



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2013년 8월

석사학위논문

온도변화에 따른 흡습조건하에서
CFRP 모자형 단면부재의 압축특성

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

국 현

온도변화에 따른 흡습조건하에서
CFRP 모자형 단면부재의 압괴특성

Collapse Characteristic of CFRP Hat Shaped Sectional
Members under Temperature Changes of Moisture
Absorption

2013 년 8 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

국 현

온도변화에 따른 흡습조건하에서
CFRP 모자형 단면부재의 압괴특성

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2013 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

국 현

국현의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김경석 ㉠

위원 조선대학교 부교수 김지훈 ㉠

위원 조선대학교 교수 양인영 ㉠

2013 년 6 월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	VI
ABSTRACT	IX
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 방법	4
제 2 장 시험편	6
제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 제작	6
제 2 절 시험편의 종류	12
제 3 장 실험방법	14
제 1 절 흡습실험	14
제 2 절 압괴실험	19
제 4 장 정적 압괴실험	20
제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험	20
제 2 절 수분이 흡수된 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험	31
1. 60℃ 흡습조건하에서 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험 ..	31
2. 80℃ 흡습조건하에서 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험 ..	42

제 5 장 결과 및 고찰	53
제 1 절 온도변화에 따른 수분흡수 거동	53
제 2 절 압궤 Mode	61
제 3 절 온도변화에 따른 흡습조건하에서 압궤특성	70
제 6 장 결 론	81
참 고 문 헌	83

LIST OF TABLES

Table 1 CFRP Characteristics and main application field	3
Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet	7
Table 3 Description of specimen	12
Table 4 Symbols of CFRP hat shaped members	13
Table 5 Temperature changes of Moisture absorption rate of CFRP hat shaped sectional members (interface number)	58
Table 6 Static collapse experiment results of changes of temperature specimens (outer angle 90°)	73
Table 7 Static collapse experiment results of changes of temperature specimens (outer angle 0°)	76
Table 8 Collapse of temperature condition rate of NH specimen and hygrothermal specimens (outer angle 90°)	77
Table 9 Collapse of temperature condition rate of NH specimen and hygrothermal specimens (outer angle 0°)	78

LIST OF FIGURES

Fig. 1 CFRP hat shaped sectional member	8
Fig. 2 Stacking conditions of CFRP hat shaped sectional members (outer angle 90°)	9
Fig. 3 Stacking conditions of CFRP hat shaped sectional members (outer angle 0°)	10
Fig. 4 Curing cycle of CFRP stacking specimen	11
Fig. 5 Load–Displacement curve of specimen NH [90 ₂ / 0 ₂] _s (Static, 2 interface number)	21
Fig. 6 Load–Displacement curve of specimen NH [0 ₂ / 90 ₂] ₂ (Static, 3 interface number)	22
Fig. 7 Load–Displacement curve of specimen NH [90 / 0] _{s4} (Static, 4 interface number)	23
Fig. 8 Load–Displacement curve of specimen NH [90 / 0] _{2s} (Static, 6 interface number)	24
Fig. 9 Load–Displacement curve of specimen NH [0 / 90] ₄ (Static, 7 interface number)	25
Fig. 10 Load–Displacement curve of specimen NH [0 ₂ / 90 ₂] _s (Static, 2 interface number)	26
Fig. 11 Load–Displacement curve of specimen NH [90 ₂ / 0 ₂] ₂ (Static, 3 interface number)	27
Fig. 12 Load–Displacement curve of specimen NH [0 / 90] _{s2} (Static, 4 interface number)	28
Fig. 13 Load–Displacement curve of specimen NH [0 / 90 ₂] _{2s} (Static, 6 interface number)	29

Fig. 14 Load–Displacement curve of specimen NH	
$[90 / 0]_4$ (Static, 7 interface number)	30
Fig. 15 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[90_2 / 0_2]_s$ (Static, 2 interface number)	32
Fig. 16 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[0_2 / 90_2]_2$ (Static, 3 interface number)	33
Fig. 17 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[90 / 0]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	34
Fig. 18 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[90 / 0]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	35
Fig. 19 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[0 / 90]_4$ (Static, 7 interface number)	36
Fig. 20 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[0_2 / 90_2]_s$ (Static, 2 interface number)	37
Fig. 21 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[90_2 / 0_2]_2$ (Static, 3 interface number)	38
Fig. 22 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[0 / 90]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	39
Fig. 23 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[0 / 90]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	40
Fig. 24 Load–Displacement curve of specimen 60H	
$[90 / 0]_4$ (Static, 7 interface number)	41
Fig. 25 Load–Displacement curve of specimen 80H	
$[90_2 / 0_2]_s$ (Static, 2 interface number)	43
Fig. 26 Load–Displacement curve of specimen 80H	
$[0_2 / 90_2]_2$ (Static, 3 interface number)	44
Fig. 27 Load–Displacement curve of specimen 80H	
$[90 / 0]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	45

Fig. 28 Load–Displacement curve of specimen 80H [90 / 0] _{2s} (Static, 6 interface number)	46
Fig. 29 Load–Displacement curve of specimen 80H [0 / 90] ₄ (Static, 7 interface number)	47
Fig. 30 Load–Displacement curve of specimen 80H [0 ₂ / 90 ₂] _s (Static, 2 interface number)	48
Fig. 31 Load–Displacement curve of specimen 80H [90 ₂ / 0 ₂] ₂ (Static, 3 interface number)	49
Fig. 32 Load–Displacement curve of specimen 80H [0 / 90] _{s2} (Static, 4 interface number)	50
Fig. 33 Load–Displacement curve of specimen 80H [0 / 90] _{2s} (Static, 6 interface number)	51
Fig. 34 Load–Displacement curve of specimen 80H [90 / 0] ₄ (Static, 7 interface number)	52
Fig. 35 Moisture absorption rate elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 90° (60°C)	55
Fig. 36 Moisture absorption rate elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 0° (60°C)	55
Fig. 37 Moisture absorption rate elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 90° (80°C)	56
Fig. 38 Moisture absorption rate elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 0° (80°C)	56
Fig. 39 Moisture absorption rate of CFRP hat shaped sectional members for variation of outer angles 90°	57
Fig. 40 Moisture absorption rate of CFRP hat shaped sectional members for variation of outer angles 0°	57
Fig. 41 Crushing process of continuous fiber reinforced composite tubes	63

Fig. 42 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)	71
Fig. 43 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)	71
Fig. 44 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 90°)	72
Fig. 45 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)	74
Fig. 46 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)	74
Fig. 47 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 0°)	75

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave	11
Photo. 2 waterbath	18
Photo. 3 Specimen holder	18
Photo. 4 precise electronic scale	18
Photo. 5 Collapse processing of specimen NH $[90_2 / 0_2]_s$ (Static, 2 interface number)	21
Photo. 6 Collapse processing of specimen NH $[0_2 / 90_2]_2$ (Static, 3 interface number)	22
Photo. 7 Collapse processing of specimen NH $[90 / 0]_{s4}$ (Static, 4 interface number)	23
Photo. 8 Collapse processing of specimen NH $[90 / 0]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	24
Photo. 9 Collapse processing of specimen NH $[0 / 90]_4$ (Static, 7 interface number)	25
Photo. 10 Collapse processing of specimen NH $[0_2 / 90_2]_s$ (Static, 2 interface number)	26
Photo. 11 Collapse processing of specimen NH $[90_2 / 0_2]_2$ (Static, 3 interface number)	27
Photo. 12 Collapse processing of specimen NH $[0 / 90]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	28
Photo. 13 Collapse processing of specimen NH $[0 / 90_2]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	29
Photo. 14 Collapse processing of specimen NH $[90 / 0]_4$ (Static, 7 interface number)	30

Photo. 15 Collapse processing of specimen 60H	
$[90_2 / 0_2]_s$ (Static, 2 interface number)	32
Photo. 16 Collapse processing of specimen 60H	
$[0_2 / 90_2]_2$ (Static, 3 interface number)	33
Photo. 17 Collapse processing of specimen 60H	
$[90 / 0]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	34
Photo. 18 Collapse processing of specimen 60H	
$[90 / 0]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	35
Photo. 19 Collapse processing of specimen 60H	
$[0 / 90]_4$ (Static, 7 interface number)	36
Photo. 20 Collapse processing of specimen 60H	
$[0_2 / 90_2]_s$ (Static, 2 interface number)	37
Photo. 21 Collapse processing of specimen 60H	
$[90_2 / 0_2]_2$ (Static, 3 interface number)	38
Photo. 22 Collapse processing of specimen 60H	
$[0 / 90]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	39
Photo. 23 Collapse processing of specimen 60H	
$[0 / 90]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	40
Photo. 24 Collapse processing of specimen 60H	
$[90 / 0]_4$ (Static, 7 interface number)	41
Photo. 25 Collapse processing of specimen 80H	
$[90_2 / 0_2]_s$ (Static, 2 interface number)	43
Photo. 26 Collapse processing of specimen 80H	
$[0_2 / 90_2]_2$ (Static, 3 interface number)	44
Photo. 27 Collapse processing of specimen 80H	
$[90 / 0]_{s2}$ (Static, 4 interface number)	45
Photo. 28 Collapse processing of specimen 80H	
$[90 / 0]_{2s}$ (Static, 6 interface number)	46

Photo. 29 Collapse processing of specimen 80H [0 / 90] ₄ (Static, 7 interface number)	47
Photo. 30 Collapse processing of specimen 80H [0 ₂ / 90 ₂] _s (Static, 2 interface number)	48
Photo. 31 Collapse processing of specimen 80H [90 ₂ / 0 ₂] ₂ (Static, 3 interface number)	49
Photo. 32 Collapse processing of specimen 80H [0 / 90] _{s2} (Static, 4 interface number)	50
Photo. 33 Collapse processing of specimen 80H [0 / 90] _{2s} (Static, 6 interface number)	51
Photo. 34 Collapse processing of specimen 80H [90 / 0] ₄ (Static, 7 interface number)	52
Photo. 35 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members (static, NH specimen, outer angle 90°)	64
Photo. 36 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members (static, NH specimen, outer angle 0°)	65
Photo. 37 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members (static, 60H specimen, outer angle 90°)	66
Photo. 38 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members (static, 60H specimen, outer angle 0°)	67
Photo. 39 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members (static, 80H specimen, outer angle 90°)	68
Photo. 40 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members (static, 80H specimen, outer angle 0°)	69

ABSTRACT

Collapse Characteristic of CFRP Hat Shaped Sectional Members under Temperature Changes of Moisture Absorption

Kook, Hyun

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

Dept. of Advanced Parts & Materials

Engineering

Graduate School of Chosun University

CFRP composites have light weight, high strength. CFRP Composite material features superior heat and corrosion resistance, and these benefits enable the gradual applications on aerospace industries and sports-entertainment business. However, CFRP Composite material has the weakness in hygrothermal environment and shock resistance. Especially, moisture absorption into composite material under hygrothermal environment can change molecule arrangement and chemical properties. Therefore, this study considered the moisture absorption behavior of CFRP composites associated temperature changes such as 60 and 80°C and following the strength evaluation after experimentally setting hygrothermal environment by producing the CFRP hat shaped sectional member currently used as automobile structural material.

Interface numbers (2, 3, 4, 6 and 7) CFRP hat shaped sectional members were made. This study performed collapse characteristics and moisture absorption movements of CFRP structure members when CFRP laminates are under the hygrothermal environment. In particular, the max collapse load, mean collapse load and absorbed energy collapse mode were analyzed.

1. Temperature changes CFRP hat shaped section member of the absorption at 60 °C the initial results of experiments conducted initial absorption rate increased sharply to about 0.5%, 80 °C up to approximately 1.0% was found to be increased dramatically. Slowing the rate of absorption after approximately 2,500 hours in 60 °C, 80 °C reached approximately 1800 hours, all specimens that they can see that saturation was reached.
2. CFRP hat shaped section member of the moisture absorption behavior of the specimen inside the higher the temperature, the fewer the interface, 0 ° direction of the thickness of the interfacial thicker, 0 ° direction closer to the surface of the specimen surface layer increases the absorption rate of the large to the point of saturation is reached gradually reduced water absorption was found hours.
3. Dry specimen and temperature changes due to the interlaminar fracture in both shear and bending modes with mixed mode of brittle fracture was observed. However, the Wet specimen with carbon fiber reinforced epoxy bonding between the degradation due to the weakening of the collapse, which leads to forming a stable crushing mode was known to 60 °C, 80 °C absorption in of the CFRP members Mode to crush almost all showed.

4. Through the static collapse test the strength degradation due to temperature changes, compare the results, the higher temperature strength degradation was noticeable response, especially CFRP structural members compared to non-hygroscopic moisture absorption at 60 °C, the decrease was 40% in the case If moisture absorption at 80 °C and 50% was found to be decreased.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 탄소섬유강화복합재)는 금속재료에 비해 20~50%정도 가벼우면서 비강도(인장강도/밀도), 비강성(탄성계수/밀도)이 높아 경량화가 요구되는 우주 항공산업을 비롯한 자동차산업, 선박산업 등 경량화가 필요로 하는 산업 분야에 널리 사용되고 있으며, 내열성과 내식성 등이 뛰어나기 때문에 현재 스포츠 용품, 환경산업, 건축분야 등 각 분야의 고성능 산업용 소재로 점차 확대되고 있고 Table.1에 CFRP 특성 및 적용분야를 나타내었다.^{1, 2)}

최근 자동차는 전자화, 고급화, 안전화 등에 수요자들의 요구가 다양해짐에 따라 부대장비가 늘어나면서 자동차 중량이 계속 증가하는 추세이며, 세계적으로 환경오염 문제가 대두되면서 연비개선이 절실히 요구되고 있다. 자동차의 연비 개선 대책은 엔진, 구동 계의 효율향상, 주행저항저감, 경량화 등이 있다. 엔진 및 구동 계의 전달효율은 기술적으로 거의 한계에 도달하여 연비의 대폭적인 향상은 기대하기 어려운 실정이나 구조변경, 경량재료로의 대체, 부품합리화 등에 의한 경량화는 연비를 대폭적으로 향상시킬수 있다. 10~15% 정도의 경량화를 달성하기 위해서는 강판의 사용법 연구만으로는 한계가 있다.^{3, 4)}

이러한 수송기계부품의 경량화를 위한 연구는 최적설계기술과 소재개발기술이라는 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.

최근에는 CFRP 복합재가 질량비 충격에너지 흡수 성능 등이 매우 우수하므로 충돌에너지를 흡수해야하는 부재에 CFRP 복합재료를 이용하고자 여러분야에서 많은 연구가 이루어 지고 있는 실정이다.^{5, 6)}

하지만 이미 충분한 실험과 검증이 확보되어 있는 금속재료와는 달리, CFRP 복

합재료는 그 붕괴거동에 관련된 실험적 연구와 이를 뒷받침 하는 연구결과가 충분치 않은 실정이다. 복합재료는 파괴 메커니즘이 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 CFRP는 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습의 흡습조건하에서 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 저하시킨다. 특히 충격 손상을 받은 CFRP 적층판은 모재크랙, 배면크랙 및 층간 계면에 박리가 발생하여 잔류강도가 현저하게 저하되는 문제점이 있으며, 고온·고습 흡습조건에 노출되면 잔류 강도 특성치가 크게 저하하게 된다.^{7~10)}

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.^{11,12)}

흡습상태에서의 이제까지의 연구 결과로는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 대한 잔류 강도 저하 문제를 취급한 연구, carbon/epoxy, glass/epoxy의 전단강도특성, 염수환경에 노출된 복합재 내구성평가, 전단강도에 미치는 흡습의 영향^{13~16)}, 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.^{17~22)}

따라서 복합재의 유용한 기계적 성질이 장시간 온도, 습도 등과 같은 가혹한 환경하에서 CFRP 복합재에 대한 강도평가 및 압축특성을 파악하고 정량적인 설계 데이터 얻어 최적의 적층 조건을 고온·고습 환경하에서의 강도 특성을 파악해야 한다.

