



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 2월
석사학위논문

경량화용 모자형 CFRP 차체부재 의 정적 축압축강도

조선대학교 산업기술융합 대학원

융합자동차공학과

선민수

경량화용 모자형 CFRP 차체부재의 정적 축압축강도

The Axial Compression Strength of CFRP Hat Member for
Lightweight Structural Materials

2017 년 2 월 25 일

조선대학교 산업기술융합 대학원

융합자동차공학과

선 민 수

경량화용 모자형 CFRP 차체부재 의 정적 축압축강도

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2016 년 10 월

조 선 대 학 교 산업기술융합 대 학 원

융합자동차공학과

선 민 수

목 차

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| LIST OF TABLES | i |
| LIST OF FIGURES | ii |
| LIST OF PHOTOGRAPHS | iv |
| ABSTRACT | v |
| | |
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 제 1 절 연구배경 | 1 |
| 제 2 절 연구목적 및 연구방법 | 4 |
| | |
| 제 2 장 압괴이론 | 6 |
| 제 1 절 복합 박육부재의 압괴모드 | 6 |
| 제 2 절 복합 박육부재의 압괴이론 | 12 |
| | |
| 제 3 장 실험방법 | 17 |
| 제 1 절 시험편 제작 | 17 |
| 제 2 절 열습실험 | 23 |
| 제 3 절 정적압괴실험 | 26 |
| | |
| 제 4 장 실험결과 | 28 |
| 제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 흡습거동 | 28 |
| 제 2 절 CFRP 모자형 단면부재의 정적압괴실험 결과 | 31 |
| | |
| 제 5 장 실험 결과 및 고찰 | 35 |
| 제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 축압축강도 | 35 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 압괴모드 | 41 |
| 제 6 장 결 론 | 47 |
| 참 고 문 헌 | 49 |

LIST OF TABLES

| | |
|---|----|
| Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet | 18 |
| Table 2 Types of CFRP hat-shaped sectional members | 19 |
| Table 3 Symbols of CFRP hat shaped members (interface specimen) · | 22 |

LIST OF FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. 1 The key factors of CFRP laminates | 2 |
| Fig. 2 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes | 7 |
| Fig. 3 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode | 8 |
| Fig. 4 Sketch of crack propagation modes | 8 |
| Fig. 5 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode | 9 |
| Fig. 6 Friction related energy-absorption mechanisms | 10 |
| Fig. 7 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode..... | 11 |
| Fig. 8 Crushing characteristics of local buckling crushing mode..... | 11 |
| Fig. 9 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load..... | 14 |
| Fig. 10 Shape of CFRP hat-shaped sectional member..... | 18 |
| Fig. 11 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°) | 20 |
| Fig. 12 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°) | 21 |
| Fig. 13 Curing cycle of CFRP hat-shaped sectional members | 23 |
| Fig. 14 Dimensions of hot waterbath | 24 |
| Fig. 15 Load-displacement curve of collapsed specimens | 27 |
| Fig. 16 Moisture absorption rate of the CFRP hat shaped section members (outer 90°) | 29 |
| Fig. 17 Moisture absorption rate of the CFRP hat shaped section members (outer 0°) | 29 |

| | |
|---|----|
| Fig. 18 Moisture absorption rate of the CFRP hat shaped section members according to outer angle | 30 |
| Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90_2/0_2]_S$ (2 interface number) | 31 |
| Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0/90]_4$ (7 interface number) | 32 |
| Fig. 21 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0_2/90_2]_S$ (2 interface number) | 33 |
| Fig. 22 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$ (7 interface number) | 34 |
| Fig. 23 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°) | 35 |
| Fig. 24 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°) | 36 |
| Fig. 25 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°) | 36 |
| Fig. 26 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°) | 37 |
| Fig. 27 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°) | 37 |
| Fig. 28 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°) | 38 |
| Fig. 29 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static, outer angle 90°) | 40 |
| Fig. 30 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static, outer angle 0°) | 40 |

LIST OF PHOTOGRAPHS

| | |
|--|----|
| Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section | 12 |
| Photo. 2 Autoclave | 22 |
| Photo. 3 Hot water bath | 24 |
| Photo. 4 Universal testing machine | 25 |
| Photo. 5 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, [90 ₂ /0 ₂] _s (2 interface number) | 31 |
| Photo. 6 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, [0/90] ₄ (7 interface number) | 32 |
| Photo. 7 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, [0 ₂ /90 ₂] _s (2 interface number) | 33 |
| Photo. 8 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, [90/0] ₄ (7 interface number) | 34 |
| Photo. 9 Fracture sectional of the collapsed specimen | 42 |
| Photo. 10 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 90° , Static) | 43 |
| Photo. 11 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 0° , Static) | 43 |
| Photo. 12 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 90° , Impact) | 45 |
| Photo. 13 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (wet specimen, 7 interface, outer angle 90° , Impact) | 45 |
| Photo. 14 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 0° , Impact) | 46 |
| Photo. 15 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (wet specimen, 7 interface, outer angle 0° , Impact) | 46 |

ABSTRACT

The Axial Compression Strength of CFRP Hat Member for Lightweight Structural Materials

Seon, Min-Soo

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

Dept. of Automotive Engineering

Graduate School of Industrial Technology

The ability to protect passengers on an automobile accident depends on the condition of the collision, structural integrity, etc. The front-end members of vehicles must absorb the impact energy effectively to ensure passenger's safety in front-end collision. Therefore, the designing vehicles should be more concerned on the aspect of securing safety performance, the while, it also should consider reducing weight of vehicle structural member. CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) of the advanced composite materials as structure materials for vehicles, has a widely application in lightweight structural materials of air planes, ships and automobiles because of high strength and stiffness.

However, CFRP composite materials have the weakness in hygrothermal environment and shock resistance. Especially, moisture ingress into composite material under hygrothermal environment can change molecule arrangement and chemical properties. In addition, interface characteristics and component material properties can be degraded.

In the study, experimental investigations are carried out for CFRP side members in order to study the effect of various stacking condition and shape of section in hygrothermal environment. Collapse tests were performed with change of the stacking condition, such as fiber orientation angle, interface

number. Collapse mode and energy absorption characteristics were analyzed.

To understand moisture absorption behavior and strength degradation of CFRP hat-shaped section member by moisture impregnation, moisture absorption test and static/collision collapsing test was conducted.

Following the above study, conclusions are drawn as below;

1. The CFRP side member was collapsed according to the different orientation angles by compounding of the 4 different modes: transverse shearing, laminar bending, brittle fracture, and local buckling. When the fiber orientation angle is small, the member absorbed energy by laminar bending.
2. As the changes of interface number, the moisture absorption behavior showed that the initial moisture absorption rate increased more in case of the CFRP side members with tick fiber direction wich has 2 interface. The moisture absorption rate is very high.
3. For the hygrothermals in CFRP hat side members, at approximately 0.5% ~ 1.0% of moisture absorption rate, Also, The moisture absorption characteristics depend on the stacking sequences in the CFRP hat side members.
4. Collapse shapes for moisture absorbed CFRP hat side members and the one without moisture absorption displayed the weakening of bonding strength between interfaces due to initial deterioration of CFRP. In addition, collapsed shape and mode for moisture absorbed CFRP hat side members exhibited more stabilized collapsing mode. Strength of moisture absorbed CFRP hat side members was reduced by 10% ~ 15% from the one without moisture absorption.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

최근, 탄소섬유강화 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP라 한다)는 각종 산업분야, 스포츠분야, 레저 분야 및 우주항공분야 까지 그 이용이 점차 확대되어가고 있으며 수송기계 분야의 경량화 재료로서 각광을 받고 있다.

또한 항공기의 2차 구조 뿐만 아니라 가혹한 환경하에서 사용되는 1차 구조부재에 이르기 까지 응용분야가 점차 확대되어 자동차, 선박등에도 널리 적용되고 있다.

이와같이 복합재료는 높은 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)을 가지기 때문에 항공우주, 자동차, 해양, 전기전자, 기반 산업뿐만 아니라 스포츠 용품과 의학 산업에 까지 다양한 분야에서 점점 사용이 증가되고 있다. 그러나 복합재료는 외부 물체의 충격에 의한 구조적 특성이 급격히 저하되는 단점이 있으며 이러한 문제점을 개선하려는 연구가 여러 분야에서 진행되고 있다. 특히, 조류충돌, 타이어의 파손 조각에 의한 충격, 지상 이착륙 상태에서의 튕겨져 나온 돌조각과의 충돌, 우주왕복선의 내열 타일에 의한 충격, 부서진 엔진의 펄 블레이드에 의한 충격, 우박 등에 의한 충격과 같은 고속 충격은 충격체의 질량이 비교적 작지만 빠른 속도(10 ~ 100m/s)로 충돌하기 때문에 복합재 구조물의 손상 메커니즘이 저속충격의 경우와 다르고 구조물과 서브시스템에 치명적인 손상을 입힐 수 있다. 이러한 고속충격으로부터 기지균열(matrix cracking), 층간분리(delamination), 섬유파손(fiber breakage), 표면파쇄(surface spallation) 및 적층관통(laminate penetration)과 같은 다양한 파괴모드가 발생한다. 저속충격은 충격체에 의한 층간분리로 인하여 먼저 국부적인 굽힘강성을 저하시켜 굽힘과 좌굴에 영향을 미치며, 국부좌굴은 다시 층간분리의 확장을 유발하여 구조물이 전체적으로 취약하게 됨으로써 정적 및 피로 강도를 감소시킨다. 또한, 충격속도가 증가하면 즉, 고속충격인 경우 층간분리는 표면파쇄 및 적층관통과 함께 발생한다. 적층판이 뒷면을 관통시키기 위해 충격체가 필요한 에너지를 탄도한계(ballistic limit)라 하는데 이 범위를 넘는 높은 에너지의 충격은 탄공(crater hole)과 뒷면파쇄를 발생시킨다.

여기서 고속충격과 저속충격을 구분하는 속도의 범위를 살펴보면, Abrate¹⁾는 충격체의 속도가 100m/s 이하인 경우를 저속충격이라 하고, 충격체의 속도가

1km/s 이상인 경우를 고속충격으로 구분하였다. 하지만 Ruiz²⁾는 충격지점으로부터 응력파(stress wave)가 발생하여 동적해석이 필요한 50~300m/s 이상을 고속이라고 하고, 경계지점에서 다중파(multiple wave)가 반사되어 준정적평형(quasi-static equilibrium)에 이르는 50m/s 이하를 저속충격이라 구분하였다. 또한, Abrate³⁾는 충격속도와 복합재료의 횡방향의 음속비($\mathcal{E} = V/c$)가 0.5~1.0% 변형률 범위인 경우를 저속과 고속충격의 천이속도로 정의하였다. 일반적으로 고속충격에 의한 손상은 전통적인 방법으로 감지하기가 어려우며, 기존의 연구들도 한 가지 기술만을 이용하여 신뢰할만한 손상평가 결과를 제시할 수 없음을 보여주고 있다.

Fig. 1은 탄소섬유강화플라스틱 특성을 결정하는 인자들을 나타낸 그림이다. 나타낸 인자 중에 가장 중요한 것은 충격에 의한 충격손상, 파손, 흡수에너지, 섬유 및 기지의 파단이며, 그 이유는 이물충격에 의한 손상에 매우 취약하고 CFRP 적층판의 특성 때문이다. 즉, CFRP 적층판에 있어 섬유로서 강화된 면내 강도에 비해 층간의 강도가 현저히 낮기 때문이다.

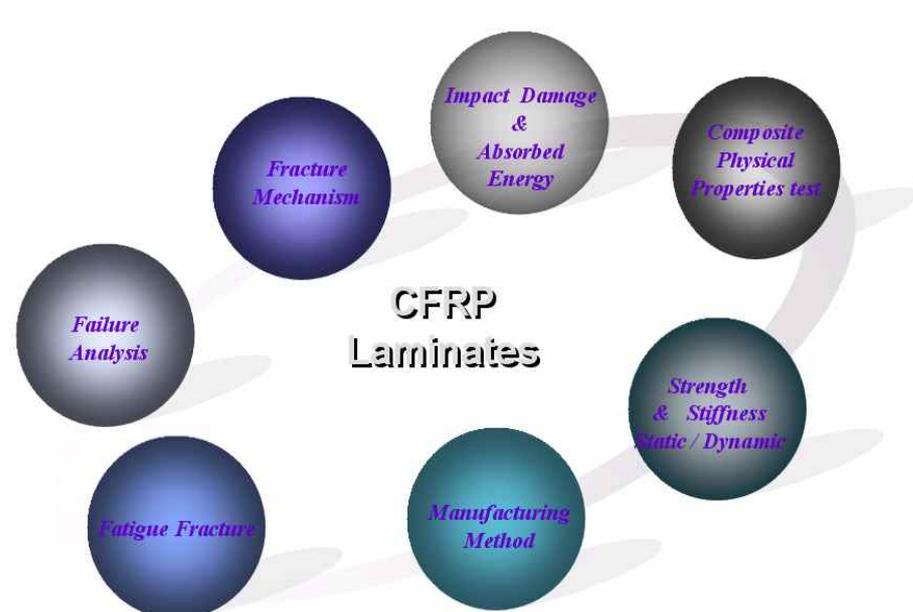


Fig. 1 The key factors of CFRP laminates

또한, 최근 국제적으로 승용차의 구조경량화에 대한 요구가 급증하여 하이브리드자동차, 친환경 그린자동차, 전기자동차등의 개발에 국가의 역량을 집중하고 있는 실정이다. 이를 위한 방법으로 소재의 경량화는 연료율을 높임과 동시

에 자동차의 성능향상을 극대화시킬 수 있어서 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다.^{4~6)} 차체 구조의 경량화를 위한 연구는 최적 구조설계 기술과 재료 및 소재개발 기술이라는 두 가지 측면으로 추진되고 있다. 복잡한 형상을 가지고 있는 차체 구조의 최적설계를 위한 강성해석이나 충돌해석 등을 위해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며,^{7~10)} 경량재료의 개발을 통한 차체 중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비개선 방안으로 평가되고 있어 현재는 기존의 철강부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다.^{11~12)}

그러나 자동차용 복합재료에 사용되는 보강섬유는 유리섬유가 대부분 사용되고 있으며, CFRP를 사용한 복합재료 부품 특히, 1차 구조부재에의 실용은 아직은 연구 개발이 미진한 상태이다.

