

2010년 8월  
석사학위논문

열습하에서 CFRP 원형/사각형  
부재의 에너지 흡수 특성

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 으 뜸

# 열습하에서 CFRP 원형/사각형 부재의 에너지 흡수 특성

A study on the energy absorption characteristics  
of CFRP circular/square members  
under the hygrothermal

2010 년 8 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

박 으 뜸

# 열습하에서 CFRP 원형/사각형 부재의 에너지 흡수 특성

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2010 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

박 으 뜸

박으뜸의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 정 낙 규



위 원 조선대학교 조교수 김 지 훈



위 원 조선대학교 교수 양 인 영



2010년 5 월 일

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
LIST OF PHOTOGRAPHS .....	V
ABSTRACT .....	VIII
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목적 및 방법 .....	3
<b>제 2 장 시험편 및 실험방법 .....</b>	<b>4</b>
제 1 절 시험편 .....	4
제 2 절 실험 방법 .....	10
2-1. 흡습 이론 .....	10
2-2. 흡습 실험 및 정적 축 압궤 실험 .....	10
제 3 절 실험 장치 .....	18

제 3 장 원형 구조부재 압괴 실험 결과 .....	19
제 1 절 CFRP 원형 구조부재 정적 압괴 실험 ....	19
제 2 절 수분이 흡수된 CFRP 원형 구조부재 정적 압괴 실험 .....	30
제 4 장 사각형 구조부재 압괴 실험 결과 ....	41
제 1 절 CFRP 사각형 구조부재 정적 압괴 실험	41
제 2 절 수분이 흡수된 CFRP 사각형 구조부재 정적 압괴 실험 .....	52
제 5 장 실험 결과 및 고찰 .....	63
제 1 절 수분 흡습거동 평가 .....	63
제 2 절 열습 환경 하에서의 강도 평가 .....	67
제 6 장 결론 .....	79
참 고 문 헌 .....	80

## LIST OF TABLES

Table 1 Characteristics and use of the CFRP .....	2
Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet .....	6
Table 3 Definition of Specimens .....	7
Table 4 Hygrothermal experiment test results of specimen .....	66
Table 5 Static collapse test results of specimen .....	72
Table 6 Comparison of the absorption energy of specimen .....	78

## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematic view of specimens .....	6
Fig. 2 Schematic arrangement of specimen in the autoclave .....	8
Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen .....	8
Fig. 4 Determination of diffusion coefficient with the square root of time for $t < t_L$ the slope is constant .....	16
Fig. 5 Load – Displacement curve of CDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	20
Fig. 6 Load – Displacement curve of CDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	21
Fig. 7 Load – Displacement curve of CDS[ 0/ 90] <sub>S2</sub> .....	22
Fig. 8 Load – Displacement curve of CDS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	23
Fig. 9 Load – Displacement curve of CDS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	24
Fig. 10 Load – Displacement curve of CDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	25
Fig. 11 Load – Displacement curve of CDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	26
Fig. 12 Load – Displacement curve of CDS[ 90/ 0] <sub>S2</sub> .....	27
Fig. 13 Load – Displacement curve of CDS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	28
Fig. 14 Load – Displacement curve of CDS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	29
Fig. 15 Load – Displacement curve of CWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	31
Fig. 16 Load – Displacement curve of CWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	32
Fig. 17 Load – Displacement curve of CWS[ 0/ 90] <sub>S2</sub> .....	33
Fig. 18 Load – Displacement curve of CWS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	34
Fig. 19 Load – Displacement curve of CWS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	35
Fig. 20 Load – Displacement curve of CWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	36
Fig. 21 Load – Displacement curve of CWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	37



Fig. 22 Load – Displacement curve of CWS[ 90/ 0] <sub>S2</sub> .....	38
Fig. 23 Load – Displacement curve of CWS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	39
Fig. 24 Load – Displacement curve of CWS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	40
Fig. 25 Load – Displacement curve of SDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	42
Fig. 26 Load – Displacement curve of SDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	43
Fig. 27 Load – Displacement curve of SDS[ 0/ 90] <sub>S2</sub> .....	44
Fig. 28 Load – Displacement curve of SDS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	45
Fig. 29 Load – Displacement curve of SDS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	46
Fig. 30 Load – Displacement curve of SDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	47
Fig. 31 Load – Displacement curve of SDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	48
Fig. 32 Load – Displacement curve of SDS[ 90/ 0] <sub>S2</sub> .....	49
Fig. 33 Load – Displacement curve of SDS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	50
Fig. 34 Load – Displacement curve of SDS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	51
Fig. 35 Load – Displacement curve of SWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	53
Fig. 36 Load – Displacement curve of SWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	54
Fig. 37 Load – Displacement curve of SWS[ 0/ 90] <sub>S2</sub> .....	55
Fig. 38 Load – Displacement curve of SWS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	56
Fig. 39 Load – Displacement curve of SWS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	57
Fig. 40 Load – Displacement curve of SWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	58
Fig. 41 Load – Displacement curve of SWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	59
Fig. 42 Load – Displacement curve of SWS[ 90/ 0] <sub>S2</sub> .....	60
Fig. 43 Load – Displacement curve of SWS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	61
Fig. 44 Load – Displacement curve of SWS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	62
Fig. 45 Moisture content of circle CFRP specimens (outer angle 0° ) .....	64
Fig. 46 Moisture content of circle CFRP specimens (outer angle 90° ) .....	64
Fig. 47 Moisture content of square CFRP specimens (outer angle 0° ) .....	65

Fig. 48 Moisture content of square CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	65
Fig. 49 Moisture content according to variation interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	67
Fig. 50 Moisture content according to variation interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	67
Fig. 51 Moisture content according to variation interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	68
Fig. 52 Moisture content according to variation interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	68
Fig. 53 Maximum collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	72
Fig. 54 Maximum collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	72
Fig. 54 Mean collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	73
Fig. 56 Mean collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	73
Fig. 57 Absorption energy according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	74
Fig. 58 Absorption energy according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	74
Fig. 59 Maximum collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	75
Fig. 60 Maximum collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	75
Fig. 61 Mean collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	76

Fig. 62 Mean collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	76
Fig. 63 Absorption energy according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $0^\circ$ ) .....	77
Fig. 64 Absorption energy according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle $90^\circ$ ) .....	77

## LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave .....	9
Photo. 2 Constant temperature Water bath and precise electronic scale .....	17
Photo. 3 Universal testing machine(UTM) .....	18
Photo. 4 Collapse Processing of CDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	20
Photo. 5 Collapse Processing of CDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	21
Photo. 6 Collapse Processing of CDS[ 0/ 90] <sub>S2</sub> .....	22
Photo. 7 Collapse Processing of CDS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	23
Photo. 8 Collapse Processing of CDS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	24
Photo. 9 Collapse Processing of CDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	25
Photo. 10 Collapse Processing of CDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	26
Photo. 11 Collapse Processing of CDS[ 90/ 0] <sub>S2</sub> .....	27
Photo. 12 Collapse Processing of CDS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	28
Photo. 13 Collapse Processing of CDS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	30
Photo. 14 Collapse Processing of CWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	31
Photo. 15 Collapse Processing of CWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	32
Photo. 16 Collapse Processing of CWS[ 0/ 90] <sub>S2</sub> .....	33
Photo. 17 Collapse Processing of CWS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	34
Photo. 18 Collapse Processing of CWS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	35
Photo. 19 Collapse Processing of CWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	36
Photo. 20 Collapse Processing of CWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	37
Photo. 21 Collapse Processing of CWS[ 90/ 0] <sub>S2</sub> .....	38
Photo. 22 Collapse Processing of CWS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	39

Photo. 23 Collapse Processing of CWS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	40
Photo. 24 Collapse Processing of SDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	42
Photo. 25 Collapse Processing of SDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	43
Photo. 26 Collapse Processing of SDS[ 0/ 90] <sub>S<sub>2</sub></sub> .....	44
Photo. 27 Collapse Processing of SDS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	45
Photo. 28 Collapse Processing of SDS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	46
Photo. 29 Collapse Processing of SDS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	47
Photo. 30 Collapse Processing of SDS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	48
Photo. 31 Collapse Processing of SDS[ 90/ 0] <sub>S<sub>2</sub></sub> .....	49
Photo. 32 Collapse Processing of SDS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	50
Photo. 33 Collapse Processing of SDS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	51
Photo. 34 Collapse Processing of SWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	53
Photo. 35 Collapse Processing of SWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	54
Photo. 36 Collapse Processing of SWS[ 0/ 90] <sub>S<sub>2</sub></sub> .....	55
Photo. 37 Collapse Processing of SWS[ 0/ 90] <sub>2S</sub> .....	56
Photo. 38 Collapse Processing of SWS[ 90/ 0] <sub>4</sub> .....	57
Photo. 39 Collapse Processing of SWS[ 90 <sub>2</sub> / 0 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub> .....	58
Photo. 40 Collapse Processing of SWS[ 0 <sub>2</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> .....	59
Photo. 41 Collapse Processing of SWS[ 90/ 0] <sub>S<sub>2</sub></sub> .....	60
Photo. 42 Collapse Processing of SWS[ 90/ 0] <sub>2S</sub> .....	61
Photo. 43 Collapse Processing of SWS[ 0/ 90] <sub>4</sub> .....	62

# ABSTRACT

## A study on the energy absorption characteristics of CFRP circular/square members under the hygrothermal

By Park, Eu ddeum

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

Dept. Advanced Parts & Materials

Engineering.

Graduate School of Chosun University.

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) high-in-tension, according to quality of light weight the sporting goods and the vehicle bonnet, aerospace craft etc. CFRP is used from the field which is various. From specially with the automobile the driver valence according to increasing, the accident valence is increasing same mobile means and the collision accident which is like this the most general region the side or the back side in order to occur plentifully most is one part which is important from general collision at the time of safety decline vehicle development. For a safety consequently shock the research which absorbs is extending plentifully time, at the time of does a safety and a lightweight anger first of all under demand conditions as the shocking absorption absent material. Insect family hour height as the material CFRP was coming to be paid attention like this demand condition, used re-with shocking absorption vice-and increased for experiments to be many wholeheartedly coming a shocking absorption and quantity. But it which has a

weakness in compliance with the moisture or moisture the efficiency falls is the thing in as many as like this CFRP. The change of change of temperature and humidity is big management very importance termination according to like this ambient environmental change from the country where the specially, with our country same field of fire paragraph is clear because being the possibility the various branch variable happening is. Gave a temperature and the humidity which are fixed in the specimen from this dissertation and the moisture absorption which follows in CFRP interfaces should have become how many, examined and came to make from under same condition, the specimen and the moisture which constructs comparison of the specimen which absorbs led and the degree of performance degradation of the water absorption at the time of should have changed how many, is examines. And the interface of CFRP complex materials the great part decides the physical properties of the complex material is and according to interface veterinarian change the energy absorption quantity of circular absence be visible what kind of difference, to know, the report person does.

1. CFRP absorption water after to make an environment, according to interface possibility with the sheep of the moisture which absorbs difference of speed is but until before 1% of original weight increases the speed which absorbs speed falls with 1% after that quickly gradually. With 2500 hour after that almost there is not fluctuation about absorption.
2. 2 interfaces absorb most quickly and also the absorption quantity appears most highly at 1.26% and on the other hand 7 interfaces show the absorption quantity which does not reach in 1.09% of circle members.

3. 2 interfaces absorb most quickly and also the absorption quantity appears most highly at 1.19% and on the other hand 7 interfaces show the absorption quantity which does not reach in 1.03% of square members.
  
4. This result leads and absorption water the within resin of the case interface layer which will do is destroyed and does not become the recovery even to dry after that and the absorption energy quantity decreases in order not to be and there is a possibility of knowing.



# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

탄소섬유강화복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics:이하 CFRP라 한다.) 복합재는 기존의 금속재료에 비하여 강성, 강도가 높고 낮은 비중 덕분에 높은 비강도와 비강성의 값을 가지고 있다. 또한 CFRP는 좋은 피로 특성을 가지고 있고 금속재료에 비하여 20%~50% 정도 중량을 절감시킬 수 있다는 장점이 있어 경량화가 요구되는 항공우주분야를 비롯하여 선박, 자동차, 의료기기, 일반산업분야, 스포츠, 에너지 관련분야 등의 경량화가 필요한 부분 전반에 걸쳐서 재료로 널리 사용되고 있다.<sup>1, 2)</sup>

또 다른 특성으로 내열성을 꼽을 수 있는데 CFRP복합재의 경우 낮은 열팽창 계수를 가지고 있으므로 우주선과 같이 고온 및 저온에서의 구조재료로써 이용되면 치수의 안정화가 유지할 수 있게 된다.

또한 최근에는 이러한 특성들을 이용해 환경 보호적 측면에서 대두되고 있는 환경오염 문제와 에너지 절약의 관점에서 차량의 연비향상 뿐만 아니라 차체의 수명 연장과 경량화 재료로 인한 엔진효율의 향상을 극대화시킬 수 있어서 차량의 부품과 구조부재에 그 사용 범위가 점차 확대되어가고 있다.<sup>3~5)</sup>

최근에는 CFRP복합재의 무게 비 충격에너지 흡수 성능이 매우 우수하므로 충돌에너지를 흡수해야하는 부재에 CFRP복합재를 이용하고자 많은 연구가 되고 있는 실정이다.<sup>6, 7)</sup> 그러나 이미 충분한 실험과 검증이 확보되어 있는 금속재료와는 달리, CFRP복합재는 그 붕괴현상에 관련된 실험과 해석적인 연구가 아직은 미흡한 상태이다. 복합재료의 파괴 메커니즘은 매우 복잡할 뿐만 아니라 그 해석 또한 어려우며 인장, 압축 및 전단하중 작용 시 섬유와 기지의 파단 및 그 상호간의 파단을 포함하고 있기 때문이다.

또한 CFRP복합재는 정적 부하에 대하여 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습 및 충격부하에 대해서는 취약한 특성을 보여주는데 온도, 습도 등과 같은 환경적 요인으로 습기가 복합재료 내로 침투하여 기지의 분자배열

및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재질의 기계적 성질을 저하시킨다. 특히 충격 손상을 받은 CFRP 적층판은 모재크랙, 배면크랙 및 층간 계면에 박리가 발생하여 잔류강도가 현저하게 저하되는 문제점이 있으며, 고온·고습 분위기에 노출되면 잔류 강도 특성치가 크게 저하하게 된다.<sup>8~21)</sup>

이는 섬유와 수지의 균열, 섬유와 수지의 분리, 섬유배향이 변하는 계면에서의 층간박리 등이 적층재 내부에 발생하고 기지의 분자배열 및 화학적 성질이 변화되어 계면 특성이 변화하는 것이 강도저하의 주된 원인으로 지적되고 있다.<sup>22~31)</sup> CFRP의 일반적인 특성 및 용도를 Table. 1에 나타냈다.

Table. 1 Characteristics and use of the and CFRP

분 류	특 성	사 용 범 위
CFRP	강성 비중량	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	FRP배, 탱크, 저장고(싸이로) 등
	강성 비열팽창	우주기기 안테나, 밀리파 안테나, 마이크로메타, 타이밍 벨트, 저온 탱크, 제도기기 등
	x선 투과성 강도, 강성	X선 카세트, X 선의료기기 등
	전기전도성 발열	약품 탱크, 대전방지 로울러, 정전도장 벽직류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패킹, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로켓 노즐, 항공기 엔진 등

## 제 2 절 연구목적 및 방법

CFRP복합재는 높은 비강도와 비강성, 탄성계수 및 내열성이라는 많은 장점을 가지고 있어서 우주·항공, 자동차, 스포츠, 일반 산업분야, 의료기기, 에너지 분야 같이 다양한 산업분야에서 사용되어지고 있다. 하지만 금속에 비하여 짧은 역사로 인해 복합재에 대한 메커니즘적인 연구가 많이 미흡한 실정으로 항공기나 우주선 분야에서도 금속으로 형태를 만든 뒤 금속을 보조하는 형태로써 많이 사용되고 있다. CFRP 복합재가 주요 구조부재로써 사용되기 위해서는 적층 방향, 적층 두께, 적층 순서, 재료의 종류 등 적층구성에 따라 변수가 많으므로 그에 따른 많은 연구가 필요하다.

CFRP복합재의 단점으로 충격에 대해서는 매우 취약하다는 것과 고온·고습이 혼재한 환경에서 강도가 저하되는 점이 있다. 첫째로, CFRP복합재는 탄소섬유와 수지를 재료로 사용하여 복합시킨 재료이기 때문에 충격으로 인해 파괴된 경우 정확한 판단을 하기가 매우 어렵다. 둘째로는 섬유로 구성된 복합재이므로 습기에 노출 되었을 때 수분에 대한 침투를 막을 수 없다는 것이다. 수분이 복합재 내부로 침투하면 기지의 화학적 변화에 의해 섬유간의 결속력이 떨어지게 되고 그에 따라 CFRP복합재의 기계적 성질이 낮아지게 됨에 따라 강도 저하가 일어나게 된다.

따라서 본 연구에서는 구조부재의 기본 형태인 원형과 사각형 단면을 가지는 CFRP구조부재를 적층구성을 달리하여 만든 후 고온·고습 환경 하에서 장시간 노출되었을 때 적층구성의 차이에 따른 수분흡수특성과 강도평가를 실험적으로 고찰하였다. 고온·고습의 환경 하에서 수분으로 인해 발생하는 강도저하에 대처할 수 있는 최적의 에너지 흡수 특성을 갖는 적층구성을 파악하여 CFRP복합재를 재료로 하는 제품을 설계 할 때 적용 가능한 데이터를 얻고자 한다.

흡습실험은 고온·고습 상황 하에서 흡습률이 더 이상 증가하지 않을 때까지인 흡습평행상태 CFRP복합재의 수분흡수 상태를 알아보았고 무흡습 시험편과의 비교를 통해 수분흡수에 따른 강도 및 흡수에너지 변화에 대하여 알아보았다.

## 제 2 장 시험편 및 실험방법

### 제 1 절 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료이며 이방성 특징을 가지는 섬유복합 재료인 CFRP를 이용하여 구조부재에 기본 단면형상인 원형과 사각형 구조부재를 제작하여 시험편으로 사용하였다.

CFRP 원형 구조부재는 Fig. 1(a)와 같이 원형형상을 가진 맨드릴에 이형 필름(release film)을 감고 Carbon/epoxy 일방향 탄소섬유 프리프레그 시트(한국카본, Cu125NS, Carbon Fiber uni-direction 125g/m<sup>2</sup>)를 적층하고 적층된 CFRP 원형 구조부재에 이형필름과 수축테이프를 감고 솜, 진공팩, 진공테이프를 이용하여 원형형상이 나올 수 있도록 감싼 후 오토클레이브를 사용하여 제작하였다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질은 Table. 2 에 나타냈다.

CFRP 사각 구조부재는 CFRP 원형 구조부재와 동일하게 사각형상을 가진 맨드릴(Mandrel)을 제작하여 Fig. 1(b)와 같이 맨드릴에 이형필름을 감은 뒤 CFRP 프리프레그 시트를 적층하였다. 시험편 제작 방법은 Fig. 2와 같이 적층된 CFRP 원형 및 사각 구조부재에 이형필름, 시험편형상을 고정시켜주는 지그, 진공팩과 진공테이프를 적층하여 오토클레이브 성형법으로 CFRP 원형 및 사각 구조부재 시험편을 제작하였다.

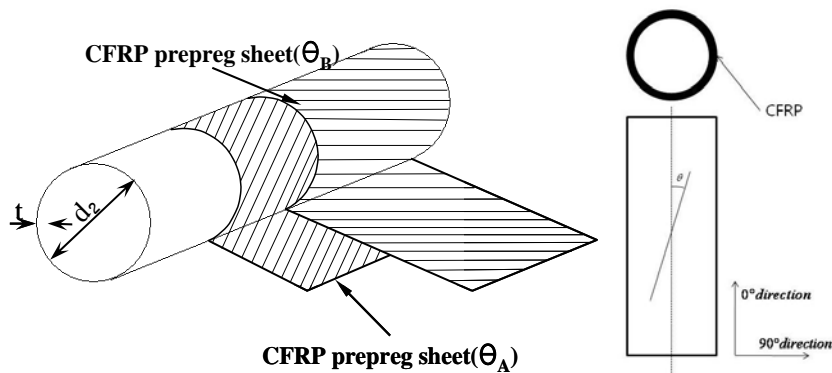
CFRP는 이방성을 가지는 재료로 설계 방법에 따라 여러 기계적 특성을 가지게 되는데 본 연구에서는 강도와 강성이 높은 구조부재로서 좋은 특성을 얻고자 계면 수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 계면 수는 축 방향을 기준으로 하여 최외각 층 0° 와 90° 로 구분한 뒤 2,3,4,6,7로 계면수를 기준으로 프리프레그 시트를 8ply씩 적층하였으며 Table. 3과 같이 시험편을 구분하였다.

시험편의 성형은 Photo. 1과 같이 autoclave를 이용하여 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 진공펌프에 의하여 진공팩 속을 10<sup>-1</sup>Pa까지 진공 시킨 후 Compressor에 의해서 진공백의 외측으

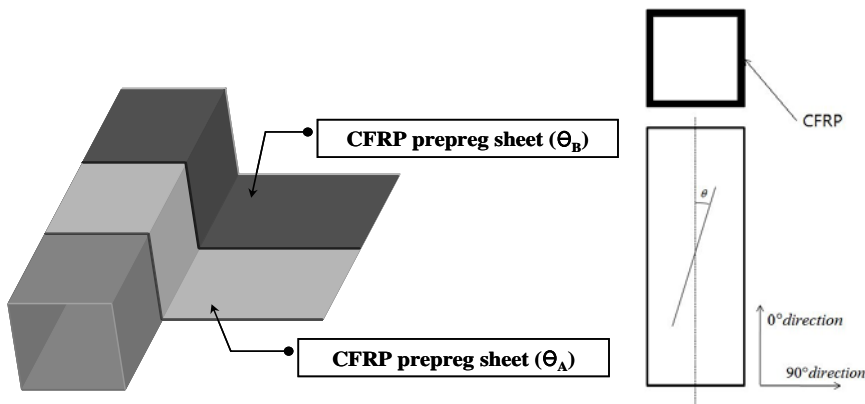
로부터  $3 \times 10^5 \text{Pa}$  정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 3은 시험편 제작 시 성형 사이클을 나타냈다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 시험편의 길이 120mm로 절단하였다. CFRP 사각구조부재는 한 변이 30mm인 정사각형 단면을 갖는 사각튜브이며 원형 구조부재는 내경 30mm 원형단면을 갖는 원형튜브이다. 그리고 시험편의 두께는 1mm로 동일하다.