Table 1 CFRP Characteristics and main application field

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, 제도기기 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 및 방법

연구배경에서와 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 된다.

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

CFRP 복합재의 가장 큰 단점으로는 수분의 흡수와 충격하중에 대해 매우 취약하다는 것이다. 탄소섬유와 에폭시수지의 결합에 의해 어느 특정한 작용이 발생하게 되면 성질이 다른 하나가 취약하게 되며, 이로 인하여 복합재 내부에는 기계적 성질의 변화가 발생한다는 것이다.²³⁾

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 인해 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질을 저하시킴으로써 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다.^{24~26)}

또한, CFRP 복합재가 주요 구조부재로서 사용되기 위해 적층 방향, 적층 두께, 적층 순서, 재료의 종류 등 적층구성에 따라 변수가 많고, 다양하고 가혹한 환경에서의 사용이 많아 짐으로 그에 따른 많은 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 구조부재가 차량용 사이드 구조 부재로 사용될 것을 산정하여 적층구성이 서로 다른 CFRP hat 부재를 설계 제작하여 고온·고습 상태에서 흡습실험을 하고 완료 흡습상태에서 압력실험을 행하여 흡습 조건 및 적층구성의 차에 따른 흡습 에너지의 비교, 압력 모드의 비교 및 압력강도의 비교를 통하여 정량적인 Data를 얻어 자동차 차체 부재의 기본이 되는 설계 방법을 제안하고자 하였다.

연구방법으로는 현재의 자동차 구조 부재의 모자형 단면부재와 비슷한 형상으로

제작된 CFRP 모자형 단면부재를 제작하여 사용하였고, 시험편의 제작 시 섬유층의 적층 방향과 순서를 달리함으로써 계면수의 변화를 주었고, 시험편의 축방향을 중심으로 최외각층의 변화를 주어 제작하였다.

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

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

항온수조의 내부온도의 설정온도로는 복합재료의 계면변화가 적게 나타나는 온도인 60℃와 차량 전면부에 구조부재로 사용되었을 것을 가정한 가장 높은 온도이며 Epoxy 수지의 Glass 전이 온도 이하인 80℃로 설정하였고,²⁷⁾ 온도와 수분이 항상 일정하게 유지가 되도록 하였다.

흡습실험을 통하여 흡습조건하의 가혹한 환경속에서 CFRP 복합재의 수분흡수 거동을 알아보았고, 나아가 수분을 흡수하지 않은 시험편과 조건을 같이하여 수분 침투에 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 단면부재의 강도평가를 실시하여 최적의 적층 구성과, 설계 시 실제 적용 가능한 정량적인 설계 데이터를 얻고자 한다.

제 2 장 시험편

제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 제작

본 실험에는 대표적인 경량화 재료이며 이방성 특징을 가지는 섬유복합재료인 CFRP를 이용하여 차량용 충돌에너지흡수 구조부재의 형상인 모자형 단면 부재를 제작하여 시험편으로 사용하였다. Table. 2와 같은 일방향 CFRP Prepreg sheet(CU125NS)를 사용하였다.

CFRP prepreg sheet를 차량용 충돌에너지흡수 구조부재의 형상인 모자형 단면 부재로 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 실제 차량에 사용되는 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 모자형(□)과 단면부재와 평판(—) 부재를 결합하여 제작을 하였다. Fig. 2, 3은 최외각층 90° 와 0° 계면수 변화 시험편의 단면형상과 플랜지 형상을 도식화 한 것이다.

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

또한 시험편의 축 방향 θ 를 중심으로 최외각층의 각도가 각각 90° 와 0° 로 구분되게 제작 하므로써 온도변화에 따른 강도평가 및 수분흡수 변화에 대해 알아보았다.

시험편의 성형은 Photo. 1과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 4는 시험편 제작시 오토클레이브의 성형 사이클을 나타냈

다. 시험편 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여, 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압제가 수주기 반복하여 나타나는 데 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.²⁷⁾

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]

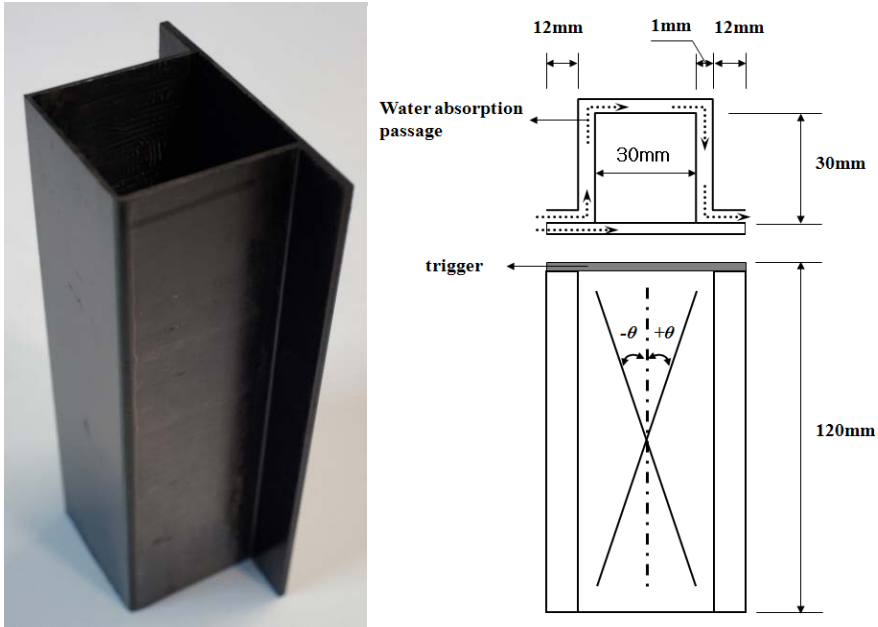
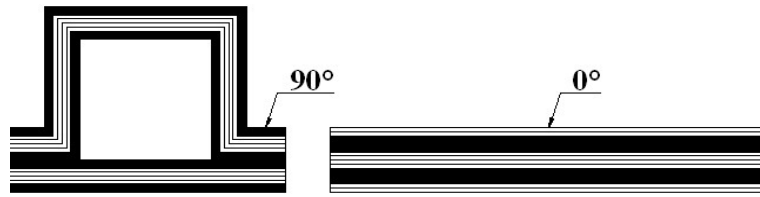
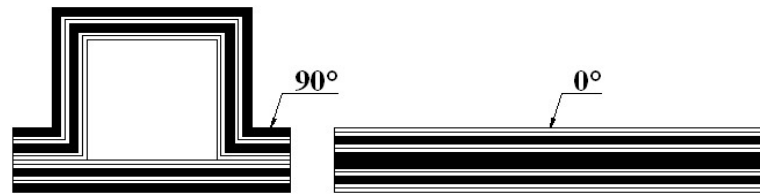


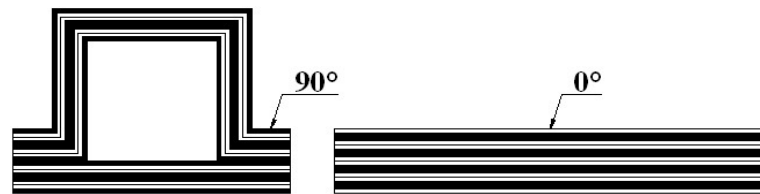
Fig. 1 CFRP hat shaped sectional member



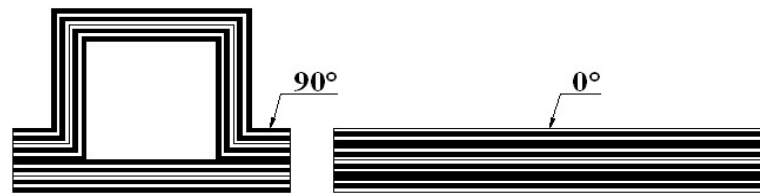
(a) 2 interface (outer angle 90°)



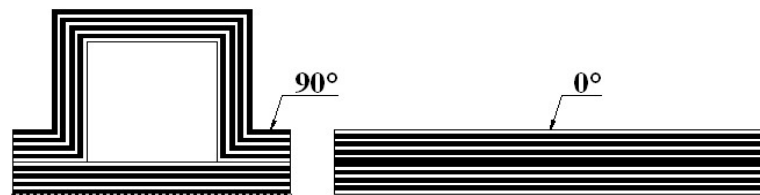
(b) 3 interface (outer angle 90°)



(c) 4 interface (outer angle 90°)



(d) 6 interface (outer angle 90°)

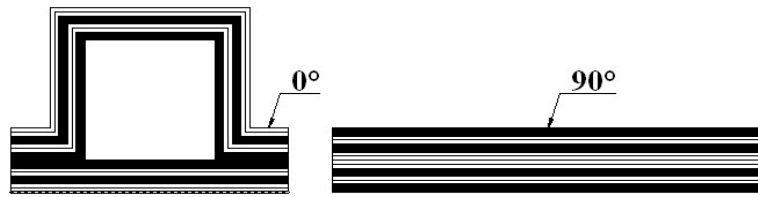


(e) 7 interface (outer angle 90°)

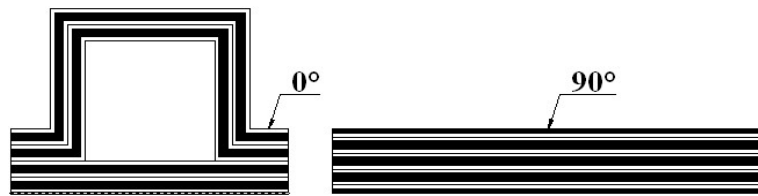
Fig. 2 Stacking conditions of CFRP hat shaped sectional members
(outer angle 90°)



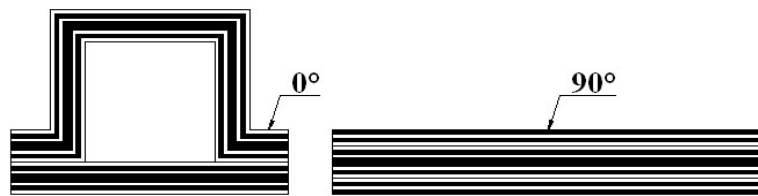
(a) 2 interface (outer angle 0°)



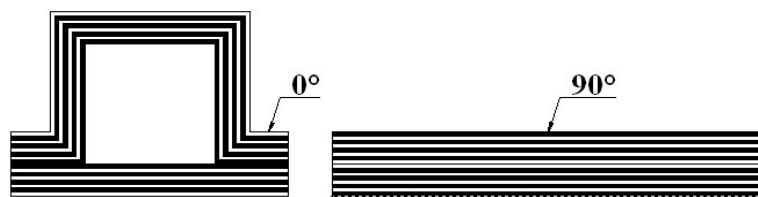
(b) 3 interface (outer angle 0°)



(c) 4 interface (outer angle 0°)



(d) 6 interface (outer angle 0°)



(e) 7 interface (outer angle 0°)

Fig. 3 Stacking conditions of CFRP hat shaped sectional members
(outer angle 0°)



Photo. 1 Autoclave

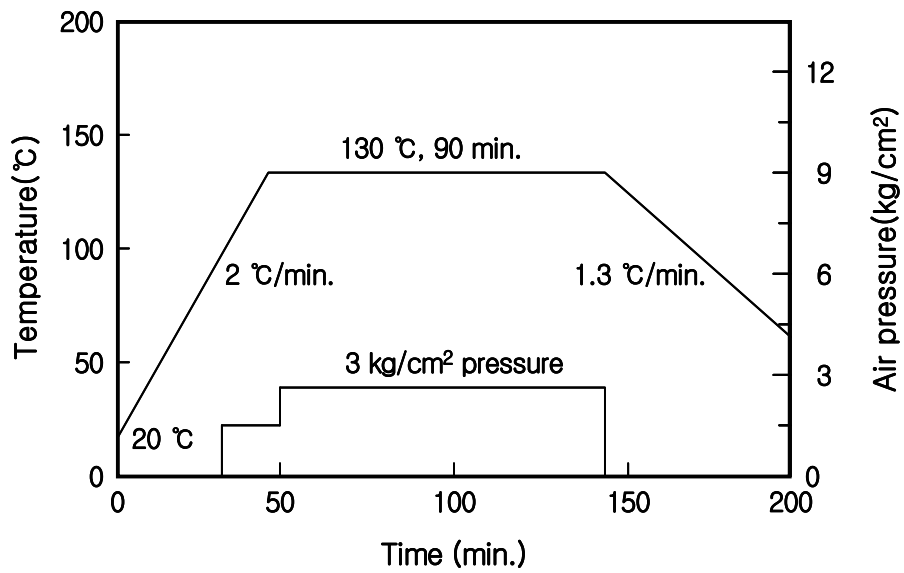


Fig. 4 Curing cycle of CFRP stacking specimen

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 정적압축실험을 실시하여 강도를 평가해 보았다.

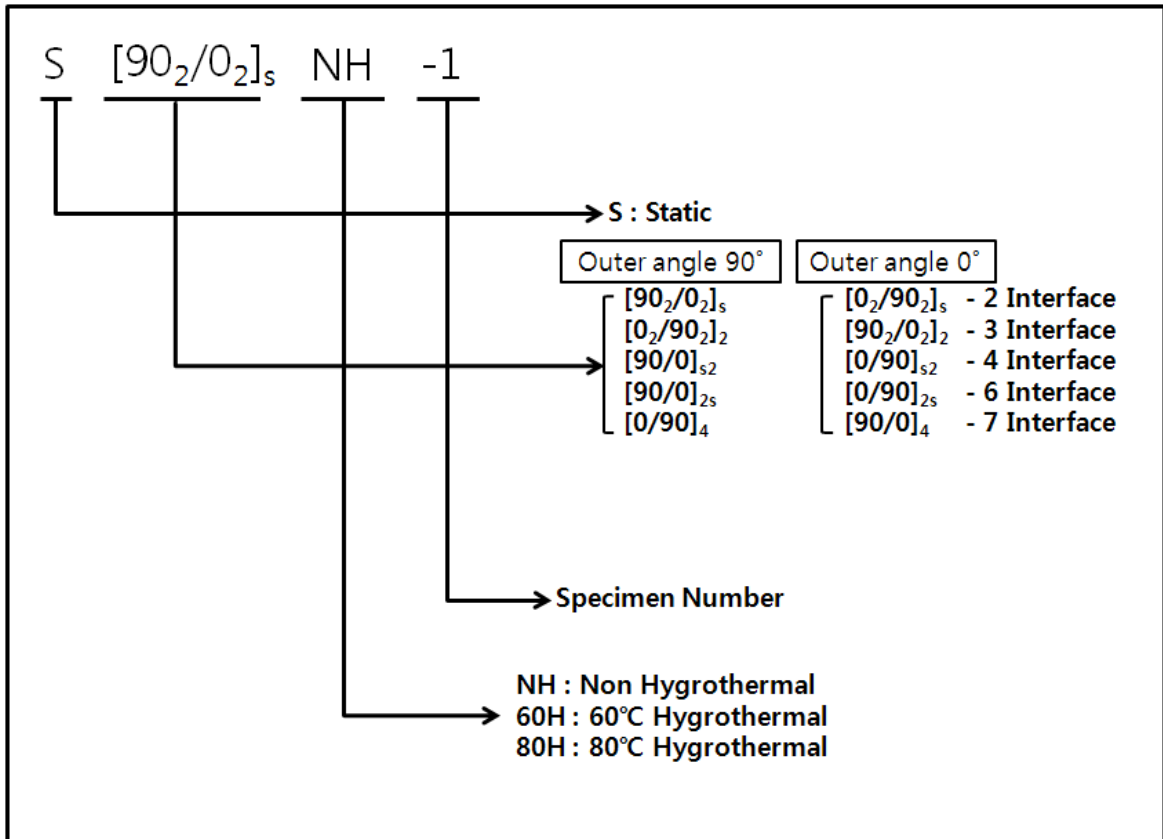
수분을 침투시킬 시험편(Hygrothermal)과 제작한 후 건조 상태를 유지하게 될 시험편(Non Hygrothermal)을 각각 90° 와 0° 의 최외각층 변화에 따른 2, 3, 4, 6, 7계면의 종류로 제작 및 분류를 하였다.

