



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](#)

2011년 8월  
박사학위논문

열습 환경하에서 CFRP 모자형  
단면부재의 충격특성 평가

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

양 용 준

열습 환경하에서 CFRP 모자형  
단면부재의 충격특성 평가

Impact Damage Characteristics of CFRP Hat-shaped  
Sectional Members Under Hygrothermal Environment

2011 년 8 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

양 용 준

# 열습 환경하에서 CFRP 모자형 단면부재의 충격특성 평가

지도교수 심 재 기

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2011 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

양 용 준



# 양용준의 박사학위 논문을 인준함.

위원장    조선대학교    교수    양    인    영 ①

위    원    조선대학교    교수    최    병    기 ①

위    원    우석대학교    교수    임    광    희 ①

위    원    조선대학교    교수    김    지    훈 ①

위    원    조선대학교    교수    심    재    기 ①

2011 년 6 월

조 선 대 학 교 대 학 원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	i
LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF PHOTOGRAPHS .....	ix
ABSTRACT .....	xii
<b>제 1 장 서 론</b> .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구동향 .....	4
제 3 절 연구목적 .....	6
<b>제 2 장 실험방법</b> .....	7
제 1 절 시험편 제작 .....	7
제 2 절 열습실험 .....	14
제 3 절 압궤실험 .....	19
<b>제 3 장 실험결과</b> .....	26
제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 흡습거동 .....	26
1. 계면수 변화에 따른 흡습거동 .....	27
2. 적층각도 변화에 따른 흡습거동 .....	34
제 2 절 계면수 변화에 따른 충격 압궤 .....	39
1. 무흡습 시험편 .....	39
2. 흡습 시험편 .....	50

제 3 절	적층각도 변화에 따른 충격 압괴 .....	61
1.	무흡습 시험편 .....	61
2.	흡습 시험편 .....	67
<b>제 4 장</b>	<b>고찰</b> .....	73
제 1 절	적층조건 변화에 따른 압괴특성 .....	73
1.	CFRP 모자형 단면부재의 정적 압괴특성 .....	73
2.	CFRP 모자형 단면부재의 충격 압괴특성 .....	84
제 2 절	CFRP 모자형 단면부재의 압괴모드 .....	96
제 3 절	흡습에 따른 강도 평가 .....	106
1.	정적하중 하에서의 강도 평가 .....	106
2.	충격하중 하에서의 강도 평가 .....	110
<b>제 5 장</b>	<b>결론</b> .....	115
<b>참고문헌</b>	.....	117

## LIST OF TABLES

Table 1 Characteristics and applications of the CFRP composites .....	3
Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet .....	9
Table 3 Types of CFRP hat-shaped sectional members .....	9
Table 4 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members (interface numbers) .....	30
Table 5 Hygrothermal experiment results of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°) .....	31
Table 6 Hygrothermal experiment results of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°) .....	32
Table 7 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles) .....	36
Table 8 Hygrothermal experiment results of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles) .....	37
Table 9 Static collapse experiment results of dry specimens (interface numbers, outer angle 90°) .....	76
Table 10 Static collapse experiment results of wet specimens (interface numbers, outer angle 90°) .....	76
Table 11 Static collapse experiment results of dry specimens (interface numbers, outer angle 0°) .....	79
Table 12 Static collapse experiment results of wet specimens (interface numbers, outer angle 0°) .....	79
Table 13 Static collapse experiment results of dry specimens (stacking angles) .....	82
Table 14 Static collapse experiment results of wet specimens (stacking angles) .....	82

Table 15 Impact collapse experiment results of dry specimens (interface numbers, outer angle 90°) .....	87
Table 16 Impact collapse experiment results of wet specimens (interface numbers, outer angle 90°) .....	87
Table 17 Impact collapse experiment results of dry specimens (interface numbers, outer angle 0°) .....	90
Table 18 Impact collapse experiment results of wet specimens (interface numbers, outer angle 0°) .....	90
Table 19 Impact experiment test results of dry specimens (stacking angles) .....	93
Table 20 Impact experiment test results of wet specimens (stacking angles) .....	93
Table 21 Strength decrease rate after collapse experiment .....	114

## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Shape of CFRP hat-shaped sectional member .....	8
Fig. 2 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°) .....	10
Fig. 3 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°) .....	11
Fig. 4 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles) .....	12
Fig. 5 Curing cycle of CFRP hat-shaped sectional members .....	13
Fig. 6 Dimensions of hot waterbath .....	17
Fig. 7 Load-displacement curve of collapsed specimens (static experiment) .....	20
Fig. 8 Load-displacement curve of collapsed specimens (impact experiment) .....	22
Fig. 9 Impact testing device .....	23
Fig. 10 Diagram of measurement system .....	25
Fig. 11 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°) .....	28
Fig. 12 Increase of moisture absorption rate (outer angle 90°) .....	28
Fig. 13 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°) .....	29
Fig. 14 Increase of moisture absorption rate (outer angle 0°) .....	29
Fig. 15 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for variation of outer angles .....	30
Fig. 16 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles) .....	35

Fig. 17 Increase of moisture absorption rate (stacking angles) .....	35
Fig. 18 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for variation of stacking angles .....	36
Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle 90°) .....	40
Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle 90°) .....	41
Fig. 21 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle 90°) .....	42
Fig. 22 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle 90°) .....	43
Fig. 23 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle 90°) .....	44
Fig. 24 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle 0°) .....	45
Fig. 25 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle 0°) .....	46
Fig. 26 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle 0°) .....	47
Fig. 27 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle 0°) .....	48
Fig. 28 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle 0°) .....	49
Fig. 29 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	51
Fig. 30 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	52
Fig. 31 Load-displacement curve of CFRPhat-shaped sectional member,	

4 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	53
Fig. 32 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
6 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	54
Fig. 33 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
7 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	55
Fig. 34 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
2 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	56
Fig. 35 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
3 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	57
Fig. 36 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
4 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	58
Fig. 37 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
6 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	59
Fig. 38 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
7 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	60
Fig. 39 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
15° (dry specimen, stacking angle) .....	62
Fig. 40 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
45° (dry specimen, stacking angle) .....	63
Fig. 41 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
90° (dry specimen, stacking angle) .....	64
Fig. 42 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
90°/0° (dry specimen, stacking angle) .....	65
Fig. 43 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
0°/90° (dry specimen, stacking angle) .....	66
Fig. 44 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	
15° (wet specimen, stacking angle) .....	68
Fig. 45 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,	



45° (wet specimen, stacking angle) .....	69
Fig. 46 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 90° (wet specimen, stacking angle) .....	70
Fig. 47 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 90°/0° (wet specimen, stacking angle) .....	71
Fig. 48 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 0°/90° (wet specimen, stacking angle) .....	72
Fig. 49 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°) .....	74
Fig. 50 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°) .....	74
Fig. 51 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°) .....	75
Fig. 52 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°) .....	77
Fig. 53 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°) .....	77
Fig. 54 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°) .....	78
Fig. 55 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (static experiment) .....	80
Fig. 56 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (static experiment) .....	80
Fig. 57 Relationship between absorbed energy and variation stacking angles (static experiment) .....	81
Fig. 58 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 90°) .....	85
Fig. 59 Relationship between mean collapse load and variation	

interface numbers (impact experiment, outer angle 90°) .....	85
Fig. 60 Relationship between absorbed energy and variation	
interface numbers (impact experiment, outer angle 90°) .....	86
Fig. 61 Relationship between collapsed length and variation	
interface numbers (impact experiment, outer angle 90°) .....	86
Fig. 62 Relationship between maximum collapse load and variation	
interface numbers (impact experiment, outer angle 0°) .....	88
Fig. 63 Relationship between mean collapse load and variation	
interface numbers (impact experiment, outer angle 0°) .....	88
Fig. 64 Relationship between absorbed energy and variation	
interface numbers (impact experiment, outer angle 0°) .....	89
Fig. 65 Relationship between collapsed length and variation	
interface numbers (impact experiment, outer angle 0°) .....	89
Fig. 66 Relationship between maximum collapse load and variation	
stacking angles (impact experiment) .....	91
Fig. 67 Relationship between mean collapse load and variation	
stacking angles (impact experiment) .....	91
Fig. 68 Relationship between absorbed energy and variation	
stacking angles (impact experiment) .....	92
Fig. 69 Relationship between collapsed length and variation	
stacking angles (impact experiment) .....	92
Fig. 70 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes .....	98
Fig. 71 Relationship between strength decrease rate and variation	
interface numbers (static, outer angle 90°) .....	108
Fig. 72 Relationship between strength decrease rate and variation	
interface numbers (static, outer angle 0°) .....	108
Fig. 73 Relationship between strength decrease rate and variation	

stacking angles (static experiment) .....	109
Fig. 74 Relationship between strength decrease rate and variation	
interface numbers (impact, outer angle 90°) .....	112
Fig. 75 Relationship between strength decrease rate and variation	
interface numbers (impact, outer angle 0°) .....	112
Fig. 76 Relationship between strength decrease rate and variation	
stacking angles (impact experiment) .....	113

## LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave .....	13
Photo. 2 Hot waterbath .....	17
Photo. 3 Electronic scale .....	18
Photo. 4 Specimen holder .....	18
Photo. 5 Devices of impact testing .....	24
Photo. 6 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle $90^\circ$ ) .....	40
Photo. 7 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle $90^\circ$ ) .....	41
Photo. 8 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle $90^\circ$ ) .....	42
Photo. 9 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle $90^\circ$ ) .....	43
Photo. 10 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle $90^\circ$ ) .....	44
Photo. 11 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle $0^\circ$ ) .....	45
Photo. 12 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle $0^\circ$ ) .....	46
Photo. 13 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle $0^\circ$ ) .....	47
Photo. 14 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle $0^\circ$ ) .....	48
Photo. 15 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle $0^\circ$ ) .....	49

Photo. 16 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	51
Photo. 17 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	52
Photo. 18 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	53
Photo. 19 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	54
Photo. 20 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (wet specimen, outer angle 90°) .....	55
Photo. 21 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	56
Photo. 22 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	57
Photo. 23 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	58
Photo. 24 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	59
Photo. 25 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (wet specimen, outer angle 0°) .....	60
Photo. 26 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 15° (dry specimen, stacking angle) .....	62
Photo. 27 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 45° (dry specimen, stacking angle) .....	63
Photo. 28 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90° (dry specimen, stacking angle) .....	64
Photo. 29 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90°/0° (dry specimen, stacking angle) .....	65

Photo. 30 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 0°/90° (dry specimen, stacking angle) .....	66
Photo. 31 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 15° (wet specimen, stacking angle) .....	68
Photo. 32 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 45° (wet specimen, stacking angle) .....	69
Photo. 33 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90° (wet specimen, stacking angle) .....	70
Photo. 34 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90°/0° (wet specimen, stacking angle) .....	71
Photo. 35 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 0°/90° (wet specimen, stacking angle) .....	72
Photo. 36 Fracture sectional of the collapsed specimen .....	99
Photo. 37 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, dry specimen, outer angle 90°) .....	100
Photo. 38 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, wet specimen, outer angle 90°) .....	101
Photo. 39 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, dry specimen, outer angle 0°) .....	102
Photo. 40 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, wet specimen, outer angle 0°) .....	103
Photo. 41 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, dry specimen, stacking angles) .....	104
Photo. 42 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, wet specimen, stacking angles) .....	105

# ABSTRACT

## **Impact Damage Characteristics of CFRP Hat-shaped Sectional Members Under Hygrothermal Environment**

Yang, Yong-Jun

Advisor : Prof. Sim, Jae-Ki, Ph. D.

Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

To obtain collision safety, design parameters should be considered, which could induce proper absorption of impact energy by car body. Therefore, structural members of automobiles should have sturdiness to enable passenger safety and proper deformation to absorb collision energy. To fulfill the opposite demand at the same time, many safety measures have been implemented. Thin-walled member for front sectional of in many car bodies has been adopted to absorb collision energy via plastic deformation. However, high oil price demands further improvement of fuel mileage, and light-weight vehicle has the utmost importance. In spite of attempts to utilize the existing structural member for car body, demand for improved fuel mileage cannot be met, and significant environment due to rapid development of industries and overwhelming number of vehicle should be reflected into vehicle design. To solve the various issues in vehicle design, carbon fiber reinforced plastics (CFRP) has been implemented in vehicle design, which has not only superior rigidity and strength but also better heat and corrosion resistance compared to the existing structural member. In addition, CFRP is widely adopted in secondary structural member including

primary member in certain application.

CFRPs have light weight and high strength. CFRP composite materials, which are reinforced with carbon fiber, features superior heat and corrosion resistance, and these benefits enables the gradual applications on aerospace industries and sports-entertainment business. Exceptional corrosion resistance enables the acceptance in maritime structural members such as ship and oil-drilling machineries.

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. In addition, interface characteristics and component material properties can be degraded.

Especially, interface in CFRP composite materials, which transfers load from matrix resin to reinforced fiber, is key factor to determine physical properties of composite. In this study, interface characteristics in CFRP composite materials were focused to be researched and tested.

Previous researches on composite material have been conducted only on moisture absorption behavior and strength evaluation on CFRP stacking plate and structural member. Research on morphological evaluation is not explored significantly.

Therefore, structural members with hat-shaped sectional, which are adopted in the actual automobile vehicle, were prepared for different stacking configurations. Moisture absorption characteristics and strength evaluation was empirically conducted after long-term exposure of differently stacked CFRP hat-shaped sectional member under hygrothermal environment. Optimal design data that can be applicable to actual transportation vehicle will be provided via identification of stacking configuration with optimal collision characteristics that could mitigate strength degradation from harsh hygrothermal environment.

To understand moisture absorption behavior and strength degradation of



CFRP hat-shaped sectional member by moisture impregnation, moisture absorption test and static/collision collapsing test was conducted. The following conclusions were acquired.

1. For the hygrothermal in CFRP composite materials, at approximately 0.5% of moisture absorption rate, the most absorption rate appears at the beginning time, but the moisture absorption rate decreases to some degree over 1.0% of the moisture rate.
2. It is found that the moisture absorption characteristics depend on the stacking sequences in the CFRP composites. Especially, a main role in the absorption rate could be considered as an agreement of absorption direction to 0 degree of fiber direction, which means a stacking sequence.
3. Through testing both moisturized-absorption sample and non-moisturized sample, in case of moisturized-absorption sample, the hygrothermal phenomena occurs in inter lamina due to the moisture ingress and the bonding strength becomes to be weaker. Ripped-edge of the most out sequence, 90 degree generated less by the moisture ingress and the stable collapsing mode appears more than that with collapsed shape and absorbed samples.
4. It is found that the strength in changes of stacking angles decreases more than that in changes of the number of interfaces through performing of both static and impact collapsing testing. 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.
5. It was found that approximately 50% of impact loading of static loaded sample with moisture is decreased more than of impact loaded sample with moisture.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 이하 CFRP) 복합재는 비강도 및 비강성도가 좋고 피로특성이 우수하며 금속재료에 비해 중량을 20%~50% 줄일 수 있다는 장점이 있어서 구조경량화 및 열변형 안정성이 필요한 우주항공 분야를 비롯하여 중량감소가 필수적인 구조물에 점차 그 사용량이 증가하고 있으며 Table 1과 같이 경량화가 요구되는 여러 분야에서 널리 이용되고 있다. 이에 따라 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 기계적 특성, 경량성, 내열성, 마찰제동 특성 및 전기 전도성 등의 고성능을 구비한 첨단복합재료의 개발이 활발히 추진되고 있으며 그 사용 분야 또한 점차 확대되어 선박, 자동차, 의료기기, 일반산업분야, 스포츠, 레저 및 에너지 관련 분야에 까지 널리 사용되고 있다.<sup>1,2)</sup>

현재 우리의 일상생활에서 중요한 것 중의 하나로 수송기계를 들 수 있다. 수송기계는 시간적인 측면에서 뿐만 아니라 그로 인한 경제적인 면까지 그 의존도는 점차 높아지고 있는 추세에 있다. 과거 차량의 이용은 운송수단을 중심으로 한 생계형의 성격이 강한 면모를 보였다면, 점차 기술의 발달과 그에 따른 삶의 질의 향상을 추구하는 편의성의 성격을 보이는 현재에는 차량의 이용이 단순히 운송수단만이 아닌 여가 또는 다양한 스포츠에까지 널리 확대되고 있으며, 그로 인해 국내에서도 차량의 이용이 증가하면서 국민 1인당 1대의 차량 소유가 점차 다가오고 있는 실정이다.

하지만 날로 증가되는 차량의 수요에 의해 갈수록 대두되고 있는 환경오염 문제 또한 직시하지 않을 수 없어 초기 차량의 설계 시 환경오염을 고려한 친환경적인 설계가 요구되고 있는 실정이다. 차량의 증가에 따른 환경오염을 해결하기 위한 친환경적인 설계 방법으로 연비의 절감을 통하여 환경오염의 문제와 경제적인 절약 또한 기대할 수 있게 된다.

차량의 연비향상을 위한 방법으로는 엔진 및 구동계의 효율향상, 주행저항저감,

차체 경량화 등이 있으며, 특히 기존 차량의 구조변경 또는 알루미늄과 같은 경량화 재료를 이용한 강판의 대체화를 통하여 연비의 향상을 도모할 수 있다.<sup>3)</sup>

하지만 기존의 경량화 재료로는 강판에서의 우수한 에너지흡수특성을 기대할 수 없기 때문에 금속에 비해 그 강도 및 강성, 내열성 및 내식성이 우수한 탄소섬유강화복합재를 보강하는 방법의 설계로 기존의 강판을 사용했을 때 보다 더 가벼운 중량으로 더 높은 강도 및 에너지 흡수를 기대할 수 있게 되었으며, 환경오염 문제와 에너지 절약 차원의 연비향상의 문제뿐만 아니라 기존의 부품보다 수명을 더 연장시키게 되었다.<sup>4~7)</sup>

또한 CFRP 복합재는 그 응용의 폭이 넓어지고 있으며, 재료의 신뢰성에 관련된 연구가 진전을 보임에 따라 응용되는 부분도 2차 구조물 위주에서 고하중을 지지하는 1차 구조물로 확대되고 있다. 특히 선박의 구동축에 복합재료를 이용한 경량화 설계가 도입됨으로써 기존 금속 구동축에 비해 50%이상의 무게를 절감함과 동시에 부식이라는 단점을 해결할 수 있게 되었다.<sup>3)</sup>

하지만 이러한 고강도 및 고강성도를 지니는 탄소/에폭시 즉, CFRP 복합재료의 경우 일반적인 환경이 아닌 가혹한 환경하에서 구조부재로 사용되어질 경우 고강도 등의 역학적 특성을 기대하기 어렵다는 단점이 발생한다. 특히, 고온과 습기가 작용하는 열습 환경과 충격하중을 받는 환경에서는 높은 역학적 특성을 기대하기가 매우 어렵게 되며, 충격 손상을 받았을 경우는 CFRP 복합재의 모재크랙, 배면크랙 및 층간 박리가 발생함으로써 잔류강도가 크게 저하하게 된다.<sup>8~14)</sup>

따라서 열습 환경과 충격하중을 받는 환경하에서 CFRP 복합재에 대한 강도평가 및 강도저하에 따른 보완방법 등의 연구가 절실히 필요하다.

Table 1 Characteristics and applications of the CFRP composites

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

## 제 2 절 연구동향

연구배경에서 살펴보았듯이 CFRP 복합재는 정적부하 환경에서는 고강도 및 고강성 등의 우수한 역학적 특성을 가지면서 여러 분야에 널리 사용이 되어 지고 있지만 구조부재의 성격상 가혹한 환경하에서의 사용을 배제하지 않을 수 없다.

따라서 CFRP 복합재가 가장 취약한 면을 보이는 가혹한 환경하에서의 신뢰성을 확보하고 이를 설계 데이터로 사용하고자 가혹한 환경하에서의 강도평가 및 강도저하에 대한 보강법 등의 여러 연구가 진행되어 왔으며, 본 연구에서의 가장 중요한 목적이기도 하다.

CFRP 복합재의 가장 큰 단점으로는 수분의 흡수와 충격하중에 대해 매우 취약하다는 것이다. 탄소섬유와 에폭시수지의 결합에 의해 어느 특정한 작용이 발생하게 되면 성질이 다른 하나가 취약하게 되며, 이로 인하여 복합재 내부에는 기계적 성질의 변화가 발생한다는 것이다.<sup>15)</sup>

구조부재의 성격상 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위 환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 열습과 같은 상황에서 수분이 복합재 내부로 침투함으로써 연성재의 역할을 수행하고 이로 인해 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질을 저하시킴으로써 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다.<sup>16~18)</sup>

이제까지의 연구 결과를 살펴보면, 실온 상태에서 CFRP 적층판에 충격력을 가하여 충격손상 및 잔류강도의 저하현상을 평가한 실험적 연구<sup>19,20)</sup>와 흡습상태에서의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 대한 잔류 강도저하 문제를 취급한 연구<sup>21~29)</sup>, 항공기용 재료에 있어서 온도 변화에 따른 CFRP 적층판의 인장강도, 층간전단강도, 잔류굽힘강도, 압축강도특성 등에 관한 연구 결과 및 서로 수지가 다른 CFRP 적층판의 충격 강도, 정적인장 및 굽힘강도, 피로강도 및 크리프강도에 미치는 온도의 영향을 고찰한 연구결과를 대표적으로 들 수 가 있다.<sup>30~37)</sup>

문<sup>38)</sup>은 복합재료가 열습 환경하에 노출 되어질 때 수분의 흡수는 섬유에 인장응력을 발생시킴에 따라 섬유와 수지계면의 분리 및 섬유파괴와 같은 영구적인 손상을 연구하였고, CFRP 복합재에 대해 열습실험 후 이를 건조시킴에 따라 강도 회

복정도에 대해 실험을 함으로써 비가역적 특성에 대해 알아보았으며, 각 파단면에 대하여 파단형상을 관찰하여 수지의 팽창 및 건조에 의한 그 재료의 수축현상을 확인하는 보강재와 수지와의 계면거동에 관련된 연구를 진행하였다.

하지만 김<sup>39)</sup>은 강도 회복의 정도는 흡습률의 회복 비율에 비해서 적게 나타났으며 수분의 흡수가 영구적인 손상을 가져온 것으로 파악하였다.

또한, 김<sup>40)</sup>은 해수와 담수를 이용한 CFRP 복합재 적층판의 열습실험을 실시한 후 수분의 침투와 그 시간이 층간파괴에 미치는 영향을 파악하였으며, 나아가 수분에 침투된 CFRP 복합재 적층판의 층간파괴인성을 결정하는 주요 메카니즘으로 수분의 함유에 의한 기지의 연성화, 균열선단부의 팽창, 층간분리 면적의 증가, 컴플라이언스의 증가 등의 연구를 실시하였다.

CFRP 복합재는 탄소강화 섬유와 에폭시 수지의 복합체로서 섬유의 파단이나 수지와의 계면 파괴 등의 현상이 복합하여 나타나는데 비하여 이제까지는 CFRP 적층판을 대상으로 수분흡수 거동과 잔류응력 등의 강도평가에 관한 연구들이 대부분 이었고, 일정한 형상을 갖는 CFRP 구조부재에 대한 연구는 미흡한 실정 이었다.

### 제 3 절 연구목적

CFRP 복합재의 계면은 매트릭스 수지에서 탄소섬유로 하중이 전달되는 부분으로서 복합재의 물성을 결정하는 중요한 부분이기 때문에 본 연구에서는 CFRP 복합재의 계면간의 특성에 중점을 두었다. 또한 CFRP 복합재의 우수한 기계적 특성을 기대할 수 없는 가혹한 환경을 실험적으로 설정한 열습 상태에서 정적 압괴실험과 충격 압괴실험을 통한 강도저하를 평가하고 그에 따른 보강방법을 알아보기 위하여 여러 조건의 적층법을 이용한 CFRP 모자형 단면부재를 제작하였다.

본 연구에서 실험적으로 설정한 가혹한 환경으로는

첫째, 고온과 수분이 작용하는 열습 환경을 위해 항온항습기를 사용하여 온도와 습기가 오랜 시간 유지가 되는 열습실험을 실시하였다.

둘째, 흡수된 후의 CFRP 모자형 단면부재를 대상으로 정적 압괴실험과 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,<sup>41)</sup> 온도와 수분이 항상 일정하게 유지가 되도록 함으로써 수분이 CFRP 복합재 내부에 흡수되어질 경우 제작과정에서의 변화에 따른 흡습거동을 살펴보았다.