Table. 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet

Types Characteristics	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density	$1.83 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$1.24 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	–
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]



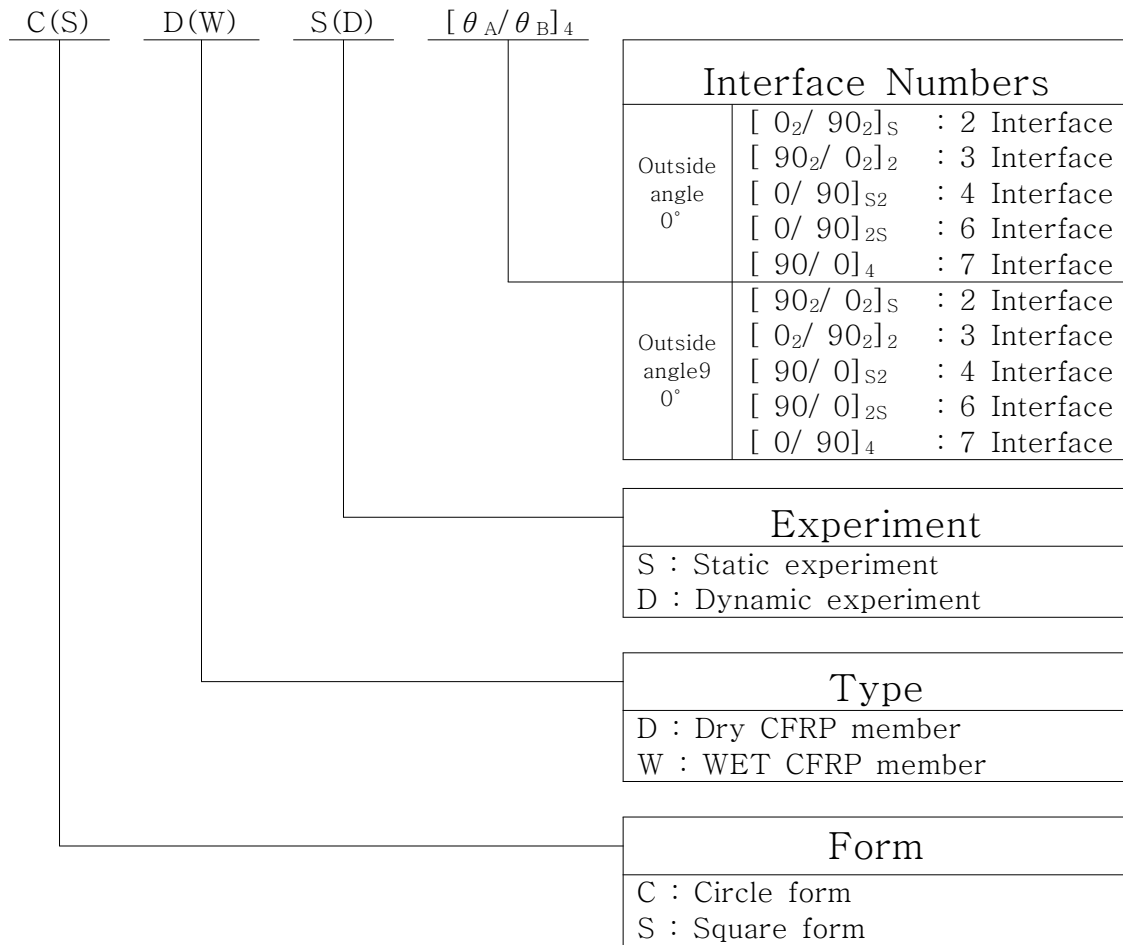
(a) Schematic view of circle CFRP specimen



(b) Schematic view of square CFRP specimen

Fig. 2 Schematic view of specimens

Table. 3 Definition of Specimens



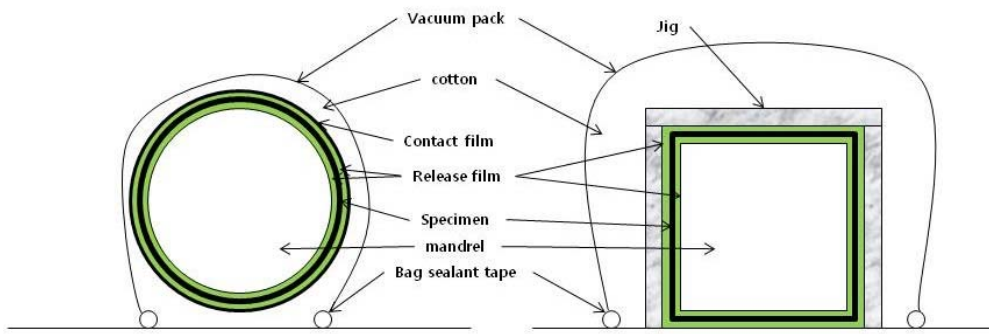


Fig. 2 Schematic arrangement of specimen in the autoclave

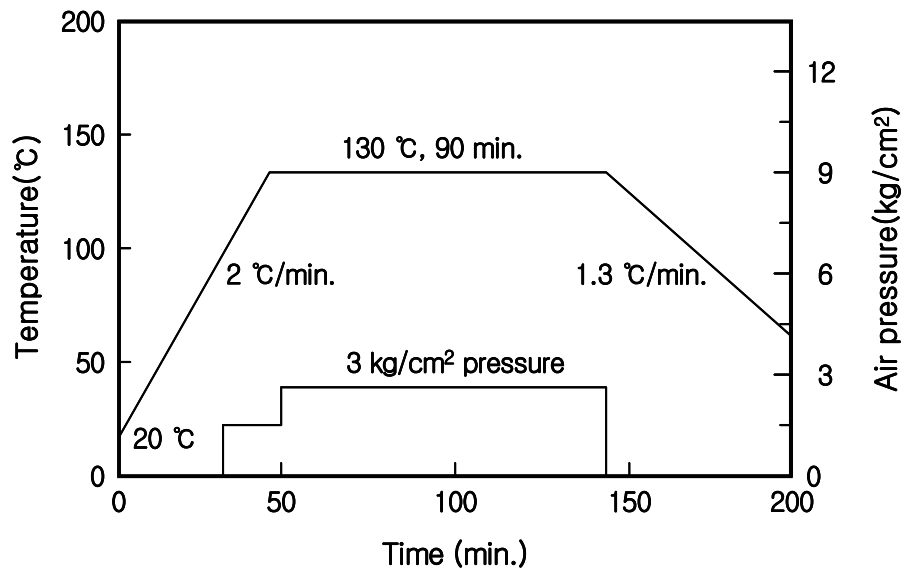


Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen





Photo. 1 Autoclave

## 제 2 절 실험 방법

CFRP 적층판은 온도와 습도 같은 환경적 조건에 오랜 시간동안 노출되면 재료의 강도저하 현상이 일어나게 된다. 수분흡수특성, 흡습률의 크기 등은 구조설계 시 중요한 자료가 될 수 있으므로 시험편에 일정한 온도와 습도를 주어서 이러한 환경이 CFRP의 계면 수에 따라 어떠한 영향을 끼치는지 알아보고 같은 조건에서 만들어진 건조한 시험편과 수분을 흡수한 시험편의 비교를 통하여 수분을 흡수한 시험편이 얼마나 성능이 떨어지는지 알아보하고자 한다.

### 2-1 흡습 이론

일방향제 복합재료의 열전도는 다음 식으로 표현된다.<sup>32)</sup>

$$q^T = -D^T T \quad (1)$$

여기서  $q^T$ : 열유속,  $D^T$ : 열전도,  $T$ : 온도구배

미소 요소  $dz$ 만을 고려하면 온도( $T$ )에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$q_z^T - (q_z^T + \frac{\partial q_z^T}{\partial z} dz) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (2)$$

여기서  $q_z^T$ : 열유속,  $\rho$ : 밀도,  $C$ : 비열

식 (1)을 식 (2)에 대입하면

$$\frac{\partial}{\partial z} (D_z^T \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

여기에서  $D_z^T$  와  $\rho C$ 는 상수이므로 다음과 같은 식과 같이 된다.

$$\frac{D_z^T}{\rho C} \partial^2 \frac{T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

식 (4)에서 재료가 무한히 긴 평판이고 수분의 흡습은 재료의 두께방향으로만 일어난다는 가정 하에서 흡습확산에 적용하면 Fick의 식이 된다.<sup>33-35)</sup>

$$D_z \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (5)$$

$M$ : 흡습농도,  $D_z$ : Z방향의 확산계수,  $t$ : 시간(sec)

식 (5)의 경계 조건은

$t \leq 0$  이고  $0 < z < h$  일 때,  $M = M_0$

$t > 0$  이고  $z = 0, z = h$  일 때,  $M = M_\infty$  이다. (6)

여기서  $h$ : 시험편의 두께,  $z$ : 시험편의 두께방향

식 (5),(6)의 해는 다음과 같다.<sup>36)</sup>

$$\frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2j+1} \sin \frac{(2j+1)\pi z}{h} \exp \left[ - \frac{\pi^2 D t}{h^2} (2j+1)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

여기서  $M$ : 임의의 시간에서 재료 내부의 수분 흡습률

$M_\infty$ : 포화 수분 흡습률

$M_0$ : 초기 수분 흡습률

식 (5), (6)과 같은 조건을 만족하는 1차원 문제로 가정할 수 있으며, 재

료내에 함유된 수분함량  $G$ 는 식(5)를 재료 두께에 관해 적분하면 얻을 수 있다.

$$G = \int_0^h M(z,t) dz \quad (8)$$

식(5), (6), (8)을 정리하면

$$G = \frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp\left[-7.3\left(D_z \frac{t}{h^2}\right)^{0.75}\right] \quad (9)$$

그리고 재료 내에 포함된 수분 흡습률은 다음과 같이 된다.<sup>37)</sup>

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (10)$$

$M$ : 수분 흡습률(%),  $W_d$ : 흡습전의 재료무게(g),  $W_m$ : 흡습후의 재료무게(g)

탄소섬유의 흡습을 무시하면 복합재료 내의 수분흡수는 모재(Matrix)의 흡습률과 섬유함유율에 의해서 다음과 같이 표현된다.<sup>38)</sup>

$$\begin{aligned} D_L &= (1 - V_f) D_R \\ D_T &= \left(1 - \sqrt{\frac{V_f}{\pi}}\right) D_R \\ \therefore D_L &= \left(\frac{1 - V_f}{1 - 2\sqrt{\frac{V_f}{\pi}}}\right) D_T \end{aligned} \quad (11)$$

$D_L$ : 섬유방향 확산계수,  $D_T$ : 섬유 수직방향 확산계수,  $D_R$ : 모재의 확산

계수,  $V_f$ : 섬유함유율이다.

$0^\circ$  와  $90^\circ$  를 같은 수로 적층한 크로스 플라이(Cross ply)의 경우 x, y, z 방향의 흡습확산계수는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} D_x = D_y &= \frac{D_L + D_T}{2} \\ D_z &= D_T \end{aligned} \quad (12)$$

그러므로 섬유함유율이 50%인 경우

$$\begin{aligned} D_L &= 2.48D_T \\ D_x = D_y &= 1.74D_T = 1.74D_z \end{aligned} \quad (13)$$

흡습이 x, y, z 방향을 통해 일어난다면 식(9)를 중첩하여 식(14)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp\left[-7.3\left(\frac{t}{h^2}\right)^{0.75}\left(D_z^{0.75} + \frac{h}{a}D_x^{0.75} + \frac{h}{b}D_y^{0.75}\right)\right] \quad (14)$$

식 (13),(14)의 관계에서,

$$G = 1 - \exp\left[-7.3\left(\frac{tD_z}{h^2}\right)^{0.75}C\right] \quad (15)$$

$$\text{여기서 } C = 1 + \frac{h}{a}1.74^{0.75} + \frac{h}{b}1.74^{0.75}$$

$a$ : 시험편의 길이,  $b$ : 시험편의 폭,  $h$ : 시험편의 두께,  $C$ : 시험편의 보정 계수

본 연구에서는 섬유배향이 다른 직교·의사등방성 적층판이 고온·고습하  
 에 노출될 때 다음식인 Fick의 법칙을 이용하여 확산계수를 구하였다.<sup>39~40)</sup>  
 흡습률을 평균흡습농도로 나타낼 수 있다.

$$\bar{M} = \frac{1}{h} \int_0^h M dz \quad (16)$$

식 (16)의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t=0 \text{일 때, } \bar{M} &= M_0 \\ t=\infty \text{일 때, } \bar{M} &= M_\infty \text{ 이다.} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (7), (16)을 이용하여 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{\bar{M} - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D t}{h^2} (2j+1)^2\right] \quad (18)$$

시간 t가 큰 경우에는 식(18)에서 첫 번째 항을 근사시키면 식(19)와 같  
 다.

$$\frac{\bar{M} - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D t}{h^2}\right) \quad (19)$$

한편 시간 (t)가 작은 경우에는 식(18)을 근사시키면 식(20)과 같다.

$$\frac{\bar{M} - M_0}{M_\infty - M_0} = 4 \left(\frac{D t}{\pi h^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

먼저 식(19)로부터 흡습 과정중에 1/2시간이 될 때 흡습확산계수는 식(21)과 같이 나온다.

$$D = \frac{h^2}{\pi^2 t (1/2)} \ln \frac{16}{\pi^2} \quad (21)$$

또한 식(20)으로부터 확산계수(D)의 값을 구하면 식(22)와 같다.

$$D = \frac{\pi}{16} \left( \frac{\overline{M}_2 - \overline{M}_1}{M_\infty - M_0} \right)^2 \left( \frac{h}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (22)$$

$h$ : 시험편의 두께,  $\overline{M}$  수분 흡습률,  $M_0$  초기 수분 흡습률,  $M_\infty$  포화수분 흡습률,  $t$ : 시간(sec)

식(10)과 식(22)로부터 수분 흡습률과 흡습확산계수를 구했다. 흡습확산계수를 구할 때는 Fig. 4와 같이 선형적인 부분인  $\overline{M}_1$  및  $\overline{M}_2$ 와  $\sqrt{t_1}$  및  $\sqrt{t_2}$  사이에서 구한다.

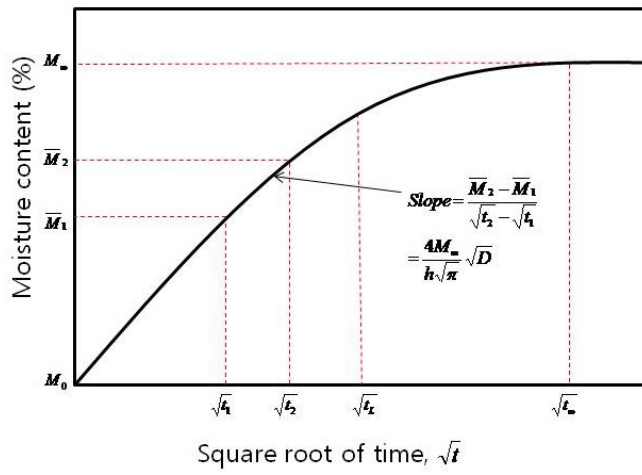


Fig. 4 Determination of diffusion coefficient with the square root of time for  $t < t_L$  the slope is constant



## 2-2 흡습 실험 및 정적 축 압계 실험

고온 고습 환경에 노출 되었을 때 CFRP의 강도저하가 어떻게 나타나는지 정량적으로 알고 CFRP 구조부재 설계 시 허용할 수 있는 데이터를 얻기 위하여 실제 실험을 하였다. 시험편에 이물질이 섞이지 않도록 항온수조와 증류수를 사용하여 60° C의 온도를 유지하면서 고온고습의 환경을 갖춘다. 흡수 변화를 알 수 있도록 72시간 간격으로 전자정밀저울을 이용하여 시험편의 무게를 재 무게변화가 어떻게 진행되는지 알아본다. 시험편의 무게변화량은 수분흡습 전의 무게와의 비를 백분율로 나타내었다.



Photo. 2 Constant temperature Water bath and precise electronic scale

정적 축 압괴 실험방법으로는 원형 및 사각형 CFRP 흡습시험편과 무흡습 시험편들을 Photo.3과 같이 UTM을 이용하여 10 mm/min의 속도로 시험편 70 mm의 변위를 제어하면서 정적 압괴실험을 실시하되 건조한 시험편은 바로 실험하였고 흡습 시험편은 습기 제거 후 실험을 하였다.

압괴실험 후 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 이를 다음과 같은 식으로 적분하여 흡수에너지를 구하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l Fdl \quad (23)$$

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



Photo. 3 Universal testing machine(UTM)

## 제 3 장 원형 구조부재 압괴 실험 결과

### 제 1 절 CFRP 원형 구조부재 정적 압괴 실험

계면수와 최외층 적층각도가 다른 원형 CFRP구조부재를 오토클레이브 성형법을 이용하여 제작된 시험편의 강도를 평가하기 위하여 먼저 수분을 흡수하지 않은 CFRP구조부재 시험편을 이용하여 정적 압괴 실험을 하였다. 최외각 층  $0^\circ$  와  $90^\circ$  에 따라 각 계면 수 변화에 따른 정적 압괴 실험을 실시하였다. 그에 따른 결과로 하중-변위 선도와 변형과정을 얻었고 하중-변위선도를 적분하여 각 시험편 내부에 축적된 에너지를 구하였고 이 값을 흡수에너지로 산정하였다.

Fig. 5 ~ 9 과 Photo. 4 ~ 8은 최외각층  $0^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 10 ~ 14 과 Photo. 9 ~ 13은 최외각층  $90^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 5 ~ 14로부터 초기에는 Peak하중이 발생하였으나 압괴가 순차적으로 진행됨에 따라 하중곡선은 순차적으로 감소됨을 알 수 있다.

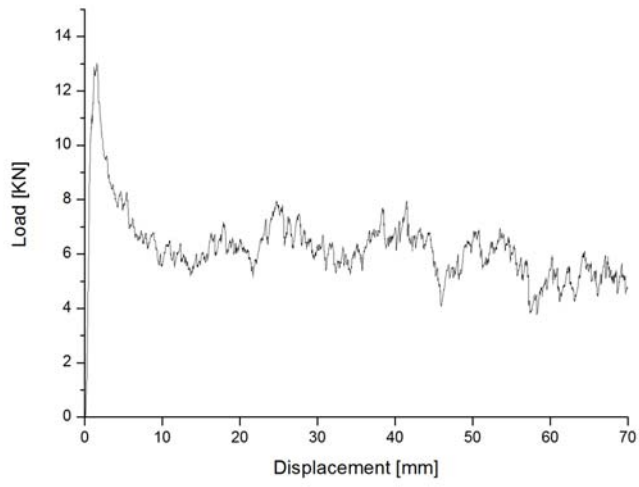


Fig. 5 Load – Displacement curve of CDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

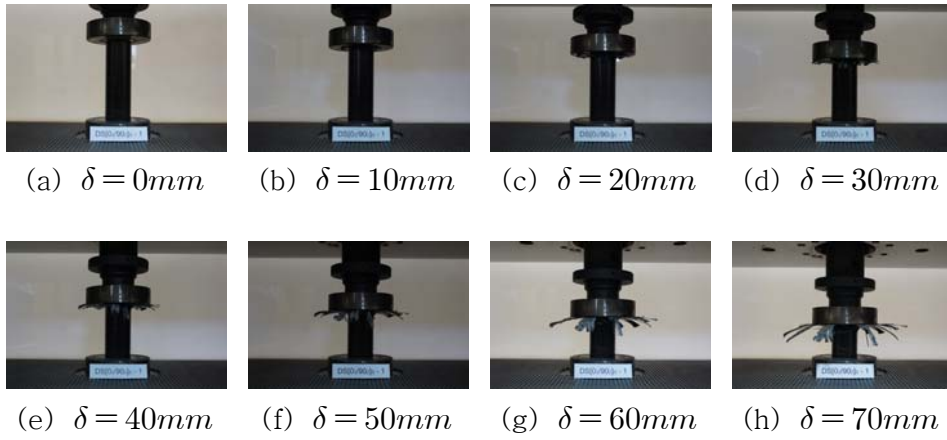


Photo. 4 Collapse Processing of CDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

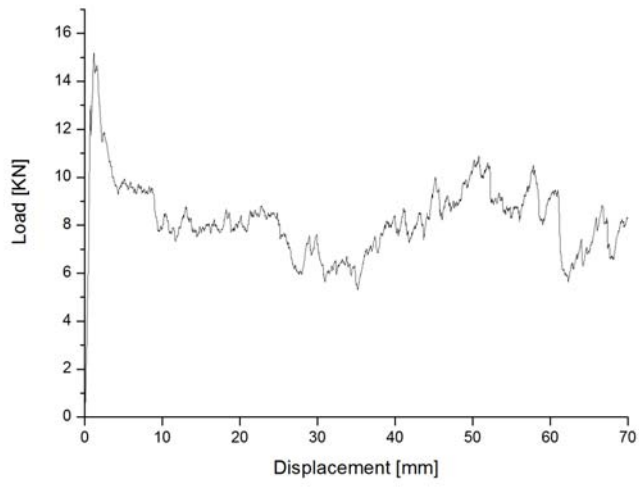


Fig. 6 Load – Displacement curve of CDS [ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub> ]<sub>2</sub>

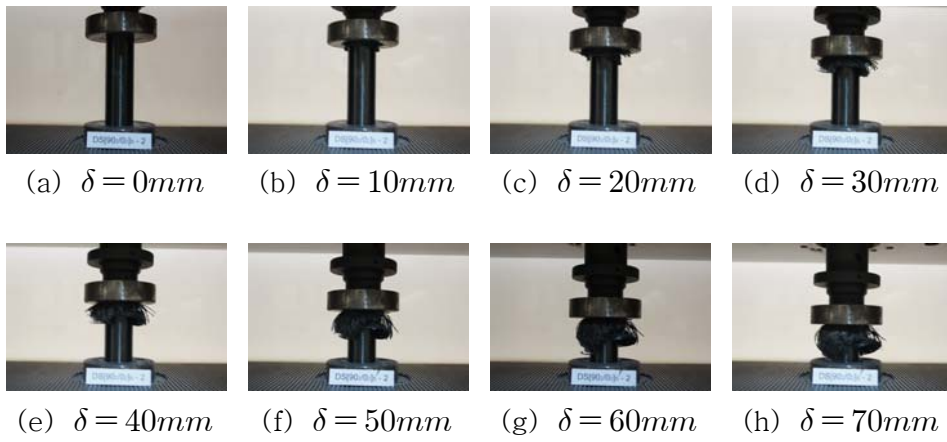


Photo. 5 Collapse Processing of CDS [ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub> ]<sub>2</sub>

