



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](#)

고온 · 고습 환경 하에서의 CFRP
모자형 단면부재의 강도평가

Strength Evaluation of CFRP Hat Shaped Sectional
Members under the Hygrothermal

2009 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

양 용 준

고온·고습 환경 하에서의 CFRP 모자형
단면부재의 강도평가

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함.

2008 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

양 용 준

양용준의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 심재기 ㉠

위원 전북대학교 교수 김선규 ㉠

위원 조선대학교 교수 양인영 ㉠

2008년 11월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	VI
ABSTRACT	VIII
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적	4
제 3 절 연구방법	6
제 2 장 시험편	7
제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 제작	7
제 2 절 시험편의 종류	10
제 3 장 실험방법	12
제 1 절 열습실험	12
제 2 절 압궤실험	15
제 4 장 정적 압궤실험	16
제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 압궤실험	16
제 2 절 수분이 흡수된 CFRP 모자형 단면부재의 압궤실험	27

제 5 장 결과 및 고찰	38
제 1 절 수분 흡습거동 평가	38
제 2 절 압궤형상 비교	45
제 3 절 고온·고습 환경 하에서의 강도평가	48
제 6 장 결 론	64
참 고 문 헌	66

LIST OF TABLES

Table 1	The goal of automobile technology development	3
Table 2	Material properties of the CFRP prepreg sheet	8
Table 3	Description of specimen	10
Table 4	Symbols of CFRP hat shaped members	11
Table 5	Hygrothermal experiment test results of specimen	43
Table 6	Static collapse test results of specimen	60

LIST OF FIGURES

Fig. 1 CFRP hat shaped member	8
Fig. 2 Curing cycle of CFRP stacking specimen	9
Fig. 3 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[90_2 / 0_2]_s$	17
Fig. 4 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[0_2 / 90_2]_2$	18
Fig. 5 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[90 / 0]_{s2}$	19
Fig. 6 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[90 / 0]_{2s}$	20
Fig. 7 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[0 / 90]_4$	21
Fig. 8 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[0_2 / 90_2]_s$	22
Fig. 9 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[90_2 / 0_2]_2$	23
Fig. 10 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[0 / 90]_{s2}$	24
Fig. 11 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[0 / 90]_{2s}$	25
Fig. 12 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal $[90 / 0]_4$	26
Fig. 13 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal $[90_2 / 0_2]_s$	28

Fig. 14 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [0 ₂ / 90 ₂] ₂	29
Fig. 15 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [90 / 0] _{s2}	30
Fig. 16 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [90 / 0] _{2s}	31
Fig. 17 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [0 / 90] ₄	32
Fig. 18 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [0 ₂ / 90 ₂] _s	33
Fig. 19 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [90 ₂ / 0 ₂] ₂	34
Fig. 20 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [0 / 90] _{s2}	35
Fig. 21 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [0 / 90] _{2s}	36
Fig. 22 Load-Displacement curve of specimen hygrothermal [90 / 0] ₄	37
Fig. 23 Moisture Absorption Rate of the 2 Interface Specimen	40
Fig. 24 Moisture Absorption Rate of the 3 Interface Specimen	40
Fig. 25 Moisture Absorption Rate of the 4 Interface Specimen	41
Fig. 26 Moisture Absorption Rate of the 6 Interface Specimen	41
Fig. 27 Moisture Absorption Rate of the 7 Interface Specimen	42
Fig. 28 Water absorption rate according to variation interface numbers (outer angle 90°)	44
Fig. 29 Water absorption rate according to variation interface numbers (outer angle 0°)	44

Fig. 30 Relationship between load and displacement	
$[90_2 / 0_2]_s$	50
Fig. 31 Relationship between load and displacement	
$[0_2 / 90_2]_s$	50
Fig. 32 Relationship between load and displacement	
$[0_2 / 90_2]_2$	51
Fig. 33 Relationship between load and displacement	
$[90_2 / 0_2]_2$	51
Fig. 34 Relationship between load and displacement	
$[90 / 0]_{s2}$	52
Fig. 35 Relationship between load and displacement	
$[0 / 90]_{s2}$	52
Fig. 36 Relationship between load and displacement	
$[90 / 0]_{2s}$	53
Fig. 37 Relationship between load and displacement	
$[0 / 90]_{2s}$	53
Fig. 38 Relationship between load and displacement	
$[0 / 90]_4$	54
Fig. 39 Relationship between load and displacement	
$[90 / 0]_4$	54
Fig. 40 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[90_2 / 0_2]_s$	55
Fig. 41 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[0_2 / 90_2]_s$	55
Fig. 42 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[0_2 / 90_2]_2$	56
Fig. 43 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[90_2 / 0_2]_2$	56

Fig. 44 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[90 / 0]_{s2}$	57
Fig. 45 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[0 / 90]_{s2}$	57
Fig. 46 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[90 / 0]_{2s}$	58
Fig. 47 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[0 / 90]_{2s}$	58
Fig. 48 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[0 / 90]_4$	59
Fig. 49 Relationship between absorbed energy and displacement	
$[90 / 0]_4$	59
Fig. 50 Relationship between maximum collapse load and variation	
interface numbers (outer angle 90°)	61
Fig. 51 Relationship between maximum collapse load and variation	
interface numbers (outer angle 0°)	61
Fig. 52 Relationship between mean collapse load and variation interface	
numbers (outer angle 90°)	62
Fig. 53 Relationship between mean collapse load and variation interface	
numbers (outer angle 0°)	62
Fig. 54 Relationship between absorbed energy and variation interface	
numbers (outer angle 90°)	63
Fig. 55 Relationship between absorbed energy and variation interface	
numbers (outer angle 0°)	63

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave	9
Photo. 2 Hot waterbath	13
Photo. 3 Specimen holder	13
Photo. 4 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[90_2 / 0_2]_s$	17
Photo. 5 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[0_2 / 90_2]_2$	18
Photo. 6 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[90 / 0]_{s2}$	19
Photo. 7 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[90 / 0]_{2s}$	20
Photo. 8 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[0 / 90]_4$	21
Photo. 9 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[0_2 / 90_2]_s$	22
Photo. 10 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[90_2 / 0_2]_2$	23
Photo. 11 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[0 / 90]_{s2}$	24
Photo. 12 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[0 / 90]_{2s}$	25
Photo. 13 Collapse processing of specimen non hygrothermal $[90 / 0]_4$	26
Photo. 14 Collapse processing of specimen hygrothermal $[90_2 / 0_2]_s$	28

Photo. 15 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[0_2 / 90_2]_2$	29
Photo. 16 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[90 / 0]_{s2}$	30
Photo. 17 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[90 / 0]_{2s}$	31
Photo. 18 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[0 / 90]_4$	32
Photo. 19 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[0_2 / 90_2]_s$	33
Photo. 20 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[90_2 / 0_2]_2$	34
Photo. 21 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[0 / 90]_{s2}$	35
Photo. 22 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[0 / 90]_{2s}$	36
Photo. 23 Collapse processing of specimen hygrothermal	
$[90 / 0]_4$	37
Photo. 24 Shape of collapsed specimen	
(non hygrothermal, outer angle 90°)	46
Photo. 25 Shape of collapsed specimen	
(hygrothermal, outer angle 90°)	46
Photo. 26 Shape of collapsed specimen	
(non hygrothermal, outer angle 0°)	47
Photo. 27 Shape of collapsed specimen	
(hygrothermal, outer angle 0°)	47

ABSTRACT

Strength Evaluation of CFRP Hat Shaped Sectional Members under the Hygrothermal

Yang, Young-Jun

Advisor : Prof. Yang, In-Young, Ph. D.
Dept. of Advanced Parts & Materials
Engineering
Graduate School of Chosun University

It is important to satisfy the requirements and standards for the protections of passengers in a car accident. There are lots of studies on the crushing energy absorption of a structure members in automobiles.

In this paper, we have studied to investigate collapse characteristics and moisture absorption movements of CFRP structure members when CFRP(carbon fiber reinforced plastics) laminates are under the hygrothermal environment. In particular, the absorbed energy, mean collapse load and deformation mode were analyzed for side members which absorbed most of the collision energy. Also, variation of CFRP interlaminar numbers is important to increase the energy absorption capability.

Therefore we have made a static collapse experiment to research into the difference of absorbed energy and deformation mode between moisture absorbed specimen and non-moisture absorbed.

The purpose of this study is to evaluate the strength reduction and

moisture absorption behavior of CFRP hat shaped member, moisture absorption test and static collapsing were conducted, and the following conclusions were achieved. For the moisture absorption behavior by the change in interlaminar numbers, 2 and 3 interlaminar showed a steep increase in absorption rate at the initial stage, but absorption rates for all specimens showed consistent increment after 1.0%.

Collapsing shapes for moisture absorbed specimen and the one without moisture absorption displayed the weakening of bonding strength between interfaces due to internal deterioration of CFRP. In addition, collapsed shape and mode for moisture absorbed specimen exhibited more stabilized collapsing mode. Strength of moisture absorbed specimen was reduced by 12% from the one without moisture absorption.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

탄소섬유강화복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 복합재는 금속재료에 비하여 비강성, 비강도가 크기 때문에 구조경량화가 요구되는 항공우주분야를 비롯하여 선박, 자동차, 의료기기, 일반산업분야, 스포츠, 레저, 에너지 관련분야 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다.

특히, 우주항공 구조용 재료로서 가장 주목 받고 있는 선진복합재료 중에서도 CFRP는 금속재료에 비해서 중량을 20%~50% 정도 저감시킬 수 있다는 장점이 있어서 Table1과 같이 경량화가 요구되는 여러 분야에 널리 이용되고 있다.^{1, 2)}

그리하여 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 기계적 특성, 경량성, 내열성, 마찰·제동 특성 및 전기 전도성 등의 고성능을 구비한 첨단복합재료의 개발이 활발히 추진되고 있다.

또한 최근에는 가벼운 중량으로 금속에 비해 그 강도 및 강성, 내열성 및 내식성이 좋기 때문에 환경 보호적 측면에서 대두되고 있는 심각한 환경오염 문제와 에너지 절약의 관점에서 차량의 연비향상 뿐만 아니라 차체의 수명 연장과 경량화 재료로 인한 엔진효율의 향상을 극대화 시킬 수 있어서 차량의 부품과 구조부재에 그 사용 범위가 점차 확대가 되고 있는 실정이다.^{3~5)}

수송기계부품의 경량화를 위한 연구는 최적설계기술과 소재개발기술 이라는 두 가지 측면으로 추진되고 있다. 복잡한 형상을 가지고 있는 수송기계의 최적설계를 위한 강성해석이나 충돌해석 등을 위해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며, 소재개발을 위해서 수송기계의 주요부품들을 복합재료나 알루미늄 등으로 대체하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다.^{6, 7)} 특히 섬유강화 복합재료의 뛰어난 무게 비 충격에너지 흡수특성으로 인해서 충돌 시에 발생하는 충돌에너지를 흡수해야 하는 부재에 섬유강화 복합재료를 적용하고자 하는 노력이 진행 중이며, 이와 관련된 실험논문 들이 발표되고 있다. 이미 충분한 실험과 검증이 확보되어

있는 금속재료와는 달리, 섬유강화 복합재료는 그 붕괴거동에 관련된 충분한 실험과 이를 뒷받침하는 해석적인 연구결과가 충분치 않은 실정이다. 복합재료의 파괴메카니즘은 매우 복잡할 뿐만 아니라 그 해석 또한 어려우며 인장, 압축 및 전단하중 작용 시 섬유와 기지의 파단 및 섬유-기지의 상호간의 파단을 포함하고 있기 때문이다.

또한 CFRP는 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습 및 충격부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 기대할 수 없고 복합재의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 온도, 습도 등과 같은 환경적 요인으로 습기가 복합재료 내로 침투하여 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질을 저하시키며, 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.⁸⁻¹¹⁾

이는 섬유의 파단, 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.¹²⁻¹⁴⁾

Table 1 The goal of automobile technology development

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, 낚싯대, 등산용구, 카메라, 원심분리기, 플라이휠, 그라인더 휠, 타이 어, 벨트, 회전 프로펠러, 제지기 로울러 등
	비강성 감쇠성	오디오 기기, 악기, 공작기계, 진동 컨베어 스프링, 자동차(drive shaft, leaf spring) 등
	강성 비크리프성	FRP배, 탱크, 저장고(싸이로) 등
	강성 비열팽창	우주기기 안테나, 밀리파 안테나, 마이크로메타, 타이밍 벨트, 저온 탱크, 체도기기 등
	X-선 투과성 강도, 강성	X-선 카세트, X-선의료기기 등
	전기전도성 발열	약품 탱크, 대전방지 로울러, 정전도장 벽직류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패키징, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로켓 노즐, 항공기 엔진 등

제 2 절 연구목적

전술한 바와 같이 CFRP 복합재는 정적부하 환경에서는 아주 우수한 역학적 특성을 가짐으로써 그 사용 분야가 점차 확대가 되고 있는 추세에 있으나, 구조부재의 성격상 정적부하의 환경만을 고집할 수 없게 됨으로써 CFRP 복합재의 단점이 존재하게 되며 이번 연구의 가장 큰 목적이기도 한다.

CFRP 복합재의 가장 큰 결점은 충격에 대해서는 매우 취약하다는 점이다. CFRP 복합재는 그 구성이 탄소섬유와 수지를 복합한 재료이기 때문에 충격으로 인해 발생하는 파괴현상이 아주 복잡하여 원인규명이 매우 어렵다는 점이다. 또한 CFRP 적층재의 또 다른 단점중 하나로는 섬유로 구성된 복합재이기 때문에 습기가 있는 환경에서는 수분을 흡수한다는 점이다. 수분이 복합재 내부로 침투할 경우 기지의 분자배열 및 화학적 성질의 변화와 복합재료의 계면특성 및 구성재질의 기계적 성질의 저하를 가져오며, 특히 정적부하에서 기대했던 강도에 큰 저하가 발생하게 된다.

구조부재의 성격상 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위 환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 고온·고습과 같은 상황 하에서 수분이 복합재료 내로 침투함으로써 연성재의 역할을 수행함으로써 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재질의 기계적 성질을 저하시킴으로써 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다.^{15~19)}

이제껏 연구 결과로는 실온 상태에서 CFRP 적층판에 충격력을 가하여 충격손상 및 잔류강도의 저하현상을 평가한 실험적 연구와^{20~27)} 흡습상태에서의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 대한 잔류 강도 저하 문제를 취급한 연구,^{28~33)} 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 굽힘 강도, 피로 강도 및 크리프강도에 미치는 온도의 영향을 고찰한 연구결과 뿐이다.^{34~38)}

또한, CFRP 복합재는 탄소강화 섬유와 에폭시 수지의 복합체이기 섬유의 파단이나 수지와의 계면 파괴 등의 현상이 복합하여 나타나는데, 고온·고습의 환경에서

이런 CFRP 복합재의 계면간의 연구에는 적층판 구조부재에 대한 수분흡수 거동과 잔류응력 등의 강도평가에 관한 연구들이 대부분 이었고, 자동차용 구조부재의 형상을 갖는 CFRP 모자형 단면부재에 대한 연구는 미흡한 실정 이었다.

따라서 본 연구에서는 적층 구성이 서로 다른 CFRP 모자형 단면부재가 고온·고습 환경 하에서 장시간 노출되었을 때 적층구성의 차이에 따른 수분흡수특성과 강도평가를 실험적으로 고찰하여, 고온·고습의 가혹한 환경 하에서 수분으로 인해 발생하는 강도저하에 대처할 수 있는 최적의 충격특성을 갖는 적층구성을 파악하여 실제 수송기계의 설계 시 적용 가능한 설계 데이터를 얻고자 한다.

제 3 절 연구방법

본 연구에서는 현재 차량용 구조부재로 사용되고 있는 모자형 단면부재와 비슷한 형상으로 제작된 CFRP 모자형 단면부재를 제작하여 사용하였다.

연구에 사용된 시험편의 제작 시 섬유층의 적층 방향과 순서를 달리함으로써 계면수의 변화를 주었고, 시험편의 축방향을 중심으로 최외각층의 변화를 주어 제작을 하였다.

특히, CFRP 복합재의 계면은 매트릭스 수지에서 강화섬유로 하중이 전달되는 부분으로 복합재료의 물성을 결정하는 중요한 부분이므로 이 실험에서는 CFRP 복합재의 계면간의 특성에 중점을 두어 실험을 실시하였고, 시험편 제작 시 설정하였던 최외각층의 변화에 따른 강도저하에 대해 비교해 보았다.

초기 연구의 목표인 고온고습 환경과 같은 가혹한 환경 하에서 장시간 놓여있을 때의 기계적 성질의 변화를 알아보기 위하여 온도와 습기가 장시간 일정하게 유지될 수 있는 항온항습기를 이용하여 흡습실험을 실시하였다.

항온수조의 내부온도의 설정은 차량의 엔진룸 내부의 온도로 평가될 수 있는 온도인 60° 로 설정하였고, 온도와 수분이 항상 일정하게 유지가 되도록 하였다.

흡습실험을 통하여 고온고습 상황 하에서 CFRP 복합재의 수분흡수 거동을 알아 보았고, 나아가 수분을 흡수하지 않은 시험편과 조건을 같이하여 수분침투에 따른 강도 및 흡수에너지에 대해 비교 및 고찰해 보았다.


또한 흡습실험을 통해 시험편 내부에 흡수된 수분이 포화상태가 되어 더 이상의 수분 흡수량의 증가가 없는 흡습실험이 종료되는 시점에서, 수분이 흡수된 시험편을 정적압력 실험을 실시하여 압력특성 및 압력형상을 비교 및 고찰해 봄으로써 수분의 침투로 인한 CFRP 모자형 박육부재의 강도평가를 실시하였다.

제 2 장 시험편

제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 제작

본 실험에 사용된 CFRP 모자형 단면부재의 제작에는 Table 2와 같은 일방향 CFRP Prepreg sheet(CU125NS)를 사용하여 제작을 하였다.

CFRP prepreg sheet를 차량용 충돌에너지흡수 구조부재의 형상인 모자형 단면부재로 제작하기 위하여 사각의 알루미늄 맨드릴 위에 적층하였다. 사각의 맨드릴 위에는 이형 필름(release film)을 사용하여 시험편 제작 후 맨드릴 제거가 용이하게끔 하였다.

실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1과 같은 실재 차량에 사용되는 전면부 사이드 부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 모자형() 단면부재와 평판(—) 부재를 결합하여 제작을 하였다.

모자형 단면부재와 평판 부재는 모두 8ply의 적층수를 갖게끔 적층하였고 각각 섬유적층각도가 0° 와 90° 가 되도록 방향과 순서를 달리함으로써 2, 3, 4, 6, 7계면의 변화를 설정하였다.

또한 시험편의 축방향 θ 를 중심으로 최외각층의 각도가 각각 90° 와 0° 로 구분되게 제작을 함으로써 최외각층의 변화에 따른 강도평가 및 수분흡수 변화에 대해 알아 보았다.

시험편의 성형은 Photo. 1과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 2는 시험편 제작시 오토클레이브의 성형 사이클을 나타냈다. 시험편 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여, 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압제가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 절단하였다.