가혹한 환경하에서의 하중특성을 알아보기 위해 수분이 흡수되기 전과 수분이 흡수된 후의 CFRP 모자형 단면부재에 대하여 정적 압괴실험과 충격 압괴실험을 실시하였고, 정적하중을 받는 일반적인 환경하에서의 강도저하와 충격하중을 받는 환경하에서의 강도저하를 비교 및 고찰해 봄으로써 가혹한 환경하에서 강도저하가 가장 적은 적층구성을 찾고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 적층 구성이 서로 다른 CFRP 모자형 단면부재가 열습 환경하에서 장시간 노출되었을 때 적층구성의 변화에 따른 흡습거동과 강도평가를 실험적으로 고찰하여, 수분으로 인해 발생하는 강도저하에 대처할 수 있는 최적의 충격특성을 갖는 적층구성을 파악하고 실제 수송기계의 설계 시 실제 적용 가능한 정량적인 설계 데이터를 얻고자 하였다.

## 제 2 장 실험방법

### 제 1 절 시험편 제작

본 연구에 사용된 시험편은 자동차용 충돌에너지흡수 구조부재로 널리 사용되고 있는 모자형상을 단면형상으로 하였다.

시험편의 제작은 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 사각의 알루미늄 맨드릴위에 이형필름(release film)을 사용하여 각각 8ply의 적층수를 갖도록 적층하여 모자형 부재의 형상으로 제작을 하였다. Fig. 1과 Table 2는 본 연구에 사용된 모자형 단면부재의 형상과 CFRP 프리프레그 시트의 물성치를 나타냈다.

시험편의 형상은 실제 차량의 전면부에 사용되고 있는 구조부재가 차량의 엔진룸 내부의 고온·고습의 가혹한 환경하에서 수분의 흡수에 대한 강도저하 현상을 적절히 평가할 수 있는 실제 크기의 1/4로 축소하여 제작을 하였다.

CFRP 모자형 단면부재는 모자형 “ $\Gamma$ ”과 평판형 “—”으로 제작을 하였으며, 모자형상의 단면은 가로, 세로 각각 30mm, 플랜지의 폭은 12mm의 형상을 갖는다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 압축실험 시 압축이 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였으며, 하중에 의한 압축실험 중 초기압축 및 일률적인 변형을 유도함으로써 안정적인 압축 및 강도평가가 이뤄질 수 있도록 시험편 끝단에 45°의 트리거 가공을 함으로써 초기조건을 설정하였다.<sup>42)</sup>

사용된 시험편의 종류로는 시험편의 축방향  $\theta$ 를 중심으로 최외각층을 90°와 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면의 계면수 변화 시험편과 CFRP 프리프레그 시트의 적층각도 변화를 갖는 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90°의 적층각도 변화 시험편을 제작하였으며, 제작된 시험편을 흡습 유·무로 분류하여 정적 압축실험과 충격 압축실험을 실시하였다. Table 3은 본 연구에 사용된 시험편의 종류를 나타냈다. Figs. 2, 3은 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편의 단면형상과 플랜지 형상을 도식화 한 것이며, Fig. 4는 적층각도 변화를 갖는 시험



편의 단면형상과 플렌지 형상을 도식화 한 것이다.

시험편의 성형은 Photo. 1의 오토클레이브를 사용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형 시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을  $10^{-1}$  Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터  $3 \times 10^5$  Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 5는 시험편 제작 시 오토클레이브의 성형 사이클을 나타냈다.

제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단한 후 열습실험과 정적 압괴실험 및 충격 압괴실험을 실시하였다.

무흡습 시험편과 흡습 시험편을 대상으로 정적 압괴실험 및 충격 압괴실험을 실시하여 압괴특성 및 강도저하를 비교 및 고찰하였다.

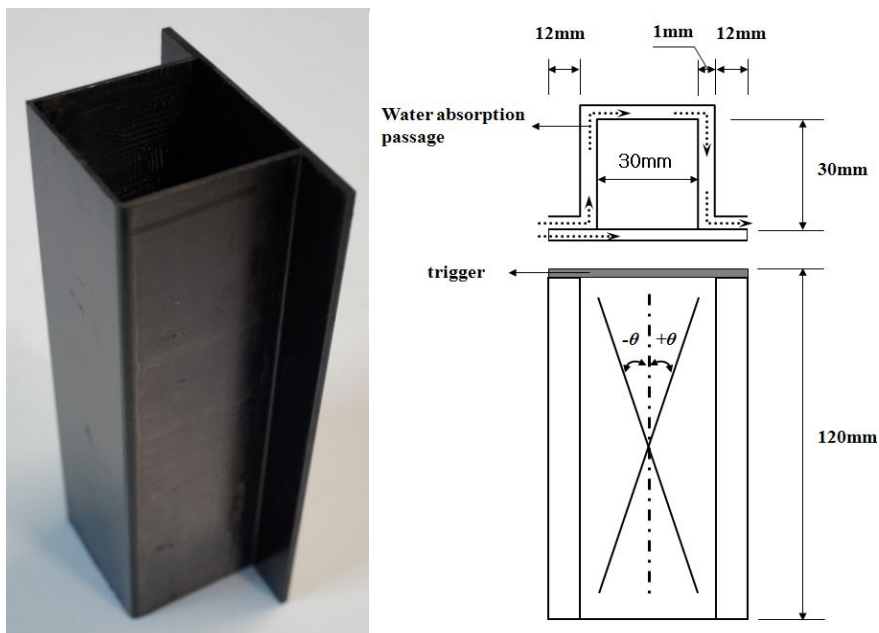


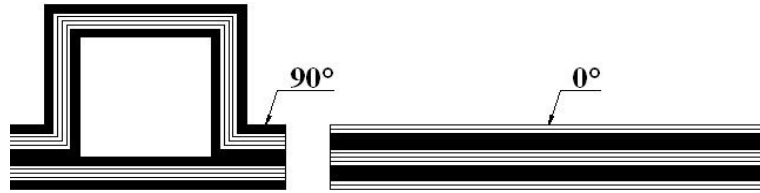
Fig. 1 Shape of CFRP hat-shaped sectional member

Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet

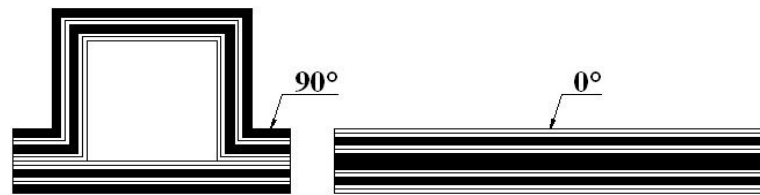
Types Characteristics	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density	1.83×103 [kg/m3]	1.24×103 [kg/m3]	-
Poisson's ratio	-	-	0.3
Young's modulus	240 [GPa]	3.60 [GPa]	132.7 [GPa]
Tensile stress	4.89 [GPa]	0.08 [GPa]	1.85 [GPa]
Breaking elongation	2.1 [%]	3.0 [%]	1.3 [%]
Resin content	-	-	33 [% Wt]

Table 3 Types of CFRP hat-shaped sectional members

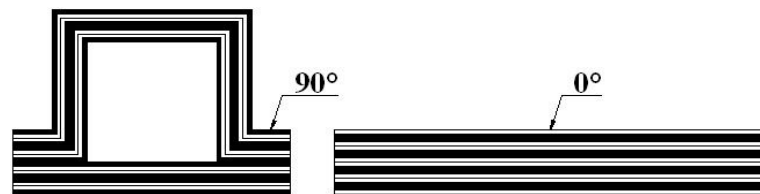
Specimens	Stacking conditions	Experiments		
2 interface	[90° <sub>2</sub> /0° <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	Hygrothermal	Static collapse	Impact collapse
3 interface	[0° <sub>2</sub> /90° <sub>2</sub> ] <sub>2</sub>			
4 interface	[90°/0°] <sub>s2</sub>			
6 interface	[90°/0°] <sub>2s</sub>			
7 interface	[0°/90°] <sub>4</sub>			
2 interface	[0° <sub>2</sub> /90° <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>			
3 interface	[90° <sub>2</sub> /0° <sub>2</sub> ] <sub>2</sub>			
4 interface	[0°/90°] <sub>s2</sub>			
6 interface	[0°/90°] <sub>2s</sub>			
7 interface	[90°/0°] <sub>4</sub>			
15°	[+15°/-15°] <sub>4</sub>			
45°	[+45°/-45°] <sub>4</sub>			
90°	[90°] <sub>8</sub>			
90°/0°	[90°/0°] <sub>4</sub>			
0°/90°	[0°/90°] <sub>4</sub>			



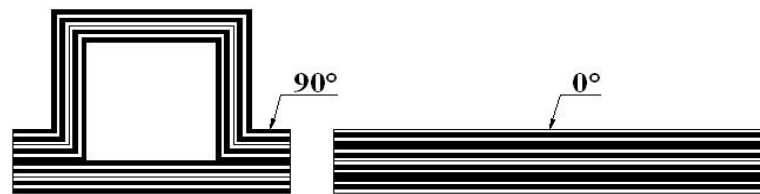
(a) 2 interface (outer angle  $90^\circ$ )



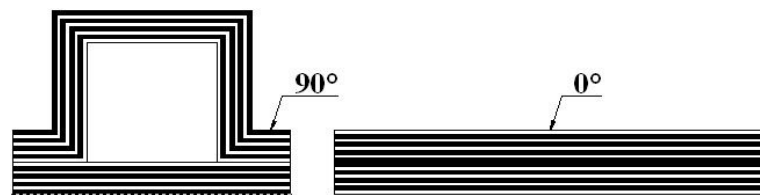
(b) 3 interface (outer angle  $90^\circ$ )



(c) 4 interface (outer angle  $90^\circ$ )



(d) 6 interface (outer angle  $90^\circ$ )

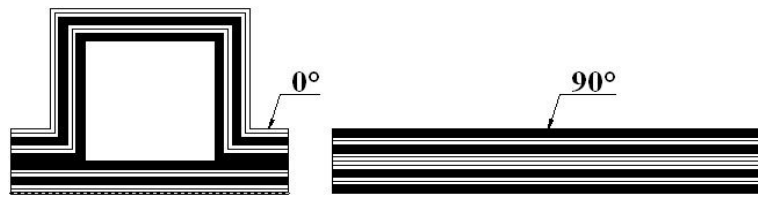


(e) 7 interface (outer angle  $90^\circ$ )

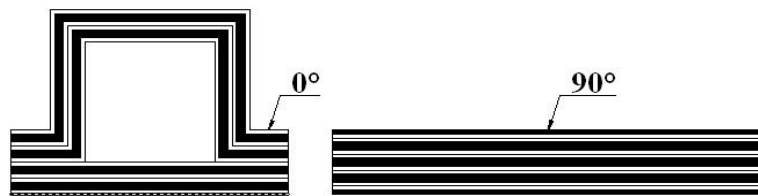
Fig. 2 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members  
(outer angle  $90^\circ$ )



(a) 2 interface (outer angle  $0^\circ$ )



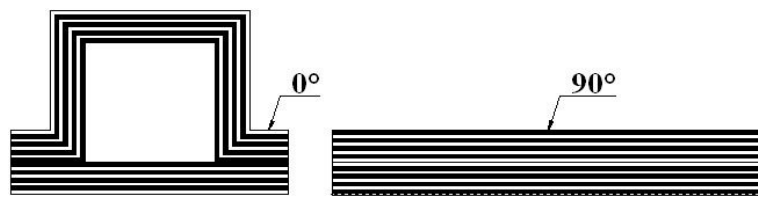
(b) 3 interface (outer angle  $0^\circ$ )



(c) 4 interface (outer angle  $0^\circ$ )

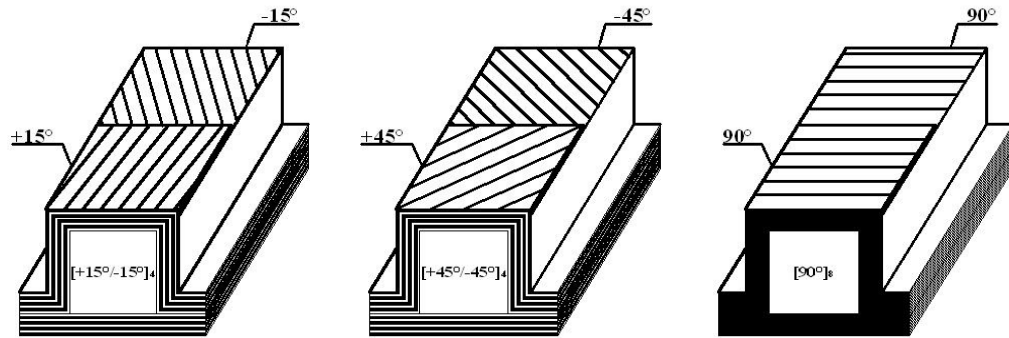


(d) 6 interface (outer angle  $0^\circ$ )



(e) 7 interface (outer angle  $0^\circ$ )

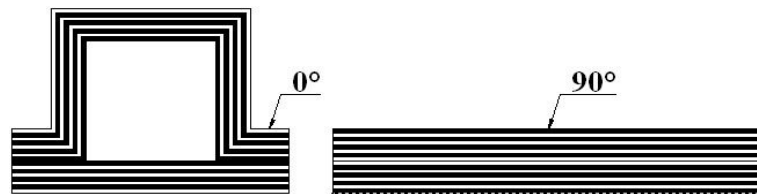
Fig. 3 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members  
(outer angle  $0^\circ$ )



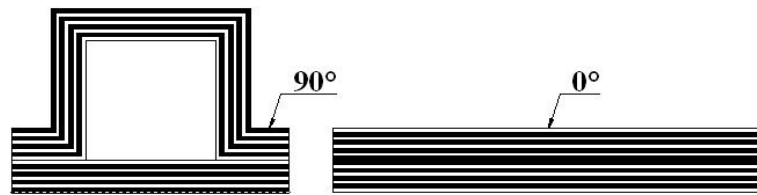
(a) 15°

(b) 45°

(c) 90°



(d) 90°/0°



(d) 0°/90°

Fig. 4 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles)



Photo. 1 Autoclave

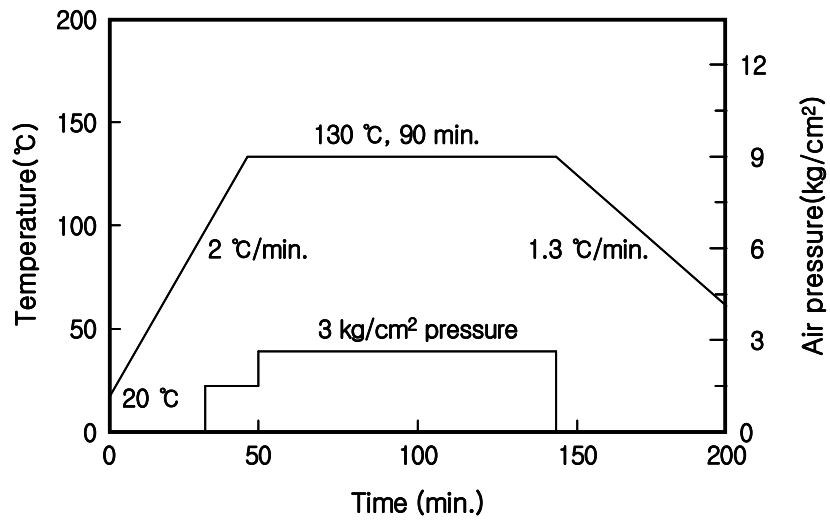


Fig. 5 Curing cycle of CFRP hat-shaped sectional members

## 제 2 절 열습실험

서론에 언급하였듯이 CFRP 복합재는 정적부하 환경에서 금속재료보다 우수한 역학적 특성을 가지고 있기 때문에 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 하지만 충격하중을 받거나 열습의 가혹한 환경하에서는 그 우수한 역학적 특성을 기대하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 설정된 가혹한 환경하에서 CFRP 복합재의 강도특성과 일반적인 환경에서의 정적 및 충격 강도특성을 비교 평가하였다.

그중 첫 번째 가혹한 환경인 열습 환경하에서의 CFRP 복합재 내부의 흡습거동을 파악하고 그로 인한 압축특성을 비교 및 고찰하기 위하여 실험적인 평가의 조건을 다음과 같이 설정하였다.

열습 환경하에서 CFRP 복합재 내부에 수분이 흡수될 경우 강도특성에 대한 정량적인 평가를 하고 이를 구조부재의 설계 데이터로 적용하기 위하여 구조부재를 장시간 사용하는 것으로 가정하여 열습실험을 실시하였다.

본 연구에서 설정한 열습 환경은 Photo. 2의 항온항습기(Waterbath WNB 7-45)를 사용하여 장시간 일정한 온도와 수분이 유지가 될 수 있도록 하였다. Fig. 6은 열습실험에 사용된 항온항습기의 형상과 크기를 도식화 한 것이다.

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 Photo. 4의 시험편 지지대를 이용하여 장시간 잠기게 하였다.

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

흡습률 측정은 항온항습기에 침전시킨 시험편의 외부 물기를 완전히 제거한 후 1/10,000g까지 측정이 가능한 Photo. 3과 같은 전자정밀저울을 사용하여 측정하였다.

흡습률에 사용한 식은 0°와 90°가 대칭하는 적층 복합재료 내의 시간에 따른 수분의 변화를 나타내는 다음 식으로 표현할 수 있다. <sup>43~46)</sup>

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (1)$$

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(1)은 다음 같이 된다.

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

식(2)의 경계조건은

$t = 0$  이고  $0 < z < h$  일때,  $M = M_i$

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

여기서  $h$  : 시험편의 두께

$z$  : 시험편의 두께방향

시험편의 흡습률은 식(2)의 조건을 만족하는 1차원 문제로 가정할 수 있으며, 재료 내에 함유된 수분함량  $G$ 는 식(2)를 재료 두께에 대하여 적분하면 얻을 수 있다. 즉,



$$G = \int_0^h M(z, t) dz \quad (3)$$

식(2)와 (3)을 풀어 정리하면

$$G = \frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp^{[-7.3(D_z \frac{t}{h^2})^{0.75}]} \quad (4)$$

여기서  $M$  : 임의의 시간에서 재료내부의 수분 흡습률

$M_\infty$  : 포화 흡습률

$M_0$  : 초기 흡습률

흡습률은 다음과 같은 결과식을 이용하였다.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (5)$$

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 측정한 흡습시험편의 무게와의 차를 백분율로 환산하는 식(5)를 이용하여 측정하였다.



Photo. 2 Hot waterbath

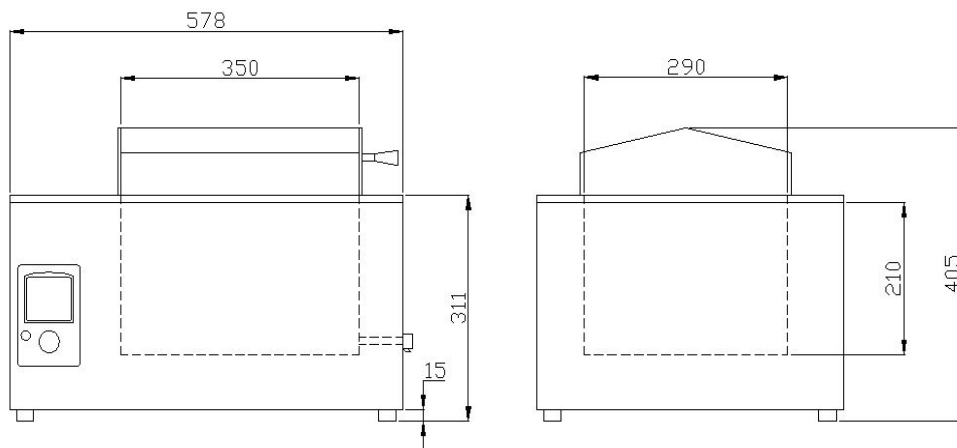


Fig. 6 Dimensions of hot waterbath

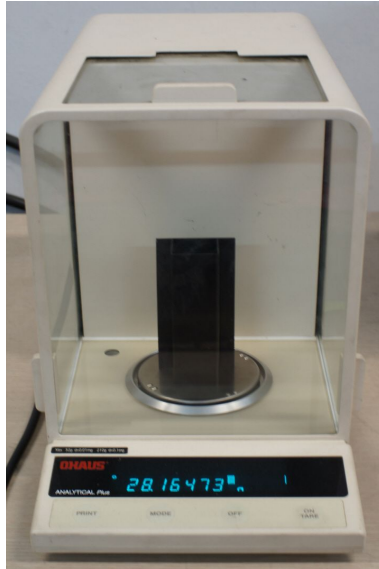


Photo. 3 Electronic scale



Photo. 4 Specimen holder

### 제 3 절 압괴실험

본 연구에서는 열습 환경과 축압축 하중을 받는 환경에서의 각각의 특성을 파악한 후 설정된 환경이 종료되는 시점에서 정적 압괴특성과 충격 압괴특성을 파악함으로써 가혹한 환경에서의 강도저하를 평가 하였다.

정적 압괴실험에서는 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 변형을 속도의 영향이 나타나지 않는 10mm/min의 균일한 압축하중을 가하여 축압축 실험을 실시하였다.

열습실험을 통한 수분의 흡수가 강도에 미치는 특성을 평가하기 위하여 최외각 층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편과 적층각도 변화 시험편에 대해서 정적 압괴실험을 실시하였다.

압괴실험 후 얻어진 Fig. 7과 같은 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 이를 식(6)과 같이 적분하여 흡수에너지를 구하였으며, 시험편의 단면적으로 평균압괴하중을 나눈으로써 평균 압괴응력을 구할 수 있었다.

$$E_a = \int_{L_0}^L F dl \quad (6)$$

$E_a$ 는 시험편에 흡수된 에너지를 나타내며,  $F$ 는 압괴하중,  $l$ 은 압괴과정에서 압괴된 시험편의 길이를 나타낸다.

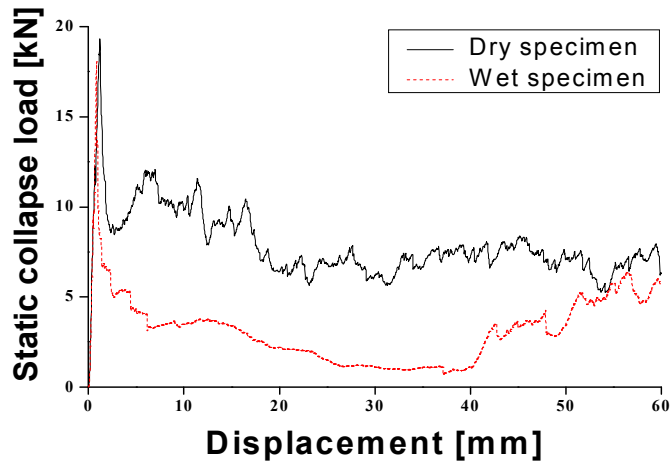


Fig. 7 Load-displacement curve of collapsed specimens (static experiment)

충격 압괴실험에서는 40kg의 크로스헤드를 시험편이 흡수할 수 있는 최대 에너지 범위 내에서 시험편의 수직방향으로 자유낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하고 이를 로드셀을 이용하여 계측하는 방식의 장치를 사용하여 Fig. 8과 같은 흡습 시험편과 무흡습 시험편의 하중 및 변위를 측정할 수 있었다.

실험장치의 구성으로는 충격 압괴과정에서 시험편에 편심 되어 충격하중이 가해지는 것을 방지하기 위하여 4개의 가이드바와 2층 구조로 제작된 크로스헤드를 사용함으로써 정량적인 데이터를 얻을 수 있었다.

직접적인 충격하중에 대한 데이터를 계측하는 Fig. 9에서의 로드셀은 연강환봉을 절삭가공하여 2개의 원판이 연결된 원주 형태로 제작하였으며, 로드셀 상단에는 시험편을 위치시키고 하단을 볼트로 고정시켰다.

충격데이터를 얻는 방법으로는 로드셀 중앙에 스트레인게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)을 원주의 중심축을 중심으로 축방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착한 Full bridge 방식을 사용하였다.

시험편에 충격하중이 가해질 때 저항 값의 변화를 로드셀에 부착된 스트레인게이지를 통해 브리지박스(Bridge circuits)와 Photo. 5 (b)의 동적변형증폭기

(Dynamic strain amplifier)에서 증폭된 전압 값을 Photo. 5 (c)의 파형 기억장치 DSO(Digital storage oscilloscope)를 거친 후 하중 값을 얻을 수 있었다.