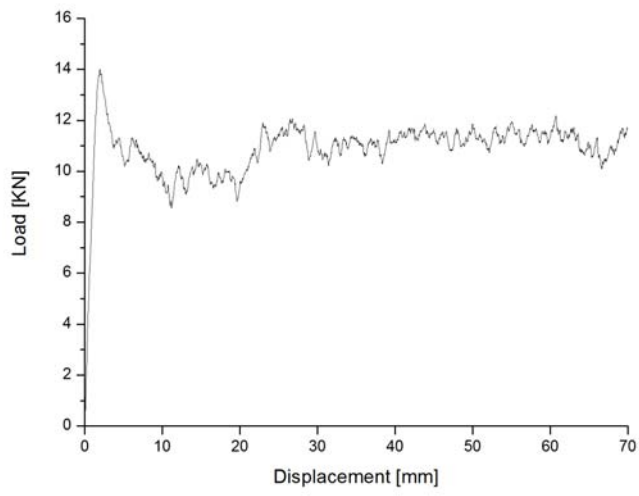


Fig. 7 Load - Displacement curve of CDS [ 0/ 90]<sub>S2</sub>

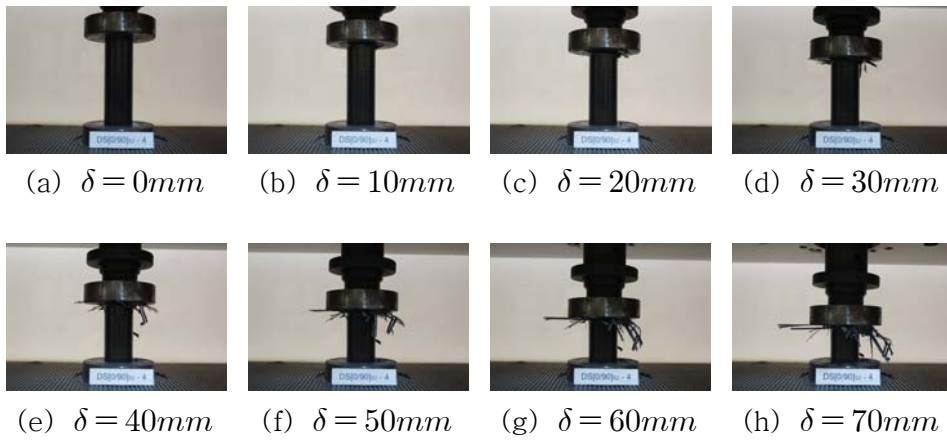


Photo. 6 Collapse Processing of CDS [ 0/ 90]<sub>S2</sub>

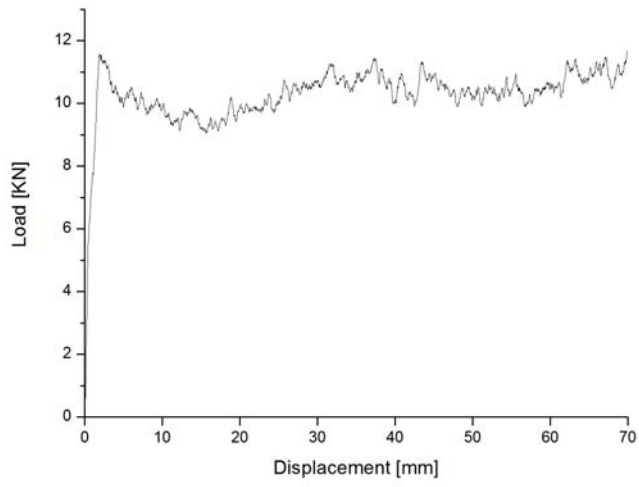


Fig. 8 Load – Displacement curve of CDS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

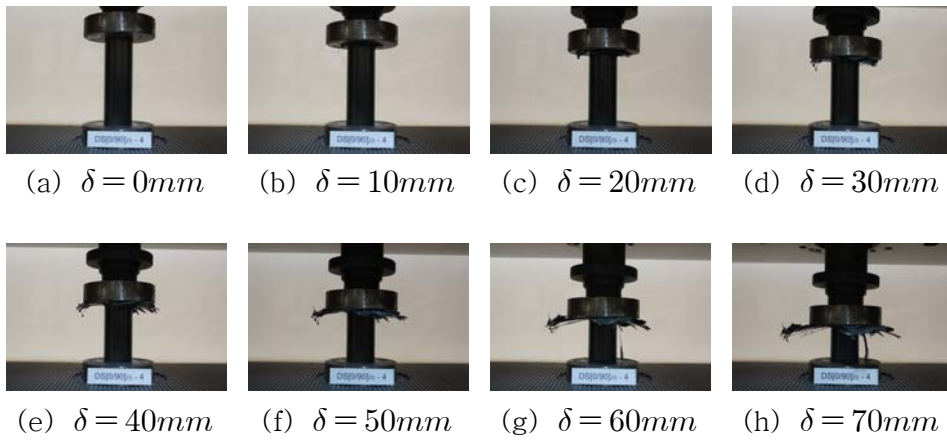


Photo. 7 Collapse Processing of CDS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

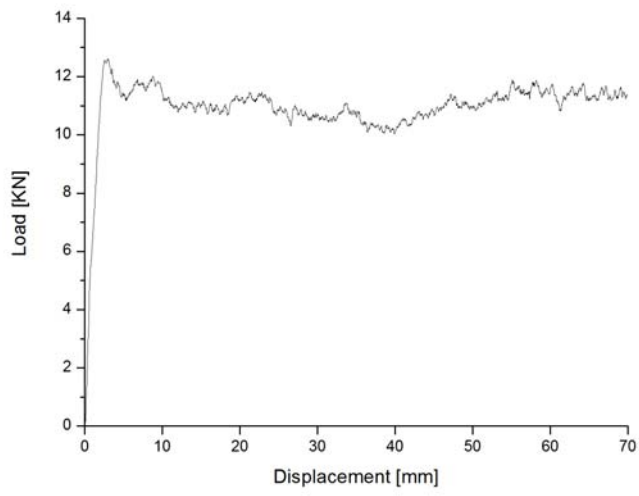


Fig. 9 Load – Displacement curve of CDS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

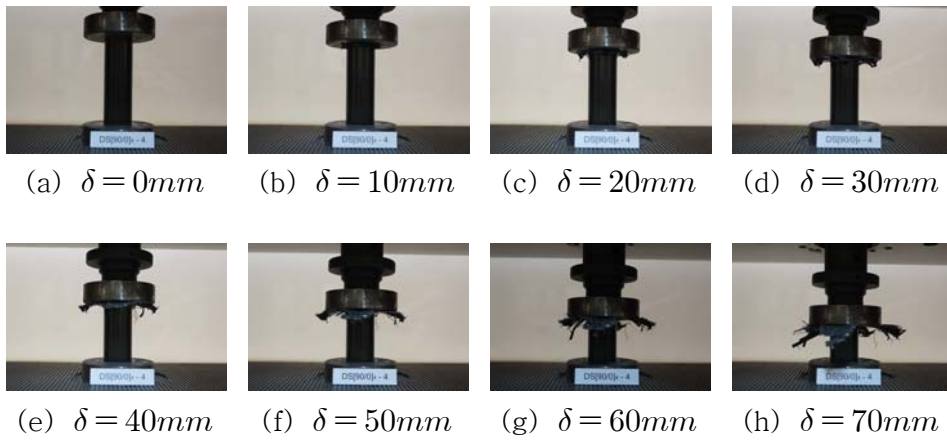


Photo. 8 Collapse Processing of CDS[ 90/ 0]<sub>4</sub>



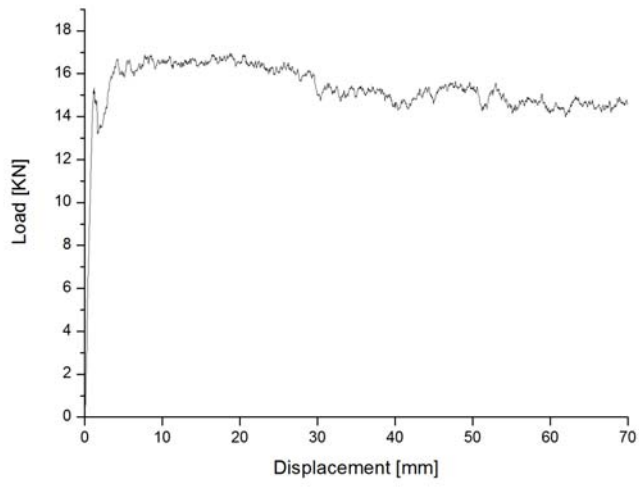


Fig. 10 Load – Displacement curve of CDS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

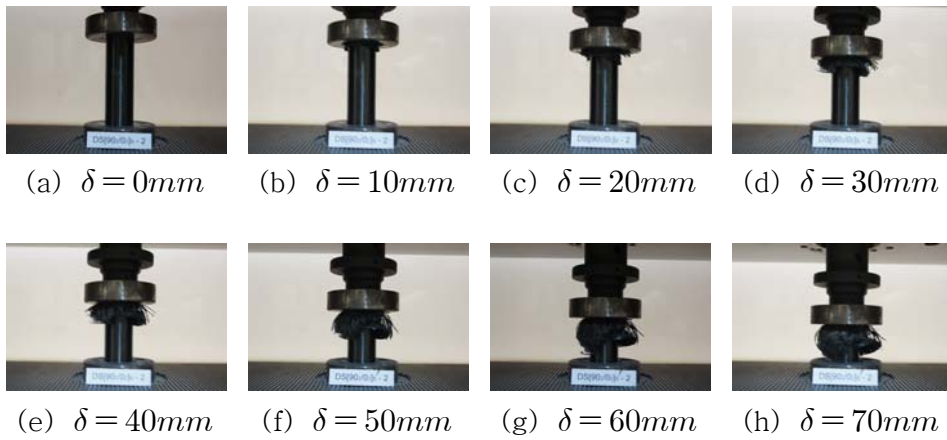


Photo. 9 Collapse Processing of CDS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

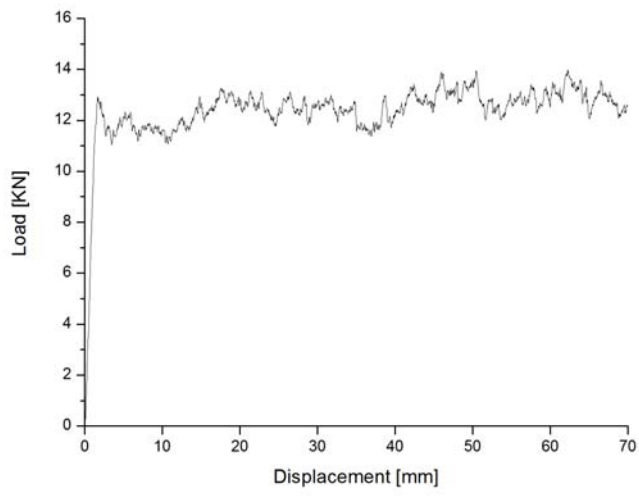


Fig. 11 Load – Displacement curve of CDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

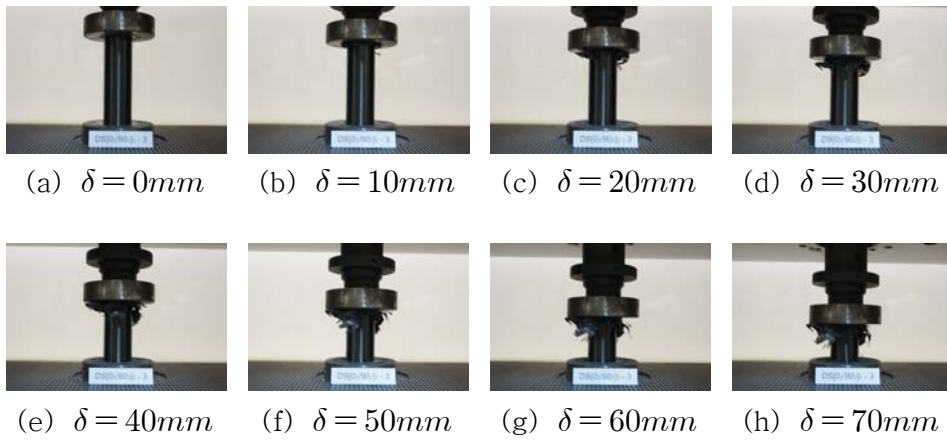


Photo. 10 Collapse Processing of CDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

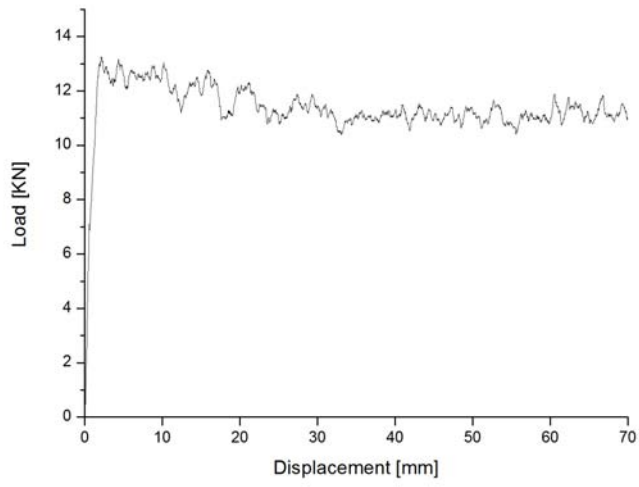


Fig. 12 Load – Displacement curve of CDS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

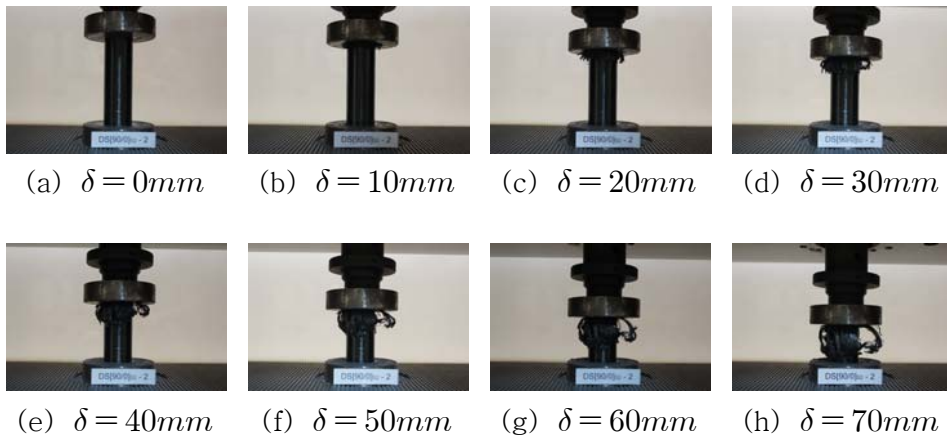


Photo. 11 Collapse Processing of CDS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

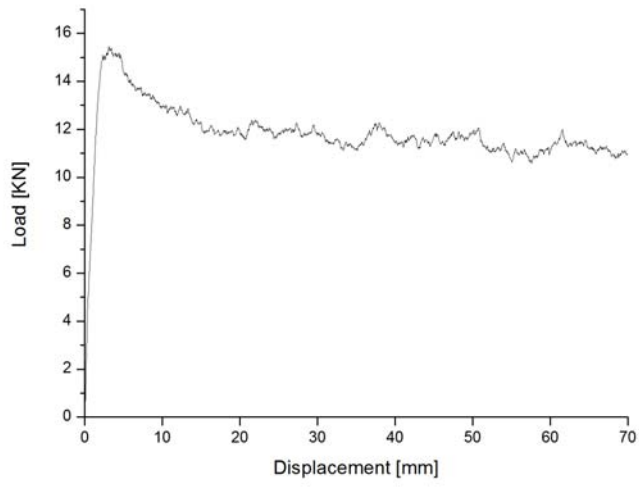


Fig. 13 Load – Displacement curve of CDS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

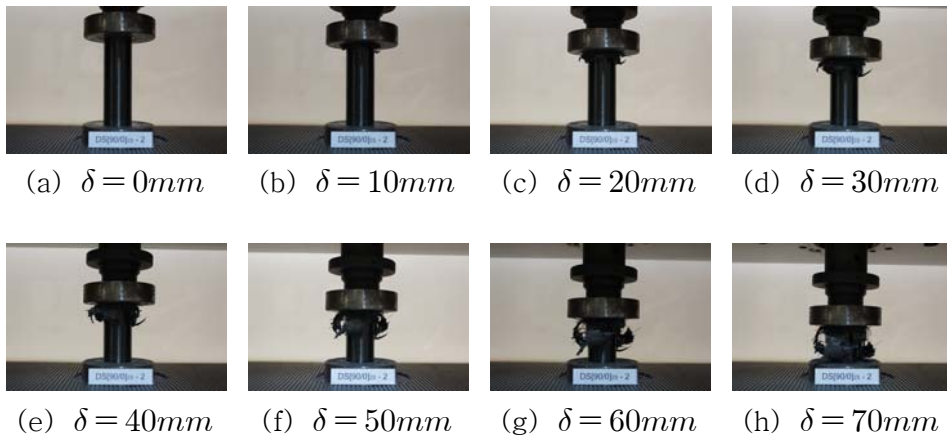


Photo. 12 Collapse Processing of CDS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

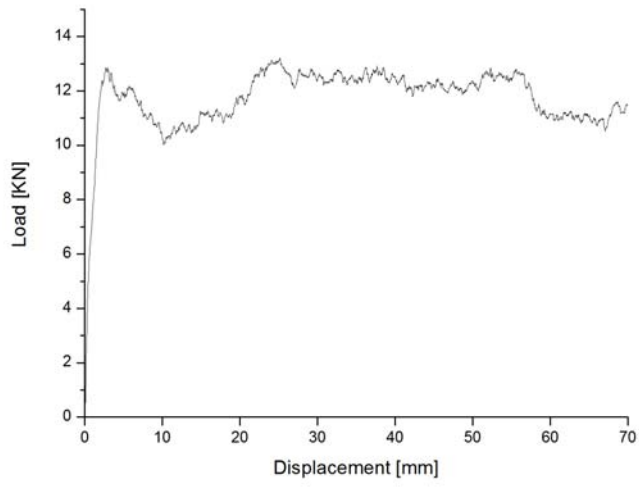


Fig. 14 Load - Displacement curve of CDS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

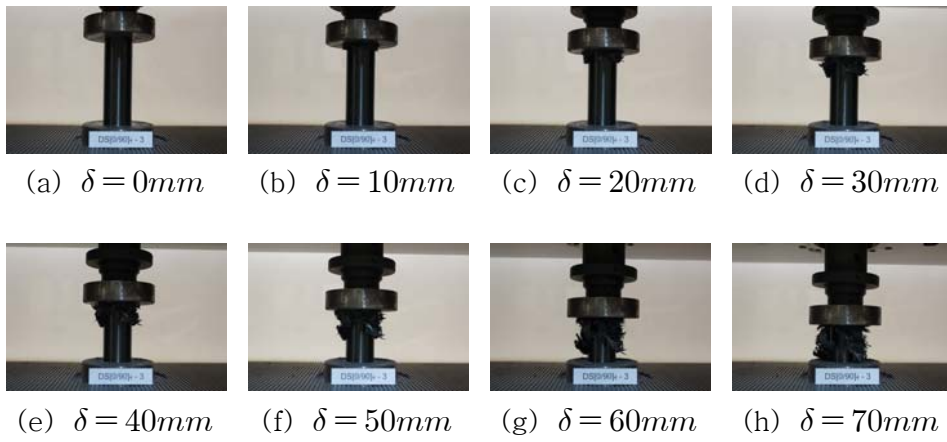


Photo. 13 Collapse Processing of CDS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

## 제 2 절 수분 흡수 CFRP 원형 구조부재 정적 압괴 실험

계면수와 최외층 적층각도가 다른 원형 CFRP구조부재를 오토클레이브 성형법을 이용하여 제작된 시험편의 강도를 평가하기 위하여 수분을 흡수한 CFRP구조부재 시험편을 이용하여 정적 압괴 실험을 하였다. 최외각 층  $0^\circ$  와  $90^\circ$  에 따라 각 계면 수 변화에 따른 정적 압괴 실험을 실시하였다. 그에 따른 결과로 하중-변위 선도와 변형과정을 얻었고 하중-변위선도를 적분하여 각 시험편 내부에 축적된 에너지를 구하였고 이 값을 흡수에너지로 산정하였다.

Fig. 15 ~ 19 과 Photo. 14 ~ 18은 최외각층  $0^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 20 ~ 24 과 Photo. 19 ~ 23은 최외각층  $90^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 15 ~ 24로부터 초기에는 Peak하중이 발생하였으나 압괴가 순차적으로 진행됨에 따라 하중곡선은 순차적으로 감소됨을 알 수 있다.

