creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000267102

2019년 2월

석사학위 논문

경량화 구조부재의 단면형상 변화가 축압궤특성에 미치는 영향

조 선 대 학 교 산업기술융합 대 학 원

융합자동차공학과

이 승 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경량화 구조부재의 단면형상 변화가 축압궤특성에 미치는 영향

Influence of Axial Collapse Characteristics on Change in Section Shapes of Structurals Member of Light weigh

2019년 2월 25일

조 선 대 학 교 산업기술융합 대 학 원

융합자동차공학과

이 승 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경량화 구조부재의 단면형상 변화가 축압궤특성에 미치는 영향

지도교수 김 지 훈

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조 선 대 학 교 산업기술융합 대 학 원

융합자동차공학과

이 승 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이승원의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 이 동 기 ㊞

위 원 조선대학교 명예교수 양 인 영 ㊞

위 원 조선대학교 부 교 수 김 지 훈 ㊞

2018 년 11 월

조 선 대 학 교 산업기술융합 대 학 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ····· Ⅰ
LIST OF FIGURES ····· Ⅱ
LIST OF PHOTOS ····· Ⅳ
ABSTRACT ····· Ⅴ

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1절 연구배경 ····· 1
제 2절 연구목적 및 연구방법 ····· 4

제 2 장 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤관련 연구동향 · 6
제 1절 탄소섬유강화 복합재 박육부재의 압궤모드 ····· 6
제 2절 탄소섬유강화 복합재 박육부재의 압궤이론 ····· 13

제 3 장 실험방법 ····· 18
제 1절 시험편 ····· 18
제 2절 축압궤실험 ····· 26

제 4 장 실험결과 및 고찰 ····· 30
제 1절 압궤 실험결과 ····· 30
제 2절 압궤 특성평가 결과 ····· 40
제 3절 압궤모드 해석 ····· 47

제 5 장 결 론 ····· 50
【참고문헌】 ····· 52

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet ····· 19
Table 2 Stacking sequence of CFRP specimen ····· 19
Table 3 Static collapse test result for CFRP laminates according to interface interface number and cross section configuration ····· 41

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Flow chart of vehicle weigh lightening ····· 2
Fig. 2 Improvement direction of the worldwide automotive industry ····· 2
Fig. 3 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes ····· 7
Fig. 4 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode ····· 8
Fig. 5 Sketch of crack propagation modes ····· 8
Fig. 6 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode ····· 10
Fig. 7 Friction related energy-absorption mechanisms ····· 10
Fig. 8 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode ····· 12
Fig. 9 Crushing characteristics of local buckling crushing mode ····· 12
Fig. 10 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load ····· 15
Fig. 11 Configuration of Specimens ····· 21
Fig. 12 Stacking conditions of CFRP single hat shaped section members (out angle 90°) ····· 23
Fig. 13 Curing cycle of CFRP stacking specimen ····· 24
Fig. 14 Schematic diagram of autoclave ····· 25
Fig. 15 Autoclave laminate stack lay-up CFRP Flate specimen ····· 25
Fig. 16 Load-displacement curve of CFRP circular member, $[0/90]_4$ (7 interface number) ····· 27
Fig. 17 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$ (7 interface number) ····· 28
Fig. 18 Load-displacement curve of CFRP double hat shaped member, $[0/90]_4$ (7 interface number) ····· 29
Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Circular section ····· 32

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Single hat section ····· 34
Fig. 21 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Double hat section ····· 36
Fig. 22 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Circular member section ····· 37
Fig. 23 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Single hat section ····· 38
Fig. 24 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Double hat section ····· 39
Fig. 25 Relationship between Interface numbers and Maximum collapse load CFRP circle shaped member and CFRP square shaped member · 43
Fig. 26 Relationship between Interface numbers and Absorbed Energy for CFRP circle shaped member and CFRP square shaped member · 43
Fig. 27 Relationship between Interface numbers and Maximum collapse load for Single hat CFRP member and Double hat CFRP members ··· 44
Fig. 28 Relationship between Interface numbers and Absorbed Energy for Single hat CFRP member and Double hat CFRP members ····· 44
Fig. 29 Relationship between Interface numbers and Maximum collapse load according to change of CFRP member sections ····· 46
Fig. 30 Relationship between Interface numbers and Absorbed Energy according to change of CFRP member sections ····· 46

