variation stacking angles (impact experiment)

Fig. 39로부터 적층각도가 [+15°/-15°]₄, [+45°/-45°]₄, [90°]₈, [90°/0°]₄ 및 [0°/90°]₄ 인 경우 같은 충격에너지로 충격을 가했을 경우 압괴된 길이를 보면, 흡습시험편의 경우 적층각도가 15° 일 때 압괴길이는 약 43 mm, 45° 일 때는 73mm, 90°일 때는 62mm, 90°/0° 일 때는 65mm, 0°/90° 일 때는 65mm, 0°/90° 일 때는 70mm로서 적층각도가 15°인 경우가 압괴 길이 가 가장 짧다. 따라서 경량화 자동차 구조설계시 외부의 충격에 의해 적절히 에너지를 흡수하고 승객의 안전을 위한 공간 확보가 가능하다는 차원에서 적층각도가 15° 일때가 가장 우수하다고 사료된다.

제 2 절 흡습/무흡습 CFRP 박육부재의 압괴모드

본 절에서는 외부 충돌에 의해 많은 에너지를 흡수할 수 있고 승객의 안전을 도모 할 수 있도록 공간 확보가 용이한 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재를 이용하여 CFRP 단일 모자형 부재를 제작한 후 적층각도 변화에 따른 무흡습/흡습상태에서의 충격 압괴특성을 고찰하였다.

Photo. 4에 무흡습 상태에서 CFRP 단일 모자형 부재의 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 변화 할 때의 충격압괴 형상을 나타냈으며, Photo. 5에 흡습 상태에서 CFRP 단일 모자형 부재의 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 변화 할 때의 충격압괴 형상을 나타냈다.

본 충격 압괴실험에서 가한 419J 의 동일한 충격에너지가 가해져도 시험편의 적층각도 변화에 따라 압괴길이가 차이가 생겼으며, Farley and Jones가 정의한 압괴 형상과 본 실험에서 실제 압괴된 형상의 단면부분을 살펴본 결과, 흡습/무흡습 시험편 모두 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태 등의 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

15° 로 적층된 부재에서는 Photo. 4의 (a)와 같이 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압괴되었다.

"ㄷ"자형 부재는 섬유 방향을 따라 압괴가 진행되며 이는 횡방향 전단과 라미나 굽힘 모드가 조합된 취성과파괴 모드로 압괴 되었으며, 모서리 부분에서 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다.

45° 로 적층된 부재에서는 Photo. 4의 (b)와 같이 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 접힘모드의 형상으로 압괴되었다. 흡습 시험편의 충격압괴시 Photo. 5의 (b)와 같이 접힘모드의 형상이 확실히 나타났다. 접힘모드는 섬유의 분리와 섬유의 파손이 없이 기지의 소성변형에 의해 국부좌굴의 변형으로 구성되며, 흡습된 시험편 일수록 섬유의 분리와 섬유의 파손 없이 기지가 소성변형 되기 쉽기 때문이라 생각된다.

90° 로 적층된 부재에서는 Photo. 4의 (c)와 같이 횡방향의 기지 파단으로 인한 파쇄모드의 형상으로 압괴되었다.

또한, $0^\circ/90^\circ$ 로 적층된 부재에서는 Photo. 4의 (d)와 같이 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 횡방향 전단

과 라미나 묶음의 파단이 조합된 취성파괴 모드의 형상으로 압괴되었다.

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. 즉, 섬유는 굽힘이 존재하나 파단에



Photo. 4 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members
(dry specimen)

가까우며 크랙성장과 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복적으로 나타난다.

90° /0° 로 적층된 부재에서는 Photo. 4의 (e)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"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 나타

나는 라미나 굽힘이 두드러지게 나타났으며, 상대적으로 $0^\circ / 90^\circ$ 에서 주로 나타났던 섬유 파단은 적게 나타났다.

Photo. 5 에 흡습 상태에서 CFRP 단일 모자형 부재의 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 변화 할 때의 충격압괴 형상을 나타냈다. 흡습상태의 압괴형상 역시 Photo. 4와 같이 무흡습 상태에서 CFRP 단일 모자형 부재와 유사한 압괴형상을 나타냈다.

Photo. 4, 5 로부터 알 수 있듯이 무흡습 시험편과 흡습 시험편 모두에서 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 90° 인 경우 최외층 플라이(ply) 섬유의 파단에 의해 높은 압괴특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드 및 시험편 모서리의 찢어짐을 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 0° 인 경우 최외층 플라이 섬유의 확장으로 인한 확장형 스플라인 모드가 나타났다.