특히, CFRP 복합재의 가장 큰 단점으로는 수분의 흡수에 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.¹³⁾

구조부재의 성격상 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위 환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 열습과 같은 상황에서 수분이 복합재 내부로 침투함으로써 연성재의 역할을 수행하고 이로 인해 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질을 저하시킴으로써 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다.^{14~16)}

이제까지의 CFRP 재의 상용환경에 관한 연구 결과를 살펴보면, 흡습상태에서의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 대한 잔류 강도저하 문제를 취급한 연구^{17~21)}, 항공기용 재료에 있어서 온도 변화에 따른 CFRP 적층판의 인장강도, 층간전단강도, 잔류굽힘강도, 압축강도특성 등에 관한 연구 결과 및 서로 수지가 다른 CFRP 적층판의 충격 강도, 정적인장 및 굽힘강도, 피로강도 및 크리프강도에 미치는 온도의 영향을 고찰한 연구결과를 대표적으로 들 수가 있다.^{22~24)}

그러나 아직까지는 경량화용 자동차의 차체구조부재로 모자형 단면의 형상을 갖는 CFRP 구조부재를 상용화 할 것을 상정하여, 모자형 단면형상의 CFRP 구조부재가 고온·고습의 가혹한 환경 하에서 자동차의 충돌등 충격하중이 작용 할 경우 발생하는 축압축강도 저하현상에 미치는 영향에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵다.

제 2 절 연구목적 및 연구방법

CFRP 재는 충격하중을 받으면 충격손상, 파손, 흡수에너지, 섬유 및 기지의 파단이 발생하기 때문에 이물충격에 의한 손상에 매우 취약한 단점을 가지고 있다. CFRP 부재가 충격하중을 받으면 섬유로 강화된 면내 강도에 비해 층간의 강도가 현저히 낮아진다.

따라서, 차량의 설계 단계에서는 차량 전체의 전면 충돌을 예측기 전에 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수가 크고, 간단한 구조부재에 대해서 압괴거동과 에너지흡수특성을 정확히 파악 하는 것이 중요한 문제이며, 자동차 충돌시 승객의 안전을 보호할 공간 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 충돌시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 최적의 충격특성을 갖는 구조부재를 개발하여야 한다.

본 연구에서는 모자형 단면의 형상을 갖는 CFRP 구조부재를 경량화 차체구조부재로 상용화 할 것을 상정하여, 모자형 단면형상의 CFRP 구조부재의 적층각도의 변화와 고온고습상태에서 충돌이 가해질 경우의 축압괴특성 및 압괴 모드에 관해 정량적으로 고찰함으로써 최적의 경량화용 자동차 구조부재를 개발하는데 적용 가능한 설계데이터를 얻고자 한다.

연구방법으로는 CFRP 복합재의 우수한 기계적 특성을 기대할 수 없는 가혹한 환경을 실험적으로 설정한 열습 상태에서 정적 압괴실험을 통한 흡습 유무 및 적층각 변화 및 계면수의 변화에 따른 강도저하 현상을 실험적으로 평가하였다.

제 1 장에서는

본 연구와 관련된 경량화자동차, 우주항공분야등의 국제적인 연구동향, 연구 목적 및 연구방법에 관하여 기술하였고,

제 2 장에서는

섬유강화 복합재 박육부재에 축 압축하중이 작용 시 발생하는 압괴형상인 횡방향전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드 및 취성파괴 압괴모드와 국부좌굴 압괴모드의 조합등을 알수 있도록 압괴모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하고, 각 압괴모드의 조합으로 발생하는 복합재 박육부재의 평균압괴응력을 수식화 한 압괴이론을 서술하였다.

제 3 장에서는

모자형 단면 형상을 갖는 CFRP시험편의 축압축하중에 가장 에너지를 많이 흡수 할 수 있는 최적의 적층법, 오토클레이브법에 의한 진공성형법, 고온고습 상태에서의 모자형 CFRP시험편의 최외층 적층각도의 변화에 따른 흡습특성 실험 및 축압괴실험 방법에 대하여 기술하였고,

제 4 장에서는

최외층 적층각도 변화와 계면수의 변화에 따른 모자형 단면 형상을 갖는 CFRP 시험편의 고온 고습상태에서의 흡습율의 변화, 잔류강도의 저하현상 및 압괴모드에 관해 고찰하였다.

제 5 장에서는

모자형 단면형상의 CFRP 구조부재의 최외층 적층각도 변화와 계면수의 변화와 고온고습상태에서 축압축 하중이 가해질 경우의 정적압 궤특성 및 압괴 모드에 관해 정량적으로 고찰한 연구결과를 나타냈다.

본 연구에서 실험적으로 설정한 가혹한 환경으로는

고온과 수분이 작용하는 열습 환경상태를 유지하기위해 항온항습기를 사용하여 온도와 습기가 오랜 시간 유지가 되는 열습실험을 실시하였고, 흡습된 후의 CFRP 모자형 단면부재를 대상으로 정적 압괴실험과 충격 압괴실험을 실시하였다.

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

제 2 장 압괴이론

제 2장에서는 CFRP 복합재 박육부재의 압괴특성(평균압괴하중, 평균압괴응력, 흡수 에너지 등)에 관한 이론을 서술하였다. 기존의 복합재 박육부재의 정적 및 충격압괴에 관한 연구는 대부분 실험적 방법에 그치고 있으며, 그 실험 또한 실험을 수행한 연구자 및 실험환경에 따라 크게 좌우된다. 따라서 본 장에서는 축 압괴하중시 발생하는 압괴 모드의 이해와, 모드해석을 이용한 이론해석을 다룸으로써 복합재 박육부재의 정량적인 이론해석을 위한 기본적인 데이터를 얻고자하며, 기존의 연구결과²⁵⁾ 를 토대로 하여 정적 및 충격압괴 실험결과와 비교·고찰하고자 한다.

제 1 절 복합 박육부재의 압괴모드

섬유강화 복합재 박육부재에 축 압축하중이 작용 시 발생하는 압괴형상은 횡방향전단 압괴모드, 라미나 굽힘 압괴모드 및 취성과괴 압괴모드와 국부좌굴 압괴모드의 조합으로 나타난다.^{26~28)} 본 절에서는 이러한 각각의 압괴모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하였으며, 각 압괴모드의 조합으로 발생하는 복합재 박육부재의 평균압괴응력을 수식화 하였다.

연속섬유 강화 복합재 박육부재의 압괴과정은 Fig. 2와 같다. 즉 하중이 압괴 Initiator의 끝단에 작용할 때 재료의 국부파손은 발생하고 미소한 층내/층간 크랙이 형성되며, 횡방향전단, 라미나 굽힘 또는 이러한 모드의 조합(취성과괴)에 의해 층내/층간 크랙의 길이, 라미나 묽음 파괴 및 압괴모드가 결정된다. 또한 모든 복합재 박육부재가 점진적으로 압괴 되는 것은 아니며, 박육부재가 점진적으로 압괴 되는지의 여부는 박육부재의 구조형상과 섬유, 기지의 조합에 의존하게 된다. 따라서 이러한 복합재 박육부재에 축하중이 작용할 경우 발생하는 압괴모드를 이해하기 위해서는 4가지의 기본적인 압괴모드의 이해가 선행되어야 한다.

첫째, 횡방향전단 압괴모드는 Fig. 3과 같이 일부분의 라미나 묽음으로 형성된 종방향 크랙과 하나 또는 다중의 짧은 층간 크랙에 의존하며, 박육부재의 압괴 면은 하중이 박육부재의 표면을 따라 일정치 않게 전파되는 것과 같은 부채꼴 모양의 형태를 갖는다. 횡방향전단 압괴모드의 주요 에너지 흡수메카니즘은 Fig. 3과 같이 라미나 묽음의 파괴이며 크랙의 수, 위치, 길이는 시험편의 구조형상과 성분 재료특성의 함수이다. 층간크랙 성장과 라мина 묽음파괴는 횡방향전단 압괴모드의 압괴과정을 제어한다. 층간크

랙 성장은 기지의 역학적 특성, 라미네이트의 섬유배향각과 원주방향으로 적층된 섬유의 파손변형을 및 인장강성에 의해 제어된다. 층간크랙은 Fig. 4에 나타낸 것 같이 Mode I(opening) 또는 Mode II(forward shear)로 성장하게 되고 이때 크랙성장의 능력은 크랙이 성장하기까지 기지의 파괴인성과 라미나 묶음의 배향각의 함수로 나타낼 수 있다. 원주방향으로 적층된 섬유(축 방향의 90° 로 적층된 섬유)는 층간 크랙성장에 주요한 영향을 미친다. 원주방향으로 적층된 섬유의 강성과 파손변형율은 라미나 묶음에 존재하는 굽힘에 영향을 미친다. 원주방향으로 적층된 섬유의 강성과 파손변형율이 높을수록 층간 크랙은 줄어든다. 라미나 묶음의 파괴는 횡방향전단 압괴모드가 존재하는 박육부재의 압괴과정의 에너지 흡수에 많은 기여를 한다. 라미나 묶음은 횡방향 굽힘 모멘트를 발생시키며, 라미나 묶음의 파괴는 라미나 묶음의 인장면에 대한 응력이 재료의 강도를 초과할 때 발생한다.

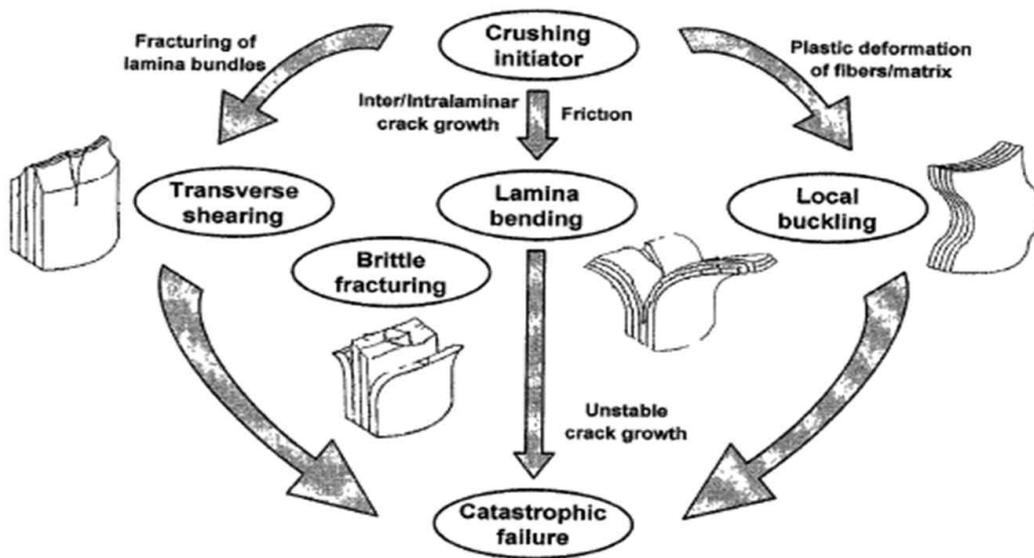


Fig. 2 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes²⁹⁾

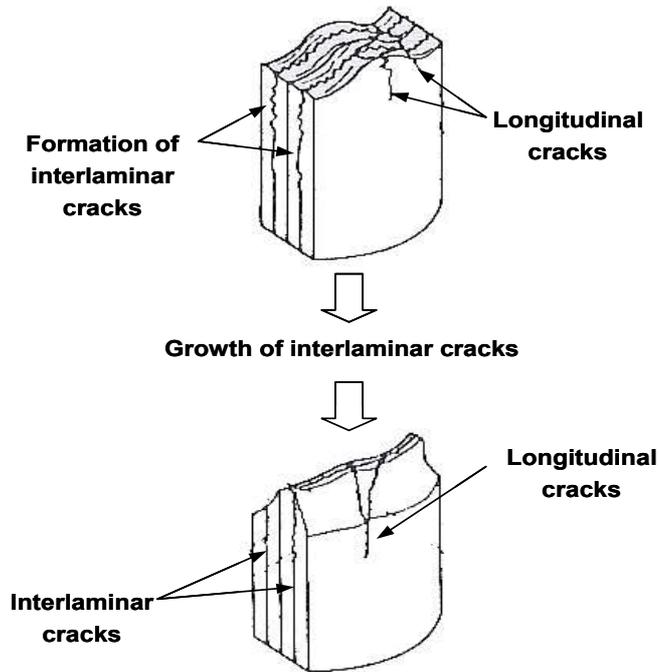


Fig. 3 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode

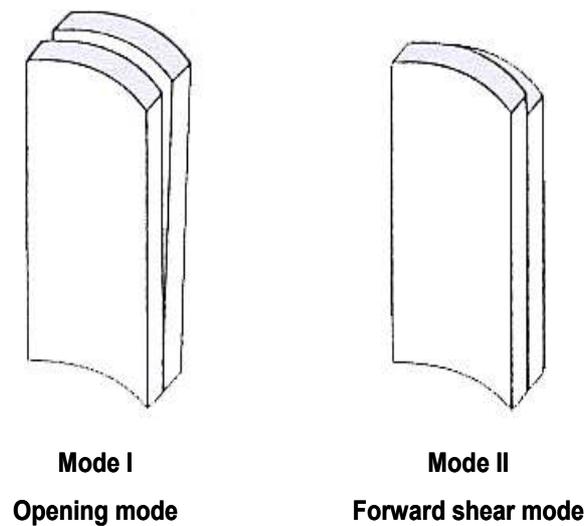


Fig. 4 Sketch of crack propagation modes

둘째, 라미나 굽힘 압축모드는 Fig. 5와 같이 매우 긴 층간크랙 및 층내크랙과 섬유와 평행한 크랙이 나타나지만 라미나 묶음은 파괴되지 않는다. 즉, 주요 에너지 흡수메카니즘은 크랙성장이며 층간 크랙이 인접한 층의 상호관계로써 진전하고 형성되는 반면 층내 크랙은 개개의 층에서 성장한다. 섬유와 평행한 크랙은 일반적인 섬유배향을 갖는

다수의 인접한 라미나 또는 플라이 하나의 섬유방향에 평행하게 전파하며 라미나 묶음은 굽힘 변형을 수반하지만 파괴되지는 않는다. 또한 마찰과 관계된 에너지 흡수메카니즘은 슬라이딩하는 다수의 라미나 묶음들 사이의 상대운동에 의한 저항으로 나타난다.