충격하중에 대한 시험편 변위의 측정은 크로스헤드에 부착된 표적의 백색부와 흑색부의 경계선의 변화를 전압변화로 측정하는 Photo. 5 (a)의 광학식 변위계 (Zimmer OHG사, 100F)를 이용하여 비접촉식 변위계측을 하였다.

충격 압력실험에 사용된 시험장치와 충격장치의 구성도를 Fig. 9에 나타내었으며, 충격실험에 사용된 시스템 구성장치와 구성도를 Photo. 5와 Fig. 10에 나타냈다.

충격하중의 계산은 측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격 압력이 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 나타냄으로써 흡수에너지  $E_a$ , 전체흡수에너지  $E_T$ , 및 시험편의 변형된 길이  $\delta$ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압력길이가 동일하지 않았기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압력되었다고 가정한 후 식 (7)과 같이 Magee와 Thornton이 제안한 압력 효율의 역수<sup>10)</sup>를 사용하여 식 (8)을 이용한 총흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (7)$$

여기서,  $\rho_0$  는 압력효율,  $L$ 은 시험편의 길이,  $\delta_f$ 는 충격 압력실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (8)$$

여기서,  $E_T$ 는 전체흡수에너지,  $E_a$ 는 흡수에너지 이다.

로드셀 위의 시험편이 흡수하는 이론적인 충격에너지  $E_I$ 는 식 (9)와 같이 크로스헤드의 위치에너지와 같으므로 시험편에 따라 시험편의 압괴형상을 관찰하기 가장 적절한 충격에너지 419.44J를 가하였다.

시험편에 가해지는 충격에너지  $E_I$ 는 다음과 같다.

$$E_I = mgh \quad (9)$$

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

하지만 적층각도 변화를 갖는 시험편에서 적층각이 90°인 시험편의 경우 419.44J의 충격에너지를 가했을 때 크로스헤드가 로드셀에 닿게 됨으로써 압괴특성을 파악할 수 없을 정도의 시험편 파괴가 발생하였다.

따라서 적층각도 90°시험편의 충격 압괴실험의 경우는 해석에 필요한 충분한 압괴가 이루어지도록 341.04J의 충격에너지를 가하여 실험을 실시하였다.

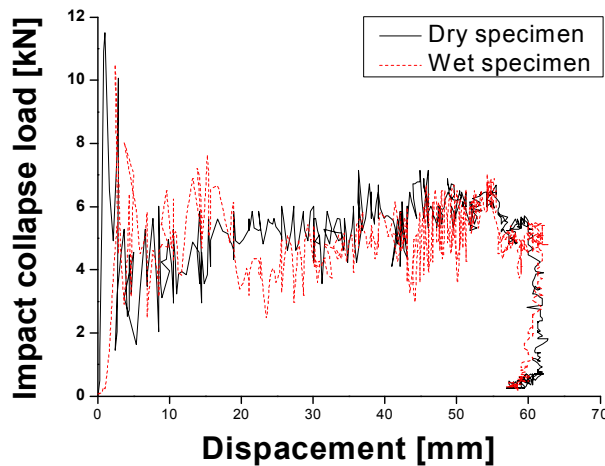


Fig. 8 Load-displacement curve of collapsed specimens (impact experiment)

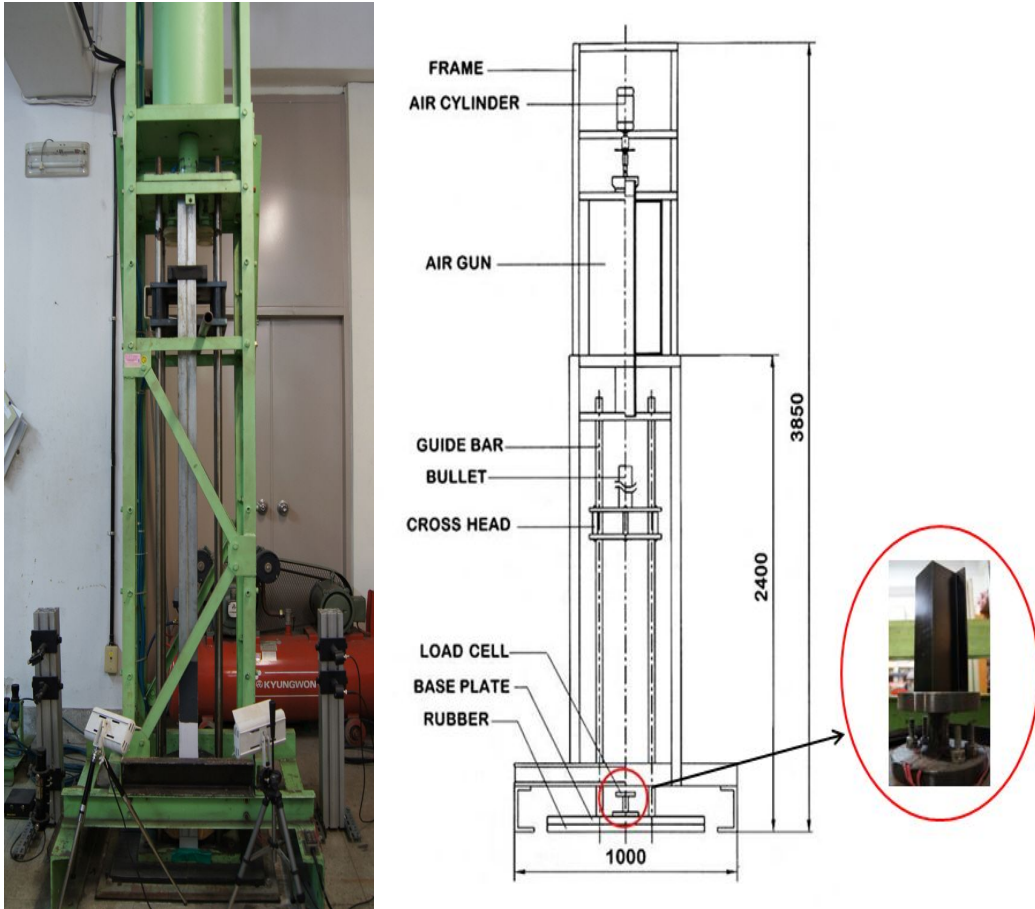


Fig. 9 Impact testing device

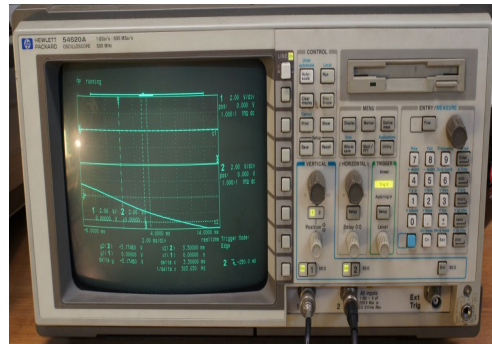




(a) Optical displacement device



(b) Dynamic strain amplifier



(c) Oscilloscope

Photo. 5 Devices of impact testing

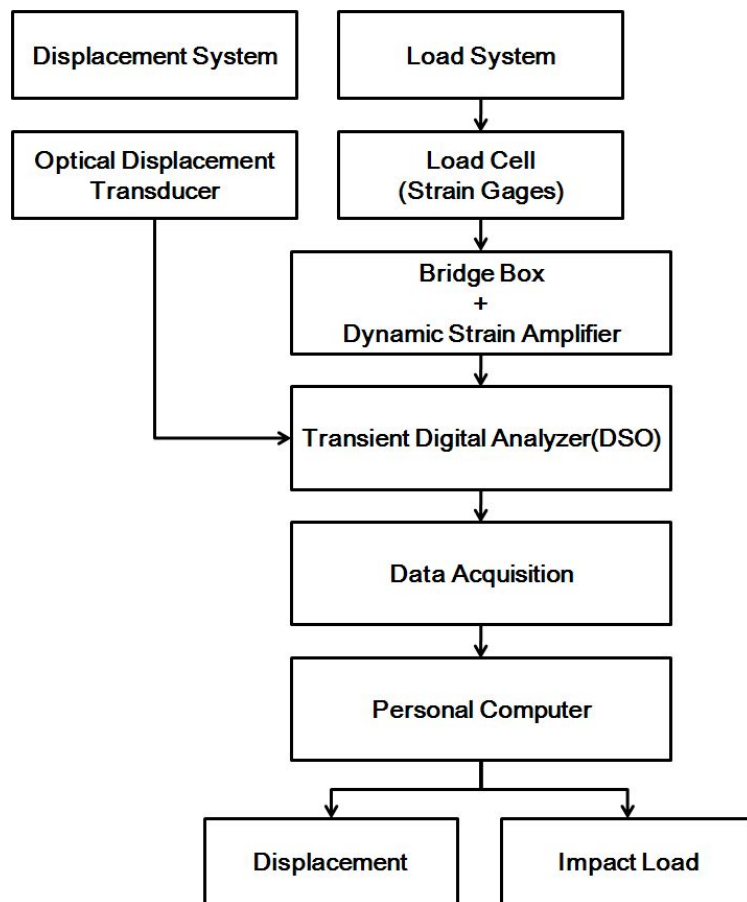


Fig. 10 Diagram of measurement system

## 제 3 장 실험결과

### 제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 흡습거동

열습실험을 통해 CFRP 모자형 단면부재의 흡습률을 측정해본 결과 약 2500시간이 경과되면서 흡습률 곡선의 경사가 완만해 짐을 알 수 있었으며, 이 시점에서 시험편 내부에 수분이 포화상태가 되었음을 판단하고 열습실험을 중단하였다. CFRP 모자형 단면부재의 흡습률을 측정한 결과 시험편의 종류와 시험편의 제작 과정으로 인하여 초기에 수분 흡수의 차이가 발생하였지만, 시간이 경과함에 따라 대부분 시험편에서의 흡습은 일정하게 평가됨을 알 수 있었다.

흡습률을 비교해본 결과 모든 시험편에서 시험편의 섬유방향이 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.

항온항습조를 이용하여 매 72시간마다 시험편의 흡습률을 측정한 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.

## 1. 계면수 변화에 따른 흡습거동

가혹한 환경하에서 적층구성의 변화를 갖는 시험편 중 시험편의 축방향을 중심으로 최외각층  $90^\circ$ 와  $0^\circ$ 의 조건에 따른 흡습률을 고찰하기 위하여 계면수 변화 시험편에 대한 흡습거동을 살펴보았다.

흡습거동을 파악하기 위하여 매 측정시마다 흡습된 시험편의 무게 및 흡습률의 증가를 시험편 내부의 흡습거동으로 파악을 하고 흡습 증가의 그래프로 나타냈다.

Figs. 11, 12는 최외각층  $90^\circ$ 의 조건을 갖는 시험편이 포화상태에 달했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 흡습률 변화 및 흡습률 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Figs. 13, 14는 최외각층  $0^\circ$ 의 조건을 갖는 시험편이 포화상태에 달했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 흡습률 변화 및 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Fig. 15는 최외각층 변화에 따른 계면수간의 흡습률 차이를 비교한 그래프이며, Table 4에서는 최외각층 변화에 따른 계면수간의 흡습률을 나타냈다.

Tables 5, 6에서는 최외각층  $90^\circ$  및  $0^\circ$ 의 조건을 갖는 열습실험 전의 무흡습 시험편 무게와 열습실험 후의 흡습 시험편 무게 및 그에 따른 흡습률을 나타냈다.

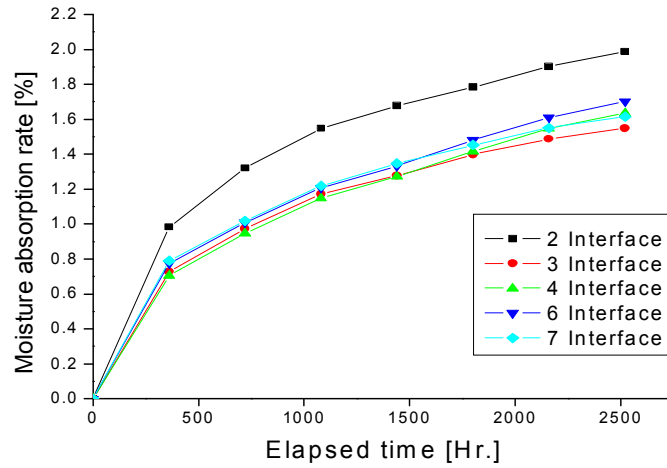


Fig. 11 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle  $90^\circ$ )

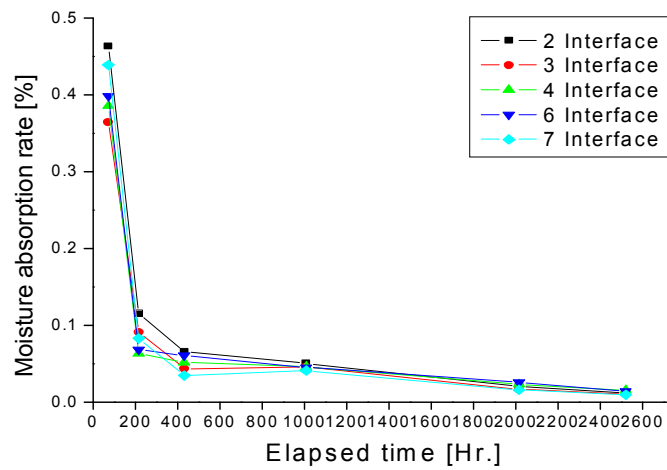


Fig. 12 Increase of moisture absorption rate (outer angle  $90^\circ$ )

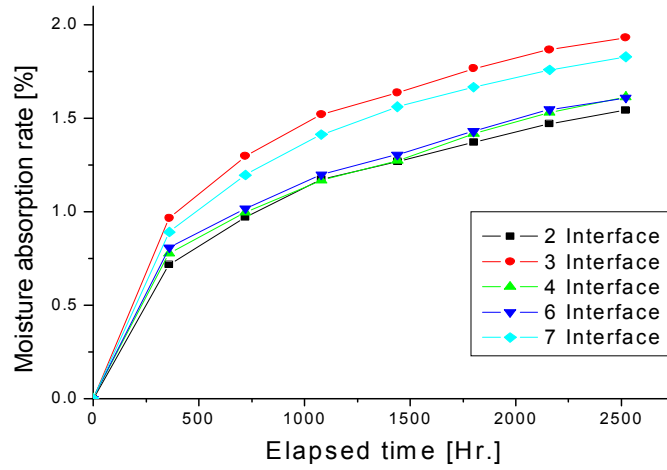


Fig. 13 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle  $0^\circ$ )

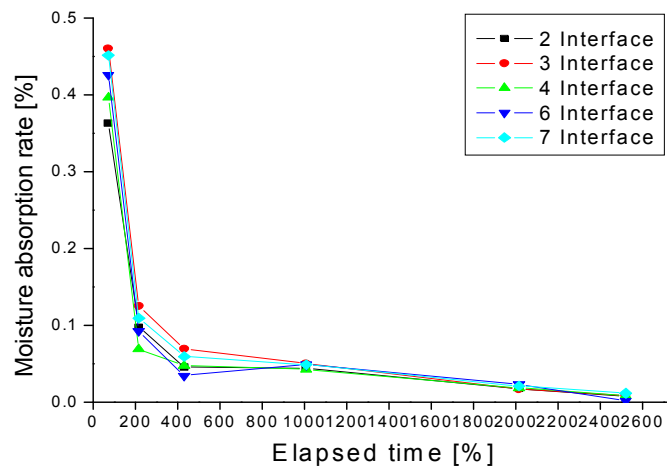


Fig. 14 Increase of moisture absorption rate (outer angle  $0^\circ$ )

Table 4 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members  
(interface numbers)

Specimen		$M$ [%]	Specimen		$M$ [%]
2	Outer angle 90°	1.988	2	Outer angle 0°	1.543
3		1.548	3		1.932
4		1.634	4		1.615
6		1.702	6		1.610
7		1.614	7		1.829

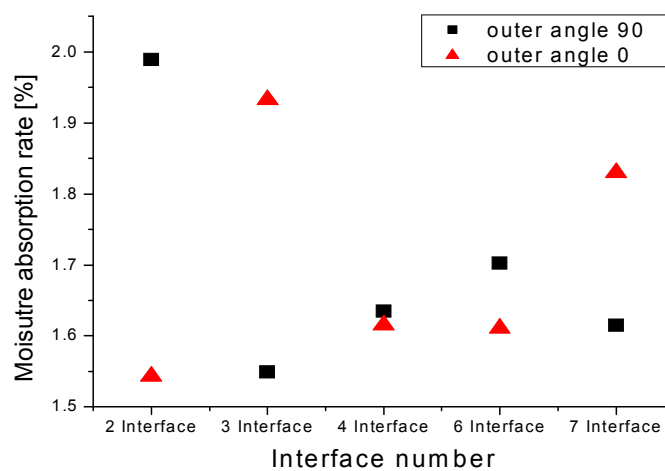


Fig. 15 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for  
variation of outer angles

Table 5 Hygrothermal experiment results of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°)

Specimen	Conditions	$W_d$ [g]	$W_m$ [g]	$M$ [%]	
2 interface	$[90^\circ_2/0^\circ_2]_s$	1	29.871	30.373	1.680
		2	29.680	30.338	2.216
		3	29.882	30.365	1.616
		4	30.004	30.674	2.233
		5	29.561	30.172	2.060
		6	29.542	30.170	2.125
3 interface	$[0^\circ_2/90^\circ_2]_2$	1	30.300	30.746	1.471
		2	30.119	30.59	1.563
		3	30.004	30.485	1.603
		4	30.124	30.598	1.573
		5	29.850	30.314	1.554
		6	30.083	30.542	1.525
4 interface	$[90^\circ/0^\circ]_{s2}$	1	29.692	30.178	1.636
		2	29.975	30.478	1.678
		3	30.114	30.596	1.600
		4	29.961	30.459	1.662
		5	29.851	30.323	1.581
		6	29.888	30.380	1.646
6 interface	$[90^\circ/0^\circ]_{2s}$	1	29.615	30.117	1.695
		2	29.998	30.512	1.713
		3	29.470	29.954	1.642
		4	29.852	30.371	1.738
		5	30.167	30.706	1.786
		6	29.634	30.120	1.640
7 interface	$[0^\circ/90^\circ]_4$	1	30.175	30.681	1.676
		2	29.976	30.420	1.481
		3	29.811	30.283	1.583
		4	30.607	31.096	1.597
		5	29.815	30.283	1.569
		6	30.429	30.971	1.781



Table 6 Hygrothermal experiment results of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°)

Specimen	Conditions	$W_d$ [g]	$W_m$ [g]	$M$ [%]
2 interface	1	30.558	31.041	1.580
	2	30.235	30.701	1.541
	3	30.599	31.081	1.575
	4	30.336	30.802	1.536
	5	30.337	30.789	1.489
	6	30.348	30.820	1.535
3 interface	1	29.549	30.155	2.050
	2	29.825	30.448	2.088
	3	29.494	30.119	2.119
	4	29.698	30.172	1.596
	5	30.003	30.505	1.673
	6	29.491	30.101	2.068
4 interface	1	30.413	30.898	1.594
	2	30.446	30.934	1.602
	3	30.251	30.735	1.599
	4	30.579	31.085	1.654
	5	29.946	30.424	1.596
	6	30.353	30.852	1.643
6 interface	1	30.108	30.612	1.634
	2	30.364	30.878	1.686
	3	29.929	30.395	1.557
	4	30.477	30.957	1.574
	5	30.350	30.821	1.551
	6	30.397	30.901	1.658
7 interface	1	29.813	30.341	1.771
	2	29.853	30.381	1.768
	3	30.414	30.983	1.870
	4	30.277	30.845	1.876
	5	29.964	30.523	1.865
	6	29.748	30.291	1.825

Figs. 11~15에서 각 구간별 흡습률 및 증가경향을 살펴본 결과, 실험 초기부터 흡습률이 0.5%가 될 때 까지는 수분의 흡수가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었으며 경과되었던 시간은 약 200시간이 소요가 되었다. 이후 흡습률이 약 1.0%에 가까워지는 400시간이 경과되면서 점차 흡습률의 증가가 완만해짐을 알 수 있었으며 경과 시간 또한 현격하게 증가함을 알 수 있었다. 그리고 약 2000시간이 경과된 시점에야 비로소 시험편 내부가 수분의 포화상태에 도달하게 됨을 알 수 있었으며, 약 2500시간이 경과되면서 모든 시험편에서 흡습률의 증가는 거의 일정하게 나타남을 알 수 있었다.

각각의 시험편 내부에 수분이 포화상태가 되는 시점에서 흡습률을 측정한 결과 Figs. 2, 3의 적층구성에 따라 흡습률의 차이가 나타남을 알 수 있었다.

최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편에서 흡습률의 증가치가 매우 높음을 알 수 있었다. 이는 수분이 흡수가 되는 0°방향의 섬유배향이 시험편 단면 부분에서는 시험편의 표면과 안쪽에 4ply로 두껍게 적층되어 있고 플렌지 부분에서는 시험편 표면에 가깝게 4ply씩 적층되어 있기 때문에 그 흡습률 또한 다른 시험편들에 비해 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 이와 반대로 같은 적층구성이지만 적층순서를 달리한 최외각층 0°의 조건을 갖는 2계면 시험편의 경우 0°방향의 섬유배향이 시험편 단면부분에서는 모자형과 평판형의 중심에 위치하면서 시험편 표면과는 멀리 떨어져 있기 때문에 그 흡습률 차이가 발생한 것으로 사료된다.

또한 최외각층 0°의 조건을 갖는 3계면과 7계면 시험편의 경우 흡습률이 높음을 알 수 있었다. 특히 3계면 시험편의 경우 시험편 단면부분에는 0°방향의 섬유배향이, 플렌지 부분에서는 90°방향의 섬유배향이 시험편 안쪽과 표면에 집중됨으로써 수분의 흡수가 가장 유리하였다고 사료된다.

따라서 열습실험 후 시험편 내부의 흡습거동을 살펴본 결과 계면수가 적을수록, 적층된 0°방향 계면의 두께가 두꺼울수록, 0°방향 계면이 시험편 표면층에서 가까울수록 흡습률의 증가가 큰 것을 알 수 있었다.

## 2. 적층각도 변화에 따른 흡습거동

적층구성에 따른 수분의 흡습거동 및 그에 따른 강도를 평가하기 위하여 시험편 제작 시 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편과 적층각도 변화를 갖는 시험편을 제작한 후 가혹한 환경 하에서의 실험을 실시하였다.

적층각도 변화를 갖는 시험편의 제작에는 CFRP 프리프레그 시트의 섬유배향각을 시험편 축방향을 중심으로  $[+n/-n]_4$ 의 구성을 갖도록 적층한 후 성형하였으며, 제작된 적층각도 변화 시험편에 대해 열습실험을 실시하였다.

흡습거동을 파악하기 위하여 매 측정시마다 흡습된 시험편 무게 및 흡습률 증가를 시험편 내부의 흡습거동으로 간주한 다음 흡습 증가의 그래프로 나타냈다.

Figs. 16, 17은 적층각도 변화를 갖는 시험편이 포화상태에 달했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 흡습률 변화 및 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Table 7과 Fig. 18은 적층각도 변화에 따른 흡습률을 나타낸 것이며, Table 8에서는 열습실험 전의 무흡습 시험편 무게와 열습실험 후의 흡습 시험편 무게 및 그에 따른 흡습률을 나타냈다.