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

Table 3 Description of specimen

Specimen	Condition			Interface No.	Outer Angle
[90 ₂ / 0 ₂] _s	NH	60°C H	80°C H	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 흡습실험

CFRP 복합재가 온도 및 습도와 같은 환경으로 인해 오랜 시간동안 노출이 되면 재료의 강도저하 현상이 일어나게 된다. 또한 수분흡수특성 등은 최적 구조설계에 아주 중요한 자료가 될 수 있다.

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 흡습조건을 하나로써 항온수조를 이용한 흡습환경을 조성하였고, 구조부재의 설계 목적상 장시간 사용될 것을 가정한 후 흡습 실험을 실시하였다.

본 실험에 사용된 Photo. 2와 같은 항온수조(Waterbath WNB 7-45)를 사용하여 Photo. 3과 같이 시험편을 고정 시켜 수심은 권장 최고 수심까지 설정을 하였었고, 장시간 일정한 온도와 수분이 유지가 되도록 하였다.

항온수조의 내부온도의 설정온도로는 복합재료의 계면변화가 적게 나타나는 온도인 60℃와 차량 전면부에 구조부재로 사용되었을 것을 가정한 가장 높은 온도이며 Epoxy 수지의 Glass 전이 온도 이하인 80℃로 설정하였고, 온도와 수분이 항상 일정하게 유지가 되도록 하였다.²⁸⁻²⁹⁾

CFRP 복합재가 장시간 수분에 노출 되었을 때 시험편 내부에 흡수되는 수분의 흡습률 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 Photo. 4의 1/10,000g까지 측정이 가능한 정밀전자저울을 이용하여 측정을 하였다.

이제 까지 연구와 흡습에 관한 이론의 기본적인 식은 다음과 같다.

흡습률에 사용한 식은 0° 와 90° 가 대칭하는 적층 복합재료 내의 시간에 따른 수분의 변화를 나타내는 다음 식으로 표현할 수 있다. ^{30~32)}

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

여기서 M : 재료내의 수분농도

D_x, D_y, D_z : x, y, z 방향의 확산계수

t : 시간 (sec)

재료를 무한 판으로 가정하면 수분의 흡수는 재료의 두께 방향으로만 일어나므로 식(1)은 다음 같이 된다.

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

식(2)의 경계조건은

$t = 0$ 이고 $0 < z < h$ 일때, $M = M_i$

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

여기서 h : 시험편의 두께

z : 시험편의 두께방향

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

있다. 즉,

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

식(2)와 (3)을 풀어 정리하면

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

여기서 M : 임의의 시간에서 재료내부의 수분 흡습률

M_∞ : 포화 흡습률

M_0 : 초기 흡습률

흡습률은 다음과 같은 결과식을 이용하였다.

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

여기서 M : 흡습률 (%)

W_d : 흡습전의 재료의 무게 (g)

W_m : 흡습후의 재료의 무게 (g)

본 연구에서는 CFRP 복합재 내부의 흡습거동을 파악하기 위한 흡습률 측정은 흡습실험을 실시하기 전의 시험편 무게와 전자정밀저울로 측정한 흡습시험편의 무게와의 차를 백분율로 환산하는 식(5)를 이용하여 측정하였다.

또한, 흡습실험이 종료가 되는 시험편 내부의 수분 포화상태를 측정하기 위하여 다음의 식(6)을 이용하였으며 시험편이 포화 상태에 도달했다고 판단 될 때 흡습 실험을 종료하였다.³³⁾

$$\frac{W_{m-1} - W_m}{W_d} < 0.0005 \quad (6)$$

여기서 W_{m-1} : 흡습된 시험편 전의 시험편 무게 (g)

W_m : 흡습된 시험편의 무게 (g)

W_d : 흡습되기 전의 시험편의 무게 (g)



Photo. 2 Waterbath



Photo. 3 Sepcimen holder



Photo. 4 precise electronic scale

제 2 절 압괴실험

본 연구에서는 수분이 흡수된 시험편과 흡수되지 않은 시험편에 대해서 수분의 흡수가 CFRP 부재의 강도에 미치는 특성을 평가하기 위하여 최외각층 90° 와 0° 의 조건을 갖는 계면수 변화를 갖는 시험편에 대해서 압괴실험을 행했다. 압괴 실험장치는 SHIMADZU사의 만능재료시험기(AG-1S, 100kN)를 사용하였으며, 로드셀과 액추에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min의 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해 지도록 실험을 행하였다. 실험 시 편심하중이 작용하지 않도록 시험편 제작 시 연마가공을 통하여 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과의 재현성이 좋도록 하였으며, 실험결과에 단부효과(end effects)가 나타나지 않고 순차적인 압괴가 주기적으로 발생하도록 전체 축 방향 길이의 60%까지 변형되도록 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴 실험을 행하였다.

정적 압괴실험 후 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(2)와 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구할 수 있었으며, 흡수에너지 E_a 를 압괴길이를 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. 5 ~ Fig. 9와 Photo. 5 ~ Photo. 9는 최외각층이 90° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

Fig. 10 ~ Fig. 14와 Photo. 10 ~ Photo. 14는 최외각층이 0° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

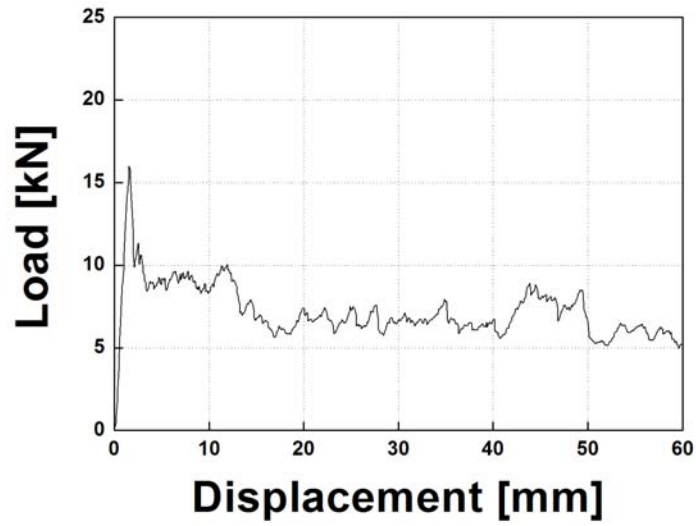


Fig. 5 Load-Displacement curve of specimen NH, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 2 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 5 Collapse processing of specimen NH, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

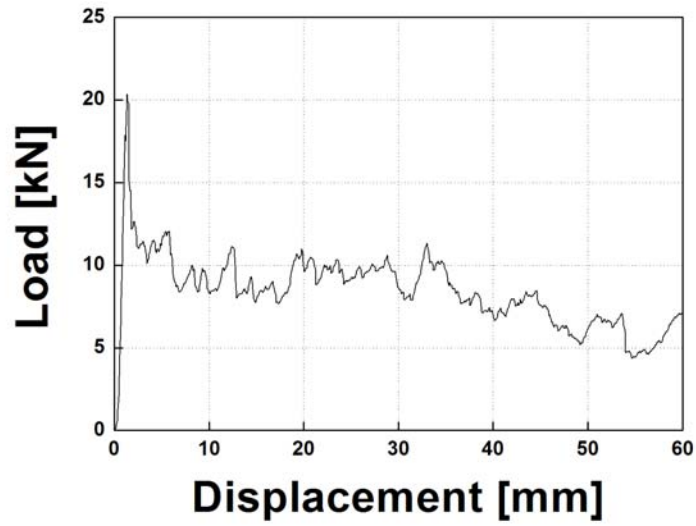


Fig. 6 Load-Displacement curve of specimen NH, $[0_2 / 90_2]_2$
 (Static, 3 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 6 Collapse processing of specimen NH, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 3 interface number)

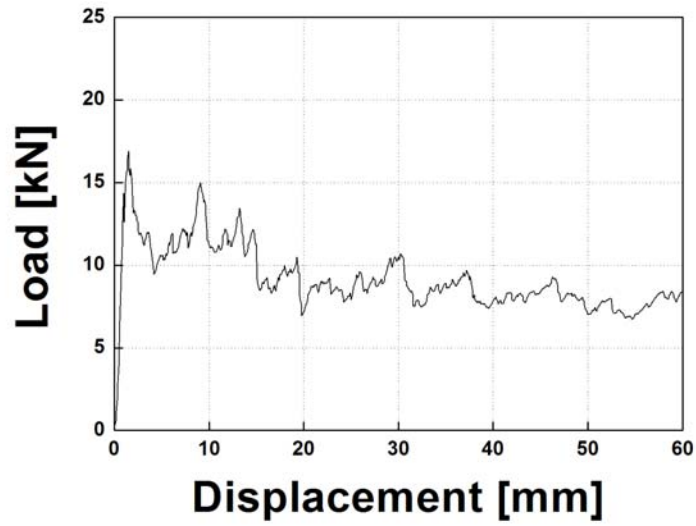


Fig. 7 Load-Displacement curve of specimen NH, $[90 / 0]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 7 Collapse processing of specimen NH, $[90 / 0]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)

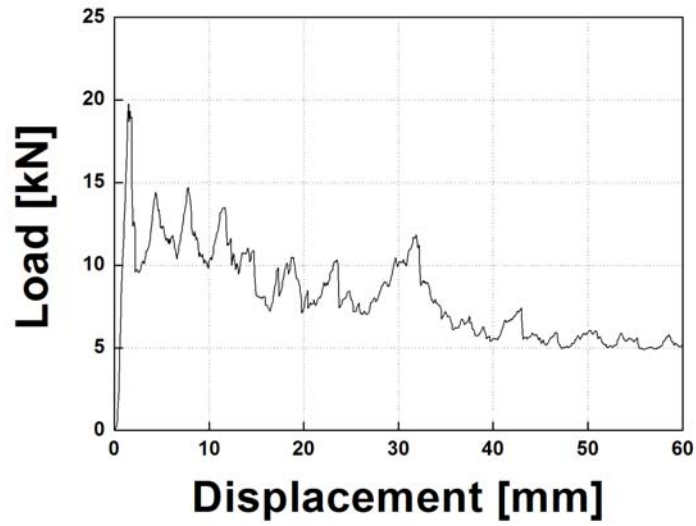


Fig. 8 Load–Displacement curve of specimen NH, $[90 / 0]_{2s}$
(Static, 6 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 8 Collapse processing of specimen NH, $[90 / 0]_{2s}$
(Static, 6 interface number)

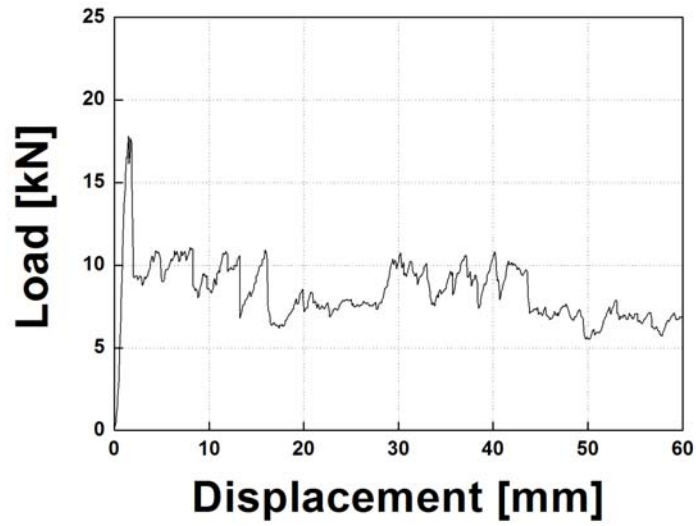


Fig. 9 Load–Displacement curve of specimen NH, $[0 / 90]_4$
 (Static, 7 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 9 Collapse processing of specimen NH, $[0 / 90]_4$
 (Static, 7 interface number)

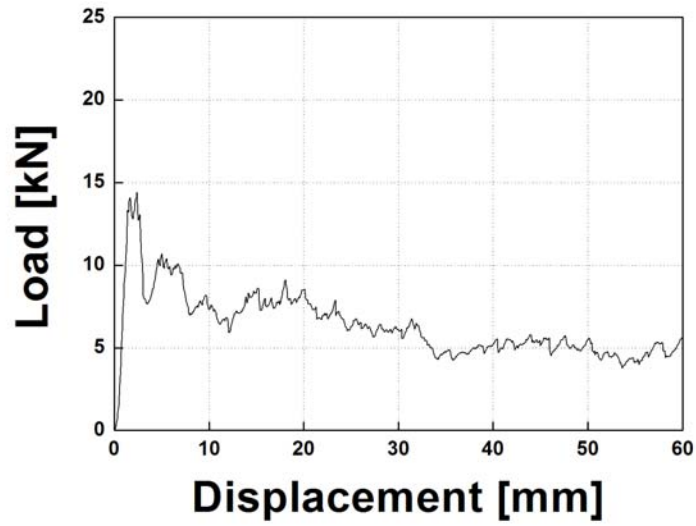


Fig. 10 Load–Displacement curve of specimen NH, $[0_2 / 90_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

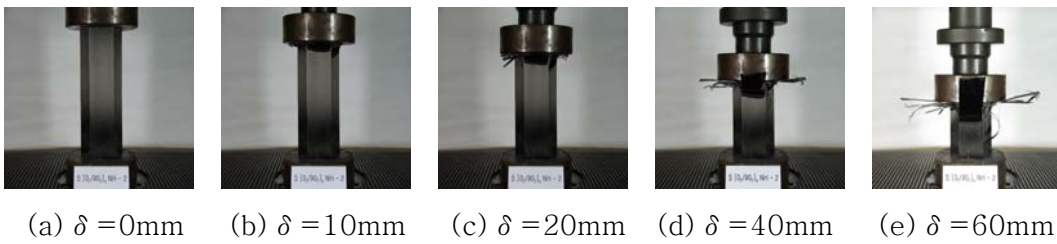


Photo. 10 Collapse processing of specimen NH, $[0_2 / 90_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