층간/층내 크랙 및 섬유의 수평방향 크랙의 성장과 마찰은 라미나 굽힘 압케모드에 있어 압케과정을 제어한다. 라미나 굽힘모드에 나타나는 크랙 진전은 횡방향전단 모드와 유사하고, 라미나 묶음은 파괴되지 않으며 단지 압케 면에 대한 저항으로 굽어질 뿐이다. 압케표면을 따라 수반된 운동과 하중 면에 대한 라미나 묶음의 굽힘은 마찰력을 통해 에너지 흡수메카니즘으로 나타나며, 마찰력은 Fig. 6과 같이 인접한 라미나 묶음의 상대운동으로부터 나타난다. 복합재료와 압케표면사이에서 마찰계수와 근접한 라미나 묶음들간의 마찰계수는 압케속도의 함수라 할 수 있다. 그러므로 에너지 흡수능력은 압케속도 변화에 따른 영향을 받는다.

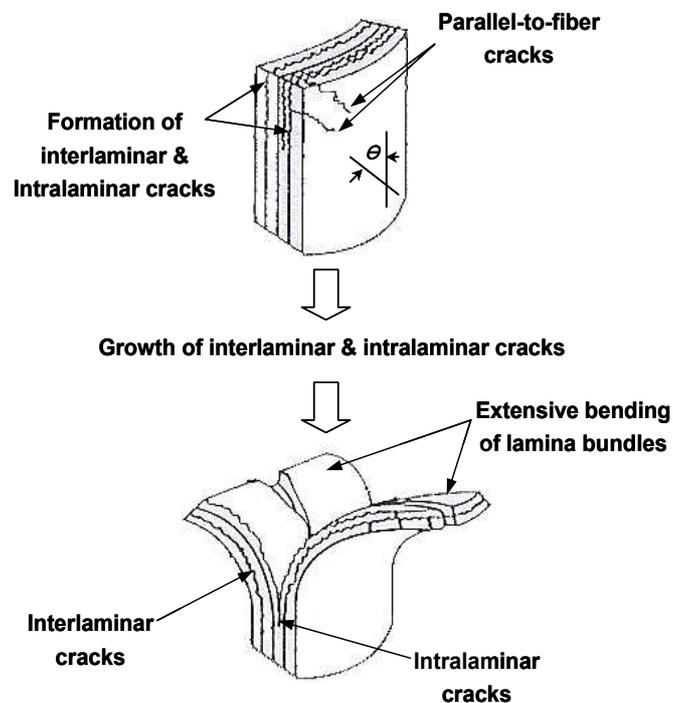


Fig. 5 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode

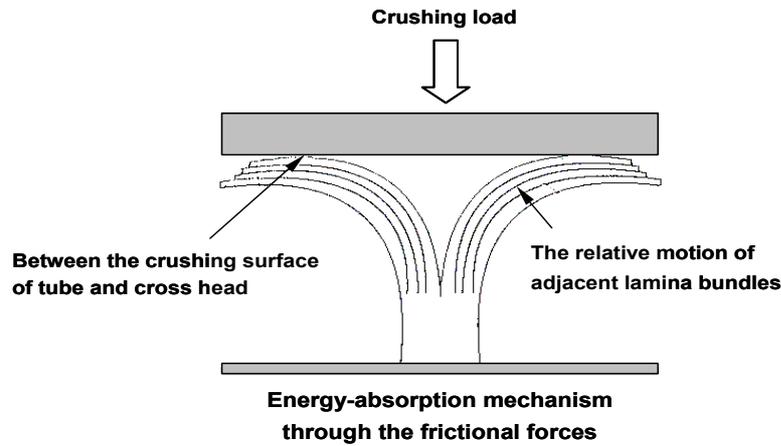


Fig. 6 Friction related energy-absorption mechanisms

셋째, 취성파괴 압재모드는 횡방향전단과 라미나 굽힘 압재모드의 조합이며, 취성섬유 강화 복합재 박육부재의 보고된 압재결과의 대부분은 취성파괴 압재모드이다. Fig. 7과 같은 취성파괴 압재모드의 경우 라미나 묶음은 약간의 굽힘이 존재하고 파단에 가까우며, 라미나 묶음이 파단될 때 하중은 박육부재에 가해지고 크랙성장파 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복된다.

넷째, 취성 및 연성 섬유강화 복합재에 존재하는 국부좌굴 모드는 연성 금속에 존재하는 것과 유사하다. 이러한 압재모드는 Fig. 8과 같이 재료의 소성변형에 의해 국부좌굴의 변형으로 구성되며, kevlar섬유와 같은 연성 섬유 강화 복합재 박육부재는 좌굴된 섬유의 압축면을 따라 좌굴영역에서 소성적으로 변형된다. 또한 섬유는 좌굴된 섬유의 인장면을 따라 분리되고 각 플라이 사이에서 국부적인 층간분리(local delamination)를 발생한다. 연성 섬유강화 복합재는 압재된 후 손상되지 않은 부분이 존재하게 되며, 이는 섬유의 분리와 섬유 파손이 없는 기지의 소성변형에 의한 결과이고 섬유가 파단되지 않을 때 박육부재는 횡방향전단과 취성파괴 압재모드에 존재하는 재료의 점진적인 파손의 저항으로 인해 손상 없이 국부좌굴 형상으로 압재된다.

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

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

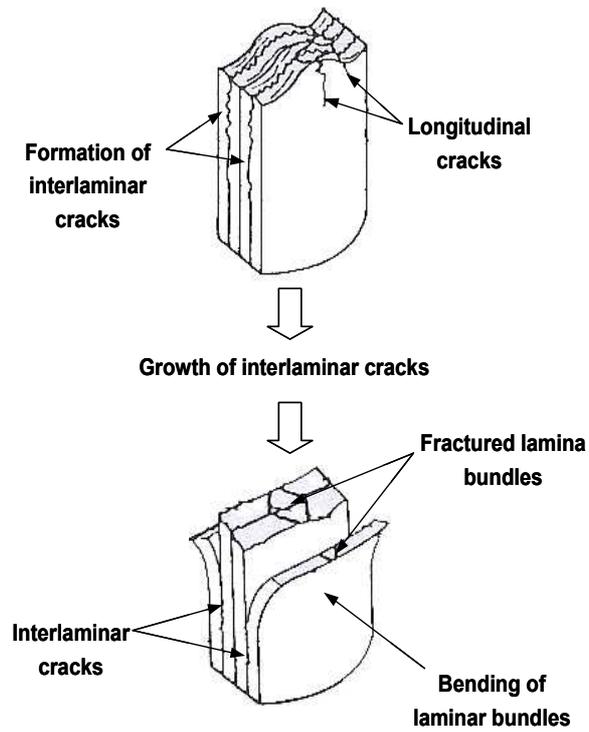


Fig. 7 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode

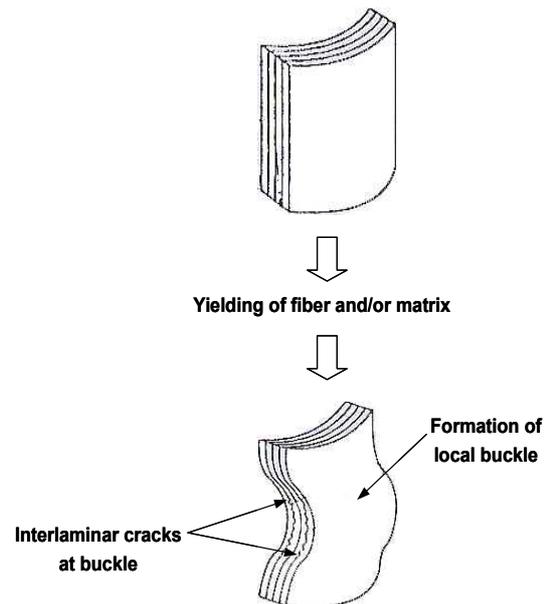


Fig. 8 Crushing characteristics of local buckling crushing mode

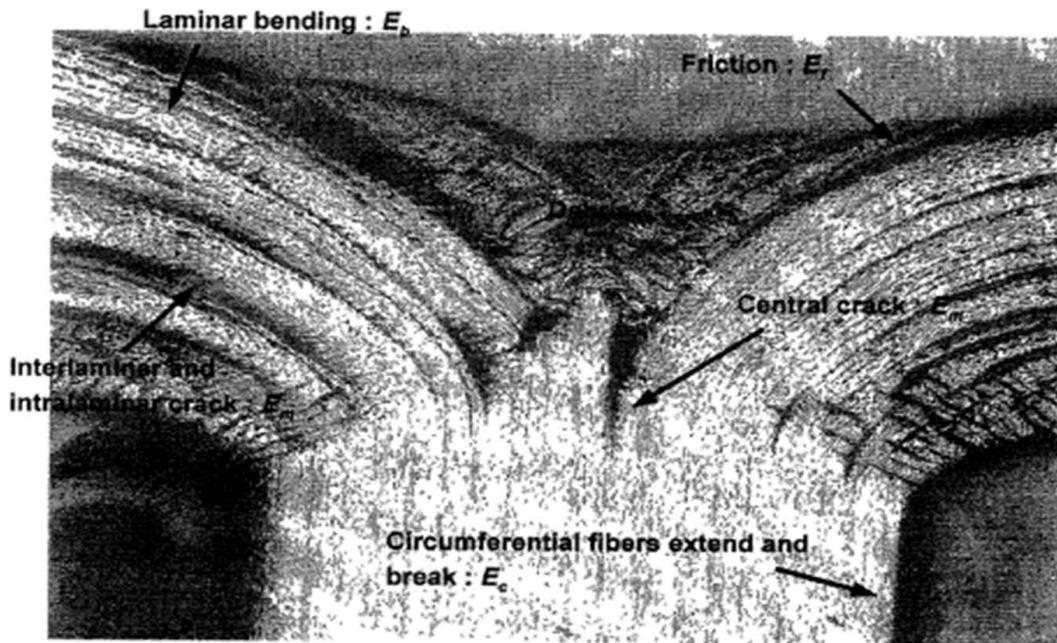


Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section³⁰⁾

제 2 절 복합 박육부재의 압괴이론

복합재 원통박육부재가 압괴될 때 에너지 흡수특성을 지배하는 인자는 Photo. 1과 같이 기지(matrix)에 의해 흡수되는 에너지(E_m), 스플라인 형상으로 압괴되면서 흡수되는 굽힘 에너지(E_b)와 압괴되는 축 방향에 직각으로 발생하는 원주방향 에너지(E_c) 및 충격 판과 시험편에서 발생하는 마찰에너지(E_f)이다. 이들 중 대부분의 충격에너지는 기지에 의해 흡수되어지며 가장 큰 영향을 미치는 인자는 기지의 크랙 진전이라 할 수 있다. 따라서 2절에서는 에너지 흡수특성을 지배하는 각 인자에 관한 모드를 이해하고, Gupta^{31 ~ 32)}의 기본적인 압괴이론 수식에 계면수 변화의 함수 $g(k)$ 를 보정함으로써 복합재 박육부재의 압괴이론 수식을 유도하고자 한다.

먼저 튜브에 가해지는 압괴 에너지는 앞에서 제시한 횡방향전단 모드에 의한 변형에 의해 흡수되어지며, 기지의 전단응력(τ_{my})과 크랙진전 위치까지의 전단변형율(γ)과 체적 및 계면수에 의존한다.

$$\begin{aligned}
 E_m &= \tau_{my} \cdot \gamma \cdot V \cdot g(k) = \tau_{my} \left(\frac{\delta_r}{l} \right) 2\pi R t l \cdot g(k) \\
 &= 2\pi R t \cdot \tau_{my} \delta_r \cdot g(k)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 τ_{my} 는 기지의 전단응력(항복강도의 45%), γ 와 V 는 중심크랙이 진전한 위치까지의 전단변형율과 체적, $g(k)$ 는 계면수 변화 함수이며 δ_r 은 섬유 원주방향 변위, l 은 중심크랙 길이(Length of Central crack)를 나타낸다.

이때 계면수 변화 함수 $g(k)$ 는 다음과 같으며, α , β 는 보정계수이다.

$$g(k) = \frac{\beta^{k-2}}{\alpha} \tag{2}$$

또한 복합재 원통 박육부재의 대표적인 압축형상은 Fig. 9 (a)와 같은 원통벽의 단면 중앙에 생긴 썩기형 크랙의 점진적인 진전과 함께 원통벽의 내측과 외측으로 확장하는 형상으로 압축되어진다. 이러한 압축모드는 라미나 묶음의 굽힘에 의한 에너지를 수반하며, 반지름(R)과 작용 모멘트(M) 및 썩기형 크랙의 축 경사각(θ)에 비례한다.