오토클레이브 성형으로 제작된 시험편에 대해 실험 중 일률적인 변형을 유도함으로써 그로인한 압제하중 및 흡수에너지를 얻기 위한 목적으로 하중을 받는 시험편의 끝단 부분에 45° 의 트리거 가공을 함으로써 압제하중을 받을 경우 안정적이고 일률적인 압제가 되도록 초기조건을 설정하였다.³⁹⁾

Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet

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

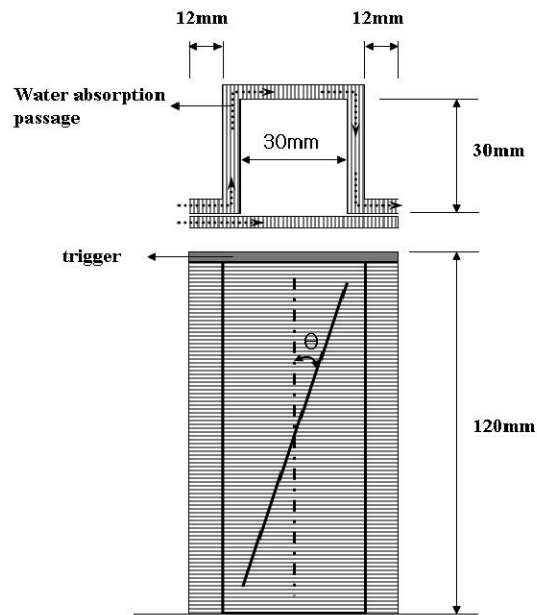


Fig. 1 CFRP hat shaped member



Photo. 1 Autoclave

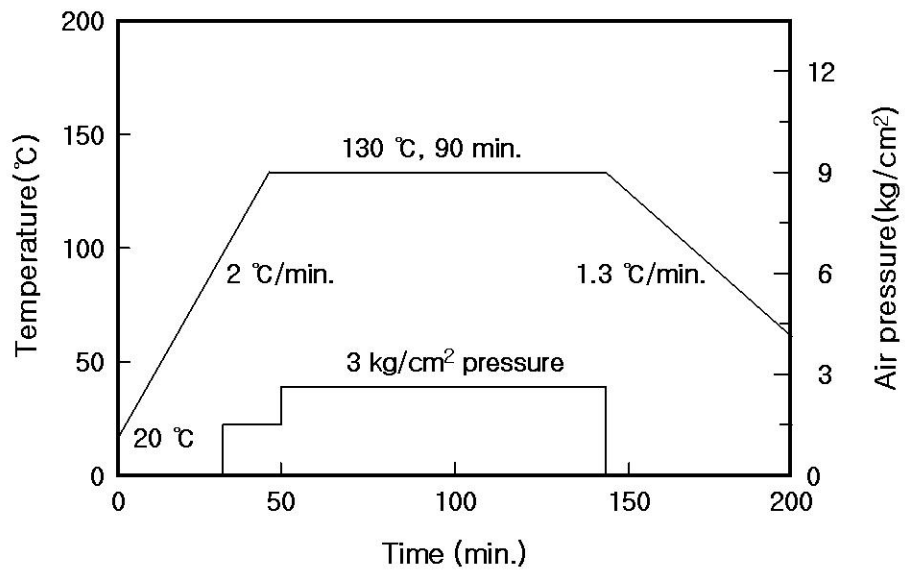


Fig. 2 Curing cycle of CFRP stacking specimen

제 2 절 시험편의 종류

본 실험에서는 Table 3에 나타난 것과 같이 10종류의 시험편을 사용하였다. CFRP 복합재의 취약한 단점 중 하나인 수분에 따른 CFRP 복합재의 수분흡수 거동을 평가하고 수분흡수 평가가 종료되는 시점인 시험편 내부의 수분 포화상태에 도달할 때 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않았던 시험편을 정적압력실험을 실시하여 강도를 평가해 보았다.

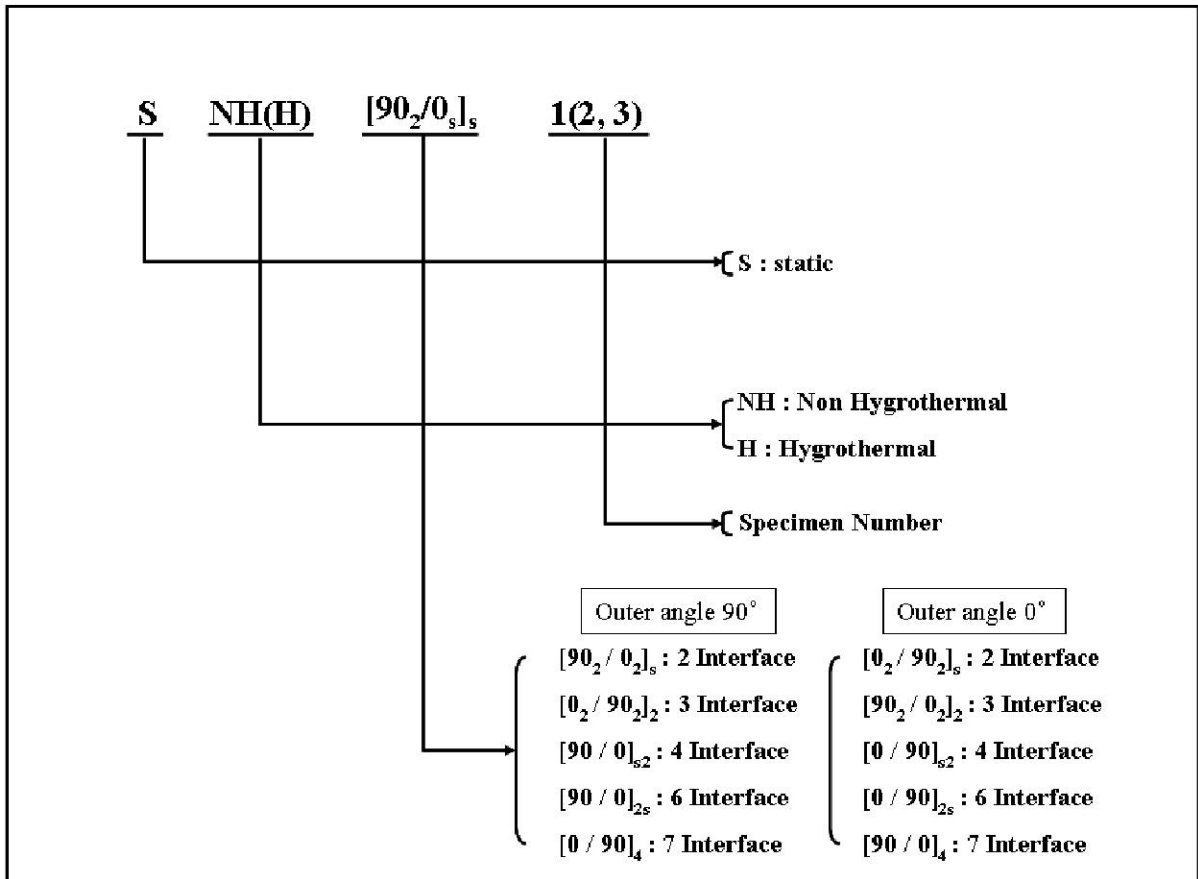
수분을 침투시킬 시험편(Hygrothermal)과 제작한 후 건조 상태를 유지하게 될 시험편(Non hygrothermal)을 각각 90° 와 0° 의 최외각층 변화에 따른 2, 3, 4, 6, 7계면의 종류로 제작 및 분류를 하였다.

또한 본 실험에 사용된 최외각층의 변화에 따른 2, 3, 4, 6, 7계면의 CFRP 모자형 박육부재의 기호에 대한 설명을 Table 4에 나타냈다.

Table 3 Description of specimen

Specimen	Condition		Interface No.	Outer Angle
[90 ₂ / 0 ₂] _s	Non Hygrothermal	Hygrothermal	2	90°
[0 ₂ / 90 ₂] ₂			3	
[90 / 0] _{s2}			4	
[90 / 0] _{2s}			6	
[0 / 90] ₄			7	
[0 ₂ / 90 ₂] _s			2	0°
[90 ₂ / 0 ₂] ₂			3	
[0 / 90] _{s2}			4	
[0 / 90] _{2s}			6	
[90 / 0] ₄			7	

Table 4 Symbols of CFRP hat shaped members



제 3 장 실험방법

제 1 절 열습실험

CFRP 복합재가 온도, 습도와 같은 환경적인 요인 하에서 오랫동안 노출되었을 때 재료의 강도저하의 큰 원인이 된다. 또한 수분흡수특성, 흡습률의 크기 등은 최적 구조 설계에 아주 중요한 자료가 될 수 있다.

고강도·강성을 갖는 CFRP는 고온·고습과 충돌 환경과 같은 가혹한 조건 하에서는 그 뛰어난 강도 및 강성을 보장 받기란 매우 어렵다.

따라서 CFRP 복합재가 고온·고습 환경 하에 노출되었을 때 그 강도가 어느 정도 저하가 되는지를 정량적으로 평가하여 CFRP 모자형 단면부재의 설계 시 적용할 수 있는 데이터를 얻기 위하여, 가혹한 조건의 하나로써 항온항습기를 이용한 고온·고습의 환경을 설정하였고, 구조부재의 설계 목적상 장시간 사용될 것을 가정한 후 흡습실험을 실시하였다.

본 실험에 사용된 Photo. 2와 같은 항온항습기(Waterbath WNB 7-45)를 사용하여 장시간 일정한 온도와 수분이 유지가 될 수 있도록 하였다.

항온항습기 내부의 온도는 구조부재의 특성상 차량의 엔진룸 내부에 CFRP 모자형 단면부재가 사용될 것을 가정하여 차량의 엔진룸 온도에 근접하게 평가가 될 수 있는 60° 로 설정하였다.

항온항습기 내부의 수심은 권장 최고 수심까지 설정을 하여 각각 30개씩의 시험편을 Photo. 3과 같은 지지대를 이용하여 물에 잠기게 하였다.



Photo. 2 Hot waterbath



Photo. 3 Specimen holder

CFRP 복합재가 장시간 수분에 노출 되었을 때 시험편 내부에 흡수되는 수분의 흡습률을 측정은 수분이 흡수되지 않았던 시험편과의 강도평가를 비교하기 위하여 중요한 역할을 수행하게 된다.

따라서 시험편에 수분이 포화상태가 될 때까지의 수분의 흡습 거동을 살펴보기 위하여 매 72시간마다 수분의 흡습률을 측정하였으며, 흡습률 측정은 물기를 완전히 제거한 후 매 72시간 마다 1/10,000g까지 측정이 가능한 정밀전자저울을 이용하여 측정을 하였다. 수분의 흡습률은 본 시험편의 무게에 수분이 흡수된 만큼의 차를 구함으로써 다시 백분율로 환산해서 구할 수 있었으며, 식(1)를 이용하여 흡습률을 구할 수 있었다.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서 M 은 시험편의 흡습률, W_m 은 수분이 흡수된 시험편의 무게, W_d 는 수분이 흡수되기 전의 시험편의 무게이며, 이를 백분율로 환산함으로써 흡습률 M 을 구할 수 있었다.

제 2 절 압괴실험

수분이 흡수된 시험편과 흡수되지 않은 시험편에 대해서 Photo. 5의 만능시험장치 (UTM)를 사용하여 변형률 속도의 영향이 나타나지 않는 충분한 속도인 10mm/min의 속도로 시험편 전체길이의 60%까지 변위를 제어하면서 정적 압괴실험을 실시하였다.

정적 압괴실험 후 얻어진 하중-변위선도와 충격 압괴실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(2)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구할 수 있었으며, 흡수에너지 E_a 를 압괴길이로 나누어 평균압괴하중 F_{mean} 을 구하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l F dl \quad (2)$$

여기서, E_a 는 시험편 내부에 흡수된 에너지이며, F 는 압괴하중을, l 은 압괴과정에서 압괴된 시험편의 길이를 나타낸다.

또한, 시험편에 흡수된 전체 흡수에너지 E_T 와 최대압괴하중 F_{max} 를 구하여 CFRP 모자형 단면부재의 에너지 흡수특성에 관하여 고찰하였다.

제 4 장 정적 압괴실험

제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험

초기에 수분을 흡수시키지 않았던 무흡습 시험편에 대하여 최외각층 90° 와 0° 에 따라 각 계면수 변화에 따른 강도평가를 실시하였다.

강도평가를 위한 정적압괴실험을 실시한 결과 하중-변위 선도와 변형과정을 얻을 수 있었다.

Fig. 3 ~ Fig. 7과 Photo. 4 ~ Photo. 8은 최외각층이 90° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

Fig. 8 ~ Fig. 12와 Photo. 9 ~ Photo. 13는 최외각층이 0° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 5mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