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF PHOTOS

Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross -section ····· 13
Photo. 2 Autoclave ····· 24
Photo. 3 Universal testing machine ····· 26
Photo. 4 Collapse processing of CFRP circular member, $[0/90]_4$ (7 interface number) ····· 27
Photo. 5 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$ (7 interface number) ····· 28
Photo. 6 Collapse processing of CFRP double hat shaped member, $[0/90]_4$ (7 interface number) ····· 29
Photo. 7 Collapse shape of CFRP members ····· 48

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Influence of Axial Collapse Characteristics on Change in Section Shapes of Structurals Member of Light weigh

Seung-Won Lee
Advisor : Prof. Ji-Hoon Kim, Ph.D.
Dept. of Automotive Engineering
Graduate School of Industrial Technology

The most important goals in designing automobile are safety and environment -friendless. Vehicle structure must be lightweight in order to improve fuel-efficiency and reducing exhaust fumes. Therefore, recent trend in vehicle design is aimed at improving the aims at environment- friendliness and collision safety requirements of the vehicles. For the former, the trend is toward light-weight of vehicles to improve fuel efficiency and reduce tail gas emission due to the heavier restriction on exhaust levels.

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.

In the study, experimental investigations are carried out for the CFRP circular shaped member , CFRP square shaped member, CFRP single hat shaped member and CFRP double hat shaped section member in order to study the effect of various interface number and shape of cross section under the axial collapse loading.

Static collapse tests were performed with change of the stacking condition, such as interface number and shape of cross section. Also, Collapse mode and energy absorption characteristics were analyzed.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Following the above study, conclusions are drawn as below;

1. In the case of CFRP member with equal thickness, Circular shaped member , squar shaped member, single hat shaped member and double hat shaped member showed transverse shear, laminar bending, brittle fracture, localized collapsing, and its combination. Collapse mode in“ㄷ” shaped member of CFRP single hat member and CFRP double hat member showed brittle fracture mode combined with laminar bending and transverse shear.

2. In the case of static collapsing test in order to energy absorption characteristics evaluation, Energy absorption pattern of CFRP single hat shaped member and CFRP double hat shaped member show the similar behavior. CFRP double hat shaped member shows 25% higher energy absorption compared with CFRP single hat shaped member.

3. In the case of maximum collapse load, CFRP double hat shaped member is biggest of the orther CFRP members. and in the case of absorbed energy, CFRP double hat shaped member a lot of interface is biggest of the orther CFRP members. and CFRP square shaped member is most unstable. Conclusionally, the most effective energy absorption was showed in case of CFRP double shaped member and a lot of interface member. Therefore, Energy absorbing characteristics are independent on the variation of interface number.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1절 연구배경

최근, 탄소섬유강화 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 수송기계 경량화 분야, 선박분야, 스포츠 레저 분야 및 우주항공분야 까지 그 이용이 점차 확대되어 가고 있다. 특히, 환경오염 방지 및 연료절감 차원에서의 미래자동차 분야 등 수송기계 분야의 구조경량화 재료로서 큰 각광을 받고 있다. 또한 항공기의 2차 구조뿐만 아니라 가혹한 환경 하에서 사용되는 1차 구조부재에 이르기 까지 응용분야가 점차 확대되어 가고 있다. 이와 같이 복합재료는 높은 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)의 특징을 가지기 때문에 항공우주, 자동차, 해양, 전기전자, 기반 산업뿐만 아니라 스포츠 용품과 의학 산업에 까지 다양한 분야에서 점점 사용이 증가되고 있다. 그러나 복합재료는 피로특성이 우수하고 높은 댐핑특성 및 고온 환경 하에서도 높은 치수 안정성 등이 있는 등 역학적 특성은 아주 우수하나 외부 충격하중을 받으면 역학적 특성이 급격히 저하되는 문제점이 있다.