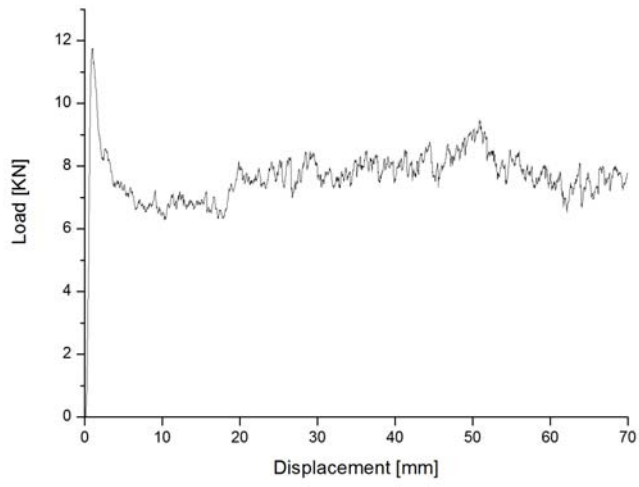


Fig. 15 Load - Displacement curve of CWS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

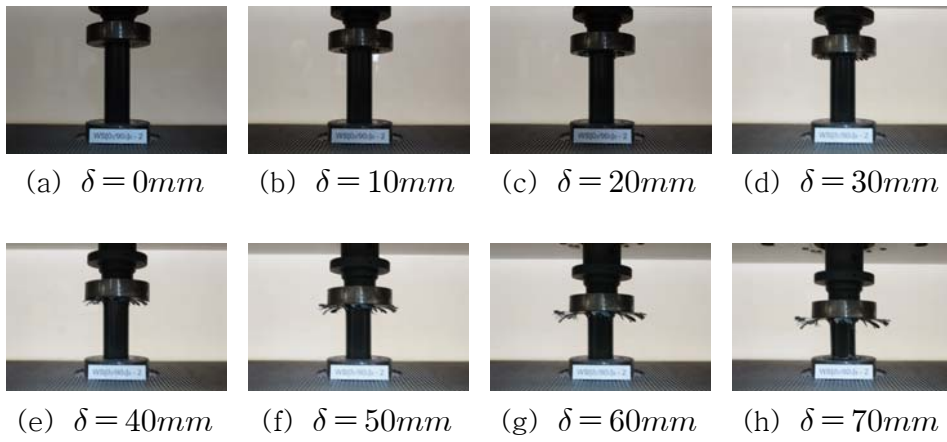


Photo. 14 Collapse Processing of CWS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

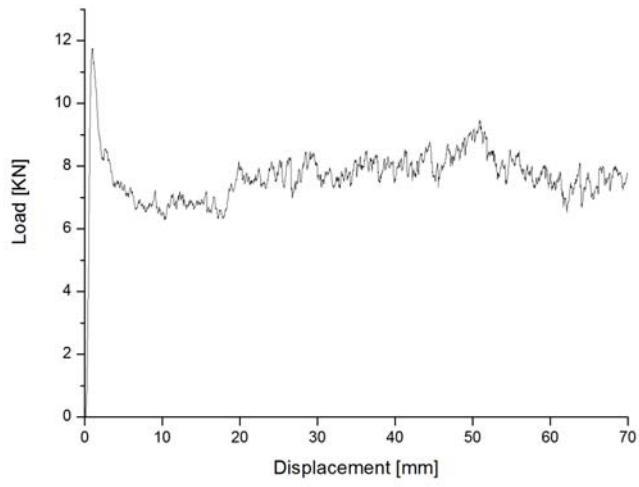


Fig. 16 Load - Displacement curve of CWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

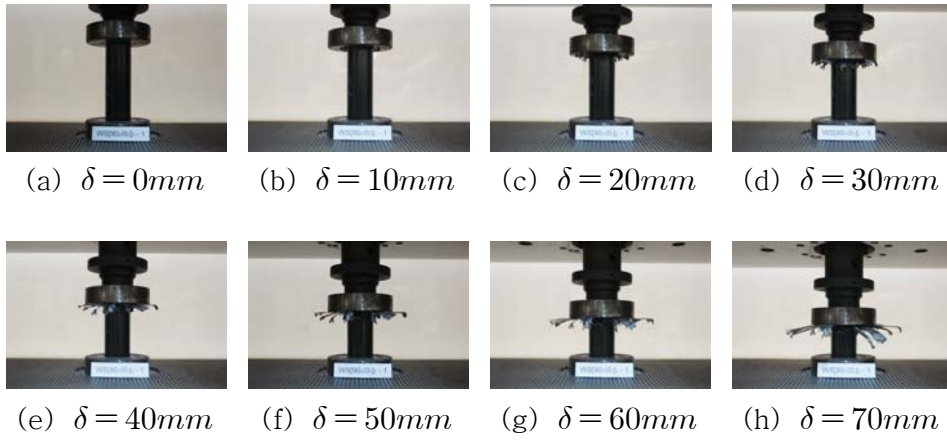


Photo. 15 Collapse Processing of CWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>2</sub>



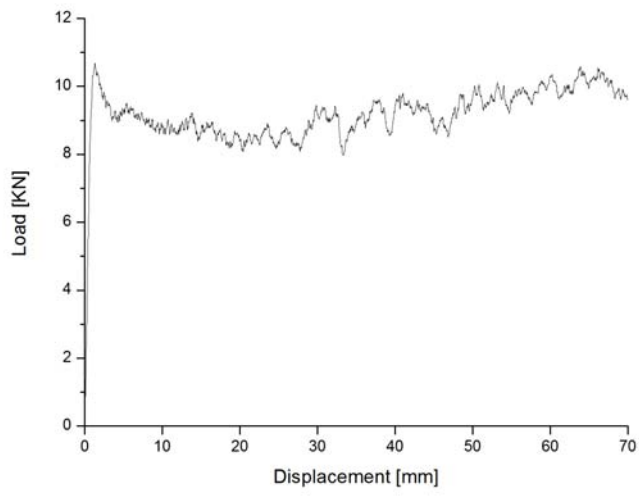


Fig. 17 Load – Displacement curve of CWS[ 0/ 90]<sub>s2</sub>

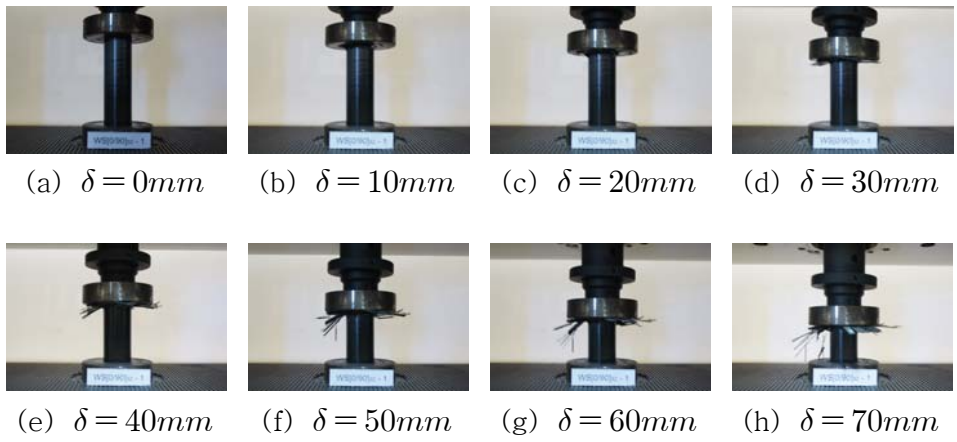


Photo. 16 Collapse Processing of CWS[ 0/ 90]<sub>s2</sub>

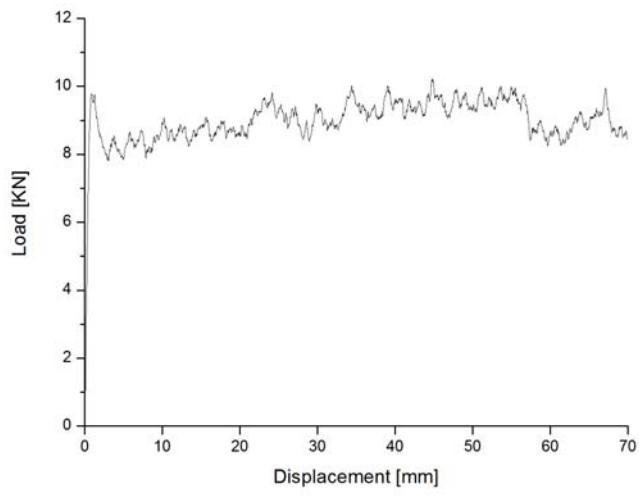


Fig. 18 Load - Displacement curve of CWS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

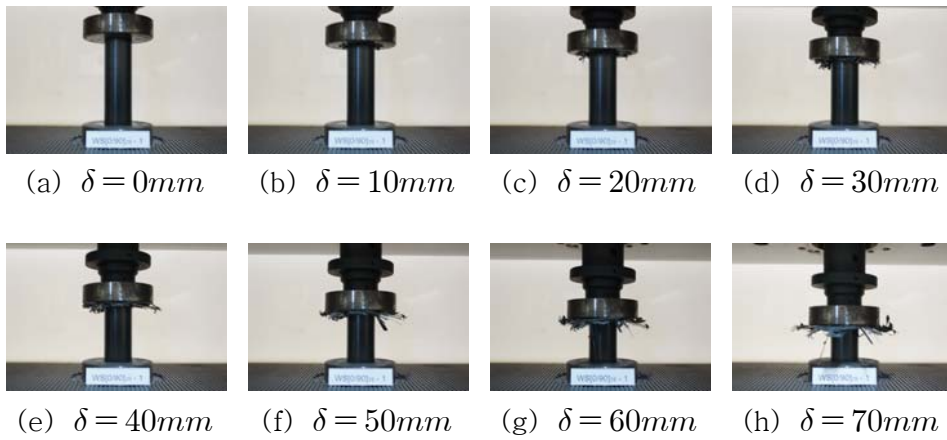


Photo. 17 Collapse Processing of CWS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

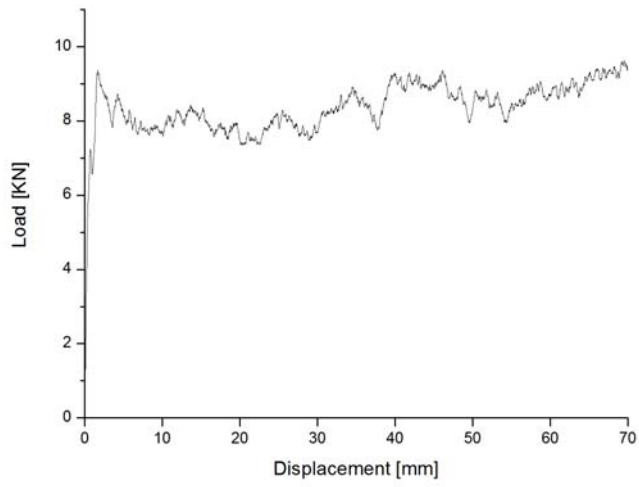


Fig. 19 Load – Displacement curve of CWS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

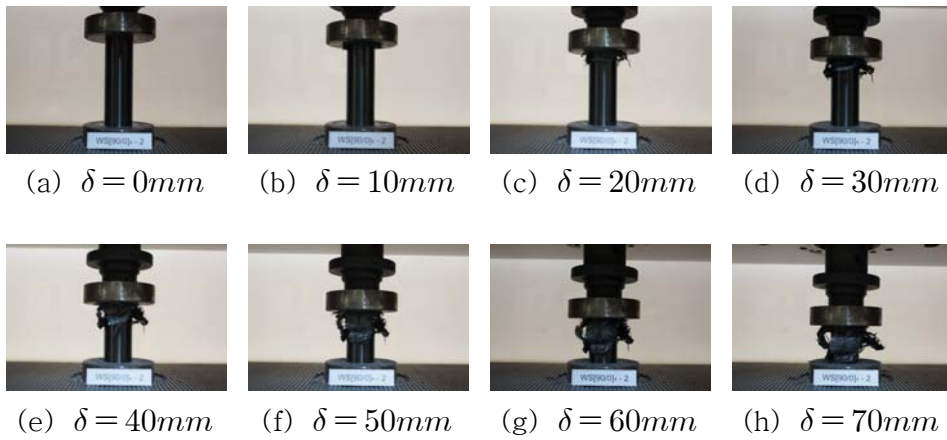


Photo. 18 Collapse Processing of CWS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

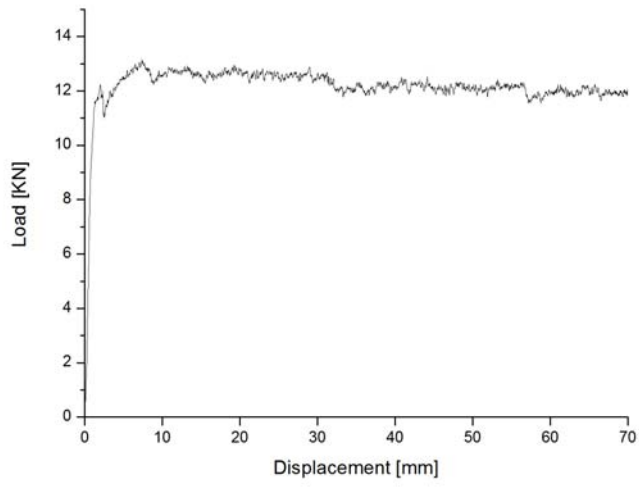


Fig. 20 Load - Displacement curve of CWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

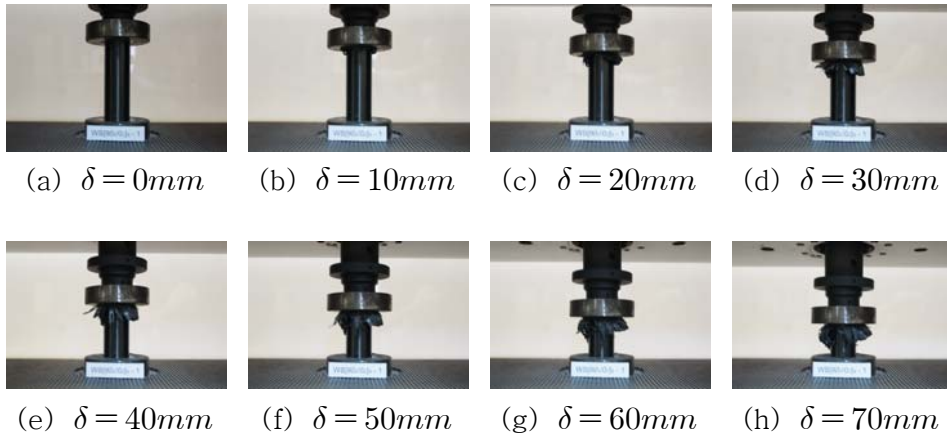


Photo. 19 Collapse Processing of CWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

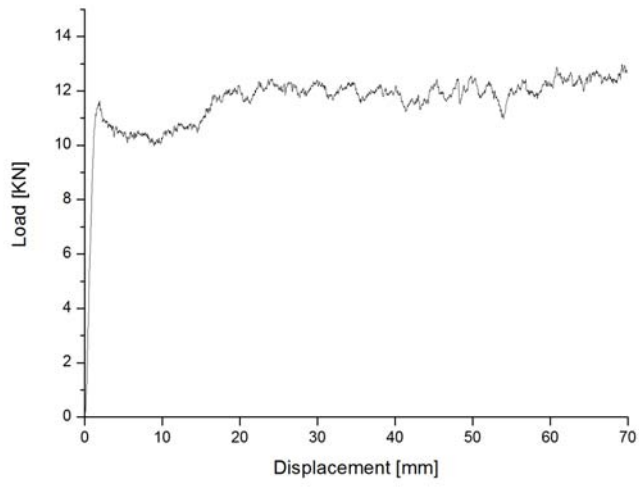


Fig. 21 Load - Displacement curve of CWS[  $0_2/ 90_2$  ]<sub>2</sub>

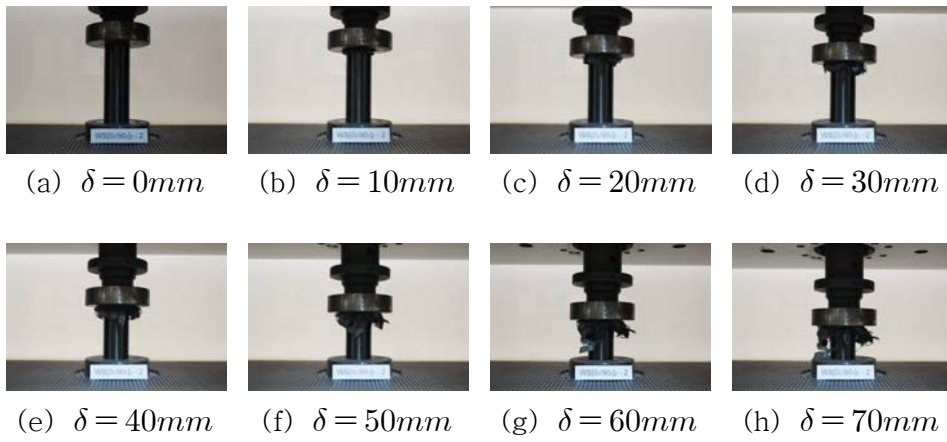


Photo. 20 Collapse Processing of CWS[  $0_2/ 90_2$  ]<sub>2</sub>

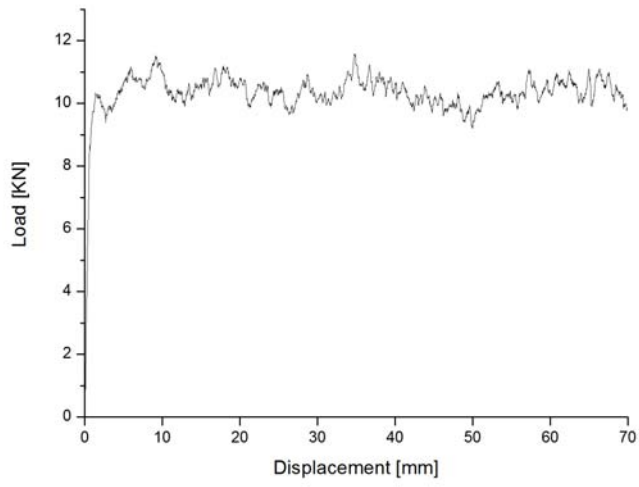


Fig. 22 Load – Displacement curve of CWS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

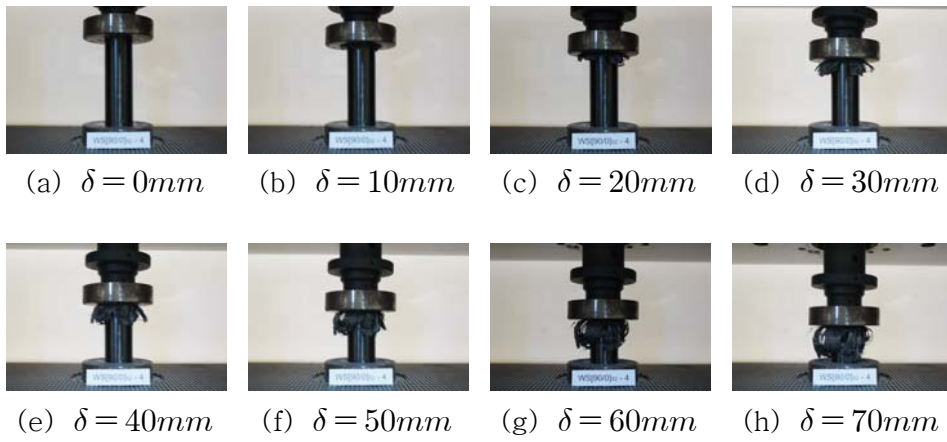


Photo. 21 Collapse Processing of CWS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

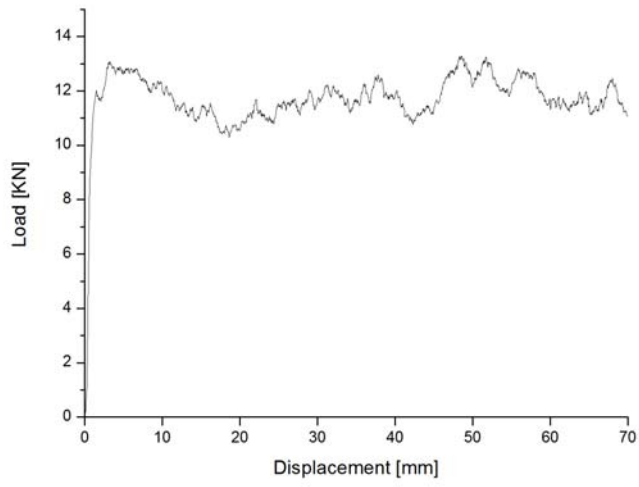


Fig. 23 Load - Displacement curve of CWS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

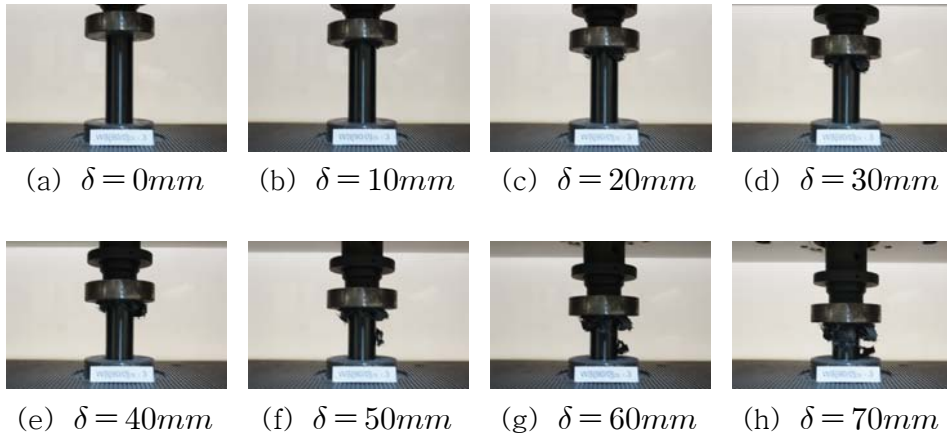


Photo. 22 Collapse Processing of CWS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

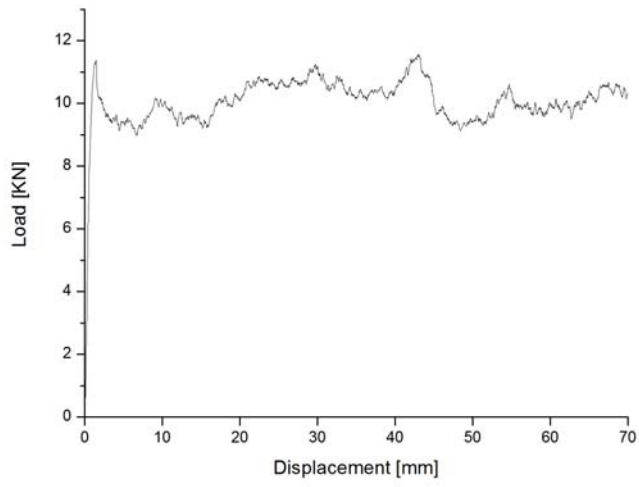


Fig. 24 Load – Displacement curve of CWS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

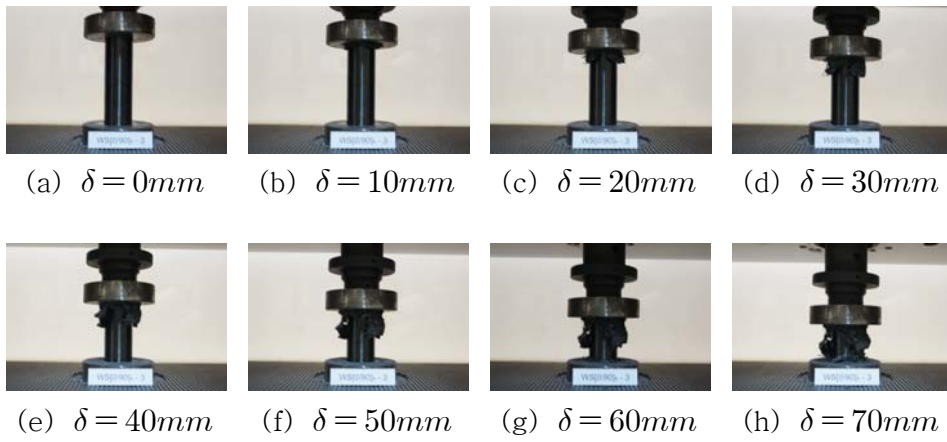


Photo. 23 Collapse Processing of CWS[ 0/ 90]<sub>4</sub>



## 제 4 장 사각형 구조부재 압괴 실험 결과

### 제 1 절 CFRP 사각형 구조부재 정적 압괴 실험

계면수와 최외층 적층각도가 다른 사각형 CFRP구조부재를 오토클레이브 성형법을 이용하여 제작된 시험편의 강도를 평가하기 위하여 먼저 수분을 흡수 하지 않은 시험편을 이용하여 정적 압괴 실험을 하였다. 최외각 층  $0^\circ$  와  $90^\circ$  에 따라 각 계면 수 변화에 따른 정적 압괴 실험을 실시하였다. 그에 따른 결과로 하중-변위 선도와 변형과정을 얻었고 하중-변위선도를 적분하여 각 시험편 내부에 축적된 에너지를 구하였고 이 값을 흡수에너지로 산정하였다.