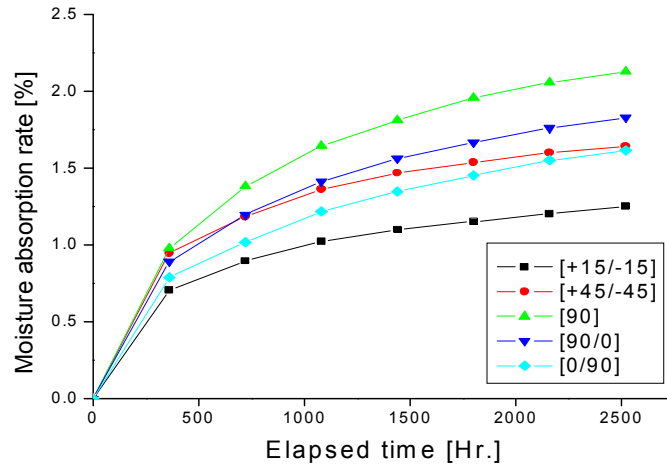


Fig. 16 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles)

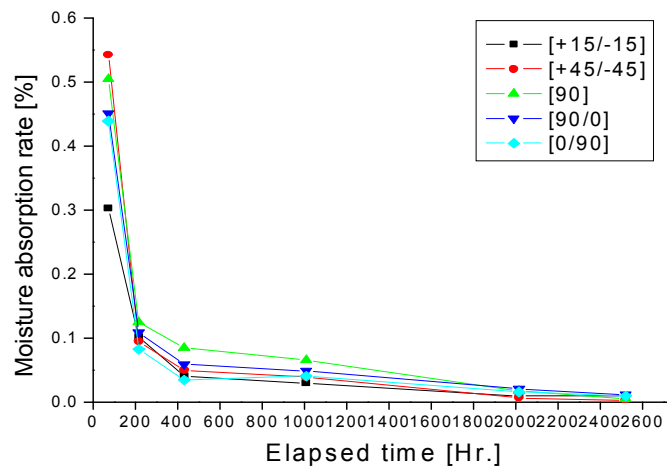


Fig. 17 Increase of moisture absorption rate (stacking angles)

Table 7 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members  
(stacking angles)

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

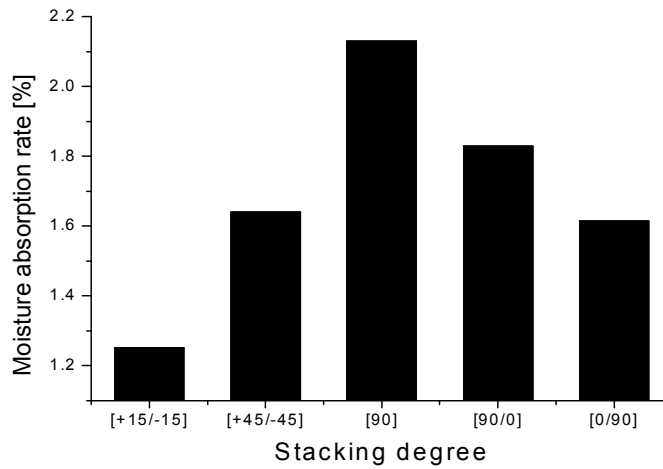


Fig. 18 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for  
variation of stacking angles

Table 8 Hygrothermal experiment results of CFRP hat-shaped sectional members (stacking angles)

Specimen	Conditions	$W_d$ [g]	$W_m$ [g]	$M$ [%]	
15°	[+15°/-15°] <sub>4</sub>	1	29.886	30.262	1.258
		2	30.250	30.631	1.259
		3	30.309	30.689	1.253
		4	29.928	30.287	1.199
		5	30.003	30.374	1.236
		6	29.960	30.352	1.308
45°	[+45°/-45°] <sub>4</sub>	1	30.073	30.561	1.622
		2	29.804	30.289	1.627
		3	29.688	30.173	1.633
		4	29.829	30.327	1.669
		5	29.735	30.215	1.614
		6	29.594	30.091	1.679
90°	[90°] <sub>8</sub>	1	29.394	30.021	2.133
		2	29.285	29.905	2.117
		3	29.504	30.119	2.084
		4	29.242	29.891	2.219
		5	29.415	30.038	2.117
		6	29.726	30.352	2.105
90°/0°	[90°/0°] <sub>4</sub>	1	29.813	30.341	1.771
		2	29.853	30.381	1.768
		3	30.414	30.983	1.870
		4	30.277	30.845	1.876
		5	29.964	30.523	1.865
		6	29.748	30.291	1.825
0°/90°	[0°/90°] <sub>4</sub>	1	30.175	30.681	1.676
		2	29.976	30.420	1.481
		3	29.811	30.283	1.583
		4	30.607	31.096	1.597
		5	29.815	30.283	1.569
		6	30.429	30.971	1.781

Figs. 16~18의 적층각도 변화를 갖는 CFRP 모자형 단면부재의 열습실험 결과 Fig. 4의 적층구성에 따라 흡습률의 차이가 나타남을 알 수 있었다.

시험편 내부로 수분 흡수는 시험편의 섬유배향이 수분에 노출되는 방향으로 관찰할 때 90° 이하의 섬유배향, 즉 +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 플렌지 부분에서 수분의 흡수가 가장 큼을 알 수 있었다. 흡습률 증가가 가장 큰 시험편은 적층방향 [90°]를 갖는 90° 시험편임을 알 수 있었다. 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°/-15°]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°/90° 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 흡수에 용이 하였던 것으로 사료된다.

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

동일한 적층 구성이었지만 초기 적층방향의 차이로 인하여 0°/90° 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 계면수 변화에 따른 충격 압괴

차량의 구조부재 형상을 갖는 CFRP 모자형 단면부재를 무흡습 시험편과 열습 실험을 실시한 흡습 시험편으로 분류한 후 충격 압괴실험을 실시하여 수분의 흡수가 CFRP 모자형 단면부재의 압괴특성에 미치는 영향을 비교 및 고찰하였다.

본 연구에서는 시험편 제작 시 CFRP 모자형 단면부재의 압괴특성이 잘 평가가 될 수 있으면서 경량화설계가 가능한 두께로 제작하기 위하여 모자형과 평판을 각각 CFRP 프리프레그 시트 8매씩으로 적층하여 제작하였다.

적층구성의 변화에 따른 압괴특성을 평가하기 위하여 시험편 축방향을 중심으로 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면의 계면수 변화 시험편을 제작하였다.

### 1. 무흡습 시험편

무흡습 CFRP 모자형 단면부재에 대하여 수직식 낙하 충격시험장치를 이용한 충격 압괴실험을 실시한 후 하중-변위의 변형과정을 얻을 수 있었다.

Figs. 19~23과 Photos. 6~10은 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 충격 압괴실험 후의 시험편의 압괴형상을 나타냈다.

Figs. 24~28과 Photos. 11~15는 최외각층 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 충격 압괴실험 후의 시험편의 압괴형상을 나타냈다.



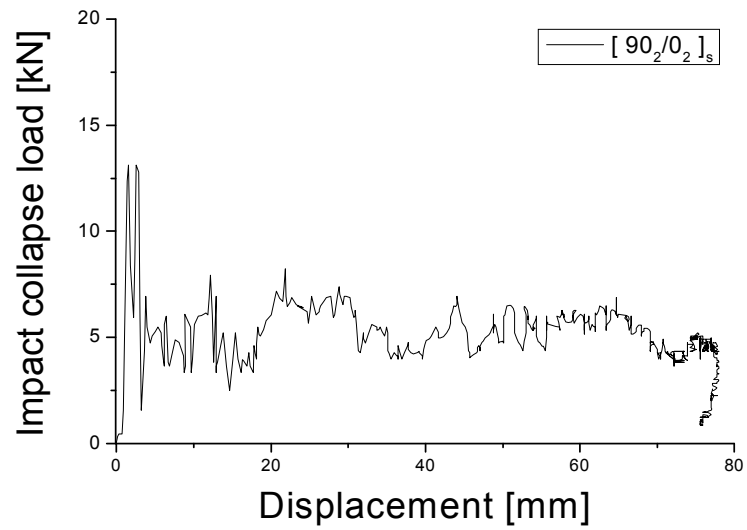


Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle  $90^\circ$ )



Photo. 6 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle  $90^\circ$ )

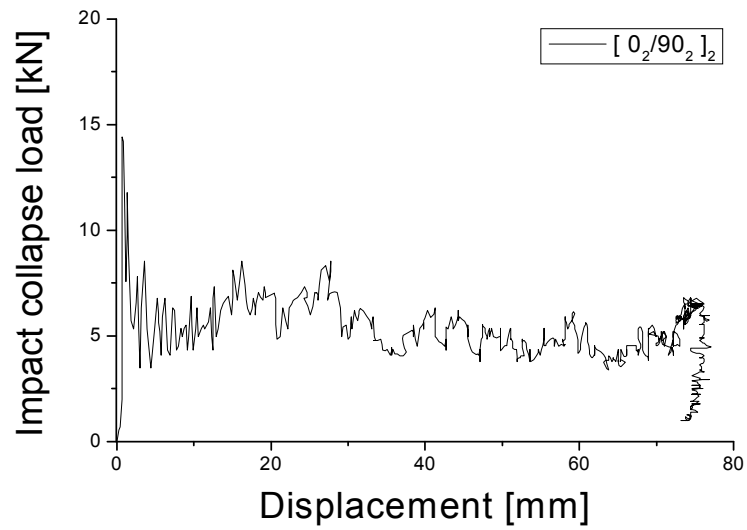


Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle 90°)



Photo. 7 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle 90°)

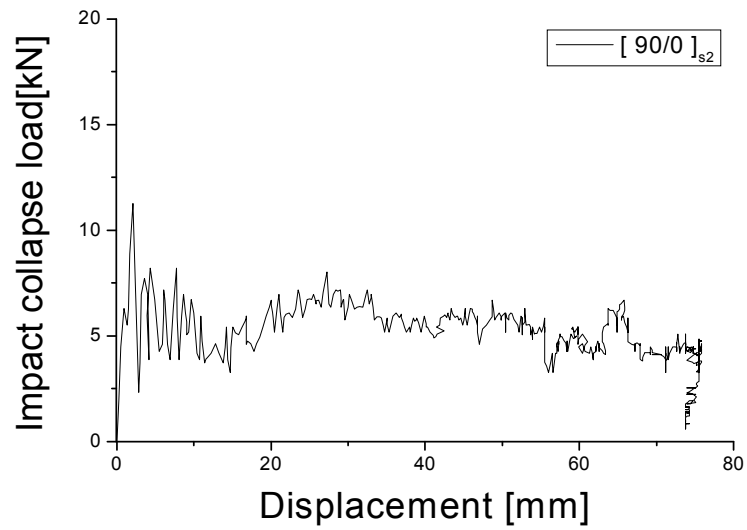


Fig. 21 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle 90°)



Photo. 8 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle 90°)

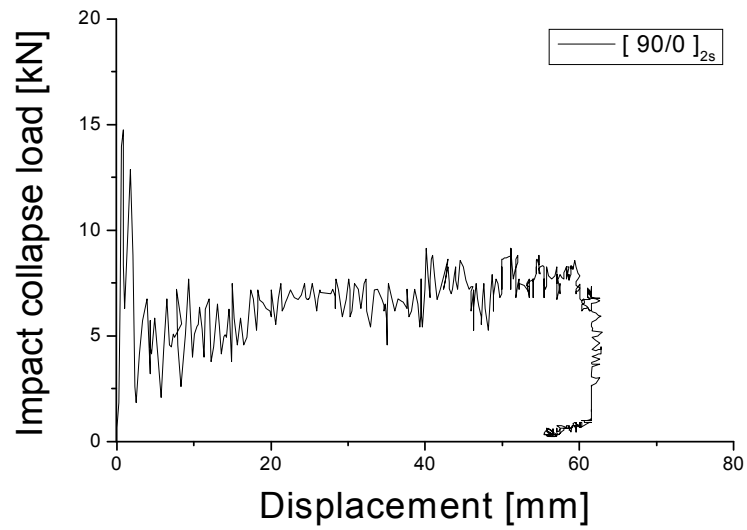


Fig. 22 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle 90°)



Photo. 9 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle 90°)

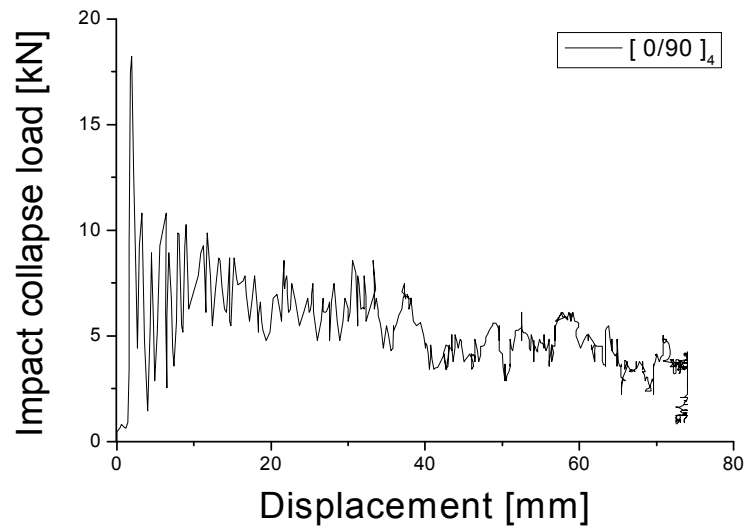


Fig. 23 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle 90°)



Photo. 10 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle 90°)

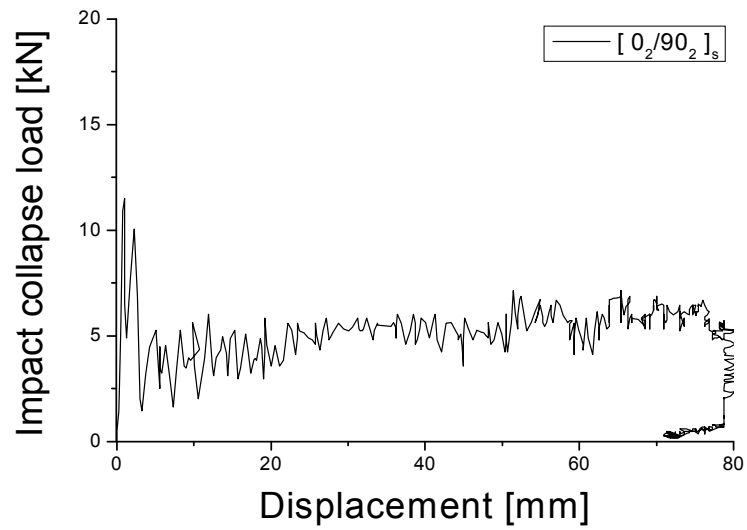


Fig. 24 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle 0°)



Photo. 11 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (dry specimen, outer angle 0°)

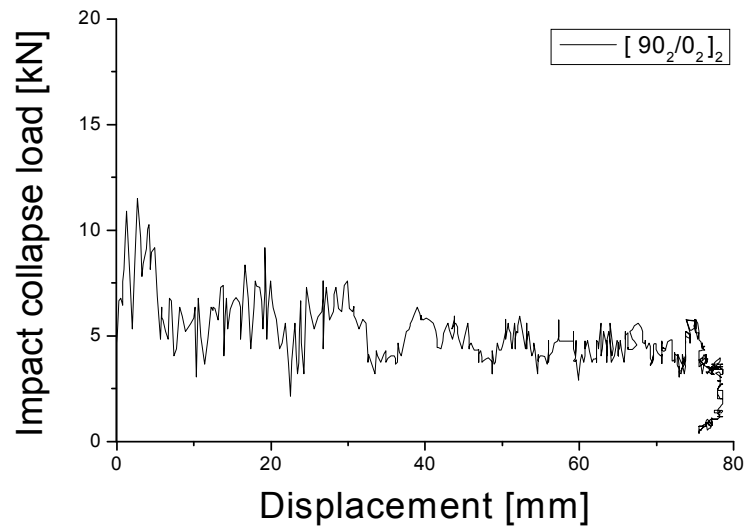


Fig. 25 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle 0°)



Photo. 12 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (dry specimen, outer angle 0°)

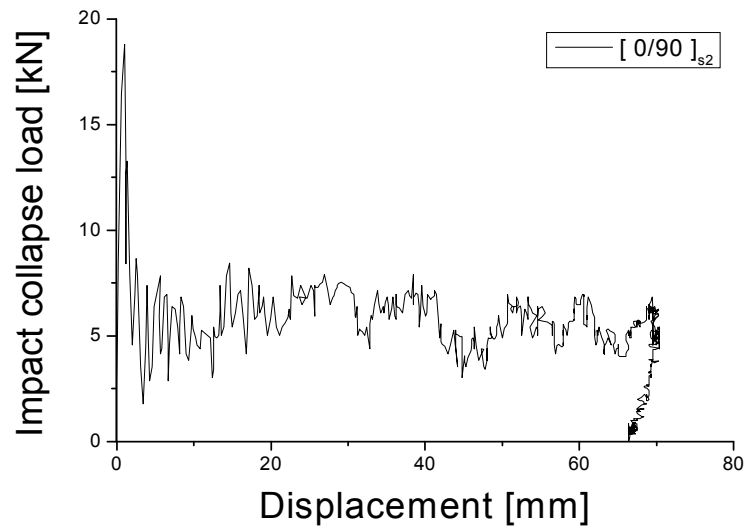


Fig. 26 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle 0°)



Photo. 13 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (dry specimen, outer angle 0°)



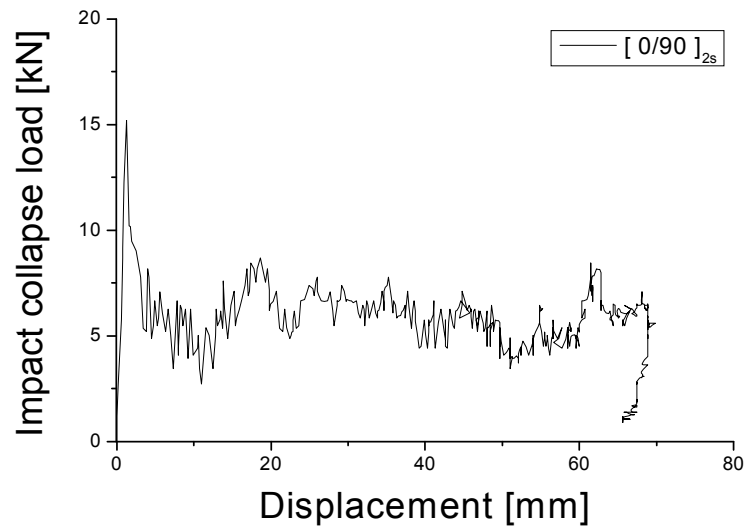


Fig. 27 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle  $0^\circ$ )

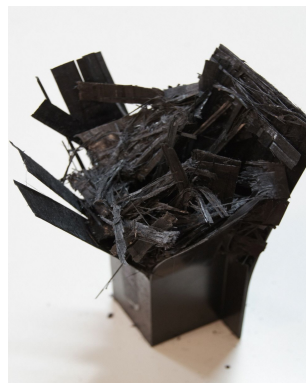


Photo. 14 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (dry specimen, outer angle  $0^\circ$ )

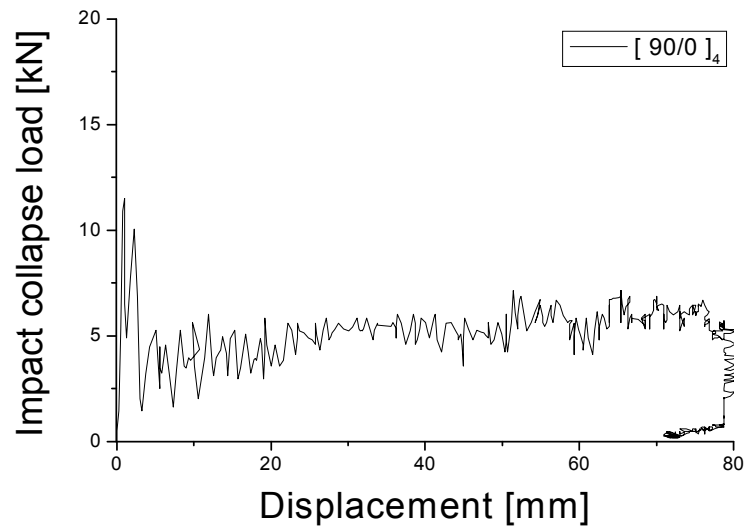


Fig. 28 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle  $0^\circ$ )



Photo. 15 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (dry specimen, outer angle  $0^\circ$ )

## 2. 흡습 시험편

열습실험 후 수분이 포화상태가 되었던 흡습 시험편에 대하여 충격 압력실험을 실시한 후 하중-변위의 변형과정을 얻을 수 있었다.

Figs. 29~33과 Photos. 16~20은 최외각층  $90^\circ$ 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 충격 압력실험 후의 시험편의 압력형상을 나타냈다.

Figs. 34~38과 Photos. 21~25는 최외각층  $0^\circ$ 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 충격 압력실험 후의 시험편의 압력형상을 나타냈다.

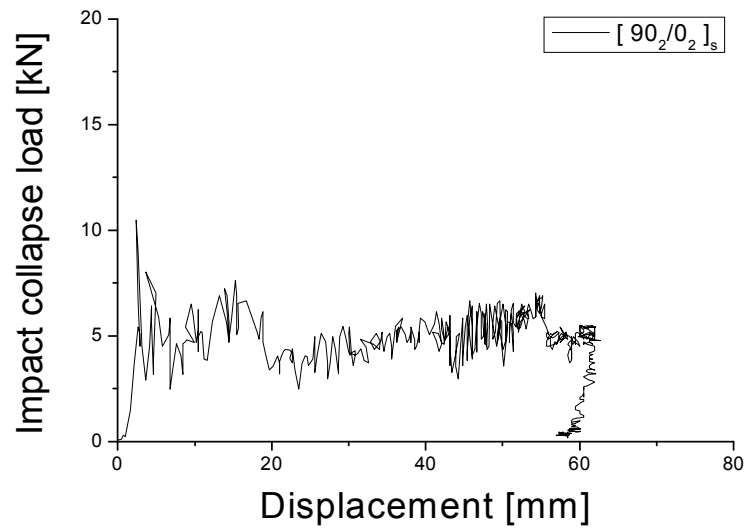


Fig. 29 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )



Photo. 16 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )

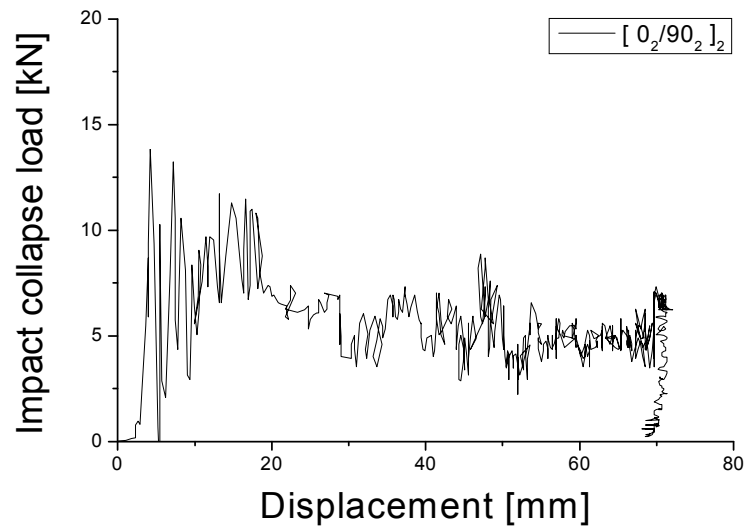


Fig. 30 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )



Photo. 17 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )

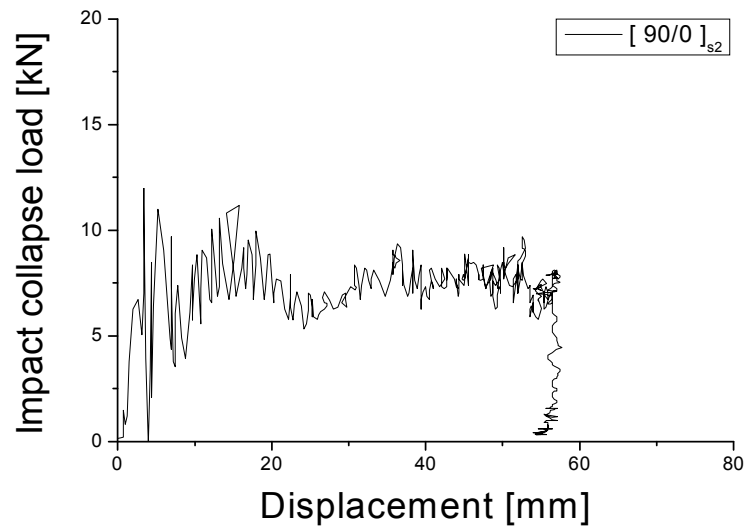


Fig. 31 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )

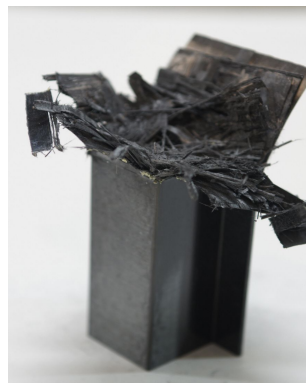


Photo. 18 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )

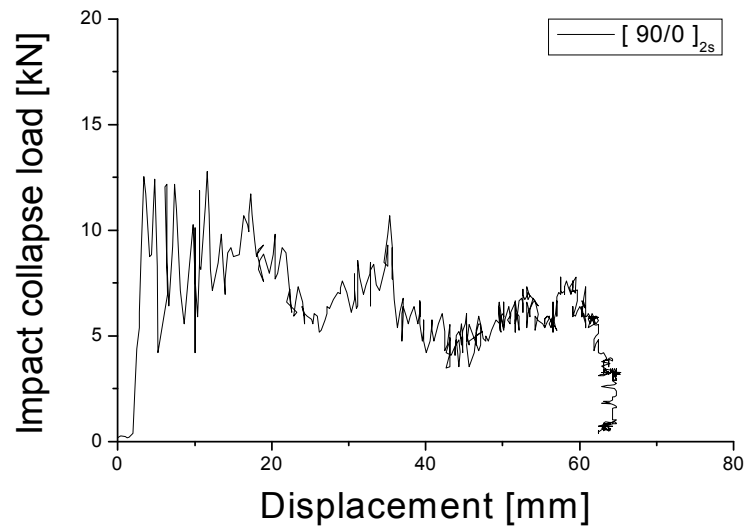


Fig. 32 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )



Photo. 19 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (wet specimen, outer angle  $90^\circ$ )

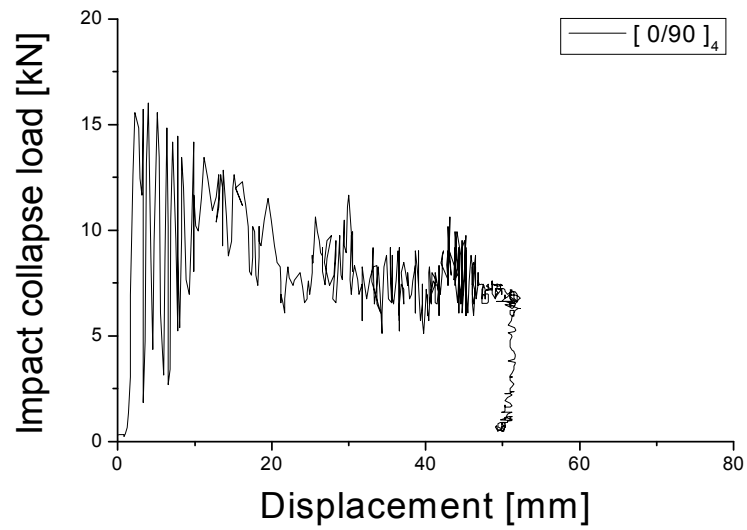


Fig. 33 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (wet specimen, outer angle 90°)



Photo. 20 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (wet specimen, outer angle 90°)



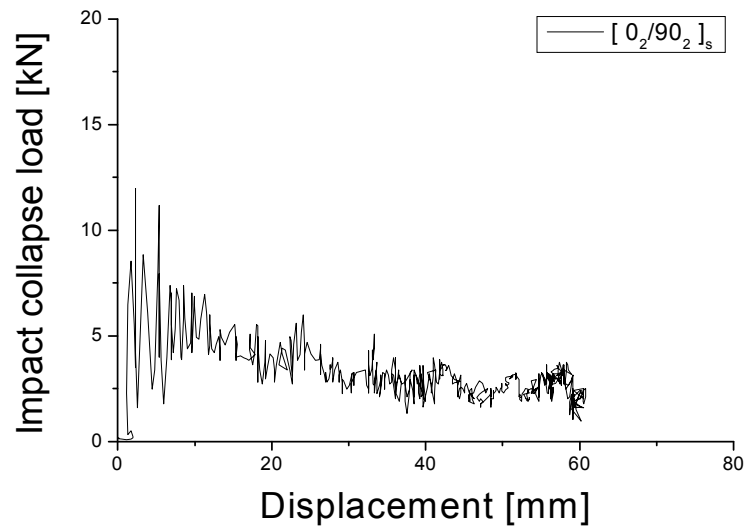


Fig. 34 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle 0°)



Photo. 21 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 2 interface (wet specimen, outer angle 0°)

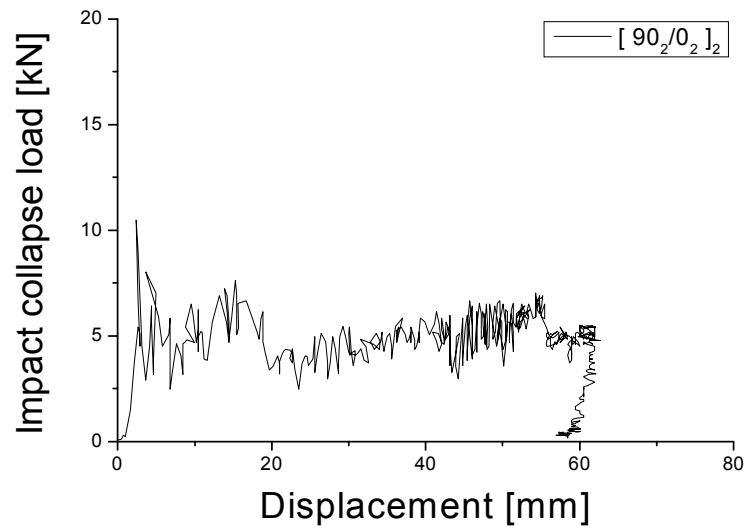


Fig. 35 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )



Photo. 22 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 3 interface (wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )

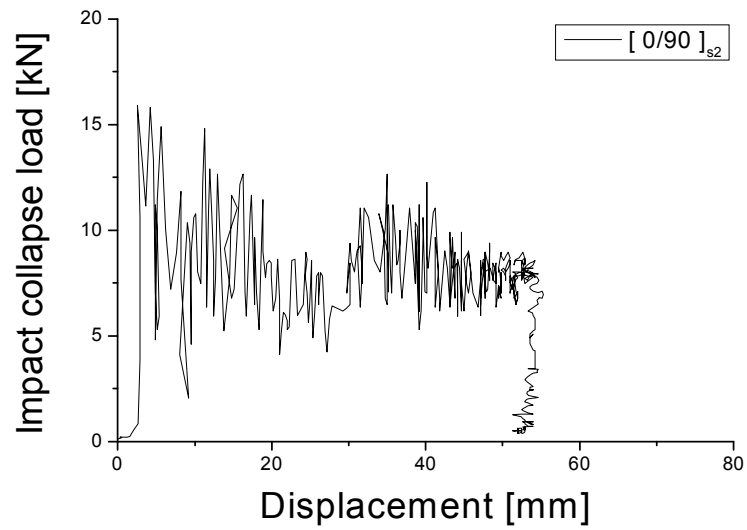


Fig. 36 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )



Photo. 23 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 4 interface (wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )

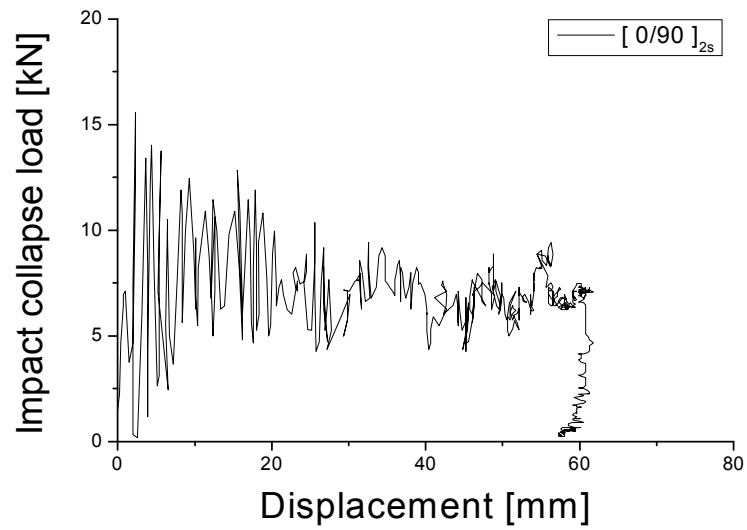


Fig. 37 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )



Photo. 24 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 6 interface (wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )

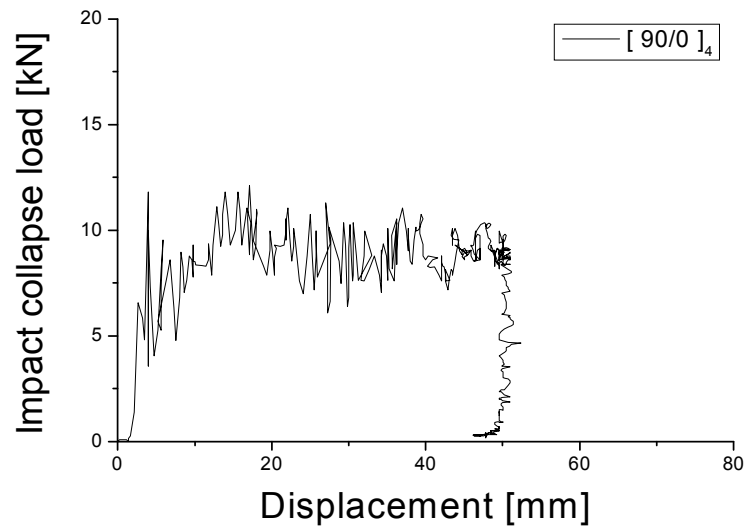


Fig. 38 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (wet specimen, outer angle 0°)



Photo. 25 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 7 interface (wet specimen, outer angle 0°)

### 제 3 절 적층각도 변화에 따른 충격 압괴

적층 각도 변화에 따른 시험편에 대하여 충격 압괴실험을 실시한 후의 압괴특성을 비교 및 고찰하였다.

또한 수분의 흡수로 인한 압괴특성의 변화를 고찰하기 위하여 무흡습 시험편과 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 적층하였다.

모든 시험편은 모자형과 평판을 8ply가 되도록 적층하였다.

#### 1. 무흡습 시험편

무흡습 CFRP 모자형 단면부재에 대하여 충격 압괴실험을 실시한 후 하중-변위의 변형과정을 얻을 수 있었다.

Figs. 39~43과 Photos. 26~30은 적층각도가  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $90^\circ/0^\circ$  및  $0^\circ/90^\circ$  인 시험편의 하중-변위 선도 및 충격 압괴실험 후의 시험편의 압괴형상을 나타냈다.

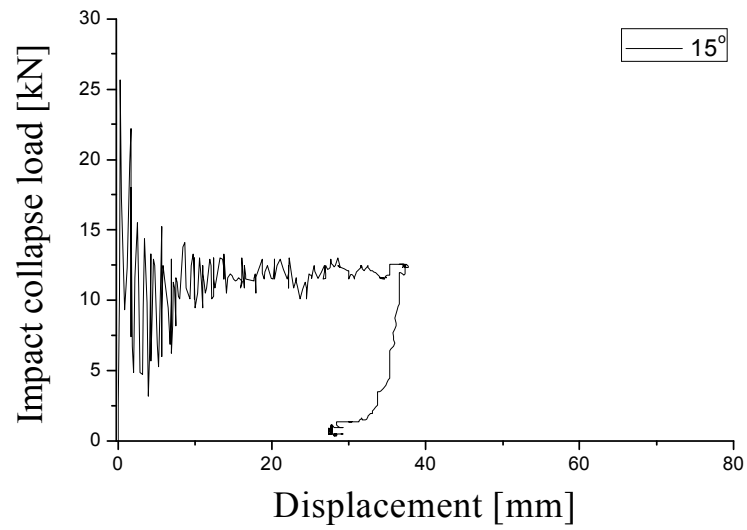


Fig. 39 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 15°  
(dry specimen, stacking angle)



Photo. 26 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 15°  
(dry specimen, stacking angle)

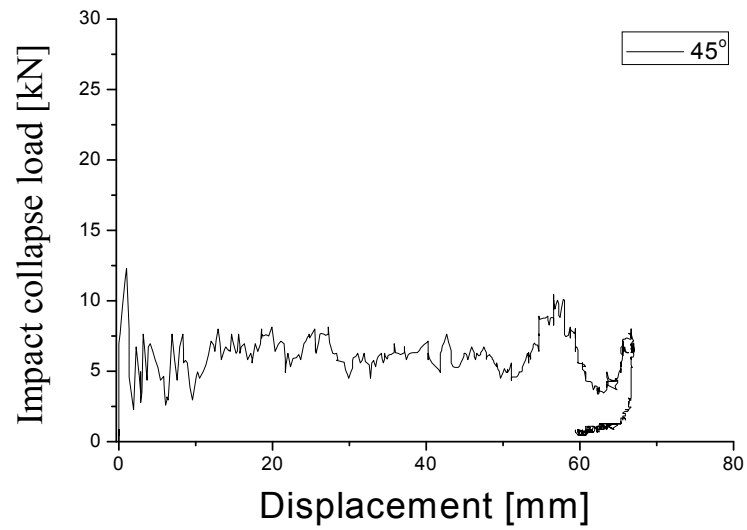


Fig. 40 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 45°  
(dry specimen, stacking angle)



Photo. 27 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 45°  
(dry specimen, stacking angle)



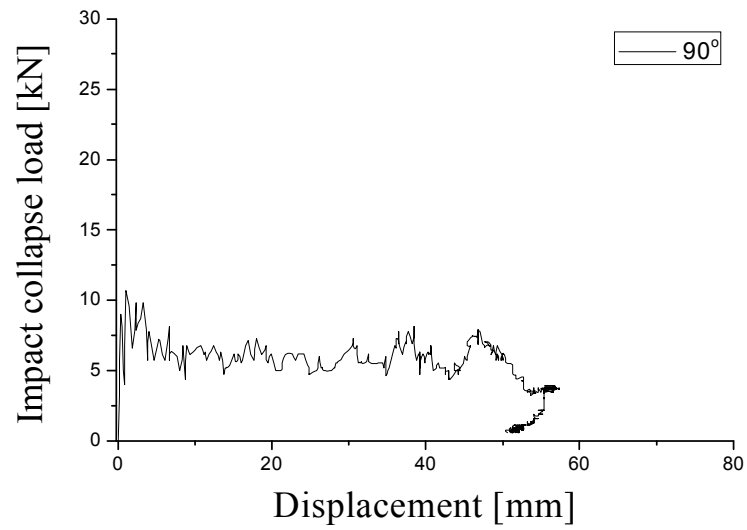


Fig. 41 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 90°  
(dry specimen, stacking angle)



Photo. 28 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90°  
(dry specimen, stacking angle)

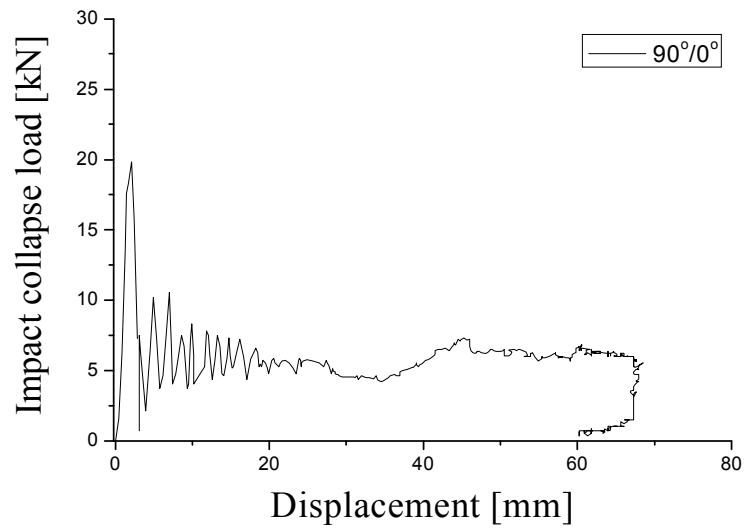


Fig. 42 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,  $90^{\circ}/0^{\circ}$   
(dry specimen, stacking angle)



Photo. 29 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member,  $90^{\circ}/0^{\circ}$   
(dry specimen, stacking angle)

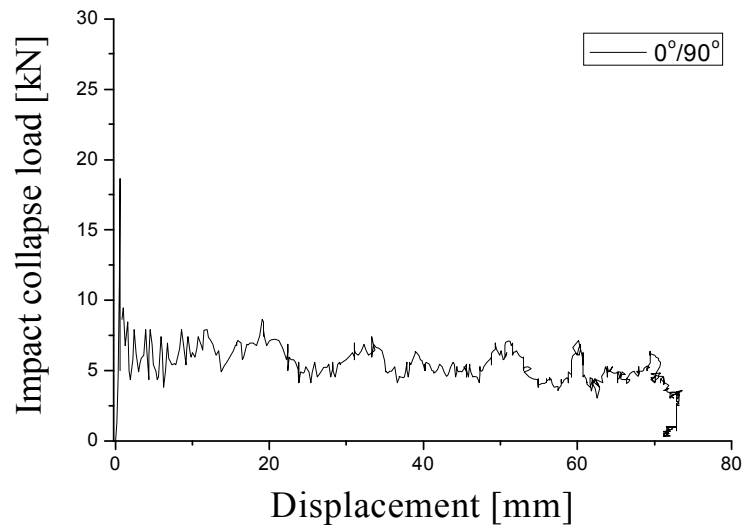


Fig. 43 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,  $0^{\circ}/90^{\circ}$   
(dry specimen, stacking angle)



Photo. 30 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member,  $0^{\circ}/90^{\circ}$   
(dry specimen, stacking angle)

## 2. 흡습 시험편

수분이 흡수된 CFRP 모자형 단면부재에 대하여 충격 압괴실험을 실시한 후 하중-변위의 변형과정을 얻을 수 있었다.

Figs. 44~48과 Photos. 31~35는 적층각도가 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90°인 시험편의 하중-변위 선도 및 충격 압괴실험 후의 시험편의 압괴형상을 나타냈다.

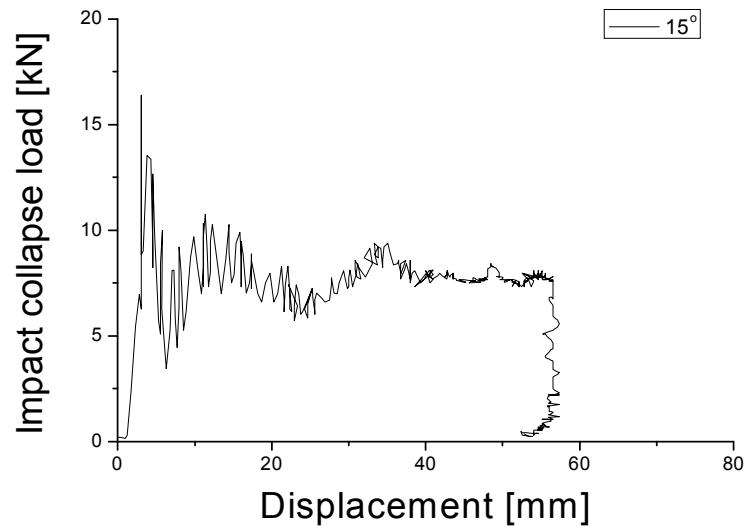


Fig. 44 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 15°  
(wet specimen, stacking angle)



Photo. 31 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 15°  
(wet specimen, stacking angle)

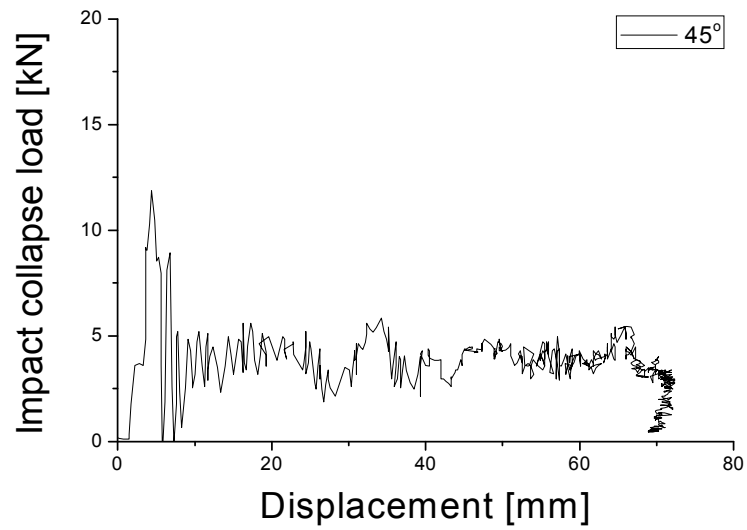


Fig. 45 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 45°  
(wet specimen, stacking angle)



Photo. 32 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 45°  
(wet specimen, stacking angle)

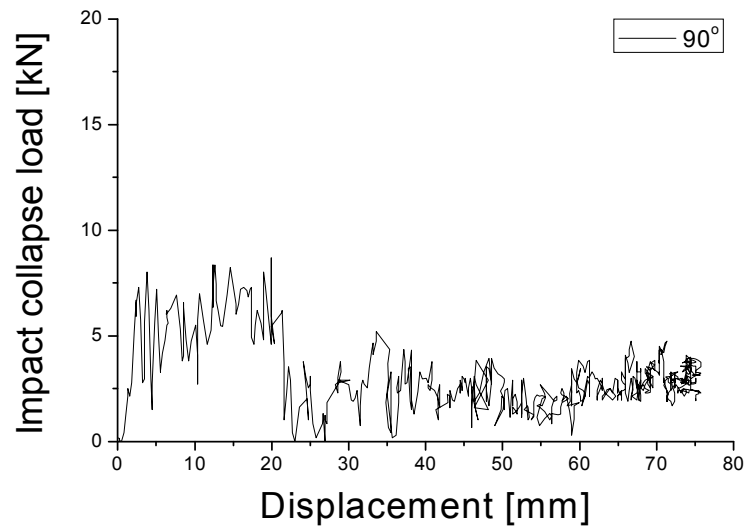


Fig. 46 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 90°  
(wet specimen, stacking angle)



Photo. 33 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90°  
(wet specimen, stacking angle)

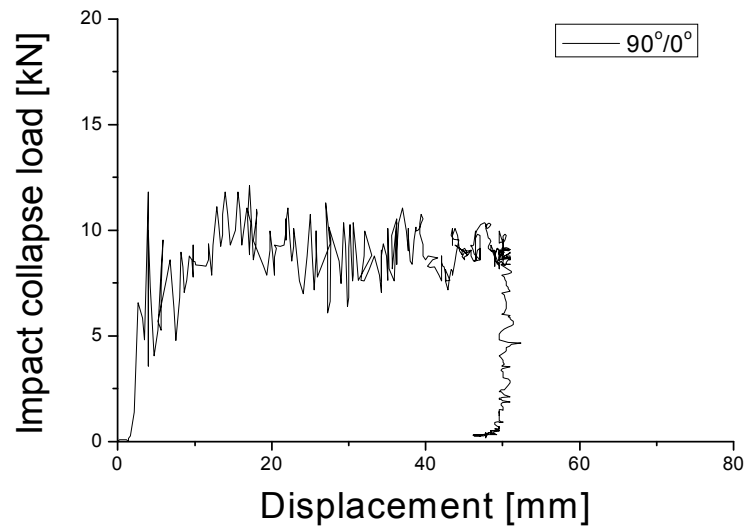


Fig. 47 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member, 90°/0°  
(wet specimen, stacking angle)



Photo. 34 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member, 90°/0°  
(wet specimen, stacking angle)



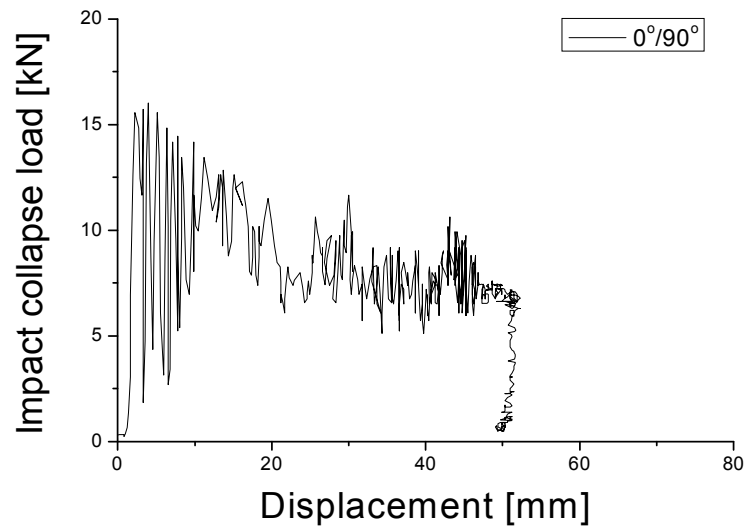


Fig. 48 Load-displacement curve of CFRP hat-shaped sectional member,  $0^{\circ}/90^{\circ}$   
(wet specimen, stacking angle)



Photo. 35 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional member,  $0^{\circ}/90^{\circ}$   
(wet specimen, stacking angle)

## 제 4 장 고 찰

### 제 1 절 적층조건 변화에 따른 압괴특성

#### 1. CFRP 모자형 단면부재의 정적 압괴특성

CFRP 복합재 내부에 수분이 흡수되었을 경우 정적하중과 충격하중에서의 강도 저하에 대해 고찰하기 위하여 본 연구에 앞서 선행되었던 정적 압괴실험에서의 데이터와 본 연구에서 실시한 충격 압괴실험에서의 데이터를 비교 후 고찰하였다.