최근, 전 세계적으로 성 에너지, 환경, 안전성에 대한 높은 관심으로, 탄소섬유 복합재료 등의 선진 복합재료를 사용한 경량화기술이 시판 차량으로 적용, 확대되고 있다. 특히 각종 규제 도입시기가 다가오고, 규제 내용도 엄격한 유럽에서 선진 복합재료의 적용 검토가 먼저 시행되고 있는데, 일본 국내에서도 Fig. 1 과 같이 적용기준이 점점강화 되고 있다[1]. 또한, 민간 항공기에서의 어프로치와 마찬가지로, 자동차에서도 패널부재 등의 2차 구조재로 적용이 시작되면서 캐빈 등의 1차 구조재로도 적용이 확대되고 있다. 바꿔 말하면 외관, 패션 성능이 중시되는 장식부재에서, 안전성 등 성능 · 기능이 중시되는 구조 부재로 적용이 확대되고 있는 것이다. 탄소섬유강화 복합재를 적용함으로서 자동차의 중량은 약30% 경량화가 가능해 지겠지만 대폭적인 경량화와 함께 안전성, 일체화에 의한 부품점수 저감에 의한 조립비 다운, 경량 · 고강성 화로 인한 운전성능 향상, 내구성 향상 등도 기대된다는 점도 적용이 확대되는 드라이빙 포스가 되고 있다. 향후, 전기자동차 등, 보다 경량화효과를 낼 수 있는 차세대 자동차 에도 본격적인 적용이 예상된다.[1] 또한, 산업 환경여건 변화에 따른 시장전망에 의하면[2] 수급양면의 변화에 세계적인 환경규제 강화까지 더해져 기존의 내연기관차량에서 친환경·고효율 그린카로 패러다임이 급변하고 있으며 하이브리드자동차 및 연료전지자동차는 동력발생장치의 차이에 따른 차량분류로서 기존 내연기관자동차를 대체하는 역할을 수행하므로 각 동

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

력발생장치별 시장점유율 변화가 매우 중요하다. 하이브리드차량이 주력차종으로 부상하는 시기는 2020년 이후가 될 것으로 예상되며, 연료전지자동차는 2020년까지 시장에 도입되는 정도의 수준에 머무르고, 2030년 이후에야 시장을 주도할 것으로 예측된다.