Fig. 25 ~ 29 과 Photo. 24 ~ 28은 최외각층  $0^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 30 ~ 34 과 Photo. 29 ~ 33은 최외각층  $90^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 25 ~ 34로부터 초기에는 Peak하중이 발생하였으나 압괴가 순차적으로 진행됨에 따라 하중곡선은 순차적으로 감소됨을 알 수 있다.

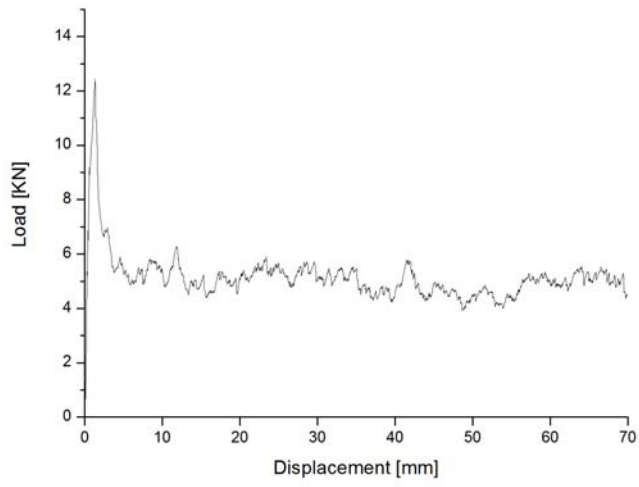


Fig. 25 Load – Displacement curve of SDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

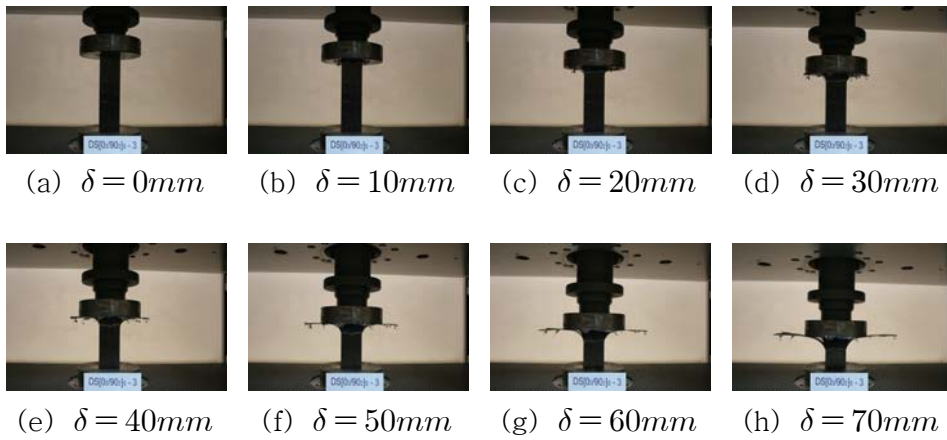


Photo. 24 Collapse Processing of SDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

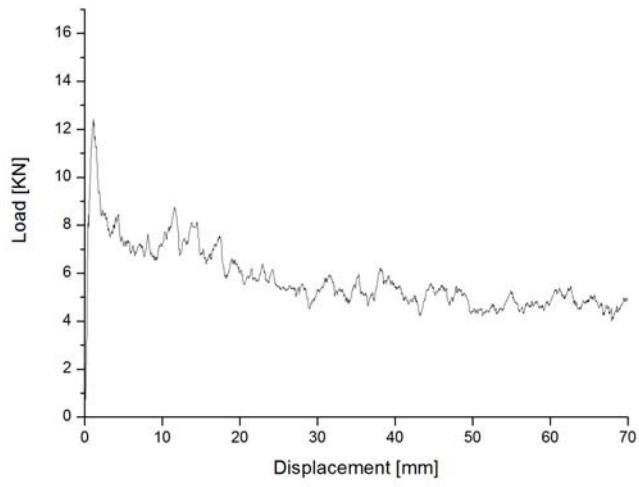


Fig. 26 Load – Displacement curve of SDS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

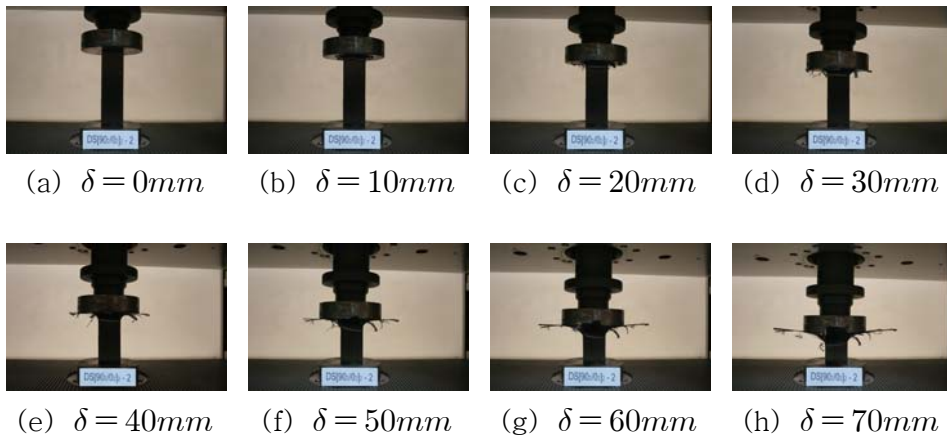


Photo. 25 Collapse Processing of SDS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

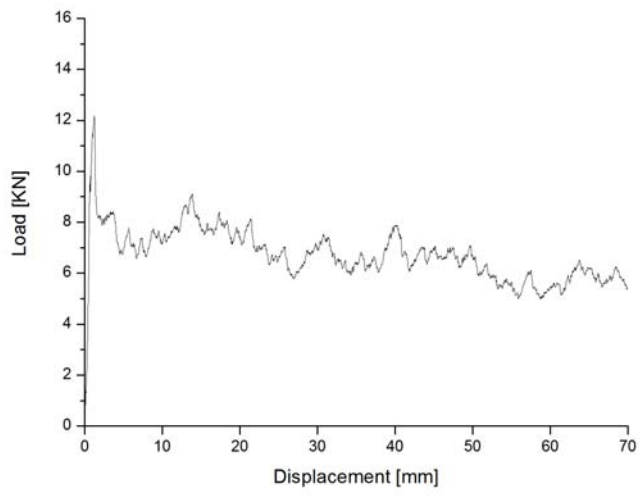


Fig. 27 Load – Displacement curve of SDS[ 0/ 90]<sub>S2</sub>

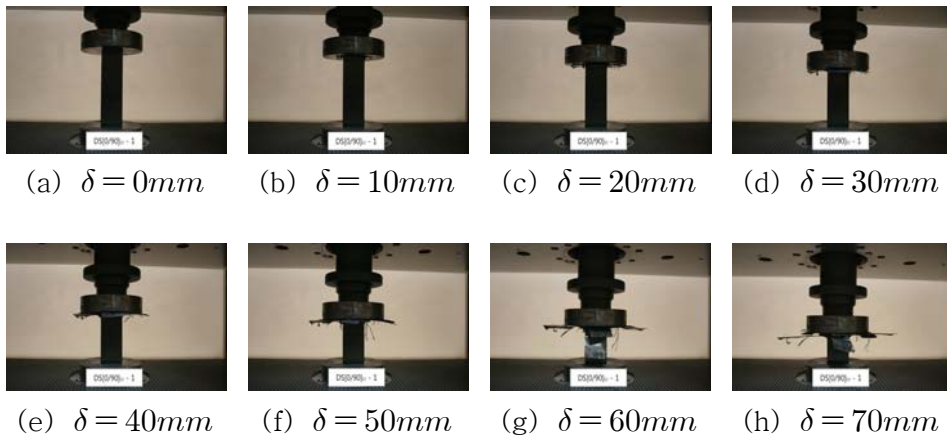


Photo. 26 Collapse Processing of SDS[ 0/ 90]<sub>S2</sub>

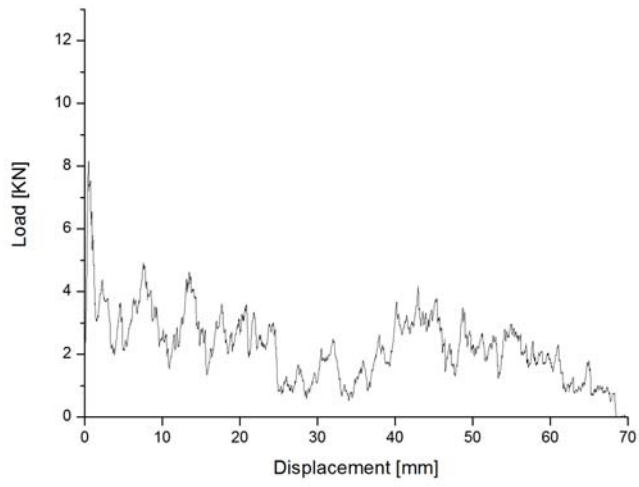


Fig. 28 Load – Displacement curve of SDS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

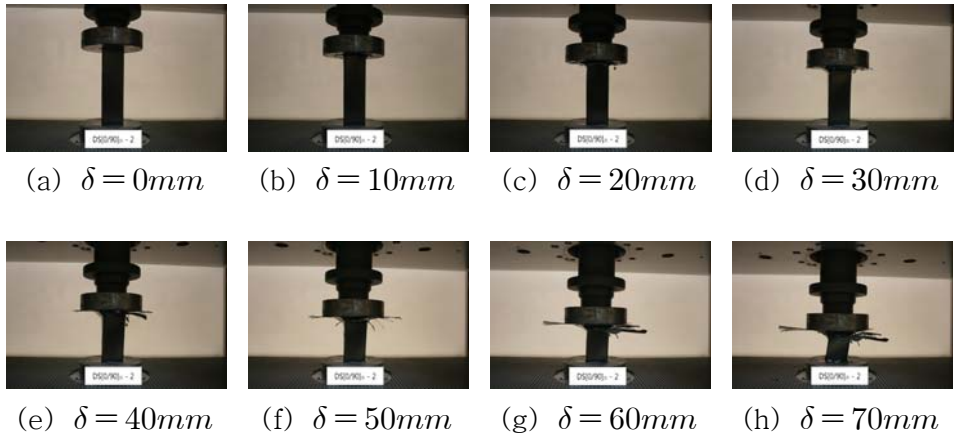


Photo. 27 Collapse Processing of SDS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

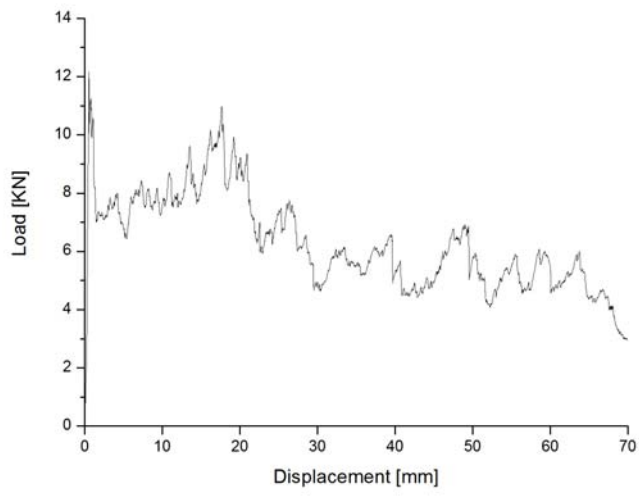


Fig. 29 Load – Displacement curve of SDS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

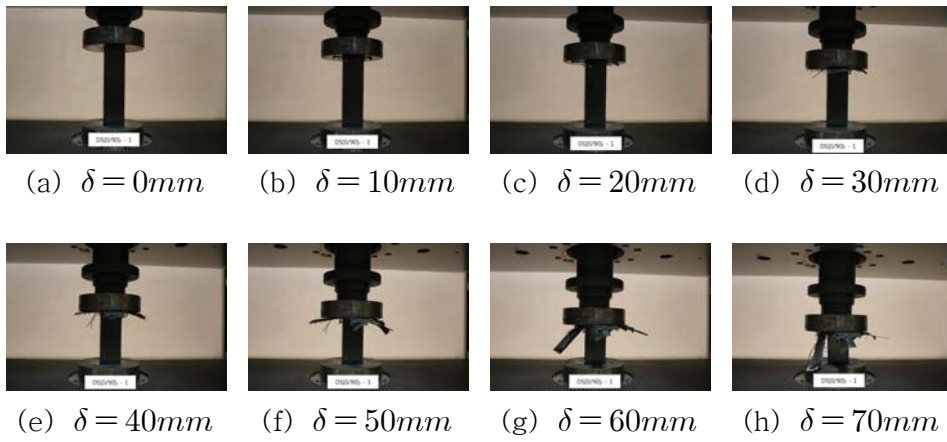


Photo. 28 Collapse Processing of SDS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

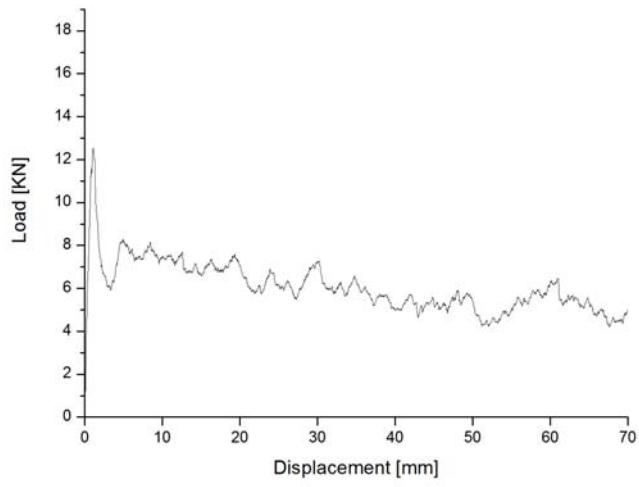


Fig. 30 Load – Displacement curve of SDS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

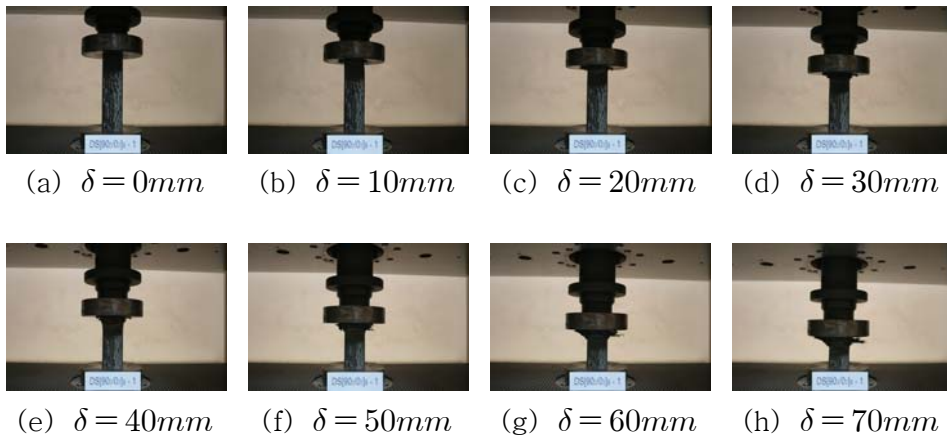


Photo. 29 Collapse Processing of SDS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

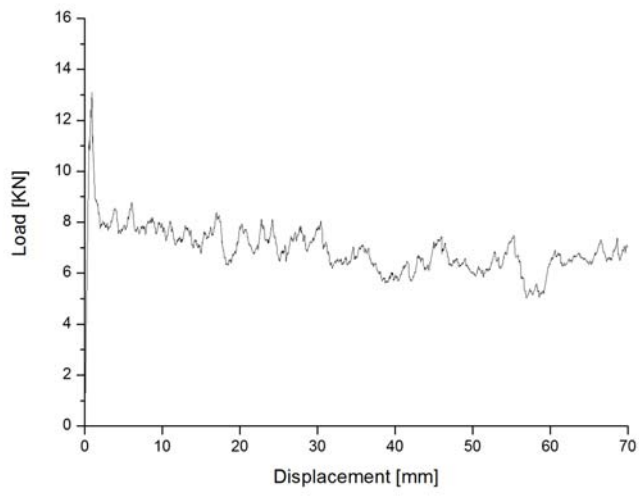


Fig. 31 Load – Displacement curve of SDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

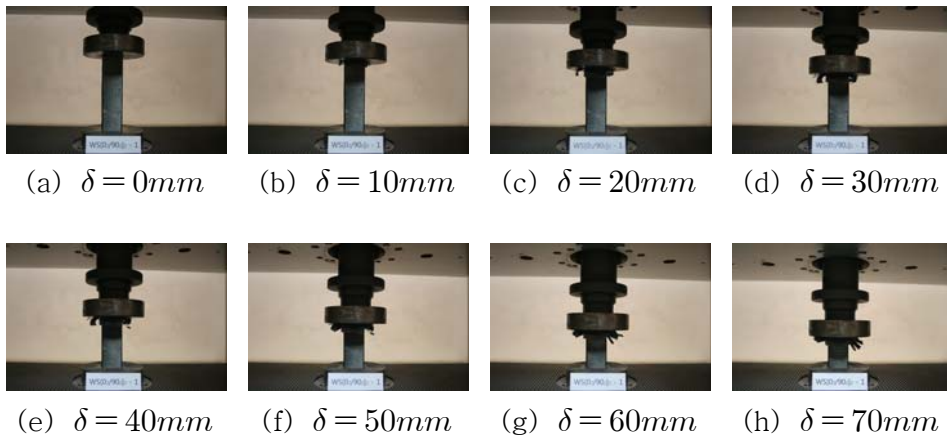


Photo. 30 Collapse Processing of SDS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>2</sub>



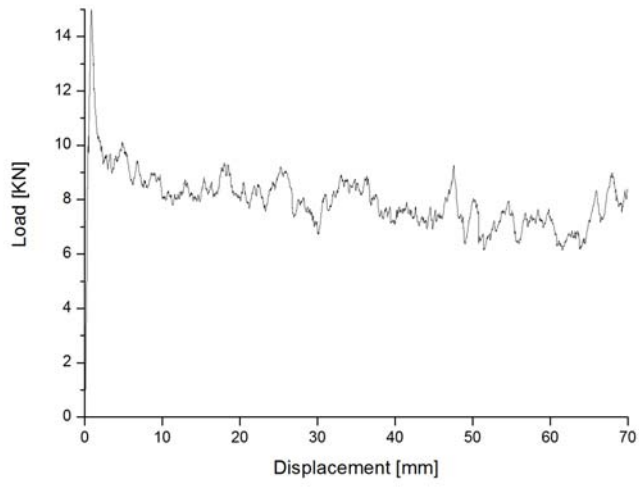


Fig. 32 Load – Displacement curve of SDS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

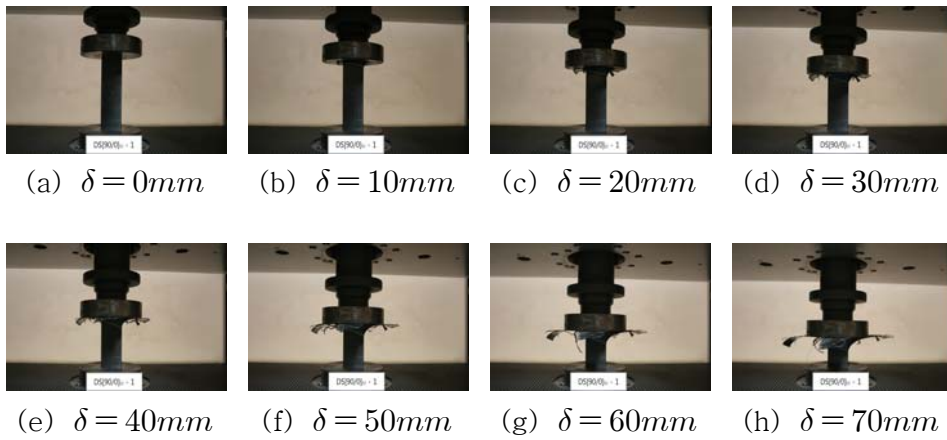


Photo. 31 Collapse Processing of SDS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

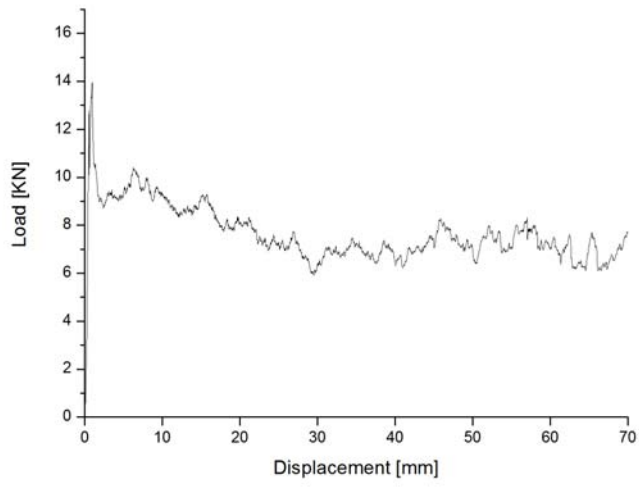


Fig. 33 Load – Displacement curve of SDS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