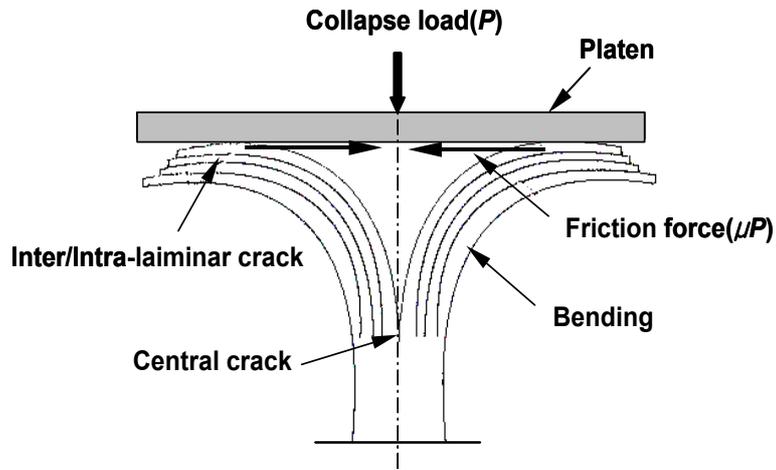
$$E_b = 4\pi R M \theta \tag{3}$$

라미네이트의 최대 굽힘 모멘트(M)는 다음과 같다.

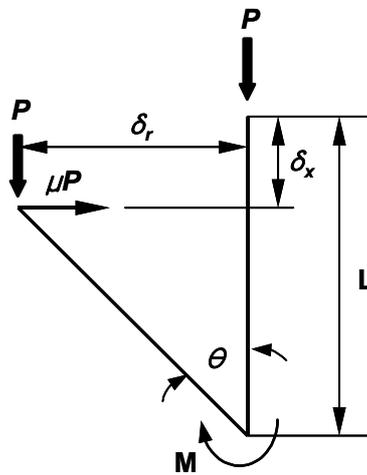
$$M = \frac{\left\{ f_y \left(\frac{t}{2} \right)^2 \right\}}{4} \tag{4}$$

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

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



(a) Actual collapse pattern



(b) Ideal collapse pattern

Fig. 9 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load

튜브의 반지름과 관계된 굽힘에 의한 외측확장 즉, 원통 박육부재의 원주방향 확장에 관한 에너지 흡수는

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

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

$$d\varepsilon = \frac{2\pi(R + \delta_r) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{\delta_r}{R} = \frac{l \sin \theta}{R} \quad (7)$$

σ_θ 는 원주방향에 대한 레이어의 강도이며, 그 결과 원주방향의 확장에 의한 흡수 에너지는

$$E_c = \pi l^2 t \cdot \sigma_\theta \cdot \sin \theta \quad (8)$$

튜브와 압축판의 마찰에 의해 흡수되어지는 에너지는

$$E_f = \mu P \delta_r \quad (9)$$

여기서 μ 는 시험장치 압축판의 마찰계수이다.

총 흡수에너지는 기지에 의해 흡수되어지는 에너지와 굽힘 에너지, 원주방향 에너지 및 마찰에너지의 합으로 표현 가능하다.

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

또한 총 흡수에너지는 평균압케하중과 압케된 길이의 곱으로 나타낼 수 있으며,

$$E_t = P_{av} \delta_x \quad (11)$$

$P_{av} = P$ 이며, 위에서 나타낸 식 (10)과 (11)을 같다고 놓고 이항하여 정리하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

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

본 연구에서 구하고자하는 평균 압케응력은 식 (12)를 정리하여 구한 평균압케하중을 시험편의 단면적으로 나누어줌으로써 얻을 수 있다. 단, $\sin \theta = \delta_r / l = d\varepsilon R / l$, θ

는 0° 에서 90° 가 될 때까지 압제되며 그 결과 $\theta = \pi/2$, $l = \delta_r = \delta_x$ 가 된다.

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

여기에서 f 는 라미네이트의 인장강도로서 축 방향의 인장강도(f_y)와 원주방향 응력(σ_θ)과 같다.

제 3 장 실험방법

제 1 절 시험편 제작

본 연구에서는 경량화용 자동차의 차체구조부재로 모자형 단면 형상을 갖는 CFRP 구조부재를 상용화 할 것을 상정하여 모자형상을 시험편으로 제작 성형 하였다.

시험편의 제작은 양⁽³³⁾의 연구에서의 적층성형 방법을 이용하였다. 일방향 CFRP 프리프레그 시트(CUI25NS)를 사각의 알루미늄 맨드릴위에 이형필름을 사용하여 각각 8ply의 적층수를 갖도록 적층하여 단일 모자형 부재의 형상으로 제작을 하였다. Fig. 10은 본 연구에 사용된 모자형 단면부재의 형상과을, Table 1 에는 CFRP 프리프레그 시트의 물성치를 나타냈다.

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

CFRP 모자형 단면부재는 모자형 “┌”과 평판형 “—”으로 제작을 하였으며, 모자형상의 단면은 가로, 세로 각각 30mm, 플랜지의 폭은 12mm의 형상을 갖는다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 압괴실험 시 압괴가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였으며, 압괴실험 중 초기압괴 및 일률적인 변형을 유도함으로써 안정적인 압괴 및 강도평가가 이뤄질 수 있도록 시험편 끝단에 45°의 트리거 가공을 함으로써 초기조건을 설정하였다.²⁵⁾

사용된 시험편의 종류로는 시험편의 축방향 θ 를 중심으로 최외각층을 90°와 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면의 5종류의 CFRP 모자형 시험편을 제작 성형 하였다.

제작된 시험편을 흡습 유·무로 분류하여 정적 압괴실험을 실시하였다. 특히, 흡습 무흡습 상태에서 압괴모드를 고찰하기위하여 충격 압괴실험을 실시 했다. Table 2는 본 연구에 사용된 시험편의 종류를 나타냈다.

Figs. 11, 12는 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편의 단면형상과 플랜지 형상을 도식화 한 것이다.

Table 3에 본 연구에 사용된 시험편의 종류를 나타낸 것이다.

시험편의 성형은 Photo. 2의 오토클레이브를 사용하여 챔버내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형 시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레서에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 13는 시험편 제작 시 오토클레이브의 성형 사이클을 나타냈다.

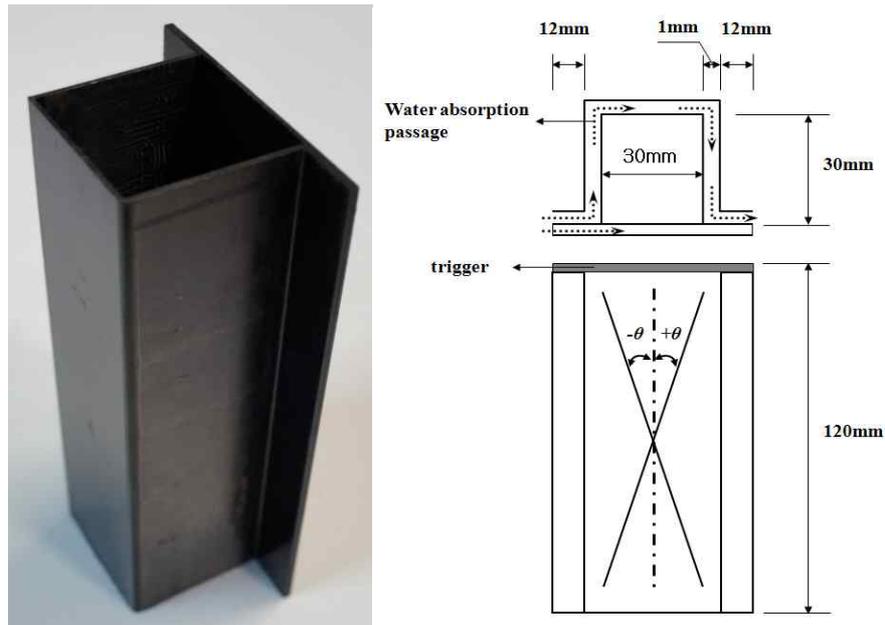


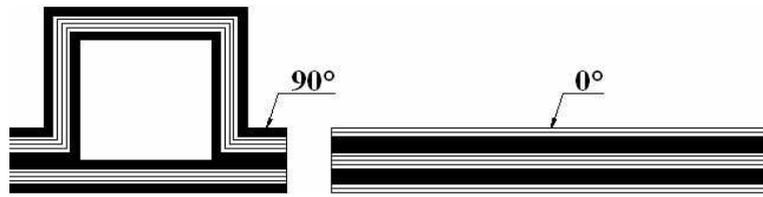
Fig. 10 Shape of CFRP hat-shaped sectional member

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet

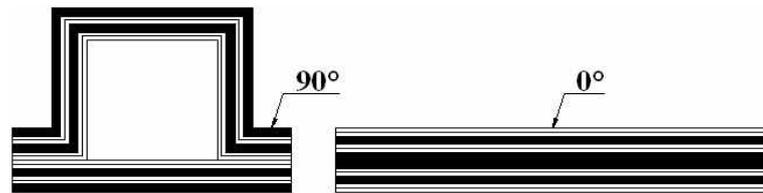
| Types Characteristics | Fiber (Carbon) | Resin (Epoxy #2500) | Prepreg sheet |
|--------------------------|---|---|---------------|
| Density | 1.83×10 ³ [kg/m ³] | 1.24×10 ³ [kg/m ³] | - |
| Poisson's ratio | - | - | 0.3 |
| Young's modulus | 240 [GPa] | 3.60 [GPa] | 132.7 [GPa] |
| Tensile stress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

Table 2 Types of CFRP hat-shaped sectional members

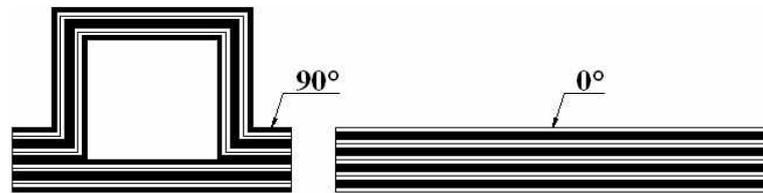
| Specimens | Stacking conditions | Outer angle | Experiment condition |
|-------------|--------------------------------|-------------|----------------------|
| 2 interface | $[90^{\circ}_2/0^{\circ}_2]_s$ | 90° | Wet / Dry |
| 3 interface | $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_2$ | | |
| 4 interface | $[90^{\circ}/0^{\circ}]_{s2}$ | | |
| 6 interface | $[90^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$ | | |
| 7 interface | $[0^{\circ}/90^{\circ}]_4$ | | |
| 2 interface | $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_s$ | 0° | Wet / Dry |
| 3 interface | $[90^{\circ}_2/0^{\circ}_2]_2$ | | |
| 4 interface | $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{s2}$ | | |
| 6 interface | $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$ | | |
| 7 interface | $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$ | | |



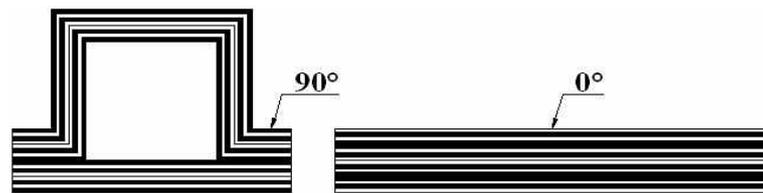
(a) 2 interface (outer angle 90°)



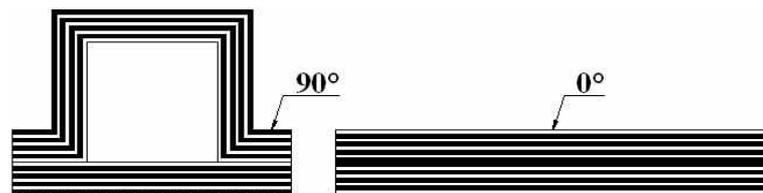
(b) 3 interface (outer angle 90°)



(c) 4 interface (outer angle 90°)

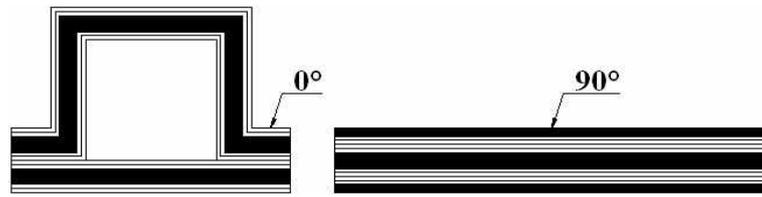


(d) 6 interface (outer angle 90°)



(e) 7 interface (outer angle 90°)

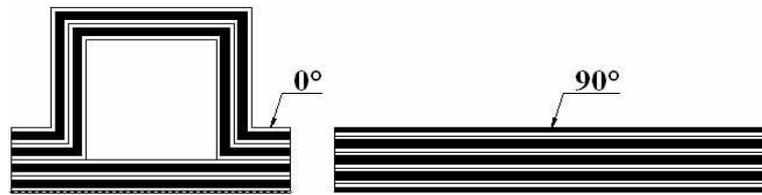
Fig. 11 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°)



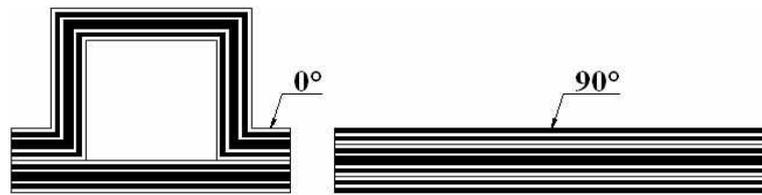
(a) 2 interface (outer angle 0°)



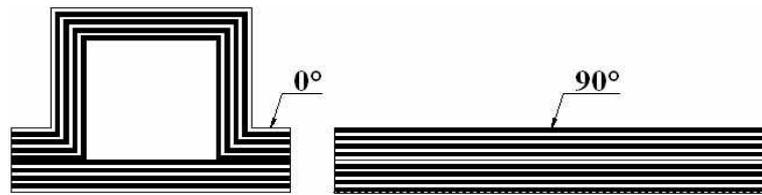
(b) 3 interface (outer angle 0°)



(c) 4 interface (outer angle 0°)



(d) 6 interface (outer angle 0°)



(e) 7 interface (outer angle 0°)