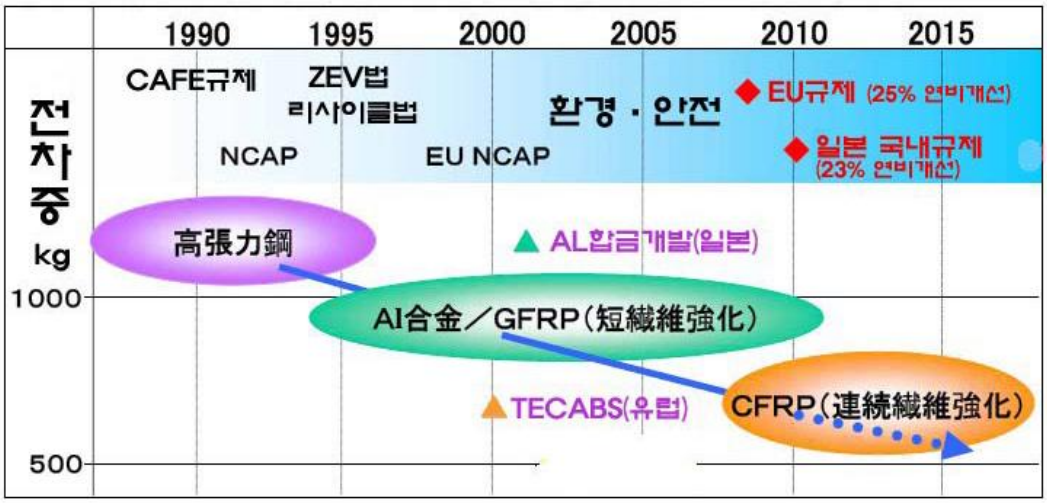


Fig. 1 Flow chart of vehicle weigh lightening

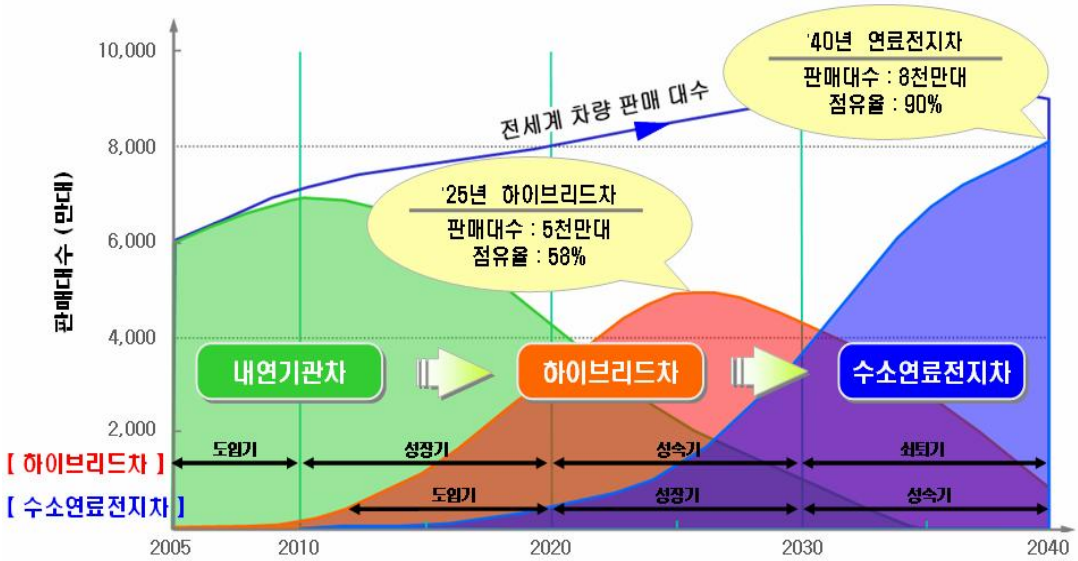


Fig. 2 Improvement direction of the worldwide automotive industry

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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, 경량재료의 개발을 통한 차체 중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비개선 방안으로 평가되고 있어 기존의 철강부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다.[3-13)]

따라서 이러한 경량화용 구조부재의 충돌안전성능 평가에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 차체 앞부분은 엔진이나 현가장치를 지지하고 여러 보조 장치를 격납하는 역할도 하지만, 전면 충돌 시 에너지를 흡수할 수 있는 구조로 되어야 한다. 많은 차량에서는 차체 앞부분의 내판을 모자형 단면형상의 강도부재로 구성하여 충돌 사고 시 전면부 골격부재는 소성 변형하여 충돌에너지를 흡수하도록 설계하고 있다. 또한, 차실을 감싼 구조부재는 차체 앞부분이 소성변형하면서 에너지를 흡수하는 동안에 그 자체는 변형되지 않고 차실내의 공간을 유지하도록 설계하고 있다. 즉, 차실내의 구조부재는 에너지흡수라고 하는 관점과 차체 앞부분으로 부터 전달된 하중을 흡수·분산을 통하여 차실의 변형이 적게 되도록 설계하여 승객의 안전을 도모하도록 설계하여야 한다. 특히, 차량의 초기설계 단계에서는 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압궤거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다. 그러나 탄소섬유강화 복합재 구조부재가 구조경량화용 차체 부재로 사용될 것을 상정한 연구결과들은 상당수 있고, 적층계면 수의 차, 적층각도의 차, 최외층 각도의 변화 등에 관한 연구결과 등은 찾아볼 수 있으나 단면의 형상의 차 및 계면수가 다른 적층 구성의 변화에 따른 탄소섬유강화 복합재 구조부재의 흡수에너지, 압궤모드 해석 등 압궤특성에 미치는 영향에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵다.