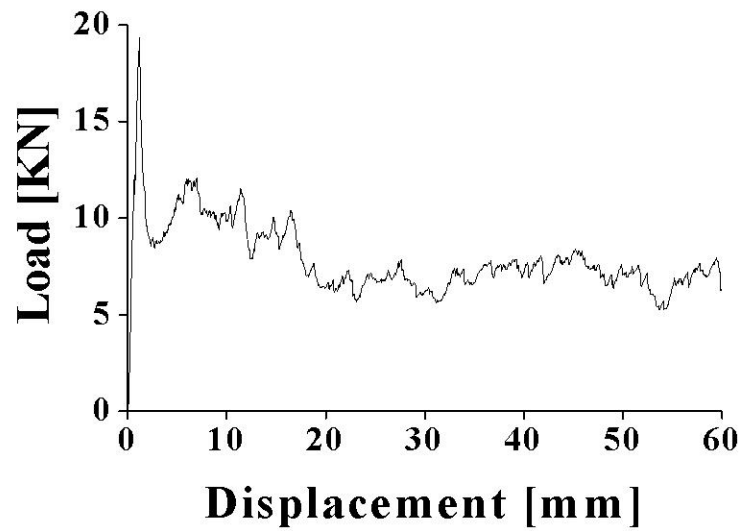


Fig. 3 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal, $[90_2 / 0_2]_s$

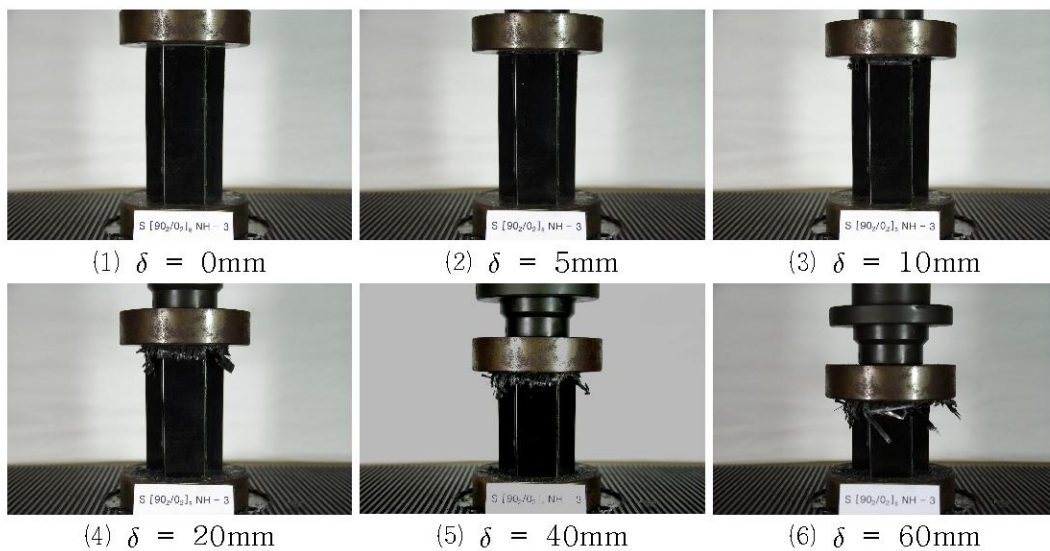


Photo. 4 Collapse processing of specimen, $[90_2 / 0_2]_s$

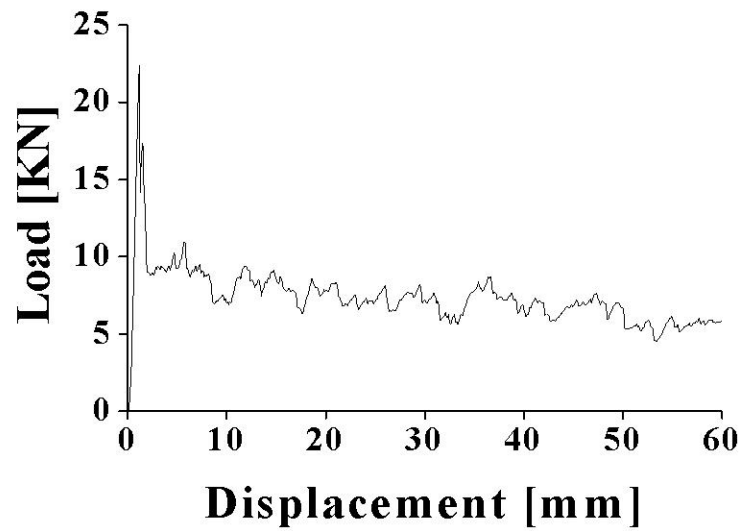


Fig. 4 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal, $[0_2 / 90_2]_2$

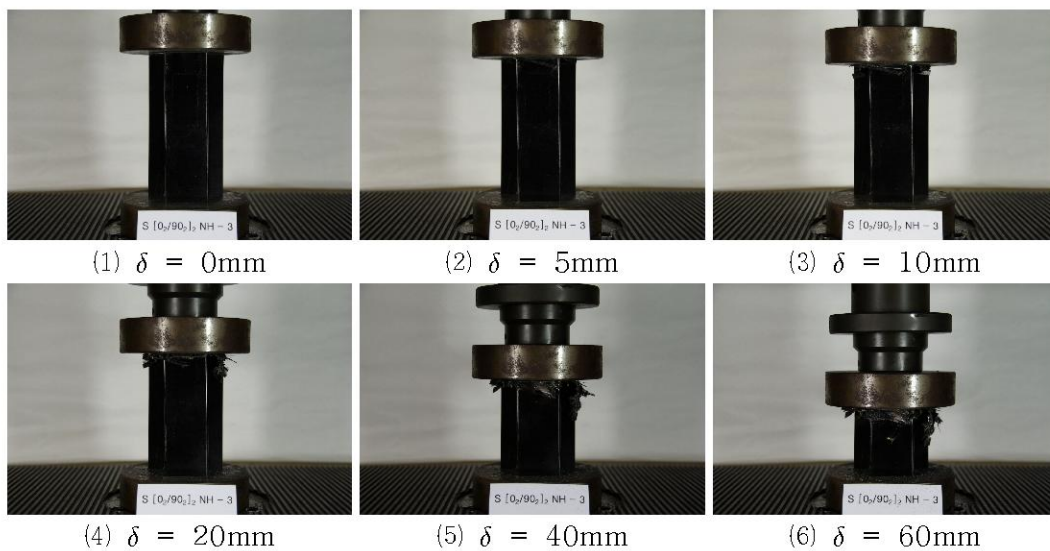


Photo. 5 Collapse processing of specimen non hygrothermal, $[0_2 / 90_2]_2$

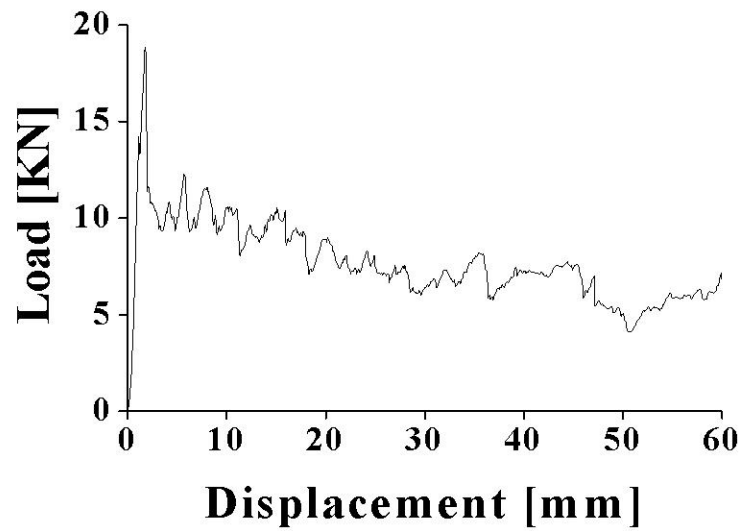


Fig. 5 Load-Displacement curve of specimen non hydrothermal, $[90 / 0]_{s2}$

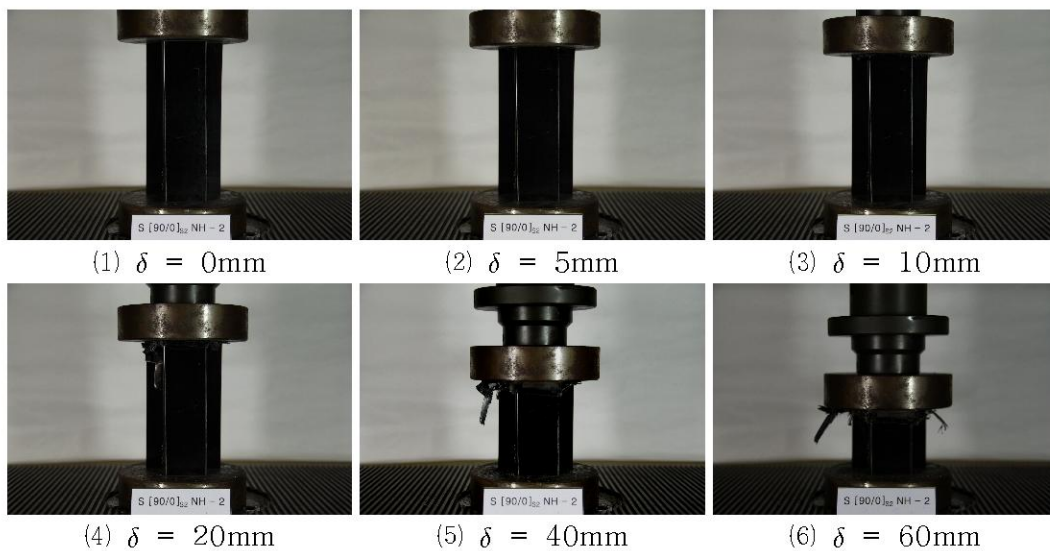


Photo. 6 Collapse processing of specimen non hydrothermal, $[90 / 0]_{s2}$

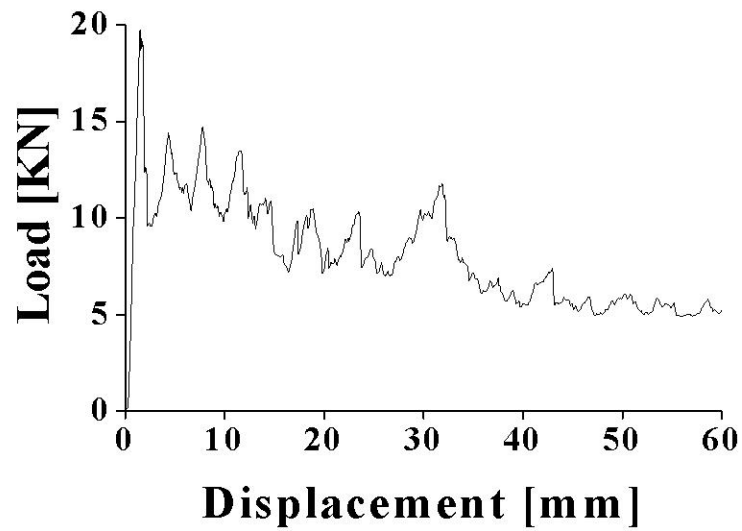


Fig. 6 Load-Displacement curve of specimen non hydrothermal, $[90 / 0]_{2s}$

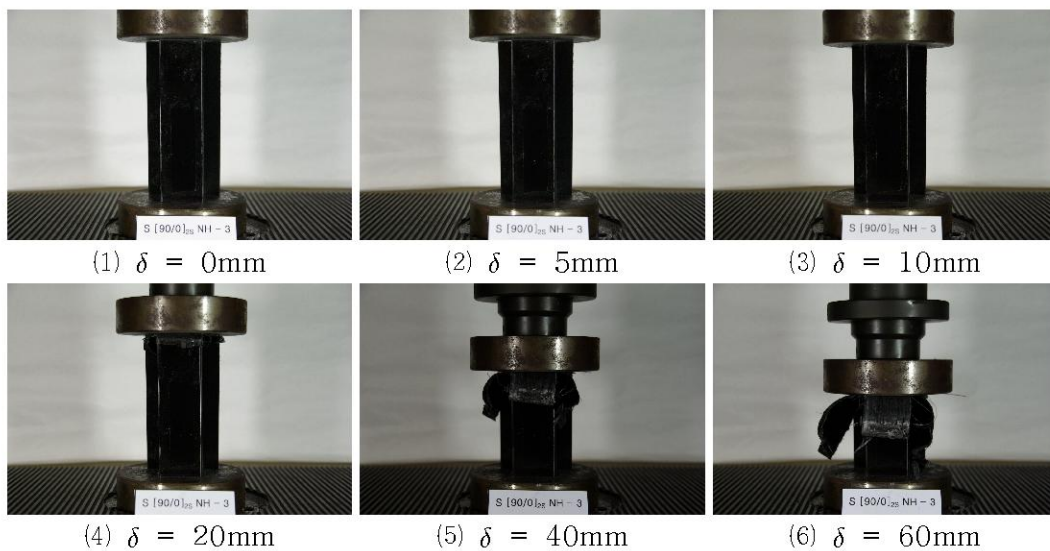


Photo. 7 Collapse processing of specimen non hydrothermal, $[90 / 0]_{2s}$

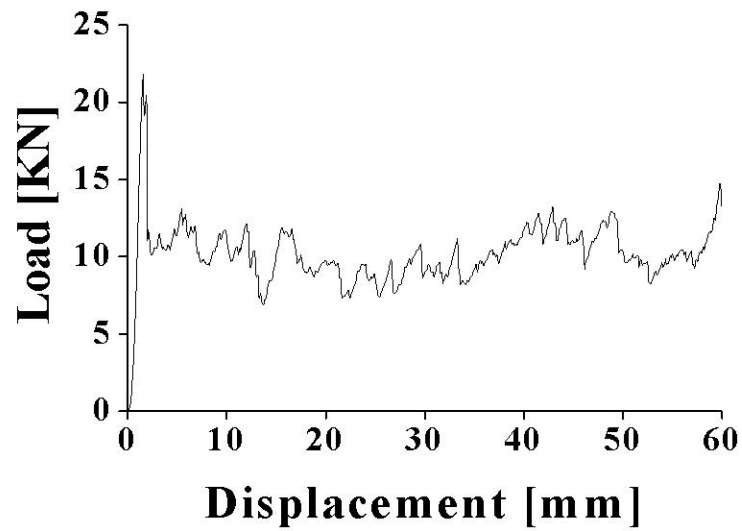


Fig. 7 Load-Displacement curve of specimen non hydrothermal, $[0 / 90]_4$

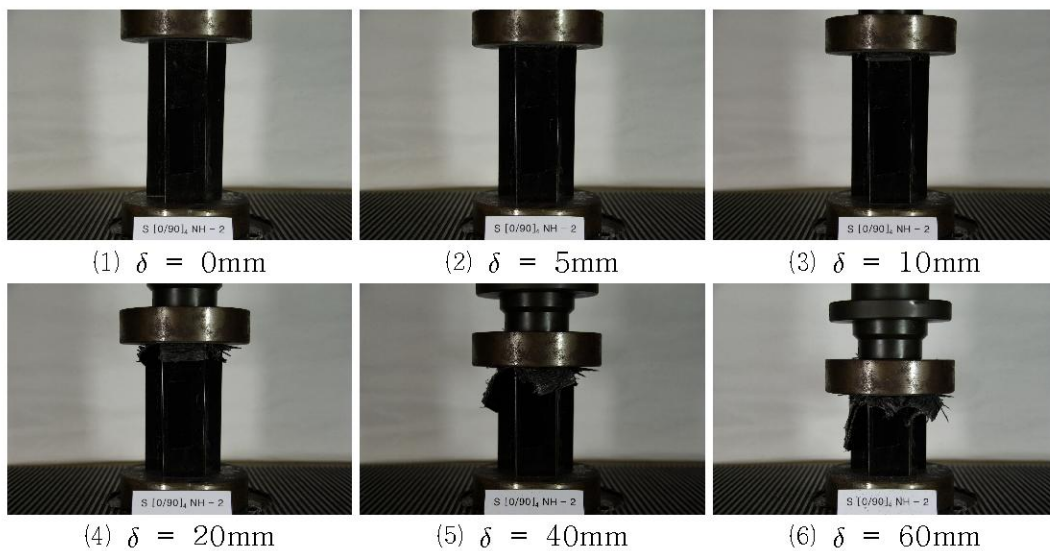


Photo. 8 Collapse processing of specimen non hydrothermal, $[0 / 90]_4$

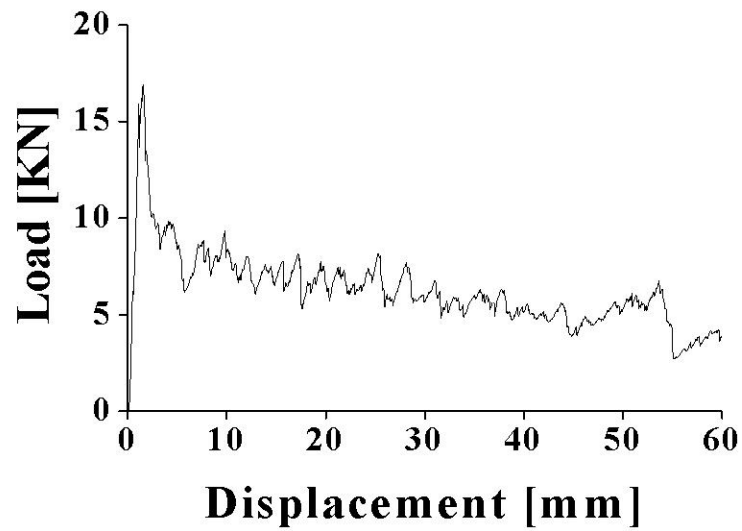


Fig. 8 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal, $[0_2 / 90_2]_s$

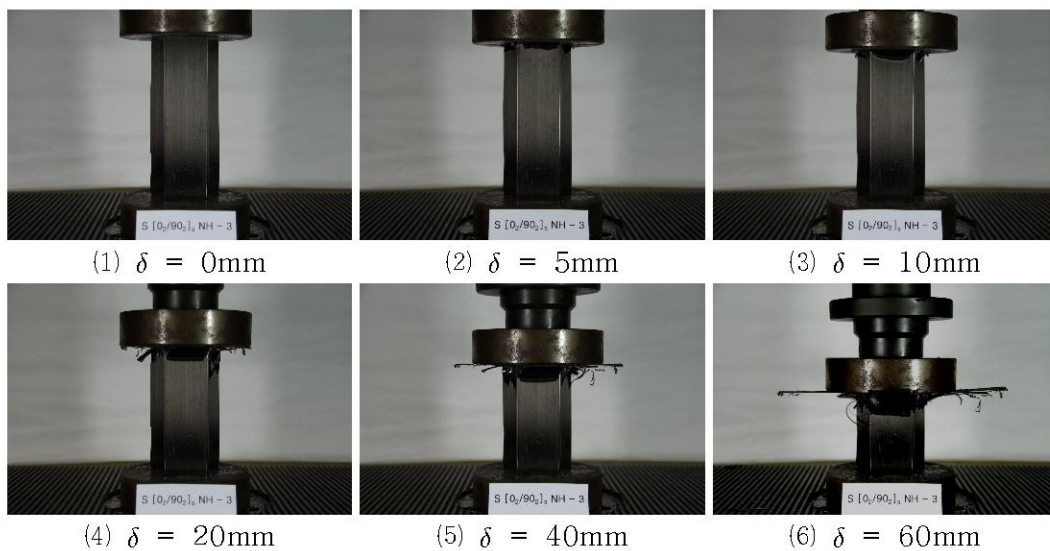


Photo. 9 Collapse processing of specimen non hygrothermal, $[0_2 / 90_2]_s$

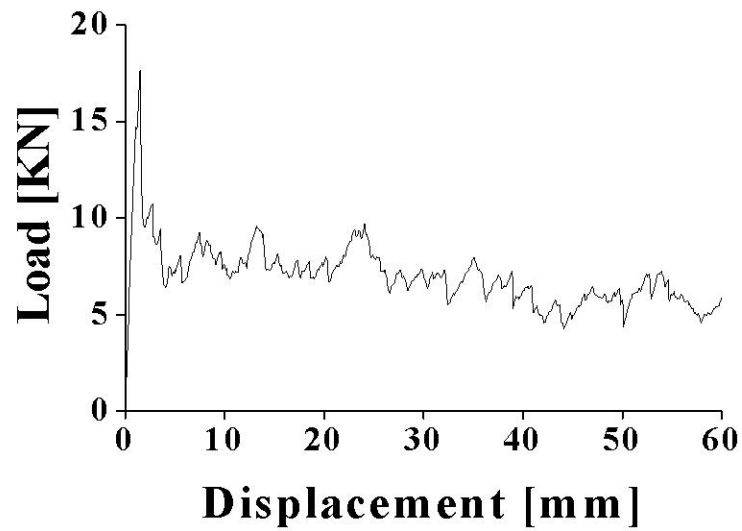


Fig. 9 Load-Displacement curve of specimen non hygrothermal, $[90_2 / 0_2]_2$

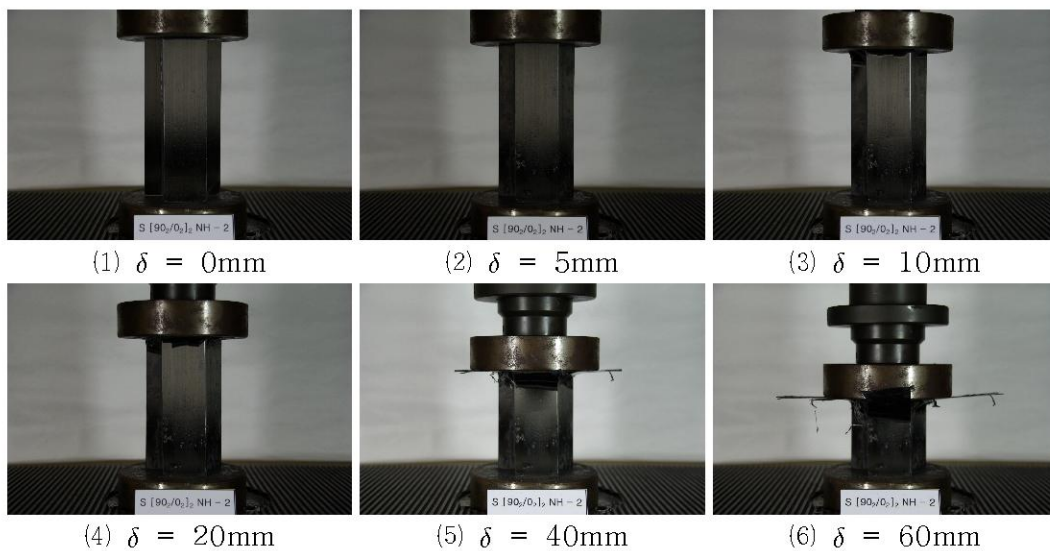


Photo. 10 Collapse processing of specimen non hygrothermal, $[90_2 / 0_2]_2$

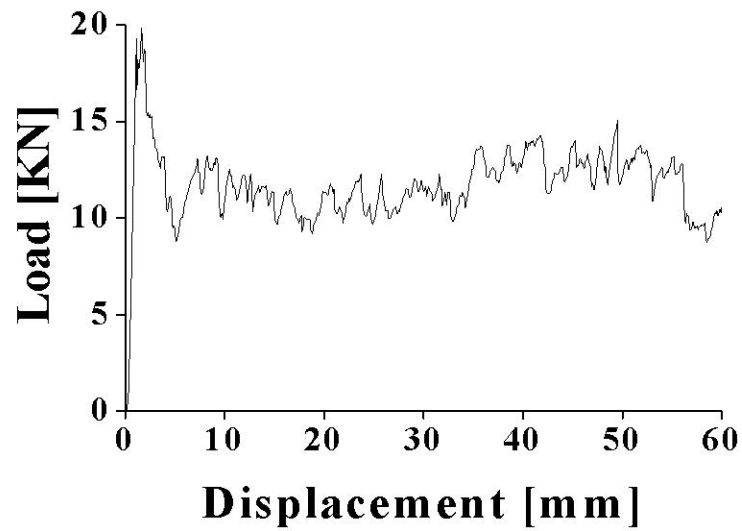


Fig. 10 Load-Displacement curve of specimen non hydrothermal, $[0 / 90]_{s2}$

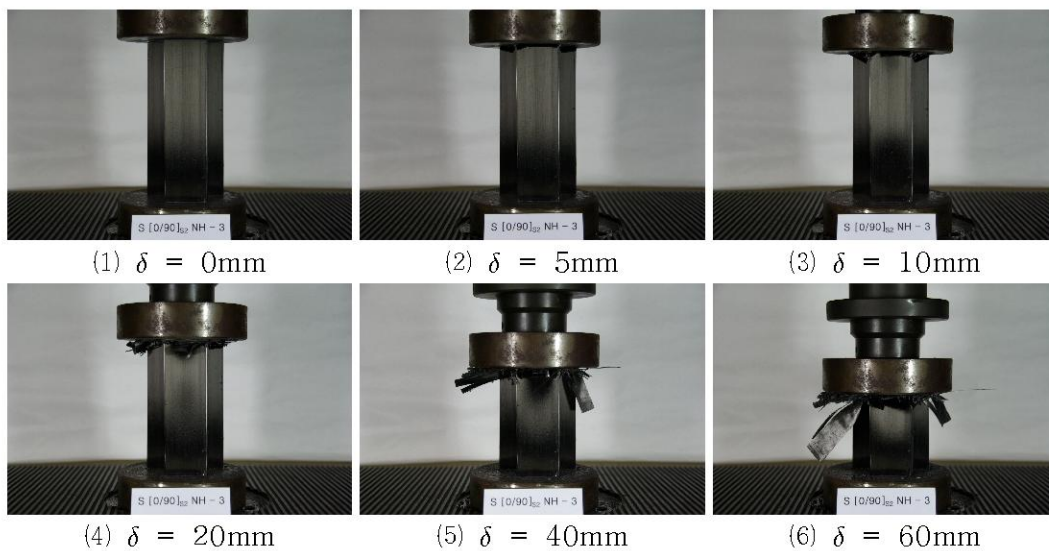


Photo. 11 Collapse processing of specimen non hydrothermal, $[0 / 90]_{s2}$

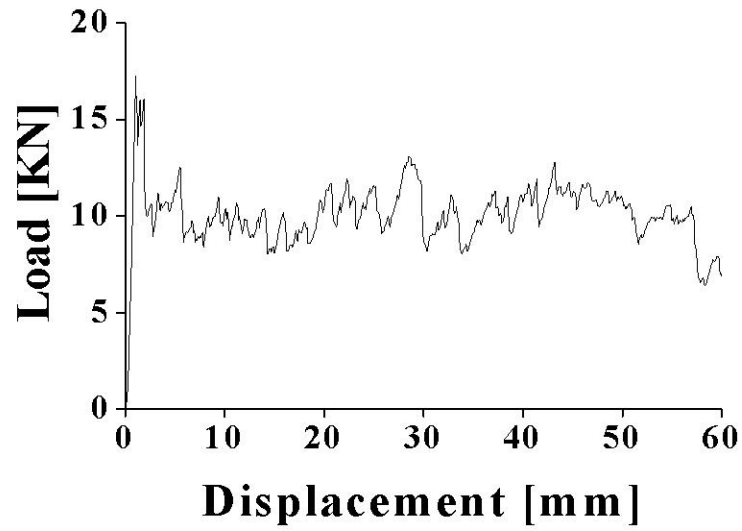


Fig. 11 Load-Displacement curve of specimen non hydrothermal, $[0 / 90]_{2s}$

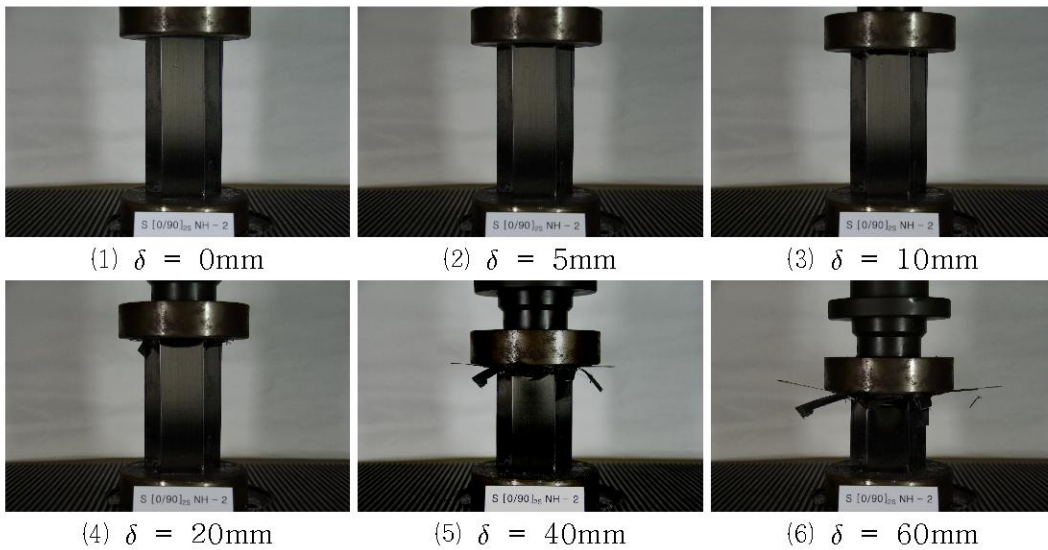


Photo. 12 Collapse processing of specimen non hydrothermal, $[0 / 90]_{2s}$

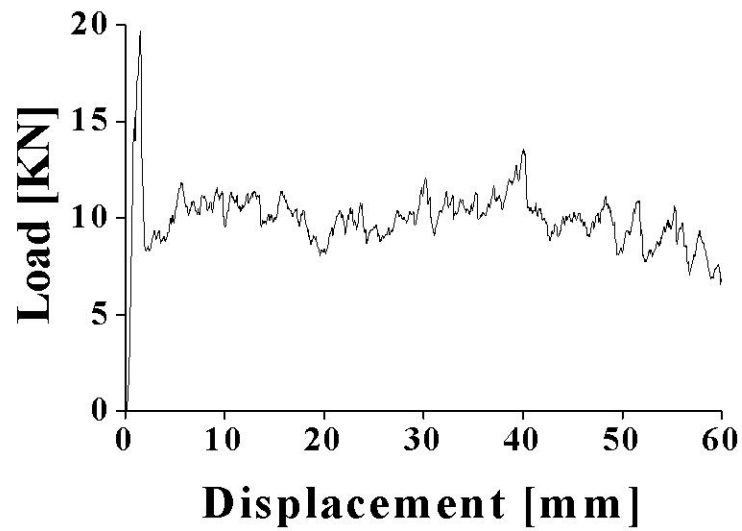


Fig. 12 Load-Displacement curve of specimen non hydrothermal, $[90 / 0]_4$

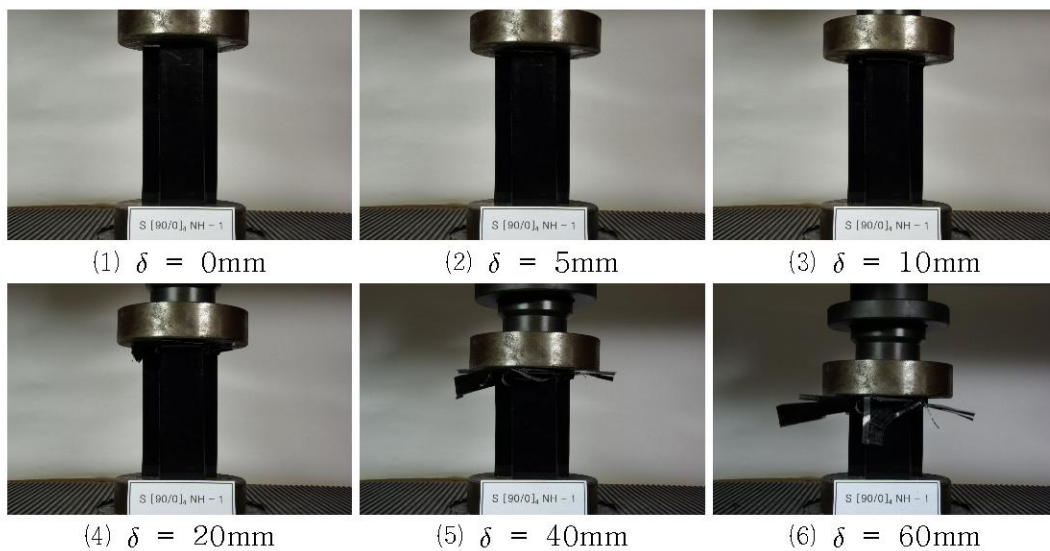


Photo. 13 Collapse processing of specimen non hydrothermal, $[90 / 0]_4$

제 2 절 수분이 흡수된 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험

다음은 수분이 흡수된 시험편에 대하여 최외각층 90° 와 0° 에 따라 각 계면수 변화에 따른 강도평가를 실시하였다.

강도평가를 위한 정적압괴실험을 실시한 결과 하중-변위 선도와 변형과정을 얻을 수 있었다.

Fig. 13 ~ Fig. 17과 Photo. 14 ~ Photo. 18은 최외각층이 90° 인 2, 3, 4, 6, 7 계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

Fig. 18 ~ Fig. 22과 Photo. 19 ~ Photo. 23은 최외각층이 0° 인 2, 3, 4, 6, 7 계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