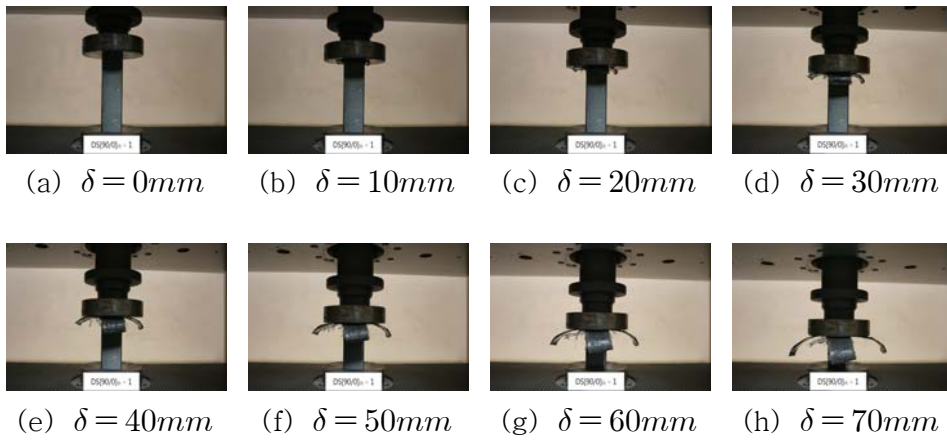


Photo. 32 Collapse Processing of SDS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

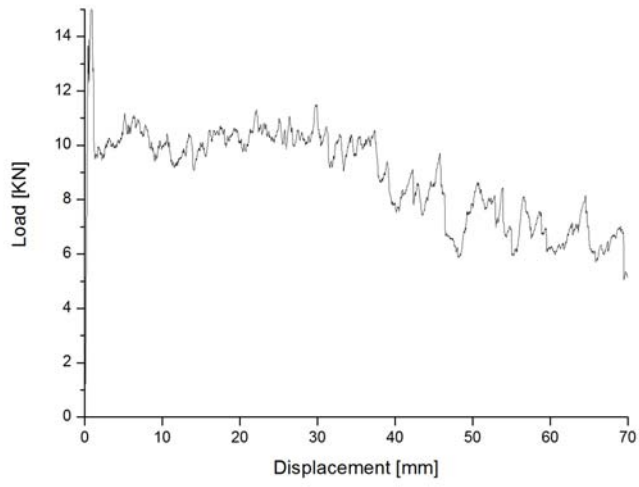


Fig. 34 Load – Displacement curve of SDS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

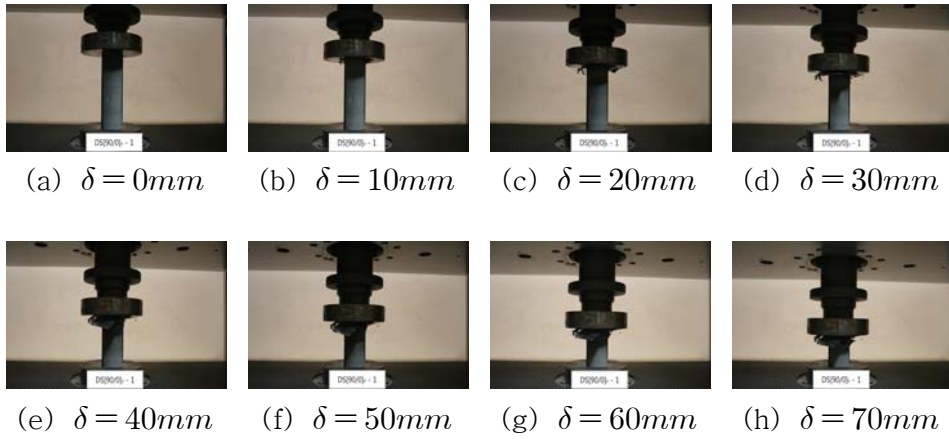


Photo. 33 Collapse Processing of SDS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

## 제 2 절 수분 흡수 CFRP 사각형 구조부재 정적 압괴 실험

계면수와 최외층 적층각도가 다른 사각형 CFRP구조부재를 오토클레이브 성형법을 이용하여 제작된 시험편의 강도를 평가하기 위하여 수분을 흡수한 CFRP구조부재 시험편을 이용하여 정적 압괴 실험을 하였다. 최외각 층  $0^\circ$  와  $90^\circ$  에 따라 각 계면 수 변화에 따른 정적 압괴 실험을 실시하였다. 그에 따른 결과로 하중-변위 선도와 변형과정을 얻었고 하중-변위선도를 적분하여 각 시험편 내부에 축적된 에너지를 구하였고 이 값을 흡수에너지로 산정하였다.

Fig. 35 ~ 39 과 Photo. 34 ~ 38은 최외각층  $0^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 40 ~ 44 과 Photo. 39 ~ 43은 최외각층  $90^\circ$  인 2,3,4,6,7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm일 때의 압괴 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 35 ~ 44로부터 초기에는 Peak하중이 발생하였으나 압괴가 순차적으로 진행됨에 따라 하중곡선은 순차적으로 감소됨을 알 수 있다.

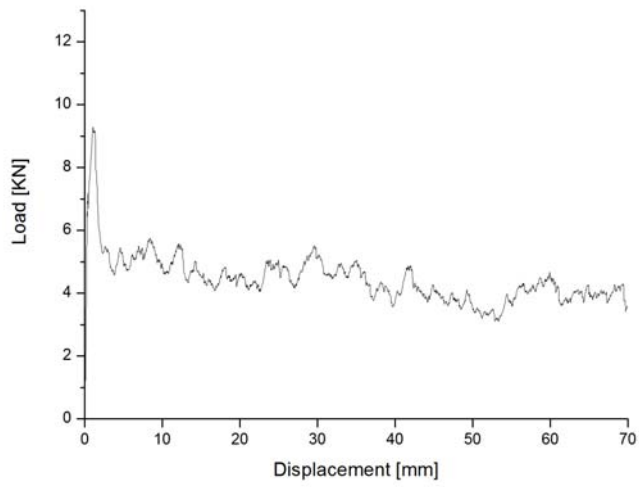


Fig. 35 Load – Displacement curve of SWS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

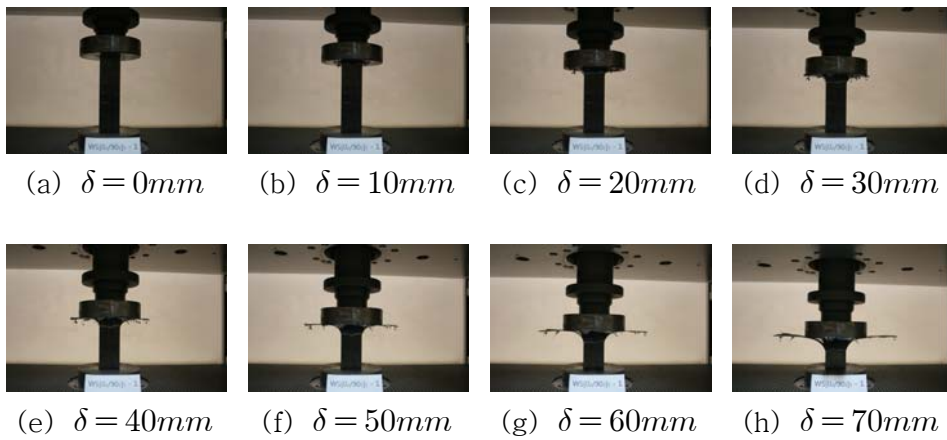


Photo. 34 Collapse Processing of SWS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

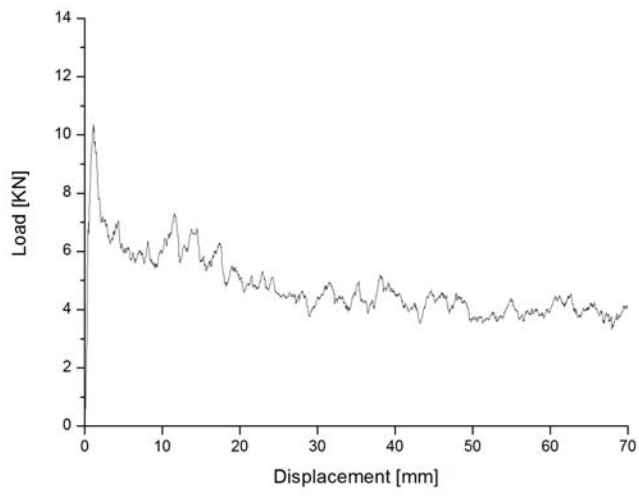


Fig. 36 Load - Displacement curve of SWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

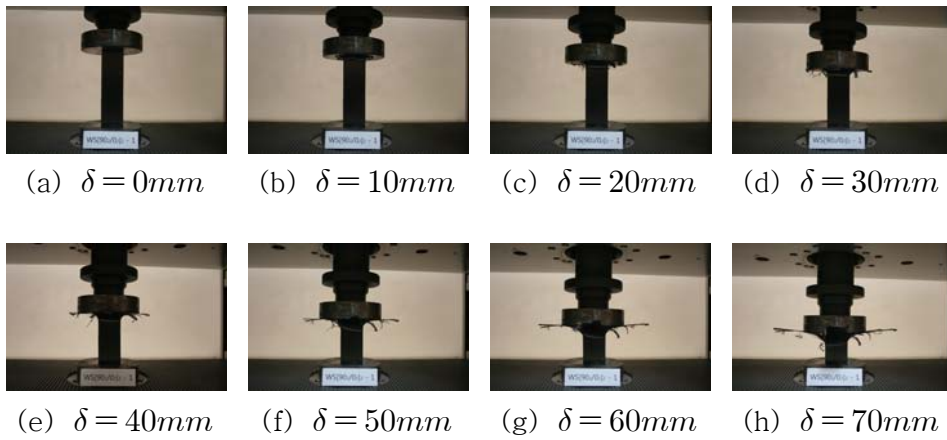


Photo. 35 Collapse Processing of SWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

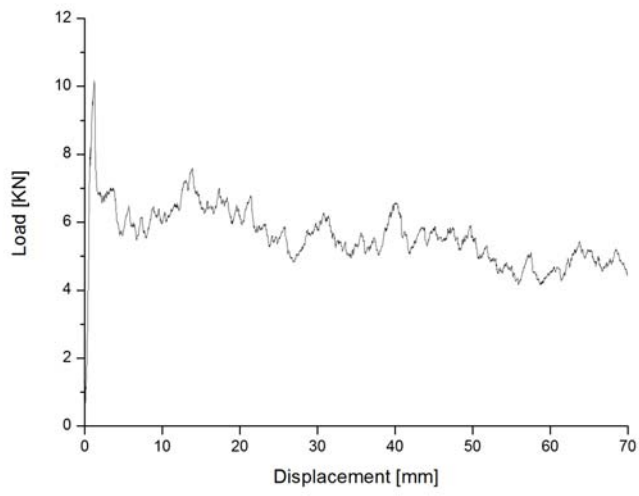


Fig. 37 Load - Displacement curve of SWS[ 0/ 90]<sub>s2</sub>

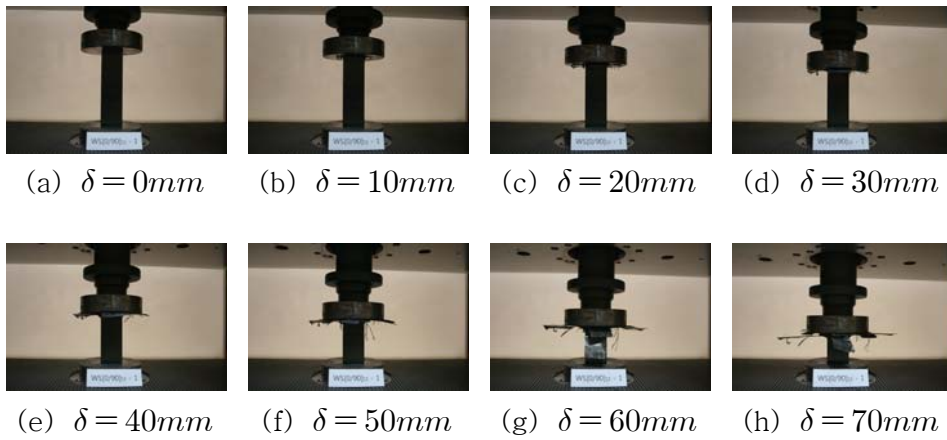


Photo. 36 Collapse Processing of SWS[ 0/ 90]<sub>s2</sub>

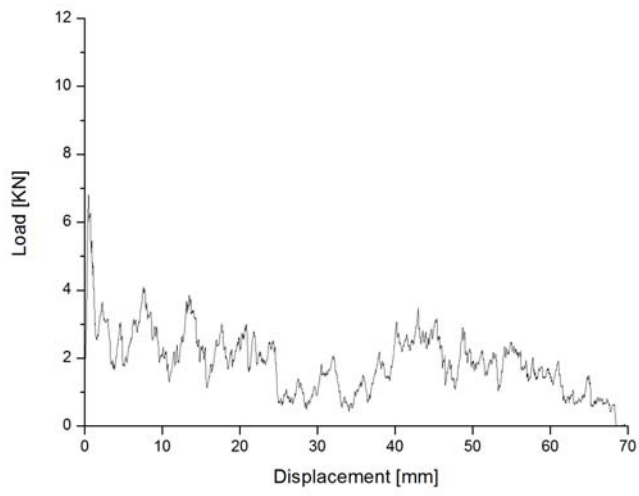


Fig. 38 Load – Displacement curve of SWS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>

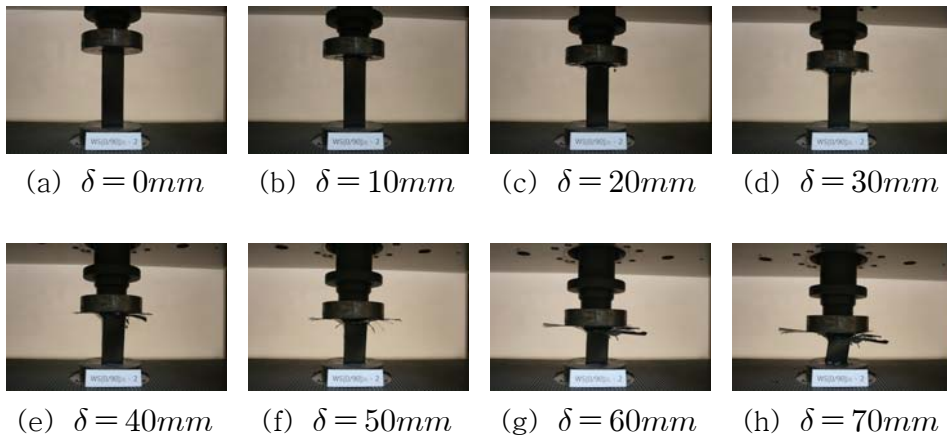


Photo. 37 Collapse Processing of SWS[ 0/ 90]<sub>2S</sub>



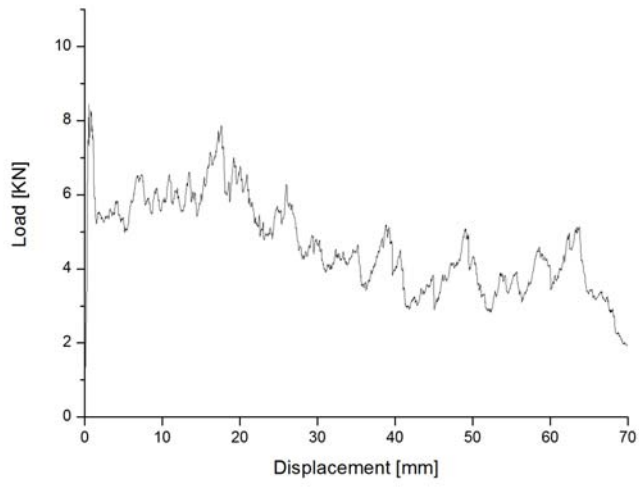


Fig. 39 Load – Displacement curve of SWS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

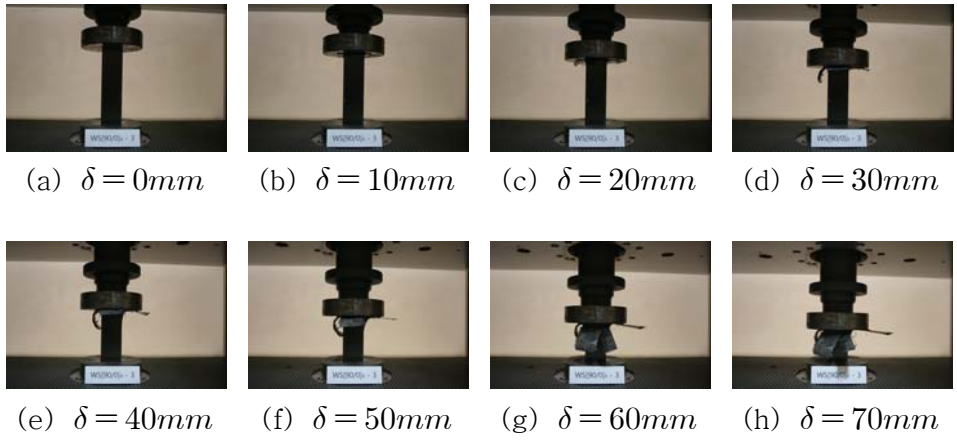


Photo. 38 Collapse Processing of SWS[ 90/ 0]<sub>4</sub>

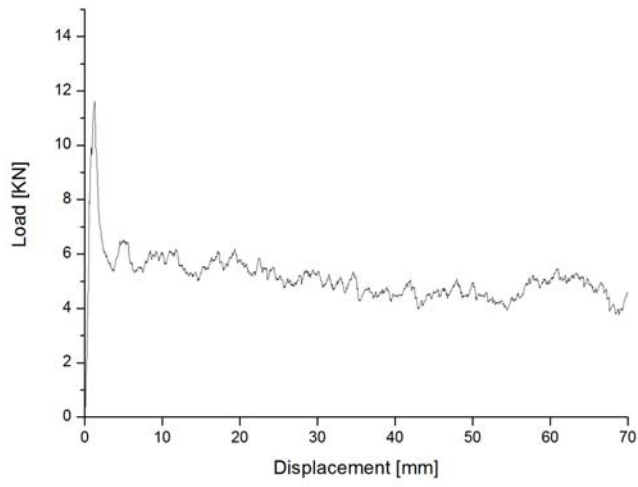


Fig. 40 Load – Displacement curve of SWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

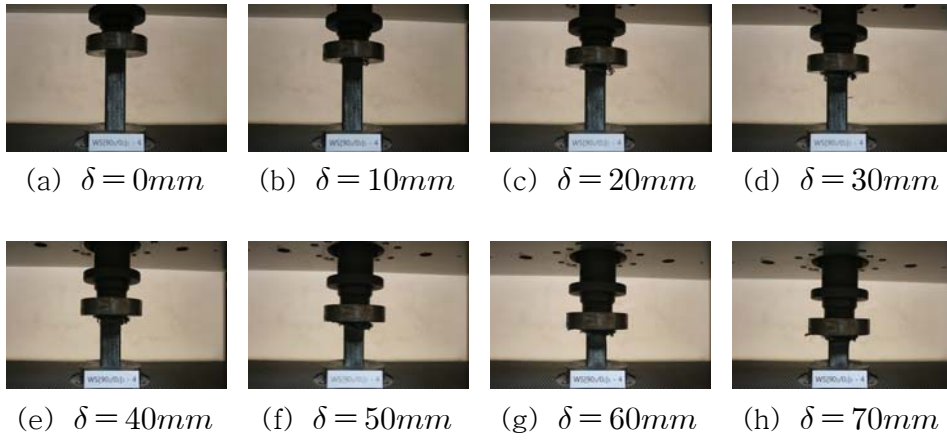


Photo. 39 Collapse Processing of SWS[ 90<sub>2</sub>/ 0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

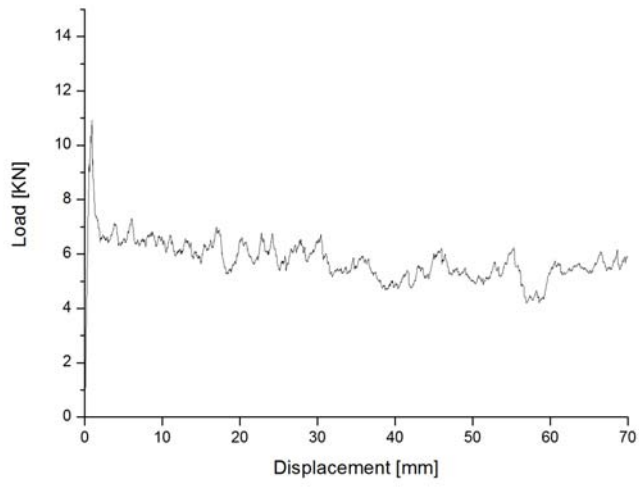


Fig. 41 Load - Displacement curve of SWS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

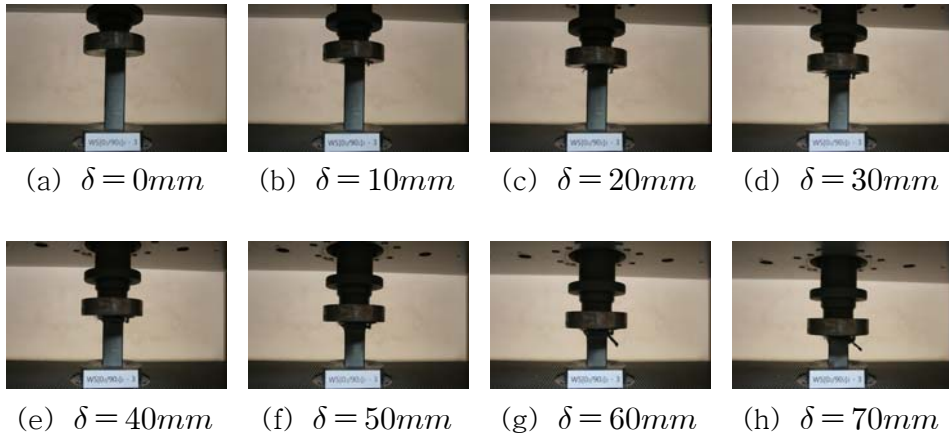


Photo. 40 Collapse Processing of SWS[ 0<sub>2</sub>/ 90<sub>2</sub>]<sub>2</sub>

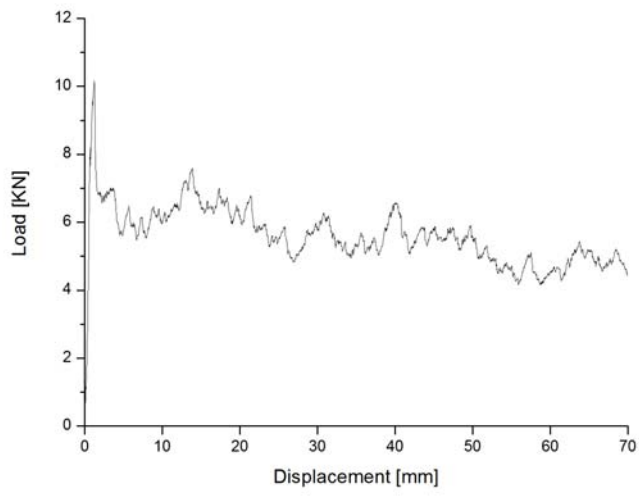


Fig. 42 Load – Displacement curve of SWS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