또한, 시험편 내부에서는 최외층 90° 에서 보였던 파괴와 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드를 관찰할 수 있었다. 수분이 흡수된 시험편의 경우에서도 마찬가지로 계면의 변화와 최외각층의 변화에 따른 압괴모드 또한 수분이 흡수되지 않았던 시험편에서 나타났던 취성파괴와 동일함을 알 수 있었다. 하지만 수분의 흡수로 인해 탄소강화섬유와 에폭시 간의 결합력의 약화로 섬유와 층간 파괴보다는 굽힘이 주를 이루는걸 알 수 있었다. 또한 최외각층 90° 의 경우에는 최외층 섬유가 횡방향으로 접히는 압괴모드를 관찰할 수 있었으며, 수분이 흡수되지 않았던 시험편에 비해 모서리의 찢김 없이 안정적인 압괴가 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분이 흡수됨으로 인하여 시험편 내부의 탄소강화섬유와 에폭시 사이의 결합력이 완화가 되면서 압괴 시 취성의 성격을 갖는 섬유의 파괴나 파단보다는 연성의 굽힘과 접힘이 주를 이루고 있었으며 수분이 침투되지 않은 시험편 보다 안정적인 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

특히 90° 시험편의 경우에는 최외각 섬유가 횡방향으로 접히는 압괴모드가 주를 이룸을 관찰할 수 있었으며, 45° 시험편의 경우 또한 횡방향으로 접히는 압괴모드와 취성파괴 모드가 혼합됨을 관찰할 수 있었다. 이는 다른 적층각 시험편에서와 똑 같이 수분이 흡수됨으로 인하여 시험편 내부의 탄소강화섬유와 에폭시 사이의 결합력이 완화가 되면서 압괴 시 취성의 성격을 갖는 섬유의 파괴나 파단보다는 연성의 굽힘과 접힘이 주를 이루고 있는걸 알 수 있었다. 그로인해 수분이 침투되지 않은 시험편 보다 안정적인 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.



(a) $[+15^\circ/-15^\circ]_4$



(b) $[+45^\circ/-45^\circ]_4$



(c) $[90^\circ]_8$



(d) $[0^\circ/90^\circ]_4$



(e) $[90^\circ/0^\circ]_4$

Photo. 5 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members
(wet specimen)

또한, 흡습/무흡습 시험편의 압괴형상 및 크랙진전 상태를 비교하기 위하여 Photo. 6 ~ 10에 흡습/무흡습 상태에서의 적층각도가 $[+15^\circ/-15^\circ]_4$, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$, $[90^\circ]_8$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 및 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 로 변화 할 때의 충격압괴 형상을 적층 각도별로 비교하여 나타냈는데, 이 역시 앞에서 설명한 것과 똑 같이 무흡습 상태에서의 시험편보다는 흡습상태의 시험편이 보다 안정적으로 압괴되을 알 수 있었다.



(a) Dry specimen



(b) Wet specimen

Photo. 6 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members, $[+15^\circ/-15^\circ]_4$



(a) Dry specimen



(b) Wet specimen

Photo. 7 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members, $[+45^\circ/-45^\circ]_4$



(a) Dry specimen



(b) Wet specimen

Photo. 8 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members, $[90^\circ]_8$



(a) Dry specimen



(b) Wet specimen

Photo. 9 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members, $[0^\circ/90^\circ]_4$



(a) Dry specimen



(b) Wet specimen

Photo. 10 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members, $[90^\circ/0^\circ]_4$

6. 결 론

본 연구에서는 고온 고습 환경하에서 충돌시 승객의 안전을 보호 하기 위해 충분한 에너지 흡수능력 및 충분한 공간을 확보 할 수 있는 최적의 경량화용 자동차 구조부재를 개발하는데 적용 가능한 설계데이터를 얻고자 한다.

연구결과는 다음과 같다.

1. 최대 정적 압케하중은 적층각이 어떤 경우나 흡습 시험편이 무흡습 시험편 보다 약 3 ~ 7 % 정도 작게 나타났으며, 최대 충격 압케하중은 흡습 시험편이 무흡습 시험편보다 약 11 ~ 20 % 정도 작게 나타났다. 이는 흡습에 의한 강도 저하현상이 충격 압케 일 때가 정적 압케시 보다 크게 나타남을 알 수 있었다.
2. 충격압케의 경우 적층각이 15°일 때 최대 압케하중이 가장 컸으며 그다음 으로는 0°/90° 가 크게 나타났으나, 정적압케의 경우는 0°/90° 의 경우가 가장 크게 나타났는데, 이는 정적의 경우 0°방향의 섬유가 15°방향의 섬유에 비해 축압케하중에 더 저항력이 크기 때문이라 생각된다. 또한, 압케된 길이는 적층각도가 15°일 때 가 가장 짧아 승객의 안전을 위한 공간 확보가 가능 하다는 차원에서 적층각도가 15°인 CFRP 구조부재가 가장 우수한 내 충격성을 갖는 것으로 판단된다.
3. 흡습/무흡습 시험편의 정적 압케시 흡수에너지는 적층각도가 90°/0° 일 때가 가장 높았으며 그 다음으로 적층각도가 0°/90°, 15°, 45° 90°순으로 낮게 나타났다. 그러나 충격압케시 흡수에너지는 적층각도가 15°, 일 때가 가장 높았으며 45° 90°, 90°/0° 및 0°/90° 시험편보다 약 40% 이상 높았다.
4. 흡습/무흡습 시험편 모두 적층각에 관계 없이 층간크랙 및 층내크랙의 점진적 진전과 함께 부재의 외측으로 압케가 진전 되지만 15° 로 적층된 부재에서는 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압케 되었으며, 45° 로 적층된 부재에서는 "ㄷ" 자형 부재가 접힘모드의 형상으로 압케되었고, 90° 로 적층된 부재에서는 횡방향의 기지 파단으로 인한 파쇄모드의 형상으로 압케되었다.
5. 0° /90° 로 적층된 부재에서는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 횡방향 전단과 라미나 묶음의 파단이 조합된 취성파괴 모드의 형상으로 압케되었으며, 0° 로 적층된 라미나 묶음은 층간