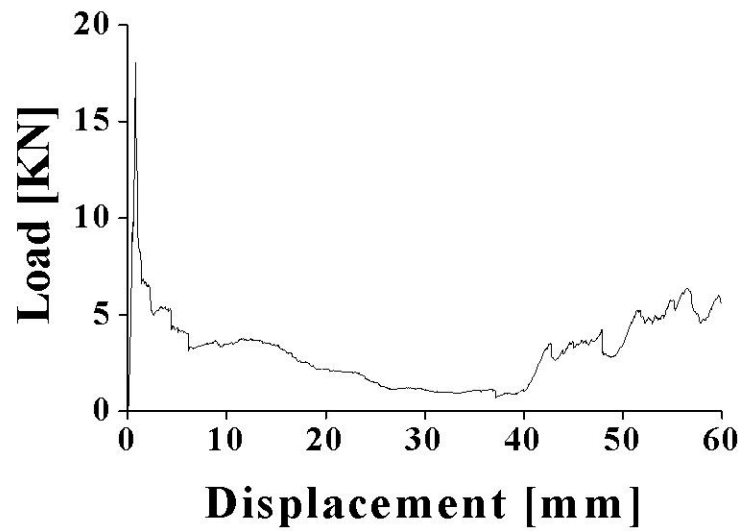


Fig. 13 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[90_2 / 0_2]_s$

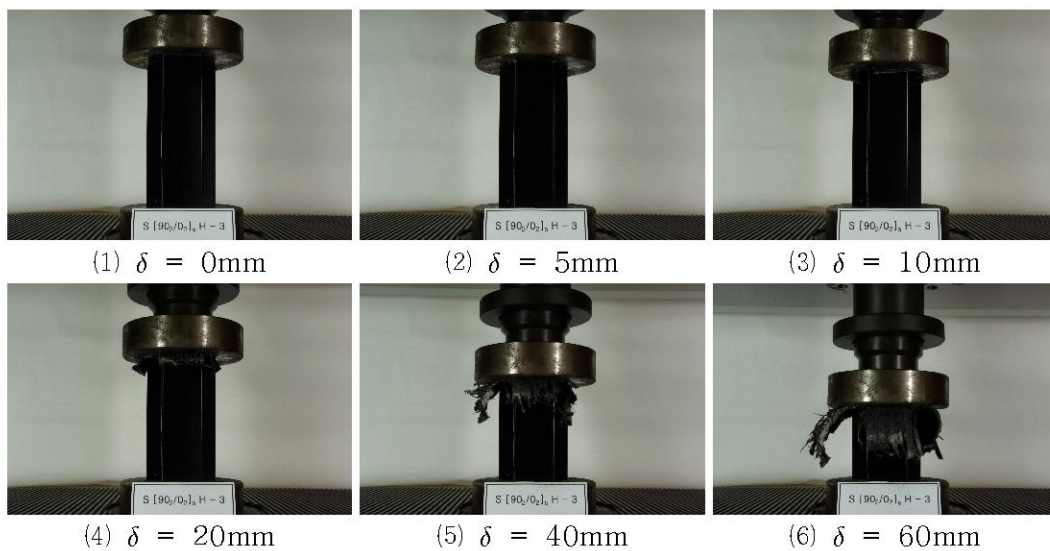


Photo. 14 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[90_2 / 0_2]_s$

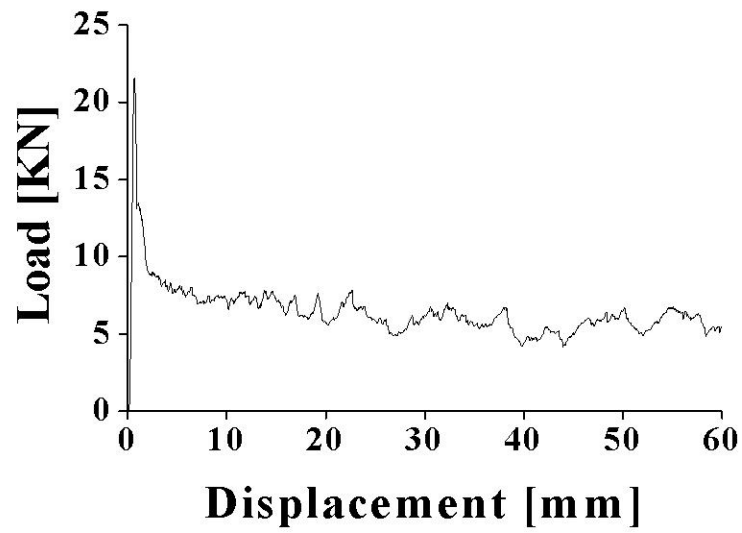


Fig. 14 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[0_2 / 90_2]_2$

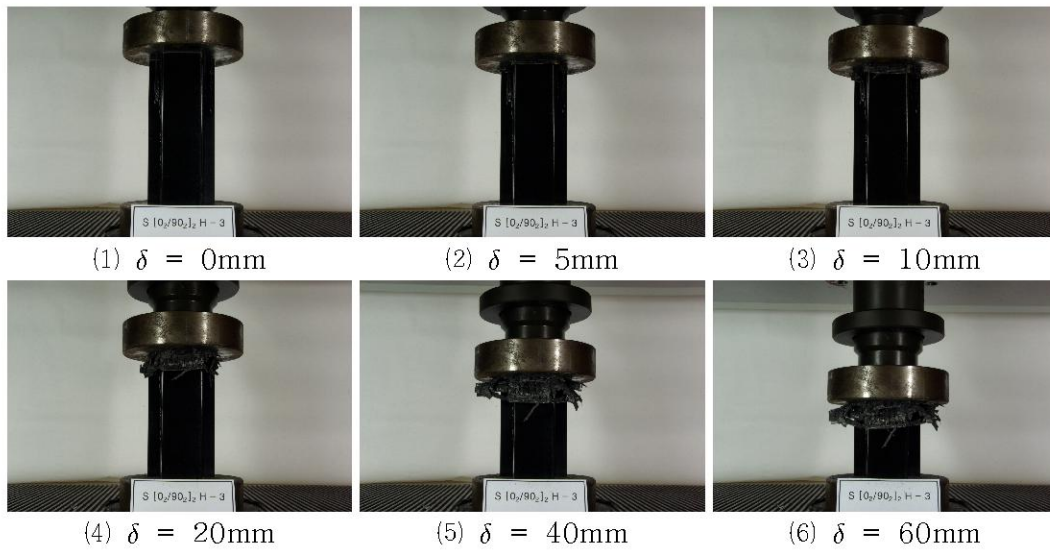


Photo. 15 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[0_2 / 90_2]_2$

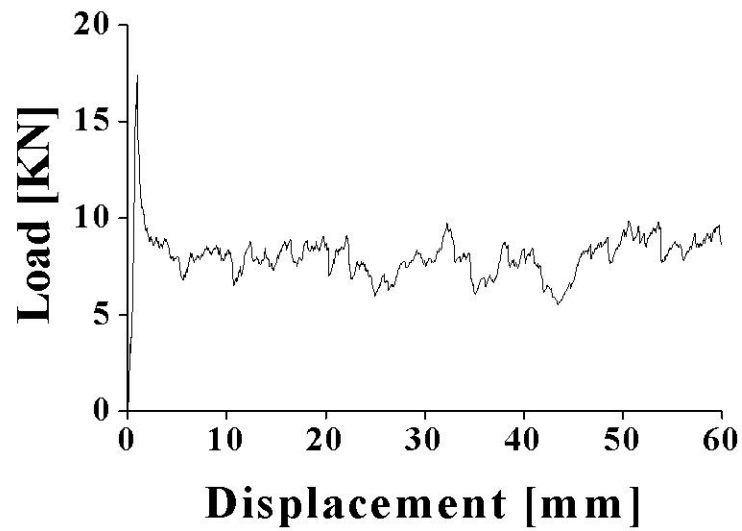


Fig. 15 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[90 / 0]_{s2}$

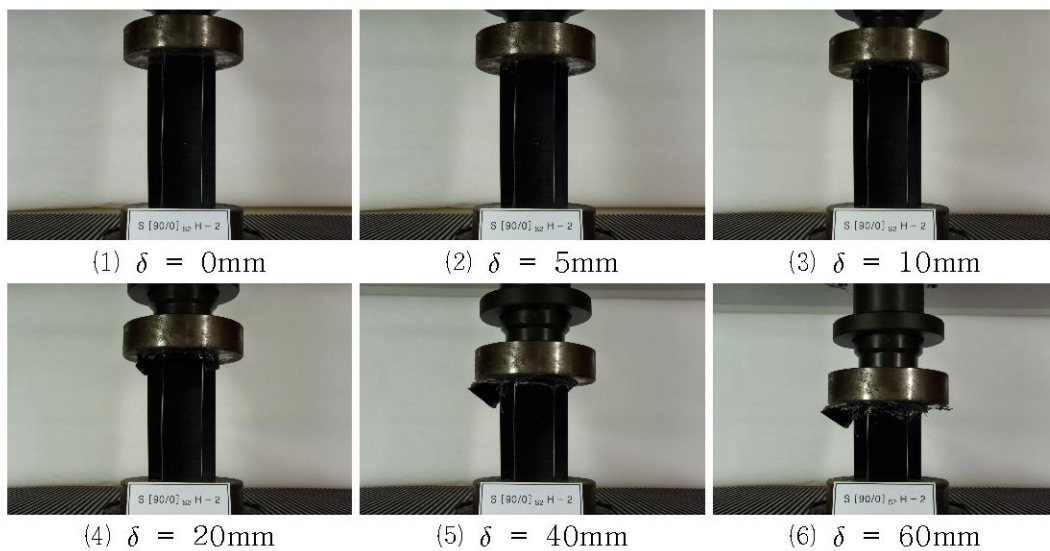


Photo. 16 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[90 / 0]_{s2}$

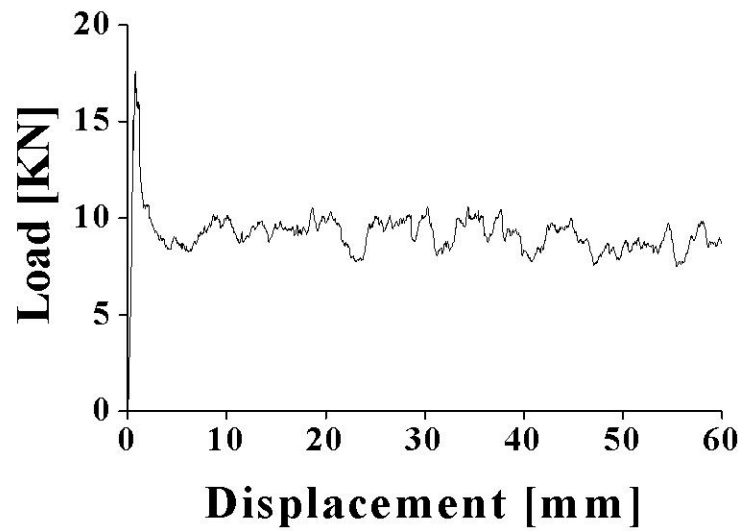


Fig. 16 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[90 / 0]_{2s}$

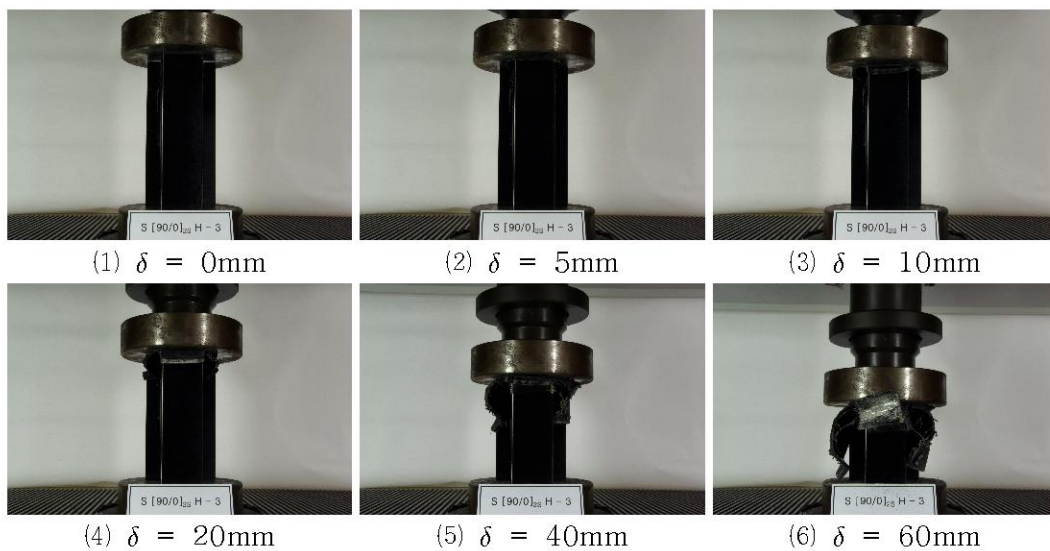


Photo. 17 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[90 / 0]_{2s}$

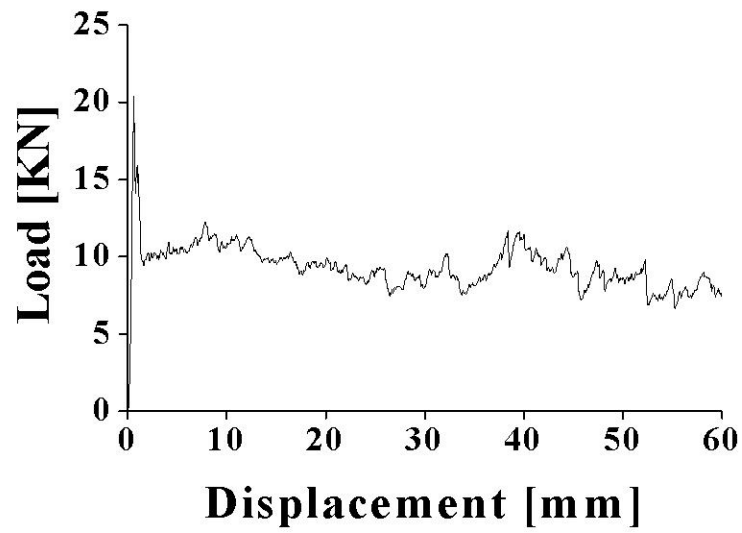


Fig. 17 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[0 / 90]_4$

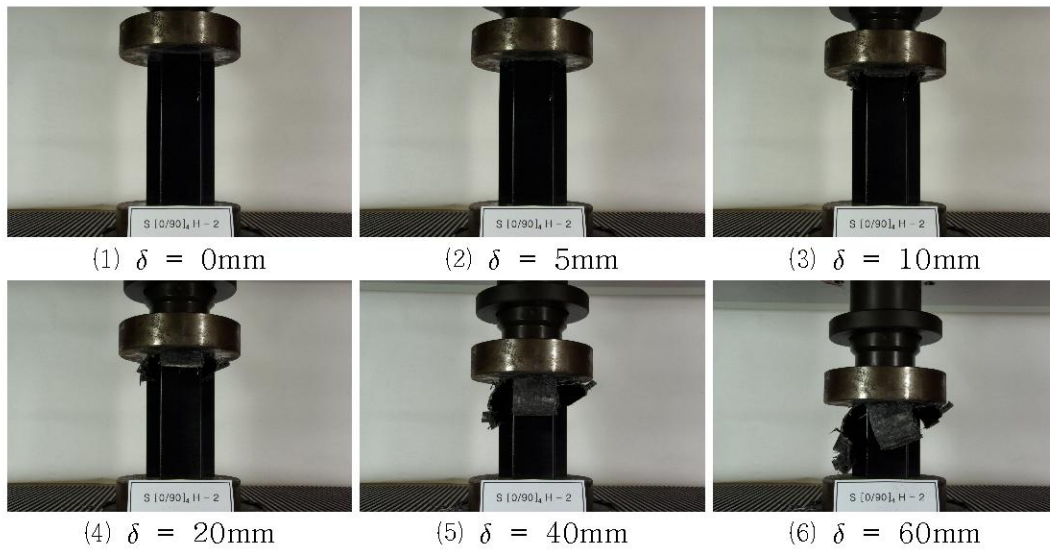


Photo. 18 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[0 / 90]_4$

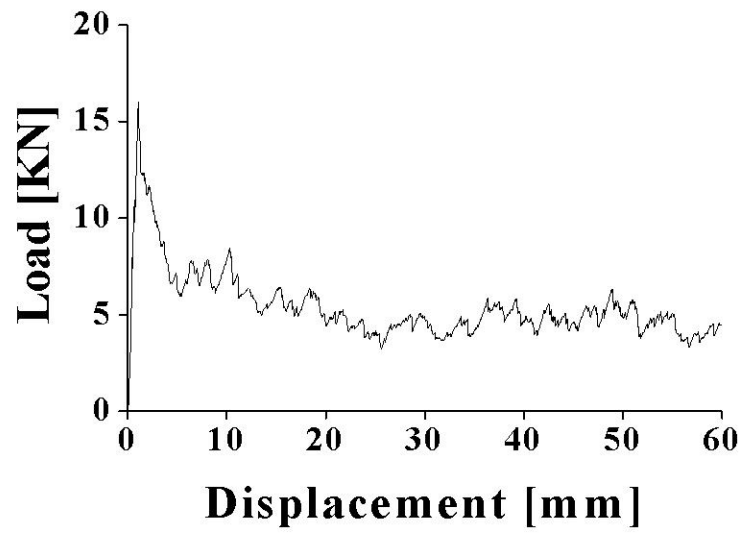


Fig. 18 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[0_2 / 90_2]_s$

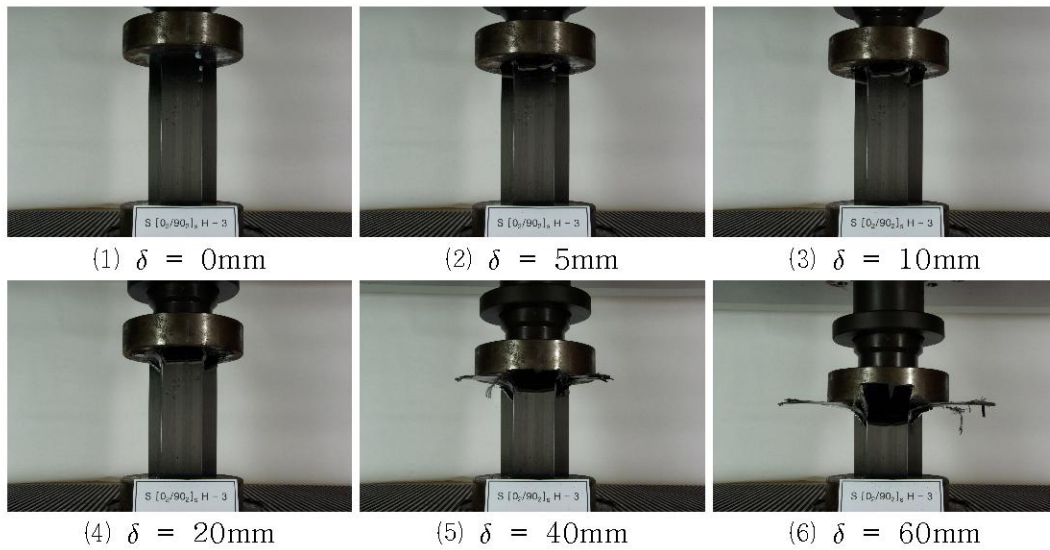


Photo. 19 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[0_2 / 90_2]_s$

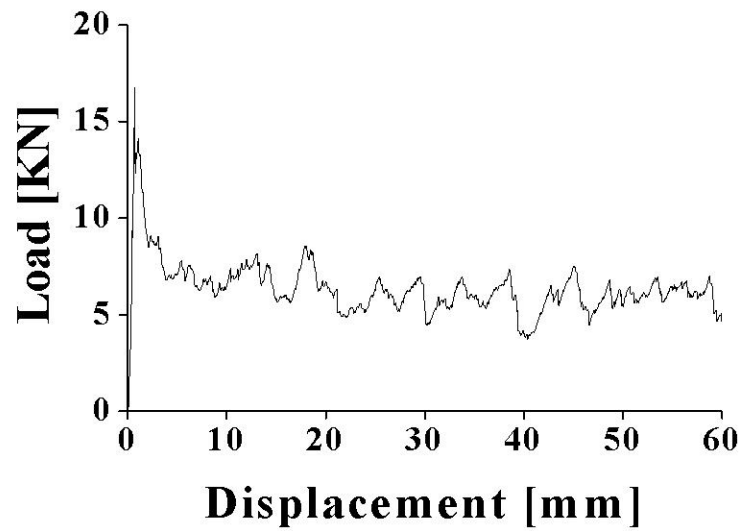


Fig. 19 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[90_2 / 0_2]_2$

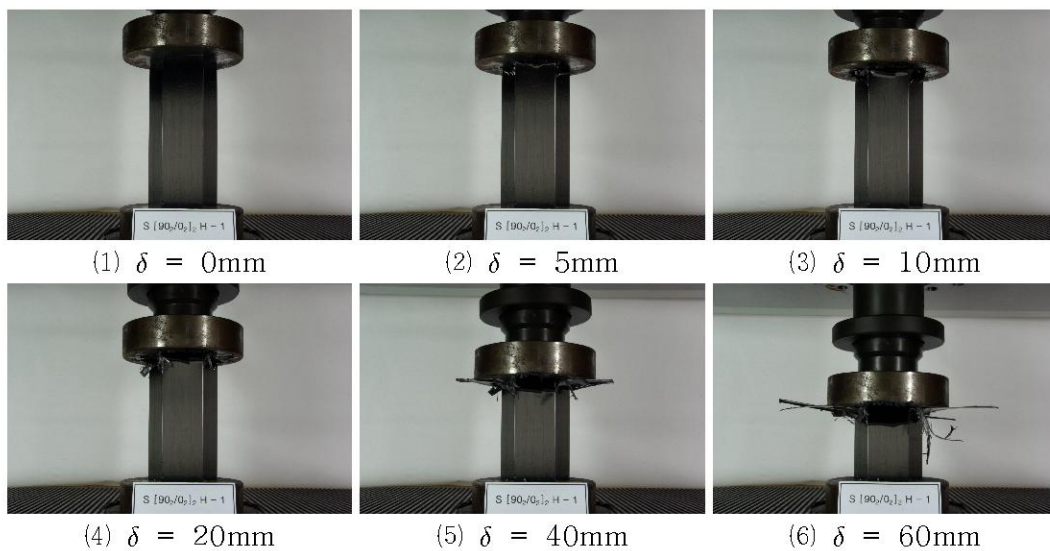


Photo. 20 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[90_2 / 0_2]_2$

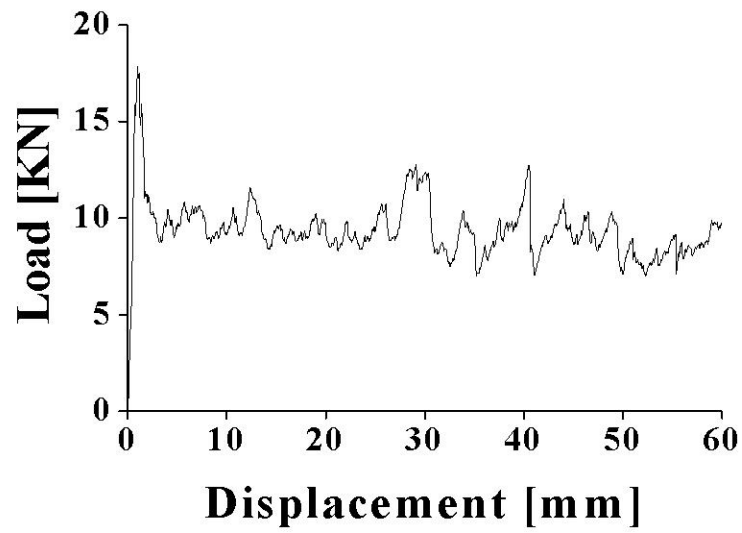


Fig. 20 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[0 / 90]_{s2}$

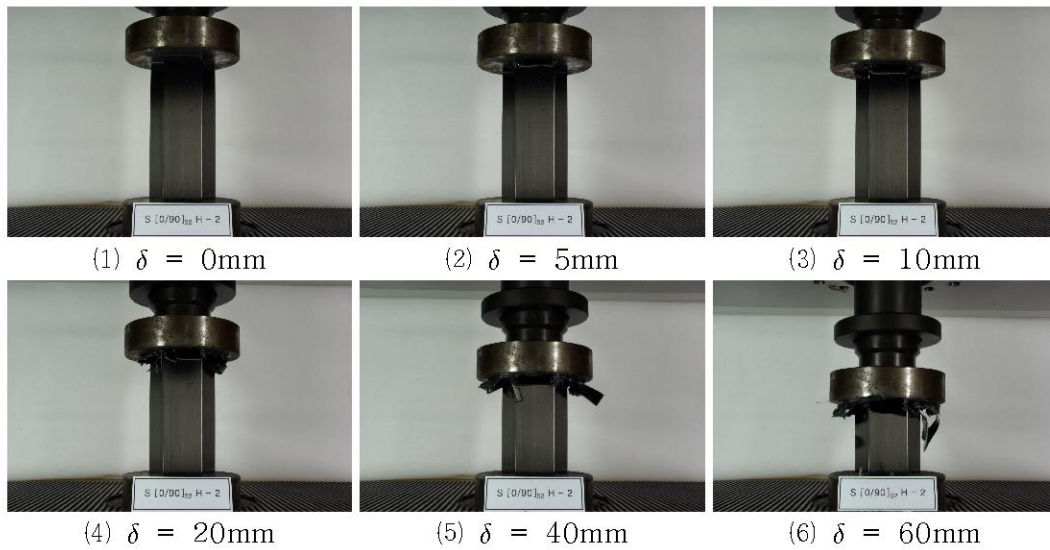


Photo. 21 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[0 / 90]_{s2}$

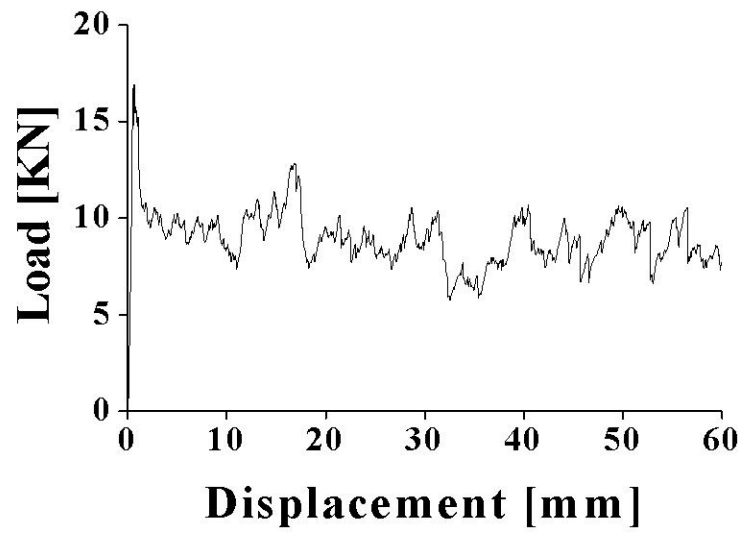


Fig. 21 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[0 / 90]_{2s}$

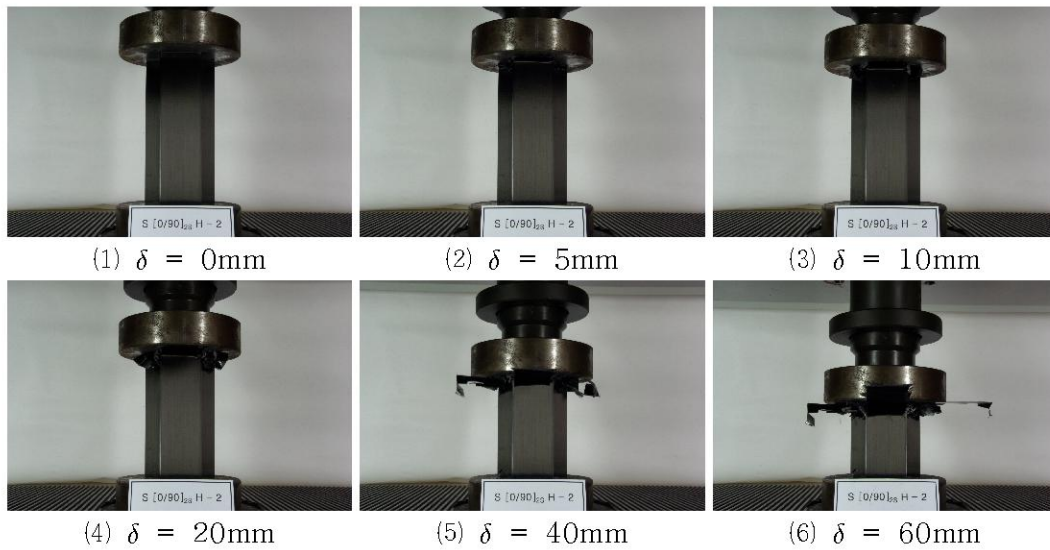


Photo. 22 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[0 / 90]_{2s}$

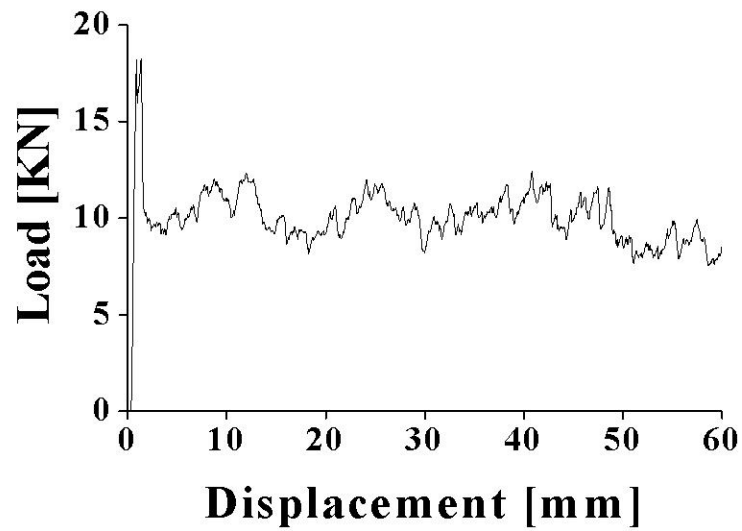


Fig. 22 Load-Displacement curve of specimen hydrothermal, $[90 / 0]_4$

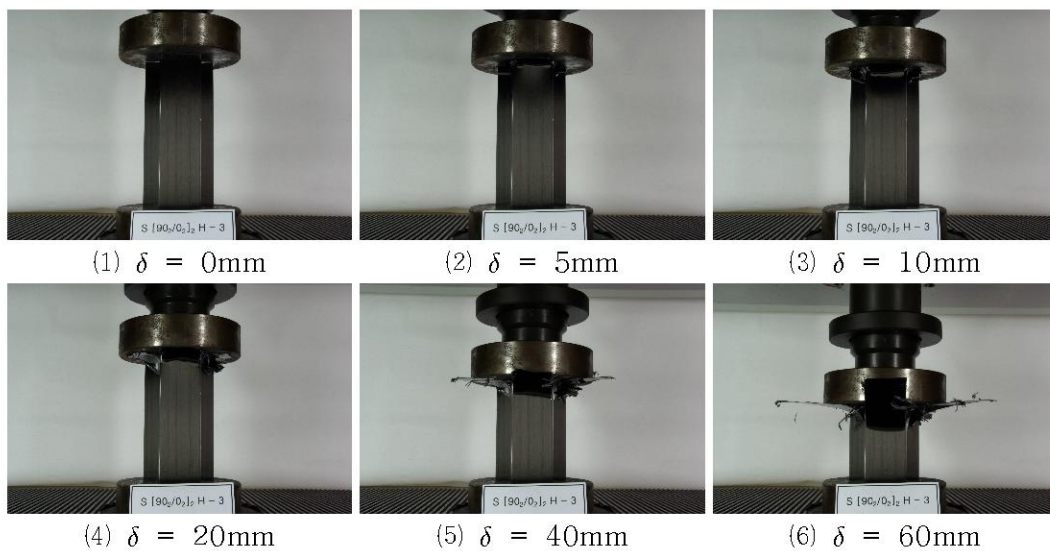


Photo. 23 Collapse processing of specimen hydrothermal, $[90 / 0]_4$

제 5 장 결과 및 고찰

제 1 절 수분 흡습거동 평가

시간의 변화에 따른 시험편의 수분 흡습률은 모든 시험편에서 초기에 흡습 증가량이 매우 높은걸 알 수 있었다. 하지만 약 400시간이 경과되는 흡습률 1.0%에 가까워지는 시점에서는 점차 수분의 흡습률 곡선은 완만한 증가를 보였고, 결국에는 시험편 내부에 수분이 포화상태가 됨으로써 수분 흡습률 또한 평행상태를 이루는걸 알 수 있었다.