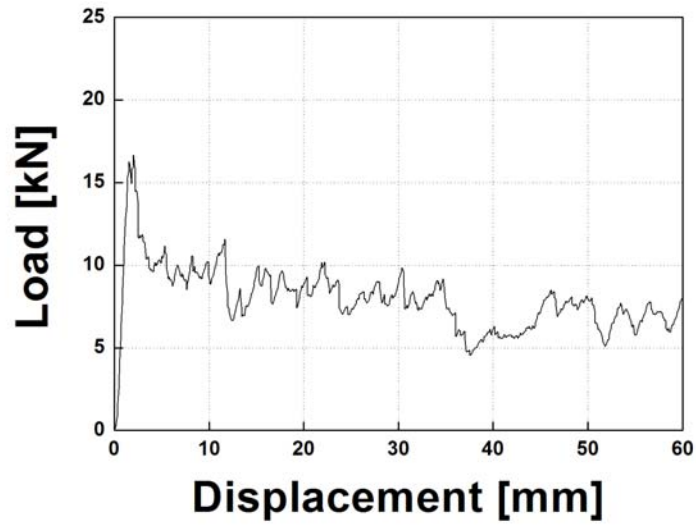


Fig. 11 Load-Displacement curve of specimen NH, $[90_2 / 0_2]_2$
 (Static, 3 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 11 Collapse processing of specimen NH, $[90_2 / 0_2]_2$
 (Static, 3 interface number)

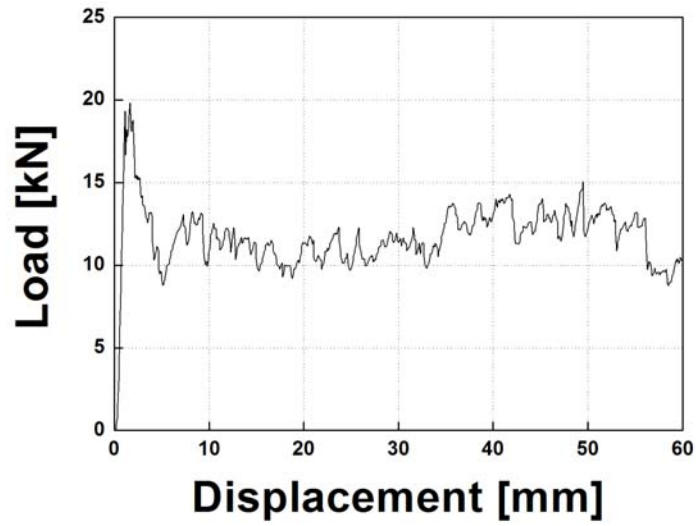


Fig. 12 Load-Displacement curve of specimen NH, $[0 / 90]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 12 Collapse processing of specimen NH, $[0 / 90]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)

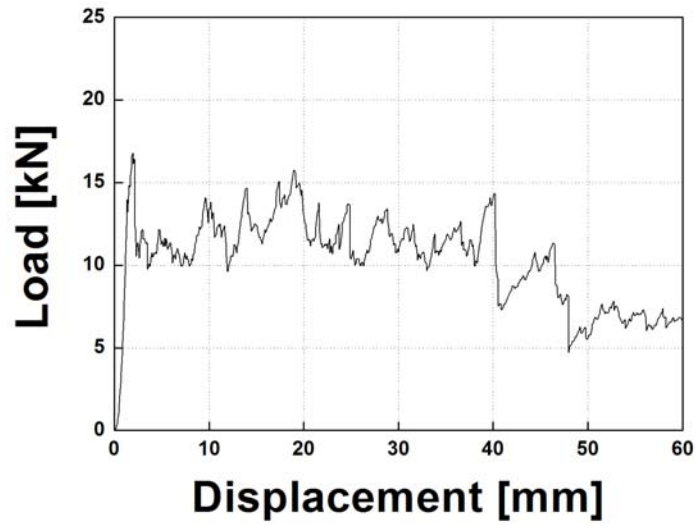


Fig. 13 Load-Displacement curve of specimen NH, $[0 / 90]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 13 Collapse processing of specimen NH, $[0 / 90]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)

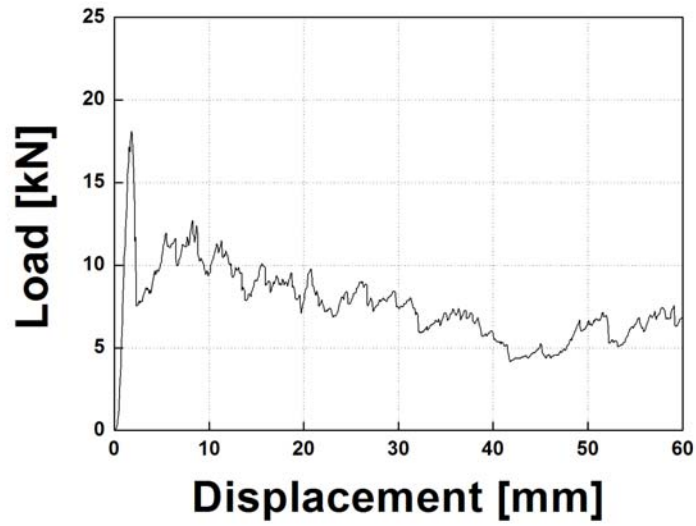


Fig. 14 Load-Displacement curve of specimen NH, $[90 / 0]_4$
 (Static, 7 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 14 Collapse processing of specimen NH, $[90 / 0]_4$
 (Static, 7 interface number)

제 2 절 수분이 흡수된 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험

다음은 60℃와 80℃의 흡습조건하에서 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.

1. 60℃ 흡습조건하에서 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험

다음의 Fig. 15 ~ Fig. 19와 Photo. 15 ~ Photo. 19은 최외각층이 90° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

Fig. 20 ~ Fig. 24와 Photo. 20 ~ Photo. 24은 최외각층이 0° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

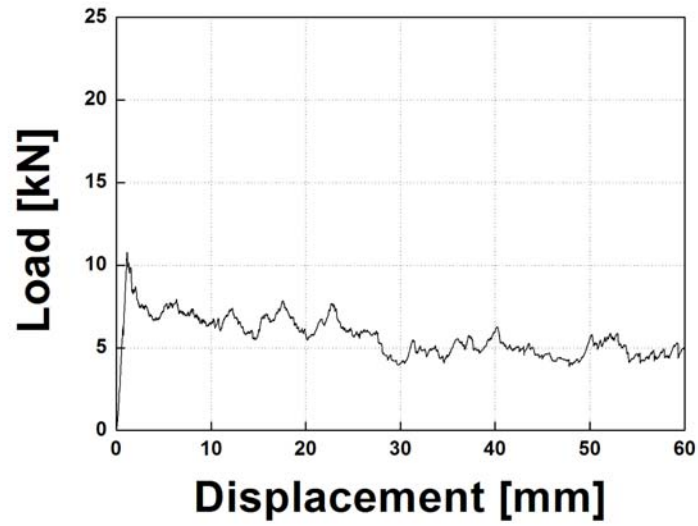


Fig. 15 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 2 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 15 Collapse processing of specimen 60H, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

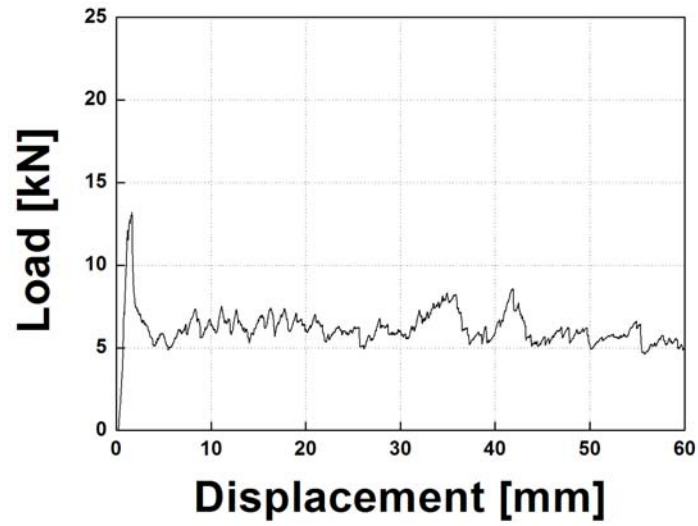


Fig. 16 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[0_2 / 90_2]_2$
 (Static, 3 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 16 Collapse processing of specimen 60H, $[0_2 / 90_2]_2$
 (Static, 3 interface number)

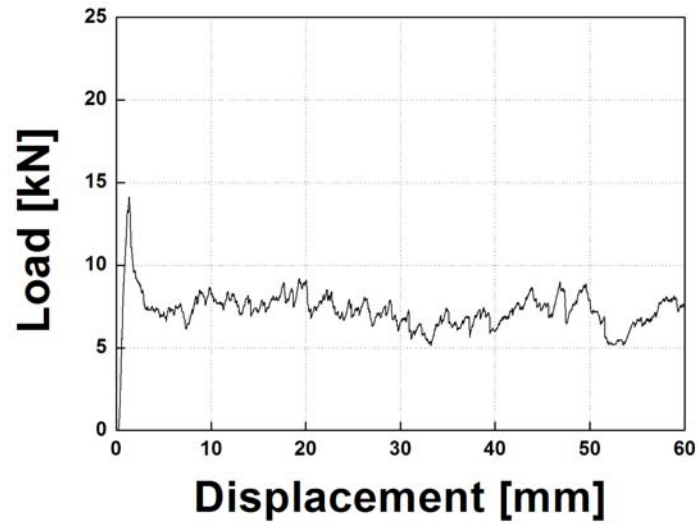


Fig. 17 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[90 / 0]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 17 Collapse processing of specimen 60H, $[90 / 0]_{s2}$

(Static, 4 interface number)

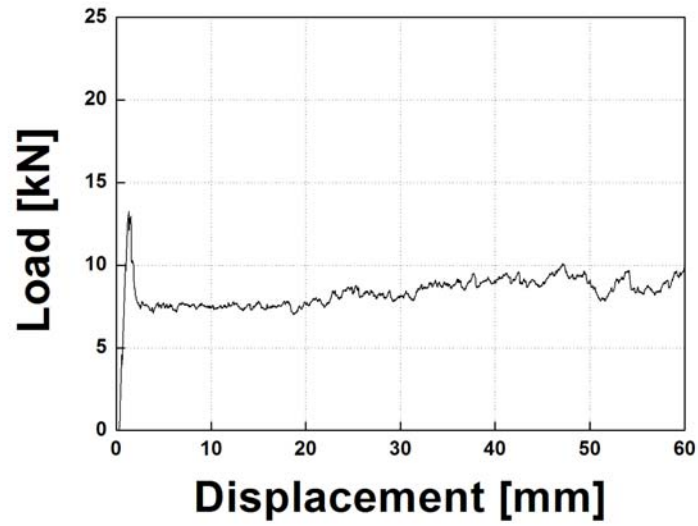


Fig. 18 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[90 / 0]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 18 Collapse processing of specimen 60H, $[90 / 0]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)

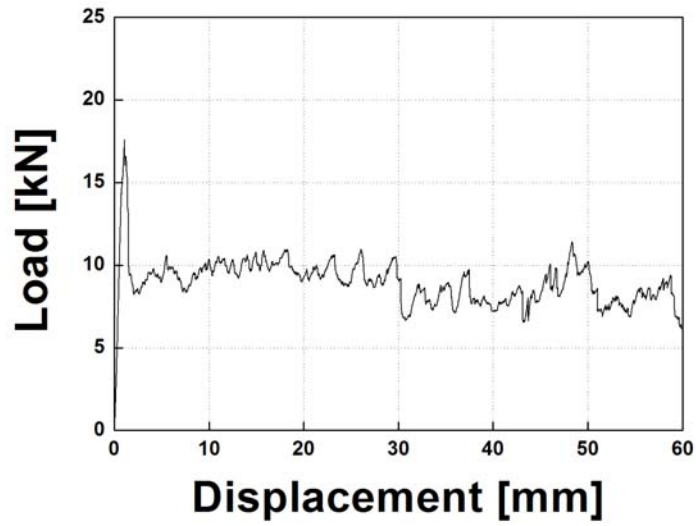


Fig. 19 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[0 / 90]_4$
 (Static, 7 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 19 Collapse processing of specimen 60H, $[0 / 90]_4$
 (Static, 7 interface number)

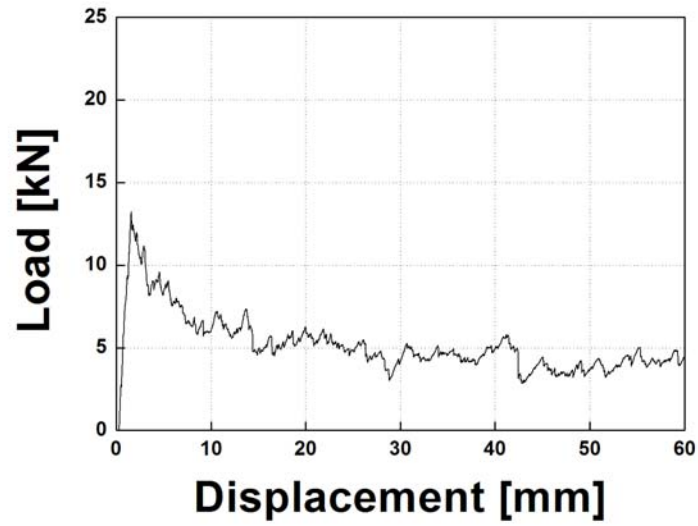


Fig. 20 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[0_2 / 90_2]_s$
 (Static, 2 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 20 Collapse processing of specimen 60H, $[0_2 / 90_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

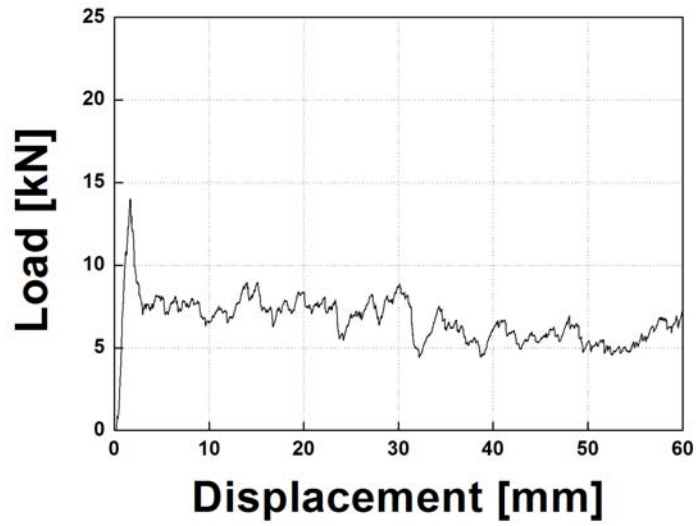


Fig. 21 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[90_2 / 0_2]_2$
 (Static, 3 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 21 Collapse processing of specimen 60H, $[90_2 / 0_2]_2$

(Static, 3 interface number)