Fig. 12 Stacking conditions of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°)

Table 3 Symbols of CFRP hat shaped members (interface specimen)

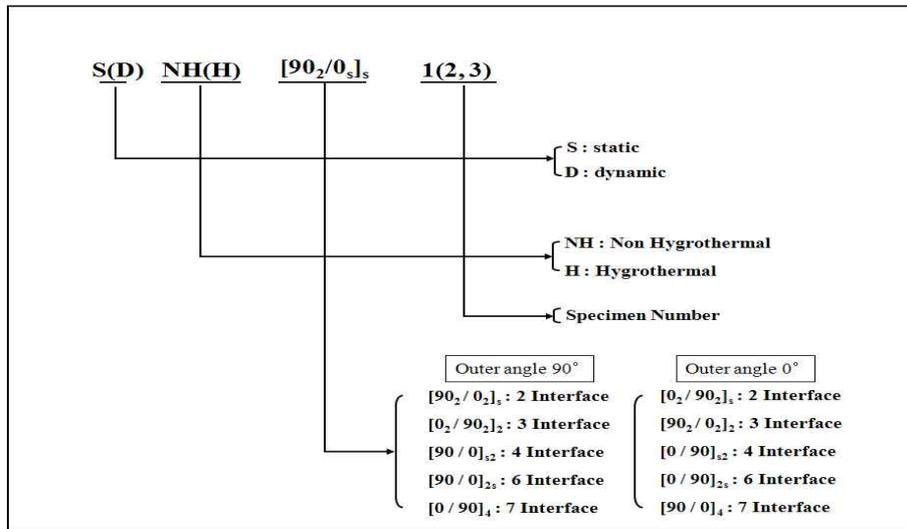


Photo. 2 Autoclave

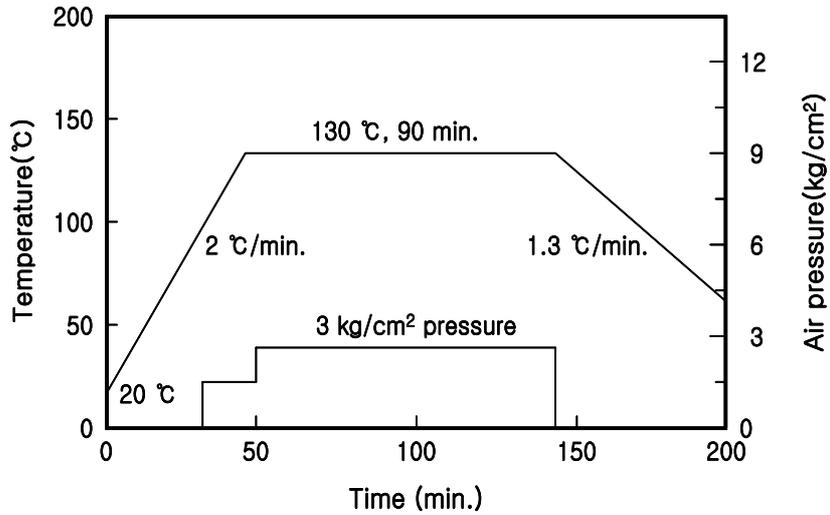


Fig. 13 Curing cycle of CFRP hat-shaped sectional members

제 2 절 열습실험

CFRP 복합재는 정적부하 환경에서 금속재료보다 우수한 역학적 특성을 가지고 있으나 충격하중을 받거나 열습의 가혹한 환경하에서는 그 우수한 역학적 특성을 기대하기가 어렵다.

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

본 연구에서 설정한 열습 환경은 Photo. 3의 항온항습기(Waterbath WNB 7-45)를 사용하여 장시간 일정한 온도와 수분이 유지가 될 수 있도록 하였다. Fig. 14 는 열습실험에 사용된 항온항습기의 형상과 크기를 도식화 한 것이다.

고온의 환경은 CFRP 모자형 단면부재가 차량 엔진룸 내부의 온도로 평가될 수 있으면서 매트릭스의 변화가 적은 온도인 60°로 설정하였으며, 차량 사용 시 동반되는 수분의 영향을 평가하기 위해 항온항습기 내부를 증류수를 사용하여 권장 최고 수심까지 설정한 후 제작된 CFRP 모자형 단면부재를 각각 30개씩 시험편 지지대를 이용하여 장시간 잠기게 하였다. CFRP 복합재가 구조부재로 장시간 열습 환경에 노출 되었을 때 CFRP 복합재 내부의 수분 흡습거동을 파악하기 위하여 복합재 내부가 포화상태가 될 때까지 흡습률을 측정하였다.

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

흡습률은 다음과 같은 결과식을 이용하였다.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (14)$$

여기서 M : 흡습률 (%)

W_d : 흡습전의 재료의 무게 (g)

W_m : 흡습후의 재료의 무게 (g)

CFRP 복합재 내부의 흡습거동을 파악하기 위한 흡습률 측정은 열습실험을 실시하기 전의 시험편 무게와 전자정밀저울로 측정한 흡습시험편의 무게와의 차를 백분율로 환산하는 식(14)를 이용하여 측정하였다.



Photo. 3 Hot waterbath

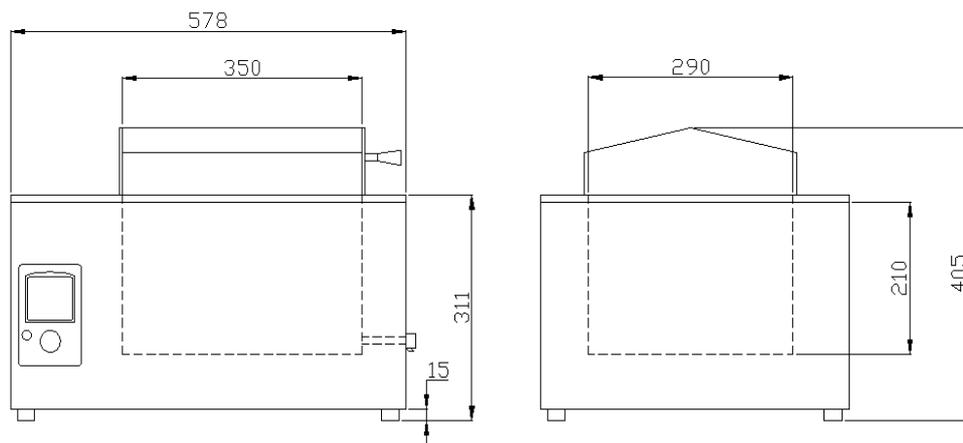


Fig. 14 Dimensions of hot waterbath

제 3 절 정적압괴실험

본 연구에서는 모자형 단면의 형상을 갖는 CFRP 구조부재를 경량화 차체구조부재로 상용화 할 것을 상정하여, 모자형 단면형상의 CFRP 구조부재의 적층구성의 변화와 고온고습상태에서 충돌이 가해질 경우의 축압괴특성 및 압괴 모드에 관해 정량적으로 고찰하기 위하여 최외층각도를 0° 와 90° 로 변화 시키고 계면수를 2,3,4,6,7로 변화 시킨 5 종류의 모자형 단면의 형상을 갖는 CFRP 부재를 성형한 후 고온고습상태에서 완전 흡습된 시험편과 무흡습 시험편을 압괴실험 하였다.

정적압괴실험은 Photo. 4와 같은 만능재료시험기를 사용하였으며, 로드셀과 액츄에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min의 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해지도록 실험을 행하였다. 실험 시 편심하중이 작용하지 않도록 시험편 제작 시 연마가공을 통하여 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과와 재현성이 좋도록 하였으며, 실험결과에 단부효과(end effects)가 나타나지 않고 순차적인 압괴가 주기적으로 발생하도록 전체 축 방향 길이(120mm)의 50%(60mm)까지 변형되도록 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴 실험을 행하였다.

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

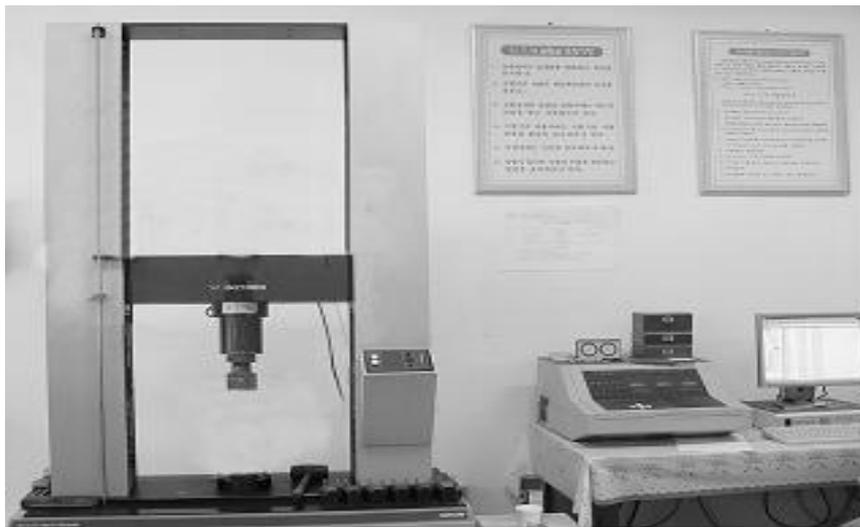


Photo. 4 Universal testing machine

정적 압괴실험 후 얻어진 하중-변위선도 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(15)와 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l P_{(l)} dl \quad (15)$$

여기서, E_a 는 시험편에 흡수된 에너지이며, l 은 압괴과정에서 압괴된 시험편의 길이, $P_{(l)}$ 은 압괴하중을 나타낸다.

그리고 단위질량당 흡수에너지는 흡수에너지를 압괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$E_m = \frac{E_a}{\rho A \Delta l} \quad (16)$$

여기서, E_m 은 단위질량당 흡수에너지, A 는 시험편의 단면적 그리고 ρ 는 시험편의 밀도를 나타낸다.

충격압괴 실험은 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위 내에서 자유낙하를 하였다. 또한 각 시험편에 대하여 4~5회의 충격 압괴실험을 행하였고, 압괴과정에서 시간에 대한 하중 및 변위를 측정하였다. 측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격압괴가 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 구하였으며 흡수에너지 E_a , 전체흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압괴되었다고 가정하여 식 (17)과 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압괴효율의 역수를 사용하여 식(18)을 이용하여 총흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (17)$$

여기서, ρ_0 는 압괴효율, L 은 시험편의 길이, δ_f 는 충격압괴 실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (18)$$

여기서, E_T 는 전체흡수에너지, E_a 는 흡수에너지 이다.

또한, 단위질량당 총흡수에너지를 비교하기 위하여 식(19)을 이용하여 총흡수에너지를 구하였다.

$$E_m = E_T/kg \tag{19}$$

여기서 E_m 은 단위질량당 총흡수에너지, kg은 각 시험편의 질량이다.

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

$$E_I = mgh \tag{20}$$

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

정적 압괴실험에서는 UTM을 이용하여 변형을 속도의 영향이 나타나지 않는 10mm/min의 균일한 압축하중을 가하여 축압축 실험을 실시하였다.

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

압괴실험 후 얻어진 Fig. 15와 같은 흡습 및 무흡습압괴시험편의 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 이를 식(15)와 같이 적분하여 흡수에너지를 구하였으며, 시험편의 단면적으로 평균압괴하중을 나눔으로써 평균 압괴응력을 구했다.

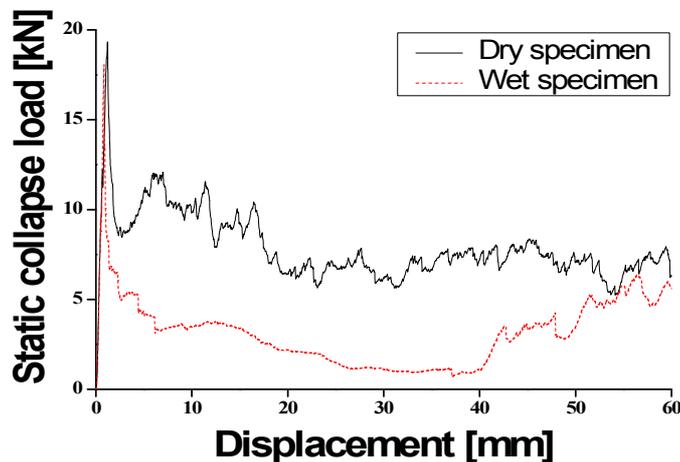


Fig. 15 Load-displacement curve of collapsed specimens ⁽³³⁾

제 4 장 실험결과

제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 흡습거동

CFRP 모자형 단면부재 내부에 수분의 흡수는 약 2500시간이 경과되면서 수분흡습률 곡선의 경사가 완만해 짐을 알 수 있었으며, 이 시점에서 시험편 내부에 수분이 포화상태가 되었음을 판단하고 흡습실험을 중단하였다. CFRP 모자형 단면부재의 수분 흡습률을 측정한 결과 시험편의 종류와 초기 시험편 제작 과정에서의 차이로 인하여 초기 수분 흡습의 증가치의 차이가 발생하였지만, 시간이 경과함에 따라 대부분 시험편에서의 수분흡습은 일정하게 평가됨을 알 수 있었다. 본 절에서의 흡습실험 결과는 양³³⁾의 실험결과를 참고하였다.

고온·고습실험에서 각 구간별 수분의 흡습률 및 증가경향을 살펴본 결과, 초기부터 수분 흡습률이 0.5%가 될 때 까지는 수분의 흡수가 급격하게 증가하는걸 알 수 있었으며, 이때까지 경과되었던 시간은 약 200시간이 소요 되었다. 이후 수분흡습률이 약 1.0%에 가까워지는 400시간이 경과되면서 점차 수분흡습률의 증가가 완만해짐을 알 수 있었으며, 경과 시간 또한 현격하게 증가함을 알 수 있었다. 그리고 약 2000시간이 경과된 시점에야 비로써 시험편 내부의 수분이 포화상태가 됨을 알 수 있었으며, 약 2500시간이 경과되면서 모든 시험편에서 수분흡습률의 증가는 거의 일정하게 나타남을 알 수 있었다.