최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편과 적층각도 변화를 갖는 15°, 45° 90°, 90°/0° 및 0°/90° 시험편을 무흡습 시험편과 흡습 시험편으로 분류한 후 정적 압괴실험을 통한 압괴특성을 평가하였다.

Figs. 49~51은 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Tables 9, 10은 압괴 실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

Figs. 52~54는 최외각층 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Tables 11, 12는 압괴 실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

Figs. 55~57은 적층각도 변화를 갖는 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90° 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Tables 13, 14는 압괴실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

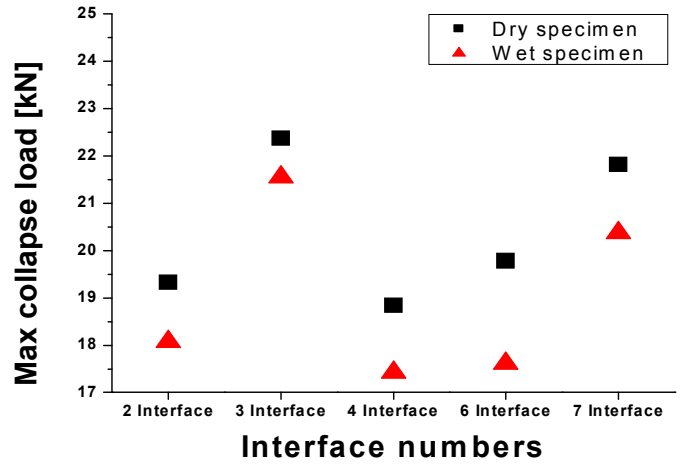


Fig. 49 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°)

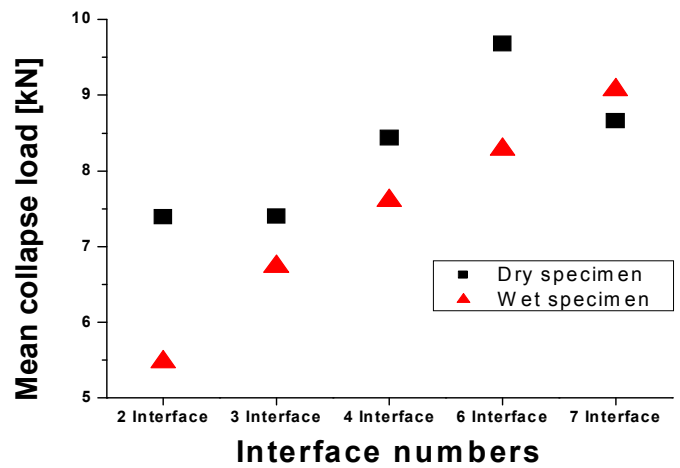


Fig. 50 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°)

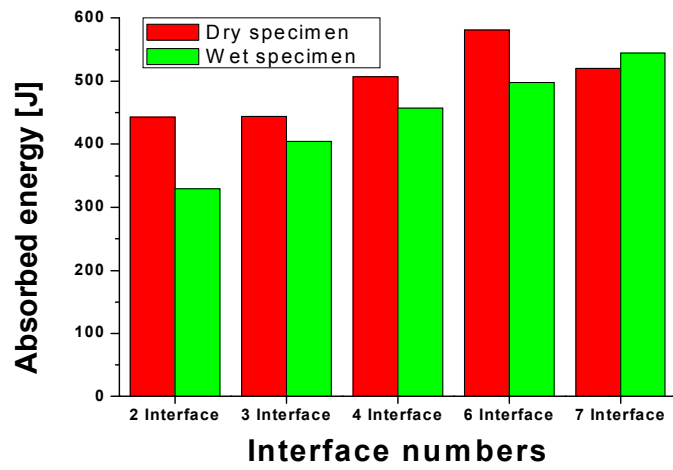


Fig. 51 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers  
(static experiment, outer angle 90°)

Table 9 Static collapse experiment results of dry specimens  
(interface numbers, outer angle 90°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
2	Outer angle 90°	19.33	7.39	443.40
3		22.37	7.40	443.90
4		18.84	8.44	506.63
6		19.78	9.68	581.17
7		21.82	8.66	519.59

Table 10 Static collapse experiment results of wet specimens  
(interface numbers, outer angle 90°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
2	Outer angle 90°	18.07	5.48	329.02
3		21.56	6.74	404.75
4		17.43	7.61	456.71
6		17.62	8.29	497.97
7		20.37	9.07	544.65

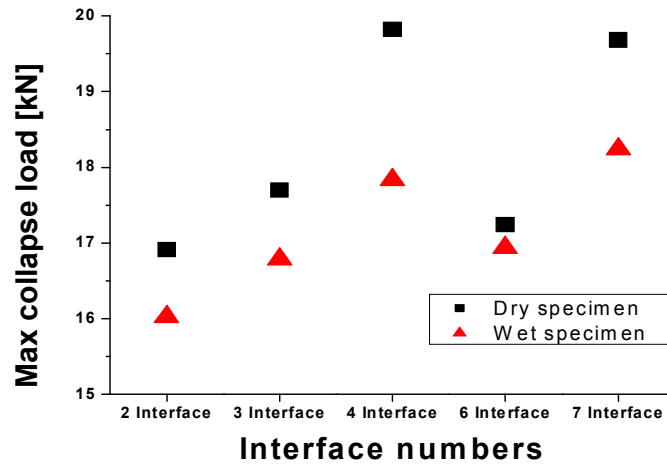


Fig. 52 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle  $0^\circ$ )

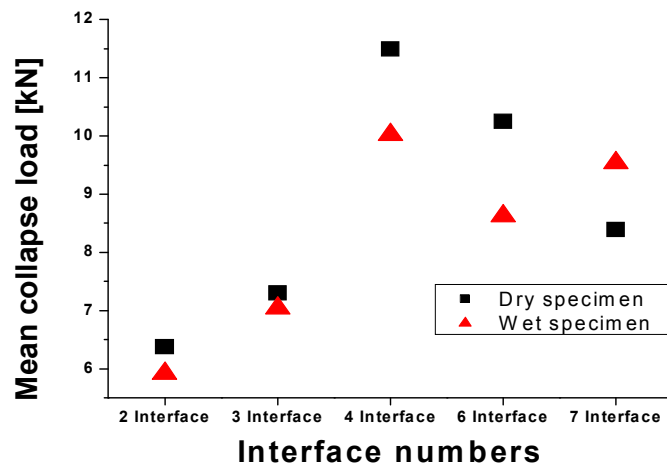


Fig. 53 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle  $0^\circ$ )

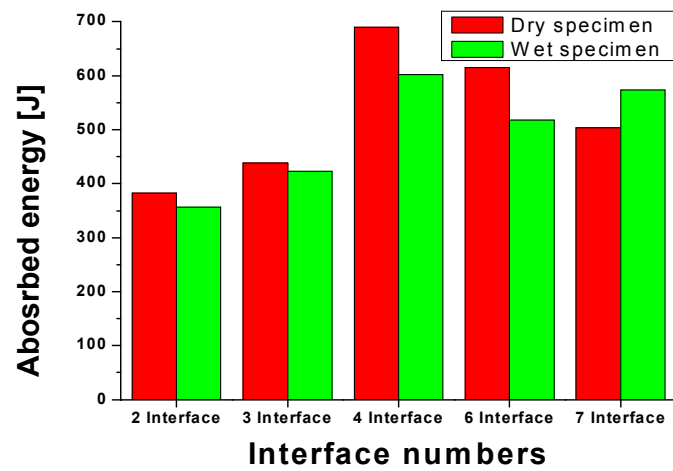


Fig. 54 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°)

Table 11 Static collapse experiment results of dry specimens  
(interface numbers, outer angle 0°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
2	Outer angle 0°	16.91	6.38	383.04
3		17.70	7.30	437.98
4		19.82	11.49	689.34
6		17.24	10.25	615.53
7		19.68	8.39	503.48

Table 12 Static collapse experiment results of wet specimens  
(interface numbers, outer angle 0°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
2	Outer angle 0°	16.03	5.92	355.74
3		16.79	7.04	422.94
4		17.84	10.02	601.57
6		16.94	8.63	518.14
7		18.24	9.54	573.13



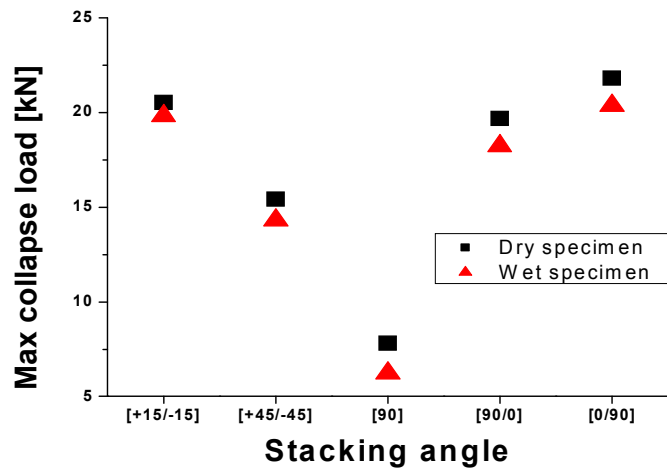


Fig. 55 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (static experiment)

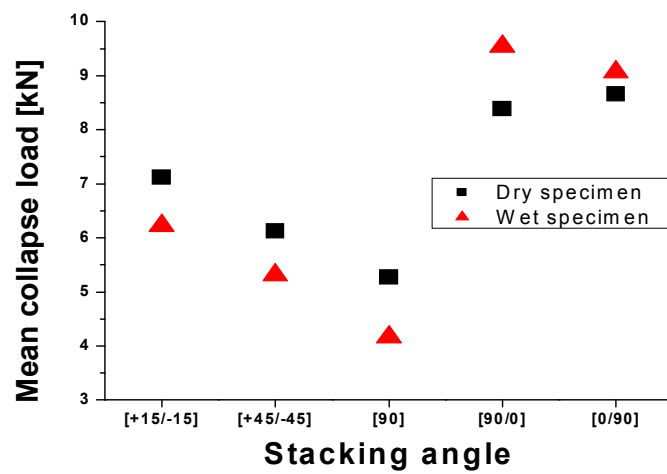


Fig. 56 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (static experiment)

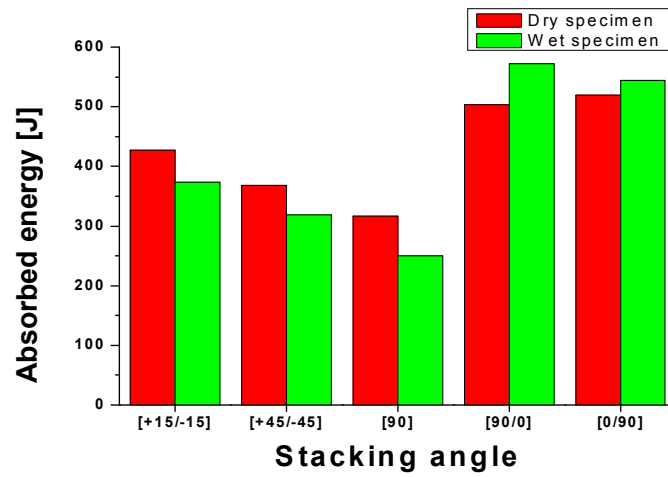


Fig. 57 Relationship between absorbed energy and variation stacking angles (static experiment)

Table 13 Static collapse experiment results of dry specimens  
(stacking angles)

Specimen	$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
15°	20.53	7.12	427.20
45°	15.41	6.13	367.86
90°	7.80	5.27	316.20
90°/0°	19.68	8.39	503.48
0°/90°	21.82	8.66	519.59

Table 14 Static collapse experiment results of wet specimens  
(stacking angles)

Specimen	$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
15°	19.85	6.22	373.20
45°	14.32	5.31	318.96
90°	6.25	4.17	250.49
90°/0°	18.24	9.54	573.13
0°/90°	20.37	9.07	544.65

최외각층 90°시험편의 경우 최대하중은 계면수 증가에 따라 증가하다가 4계면 시험편에서는 감소의 경향을 보였으며, 다시 계면수 증가에 따라 최대하중이 증가하는 경향을 보였다. 최외각층 0°시험편의 경우 4계면 시험편까지는 최대하중이 증가하다 6계면 시험편에서는 감소하는 경향을 보였으며, 다시 7계면 시험편에서는 최대하중이 증가하는 경향을 보였다.

평균하중에서는 최외각층 90°시험편과 0°시험편에서 동일한 압축특성을 보였다. 하지만 7계면 시험편의 경우 흡습 시험편이 무흡습 시험에 비해 평균하중이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 수분의 흡수로 인하여 압축과정에서 계면간의 접합이 주를 이루면서 최대하중 이후의 일률적인 데이터 확보가 그 이유인 것으로 사료된다.

적층각도 변화에 따른 정적 압축특성을 살펴본 결과 적층각도가 증가함에 따라 최대하중은 감소하는 경향을 보였지만, 90°/0°과 0°/90°의 적층각도에서는 점차 증가하는 경향이 나타났다.

평균하중과 흡수에너지에서는 최대하중과 유사한 경향의 압축특성을 보였다. 하지만 최대하중에서의 감소치보다 평균하중과 흡수에너지에서의 감소치가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 시험편 축방향을 중심으로 각도의 변화에 따라 적층되어있기 때문에 수분의 영향이 최대하중보다는 이후의 압축에 높게 작용했던 것으로 사료된다.

또한 90°/0°과 0°/90° 시험편의 경우 평균하중과 흡수에너지가 무흡습 시험편의 경우보다 흡습 시험편의 경우가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수로 인하여 초기 최대하중 이후 안정적인 압축곡선을 그리면서 무흡습 시험편보다 더 안정적인 에너지의 흡수가 이뤄졌을 것으로 사료된다.

## 2. CFRP 모자형 단면부재의 충격 압괴특성

정적 압괴실험과 충격 압괴실험에서의 강도평가를 실시한 후 열습실험을 통한 흡습이 CFRP 모자형 단면부재의 강도에 미치는 특성을 평가하기 위하여 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편과 적층각도 변화를 갖는 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90° 시험편을 무흡습 시험편과 흡습 시험편으로 분류한 후 충격 압괴실험을 통한 압괴특성을 평가하였다.

Figs. 58~60은 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Fig. 61은 충격 압괴 실험 후 시험편의 압괴된 길이를 나타냈다. Tables 15, 16은 압괴실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

Figs. 62~64는 최외각층 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Fig. 65는 충격 압괴 실험 후 시험편의 압괴된 길이를 나타냈다. Tables 17, 18은 압괴실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

Figs. 66~68은 적층각도 변화를 갖는 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90° 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Fig. 69는 충격 압괴실험 후 시험편의 압괴된 길이를 나타냈다. Tables 19, 20은 압괴실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

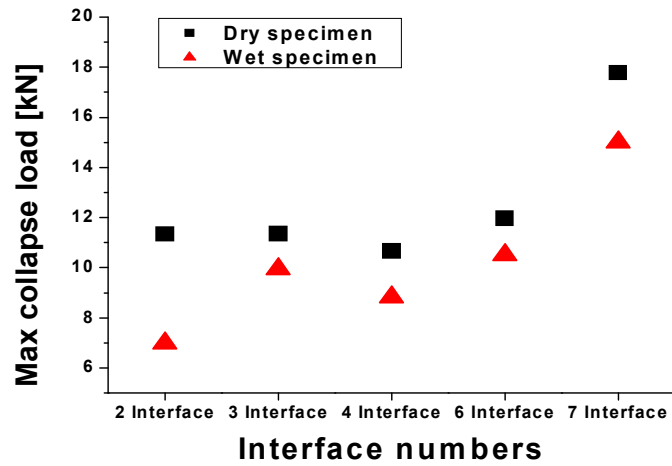


Fig. 58 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 90°)

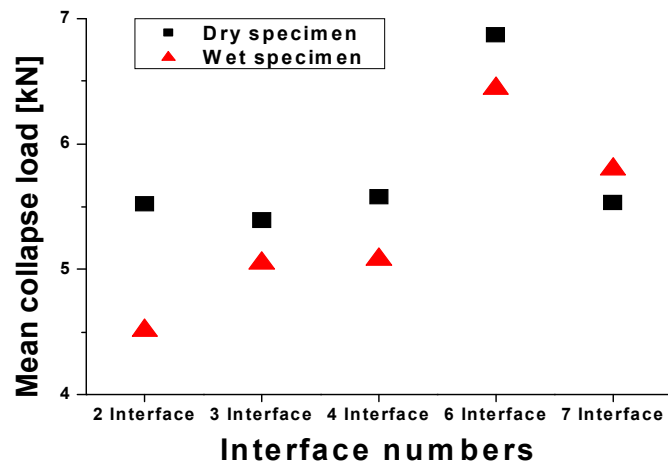


Fig. 59 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 90°)

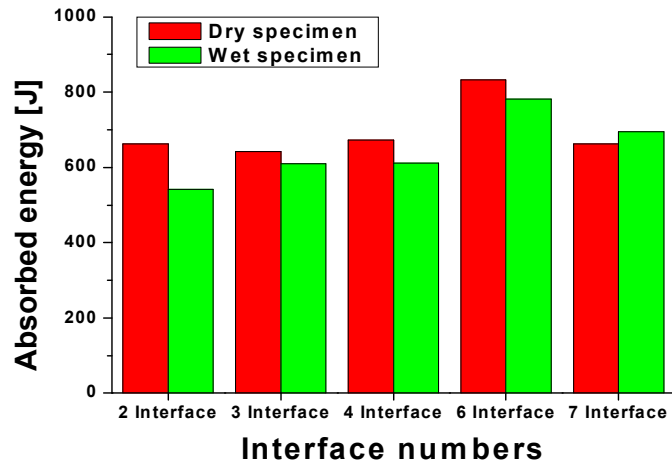


Fig. 60 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 90°)

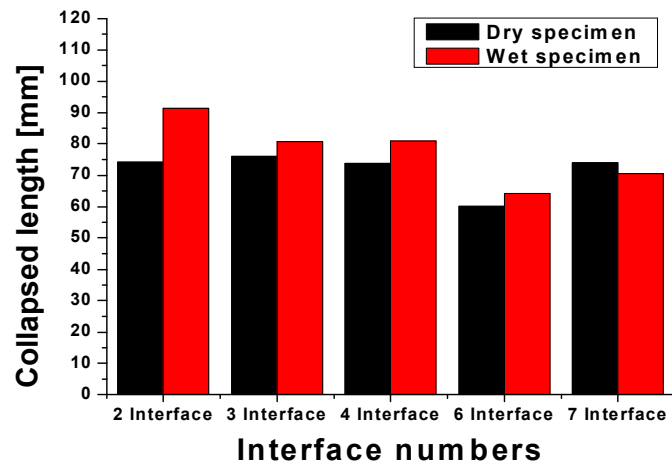


Fig. 61 Relationship between collapsed length and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 90°)

Table 15 Impact collapse experiment results of dry specimens  
(interface numbers, outer angle 90°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	Collapsed length [mm]
2	Outer angle 90°	11.34	5.52	662.45	74.11
3		11.35	5.39	642.68	75.97
4		10.66	5.57	673.33	73.81
6		11.97	6.86	832.50	60.04
7		17.77	5.53	662.81	74.01

Table 16 Impact collapse experiment results of wet specimens  
(interface numbers, outer angle 90°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	Collapsed length [mm]
2	Outer angle 90°	7.00	4.51	542.25	91.37
3		9.95	5.05	608.76	80.71
4		8.82	5.07	611.12	81.01
6		10.51	6.44	780.95	64.24
7		15.00	5.80	694.96	70.58



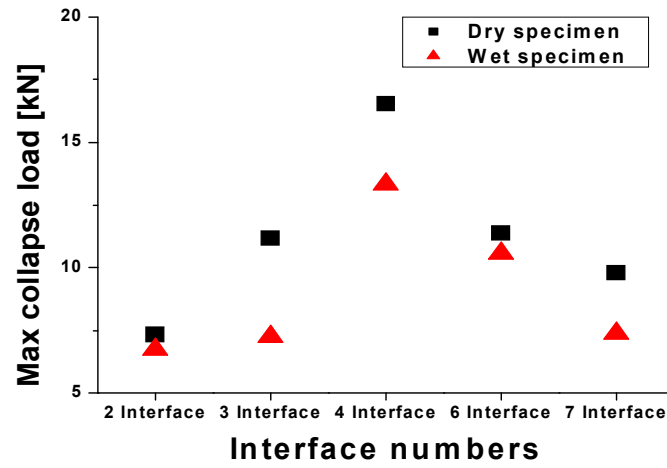


Fig. 62 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 0°)

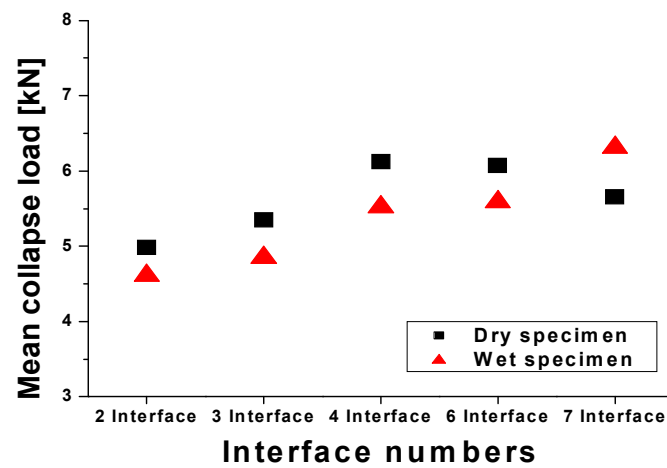


Fig. 63 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 0°)

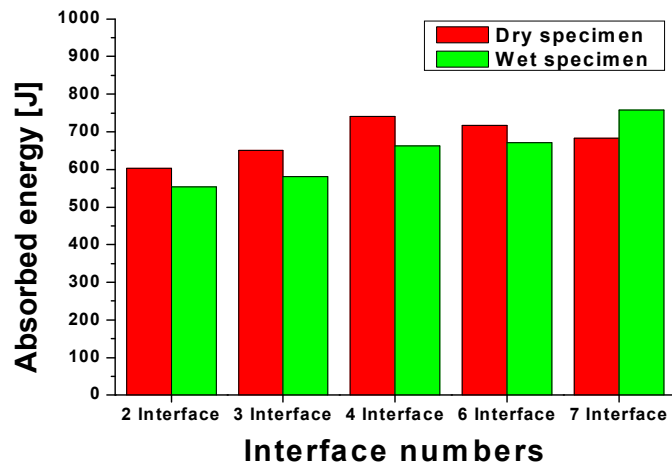


Fig. 64 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 0°)

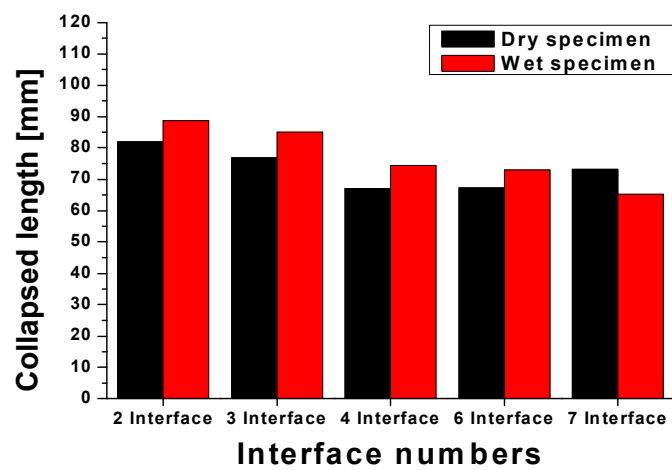


Fig. 65 Relationship between collapsed length and variation interface numbers (impact experiment, outer angle 0°)

Table 17 Impact collapse experiment results of dry specimens  
(interface numbers, outer angle 0°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	Collapsed length [mm]
2	Outer angle 0°	7.33	4.98	603.53	81.98
3		11.18	5.34	650.65	76.88
4		16.52	6.12	740.43	67.01
6		11.38	6.07	717.14	67.17
7		9.78	5.64	682.62	73.05