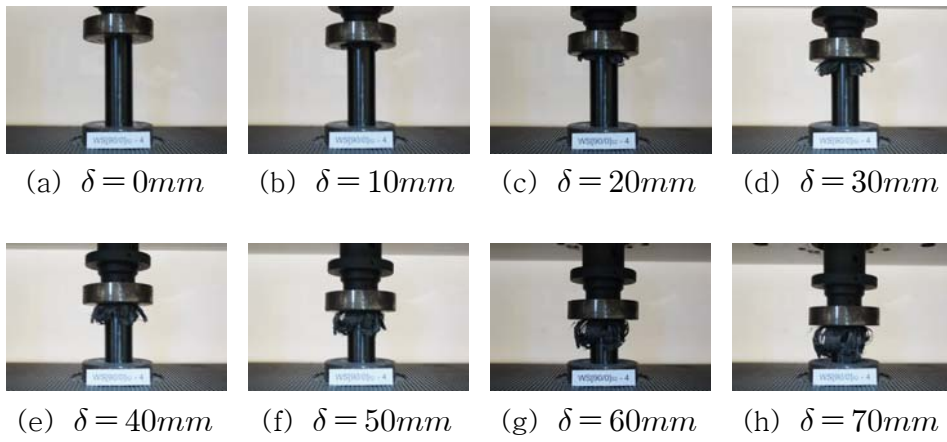


Photo. 41 Collapse Processing of SWS[ 90/ 0]<sub>S2</sub>

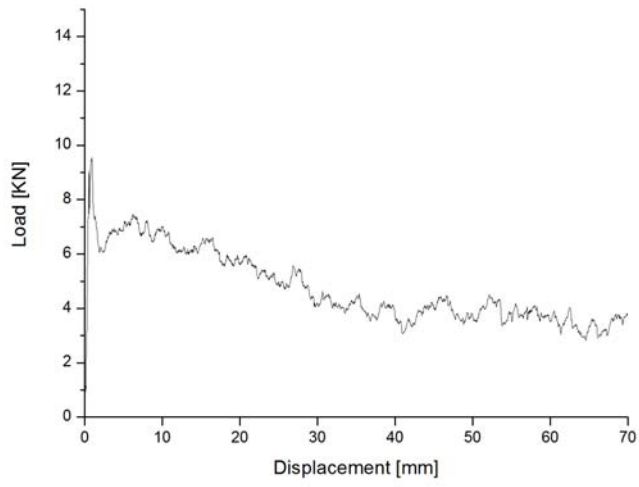


Fig. 43 Load – Displacement curve of SWS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

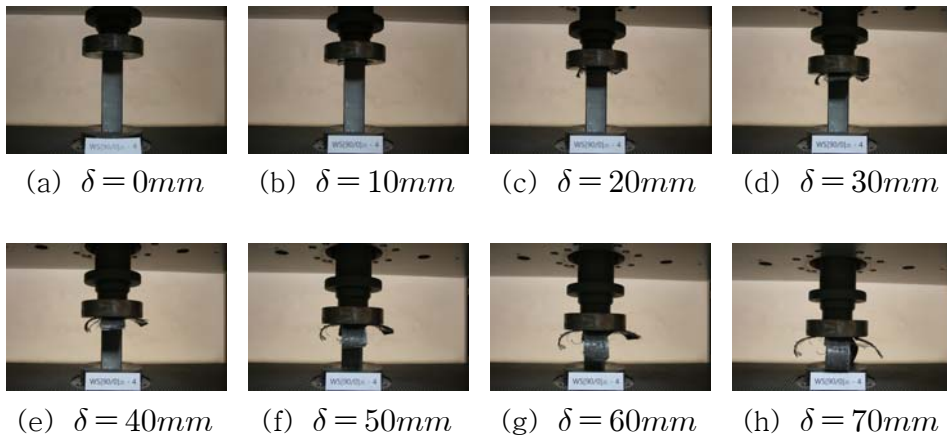


Photo. 42 Collapse Processing of SWS[ 90/ 0]<sub>2S</sub>

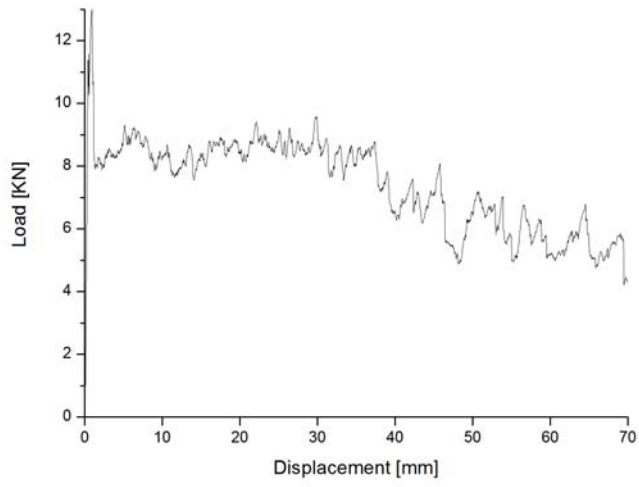


Fig. 44 Load – Displacement curve of SWS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

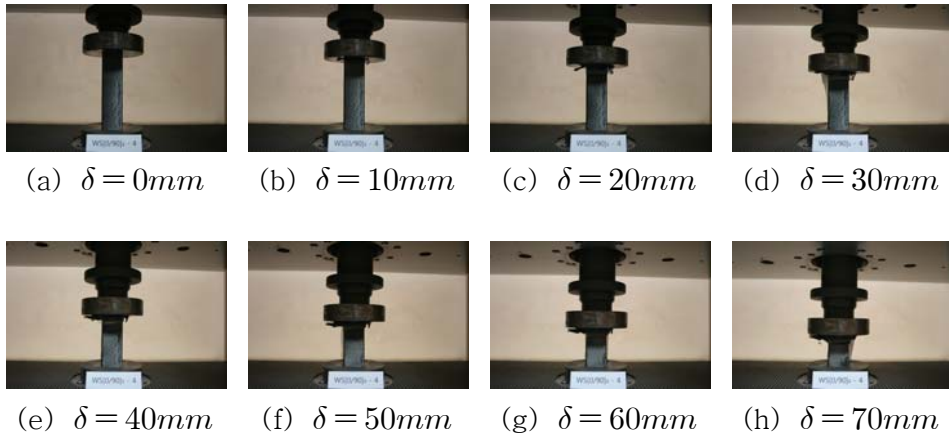


Photo. 43 Collapse Processing of SWS[ 0/ 90]<sub>4</sub>

## 제 5 장 실험 결과 및 고찰

### 제 1 절 수분 흡습거동 평가

수분 흡습률을 시간에 따라 나타낸 결과 계면 수에 따라 흡수되는 수분의 양과 속도의 차이는 있지만 모든 시험편이 초기에 흡습율이 매우 빠르게 증가하였다. 흡습 실험 후 약 200시간 전후 (0.5%의 무게 증가)까지는 그래프가 급격한 기울기로 모든 시험편에서 빠른 흡수율을 보였고 그 이후 1000시간 전(1%)까지 기울기가  $45^\circ$  이상의 기울기를 보이다가 1% 지점 이후 흡수율이 완만한 기울기에 따라 점점 흡수율이 졌다. 결국에는 시험편 내부의 수분이 포화상태(1.2~1.3%)가 됨으로써 수분 흡습률 또한 평행상태를 이루는 것을 알 수 있었다.

각각의 시험편 내부에 수분의 포화상태가 되는 시점에서 수분의 흡습률을 측정된 결과 원형부재에서는 최외각 층  $0^\circ$  인 시험편의 경우는 3계면의 경우에 흡습률이 가장 높았고, 최외각 층  $90^\circ$  를 갖는 시험편에서는 2계면의 적층구성을 갖는 시험편에서 흡습률이 가장 높게 측정되었다. 사각형부재에서도 흡습률의 차이는 있었으나 원형과 비슷한 결과를 얻었다.

수분 흡습률은 2계면에서 7계면으로 갈수록 낮게 나타났고 계면수에 따른 차이는 약 0.1%였으며 최외층 각도의 변화에 따른 흡습률 차이는 별로 나타나지 않았다. 2500시간 전후로 수분 흡수율의 변화는 거의 일어나지 않고 있으므로 평행상태를 유지하다는 것을 알 수 있었다.

계면 수가 낮을수록 수분 흡습률이 높게 나타나는 것으로 보아 같은 섬유 방향으로 연속적으로 적층될 때 더 많은 흡수율을 보임을 알 수 있었다.

시간의 경과에 따른 수분 흡습률의 변화를 원형 $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , 사각형 $0^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 순서대로 다음의 Fig. 46 ~ 49에 나타내었으며, 흡습실험이 종료된 후 각각의 시험편의 수분 흡습률을 Table 4에 나타내었다. 수분 흡습률을 계면수의 변화에 맞춰서 원형 $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , 사각형 $0^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 순서대로 Fig. 50 ~ 53에 나타내었다.

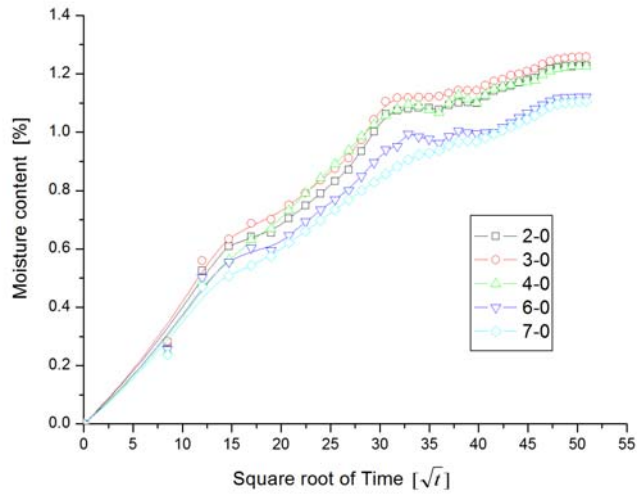


Fig. 45 Moisture content of circle CFRP specimens  
(outer angle  $0^\circ$  )

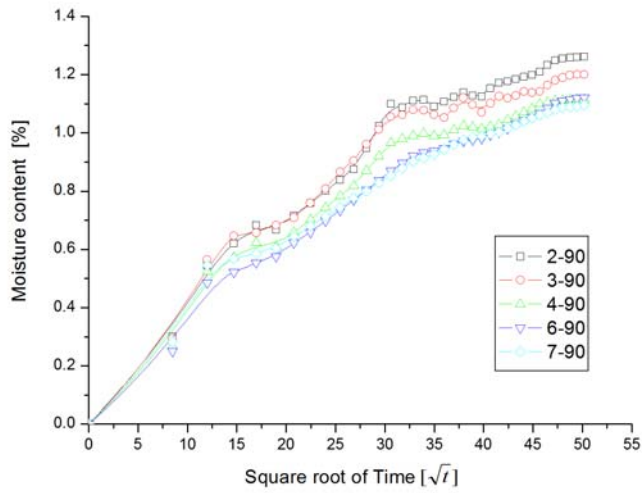


Fig. 46 Moisture content of circle CFRP specimens  
(outer angle  $90^\circ$  )



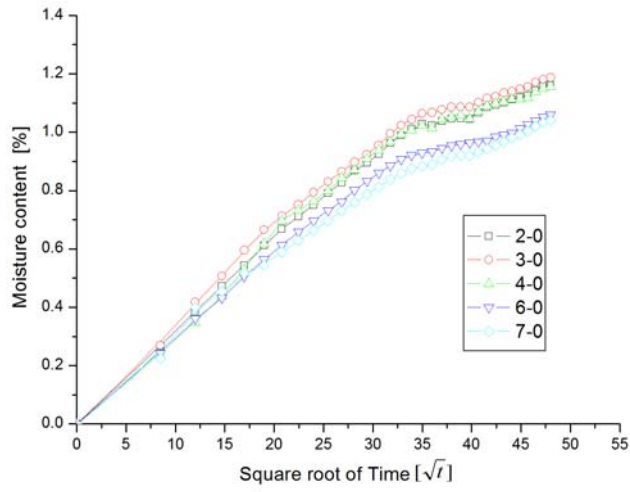


Fig. 47 Moisture content of square CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

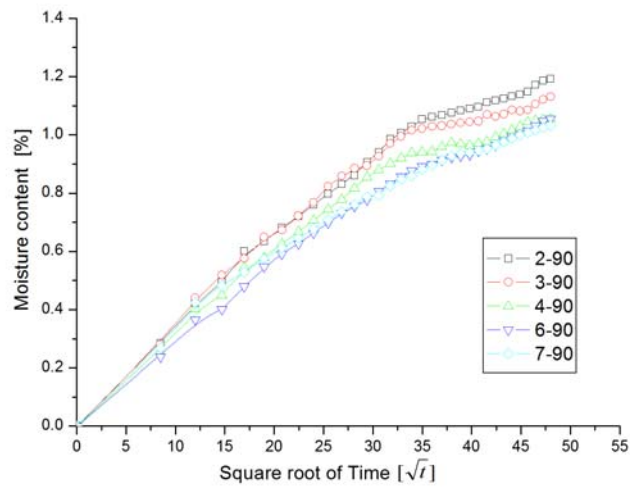


Fig. 48 Moisture content of square CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

Table 4 Hygrothermal experiment test results of specimen

최 외각층	계면 수	Moisture content (%)	
		Circle	Square
outer angle 0°	2 계면	1.228	1.160
	3 계면	1.258	1.187
	4 계면	1.226	1.157
	6 계면	1.121	1.060
	7 계면	1.104	1.040
outer angle 90°	2 계면	1.262	1.192
	3 계면	1.200	1.131
	4 계면	1.115	1.055
	6 계면	1.121	1.055
	7 계면	1.096	1.032

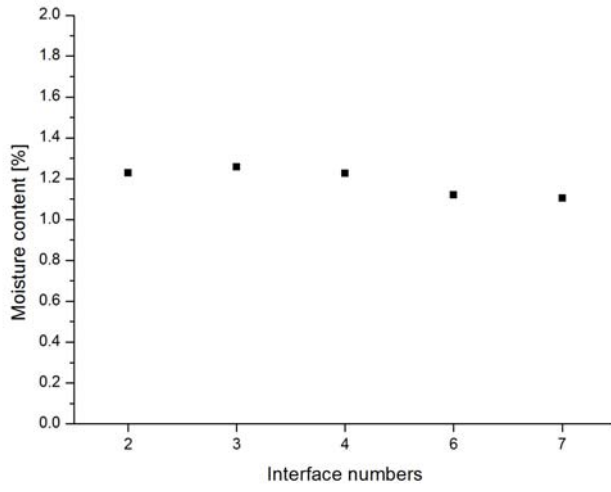


Fig. 49 Moisture content according to variation interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

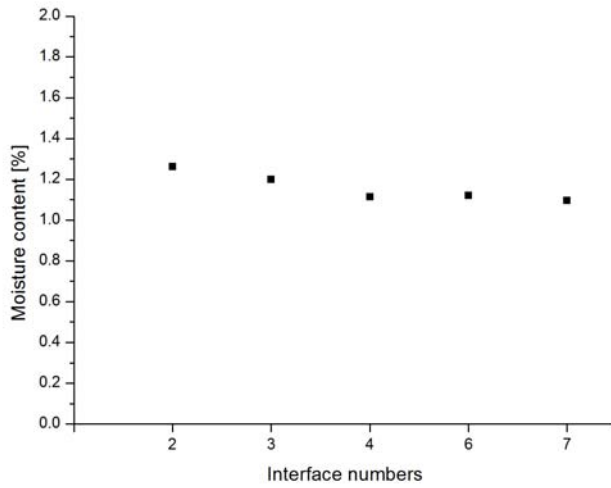


Fig. 50 Moisture content according to variation interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

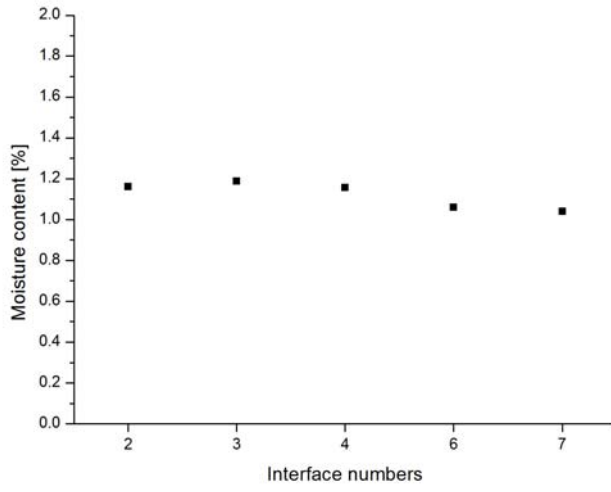


Fig. 51 Moisture content according to variation interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

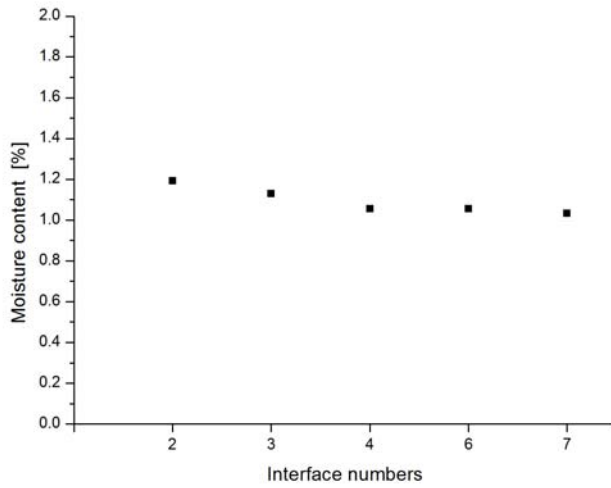


Fig. 52 Moisture content according to variation interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

## 제 2 절 열습 환경 하에서의 강도평가

수분의 침투로 인한 CFRP복합재의 강도저하를 알아보기 위해 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않았던 시험편에 대해 압괴실험을 실시한 결과 최외각층의 변화에 따른 계면간의 최대하중, 평균하중, 흡수에너지 및 질량당 흡수에너지 값을 Table. 5 에 나타냈다. Table. 5의 SAE(specific absorption energy)는 질량당 흡수에너지를 나타냈다.

Fig. 53 ~ 64는 수분의 흡수 여부에 따라 최외각층 90°, 0° 에 대한 각각의 계면 수 변화에 따른 최대하중과 평균하중, 흡수에너지 및 질량당 흡수 에너지를 원형, 사각형부재로 나누어서 그래프로 나타내었다.

Fig. 53과 54는 원형부재의 최대 압괴하중을 나타낸 그래프이다. 원형 최외각층 0° 의 경우 3계면 제외하고는 수분을 흡수하기 전보다 수분흡수 후에 최대하중의 값이 감소했고 최외각층 90° 의 경우에는 모두 감소했다. 최대 하중이 감소한 경우 약 10 ~ 24%까지 감소하였다.

Fig. 55과 56은 원형부재의 평균 압괴하중을 나타낸 그래프이다. 원형 최외각층 0° 의 경우 모든 시험편이 수분을 흡수하기 전보다 수분흡수 후에 평균하중의 값이 감소했고 최외각층 90° 의 경우에는 모든 시험편의 평균하중이 감소하긴 했으나 6계면의 경우엔 수분흡수전의 시험편과 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 평균하중이 감소한 경우 약 8 ~ 21%까지 감소하였다.

Fig. 57과 58은 원형부재의 총 흡수에너지를 나타낸 그래프이다. 원형 최외각층 0° 의 경우 모든 시험편이 수분을 흡수하기 전보다 수분흡수 후에 총 흡수에너지의 값이 감소했고 4계면으로 갈수록 증가하다가 6, 7계면에서는 다시 낮아지고 있다. 최외각층 90° 의 경우에는 모든 시험편의 총 흡수에너지가 감소하긴 했으나 6계면의 경우엔 수분흡수전의 시험편과 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 평균하중이 감소한 경우 약 8 ~ 21%까지 감소하였다.

Fig. 59과 60은 사각형부재의 최대 압괴하중을 나타낸 그래프이다. 사각형 최외각층 0° 의 경우 모든 시험편이 수분을 흡수하기 전보다 수분흡수 후에 최대하중의 값이 감소했고 최외각층 90° 의 경우에도 모두 감소했다. 6계면의 경우 다른 시험편보다 최대하중이 많이 떨어지는 값을 보이고 있다. 최대

하중이 감소한 경우 약 10 ~ 24%까지 감소하였다.

Fig. 61과 62는 사각형부재의 평균 압축하중을 나타낸 그래프이다. 사각형 최외각층  $0^\circ$ 의 경우 모든 시험편이 수분을 흡수하기 전보다 수분흡수 후에 평균하중의 값이 감소했고 최외각층  $90^\circ$ 의 경우에는 모든 시험편의 평균하중이 감소하긴 했으나 6계면의 경우엔 수분흡수전의 시험편과 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 평균하중이 감소한 경우 약 8 ~ 21%까지 감소하였다.

Fig. 63과 64는 사각형부재의 총 흡수에너지를 나타낸 그래프이다. 사각형 최외각층  $0^\circ$ 의 경우 모든 시험편이 수분을 흡수하기 전보다 수분흡수 후에 총 흡수에너지의 값이 감소했고 최외각층  $90^\circ$ 의 경우에는 모든 시험편의 총 흡수에너지가 감소하긴 했으나 6계면의 경우엔 수분흡수전의 시험편과 거의 동일한 값을 보여주고 있다.