흡습실험 결과 수분의 흡수는 시험편의 단면 부분에서는 0° 의 적층배향을 갖는 계면에서 수분의 흡수가 발생하고 플렌지 부분에서는 섬유배향이 90° 로 적층된 계면으로 수분이 흡수가 되는걸 알 수 있었다.

각각의 시험편 내부에 수분의 포화상태가 되는 시점에서 수분의 흡습률을 측정한 결과 최외각층 90° 를 갖는 시험편에서는 2계면의 적층구성을 갖는 시험편에서 시험편 내부에 흡수된 흡습률의 증가치가 매우 큼을 알 수 있었다.

이는 최외각층 90° 를 갖는 2계면 시험편의 경우 수분이 흡수가 되는 0° 방향의 섬유배향이 단면 부분에서는 가운데 4ply로 적층이 이루어져있고 플렌지 부분에서는 최외각으로 2ply씩 적층이 구성되어 있기 때문에 그 흡습률 또한 다른 시험편들에 비해 상대적으로 높은 것으로 사료가 된다.

또한 최외각층 0° 인 시험편의 경우는 3계면과 7계면의 경우에 흡습률이 매우 높음을 알 수 있었다. 특히 최외각층 0° 를 갖는 3계면의 시험편은 시험편들 중에서 흡습률이 가장 높음을 알 수 있었다.

이는 최외각층 90° 를 갖는 2계면 시험편 보다 더 높은 수치로써, 단면부분에는 0° 가 플렌지 부분에서는 90° 의 적층 계면이 최외각층에 밀집됨으로써 수분의 흡수가 가장 유리하였다고 판단할 수 있었다.

흡습실험결과 수분의 흡습은 수분이 흡습될 수 있는 0° 의 적층배향을 갖는 계면에서 그 수분의 흡습이 발생하였고, 수분이 흡수되는 계면의 두께가 두꺼울수록,

시험편의 표면층에서 가까울수록 그 흡습의 증가가 큰 것을 알 수 있었다.

CFRP 모자형 단면부재 시험편의 수분 함유량이 포화상태가 되기까지의 시간은 대략 2500시간이 경과가 되었고, 그 후 시험편의 수분 흡습률은 평행 상태를 유지하는 것을 알 수가 있었다.

시간의 경과에 따른 수분 흡습률의 변화를 최외각층의 변화에 대해 다음의 Fig. 23 ~ Fig. 27에 나타내었으며, 흡습실험이 종료된 후 각각의 시험편의 수분 흡습률을 Table 5에 나타내었다. 계면수의 변화와 최외각층의 변화에 대해 Fig. 28은 최외각층이 90° 인 경우의 수분 흡습률을 나타낸 것이고, Fig. 29는 최외각층이 0° 인 경우의 수분 흡습률을 나타내고 있다.

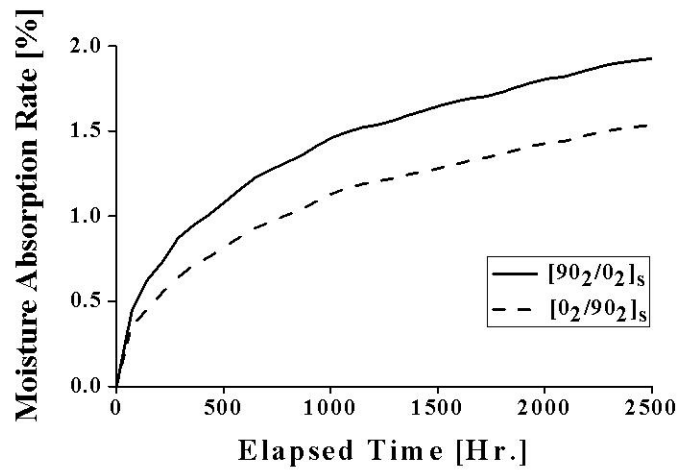


Fig. 23 Moisture Absorption Rate of the 2 Interface Specimen

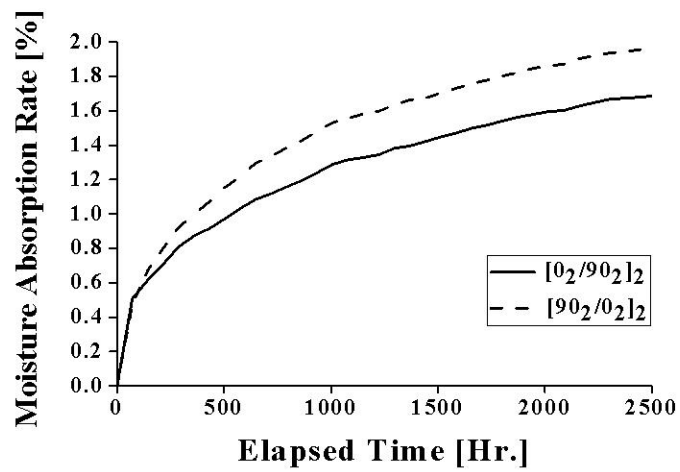


Fig. 24 Moisture Absorption Rate of the 3 Interface Specimen

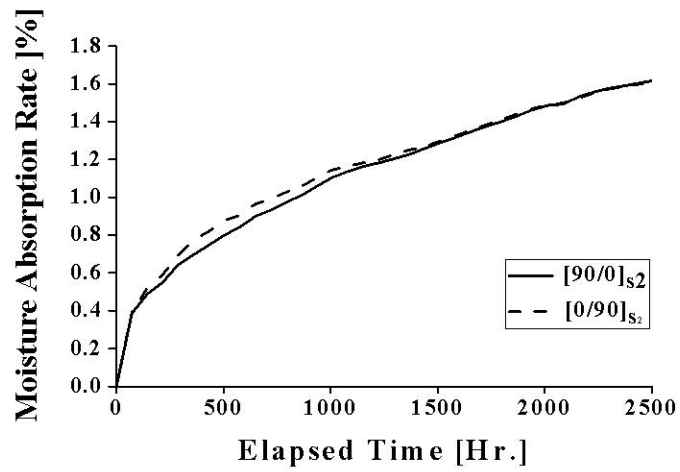


Fig. 25 Moisture Absorption Rate of the 4 Interface Specimen

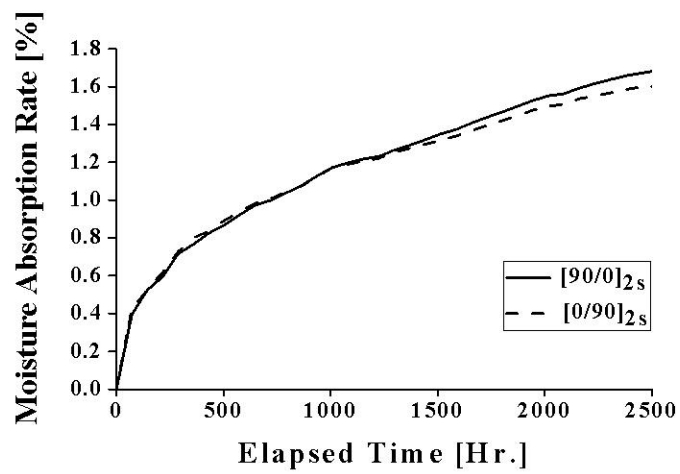


Fig. 26 Moisture Absorption Rate of the 6 Interface Specimen

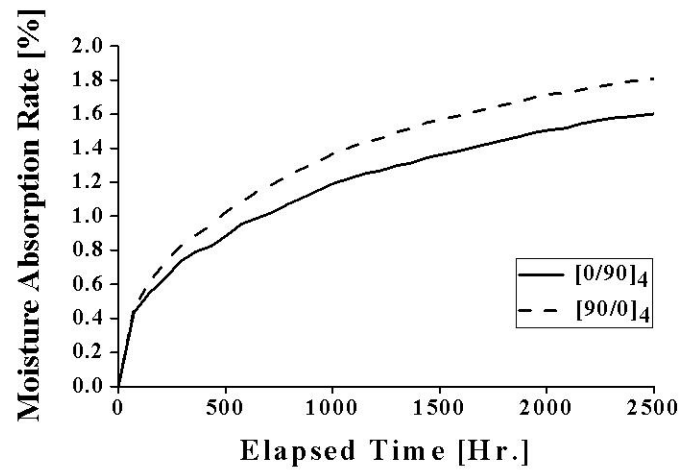


Fig. 27 Moisture Absorption Rate of the 7 Interface Specimen

Table 5 Hygrothermal experiment test results of specimen

Specimen			Hygrothermal	Specimen			Hygrothermal
Interface	No.	outer angle	Absorption rate [%]	Interface	No.	outer angle	Absorption rate [%]
[90 ₂ / 0 ₂] _s	1	90°	2.216	[0 ₂ / 90 ₂] _s	1	0°	1.580
	2		2.233		2		1.541
	3		2.125		3		1.575
[0 ₂ / 90 ₂] ₂	1		1.563	[90 ₂ / 0 ₂] ₂	1		2.088
	2		1.603		2		2.119
	3		1.573		3		2.152
[90 / 0] _{s2}	1		1.678	[0 / 90] _{s2}	1		1.602
	2		1.662		2		1.654
	3		1.646		3		1.643
[90 / 0] _{2s}	1		1.713	[0 / 90] _{2s}	1		1.634
	2		1.738		2		1.692
	3		1.786		3		1.658
[0 / 90] ₄	1	1.676	[90 / 0] ₄	1	1.870		
	2	1.583		2	1.876		
	3	1.597		3	1.865		

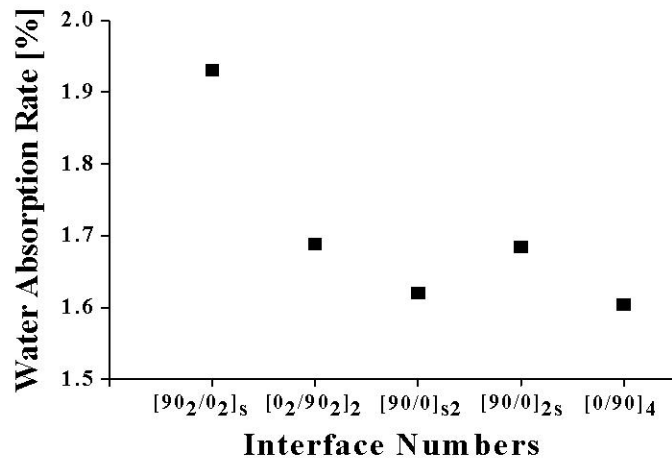


Fig. 28 Water absorption rate according to variation interface numbers (outer angle 90°)

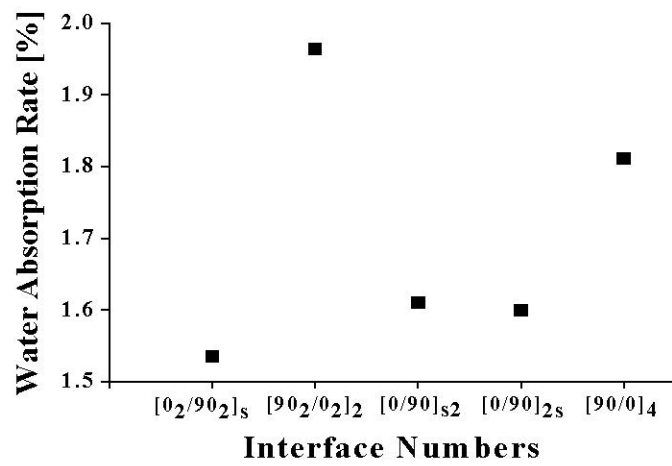


Fig. 29 Water absorption rate according to variation interface numbers (outer angle 0°)

제 2 절 압괴형상 비교

흡습실험을 통해 수분에 노출된 시험편과 노출되지 않았던 시험편들에 대해 정적압괴실험을 실시한 후 다음과 같은 압괴모드를 관찰할 수 있었다.

수분에 노출되지 않았던 시험편과 수분에 노출되었던 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 모드를 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 0° 인 경우 최외층 플라이 섬유의 확장으로 인한 확장형 스플라인 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.^{40~42)} 하지만 수분의 흡수로 인해 탄소강화섬유와 에폭시 간의 결합력의 약화로 섬유와 층간 파괴보다는 굽힘이 주를 이루는걸 알 수 있었고, 더 나아가 최외각층 90° 의 경우에는 최외층 섬유가 횡방향으로 접히는 압괴모드를 관찰할 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 압괴 시 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 동일한 취성파괴를 관찰할 수 있었지만 점차 파괴 보다는 굽힘이 주를 이루면서 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압괴가 진행됨을 알 수 있었다.

정적압괴실험을 실시한 결과 다음과 같은 압괴형상을 얻을 수 있었다.

Photo. 24, Photo. 25는 최외각층이 90° 인 시험편의 수분흡수 여부에 따른 압괴형상을 나타낸 사진이며, Photo. 26과 Photo. 27은 최외각층이 0° 인 시험편의 수분흡수 여부에 따른 압괴형상을 나타낸 사진이다.

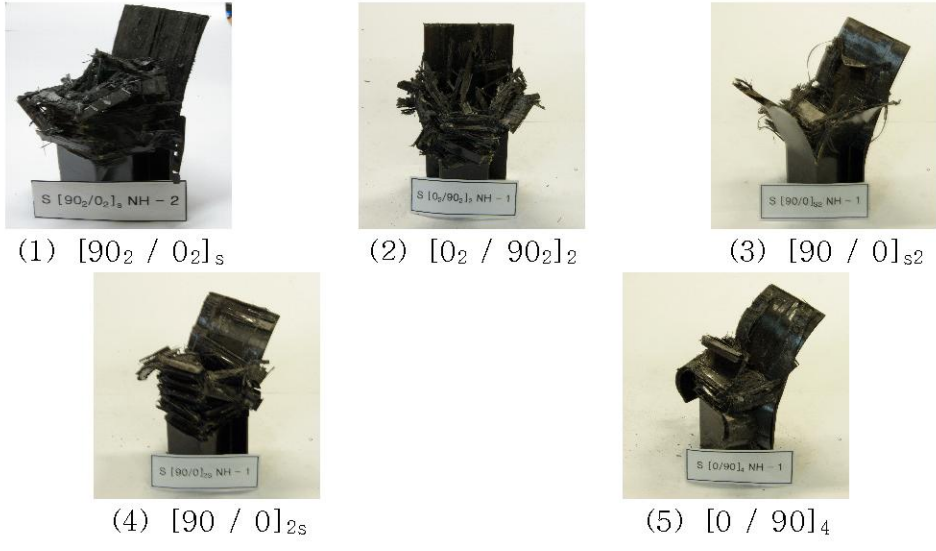


Photo. 24 Shape of collapsed specimen (Non hydrothermal, outer angle 90°)

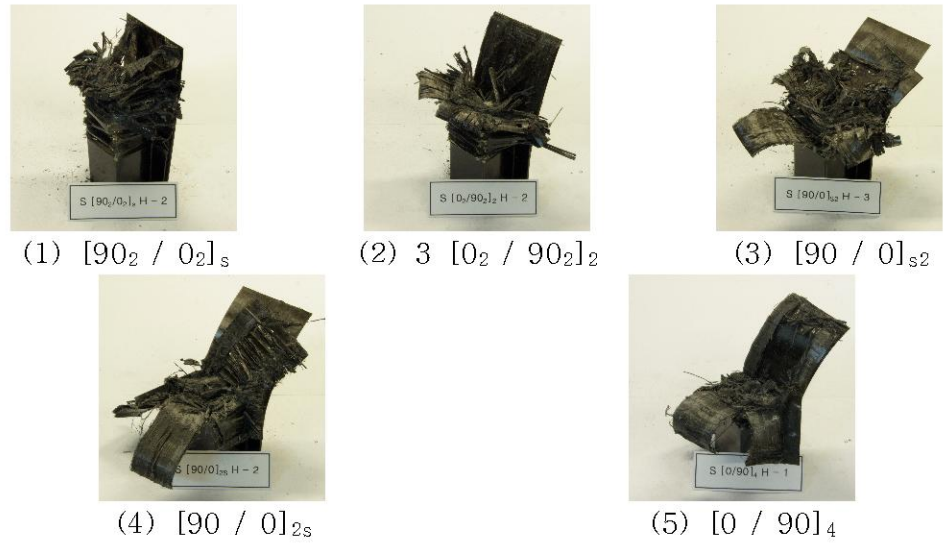


Photo. 25 Shape of collapsed specimen (hydrothermal, outer angle 90°)



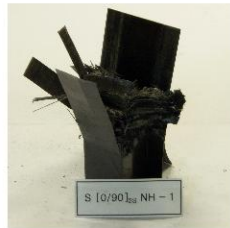
(1) $[0_2 / 90_2]_s$



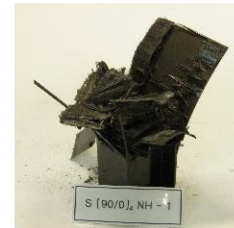
(2) $[90_2 / 0_2]_2$



(3) $[0 / 90]_{s2}$



(4) $[0 / 90]_{2s}$



(5) $[90 / 0]_4$

Photo. 26 Shape of collapsed specimen (Non hygrothermal, outer angle 0°)



(1) $[0_2 / 90_2]_s$



(2) $[90_2 / 0_2]_2$



(3) $[0 / 90]_{s2}$



(4) $[0 / 90]_{2s}$



(5) $[90 / 0]_4$

Photo. 27 Shape of collapsed specimen (hygrothermal, outer angle 0°)

제 3 절 고온 · 고습 환경 하에서의 강도평가

수분의 침투로 인한 CFRP 박육부재의 강도저하를 알아보기 위해 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않았던 시험편에 대해 압괴실험을 실시한 결과 최외각m층의 변화에 따른 계면간의 최대하중, 평균하중, 흡수에너지 그래프를 얻을 수 있었다.