수분의 흡습률을 비교해본 결과 모든 시험편에서 시험편의 섬유방향이 수분에 노출되는 방향으로 0°의 섬유배향을 가질 때 수분흡수가 이루어 짐을 알 수 있었으며, 시험편 적층 시 0°와 90°로 적층되는 조건에 따라서 그 흡습률의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

향온흡습조를 이용하여 매 72시간마다 수분 흡습률을 측정한 결과 계면수 변화에 따라 초기 수분 흡습의 증가치의 차이가 발생하였지만, 시간이 경과함에 따라 포화상태에 이르는 시점에서 수분흡습률은 대부분 시험편에서 일정하게 나타남을 알 수 있었다.

특히, 적층구성의 변화를 갖는 시험편 중 시험편의 축방향을 중심으로 90°와 0°의 변화에 따른 수분의 흡습률을 고찰하기 위하여 최 외각층의 각도에 따른 계면수 변화 시험편에 대한 수분흡습 거동을 고찰하였다.

수분의 흡습 거동을 파악하기 위하여 매 측정시 마다 흡습된 시험편의 무게 및 수분 흡습률의 증가량을 시험편 내부에 수분이 흡습되는 거동으로 파악을 하고 수분흡습 증가의 그래프를 나타내었다.

Fig. 16은 최외각층 90°의 구성을 갖는 시험편이 포화상태에 달했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 수분흡습률의 변화 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Fig. 17은 최외각층 0°의 구성을 갖는 시험편이 포화상태에 달했을 때의 시간경과에 대한 시험편 내부의 수분흡습률의 변화 및 흡습률 진행 상태를 알아보기 위한 그래프이다.

Fig. 18은 최외각층 변화에 따른 계면수간의 수분흡습률의 차이를 비교한 그래프이다.

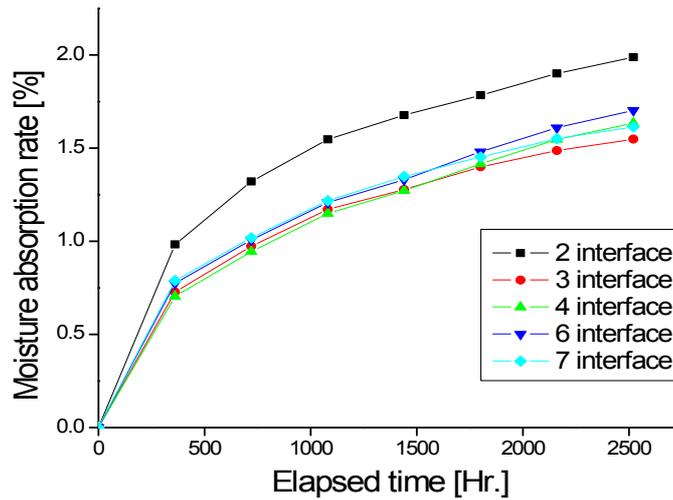


Fig. 16 Moisture absorption rate of the CFRP hat shaped section members (outer 90°)

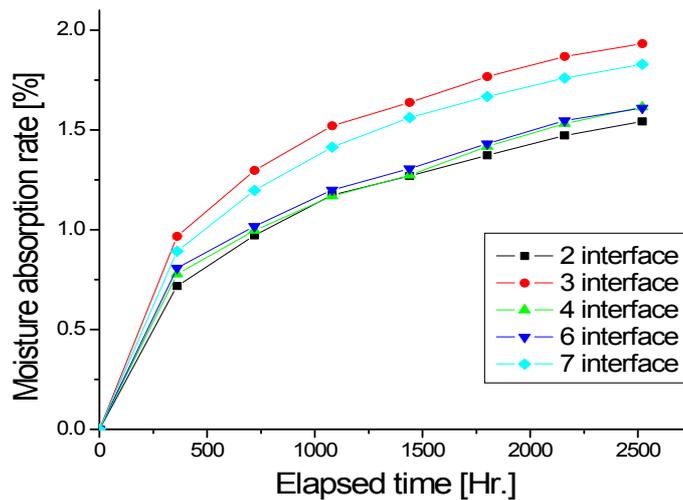


Fig. 17 Moisture absorption rate of the CFRP hat shaped section members (outer 0°)

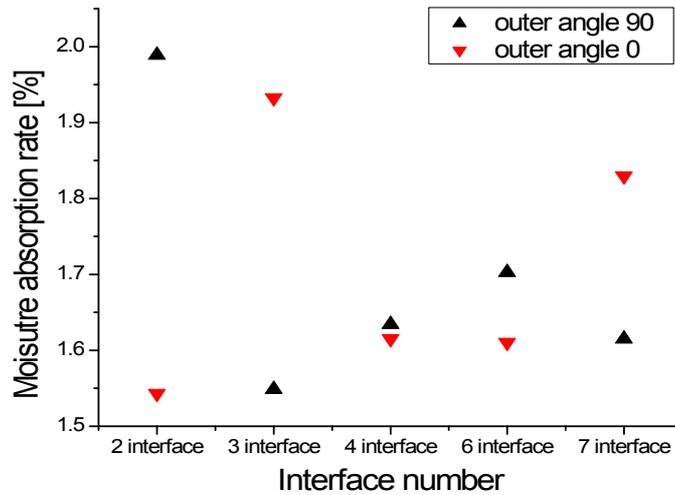


Fig. 18 Moisture absorption rate of the CFRP hat shaped section members according to outer angle

이상의 흡습 실험결과로부터 알 수 있듯이, 계면수 변화를 갖는 CFRP 모자형 단면부재 내부의 흡습거동을 살펴보면 시험편의 계면수가 적을수록, 적층된 시험편의 0° 방향 계면의 두께에 따라서 수분의 흡습률 차이가 있었으며, 시험편의 표면층에서 가까울수록 흡습의 증가가 큰 것을 알 수 있었다.

각각의 시험편 내부에 수분이 포화상태가 되는 시점에서 수분의 흡습률을 측정한 결과 최외각층 90° 를 갖는 시험편에서는 2계면의 적층구성을 갖는 시험편에서 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 집중됨으로써 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.

제 2 절 CFRP 모자형 단면부재의 정적압괴실험 결과

Figs. 19, 20에 최외층각이 90° 인 적층각도 $0^\circ / 90^\circ$ 의 CFRP 단일 모자형 부재에 대하여 대표적인 2, 7계면의 계면수 변화에 따른 정적압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 5~6에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 20mm 및 60mm일 때의 압괴과정을 나타내었다. 또한, Figs. 21, 22에 최외층각이 0° 인 적층각도 $90^\circ / 0^\circ$ 의 CFRP 모자형 부재에 대하여 대표적인 2, 7계면의 계면수 변화에 따른 정적압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타 내었으며, Photos. 7,8에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 20mm, 및 60mm일 때의 압괴과정을 나타내었다. 본 절에서의 압괴실험 결과는 황⁽³⁴⁾의 실험결과를 참고하였다.

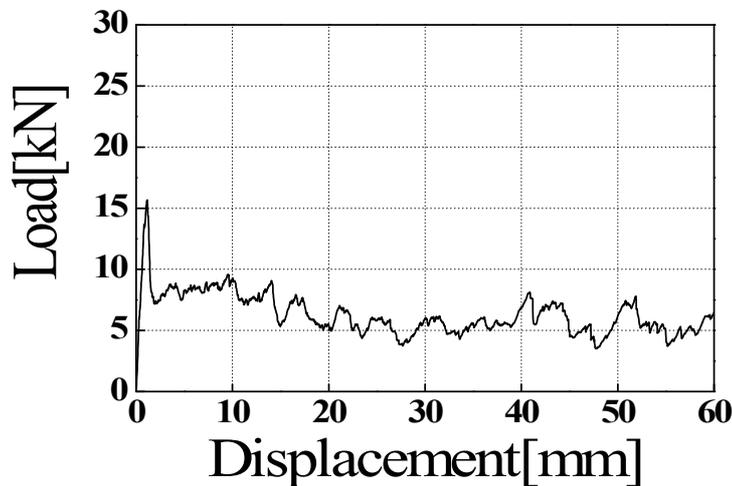


Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90_2/0_2]_s$
(2 interface number)

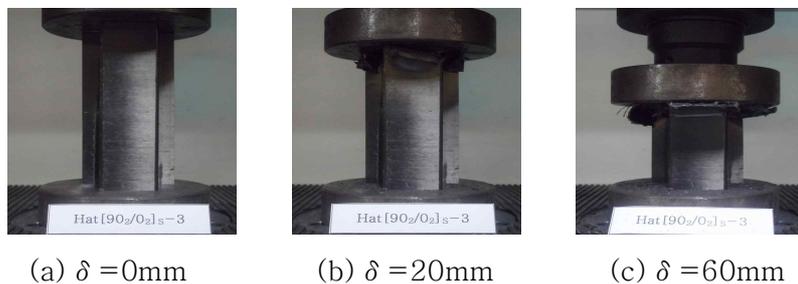


Photo. 5 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, $[90_2/0_2]_s$
(2 interface number)

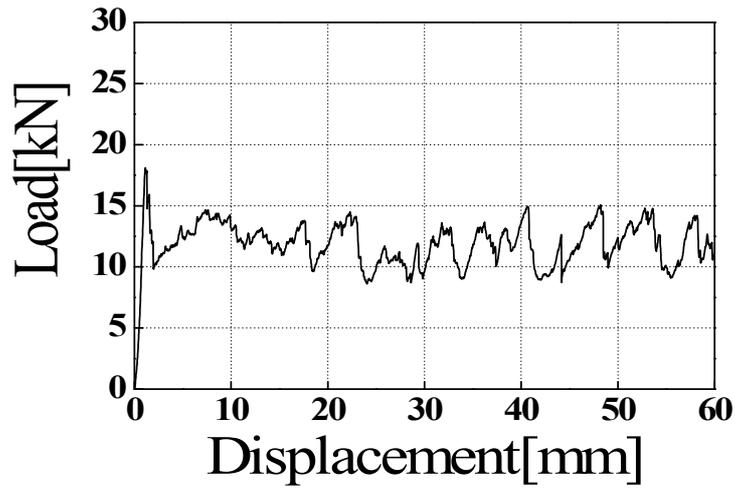


Fig. 20 Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0/90]_4$
 (7 interface number)

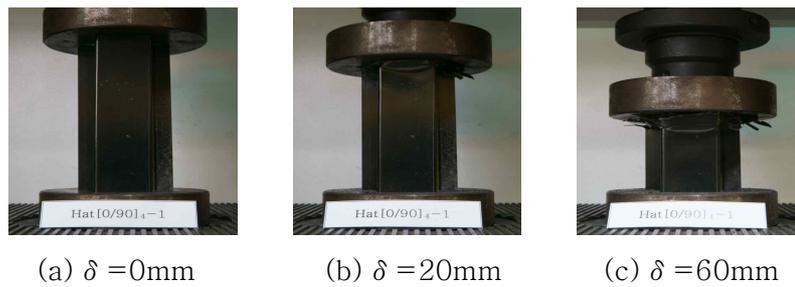


Photo. 6 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, $[0/90]_4$
 (7 interface number)

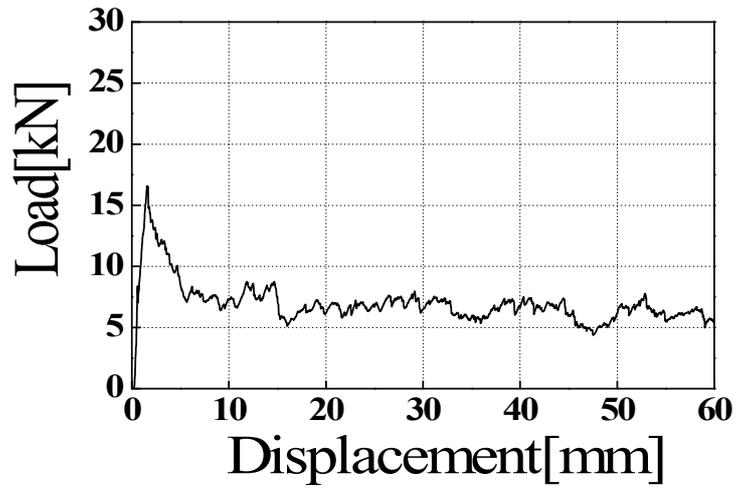


Fig. 21 Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[0_2/90_2]_s$
(2 interface number)



(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. 7 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, $[0_2/90_2]_s$
(2 interface number)

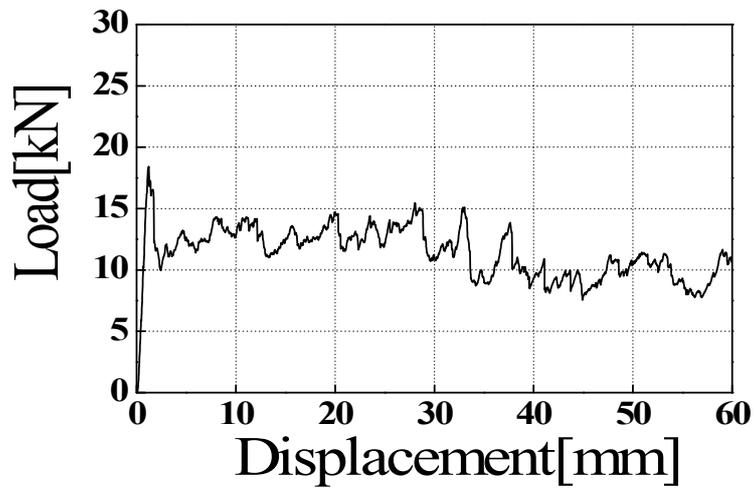


Fig. 22 Load–displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$
(7 interface number)

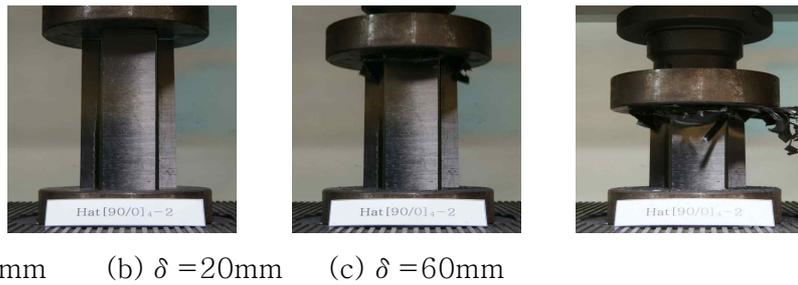


Photo. 8 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$
(7 interface number)

제 5 장 실험 결과 및 고찰

제 1 절 CFRP 모자형 단면부재의 축압축강도

본 장에서는 CFRP 복합재 내부에 수분이 흡수되었을 경우 정적강도 저하현상에 대해 고찰하였다.