Table. 5 Static collapse test results of specimen

원형	계면 수	총에너지		최대하중		평균하중		SAE	
		DRY	WET	DRY	WET	DRY	WET	DRY	WET
outer angle 0°	2	592.1027	536.6342	13.03229	11.75235	8.230646	7.665611	26.58746	23.82923
	3	576.6602	542.3967	12.175	12.23438	8.236996	7.747735	26.12632	24.23145
	4	761.1337	642.4684	13.99922	10.675	10.87213	9.177075	34.52793	28.55669
	6	719.6957	629.3457	11.7	10.22396	10.28033	8.989509	33.06969	28.17629
	7	766.0598	584.9254	12.62656	9.628127	10.94246	8.355206	34.92249	26.38602
outer angle 90°	2	1072.267	851.5546	16.96641	13.15729	15.31627	12.16353	48.83488	38.12476
	3	866.2153	813.4343	13.98125	12.97344	12.37305	11.61921	39.08914	36.15263
	4	795.1314	723.302	13.26146	11.575	11.35762	10.33156	36.53761	32.35816
	6	827.9422	819.2041	15.45625	13.2875	11.82622	11.70143	37.80903	36.61084
	7	821.5086	704.2004	13.22734	11.57344	11.73438	10.05886	37.52894	32.20527

사각형	계면 수	총에너지		최대하중		평균하중		SAE	
		DRY	WET	DRY	WET	DRY	WET	DRY	WET
outer angle 0°	2	358.987	311.499	12.435	9.289	5.128	4.449	15.941	13.832
	3	402.596	335.497	12.443	10.369	5.751	4.792	17.986	14.989
	4	470.358	391.965	12.195	10.163	6.719	5.599	20.907	17.422
	6	156.415	130.346	8.169	6.808	2.234	1.862	7.003	5.836
	7	439.266	325.378	12.182	8.440	6.274	4.647	20.089	14.880
outer angle 90°	2	424.677	357.892	12.552	11.622	6.066	5.112	19.013	16.023
	3	484.628	403.857	13.113	10.927	6.922	5.769	21.539	17.950
	4	558.513	465.428	15.235	12.696	7.978	6.648	24.986	20.822
	6	534.725	332.682	13.963	9.561	7.638	4.752	23.897	14.868
	7	620.585	517.154	15.647	13.039	8.864	7.387	27.995	23.329

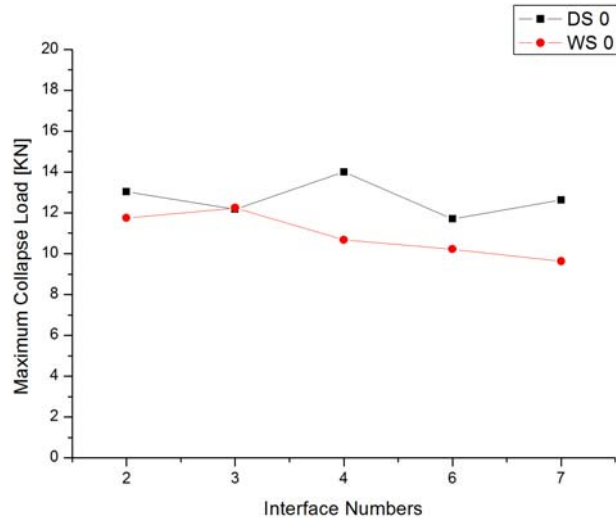


Fig. 53 Maximum collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

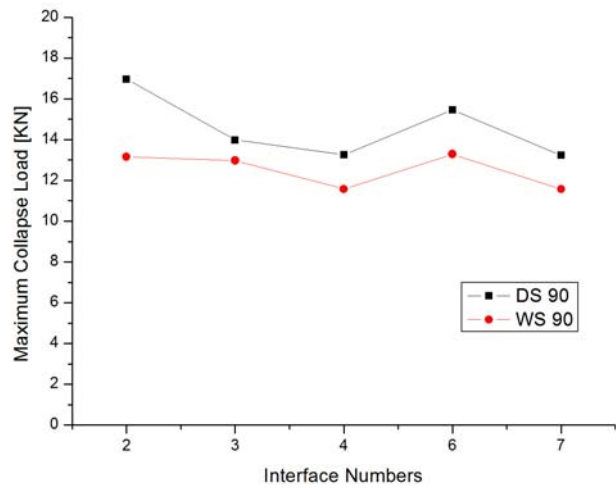


Fig. 54 Maximum collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )



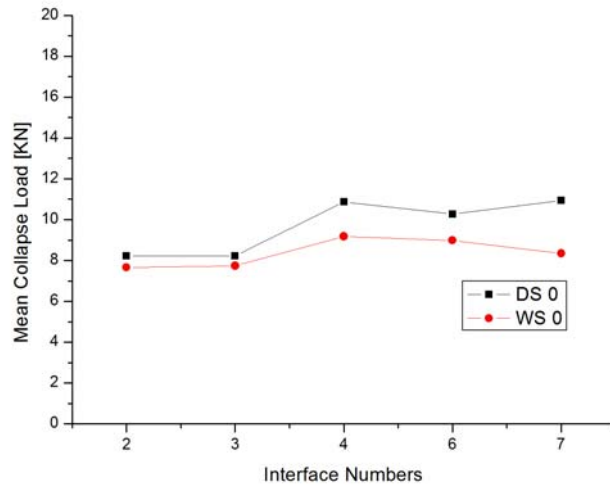


Fig. 55 Mean collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

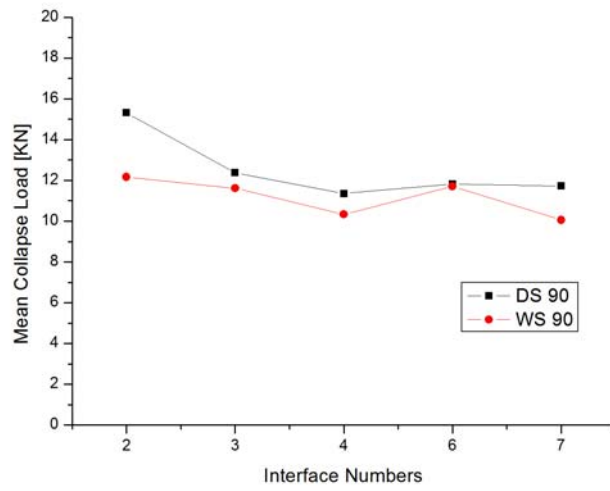


Fig. 56 Mean collapse load according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

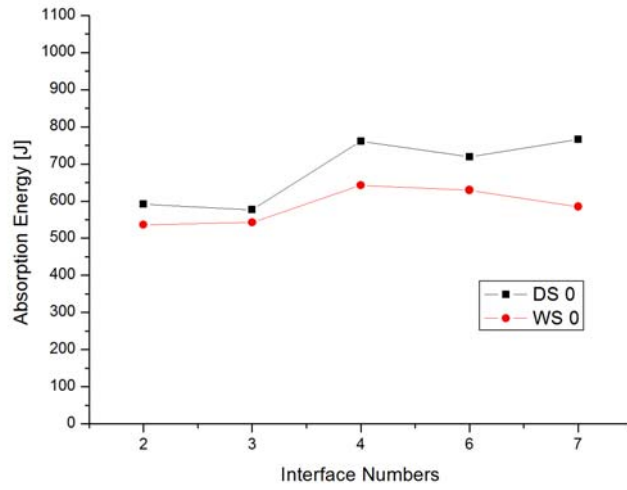


Fig. 57 Absorption energy according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

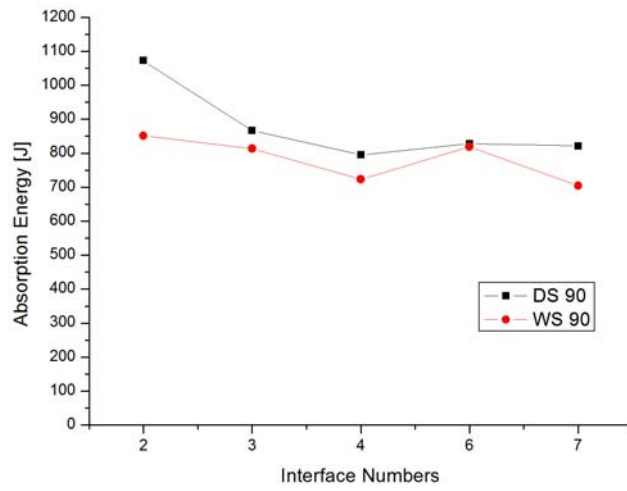


Fig. 58 Absorption energy according to interface numbers of circle CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

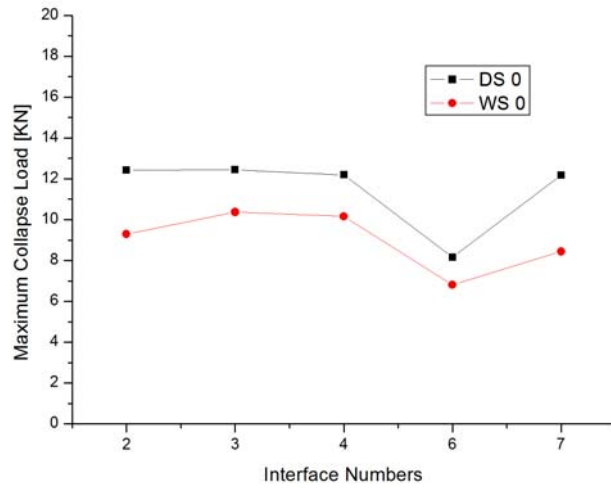


Fig. 59 Maximum collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

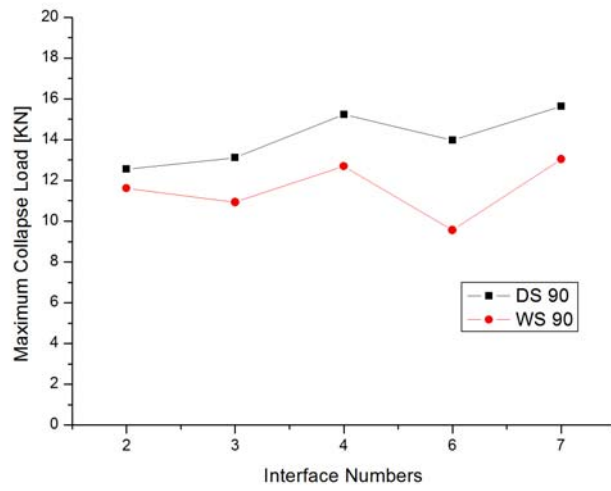


Fig. 60 Maximum collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

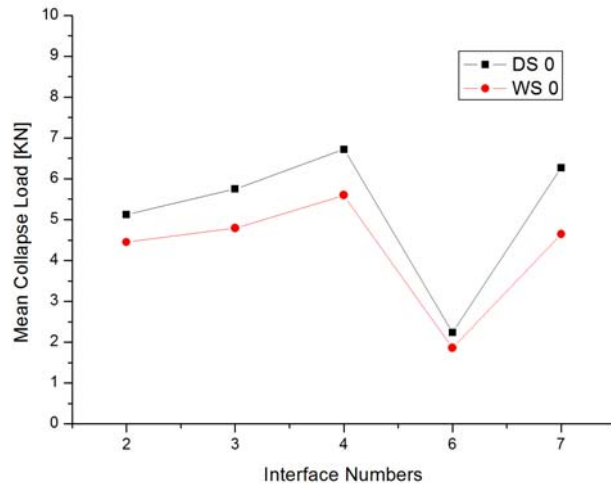


Fig. 61 Mean collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

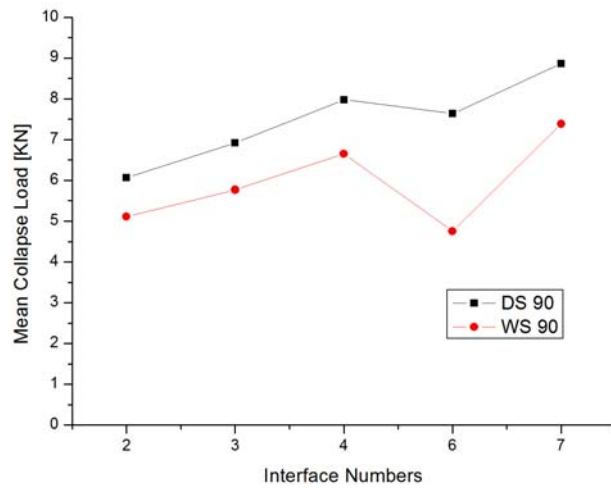


Fig. 62 Mean collapse load according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

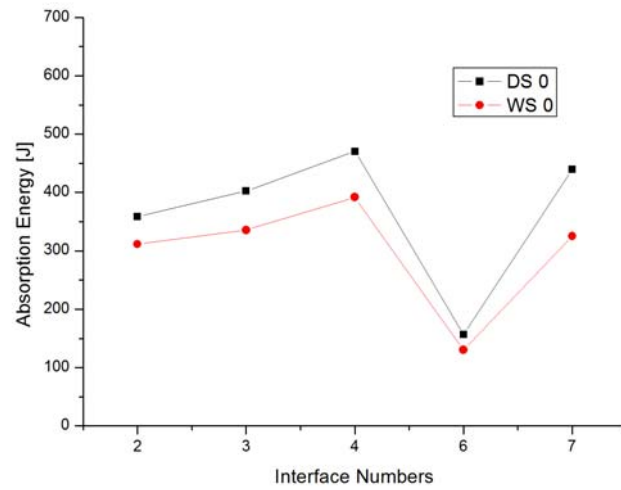


Fig. 63 Absorption energy according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $0^\circ$  )

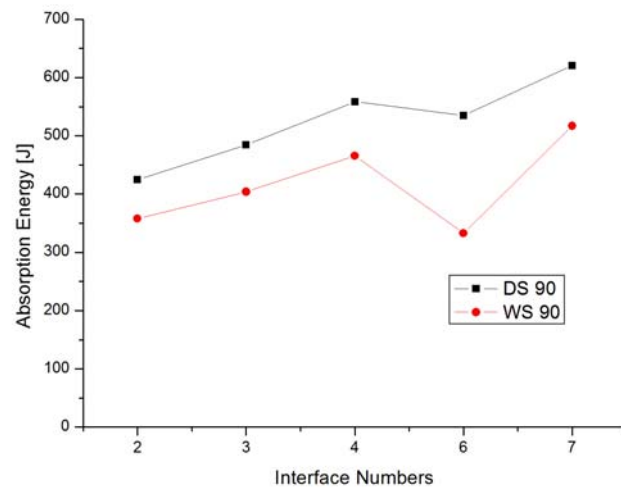


Fig. 64 Absorption energy according to interface numbers of square CFRP specimens (outer angle  $90^\circ$  )

Table. 6 Comparison of the absorption energy of specimen

	Interface number	Circle			Square		
		DRY	WET	WET/DRY (%)	DRY	WET	WET/DRY (%)
outer angle 0°	2	358.987	311.499	90	358.987	311.499	87
	3	402.596	335.497	94	402.596	335.497	83
	4	470.358	391.965	84	470.358	391.965	83
	6	156.415	130.346	87	156.415	130.346	83
	7	439.266	325.378	76	439.266	325.378	74
outer angle 90°	2	424.677	357.892	79	424.677	357.892	84
	3	484.628	403.857	94	484.628	403.857	83
	4	558.513	465.428	91	558.513	465.428	83
	6	534.725	332.682	99	534.725	332.682	62
	7	620.585	517.154	86	620.585	517.154	83

## 제 6 장 결 론

본 연구를 통해 원형 및 사각형 구조부재가 고온·고습 환경에 장시간 노출되었을 때의 수분 흡습 거동을 살펴보고, 그에 따라 CFRP 원형, 사각형 구조부재가 축방향의 하중을 받을 때의 강도 저하를 고찰해 보았다. 구조부재의 기본 형상인 CFRP 원형, 사각형 구조부재의 최외각 층과 계면수의 변화에 따라 압축실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수분 흡습이 비교적 용이한  $0^\circ$  방향의 적층배향을 갖는 계면에서 흡습이 많았으며 시간의 경과에 따라 증가하다가 흡습률이 약 1%정도에서 흡습률 증가 곡선이 많이 완만해졌고 2500시간 전후로 수분이 포화상태가 되었다.
2. 수분 흡습률은 2계면에서 7계면으로 갈수록 낮게 나타났고 계면수에 따른 차이는 약 0.1%정도였으며 최외층 각도의 변화에 따른 흡습률의 차이는 별로 나타나지 않았다.
3. 최외각층 각이  $90^\circ$  일 때가  $0^\circ$  일 때에 비하여 최대하중 및 평균 하중이 높았고 무흡습 시험편이 흡습 시험편에 비하여 더 높게 나타났다. 또한 무흡습 시험편의 경우는 계면수가 적을수록 많은 에너지를 흡수하고 최외각층  $90^\circ$  쪽이  $0^\circ$  에 비하여 에너지 흡수량이 높다.
4. 사각 CFRP부재의 경우 6계면에서 급격한 강도 저하가 나타났으며 최외각층이  $0^\circ$  인 경우가 특히 심했다.
5. 흡습에 따른 강도 저하를 살펴보면 원형 시험편의 경우 최외각층이  $0^\circ$  일 때 약 14%,  $90^\circ$  일 때 약 10% 강도가 감소하였으며 사각시험편의 경우 최외각층이  $0^\circ$  일 때 약 18%,  $90^\circ$  일 때 약 21% 감소하였다. 따라서 원형부재와 사각형 부재가 흡습에 의해 상도 저하가 크게 남을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Jcantwell W. J. and Morton J., "Detection of Impact Damage in CFRP Laminates", Composite Structures, Vli. 3, pp. 241~257, 1985.
2. Lubin G. : Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold, p. 147, 1982.
3. 박규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 자동차경제, pp. 24~29, 1997.
4. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (VI)." 자동차공학회지, Vol. 26, No. 4, pp. 30~35, 2004.
5. 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.
6. 이영신·전병희·오재문. "복합재료 원통셀의 진동, 좌굴강도, 충격강도 특성 및 그의 설계최적화에 관한 연구." 한국자동차공학회 논문집, Vol.5, pp. 48~69, 1997.
7. S. Tashiro, A. Yokoyama, H. Hamada. "Numerical Method of Impact Deformation and Failure in Composite Tubes." JSMS Composites-27: pp. 297~298, 1998.
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



- Graphite/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. Hiroshi Saito, Isao Kimpara, "Damage evolution behavior of CFRP laminates under post-impact fatigue with water absorption environment", *Composites Science and Technology* 69, pp. 847~855, 2009.
  13. J. Tong, F. J. Guild, S. L. Ogin, P. A. Smith, "ON MATRIX CRACK GROWTH IN QUASI-ISOTROPIC LAMINATES-I. EXPERIMENTAL INVESTIGATION", *Composites Science and Technology* 57, pp. 1527-1535, 1997.
  14. Thorton, P. H. and Jeryan. R. A, "Crash energy management in composite automotive structures", *Int J Impact Eng.*, Vol. 7, pp. 167-180, 1988.
  15. Farley, G. L. and Jones R, "Crushing characteristics of continuous fiber reinforced composite tubes.", *J. Compos. Mater.*, Vol. 26, pp. 37-50, 1992.
  16. Abramowicz, W, "Simplified Crushing Analysis of Thin-Walled Columns and Beams," *Engineering Transactions*, Vol. 29, No. 1, pp. 5~26, 1981.
  17. Abramowicz, W. and Wierzbicki, T, "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures," *J. Appl. Mech*, Vol. 50, pp. 157~174, 1986.
  18. Kwang-Hee Im, In-Young Yang, "A Study on Effects to Residual Fatigue Bending Strength of Orthotropy CFRP Composite Laminates under High Temperature and Moisture," *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 8, No. 6, pp. 247~258, 2000.

19. Youngnam Kim, Hyosuk Choi, Chunsuk Cha, Kwanghee Im, Jongan Jung and Inyoung Yang, "Influence of Stacking Sequence Conditions on the Characteristics of Impact Collapse using CFRP Thin-Wall Structures," Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers A, Vol. 24, No. 12, pp. 2945~2951, 2000.
20. H. Benson Dexter, Donald J. Baker. "Flight Service Environmental Effects on Composite Materials and structures", Advanced Performance Materials, 1, pp. 51~85, 1994.
21. K. Ogi, H.S. Kim, T. Maruyama, Y. Takao, "The influence of hygrothermal conditions on the damage processes in quasi-isotropic carbon/epoxy laminates", Composites Science and Technology 59, pp. 2375~2382 .1999.
22. Greszczuk L. B. and Chao H., "Impact Damage in Graphite Fiber Reinforced Composite", pp. 389~408, 1997.
23. Chllenger K. D., "The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composite", A Workshop Summary, Composite Structure, 6, pp. 295~318, 1986.
24. 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.
25. Beckry Abdel-Magid, Saeed Ziaee, Katrina Gass, Marcus Schneider, "The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites", Composite Structures 71 pp. 320~326, 2005.
26. Y.I. Tsai, E.J. Bosze, E. Barjasteh, S.R. Nutt, "Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites", Composites Science and Technology 69 pp. 432~437, 2009.
27. 최홍섭, 안규중, 남재도 "단일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료 적층판의

- 수분흡수거동," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, pp. 1486~1500, 1998.
28. G. Sala, "Composite degradation due to fluid absorption," Composites Part B, Vol. 31, pp. 357~373, 2000.
  29. Yuichiro Aoki, Ken Yamada, Takashi Ishikwa, "Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates," composites science and technology, Vol. 68, pp. 1376~1383, 2007.
  30. 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.
  31. Christos J. Tsenoglou, Sylvia Pavlidou, Constantine D. Papaspyrides. "Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber-polymer composites", Composites Science and Technology 66, pp. 2855~2864, 2006.
  32. Stephen W. and Hahn H. T., : Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing C., Inc., pp. 329~340, 1980.
  33. Ishai O. and Arnon V., "Instantaneous Effect of Internal Moisture Conditions on Strength of Glass-Fiber-Reinforced Plastics", ASTM, pp. 267~276, 1978.
  34. Shen H. and Springer G. S., "Effects of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials", Journal of Composite Material, Vol. 2, pp. 2~16, 1976.
  35. Ankara, A., Weisgerber, D., Vilsmeir, J., "Influence of Moisture on the Mechanical Properties of Graphite /Epoxy System ", Advanced Composite Materials and Structures, pp. 347~362. 1987.
  36. GRank J., "Mathematics of Diffusion", Oxford University Press, London, 1956.

37. Whitney J. M., Daniel I. M. and Pipes R. B., "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials" Prentice-Hall, Inc, pp. 250~255, 1984.
38. Turker W. C. and Brown R., "Moisture Absorption of Graphite/Polymer Composites Under 2000 Feet of Seawater", Journal of Composite Materials, Vol. 23, No. 8, pp. 787~797, 1989.
- 39.李大吉, : qhrgkqwofydurgkr 및 가공론, 성안당, pp. 6, 165~168, 1993.
40. 한길영, 이동기, 김이곤, 김기성, "열습효과가 GFRP의 잔류강도에 미치는 영향" , 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 93~97, 1994.