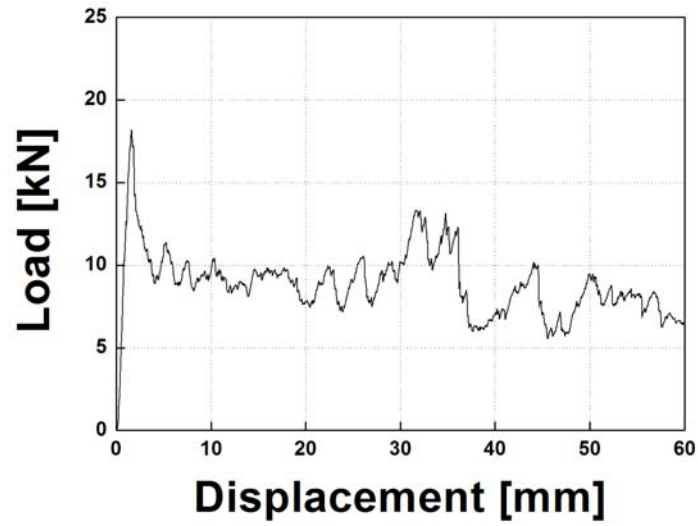


Fig. 22 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[0 / 90]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 22 Collapse processing of specimen 60H, $[0 / 90]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)

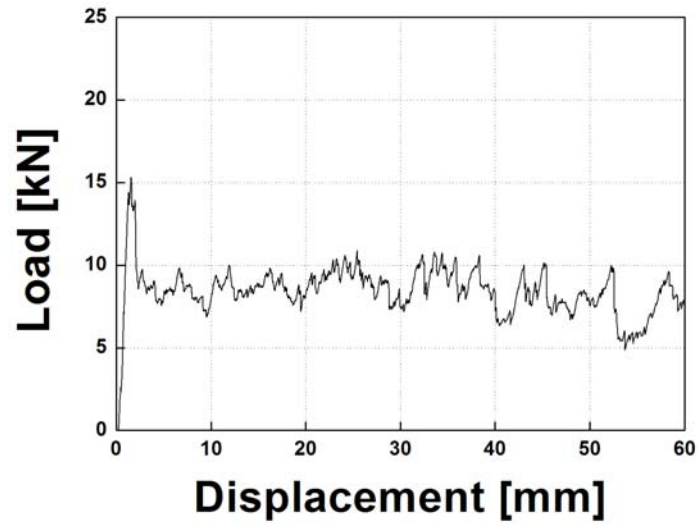


Fig. 23 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[0 / 90]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 23 Collapse processing of specimen 60H, $[0 / 90]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)

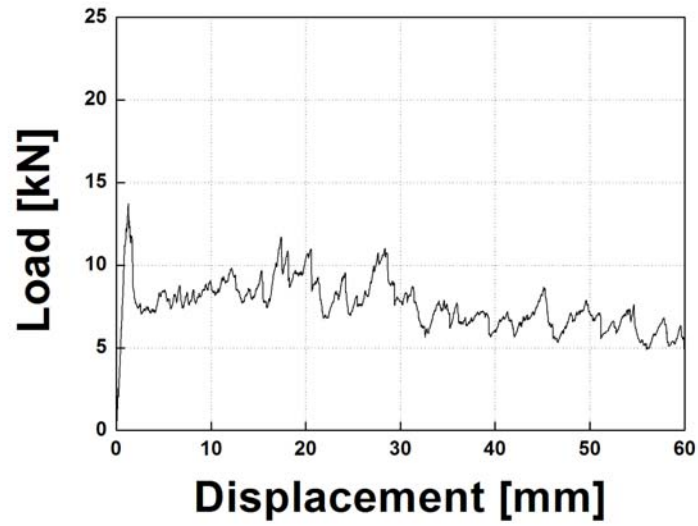


Fig. 24 Load-Displacement curve of specimen 60H, $[90 / 0]_4$
 (Static, 7 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 24 Collapse processing of specimen 60H, $[90 / 0]_4$
 (Static, 7 interface number)

2. 80℃ 흡습조건하에서 CFRP 모자형 단면부재의 압괴실험

다음은 Fig. 25 ~ Fig. 29와 Photo. 25 ~ Photo. 29은 최외각층이 90° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

Fig. 30 ~ Fig. 34와 Photo. 30 ~ Photo. 34은 최외각층이 0° 인 2, 3, 4, 6, 7계면 시험편의 하중-변위 선도 및 변형량이 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm일 때의 압괴과정을 나타낸 것이다.

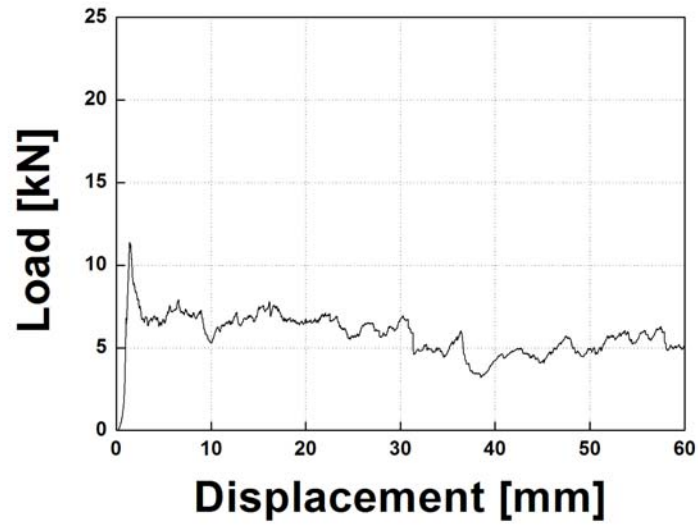


Fig. 25 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 2 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 25 Collapse processing of specimen 80H, $[90_2 / 0_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

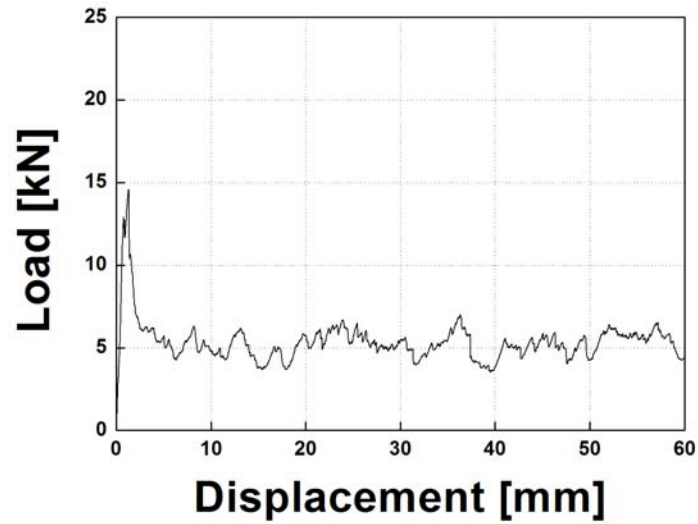


Fig. 26 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[0_2 / 90_2]_2$
 (Static, 3 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 26 Collapse processing of specimen 80H, $[0_2 / 90_2]_2$
 (Static, 3 interface number)

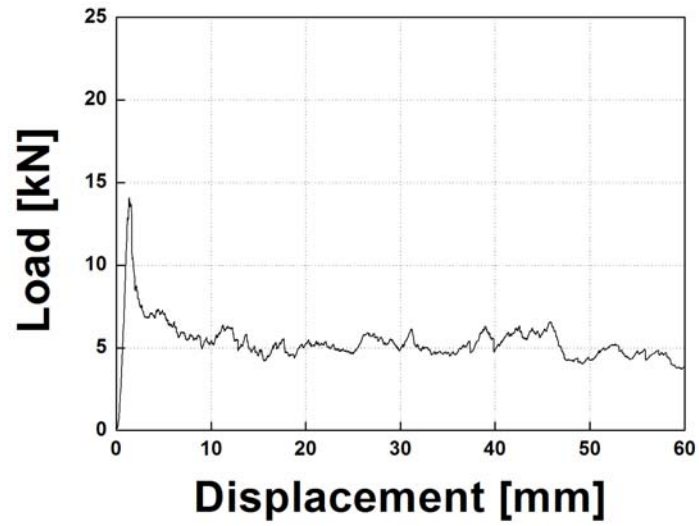


Fig. 27 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[90 / 0]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 27 Collapse processing of specimen 80H, $[90 / 0]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)

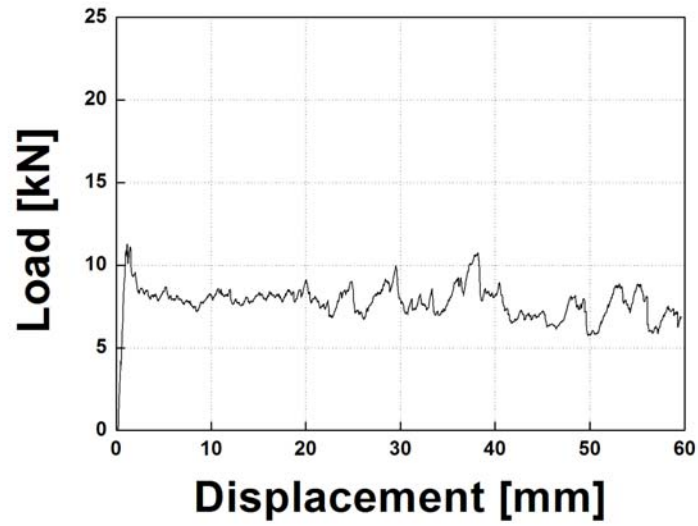


Fig. 28 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[90 / 0]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 28 Collapse processing of specimen 80H, $[90 / 0]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)

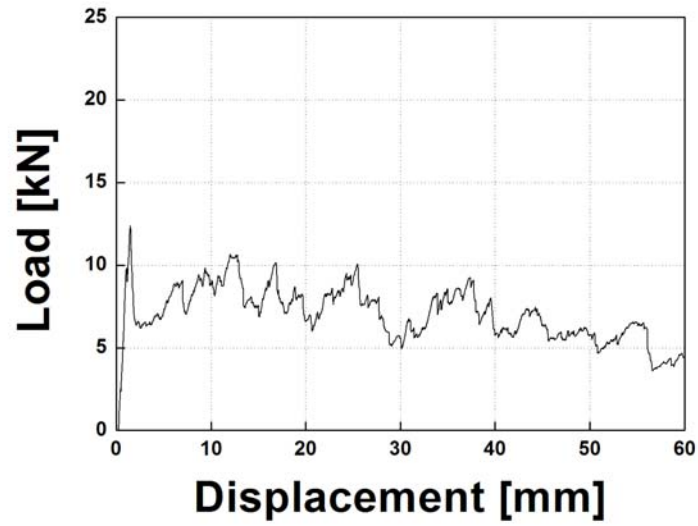


Fig. 29 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[0 / 90]_4$
 (Static, 7 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 29 Collapse processing of specimen 80H, $[0 / 90]_4$
 (Static, 7 interface number)

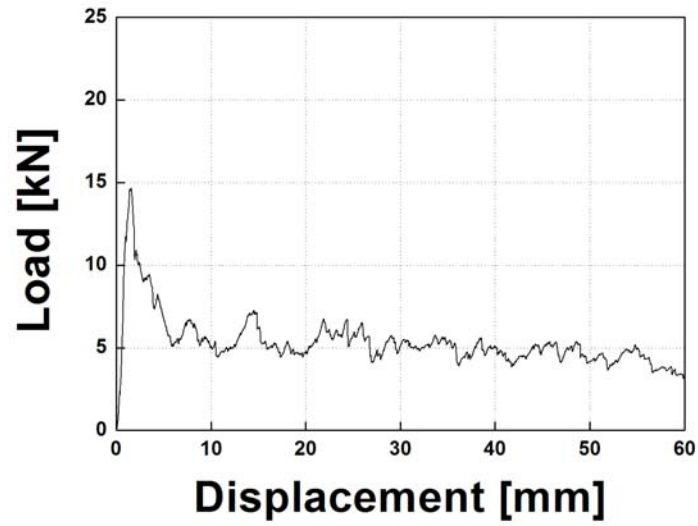


Fig. 30 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[0_2 / 90_2]_s$
 (Static, 2 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 30 Collapse processing of specimen 80H, $[0_2 / 90_2]_s$
 (Static, 2 interface number)

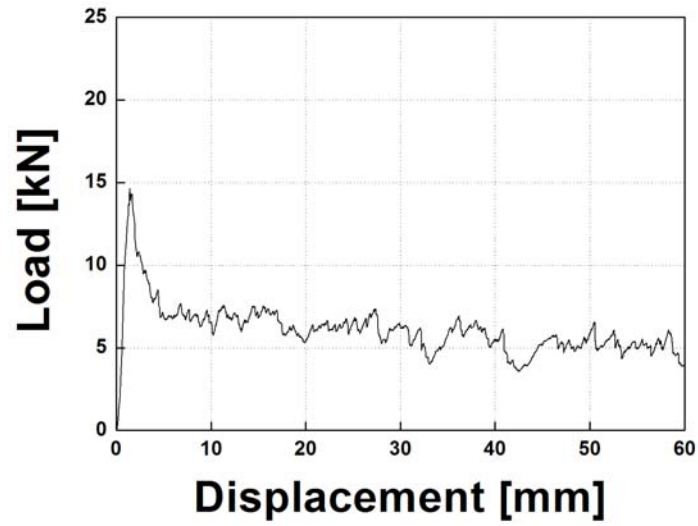


Fig. 31 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[90_2 / 0_2]_2$
 (Static, 3 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 31 Collapse processing of specimen 80H, $[90_2 / 0_2]_2$
 (Static, 3 interface number)

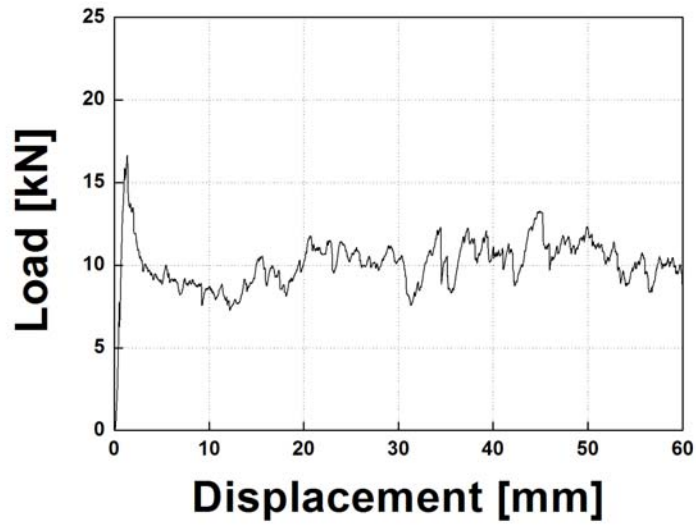


Fig. 32 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[0 / 90]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 32 Collapse processing of specimen 80H, $[0 / 90]_{s2}$
 (Static, 4 interface number)