Fig. 30 ~ Fig. 39는 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 수분이 흡수된 시험편들 중 최외각층 90° 와 0° 를 갖는 시험편의 하중-변위선도를 나타낸 그래프이다.

수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않았던 시험편의 하중-변위선도를 비교해보면 최대하중에서는 수분이 흡수된 시험편들에서 그 감소가 나타나는걸 알 수 있었다. 하지만 최대하중 이후의 압괴에서는 수분이 흡수되지 않았던 시험편의 압괴보다 안정적인 압괴가 진행됨을 알 수 있었다.

정적압괴실험을 실시한 결과 수분이 흡수된 시험편의 최대하중의 감소는 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 비교해서 약 5% 내외로써 수분의 침투로 인하여 최대하중의 감소를 알 수 있었다.

Fig. 40 ~ Fig. 49는 최외각층 90° 와 0° 를 갖는 시험편의 변위-흡수에너지 선도를 나타낸 그래프이다.

수분의 흡수 여부에 따라서 최외각층 90° , 0° 에 대한 각각의 계면수 변화에 따른 강도평가를 수행하기 위하여 최대하중과 평균하중, 흡수에너지를 다음의 Fig. 50 ~ Fig. 55의 그래프에 나타내었다.

Fig. 50과 Fig. 51은 최대 압괴하중을 나타낸 그래프이고, Fig. 52와 Fig. 53은 평균 압괴하중을 나타낸 그래프이다.

Fig. 54와 Fig. 55는 흡수에너지를 나타낸 그래프로써 수분의 흡수로 인하여 각 계면간의 흡수에너지의 변화를 나타낸 그래프이다.

수분의 침투로 인하여 최대하중에서는 약 5%의 감소가 있었던 것에 비해 평균하중에서는 그 감소가 약 12% 정도로 저하되었으며, 최외각층 90° 를 갖는 2계면의 시험편에서는 수분의 흡수로 인해 평균하중과 흡수에너지는 약 20%까지 감소

가 되는걸 알 수 있었다.

시험편의 압괴 특성으로는 수분이 흡수되지 않았던 시험편의 경우 계면수가 증가함에 따라 평균압괴하중과 흡수에너지는 점차 증가하다 감소가 되는걸 알 수 있었다. 최외각층 90° 인 시험편의 경우 계면수가 6계면을 지나는 7계면 시험편 부터는 그 강도가 감소되는 경향을 보였고, 최외각층이 0° 인 시험편에서는 4계면을 갖는 시험편의 경우 최외각층 90° 인 경우보다 상대적인 증가치를 보이다 그 이후 다시 감소하는 경향을 보였다.

수분이 흡수된 시험편의 정적압괴실험 결과를 살펴보면 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 비슷한 증가와 감소를 보였다.

하지만 최외각층 90° 와 0° 모두 다 7계면까지 계면수의 증가에 따라 평균하중과 흡수에너지가 증가하는걸 알 수 있으며 최외각층 90° 를 갖는 7계면의 시험편에서는 평균하중과 흡수에너지가 약 4%의 증가를 보였다. 또한 최외각층 0° 를 갖는 7계면의 시험편에서는 그 평균하중과 흡수에너지가 약 13% 정도 증가하는걸 알 수 있었다.

이는 수분으로 인해 계면과 수지간의 결합력이 약화됨으로써 최대하중은 감소가 되었지만 최대하중 이후로는 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압괴를 보이면서 특히 계면수가 많은 7계면의 시험편에서는 그 계면수의 영향을 받은 결과 평균하중과 흡수에너지가 높게 나타나는 것으로 사료가 된다.