Table 18 Impact collapse experiment results of wet specimens  
(interface numbers, outer angle 0°)

Specimen		$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	Collapsed length [mm]
2	Outer angle 0°	6.73	4.61	553.60	88.73
3		7.25	4.84	581.70	85.07
4		13.32	5.52	663.00	74.34
6		10.58	5.59	670.80	72.94
7		7.37	6.31	757.20	65.15

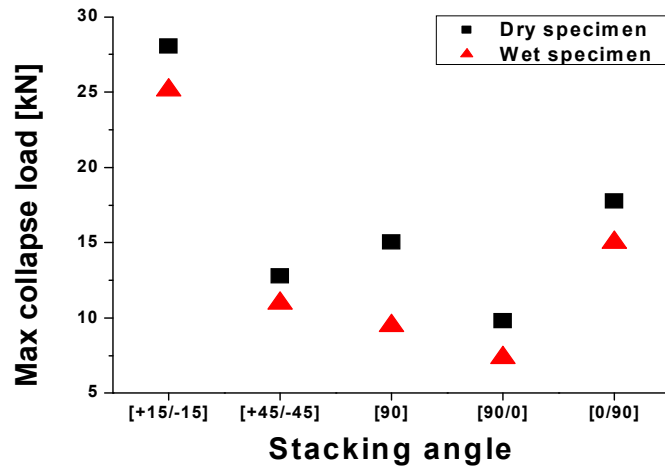


Fig. 66 Relationship between maximum collapse load and variation stacking angles (impact experiment)

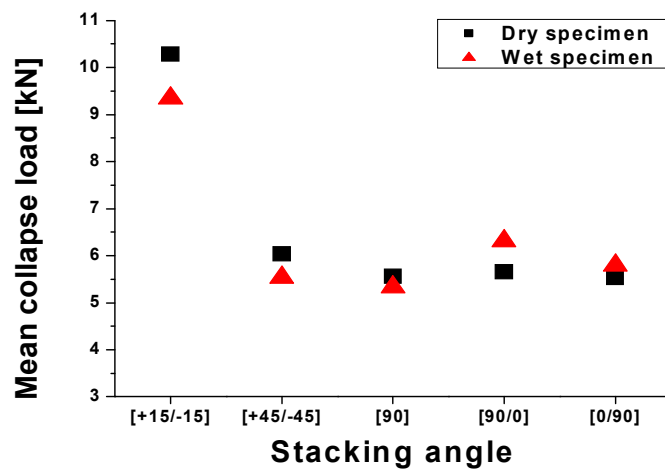


Fig. 67 Relationship between mean collapse load and variation stacking angles (impact experiment)

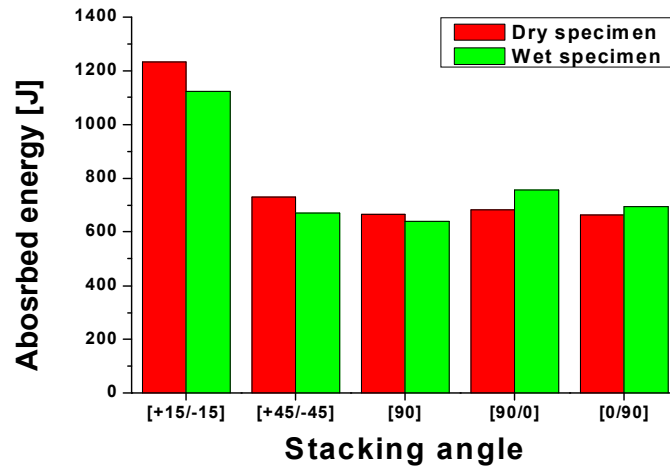


Fig. 68 Relationship between absorbed energy and variation stacking angles (impact experiment)

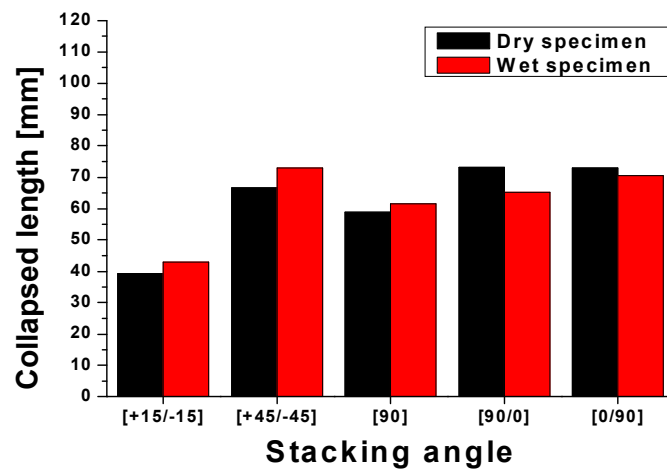


Fig. 69 Relationship between collapsed length and variation stacking angles (impact experiment)

Table 19 Impact collapse experiment results of dry specimens  
(stacking angles)

Specimen	$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	Collapsed length [mm]
15°	28.04	10.27	1233.10	39.27
45°	12.77	6.03	728.80	66.73
90°	15.01	5.55	665.97	58.99
90°/0°	9.78	5.64	682.62	73.05
0°/90°	17.77	5.53	662.81	73.01

Table 20 Impact collapse experiment results of wet specimens  
(stacking angles)

Specimen	$F_{max}$ [kN]	$F_{mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	Collapsed length [mm]
15°	25.11	9.35	1122.01	42.95
45°	10.99	5.54	669.78	72.99
90°	9.47	5.33	638.81	61.58
90°/0°	7.37	6.31	757.20	65.15
0°/90°	15.00	5.80	694.96	70.43

충격 압케실험을 통한 계면간의 압케특성을 살펴본 결과 정적 압케실험에서의 압케특성과 유사한 경향이 나타남을 알 수 있었다.

최외각층 90° 시험편의 경우 무흡습 시험편과 흡습 시험편 모두 최대하중은 계면수의 증가에 따라 증가하다 4계면 시험편에서는 감소하는 경향을 보였으며 다시 7계면 까지는 증가하는 경향이 나타났다.

하지만 평균하중과 흡수에너지에서는 계면수 증가에 따라 증가하다 7계면 시험편의 경우는 감소하는 경향이 나타났다. 특히 7계면 시험편의 경우 수분의 흡수로 인하여 평균하중과 흡수에너지가 증가하는 경향을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수로 인한 계면간의 결합력 약화에 따른 압케 형상이 그 원인인 것으로 사료된다. 2계면 시험편의 경우 가장 높은 흡습률을 보였던 바 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지가 무흡습 시험편에 비해 차이가 크게 발생하였던 것을 알 수 있었다.

최외각층 0°의 조건을 갖는 무흡습 시험편의 경우 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지에서의 경향이 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 흡습 시험편의 경우 최대하중에서는 무흡습 시험편과 비슷한 경향을 보였으며 3계면 시험편의 경우는 높은 흡습률로 인하여 다른 시험편에 비해 높은 감소를 보이는 것을 알 수 있었다. 무흡습 시험편의 경우 평균하중과 흡수에너지는 4계면 시험편 까지 증가를 하다 7계면 시험편 까지는 다시 감소하는 경향을 보였다. 하지만 흡습시험편의 경우 계면수의 증가에 따라 평균하중과 흡수에너지는 증가하는 경향이 나타났다. 특히 7계면 시험편의 경우는 최외각층 90°의 조건을 갖는 시험편과 유사하게 흡습 시험편이 평균하중과 흡수에너지가 높게 나타남을 알 수 있었다. 이 또한 수분의 흡수와 계면수 증가가 그 이유인 것으로 사료된다.

계면간의 압케특성을 살펴본 결과 수분의 흡수로 인한 압케특성은 무흡습 시험편과 흡습 시험편 대부분에서 비슷한 경향을 보였으며 수분의 흡수로 인해 압케특성을 달리하는 경향은 나타나지 않았고 단지 무흡습 시험편에 비해 감소가 되는 것을 알 수 있었다. 하지만 계면수가 증가함에 따라 계면수 크기가 큰 시험편의 경우는 무흡습 시험편에 비해 일률적인 계면간의 압케와 접힘의 발생으로 인하여 평균하중과 흡수에너지는 증가하는 경향을 보였다.

적층각도 변화에 따른 압케특성을 살펴본 결과 정적 압케실험에서의 압케특성과

유사한 경향이 나타남을 알 수 있었다. 단 90°시험편의 경우 다른 적층각도 시험편에 비하여 높은 흡습률을 보였던 바 최대하중에서의 감소가 높게 나타남을 알 수 있었다.

충격 압괴실험 후 시험편의 압괴된 길이를 살펴본 결과 흡습률이 높았던 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편과 최외각층 0°의 조건을 갖는 3계면 시험편을 제외하고는 약 5% 안팎의 압괴길이의 차이를 보였으며, 15°시험편의 경우가 가장 압괴된 길이가 짧은 것을 알 수 있었다. 가장 흡습률이 높았던 2계면 시험편의 경우는 충격 압괴실험 후 약 17%가 더 압괴된 것을 알 수 있었다.

하지만 7계면 시험편과 90°/0°, 0°/90° 시험편의 경우 흡습 시험편의 경우가 무흡습 시험편보다 압괴된 길이가 짧은 것을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수와 계면수의 증가로 인하여 일률적인 압괴과정이 가장 큰 요인인 것으로 사료된다. 최대하중 이후 평균하중과 흡수에너지가 증가했던 것과 마찬가지로 일률적인 압괴과정과 계면의 순차적인 접힘 현상으로 인하여 접힘이 최대가 되는 압괴길이 까지만 압괴가 진행된 것으로 사료된다.

따라서 15° 적층구성일 때의 구조부재가 충격하중을 받았을 경우 많은 공간 확보를 기대할 수 있는 것을 알 수 있었다.



## 제 2 절 CFRP 모자형 단면부재의 압괴모드

흡습 시험편과 무흡습 시험편에 대해 정적 압괴실험과 충격 압괴실험을 실시한 결과 다음과 같은 압괴형상을 얻을 수 있었다.

정적 압괴실험 시 일률적이고 안정적인 압괴데이터를 얻기 위하여 시험편 길이의 50%인 60mm까지 압괴를 실시하였다. 반면 충격 압괴실험에서는 크로스헤드에 의한 충격에너지에 견디는 시험편의 적층 각도의 변화로 인하여 압괴길이에서는 차이가 발생하는 것을 알 수 있었지만, Fig. 70의 Farley and Jones<sup>47-49)</sup>가 정의한 압괴 형상과 Photo. 36<sup>42)</sup>의 실제 압괴된 형상의 단면부분을 살펴본 결과 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태 등의 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

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) 섬유에 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 스프라인 모드가 나타났고, 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 나타났었던 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 있는걸 알 수 있었다. 그로인해 수분이 침투되지 않은 시험편 보다 안정적인 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

수분이 흡수되었던 시험편들은 초기 압제 시 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 동일한 취성과파괴를 관찰할 수 있었지만 점차 파괴 보다는 굽힘이 주를 이루면서 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압제가 진행됨을 알 수 있었다.

특히, 4계면 시험편과 7계면 시험편의 경우 수분의 흡수로 인하여 가장 안정적인 압제 형상을 나타냄으로써 압제특성에서 알 수 있듯이 흡수에너지의 증가가 나타남을 알 수 있었다.

적층각도 변화를 시험편의 압제형상은 수분이 흡수되었던 시험편의 경우 초기 압제 시 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 동일한 취성과파괴를 관찰할 수 있었지만 점차 파괴 보다는 굽힘이 주를 이루면서 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압제가 진행됨을 알 수 있었다.

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

Photo. 37은 최외각층 90°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편 중 무흡습 시험편의 압제형상이며, Photo. 38은 흡습 시험편의 압제형상이다.

Photo. 39는 최외각층 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편 중 무흡습 시험편의 압제형상이며, Photo. 40은 흡습 시험편의 압제형상이다.

Photo. 41은 적층각도 변화를 갖는 시험편 중 무흡습 시험편의 압제형상이며, Photo. 42는 흡습 시험편의 압제형상이다.

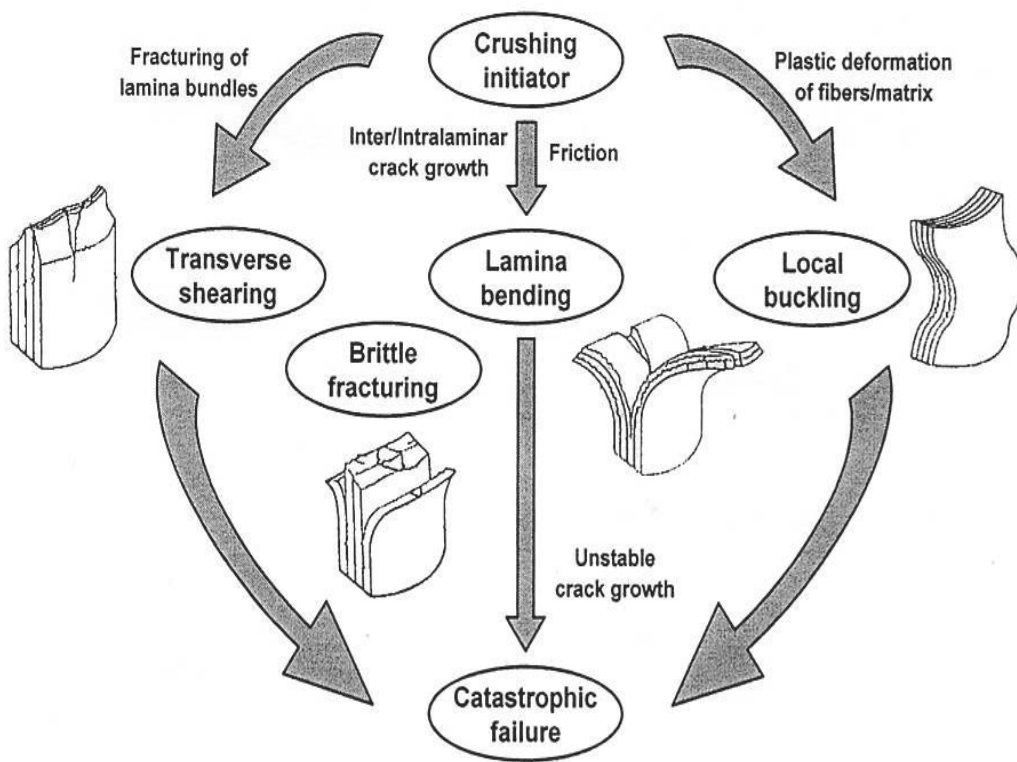


Fig. 70 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes

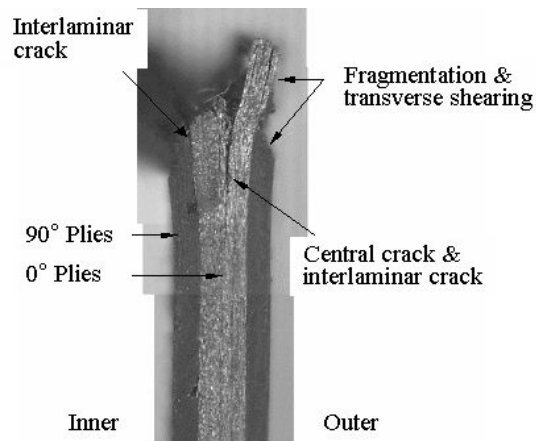
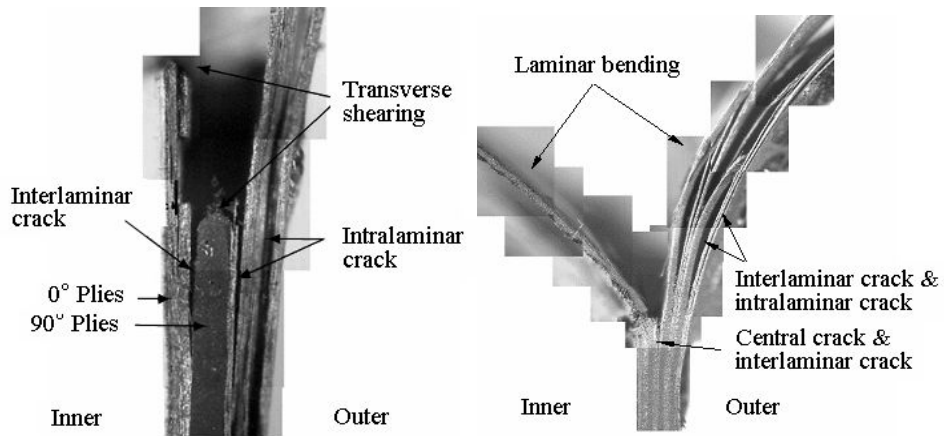


Photo. 36 Fracture sectional of the collapsed specimen



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface

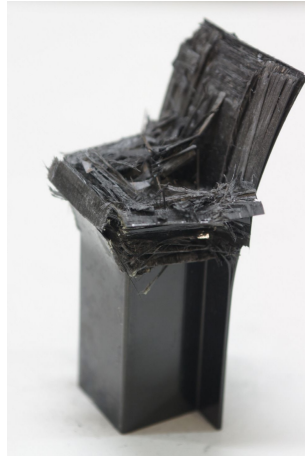


7 interface

Photo. 37 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, dry specimen, outer angle 90°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 38 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, wet specimen, outer angle 90°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 39 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, dry specimen, outer angle  $0^\circ$ )



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 40 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, wet specimen, outer angle  $0^\circ$ )





15°



45°



90°



90°/0°

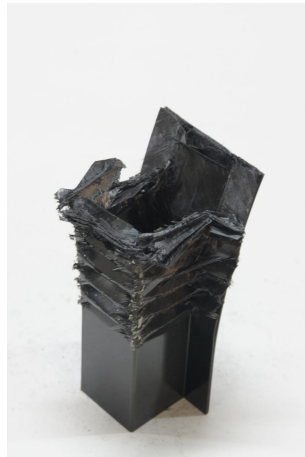


0°/90°

Photo. 41 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, dry specimen, stacking angles)



15°



45°



90°



90°/0°



0°/90°

Photo. 42 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (impact, wet specimen, stacking angles)

## 제 3 절 흡습에 따른 강도 평가

### 1. 정적하중 하에서의 강도 평가

수분의 흡수로 인한 강도의 저하를 비교해본 결과 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편과 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 7계면 시험편을 제외한 모든 시험편에서 약 10%~15%의 강도저하가 나타남을 알 수 있었다.

또한 수분의 흡수로 인하여 최대하중에서의 강도저하보다는 평균하중과 흡수에너지에서의 강도저하가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 충격하중에서와는 달리 무흡습 시험편에서도 실험환경상 안정적인 압케와 일률적인 데이터의 확보가 가능하였기 때문에 흡습 시험편에서의 수분의 작용이 단지 강도의 저하만을 가져오는 것으로 사료된다.

흡습률이 가장 높았던 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편의 경우 최대하중에서의 감소보다는 평균하중에서의 감소가 약 70% 이상이 더 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 정적압케 환경하에서의 수분의 흡수는 안정적인 압케나 일률적인 데이터 확보를 이유로 충격하중에서의 낮은 강도저하나 강도의 증가 등과는 무관함을 알 수 있었다.

7계면 시험편의 경우 최대하중의 감소는 약 10% 이내로 나타났지만, 평균하중과 흡수에너지는 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 최외각층 90°의 조건보다는 0°의 조건을 갖는 7계면 시험편에서의 증가치가 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 최외각층 0°의 조건을 갖는 7계면 시험편의 경우 흡습률이 높았기 때문인 것으로 사료된다.

적층각도 변화를 갖는 시험편에 대하여 정적 압케실험을 실시한 결과 최대하중에서는 흡습률이 가장 낮았던 15° 시험편의 경우 약 3%의 강도저하를 보이는 것을 알 수 있었다. 흡습률이 가장 높았던 90° 시험편의 경우 강도가 약 19.9% 저하했으며, 평균의 흡습을 보였던 45° 시험편의 경우 7%의 강도저하가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 0°/90° 시험편의 경우 약 6.6%의 감소가 나타났던 반면 같은 적층

구성을 갖는 90°/0°의 경우는 약 7.3%의 저하가 나타났다. 이는 흡습거동에서 알 수 있었듯이 90°/0° 시험편의 경우 시험편 최외각이 수분이 흡수되기 용이한 0° 방향을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

최대하중에서의 강도저하는 흡습률이 가장 높았던 90° 시험편을 제외하고는 약 15% 이내의 강도저하를 보이는 것을 알 수 있었다.

평균하중에서의 강도저하를 관찰해본 결과 90°/0°과 0°/90°을 제외한 대부분의 시험편들에 대해 약 20% 이내의 강도저하가 나타났다.

90°/0° 시험편과 0°/90° 시험편에서는 평균하중과 흡수에너지의 증가가 나타났다. 특히, 90°/0° 시험편의 경우 수분의 흡습률이 높았던 관계로 압력실험이 종료 될 때까지 안정적인 압력이 나타남으로 인해 평균하중의 증가 또한 0°/90° 시험편에 비해 크게 나타남을 알 수 있었다.

Figs. 71, 72는 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편의 강도저하율을 나타낸 것이며, Fig. 73은 적층각도 변화를 갖는 시험편의 수분의 흡수로 인한 강도의 저하율을 나타냈다.

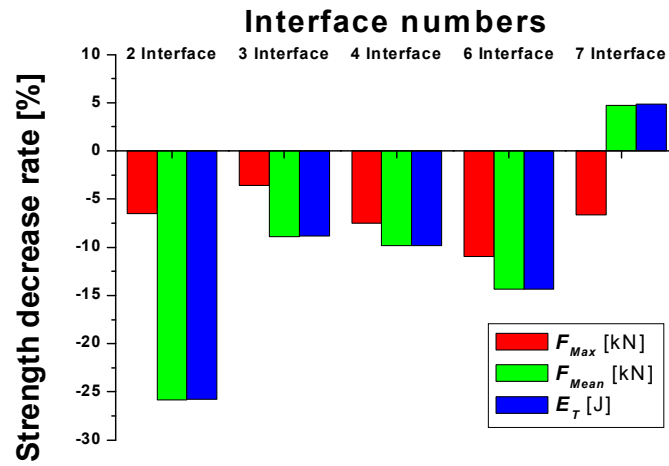


Fig. 71 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static, outer angle 90°)

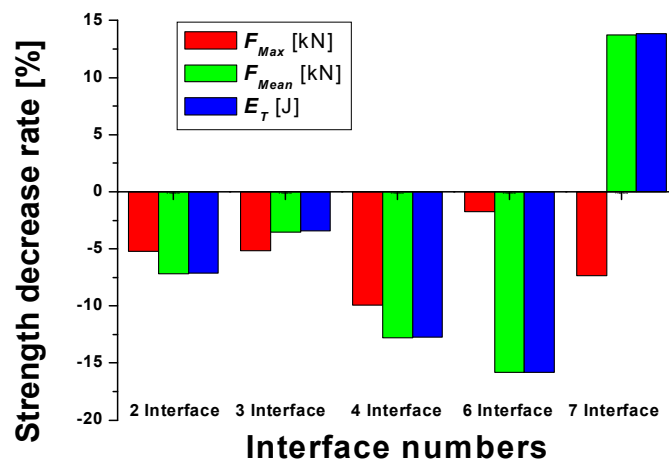


Fig. 72 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static, outer angle 0°)

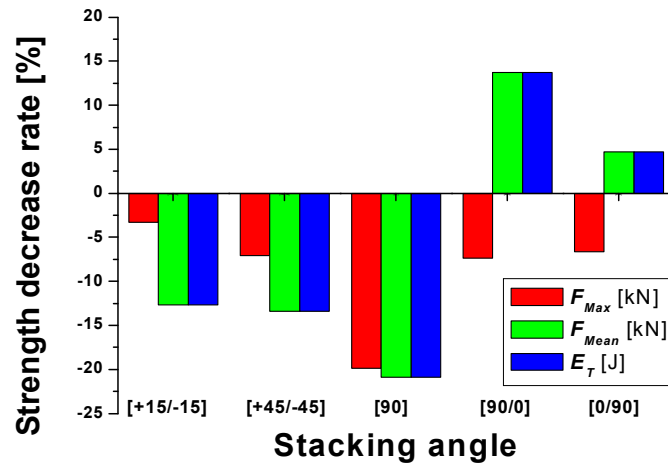


Fig. 73 Relationship between strength decrease rate and variation stacking angles (static experiment)

## 2. 충격하중 하에서의 강도 평가

열습 환경하에 노출되었던 흡습 시험편에 대해서 충격 압축실험 후 강도의 저하를 살펴본 결과 흡습으로 인하여 최대하중은 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있었다. 특히 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편과 최외각층 0°의 조건을 갖는 3계면 시험편의 경우 계면수 변화 시험편 중에서 흡습률이 가장 높았기 때문에 약 35% 이상 최대하중의 감소를 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 최대하중의 감소율과는 달리 평균하중에서는 낮은 감소율을 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수는 시험편 끝단에서의 하중에 대한 저항을 저하시킴으로써 초기 피크하중까지는 높은 저하를 보였지만, 이후 수분이 CFRP 복합재의 성질 중 하나인 취성의 성격을 연성화 시킴으로써 안정적으로 압축이 진행되었고 일률적인 하중 데이터의 확보로 인하여 평균하중에서는 최대하중에서의 감소치 보다 약 50% 이상의 낮은 감소율을 보이는 것을 알 수 있었다.