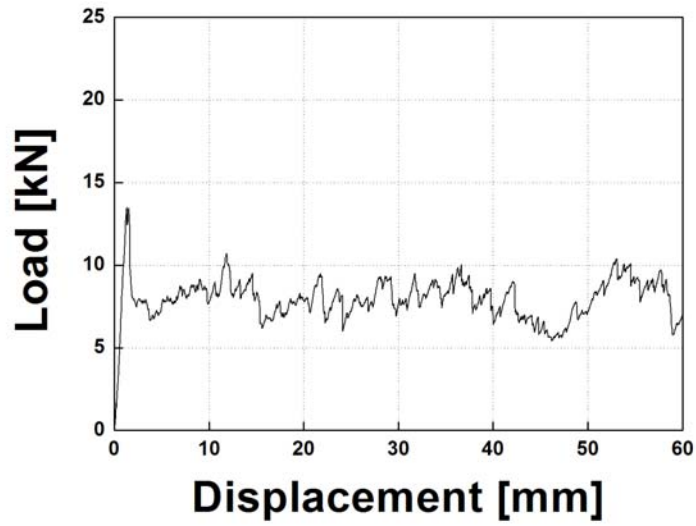


Fig. 33 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[0 / 90]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 33 Collapse processing of specimen 80H, $[0 / 90]_{2s}$
 (Static, 6 interface number)

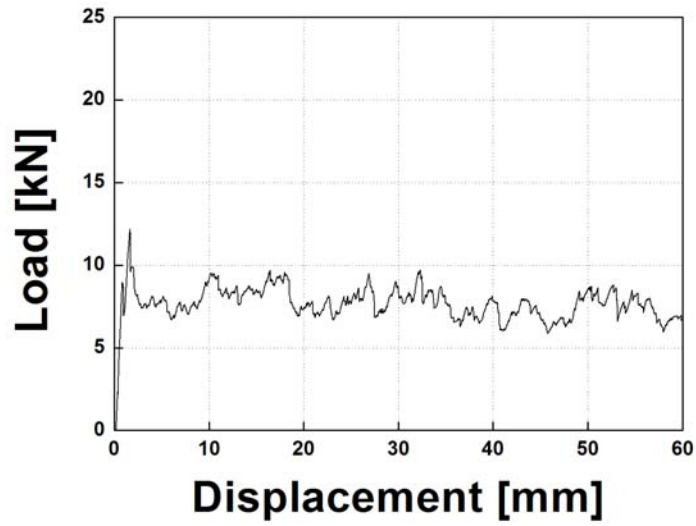


Fig. 34 Load-Displacement curve of specimen 80H, $[90 / 0]_4$
 (Static, 7 interface number)



(a) $\delta = 0\text{mm}$ (b) $\delta = 10\text{mm}$ (c) $\delta = 20\text{mm}$ (d) $\delta = 40\text{mm}$ (e) $\delta = 60\text{mm}$

Photo. 34 Collapse processing of specimen 80H, $[90 / 0]_4$
 (Static, 7 interface number)

제 5 장 결과 및 고찰

제 1 절 온도변화에 따른 수분 흡수 거동

60℃와 80℃의 온도변화에 따른 흡습조건하에서 CFRP 모자형 단면부재의 흡습률을 측정해본 결과 온도가 높을수록 초기 흡습률이 급격하게 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며, 식 (6)을 이용하여 시험편의 내부의 수분이 포화상태가 도달했다고 판단 될 때 흡습 실험을 종료 하였다. 또한 시간이 경과되면서 대부분의 시험편에서의 수분흡수는 일정하게 점차 완화된 을 알 수 있었다.

60℃와 80℃의 온도변화를 갖는 흡습조건하에서 CFRP 모자형 단면부재의 흡습률을 비교해본 결과 모든 시험편에서 시험편의 섬유방향에 수분에 노출되는 방향으로 0°의 섬유배향을 가질 때 수분의 흡수가 이루어짐을 알 수 있었으며, 시험편 적층 시 0°와 90°로 적층되는 조건에 따라서 그 흡습률의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

항온수조를 이용하여 매 72시간 간격으로 시험편의 흡습률을 측정한 결과를 비교해본 결과 온도가 높을수록 초기 흡습률이 급격하게 증가함을 알 수 있었고, 또한 포화상태에 도달하는 시간이 60℃의 온도에 비해서 80℃의 온도에서 포화상태가 약 700시간 빠르게 도달 함을 알 수 있었다. 그리고 시험편간 적층시 90°와 0°의 적층구성에 따라서 그 흡습률의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

60℃와 80℃의 온도변화에 따른 흡습조건하에서의 적층구성의 변화를 갖는 시험편의 축방향을 중심으로 최외각층 90°와 0°의 조건에 따른 흡습률을 고찰하고자 계면수 변화에 대한 흡습거동을 살펴 보았다.

흡습거동을 파악하기 위하여 매 측정시마다 흡습된 시험편의 무게 및 흡습률의 증가를 시험편 내부의 흡습거동으로 파악 하고 흡습 증가의 그래프로 나타 냈다.

Fig. 35 ~ Fig. 36은 60℃의 온도를 갖는 흡습조건하에서의 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 시험편이 포화상태에 도달 했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 흡습률 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Fig. 37 ~ Fig. 38은 80℃의 온도를 갖는 흡습조건하에서의 최외각층 90° 와 0° 의 의 조건을 갖는 시험편이 포화상태에 도달 했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 흡습률 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Fig. 39 ~Fig. 40은 온도변화에 따른 최외각층 90° 와 0° 의 조건을 갖는 계면수간의 흡습률 차이를 비교한 그래프이다

Table. 5는 60℃와 80℃의 온도변화에 따른 최외각층 90° 와 0° 의 조건을 갖는 계면수간의 흡습률을 나타냈다.

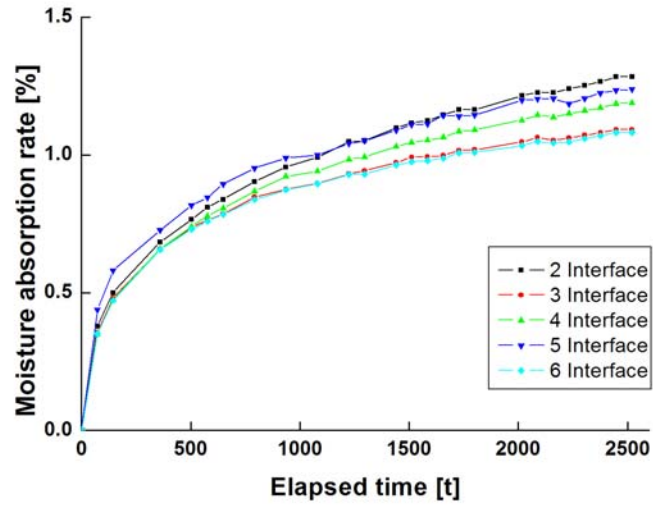


Fig. 35 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 90° (60°C)

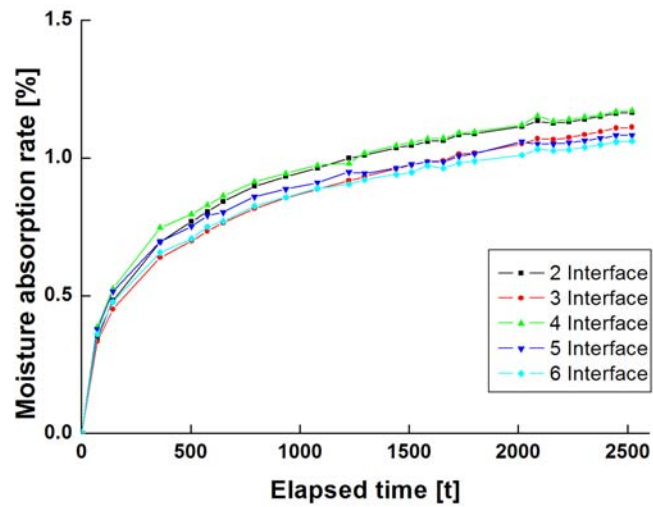


Fig. 36 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 0° (60°C)

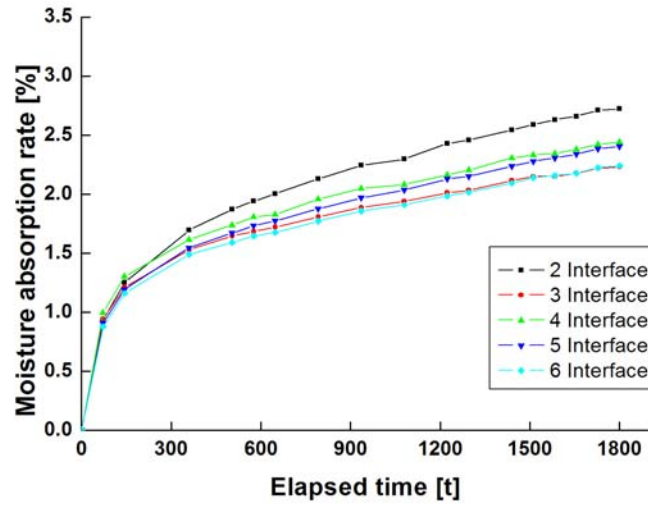


Fig. 37 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 90° (80°C)

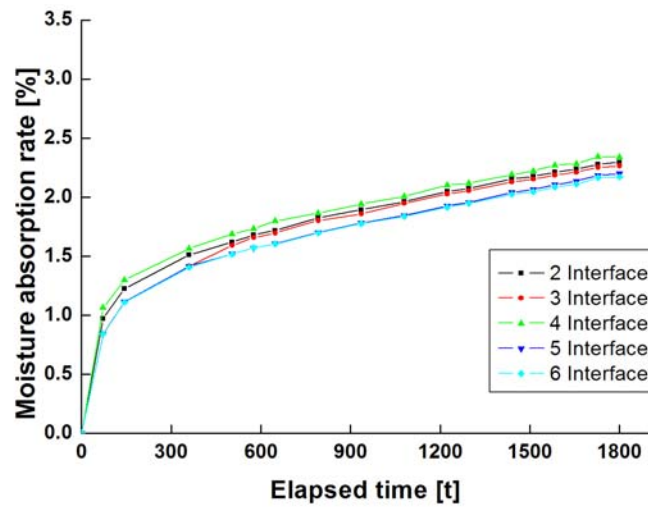


Fig. 38 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat shaped sectional members outer angle 0° (80°C)

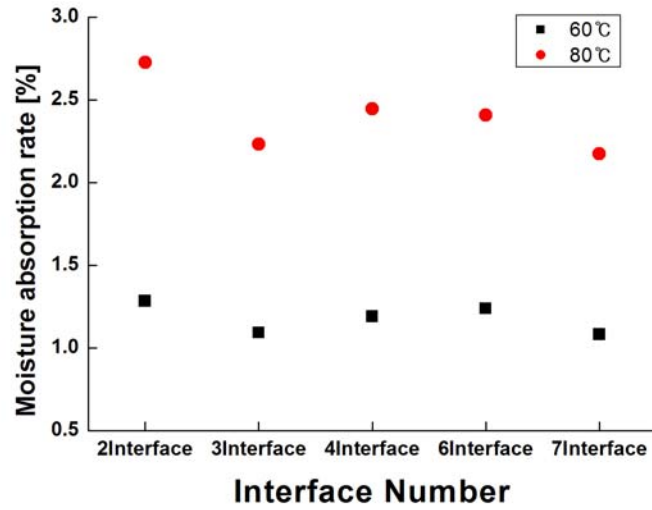


Fig. 39 Moisture absorption rate of CFRP hat shaped sectional members for variation of outer angles 90°

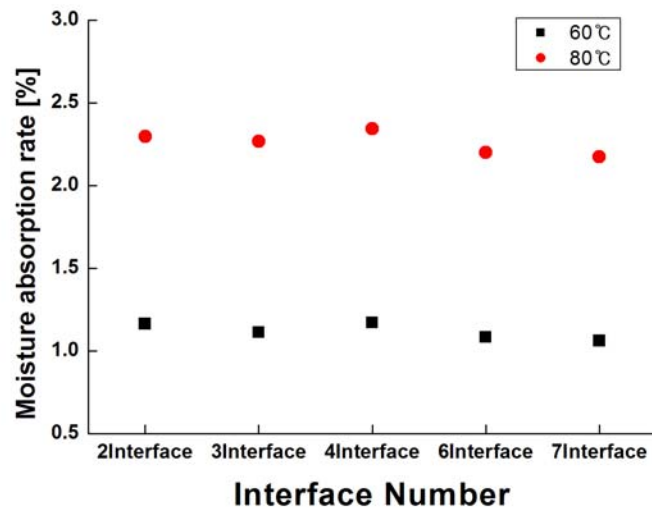


Fig. 40 Moisture absorption rate of CFRP hat shaped sectional members for variation of outer angles 0°

Table. 5 Temperature changes of Moisture absorption rate of CFRP hat shaped sectional members
(interface number)

60°C					
Specimen		M [%]	Specimen		M [%]
2	Outer angle 90°	1.283	2	Outer angle 0°	1.163
3		1.091	3		1.111
4		1.189	4		1.170
6		1.237	6		1.082
7		1.081	7		1.060
80°C					
Specimen		M [%]	Specimen		M [%]
2	Outer angle 90°	2.725	2	Outer angle 0°	2.296
3		2.232	3		2.266
4		2.444	4		2.342
6		2.406	6		2.199
7		2.243	7		2.173

Fig. 35 ~ Fig. 40 에서 각각 온도의 구간별 흡습률 및 증가 결과를 살펴본 결과, 실험 초기부터 흡습률이 60°C 와 80°C 모두 초기 흡습률이 급격하게 증가 하는 것을 알 수 있었으며, 80°C 에서는 포화상태까지 도달하는 시간이 60°C 에서 보다 약 28% 빠르게 나타남을 알 수 있었다.

60°C에서는 약 0.5%가 될 때까지 수분의 흡수가 급격하게 증가함을 알 수 있었으며 시간은 약 200시간이 경과가 되었다. 이후 1.0% 까지 시간은 약 1500시간이 경과 되면서 흡습률의 증가가 완만해짐을 알 수 있었으며 흡습률 증가 약 2500시간이 경과되면서 모든 시험편에서 흡습률의 증가가 거의 일정하게 나타나면서 포화상태에 도달함을 알 수 있었다.

80°C에서는 1.0%가 될 때까지 수분의 흡수가 급격하게 증가함을 알 수 있었으며 시간은 약 130시간이 경과 되었다. 이후 수분의 흡수가 초기 흡습률 보다 낮게 나타났으며 1.5%까지 약 400시간이 경과 되고 점차 수분의 흡수가 둔화 되면서 약 1800시간 경과되면서 모든 시험편에서의 흡습률의 증가가 거의 일정하게 나타나면서 포화상태에 도달함을 알 수 있었다.

각각의 시험편 내부에 수분이 포화상태가 되는 시점까지 흡습률을 측정한 결과 적층구성과 온도에 따라 흡습률의 차이가 나타남을 알 수 있었다.

60°C와 80°C 모두 최외각층 90° 의 조건을 갖는 2계면의 시험편에서 흡습률의 증가치가 가장 높음을 알 수 있었다. 이는 수분이 흡수가 되는 0° 방향의 섬유배향이 시험편 단면 부분에서는 시험편의 표면과 안쪽에 4ply로 두겹게 적층되어 있고 플렌지 부분에서는 시험편 표면에 가깝게 4ply씩 적층되어 있기 때문에 그 흡습률 또한 다른 시험편들에 비해 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 이와 반대로 같은 적층구성이지만 적층순서를 달리한 최외각층 0° 의 조건을 갖는 2계면 시험편의 경우 0° 방향의 섬유배향이 시험편 단면부분에서는 모자형과 평판형의 중심에 위치하면서 시험편 표면과는 멀리 떨어져 있기 때문에 그 흡습률 차이가 발생한 것으로 사료된다.