최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 무흡습 시험편과 흡습 시험편으로 분류한 후 정적 압축실험을 통한 압축특성을 평가하였다.

Figs. 23~25는 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈다.

Figs. 26~28은 최외각층 0°의 조건을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편의 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지를 나타냈다.

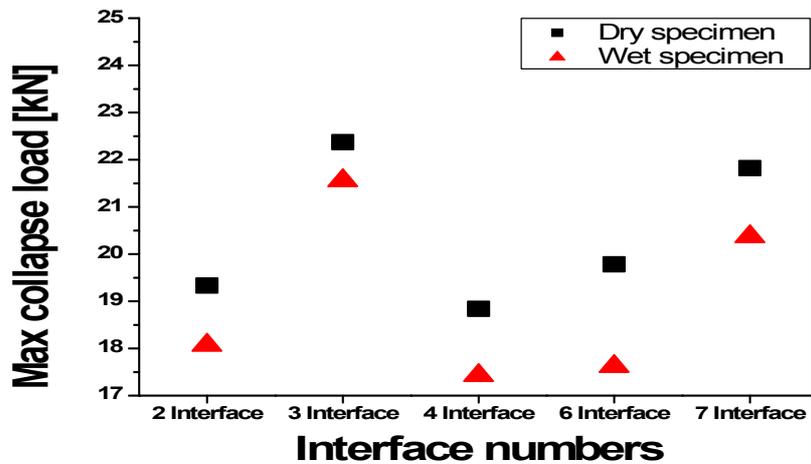


Fig. 23 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°)

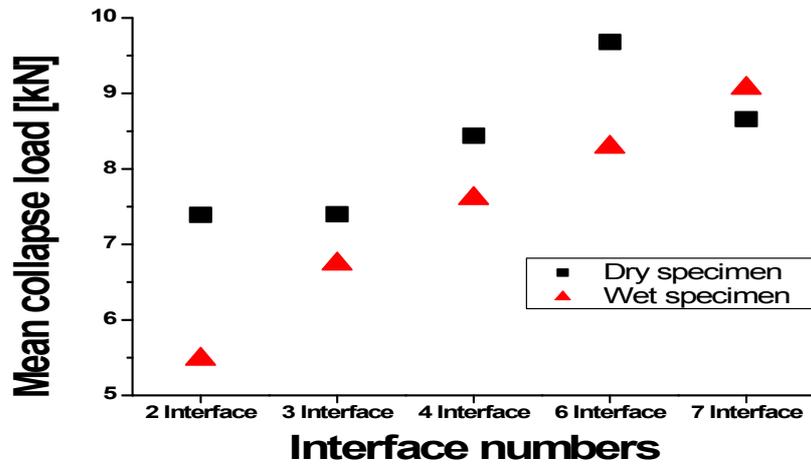


Fig. 24 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°)

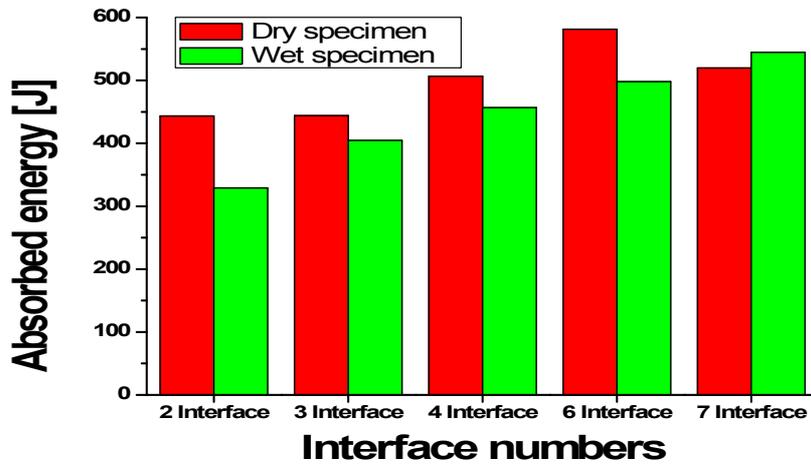


Fig. 25 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 90°)

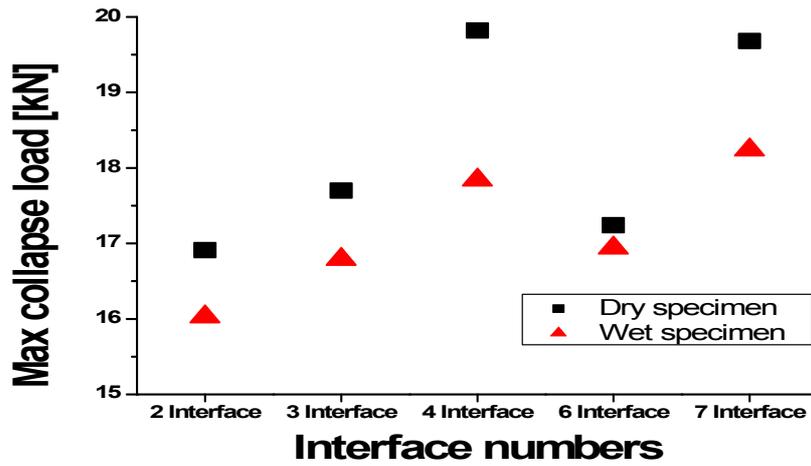


Fig. 26 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°)

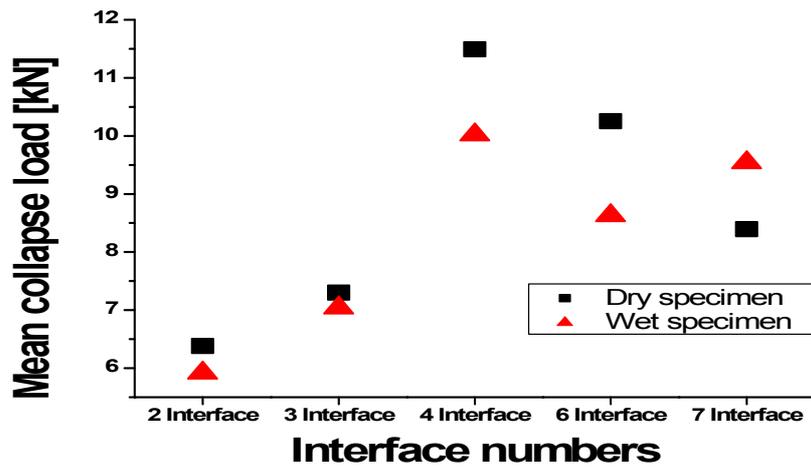


Fig. 27 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°)

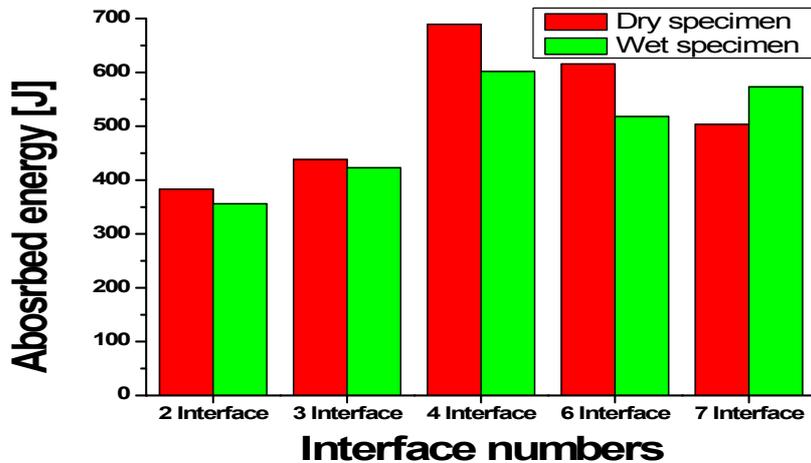


Fig. 28 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment, outer angle 0°)

이상의 압궤결과로부터 최대 압궤하중은 최외각층 90°시험편의 경우 Fig, 23, 24로부터 알 수 있듯이 계면수 증가에 따라 증가하다가 4계면 시험편에서는 감소의 경향을 보였으며, 다시 계면수 증가에 따라 최대하중이 증가하는 경향을 보였다. 이와는 달리 Fig, 23, 24로부터 알 수 있는 바와같이 최외각층 0°시험편의 경우 4계면 시험편까지는 최대하중이 증가하다 6계면 시험편에서는 감소하는 경향을 보였으며, 다시 7계면 시험편에서는 최대하중이 증가하는 경향을 보였다. 평균하중에서는 최외각층 90°시험편과 0°시험편에서 동일한 압궤특성을 보였다. 하지만 7계면 시험편의 경우 흡습 시험편이 무흡습 시험에 비해 평균하중이 증가하는 경향이 나타났다.

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

Fig, 25 와 28에 최외각층각이 각각 90°, 0°시험편의 계면수 변화에 따른 흡수에너지 변화 관계를 나타냈다.

흡수에너지는 최대하중과 유사한 경향의 압궤특성을 보였지만 최대하중에서의 감소치보다 평균하중과 흡수에너지에서의 감소치가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 시험편 축방향을 중심으로 각도의 변화에 따라 적층되어있기 때문에 수분의 영향이 최대하중보다는 이후의 압궤에 높게 작용했던 것으로 사료된다.

또한, 흡수에너지는 90°/0°과 0°/90° 시험편의 경우가 무흡습 시험편의 경우보다 흡습 시험편의 경우가 더 크게 나타남을 알 수 있었는데 수분의 흡수로 인하여 초기

최대하중 이후 안정적인 압력곡선을 그리면서 무흡습 시험편보다 더 안정적인 에너지의 흡수가 이뤄졌을 것으로 사료된다.

Figs. 29, 30은 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 계면수 변화 시험편의 강도저하율을 나타낸 것이다.

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

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

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

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

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

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

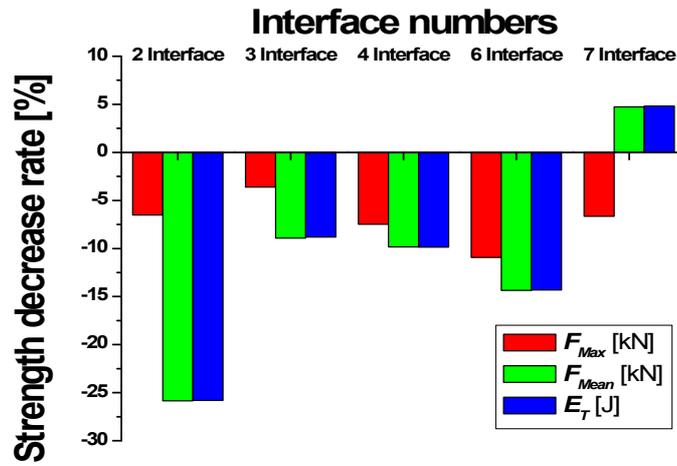


Fig. 29 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static, outer angle 90°)

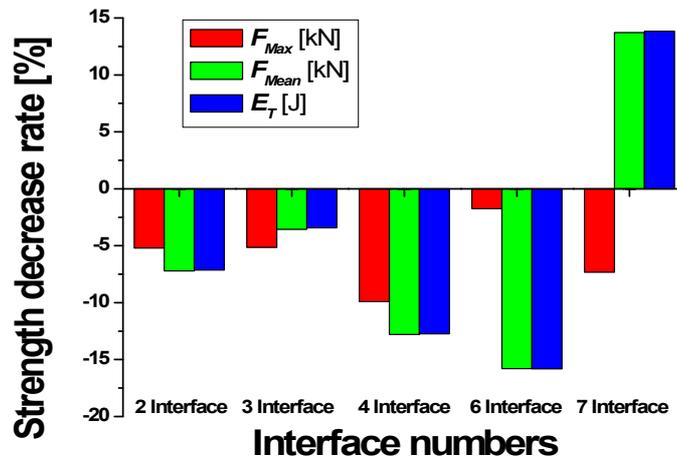


Fig. 30 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static, outer angle 0°)

제 2 절 CFRP 모자형 단면부재의 압괴모드

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

정적 압괴실험 시 일률적이고 안정적인 압괴데이터를 얻기 위하여 시험편 길이의 50%인 60mm까지 압괴를 실시하였다. 반면 충격 압괴실험에서는 크로스헤드에 의한 충격에너지에 견디는 시험편의 적층 각도의 변화로 인하여 압괴길이에서는 차이가 발생하는 것을 알 수 있었지만, Fig. 2의 Farley and Jones²⁶⁻²⁹⁾가 정의한 압괴 형상과 Photo. 9²⁵⁾의 실제 압괴된 형상의 단면부분을 살펴본 결과 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태 등의 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

먼저 무흡습 시험편의 정적압괴형상을 살펴보면 Photo. 10과 같이 0° /90° 로 적층된 부재에서는 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 횡방향 전단과 라미나 뒹임의 파단이 조합된 취성 파괴 모드의 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 주로 평판부재의 층간 크랙 및 층내 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 "ㄷ"자형 부재의 횡방향 전단모드에 의한 라미나 뒹임의 섬유 및 기지 파단과 라미나 뒹임의 굽힘과 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 이는 0° 로 적층된 라미나 뒹임은 층간 크랙 및 층내 크랙 진전에 의해 부재 외측으로의 라мина 굽힘을 발생시키지만 축 방향에 대하여 90° 로 적층된 섬유는 0° 로 적층된 라мина 뒹임의 라мина 굽힘을 방해하면서 파단 된다. 즉, 섬유는 굽힘이 존재하나 파단에 가까우며 크랙성장과 라мина 뒹임의 굽힘/파괴가 반복적으로 나타난다. 90° /0° 로 적층된 부재에서는 Photo. 11과 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라мина 뒹임의 섬유 및 기지 파단과 라мина 굽힘모드가 조합된 형상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 최외각층에 0° 로 적층된 라мина 뒹임에 의해 나타나는 라мина 굽힘이 두드러지게 나타났으며, 상대적으로 0° /90° 에서 주로 나타났던 섬유의 파단은 적게 나타났다.