7계면 시험편의 경우 평균하중과 흡수에너지는 증가하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 정적 압축특성에서 살펴보았듯이 계면수 증가와 흡습으로 인한 안정적인 압축이 그 원인인 것으로 사료된다.

적층각도 변화를 갖는 시험편에 대하여 수분의 흡수로 인한 강도저하를 살펴본 결과 15°, 45°, 90° 시험편에서는 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지의 저하 경향을 알 수 있었다. 특히 90° 시험편의 경우 최대하중의 저하율은 약 37%가 됨을 알 수 있었다. 이는 90° 시험편의 경우 흡습률의 증가로 인하여 최대하중의 감소는 앞서 살펴본 계면수 시험편에서와 비슷한 감소율을 나타냈다. 하지만 평균하중과 흡수에너지에서는 수분으로 인한 안정적인 압축과 일률적인 데이터 확보로 인하여 최대하중에서와는 달리 그 감소율이 낮게 나타남을 알 수 있었다.

15° 시험편의 경우 흡습률이 가장 낮았던 관계로 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지의 감소는 거의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있었다. 45° 시험편의 경우도 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

90°/0° 시험편과 0°/90° 시험편의 경우는 앞서 계면수 변화 시험편 중 7계면 시험편과 동일한 적층구성을 가지고 있기 때문에 계면수 변화에서 살펴본 바와 같이

평균하중과 흡수에너지의 증가경향이 나타남을 알 수 있었다.

본 실험결과 수분은 CFRP 복합재의 계면간 결합력을 약화시키고 수지의 연성화를 초래함으로써 초기 하중을 받았을 때의 높은 강도저하를 발생시킴을 알 수 있었다. 하지만 압쇄과정에서 수지의 굽힘과 접힘이 주를 이루면서 안정적인 압쇄가 발생하게 되고 그로인한 일률적인 데이터의 확보가 용이함을 알 수 있었다.

열습 환경하에서 정적하중으로 인한 강도저하와 충격하중에서의 강도저하를 살펴본 결과 최대하중에서는 충격하중을 받았을 경우 50% 이상의 강도의 저하가 나타나는 것을 알 수 있었다. 하지만 평균하중과 흡수에너지에서는 정적하중을 받았을 경우가 더 높은 강도의 저하를 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 고찰에서 살펴 보았듯이 정적하중이라는 실험적 조건 때문에 수분의 흡수로 인한 일률적인 압쇄를 평가할 수 없었던 이유로 사료된다. 따라서 하중의 초기 전달을 받는 시험편 끝단에서 CFRP 복합재의 계면의 파단과 수지의 갈라짐 등을 파악할 수 있는 최대하중의 강도저하는 가혹한 환경하에서 매우 높음을 알 수 있었다.

Figs. 74, 75는 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편에 대해서 흡습으로 인한 강도의 저하율을 나타낸 것이며, Fig. 76은 흡습으로 인한 적층각도 변화를 갖는 시험편의 강도저하율을 나타냈다.

Table 21은 정적 압쇄실험과 충격 압쇄실험을 실시한 후 수분의 흡습으로 인한 강도의 저하율의 데이터를 나타냈다.



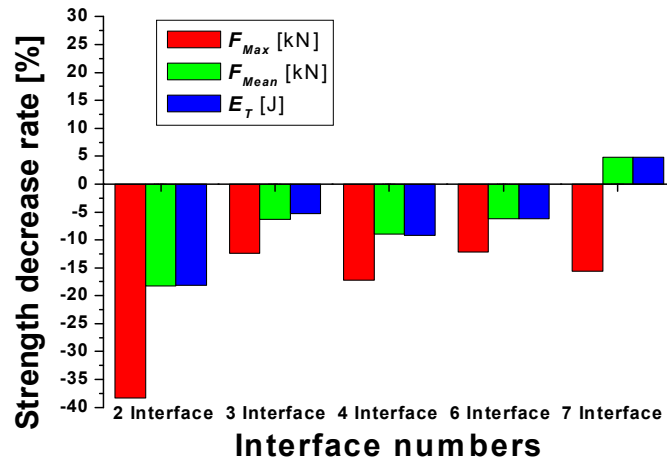


Fig. 74 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (impact, outer angle 90°)

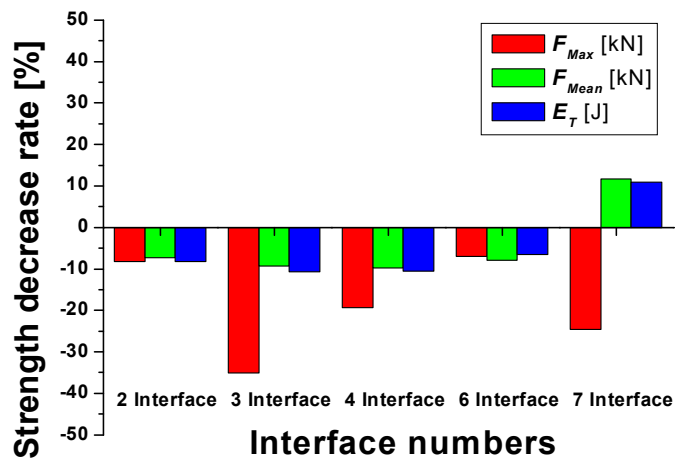


Fig. 75 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (impact, outer angle 0°)

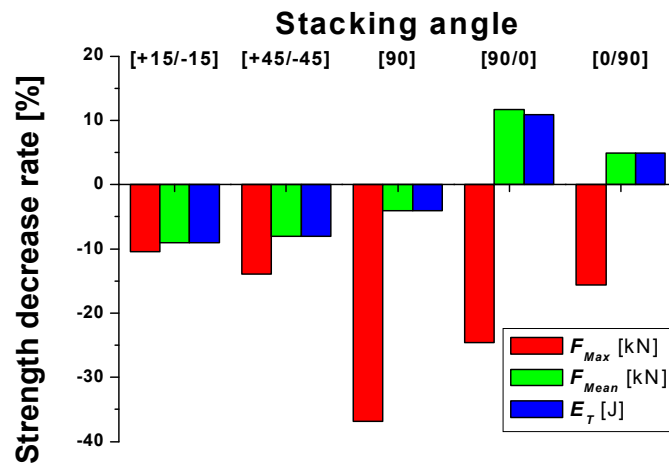


Fig. 76 Relationship between strength decrease rate and variation stacking angles (impact experiment)

Table 21 Strength decrease rate after collapse experiment

Specimen		Static			Impact		
		$F_{Max}$ [kN]	$F_{Mean}$ [kN]	$E_T$ [J]	$F_{Max}$ [kN]	$F_{Mean}$ [kN]	$E_T$ [J]
2	outer angle 90°	-6.52	-25.85	-25.80	-38.31	-18.21	-18.14
3		-3.62	-8.92	-8.82	-12.36	-6.32	-5.27
4		-7.48	-9.83	-9.85	-17.23	-8.99	-9.23
6		-10.92	-14.36	-14.32	-12.20	-6.22	-6.19
7		-6.65	4.73	4.82	-15.60	4.85	4.84
2	outer angle 0°	-5.20	-7.21	-7.13	-8.18	-7.36	-8.27
3		-5.14	-3.56	-3.43	-35.11	-9.38	-10.59
4		-9.90	-12.79	-12.73	-19.35	-9.73	-10.45
6		-1.74	-15.80	-15.82	-7.03	-7.92	-6.46
7		-7.32	13.71	13.83	-24.64	11.68	10.92
15°		-3.31	-12.64	-12.64	-10.43	-9.00	-9.00
45°		-7.07	-13.38	-13.38	-13.92	-8.09	-8.09
90°		-19.87	-20.87	-20.87	-36.88	-4.07	-4.07
90°/0°		-7.32	13.71	13.71	-24.64	11.68	10.92
0°/90°		-6.65	4.73	4.73	-15.60	4.85	4.84

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 CFRP 모자형 단면부재가 열습 환경과 충격하중을 받는 환경에 노출되어질 때의 흡습거동을 파악하고 그에 따른 강도평가 및 압케조건의 변화에 따른 강도의 저하현상을 고찰하였다. CFRP 모자형 단면부재를 최외각층 변화를 갖는 계면수 변화 시험편과 적층각도 변화를 갖는 시험편으로 각각 제작하고, 열습 실험 후 정적 압케실험과 충격 압케실험을 통한 압케하중과 흡수에너지 및 실험 후의 압케형상을 비교함으로써 다양한 조건 하에서의 강도를 평가하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. CFRP 모자형 단면부재 내부의 흡습거동은 실험 초기부터 흡습률 0.5% 구간에서 그 흡습이 가장 높았으며 흡습률이 1%가 지나면서 부터 흡습률의 증가는 현저히 낮아짐을 알 수 있었다.
2. CFRP 모자형 단면부재 내부의 수분 흡수는 적층 구성에 따라 차이가 있었으며, 수분의 흡수에 주요한 역할을 하는 것은 수분 흡수방향과 일치하는 0°방향의 섬유구성과 열습 환경에 노출되는 0°방향이 위치하는 적층구성인 것으로 알 수 있었다.
3. 무흡습 시험편과 흡습 시험편의 압케 형상을 살펴본 결과 수분이 침투함에 따라 CFRP 모자형 단면부재 내부에 열화현상이 발생하여 계면간의 결합력 또한 약해짐을 알 수 있었고, 수분이 흡수됨으로써 최외각층 90°의 조건을 갖는 시험편은 모서리의 찢어짐 정도가 적음을 알 수 있었다. 본 실험에서 시험편 모두 굽힘모드, 국부좌굴모드, 라미나 굽힘모드가 주로 발생한 것을 알 수 있었다.
4. 정적 압케실험과 충격 압케실험을 실시한 후 수분의 흡수로 인한 강도의 저하를 비교해본 결과 계면수 변화를 갖는 시험편에서의 강도저하가 적층각도 변화를 갖는 시험편에서의 강도의 저하보다 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

또한 수분의 흡수가 취성의 성질을 가지는 CFRP 복합재를 연성화 시킴으로써 하중을 받는 초기에는 수분이 흡수되지 않았을 경우보다 강도의 저하가 크게 발생하였다.

5. 수분의 흡수로 인하여 정적하중을 받았을 경우와 충격하중을 받는 환경에서의 강도저하 현상을 비교해본 결과 정적하중에서의 강도저하보다는 충격하중에서의 강도저하가 약 50% 이상 크게 나타남을 알 수 있었다.
6. 무흡습 시험편과 흡습 시험편 모두 최대하중, 평균압축하중 및 흡수에너지는 적층구성이 15°일 때 가장 높았으며, 압축길이는 가장 짧았다. 따라서 공간을 확보하고 많은 에너지를 흡수할 수 있는 최적의 충격특성을 갖는 CFRP 모자형 단면부재로는 적층각이 15°의 경우가 최적이었으며 90°/0° 적층구성 부재보다는 0°/90° 적층부재가 충격특성이 우수하였다.

## 참 고 문 헌

1. Jcantwell W. J. and Morton J., "Detection of Impact Damage in CFRP Laminates", Composite Structures, Vol. 3, pp. 241~257, 1985.
2. Lubin G, "Handbook of Composites", Van Nostrand Reinhold, pp. 147, 1982.
3. 이상관, "자동차용 복합재료", 기계저널 Vol. 39, No. 2, pp. 91~100, 1997
4. 광규섭, "자동차 경량화의 현황과 전망", 자동차경제, 24~29, 1997
5. 권문식, "한국자동차 신기술의 동향 (VI)", 자동차공학회지, pp. 30~35, 2004.
6. Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H. and Park, G. G.. "Light weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments", Transactions of KSAE 10: pp. 125~132, 2002.
7. 이영신, 전병희, 오재문, "복합재료 원통셀의 진동, 좌굴강도, 충격강도 특성 및 그의 설계최적화에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 5, pp. 48~69, 1997
8. Ma C. C. M., Huang Y. H and Chang H. J., "Hygrothermal Effent on the PEEK/CF and PPS/CF under Impact Loading(I)", ANTEC, pp. 2092~2096, 1991.
9. Karasek M. L., Strait L. H., Amateau M. F. and Runt J. P., "Effect of Temperature and Moisture on the Impact Behavior of Craphite/Epoxy Composites : Part I - Impact Energy Absorption", Journal of Composites Technology & Research, Vol. 17, No. 1, pp. 3~10, 1995.
10. Karasek M. L., Strait L. H., Amateau M. F. and Runt J. P., "Effect of Temperature and Moisture on the Impact Behavior of Craphite/Epoxy Composites : Part II - Impact Energy Absorption", Journal of Composites Technology & Research, Vol. 17, No. 1, pp. 11~16, 1995.
11. Weitsman Y. : Moisture in Composites : Sorption and Damage, Fatigue of Composite Materials, © Elsevier Science Publishers B. V., pp. 384~429, 1990.

12. Greszczuk L. B. and Chao H., "Impact Damage in Graphite Fiber Reinforced Composite", pp. 389~408, 1997.
13. Chllenger K. D., "The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composite", A Workshop Summary, Composite Structure, Vol. 6, pp. 295~318, 1986.
14. Ishai O, and Shragi, "Effect Impact of Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beam", Composites Struct., Vol. 14, No. 4, pp. 310~337, 1990.
15. Zheng Q. and Morgan R. J., "Synergistic Thermal-Moisture Damage Mechanism of Epoxies and Their Carbon Fiber Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 27, No. 15, pp. 1465~1479, 1993.
16. 최홍섭, 안규중, 남재도 "단일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료 적층판의 수분흡수거동", 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, pp. 1486~1500, 1998.
17. G. Sala, "Composite degradation due to fluid absorption", Composites Part B, Vol. 31, pp. 357~373, 2000.
18. 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.
19. 임광희, "CFRP 적층판의 충격손상과 열습효과가 잔류굽힘 피로강도에 미치는 영향", 조선대학교 박사학위논문, 1996
20. 정종안, "CFRP 적층판의 충격손상과 잔류강도에 미치는 고온 및 열습 영향", 조선대학교 박사학위논문, 1995
21. J.S.Lool, I.Y.Yang and T.Adachi, "Characteristics of Delamination in Graphite/Epoxy Laminates under Static and Impact Loads," Key Engineering Materials, Vol. 183~187, pp. 731~736, 2000.
22. Menges G. and Gitschner H. -W., "Sorpton Behaviour of Glass-Fiber Reinforced Composites and the Influence of Diffusing Media on Deformation and Failure Behaviour", Advances in Composite Materials, Vol. 1, pp. 25~48,

1980.

23. Aveston J., Kelly A. and Sillwood J. M., "Long Term Strength of Glass Reinforced Plastics in Wet Environments", *Advances in Composite Materials*, Vol. 1, pp. 556~568, 1980.
24. Cairns D. S. and Lagace P. A., "Residual Tensile Strength of Graphite/Epoxy and Kevlar/Epoxy Laminates with Impact Damage", *Composite Materials: Testing and Design*, ASTM STP 1059, Philadelphia, Vol. 9, pp. 48~63, 1990.
25. Starnes J. H., Jr. and Rhodes M. D., "Effect of Impact Damage and Holes on the Compressive Strength of a Graphite/Epoxy Laminate", *Nondestructive Evaluation and Critically for Composite Materials*, ASTM STP 696.
26. Rhodes M. D., "Low - Velocity Impact Damage in Graphite- Fiber Reinforced Epoxy Laminates", *Polymer Composites*, Vol. 2, No. 1, 1981.
27. Sirkis J. S., Chang C. C. and Smith B. T., "Low Velocity Impact of Optical Fiber Embedded Laminated Graphite/Epoxy Panels. Part I: Macro-Scale", *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 14, pp. 1347~1371, 1994.
28. Watanabe M., "Prediction of Leakage Life and Deterioration in Water for Fiber Glass Reinforced Plastic Bessels", *ASTM*, pp. 324~344, 1979.
29. Clark G., Ssunders D. S., Van Blaricum T. J. and Richmond M., "Moisture Absorption in Graphite/Epoxy Laminates", *Composites Science and Technology* 39, pp. 355~375, 1990.
30. Rief C., Lindner M. and Kromp K., "Experimental Investigations and a Model Proposal on Damage Mechanism in a Reinforced Carbon-Carbon Composite", *Composite Materials : Testing and Design*, ASTM STP 1059, Philadelphia, Vol. 9, pp. 564~579, 1990.
31. Aoki R. and Heyduck J., "An Experimental Study of Impact-Damaged Panels under Compression Fatigue Loading", *Developments in the Science and Technology of Composite Materials*, Fourth European Conference on



- Composite Materials, pp. 633~642, 1990.
32. Avva V., “Effect of Specimen Size on the Buckling Behavior of Laminated Composites Subjected to Low Velocity Impact”, ASTM STP 808, pp. 140~159, 1983.
  33. Chamis C. C., “Fracture and Fatigue Composite Materials”, Academic Press, New York, Vol. 5, pp. 94, 1974.
  34. Arakawa K. and Takahash K., “Analysis of Mode I Interlamina Fracture Behavior in Unidirectional CFRP Laminates”, JSME(A), Vol. 59, No. 568, pp. 2831~2836, 1993.
  35. Tratt M. D., “Analysis of Delamination Growth in Compressively Loaded Composite Laminates”, Composite Materials : Fatigue and Fracture, ASTM STP 1110, Vol. 3, pp. 359~372, 1991.
  36. Sharma V. A., “Effect of Specimen Size on the Buckling Behavior of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact”, Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites, ASTM STP 808.
  37. Cantwell W. J., “An Assessment of the Impact Performance of CFRP Reinforced with High Strain Carbon Fibers”, Composites Science and Technology, Vol. 25, 1986.
  38. 문창권, 최희락, 이봉 “적층형 복합재료의 기계적 성질에 미치는 수분의 영향”, 한국해양공학회지 Vol. 14, No. 3, pp. 90~99, 2000
  39. 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만 “복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복 메커니즘에 관한 연구”, 한국복합재료학회지, Vol. 21, No. 21, pp. 8~14, 2008
  40. 김형진, 김종훈, 고성위, 김엄기 “CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 미치는 수분의 영향”, 한국해양공학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 75~83, 1996
  41. 박정수, “고온에서 횡충격을 받는 CFRP 적층판의 충격손상과 잔류 굽힘강도에 관한 연구.” 조선대학교 박사학위논문, 1993
  42. 김영남, “수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압특성”, 조선대학

교 박사학위논문, 2002

43. Ishai O. and Aron V., "Instantaneous Effect of Internal Moisture Conditions on Strength of Glass-Fiber-Reinforced Plastics", ASTM, pp. 267~276, 1978.
44. H. Shen and G. S. Springer, "Effects of Moisture and Temperature on The Tensile Strength of Composite Materials", Journal of Composite Material, Vol. 2, pp. 2~16, 1976.
45. J. M. Whitney, I. M. Daniel and R. B. Pipes, "Experimental Mechanics of Fiber", Experimental Techniques, Vol. 7, No. 3, pp. 25
46. A. Ankara and D. Weisgerber, J. Vilsmeir, "Influence of Moisture on The Mechanical Properties of Graphite Epoxy System", Advanced Composites Material and Structure, pp. 347~362, 1987
47. G. L. Farley, R. M. Jones, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes", Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp. 37~50, 1992.
48. 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, Vol. 26, pp. 78~89, 1992.
49. G. L. Farley, R. M. Jones, "Crushing Characteristics of Composite Tubes with Near-Elliptical Cross sectionals", Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp. 1741~1751, 1992.

## 감사의 글

자유를 만끽하며 대학이라는 생활을 끝내고 이제 무엇을 해야 하는지 막막해 하고 있을 때가 불과 8년 전이었습니다. 그때와는 전혀 다른 학문을 전공으로 택하면서 받을 들이게 되었던 대학원에서 지금까지도 많은 것을 보고 배우고 있습니다. 배움에는 귀천도 없거니와 누구에게라도 배운다는 마음으로 또한 거꾸로 메달아 놔도 몇 년을 버티지 못하겠냐는 각오로 보내왔던 인내와 겸손의 시간이 벌써 5년이 흘렀습니다.

저에게는 하루하루가 배움인 것 같습니다. 항상 배울 것이 이렇게 많은걸 보면 아직도 부족한 저인 것 같습니다. 그런 제가 이렇게 박사학위라는 큰 결실을 맺을 수 있기까지 저에게 힘과 격려, 많은 도움을 주신 분들께 감사의 말씀 전하고 싶습니다.

본 논문이 있기까지 항상 저를 아들과 같이 따뜻하고 반갑게 맞이하여 주시며 많은 격려를 아끼지 않아 주신 심재기 교수님께 먼저 감사의 말씀 전합니다.

저에게 열성적인 관심과 진심어린 격려를 주셨던 송원대학교 정종안 교수님, 언제나 따뜻한 한마디로 저에게 먼저 말씀을 건네주셨던 전북대학교 김선규 교수님, 저의 영어 과외선생님이시자 본 논문이 완성되기까지 꼼꼼하게 도와주신 우석대학교 임광희 교수님, 후배들에게 하나라도 배움을 주시고자 노력하시는 성화대학 민한기 교수님, 처음 대학원에 입학하여 저에게 제도를 가르쳐 주셨고 지금은 책상 건너로 저에게 힘을 주시면서 때로는 따끔한 질책과 많은 교훈을 주시는 동강대학 차천석 교수님, 항상 후배들에게 따뜻한 한마디로 저희 후배들을 편하게 해주시는 조선대학교 김지훈 교수님, 난처함이 많으셨을 텐데 저에게 부담 주지 않으시려 배려해 주셨던 도원테크 윤규중 사장님, 때로는 장난기 어린 말씀으로 저희에게 농담도 잘 건네시는 친구같이 편한 선배님 김정호 박사님, 처음 실험실에 들어와 어색하고 서먹했던 저에게 먼저 다가와 따뜻한 한마디로 힘을 주셨던 이길성 박사님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

졸업논문을 작성하기까지 대학원 생활동안 제가 많이 의지하고 저에게 많은 배움을 주었던 황우채와 윤희성, 따뜻한 마음씨와 장난기가 많았던 서현경, 언제나

밝은 모습을 보여주는 김정호, 누구보다 열심히 대학원 생활을 보내고 지금은 멀리 떨어져 있는 정주영, 저 만큼이나 많이 덜렁거리면서 교수님께 야단을 듣고는 하지만 항상 착하고 재미있는 박으뜸, 언제나 깡뚫 한 모습과 한결같은 모습의 최주호 후배님께 마지막으로 감사의 말씀을 전합니다.

또한 저에게 좋은 말씀과 교훈을 주시며 저를 진심으로 아들같이 대해주시는 장인어르신과 장모님께도 진심으로 감사의 마음 전합니다.

그리고 지금이 있기까지 격려와 때로는 투정으로 묵묵히 제 곁을 지켜줬던 아름답고 사랑스러운 아내 덕영에게 미안함과 진심어린 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 지금의 저를 만들어 주셨고, 이제껏 살면서 저의 정신적 지주이시자 제가 닮아가고 싶은 아버지께 감사의 말씀 드리고 싶습니다. 언제나 부족한 아들에게 실망도 많이 하시지만 따뜻한 격려와 당신의 난처함과 고됨을 저에게 표현치 못하시고 뒤에서 묵묵히 도와주신 아버지께 한없는 감사와 죄스러움을 이렇게 글로밖에 대신하지 못하는 점 죄송합니다. 아버지, 어머니 사랑합니다.

오늘의 제가 있기까지 저에게 관심을 주셨던 모든 이께 감사를 드립니다.

2011 년 6 월 졸업논문을 마치며...

양 용 준