또한 최외각층 0° 의 조건을 갖는 3계면의 시험편에서의 흡습률이 높음을 알 수 있었다. 이는 시험편 단면부분에는 0° 방향의 섬유배향이, 플렌지 부분에서는 90° 방향의 섬유배향이 시험편 안쪽과 표면에 집중됨으로써 수분의 흡수가 유리하였다고 사료된다.

따라서 흡습실험 후 시험편 내부의 수분흡습거동을 알아본 결과 온도가 높을수록, 계면수가 적을수록, 적층된 0° 방향 계면의 두께가 두꺼울수록, 0° 방향 계면이 시험편 표면층에서 가까울수록 흡습률의 증가가 크고 포화상태로 판단되는 시점까지의 수분흡수 시간은 점차 감소됨을 알 수 있었다.

제 2 절 압케 Mode

60℃와 80℃의 흡습 시험편과 무흡습 시험편에 대해 정적 압케실험을 실시한 결과 다음과 같은 Photo. 35 ~ Photo. 40의 압케형상을 얻을 수 있었다.

정적압케 실험 시 일률적이고 안정적인 압케데이터를 얻기 위하여 시험편 길이의 60%까지 압케를 실시하였다.

축 압축하중이 작용할 때 발생하는 압케는 Fig. 41의 Farley and Jones^{34~36)}가 정의한 압케 형상과 실제 압케된 형상의 단면부분을 살펴본 결과 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태 등의 압케모드가 나타남을 알 수 있었다.

무흡습 시험편과 온도변화를 달리한 흡습 시험편 모두에서 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 90°인 경우 최외층 ply의 섬유 파단에 의해 높은 압케특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드 및 시험편 모서리의 찢어짐을 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 0°인 경우 최외층 ply 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 압케모드 또한 무흡습 시험편에서 나타났던 취성파괴와 동일함을 알 수 있었다. 하지만 수분의 흡수로 인해 탄소강화섬유와 에폭시 간의 결합력의 약화로 압케 시 취성의 성격을 갖는 섬유의 파괴나 파단보다는 연성의 굽힘과 접힘이 주를 이루는걸 알 수 있었다. 이로 인해 무흡습 시험편보다 안정적인 압케모드가 나타남을 알 수 있었다.

Photo. 35은 최외각층90°를 갖는 무흡의 조건의 계면수 변화 시험편의 압케형상이며, Photo. 36은 최외각층 0°를 갖는 압케형상이다.

Photo. 37은 최외각층90°를 갖는 60℃ 조건의 계면수 변화 시험편의 압케형상이며, Photo. 38은 최외각층 0°를 갖는 압케형상이다.

Photo. 39은 최외각층 90° 를 갖는 80°C 조건의 계면수 변화 시험편의 압궤형상이며, Photo. 40은 최외각층 0° 를 갖는 압궤형상이다.

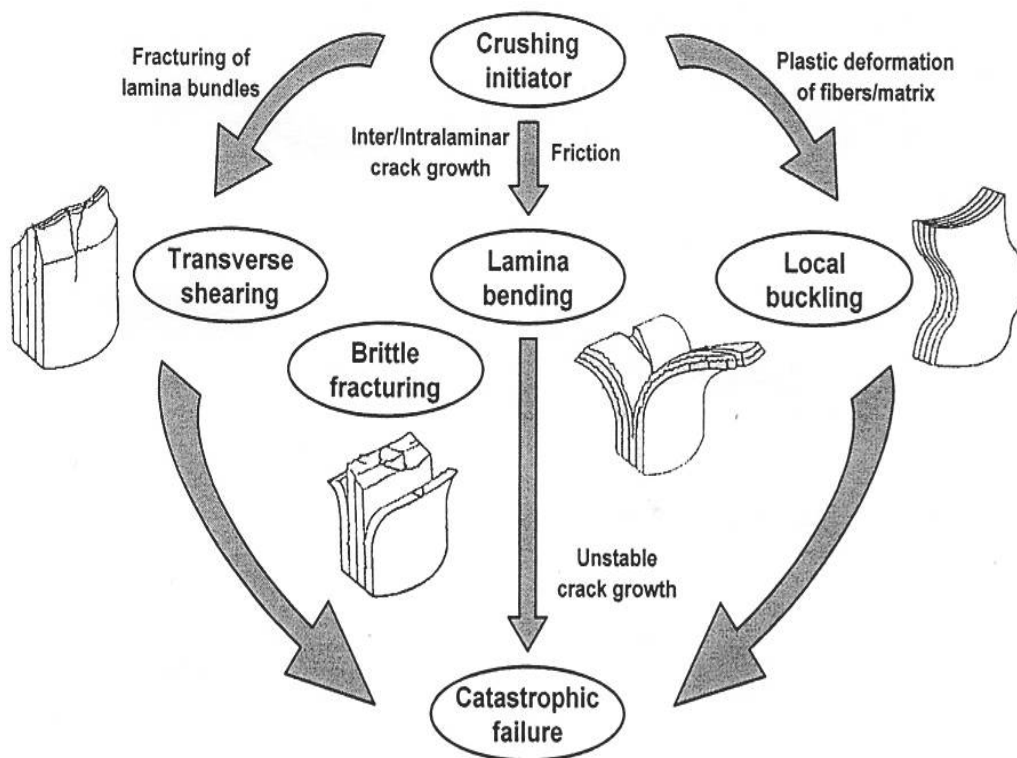


Fig. 41 Crushing process of continuous fiber reinforced composite tubes



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 35 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members
(static, NH specimen, outer angle 90°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 36 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members
(static, NH specimen, outer angle 0°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 37 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members
(static, 60H specimen, outer angle 90°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 38 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members
(static, 60H specimen, outer angle 0°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 39 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members
(static, 80H specimen, outer angle 90°)



2 interface



3 interface



4 interface



6 interface



7 interface

Photo. 40 Collapsed shaped of CFRP hat shaped sectional members
(static, 80H specimen, outer angle 0°)

제 3 절 온도변화에 따른 흡습조건하에서 압괴특성

CFRP 복합재 내부에 수분이 흡수되었을 경우 정적하중하에서의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 얻을 수 있었으며, 최외각층 90° 와 0° 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 그리고 7계면 시험편을 무흡습 시험편과 60℃와 80℃의 시험편으로 분류한 후 정적 압괴실험 후 흡습에 따른 강도저하와 온도변화에 따른 강도저하를 고찰 하였다.

Figs. 42 ~ 44는 최외각층 90° 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 그리고 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Table. 6은 압괴실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

Figs. 45 ~ 47는 최외각층 0° 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈으며, Table. 7은 압괴실험 후 얻은 데이터를 나타냈다.

Table. 8은 최외각층 90° 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 그리고 7계면 시험편의 온도변화에 따른 강도 저하율의 데이터를 나타냈다.

Table. 9은 최외각층 0° 의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 그리고 7계면 시험편의 온도변화에 따른 강도 저하율의 데이터를 나타냈다.

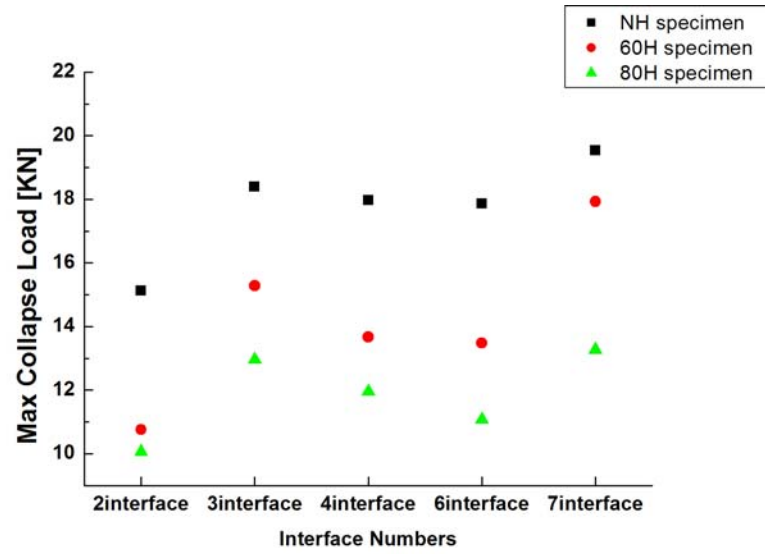


Fig. 42 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

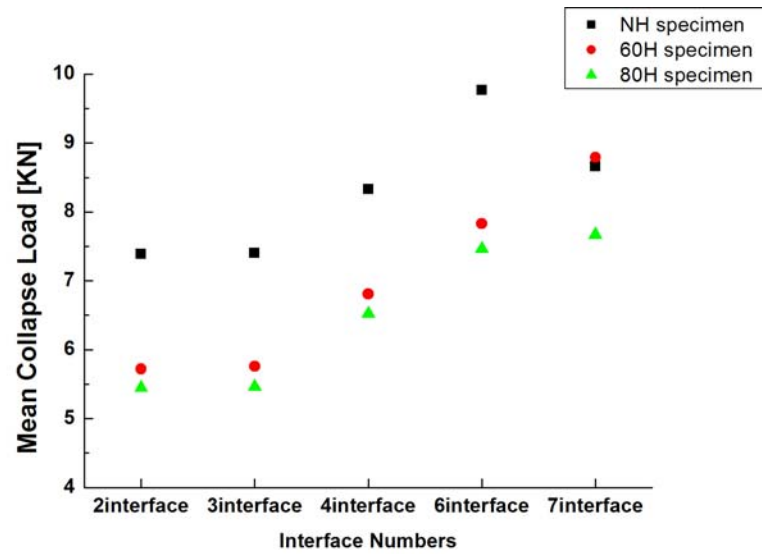


Fig. 43 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

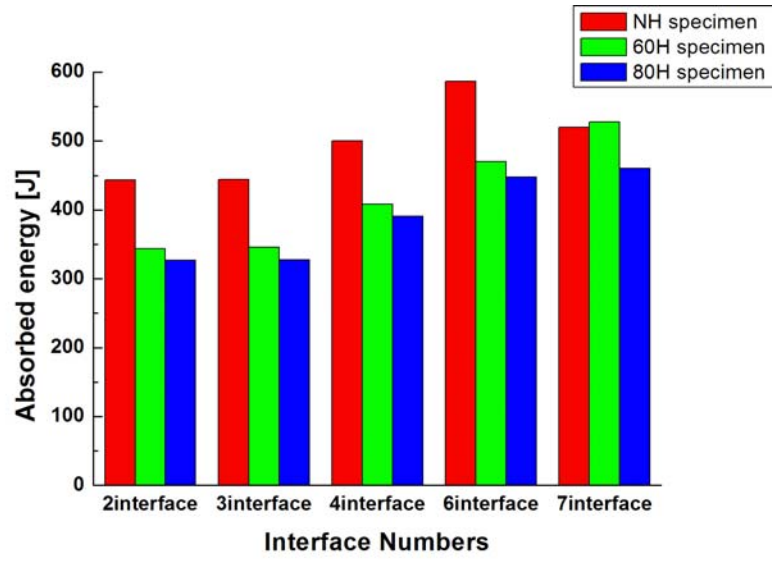


Fig. 44 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 90°)

Table. 6 Static collapse experiment results of changes of temperature specimens (outer angle 90°)

NH specimen				
Specimen		F _{max} [kN]	F _{mean} [kN]	E _T [J]
2	Outer angle 90°	15.13	7.39	443.41
3		18.39	7.40	443.91
4		17.97	8.33	499.89
6		17.86	9.77	586.44
7		19.53	8.66	519.59
60H specimen				
Specimen		F _{max} [kN]	F _{mean} [kN]	E _T [J]
2	Outer angle 90°	10.76	5.72	343.44
3		15.28	5.76	345.92
4		13.67	6.81	408.48
6		13.48	7.83	469.69
7		17.93	8.79	527.64
80H specimen				
Specimen		F _{max} [kN]	F _{mean} [kN]	E _T [J]
2	Outer angle 90°	10.06	5.45	326.96
3		12.96	5.46	327.77
4		11.95	6.52	390.99
6		11.07	7.46	447.88
7		13.27	7.67	460.02

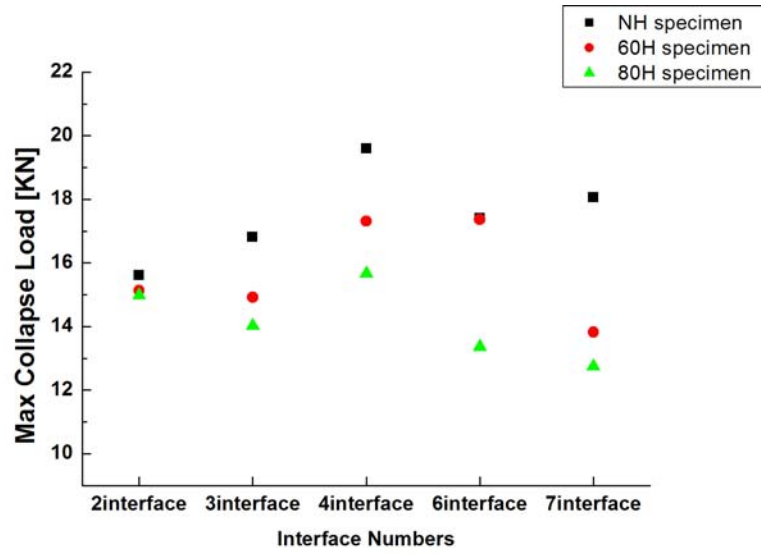


Fig. 45 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

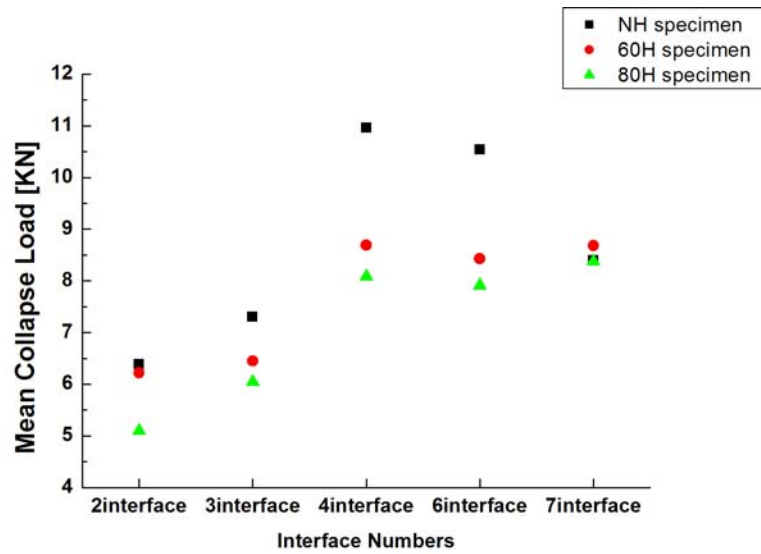


Fig. 46 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

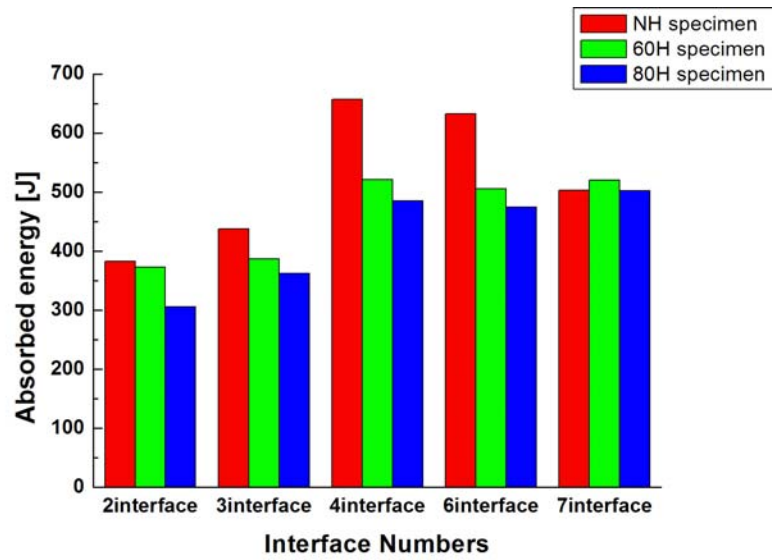


Fig. 47 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 0°)