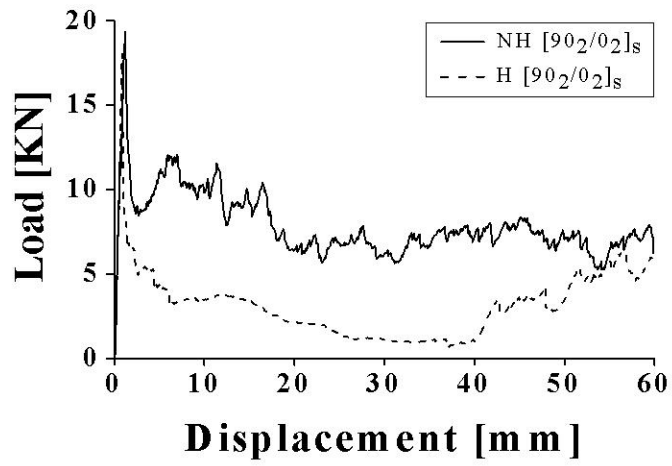


Fig. 30 Relationship between load and displacement,
 $[90_2 / 0_2]_s$

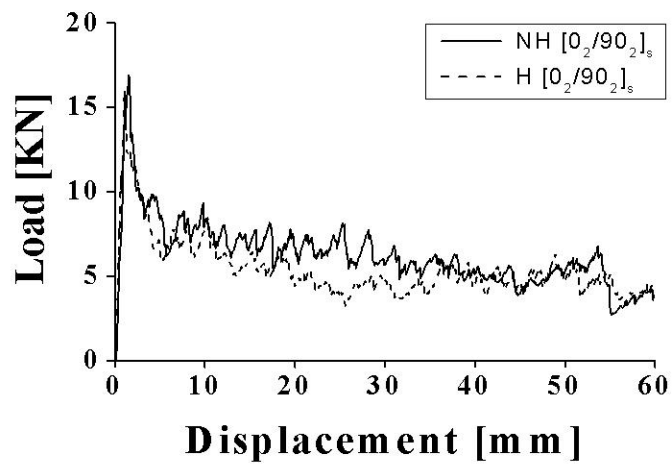


Fig. 31 Relationship between load and displacement,
 $[0_2 / 90_2]_s$

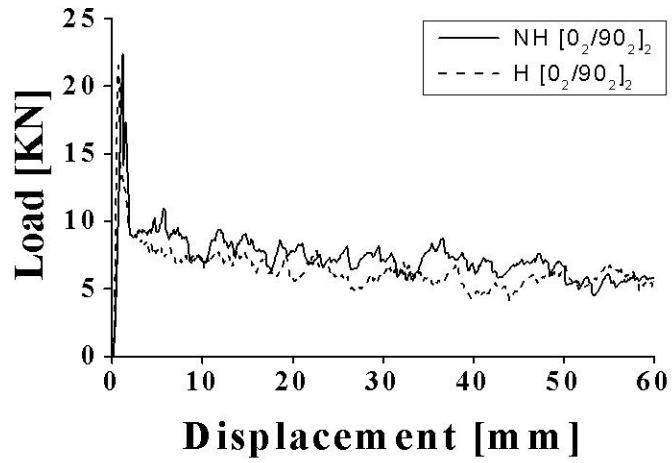


Fig. 32 Relationship between load and displacement,
 $[0_2 / 90_2]_2$

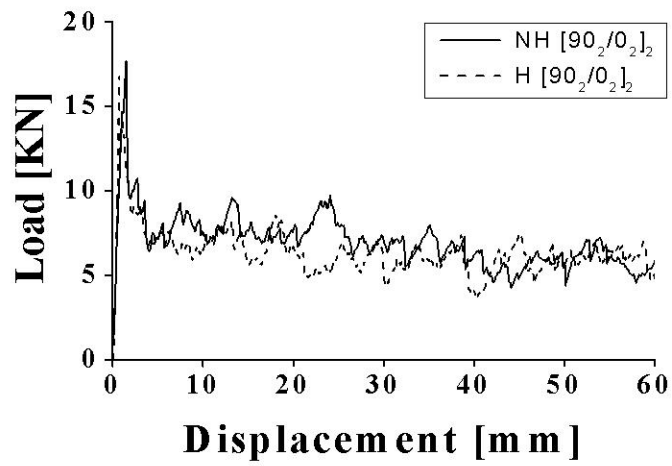


Fig. 33 Relationship between load and displacement,
 $[90_2 / 0_2]_2$

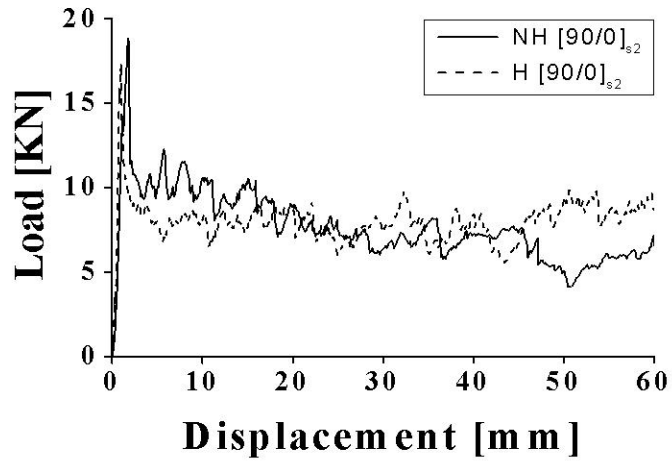


Fig. 34 Relationship between load and displacement,
 $[90 / 0]_{s2}$

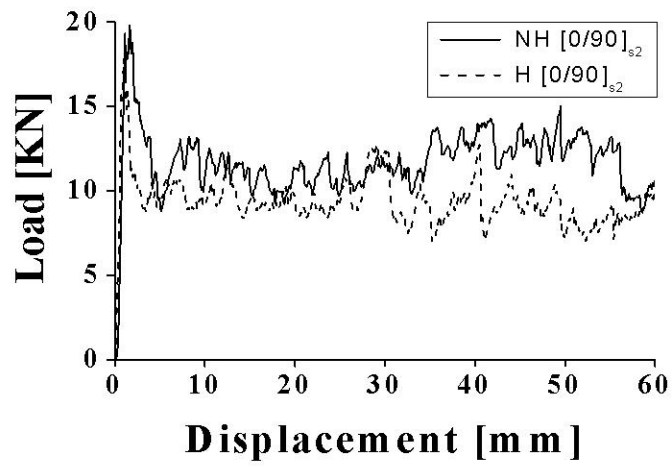


Fig. 35 Relationship between load and displacement,
 $[0 / 90]_{s2}$

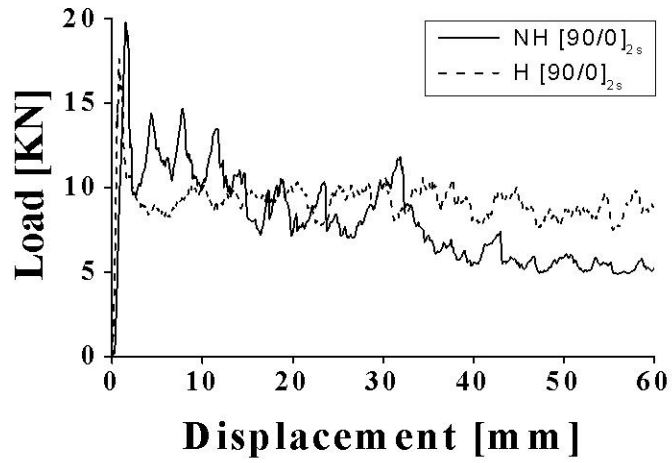


Fig. 36 Relationship between load and displacement,
 $[90 / 0]_{2s}$

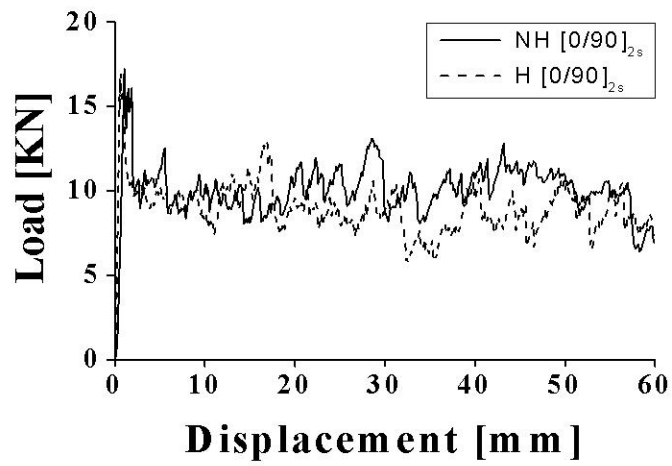


Fig. 37 Relationship between load and displacement,
 $[0 / 90]_{2s}$

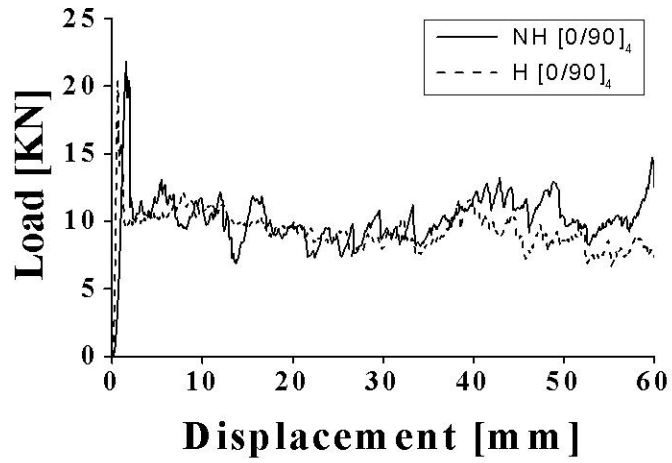


Fig. 38 Relationship between load and displacement,
 $[0 / 90]_4$

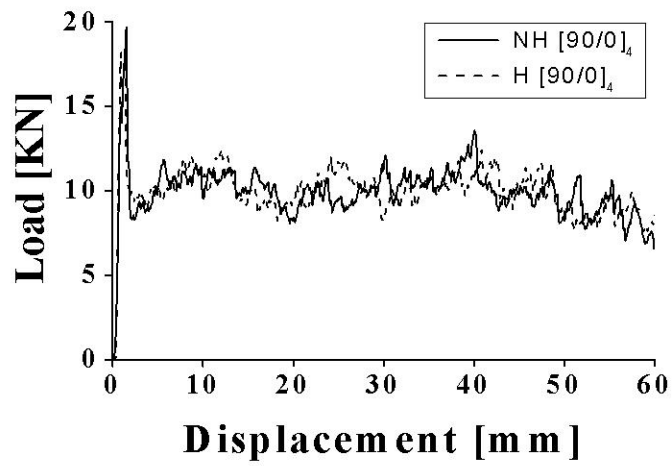


Fig. 39 Relationship between load and displacement,
 $[90 / 0]_4$

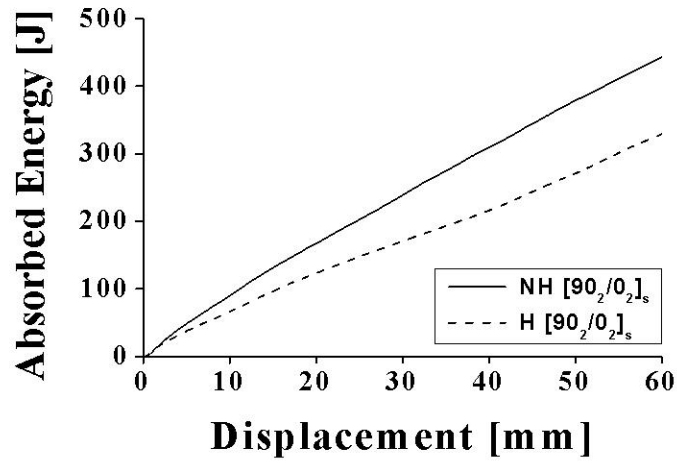


Fig. 40 Relationship between absorbed energy and displacement, $[90_2 / 0_2]_s$

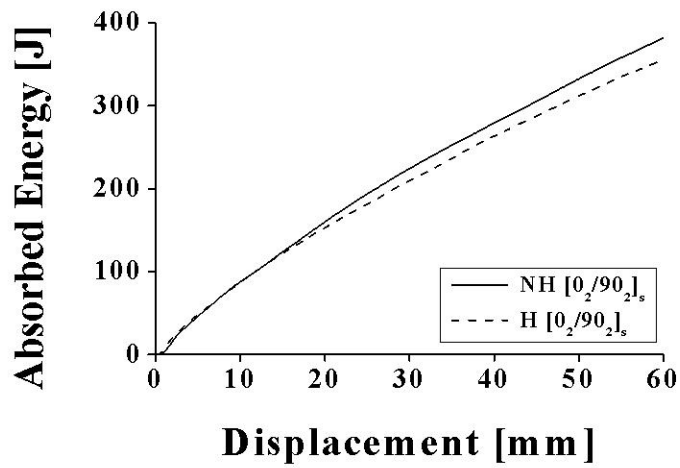


Fig. 41 Relationship between absorbed energy and displacement, $[0_2 / 90_2]_s$

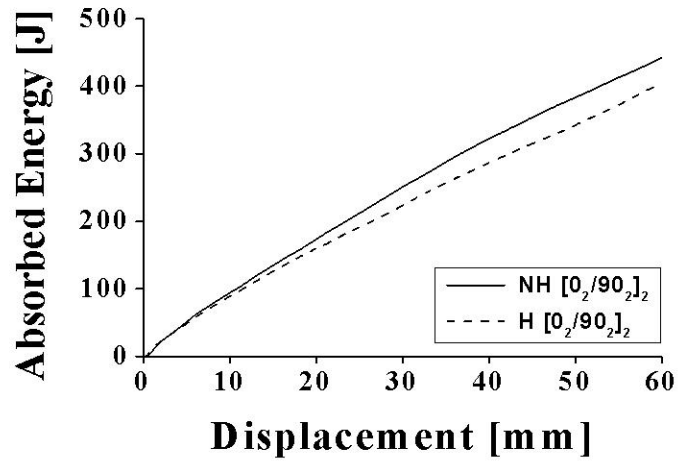


Fig. 42 Relationship between absorbed energy and displacement, $[0_2 / 90_2]_2$

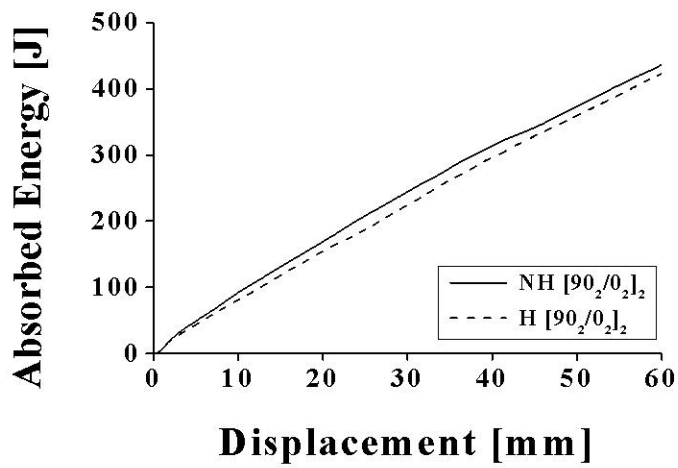


Fig. 43 Relationship between absorbed energy and displacement, $[90_2 / 0_2]_2$

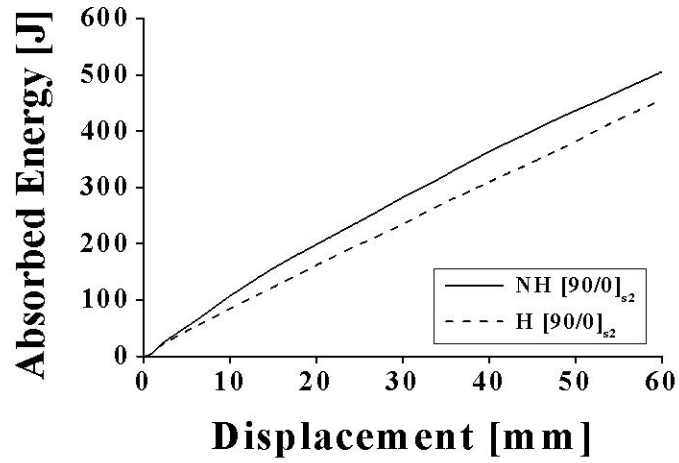


Fig. 44 Relationship between absorbed energy and displacement, $[90 / 0]_{s2}$

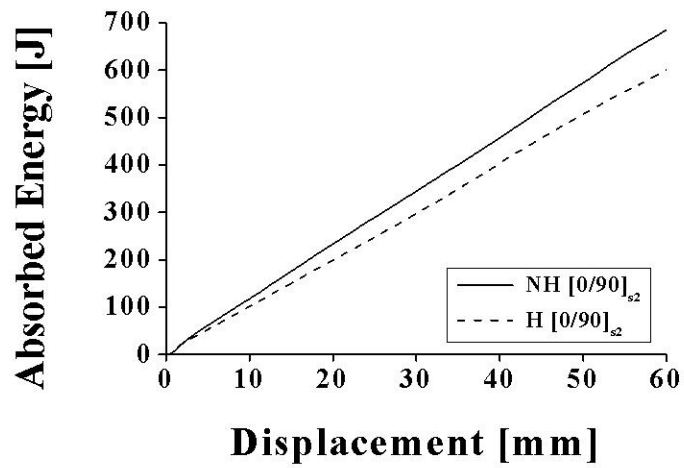


Fig. 45 Relationship between absorbed energy and displacement, $[0 / 90]_{s2}$

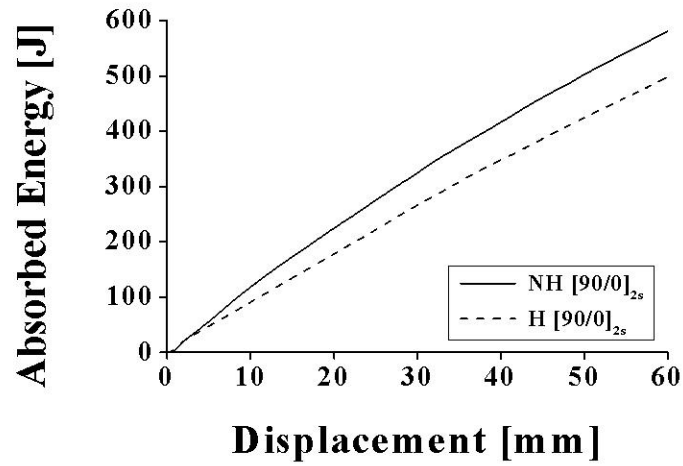


Fig. 46 Relationship between absorbed energy and displacement, $[90 / 0]_{2s}$

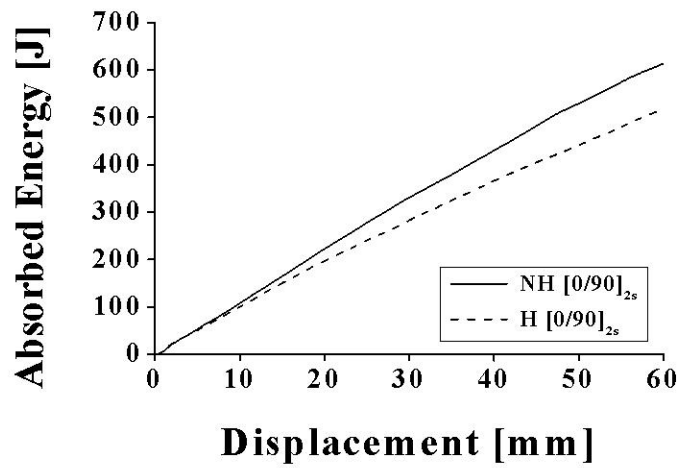


Fig. 47 Relationship between absorbed energy and displacement, $[0 / 90]_{2s}$

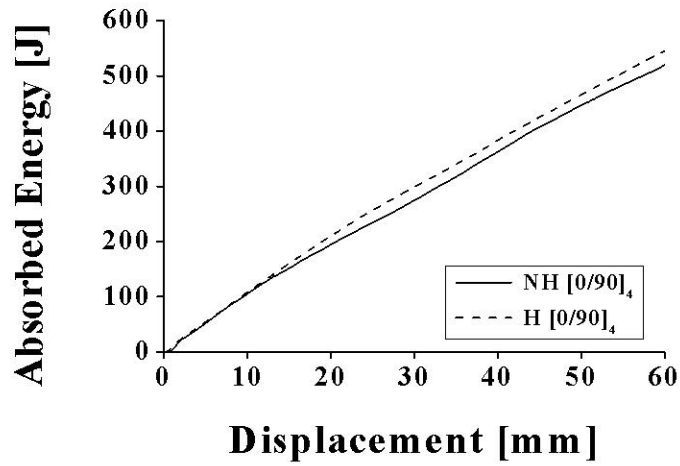


Fig. 48 Relationship between absorbed energy and displacement, [0 / 90]₄

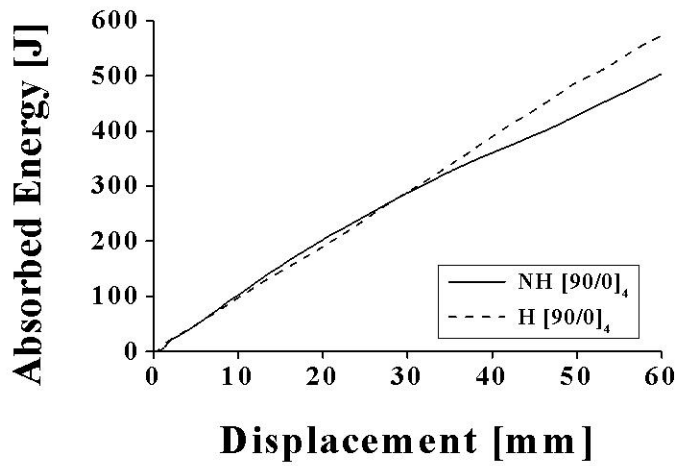


Fig. 49 Relationship between absorbed energy and displacement, [90 / 0]₄

Table 6 Static collapse test results of specimen

Specimen		F_{max} [KN]		F_{mean} [KN]		E_T [J]	
		NH	H	NH	H	NH	H
[90 ₂ / 0 ₂] _s	outer angle 90°	19.33	18.07	7.39	5.48	443.40	329.02
[0 ₂ / 90 ₂] ₂		22.37	21.56	7.40	6.74	443.90	404.75
[90 / 0] _{s2}		18.84	17.43	8.44	7.61	506.63	456.71
[90 / 0] _{2s}		19.77	17.62	9.68	8.29	581.17	497.97
[0 / 90] ₄		21.82	20.37	8.66	9.07	519.59	544.95
[0 ₂ / 90 ₂] _s	outer angle 0°	16.91	16.03	6.38	5.92	383.04	355.74
[90 ₂ / 0 ₂] ₂		17.7	16.79	7.30	7.04	437.98	422.94
[0 / 90] _{s2}		19.82	17.84	11.49	10.02	689.34	601.57
[0 / 90] _{2s}		17.24	16.94	10.25	8.63	615.53	518.14
[90 / 0] ₄		19.68	18.24	8.396	9.54	503.48	573.13

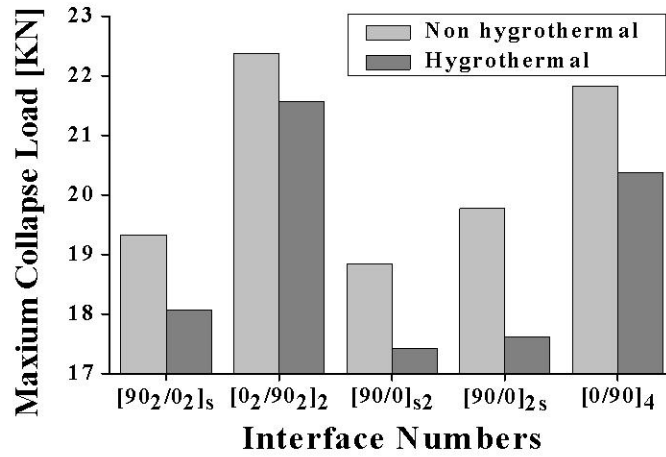


Fig. 50 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

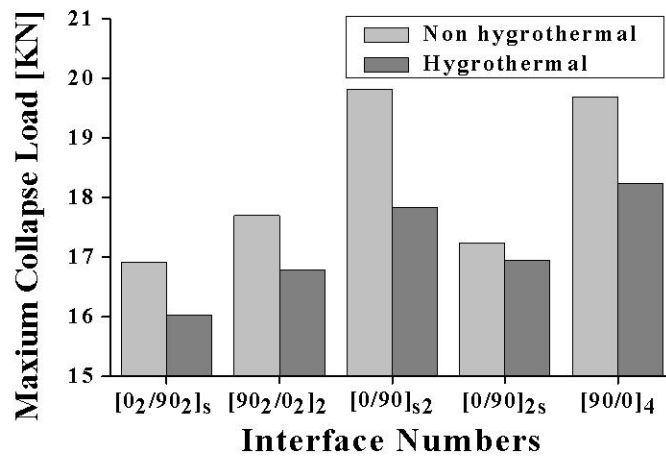


Fig. 51 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

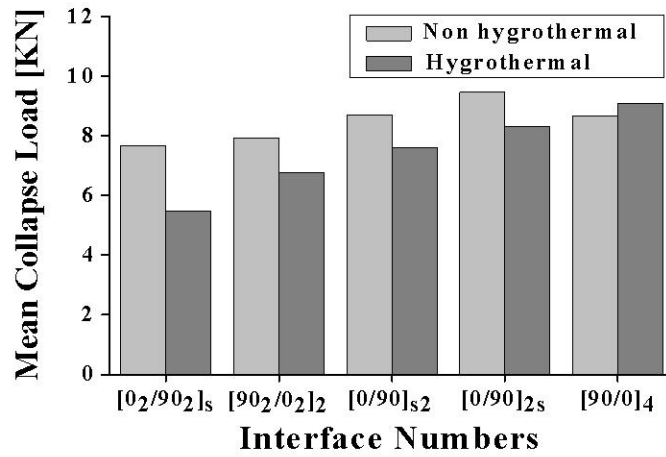


Fig. 52 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

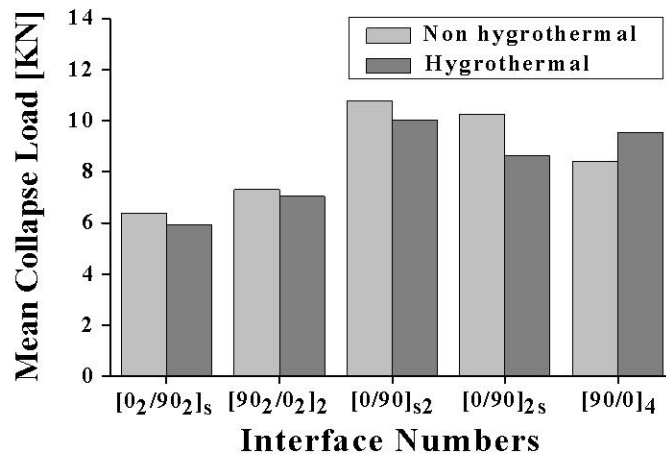


Fig. 53 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

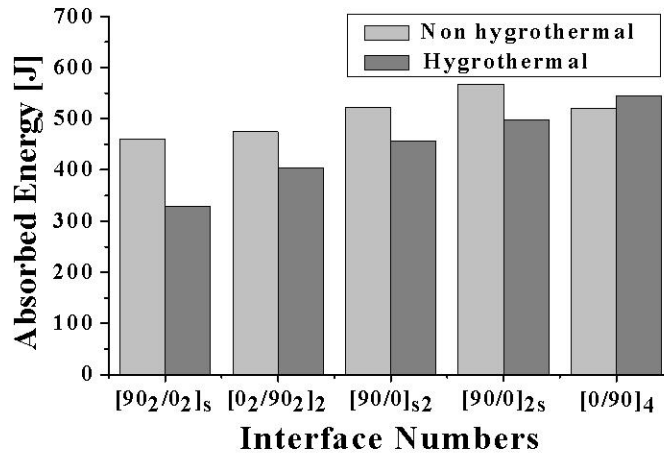


Fig. 54 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 90°)

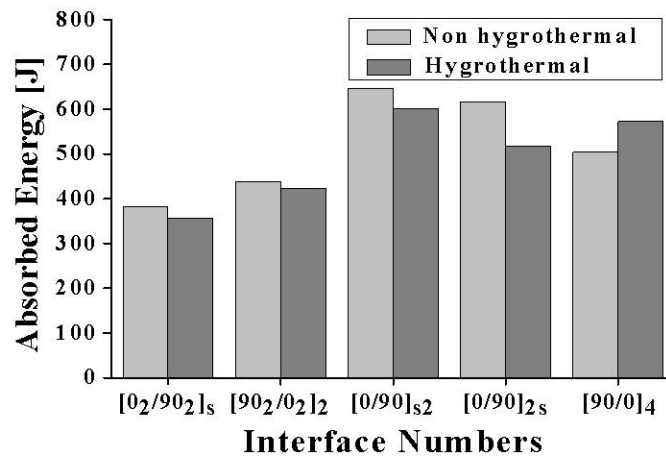


Fig. 55 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 0°)

제 6 장 결 론

본 연구를 통해 차량용 구조부재가 고온·고습 환경에 장시간 노출되었을 때의 수분 흡습 거동을 살펴보고, 그에 따라 CFRP 모자형 단면부재가 축방향의 하중을 받을 때의 강도 저하를 고찰해 보았다. 차량용 구조부재의 기본 형상인 CFRP 모자형 단면부재의 최외각층과 계면수의 변화에 따라 압축실험을 실시하여 압축하중, 에너지 흡수 능력 및 변형 모드의 해석을 통해 안전성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수분 흡습실험 결과 수분의 흡습은 수분이 흡습될 수 있는 0° 방향의 적층배향을 갖는 계면에서 그 수분의 흡습이 발생하였고, 수분이 흡수되는 계면의 두께가 두꺼울수록, 시험편의 표면층에서 가까울수록 그 흡습의 증가가 큰 것을 알 수 있었다. 시간의 변화에 대한 흡습률 곡선을 살펴본 결과 모든 시험편들이 0.8%에서 1.0% 구간 사이에서 흡습률 증가가 둔화되는걸 알 수 있었으며, 모든 시험편들이 약 2500시간이 경과된 시점에서 수분의 포화상태에 도달하였다.