크랙 및 층내 크랙 진전에 의해 부재 외측으로 라미나 굽힘을 발생시키지만 축 방향에 대하여 90° 로 적층된 섬유는 0° 로 적층된 라미나 묶음의 라미나 굽힘을 방해하면서 파단 된다. 즉, 섬유는 굽힘이 존재하나 파단에 가까우며 크랙성장과 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복적으로 나타난다.

6. 모든 적층각에서 무흡습 상태에서의 시험편 보다는 흡습상태의 시험편은 탄소강화 섬유와 에폭시 사이의 결합력이 수분에 의해 완화가 되기 때문에 무흡습 상태에서 압괴 시 취성의 성격을 갖는 섬유의 파괴나 파단 보다는 연성의 굽힘과 접힘이 주를 이루면서 무흡습 시험편 보다 안정적으로 압괴되었다.

참 고 문 헌

1. Poon,C.,Benak,T., Goule, R.,1990," Assessment of impact damage in toughen resin composites", theoretical and applied fracture mechanics, Vol.13, No. 2, pp.81~97
2. 신형섭, 김진환,오상영, 2001, “취성재료의 펀치가공을 위한 충격장치 개발 및 펀치 기구해석” ,대한기계학회논문집 A권, Vol.25, No. 4, pp.629~636
3. MA, C.C.M., HUANG, Y.H. and CHANG, M.J.,1991,"Hygrothermal Effect on the PEEK/C.F. and PP.S/C.F. under Impacting Loading(I),"ANTEC, pp.2029~2096
4. 한국자동차공학회지 , 『자동차 기술 핸드북 ; 시험평가편』 SAE Korea, 1996, pp. 339-350.
5. 이대길, 오박균. “복합재료 자동차 부품의 설계 및 조방법.” 자동차공학회지』 16 : 45-53, 1994.
6. Donald F. Adams. "Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes." Technomic Publishing Company, 1990.
7. 이길성. "충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가" 조선대학교 박사논문, 2008.
8. 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.
9. 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
10. 광규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 『자동차경제』 , 24-29, 1997
11. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (VI)." 『자동차공학회지』 26:30-35, 2004.

12. 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.
13. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압특성." 조선대학교 박사논문, 2002.
14. Mamilis, A. G., Manolakos, D. E., Demosthenous, G. A. and Johnson, W.. "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating Systems." International Journal of Impact Engineering 11: 185-196, 1991.
15. 최홍섭, 안규중, 남재도 “단일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료 적층판의 수분 흡수 거동 ” , 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, pp. 1486 ~ 1500, 1998.
16. G. Sala, “Composite degradation due to fluid absorption” , Composites Part B, Vol. 31, pp. 357 ~ 373, 2000.
17. Yuichiro Aoki, Ken Yamada, Takashi Ishikwa, “Effect of Hygrothermal Condition on Compression Sfter Impact Strength of CFRP Laminates” , composites science and technology, Vol. 68, pp. 1376 ~ 1383, 2007.
18. 양용준. "열습 환경하에서 CFRP 모자형 단면부재의 충격특성 평가." 조선대학교 박사학위논문, 2011.
19. G. L. Farley, R.M. Jones. "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes." Journal of Composite Materials 26:37-50, 1992
20. L. Farley, R.M. Jones. "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes." Journal of Composite Materials 26:78-80, 1992
- 21 G. L. Farley, R.M. Jones. "Crushing Characteristics of composite Tubes with "Near-Elliptical" Cross Sections." Journal of Composite Materials 26:1741-1751, 1992
22. G. L. Farley, R.M. Jones. "Prediction of Energy-Absorption Capability Composite Tubes ." Journal of Composite Materials 26:388-404, 1991
23. H. Hamada, S .Ramakrishna, M. Nakamura, Z. Maekawa, T. Nishiwaki. "Energy-Absorption Characteristics of Composite Tubes with Different

Cross-Sectional Shapes. "Proceeding of the 10th Annual ASM/ESD
Advanced Composites Conference: 523-534,1994.

24. 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.
25. N. K. Gupta, R. Velmurugan, S. K. Gupta."An Analysis of Axial Crushing
of Composite Tubes."Journal of Composite Materials 31:1262-1286,1997.