Table. 7 Static collapse experiment results of changes of temperature specimens (outer angle 0°)

NH specimen				
Specimen		F_{\max} [kN]	F_{mean} [kN]	E_T [J]
2	Outer angle 0°	15.61	6.38	383.04
3		16.81	7.30	437.99
4		19.59	10.96	657.36
6		17.40	10.54	632.70
7		18.06	8.40	503.48
60H specimen				
Specimen		F_{\max} [kN]	F_{mean} [kN]	E_T [J]
2	Outer angle 0°	15.13	6.22	373.29
3		14.92	6.45	387.08
4		17.31	8.69	521.70
6		17.37	8.43	505.70
7		13.82	8.68	520.65
80H specimen				
Specimen		F_{\max} [kN]	F_{mean} [kN]	E_T [J]
2	Outer angle 0°	14.98	5.10	305.79
3		14.02	6.04	362.45
4		15.66	8.08	485.00
6		13.36	7.91	474.94
7		12.74	8.37	502.27

Table. 8 Collapse of temperature condition rate of NH specimen and
hygrothermal specimens (outer angle 90°)

Interface number		Max load [KN]	Decrease [%]	Mean load [KN]	Decrease [%]	Energy [J]	Decrease [%]
2	NH	15.13		7.39		443.41	
	60°C	10.76	40.54	5.72	29.12	343.44	29.10
	80°C	10.06	50.37	5.45	35.68	326.92	35.63
3	NH	18.39		7.40		443.91	
	60°C	15.28	20.36	5.76	28.38	345.92	28.32
	80°C	12.96	41.82	5.46	35.49	327.77	35.43
4	NH	17.97		8.33		499.89	
	60°C	13.67	31.40	6.81	22.43	408.48	22.37
	80°C	11.95	50.32	6.52	27.90	390.99	27.85
6	NH	17.86		9.77		586.44	
	60°C	13.48	32.53	7.83	24.87	469.69	24.85
	80°C	11.07	61.30	7.46	30.95	447.88	30.93
7	NH	19.53		8.66		519.59	
	60°C	17.93	8.89	8.79	-1.46	527.64	-1.52
	80°C	13.27	47.21	7.67	13.05	460.02	12.95

Table. 9 Collapse of temperature condition rate of NH specimen and hygrothermal specimens(outer angle 0°)

Interface number		Max load [KN]	Decrease [%]	Mean load [KN]	Decrease [%]	Energy [J]	Decrease [%]
2	NH	15.61		6.38		383.04	
	60℃	15.13	3.21	6.22	2.62	373.29	2.61
	80℃	14.98	4.25	5.10	25.28	305.79	25.26
3	NH	16.81		7.30		437.99	
	60℃	14.92	12.66	6.45	13.18	387.08	13.15
	80℃	14.02	19.83	6.04	20.87	362.45	20.84
4	NH	19.59		10.96		657.36	
	60℃	17.31	13.18	8.69	26.04	521.70	26.00
	80℃	15.66	25.11	8.08	35.57	485.00	35.53
6	NH	17.40		10.54		632.70	
	60℃	17.37	0.19	8.43	25.07	505.70	25.11
	80℃	13.36	30.28	7.91	33.18	474.94	33.21
7	NH	18.06		8.40		503.48	
	60℃	13.82	30.70	8.68	-3.22	520.65	-3.29
	80℃	12.74	41.73	8.37	0.32	502.27	0.24

무흡습 시험편과 흡습 시험편의 강도저하를 고찰한 결과 60℃에서 흡습된 CFRP 적층재의 최외각 90° 를 갖는 시험편의 경우 흡습률이 가장 높았던 순으로 2계면, 6계면 및 4계면 시험편의 최대하중은 현저하게 저하되는 것을 알 수 있었으며, 흡습률이 가장 낮았던 7계면 시험편의 경우 최대하중의 저하는 가장 적게 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분이 계면간의 결합력과 수지와 섬유와의 결합력을 약화시킴으로써 압축실험 초기 나타나는 최대하중에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

최외각 0° 를 갖는 시험편의 경우도 흡습률이 가장 높았던 4계면의 시험편의 최대하중이 최대하중이 저하되는 것을 알 수 있었으나, 7계면의 시험편의 경우 흡습률에 의해서보다 축방향으로 하중을 받는 계면의 수가 증가 함으로 인해 저하가 심하게 나타난 것으로 사료가 된다.

80℃에서 흡습된 CFRP 적층재의 최외각 90° 를 갖는 시험편 경우 모든 시험편이 50% 내외의 근접한 최대하중의 저하가 나타났지만 60℃의 온도조건을 갖는 시험편과 비슷한 저하경향이 나타남을 알 수 있었다. 최외각 0° 를 갖는 시험편은 계면수가 증가함에 따라 저하가 되는 경향이 나타났다.

평균하중과 흡수에너지에서는 최대하중과는 달리 흡습률의 영향보다는 계면특성에 따른 경향이 나타남을 알 수 있었다. 무흡습의 시험편에서는 계면수가 증가함에 따라 평균하중과 흡수에너지는 증가하다 7계면 시험편에 도달해서는 감소하는 경향이 나타났지만 흡습 시험편에서는 온도의 변화와 상관 없이 계면수가 증가함에 따라 점차 평균하중과 흡수에너지는 증가하는 것을 알 수 있었다. 무흡습 시험편과 가장 큰 차이점으로는 7계면 시험편에서의 경우 계면간의 열화현상으로 인해 결합력 약화로 인하여 파괴가 아닌 굽힘에 따라 강도가 증가하는 경향이 나타난 것으로 사료가 된다.

60℃의 온도조건을 갖는 CFRP 적층재 시험편의 강도와 80℃의 온도조건을 갖는 CFRP 적층재 시험편의 강도는 60℃와 80℃ 온도조건에 따라 80℃의 경우가 60℃에서 흡습된 경우보다 약 5% 이상 강도 저하현상이 나타났다. 특히 60℃의 온도조건에서는 흡습률이 증가가 가장 적게 나타난 7계면의 시험편의 경우 80℃의 온도조건에서 흡습률이 증가함에 따라 최대하중의 저하는 크게 나타남을

알 수 있었다. 평균하중과 흡수에너지는 온도가 증가함에 따라 대부분의 시험편에서 약 5%의 강도저하가 나타남을 알 수 있었으며 4계면 시험편은 높은 흡습률에 비해 가장 낮은 강도저하가 나타났다. 단 7계면 시험편의 경우 60℃의 온도조건에서의 무흡습 시험편보다 증가하는 평균하중과 흡수энер지를 보인바 80℃의 온도조건에서는 그 저하치가 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 최외각 0° 를 갖는 모든 시험편들은 5%내외의 강도저하가 나타남을 알 수 있었다.

따라서 흡습에 의한 강도저하는 온도가 높을수록 크게 나타남을 알 수 있었으며, 특히 최대하중에서는 온도의 변화와 흡습률 증가에 따라 강도저하가 매우 크게 나타남을 알 수 있었다.

제 6 장 결 론

본 연구를 통해 차량용 구조부재로 사용되고 있는 모자형 단면부재의 형상으로 온도변화에 따른 흡습조건하에서의 장시간 노출되었을 때의 수분 흡습 거동을 살펴보고, 그에 따라 CFRP 모자형 단면부재가 축방향의 하중을 받을 때의 온도변화에 따른 강도 저하를 고찰해 보았다. 차량용 구조부재의 기본 형상인 CFRP 모자형 단면부재의 최외각층 계면수의 변화에 따라 압괴실험을 실시하여 최대하중, 에너지 흡수 능력 및 압괴형상 비교를 통해 안전성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 온도변화에 따른 CFRP 모자형 단면부재의 흡습 실험을 실시한 결과 초기 60℃에서는 초기 흡습률이 약 0.5%까지 급격하게 증가 하였고, 80℃에서는 약 1.0% 까지 급격하게 증가 함을 알 수 있었다. 그 이 후 흡습률이 둔화되면서 60℃에서는 약 2500시간, 80℃에서는 약 1800시간에 도달 했을 때 모든 시험편들이 포화상태에 도달 함을 알 수 있었다.
2. CFRP 모자형 단면부재의 시험편 내부의 수분흡습 거동은 온도가 높을수록, 계면수가 적을수록, 0° 방향의 계면의 두께가 두꺼울수록, 0° 방향 계면이 시험편 표면층에 가까울수록 흡습률의 증가가 크고 포화상태에 도달하는 시점까지의 수분흡수 시간은 점차 감소됨을 알 수 있었다.
3. 무흡습 시험편과 온도변화에 따른 흡습 시험편 모두에서 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었다. 하지만 흡습 시험편에서는 수분의 흡수로 탄소강화섬유와 에폭시 간의 열화현상으로 인해 결합력의 약화되며 이로 인해 안정적인 압괴모드를 이루는 것을 알 수 있었으며 60℃, 80℃에서 흡습된 CFRP 부재 모두 거의 비슷한 압괴 Mode를 나타냈다.

4. 정적압괴실험을 통해 온도변화에 따른 강도 저하를 비교해 본 결과 흡습온도가 높을수록 강도저하가 크게 나타남을 알 수 있었고, 특히 무흡습 CFRP 구조부재에 비해 60℃에서 흡습된 경우는 약 40%정도 저하하였고 80℃에서 흡습된 경우는 약 50%정도 저하 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Jcantwell W. J. and Morton J., 1985, "Detection of Impact Damage in CFRP Laminates", Composite Structures, Vol. 3, pp. 241~257.
2. Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H. and Park, G. G.. 2002, "Light weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments", Transactions of KSAE 10: pp. 125~132.
3. 이상관. "복합재료 응용" 『기계저널 제39권 제2호』, 31~36, 1997
4. 한국자동차공학회. "2030년 자동차 기술 전망(16)" 『오토저널 제 34권 11호』, 41~49, 2012
5. 이영신, 전병희, 오재문. "복합재료 원통셸의 진동, 좌굴강도, 충격강도 특성 및 그의 설계최적화에 관한 연구." 한국자동차공학회 논문집 5: 48~69, 1997
6. S. Tashiro, A. Yokoyama, H. Hamada. "Numerical Method of Impact Deformation and Failure in Composite Tubes." JSMS Composites-27: 297~298, 1998
7. 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.
8. 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.
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 II - Impact Energy Absorption", Journal of Composites Technology & Research, Vol. 17, No. 1, pp. 11~16, 1995.
10. Weitsman Y. : Moisture in Composites : Sorption and Damage, Fatigue

- of Composite Materials, © Elsevier Science Publishers B. V., pp. 384~429, 1990.
11. Greszczuk L. B. and Chao H., "Impact Damage in Graphite Fiber Reinforced Composite", pp. 389~408, 1997.
 12. Chllenger K. D., "The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composite", A Workshop Summary, Composite Structure, 6, pp. 295~318, 1986.
 13. 김혁, 한길영, 이동기, "수분흡수가 섬유강화 고분자 복합판의 기계적 성질에 미치는 영향" 조선대학교 생산기술연구 Vol. 17, No. 1, pp. 113~129, 1995.
 14. B.C. Ray, "Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites", Journal of Colloid and interface Science 298, pp. 111~117, 2006.
 15. 윤성호, 황영은, 김정석, 윤혁진, Michael R. Kessler, "염수환경에 노출된 철도차량용 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성 평가", 한국철도학회논문집, Vol. 11, No. 4, pp. 357~363, 2008.
 16. 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, 김동훈, "섬유강화 복합재료의 전단강도에 미치는 흡습의 영향", 한국복합재료 학회지 Vol. 21, No. 2, pp. 1~7. 2008.
 17. Chamis C. C., "Fracture and Fatigue Composite Materials" , Academic Press, New York, Vol. 5, pp. 94, 1974.
 18. Cantwell W. J., "An Assessment of the Impact Performance of CFRP Reinforced with High Strain Carbon Fibers" , Composites Science and Technology, Vol. 25, 1986.
 19. 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.

20. Tratt M. D., "Analysis of Delamination Growth in Compressively Loaded Composite Laminates", Composite Materials : Fatigue and Fracture, ASTM STP 1110, Vol. 3, pp. 359 ~ 372, 1991.
21. 임광희, "CFRP 적층판의 충격손상과 열습효과가 잔류굽힘 피로강도에 미치는 영향", 조선대학교 박사학위논문, 1996
22. 정종안, "CFRP 적층판의 충격손상과 잔류강도에 미치는 고온 및 열습 영향", 조선대학교 박사학위논문, 1995
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 박정수, "고온에서 횡충격을 받는 CFRP 적층판의 충격손상과 잔류 굽힘강도에 관한 연구." 조선대학교 박사학위논문, 1993
29. Jung, J. A, Yang, I. Y., 1996, "Impact Damages and Residual Strength

- of CFRP Laminates under the Hygrothermal Environment", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers (A), Vol. 20, No. 12, pp. 3748~3758
30. Ishai O. and Aron V., "Instantaneous Effect of Internal Moisture Conditions on Strength of Glass-Fiber-Reinforced Plastics" , ASTM, pp. 267 ~ 276, 1978.
 31. H. Shen and G. S. Springer, "Effects of Moisture and Temperature on The Tensile Strength of Composite Materials" , Journal of Composite Material, Vol. 2, pp. 2 ~ 16, 1976.
 32. J. M. Whitney, I. M. Daniel and R. B. Pipes, "Experimental Mechanics of Fiber" , Experimental Techniques, Vol. 7, No. 3, pp. 25
 33. J. Tomblin, W. Seneviratne, J. Mckenna, and Y. Ng., 2001, "B-Basis Design Allowables for 2x2 Biaxially Braided RTM Composite Material Systems", National Institute for Aviation Research Wichita State University
 34. G. L. Farley, R. M. Jones, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes" , Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp. 37 ~ 50, 1992.
 35. G. L. Farley, R. M. Jones, "Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy-Absorption Capability of Composite Tubes" , Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp. 78 ~ 89, 1992.
 36. G. L. Farley, R. M. Jones, "Crushing Characteristics of Composite Tubes with Near-Elliptical Cross sectionals" , Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp. 1741 ~ 1751, 1992.