2. 정적압축 실험으로 강도평가를 실시한 결과 수분이 흡수되지 않았던 시험편의 경우 계면수가 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 보이다가 6계면 이후부터는 강도가 저하되는걸 알 수 있었다.
하지만 수분이 흡수된 시험편에서는 계면수가 증가함에 따라 그 강도 또한 증가하는걸 알 수 있었다.
3. 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않은 시험편의 압축 형상을 살펴본 결과 수분의 침투로 인해 CFRP 내부의 열화현상의 발생으로 인하여 계면간의 결합력 또한 약해짐을 알 수 있었고,
그로 인해 시험편의 압축 형상 또한 수분이 흡수된 시험편의 경우가 보다 더 안

정적인 압제모드를 이루는 것을 알 수 있었다.

4. 정적압제실험을 통해 그 강도를 비교해본 결과 수분이 흡수된 시험편의 경우 그 강도가 수분이 흡수되지 않은 시험편보다 약 12% 정도 저하됨을 확인할 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. 광규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 『자동차경제』, 24~29, 1997
4. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (VI)." 『자동차공학회지』 26: 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: 125~132, 2002.
6. 이영신·전병희·오재문. "복합재료 원통셴의 진동, 좌굴강도, 충격강도 특성 및 그 의 설계최적화에 관한 연구." 한국자동차공학회 논문집 5: 48~69, 1997
7. S. Tashiro, A. Yokoyama, H. Hamada. "Numerical Method of Impact Deformation and Failure in Composite Tubes." JSMS Composites-27: 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 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, 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. 최홍섭, 안규중, 남재도 "단일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료 적층판의 수분흡수거동," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, 1486~1500, 1998.
16. G. Sala, "Composite degradation due to fluid absorption," Composites Part B, Vol. 31, 357~373, 2000.
17. Yuichiro Aoki, Ken Yamada, Takashi Ishikwa, "Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates," composites science and technology, Vol. 68, 1376~1383, 2007.
18. 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, 731~736, 2000.
19. 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, 247~258, 2000.
20. 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.

21. Menges G. and Gitschner H. -W., "Sorption 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.
22. 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.
23. 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*, Vol.9 ASTM STP 1059, Philadelphia, pp. 48~63, 1990.
24. Cantwell W. J., "An Assessment of the Impact Performance of CFRP Reinforced with High Strain Carbon Fibers", *Composites Science and Technology*, 25, 1986.
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. 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.
27. Rhodes M. D., "Low - Velocity Impact Damage in Graphite- Fiber Reinforced Epoxy Laminates", *Polymer Composites*, Vol. 2, No. 1, 1981.
28. 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.

29. Watanabe M., "Prediction of Leakage Life and Deterioration in Water for Fiber Glass Reinforced Plastic Bessels", ASTM, pp. 324~344, 1979.
30. 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.
31. Shen C. H. and Springer G. S., "Moisture Absorption and Edsorption of Composite Materials", J. of Composite Materials, Nol. 10, pp. 2~20,1975.
32. Ishai O. and Aron V., :Instantaneous Effect of Internal Moisture Conditions on Strength of Glass-Fiber-Reinforced Plastics", ASTM, pp. 267~276, 1978.
33. 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.
34. Chamis C. C., "Fracture and Fatigue", Composite Materials, Academic Press, New York, Vol. 5, pp. 94, 1974.
35. 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.
36. Tratt M. D., :Analysis of Delamination Growth in Compressively Loaded Composite Laminates", Composite Materials : Fatigue and Fracture, Vol. 3, ASTM STP 1110, pp. 359~372, 1991.
37. 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.
38. 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.

39. 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, 2945~2951, 2000.
40. G. L. Farley, R. M. Jones. "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," Journal of Composite Materials 26, 37~50, 1992.
41. G. L. Farley, R. M. Jones. "Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy-Absorption Capability of Composite Tubes ," Journal of Composite Materials 26, 78~89, 1992.
42. G. L. Farley, R. M. Jones."Crushing Characteristics of Composite Tubes with "Near-Elliptical" Cross Sections." Journal of Composite Materials 26: 1741~1751, 1992.