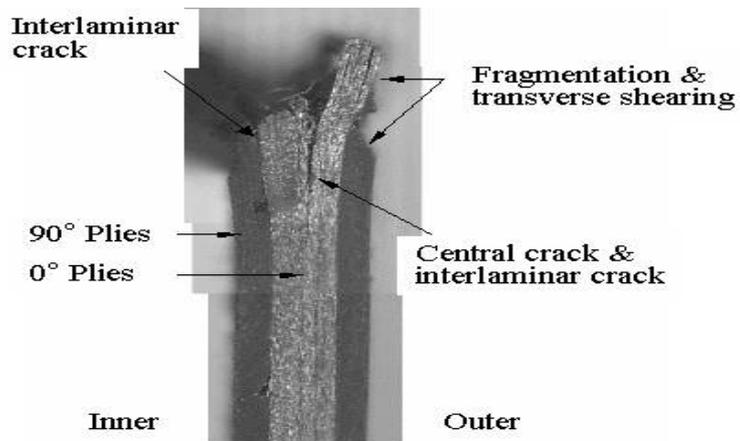
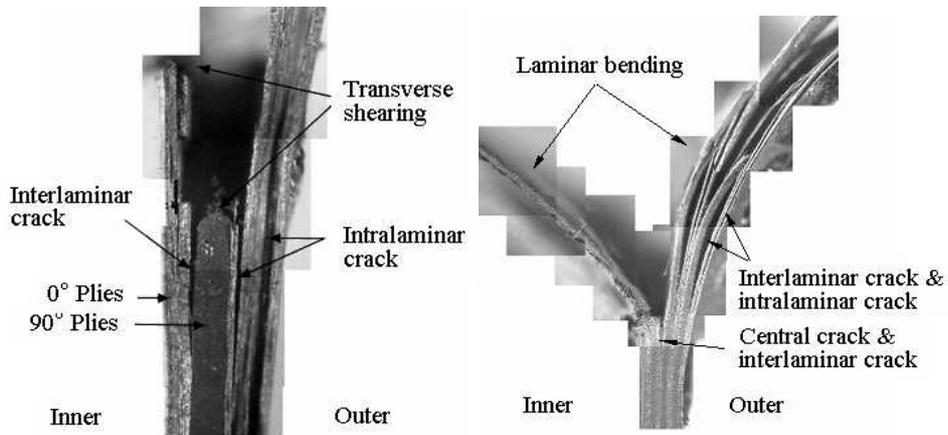


Photo. 9 Fracture section of the collapsed specimen



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



Photo. 11 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 0°, Static)

Photo. 12은 최외각층 90°의 조건을 갖는 7계면 무흡습 시험편의 압괴형상이며, Photo. 13는 최외각층 90°의 조건을 갖는 7계면 흡습 시험편의 압괴형상이다.

Photo. 14은 최외각층 0°의 조건을 갖는 7계면 무흡습 시험편의 압괴형상이며, Photo. 15는 최외각층 0°의 조건을 갖는 7계면 흡습 시험편의 압괴형상이다.

Photo. 12 ~ 15로부터 충격 압괴 실험의 경우 무흡습 시험편과 흡습 시험편 모두에서 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 90°인 경우 최외층 플라이(ply) 섬유에 의한 높은 압괴 특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드 및 시험편 모서리의 찢어짐을 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 0°인 경우 최외층 플라이 섬유의 확장으로 인한 확장형 스플라인 모드가 나타났고, 시험편 내부에서는 최외층 90°에서 보였던 파괴와 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드를 관찰할 수 있었다. 무흡습 시험편의 경우에서도 수분이 흡수된 시험편의 경우와 마찬가지로 계면의 변화와 최외각층의 변화에 따른 압괴모드 또한 수분이 흡수되지 않았던 시험편에서 나타났었던 취성파괴와 동일함을 알 수 있었다. 하지만 수분의 흡수로 인해 탄소강화섬유와 에폭시 간의 결합력의 약화로 섬유와 층간 파괴보다는 굽힘이 주를 이루는걸 알 수 있었다. 또한 최외각층 90°의 경우에는 최외층 섬유가 횡방향으로 접히는 압괴모드를 관찰할 수 있었으며, 수분이 흡수되지 않았던 시험편에 비해 모서리의 찢김 없이 안정적인 압괴가 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분이 흡수됨으로 인하여 시험편 내부의 탄소강화섬유와 에폭시 사이의 결합력이 완화되면서 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.

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



Photo. 12 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 90°, Impact)



Photo. 13 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (wet specimen, 7 interface, outer angle 90°, Impact)



Photo. 14 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (dry specimen, 7 interface, outer angle 0°, Impact)



Photo. 15 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (wet specimen, 7 interface, outer angle 0°, Impact)

결 론

1. CFRP 모자형 적층재의 계면수가 적을수록, 적층된 CFRP 적층재의 0° 방향 계면의 두께에 따라서 수분의 흡습률 차이가 있었으며, CFRP 적층재의 표면층에서 가까울 수록 또 수분이 흡수되는 계면의 두께가 두꺼울 수록 흡습의 증가가 크게 나갔으며, 최외각층 0° 를 갖는 3계면의 CFRP 적층재의 흡습률이 가장 높음을 알 수 있었다.
2. 최대 압케하중은 최외각층 90° CFRP 적층재의 경우 계면수 증가에 따라 증가하다가 4계면 CFRP 적층재에서는 감소의 경향을 보였으며, 다시 계면수 증가에 따라 최대하중이 증가하는 경향을 보였다. 이와는 달리 최외각층 0° CFRP 적층재의 경우 4계면 CFRP 적층재 까지는 최대하중이 증가하다 6계면 CFRP 적층재 에서는 감소하는 경향을 보였다.
3. 수분의 흡수로 인한 강도의 저하현상을 비교해본 결과 최외각층 90° 의 조건을 갖는 2계면 CFRP 적층재와 최외각층 90° 와 0° 의 조건을 갖는 7계면 CFRP 적층재를 제외한 모든 CFRP 적층재에서 무흡습 CFRP 적층재에 비해 약 10% ~ 15%의 강도저하가 나타남을 알 수 있었다.
4. 7계면 CFRP 적층재의 경우 최대하중의 감소는 약 10% 이내로 나타났지만, 평균 하중과 흡수에너지는 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 최외각층 90° 의 조건보다는 0° 의 조건을 갖는 7계면 CFRP 적층재에서의 증가치가 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 최외각층 0° 의 조건을 갖는 7계면 CFRP 적층재의 경우 흡습률이 높았기 때문인 것으로 사료된다.
5. 0° /90° 로 적층된 무흡습 CFRP 적층재의 정적압케형상을 살펴보면 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 횡방향 전단과 라미나 묶음의 파단이 조합된 취성파괴 모드의 형상으로 압케되었다. 이러한 압케모드는 주로 평판부재의 층간 크랙 및 층내 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 "ㄷ"자형 부재의 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 묶음의 굽힘과 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다.
6. 90° /0° 로 적층된 무흡습 CFRP 적층재의 정적압케형상을 살펴보면 평판부재는

층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㄷ"자형 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶임의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형 상으로 압괴되었다. 이러한 압괴모드는 최외각층에 0° 로 적층된 라미나 묶임에 의해 나타나는 라미나 굽힘이 두드러지게 나타났으며, 상대적으로 0° /90° 에서 주로 나타났던 섬유의 파단은 적게 나타났다.

7. 수분이 흡수되었던 CFRP 적층재들은 초기 압괴 시 수분이 흡수되지 않았던 CFRP 적층재와 동일한 취성파괴를 관찰할 수 있었지만 점차 파괴 보다는 굽힘이 주를 이루면서 수분이 흡수되지 않았던 CFRP 적층재보다 안정적인 압괴가 진행됨을 알 수 있었다. 특히, 4계면 CFRP 적층재와 7계면 CFRP 적층재의 경우 수분의 흡수로 인하여 가장 안정적인 압괴 형상을 나타냄으로써 압괴특성에서 알 수 있듯이 흡수에너지의 증가가 나타남을 알 수 있었다.

8. 충격 압괴 실험의 경우 무흡습 CFRP 적층재와 흡습 CFRP 적층재 모두에서 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 90° 인 경우 최외층 플라이(ply) 섬유의 파단에 의해 높은 압괴특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드 및 CFRP 적층재 모서리의 찢어짐을 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 0° 인 경우 최외층 플라이 섬유의 확장으로 인한 확장형 스프라인 모드가 나타났고, CFRP 적층재 내부에서는 최외층 90° 에서 보였던 파괴와 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드를 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S. Abrate, "Impact on lamina composite materials," *applied Mechanics review*, Vol. 44, No. 4, 1999, pp.155-190.
2. C. Ruiz and J. harding, "Modelling impact of composite structures using small specimens," in *Impact Behaviour of Fiber-reinforced Composite Materials and Structures* (S.R. Reid and G. Zhou, eds), Woodhead Publishing Ltd., 2000.
3. S. Abrate, *Impact on composite structures*, Cambridge University Press. 1988.
4. 광규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 『자동차경제』, 24-29, 1997
5. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (VI)." 『자동차공학회지』 26:30-35, 2004.
6. Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H. and Park, G. G.. "Light weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments." *Transactions of KSAE* 10:125-132, 2002.
7. Huh, H., Kim, K. P., kim, S. H., Song, J. H., and Hong, S. K.. "Crashworthiness assessment of frond side members in an auto-body considering the fabrication histories." *Int. J. Mech. Sci.* **45**:1645-1660, 2003.
8. 김기풍·송정환·허훈·김현섭·홍석길. "성형 효과를 고려한 차체 구조 부재의 충돌 특성." 『한국정밀공학회논문집』 12:91-98, 2004.
9. Kim, B. J. and Heo, S. J.. "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles" *Inernational Journal of Automotive Technology* 4:141-147, 2003.
10. Hanssen, A. G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S.. "Optimum design for energy absorption of square aluminum columns with aluminium foam filler." *Int. J. Mech. Sci.* 43:153-176, 2001.
11. Avalle, M. and Belingardi, G.. "Experimental evaluation of the strain field history during plastic progressive folding of aluminum circular tubes." *Int. J. Mech. Sci.* 39:575-583, 1997.

12. Minoru, Y., Manabu, G. and Yasuhiko S.. "Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections numerical simulation and experiment." *Journal of Materials Processing Technology* 140:59-64, 2003.
13. 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.
14. 최홍섭, 안규중, 남재도 "단일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료 적층판의 수분흡수거동" , *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 22, pp. 1486 ~ 1500, 1998.
15. G. Sala, "Composite degradation due to fluid absorption" , *Composites Part B*, Vol. 31, pp. 357 ~ 373, 2000.
16. Yuichiro Aoki, Ken Yamada, Takashi Ishikwa, "Effect of Hygrothermal Condition on Compression Sfter Impact Strength of CFRP Laminates" , *composites science and technology*, Vol. 68, pp. 1376 ~ 1383, 2007.
17. J.S.Lool, I.Y.Yang and T.Adachi, "Characteristics of Delamination in Graphite/Epoxy Laminates under Static and Impact Loads," *Key Engineering Materials*, Vol. 183 ~ 187, pp. 731 ~ 736, 2000.
18. 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.
19. 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.
20. Cairns D. S. and Lagace P. A., "Residual Tensile Strength of Graphite/Epoxy and Kevlar/Epoxy Laminates with Impact Damage" , *Composite Materials: Testing and Design*, ASTM STP 1059, Philadelphia, Vol. 9, pp. 48 ~ 63, 1990.
21. 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 Cretically for Composite Materials*, ASTM

STP 696.

22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압특성." 조선대학교 박사논문, 2002.
26. G. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes."Journal of Composite Materials 26:37-50,1992
27. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes."Journal of Composite Materials 26:78-80,1992
28. G. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of composite Tubes with "Near-Elliptical" Cross Sections."Journal of Composite Materials 26:1741-1751,1992
29. G. L. Farley, R.M. Jones."Prediction of Energy-Absorption Capability Composite Tubes ."Journal of Composite Materials 26:388-404,1991
30. H. Hamada, S .Ramakrishna, M. Nakamura, Z. Maekawa, T. Nishiwaki. "Energy-Absorption Characteristics of Composite Tubes with Different Coss-Sectional Shapes. "Proceeding of the 10th Annual ASM/ESD Advanced Composites Conference: 523-534,1994.
31. N. K. Gupta, R. Velmurugan."Consideration of Internal Folding and Non-symmetry in Axi-symmetric Axial Compression of Round Tubes."Int. J.

- of Solid and Structures, 1996.
32. N. K. Gupta, R. Velmurugan, S. K. Gupta."An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes."Journal of Composite Materials 31:1262-1286,1997.
33. 양용준. "열습 환경하에서 CFRP 모자형 단면부재의 충격특성 평가." 조선대학교 박사논문, 2011.
34. 황우채. "차체구조용 CFRP 모자형 부재의 충돌 안전성능 평가." 조선대학교 박사논문, 2012.