따라서 차량의 설계 단계에서는 차량전체의 전면 충돌을 예측하기 전에 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지흡수가 크고, 간단한 구조부재에 대해서 압궤거동과 에너지흡수특성을 정확히 파악 하는 것이 중요한 문제이며, 탄소섬유강화 복합재구조부재의 형상의 차(원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 단면 탄소섬유강화 복합재 부재 및 이중단면 탄소섬유강화 복합재 모자형 부재), 계면수의 차이에 따른 에너지흡수 능력과 파괴 시 압궤 모드 해석을 통한 정량적인 데이터를 산출하여 재현성이 우수한 설계의 필요성이 제기된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 연구목적 및 연구방법

자동차의 전면부 사이드 멤버로는 정면충돌 시 충돌에너지의 50~70%를 흡수하기 때문에 외부로부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 외부로 부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환하여, 승객의 안전 보호 공간 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 충돌 시 충돌속도의 크기를 감소시킬 수 있도록 안정한 접힘좌굴 모드를 유도 하여 차체구조부재 설계에 이용되고 있다.[14-15)]

따라서 본 연구에서는 자동차 설계 시 충돌에 의한 승객의 안전 보호 공간 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고 많은 에너지를 흡수할 수 있는 최적의 압궤특성을 갖는 구조부재를 개발하는데 필요한 기초데이터를 확보할 수 있도록 하고자한다. 탄소섬유강화 복합재 구조 부재가 경량화 자동차 구조부재의 사이드 부재로 상용 될 것을 상정하여 먼저, 단면적이 동일한 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재를 제작 한 후 단면의 형상의 변화와 계면수의 변화에 따른 최대 압궤하중의 변화, 흡수에너지의 변화 및 압궤 시 발생하는 탄소섬유강화 복합재 구조 부재파괴시의 압궤 모드에 관해 정량적으로 고찰함으로써 경량화용 자동차 구조부재를 개발하는데 적용 가능한 최적의 설계데이터를 얻고자 한다.

연구방법으로는 먼저, 단면적이 동일한 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재를 최외층각도가 90가 되도록 하고 계면수가 2,3,4,6,7계면이 되도록 적층하여 Autoclave 내에서 압력과 열을 가하여 경화시키는 성형법을 이용 하였고 재료시험기를 이용하여 축 방향 하중을 받는 경우의 정적 압궤실험을 행하였다.

실험결과로 부터 얻은 하중-변위선도로 부터 최대압궤하중, 흡수에너지 및 압궤모드 해석을 통해 단면의 형상과 계면수가 다른 탄소섬유강화 복합재 구조부재의 최적 압궤특성을 정량적으로 고찰하여 경량화용 자동차의 최적의 안전설계를 위한 데이터를 얻고자 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장에서는

본 연구와 관련된 경량화 자동차, 미래자동차 관련 국제적인 연구동향, 축압축 하중을 받는 탄소섬유강화 복합재 구조부재의 연구동향, 본 연구에서의 연구 목적 및 연구방법에 관하여 기술하였다.

제 2 장에서는

탄소섬유강화 복합재 박육부재에 하중이 작용할 경우 발생하는 압궤형상인 횡방향전단 압궤모드, 라미나 굽힘 압궤모드 및 취성파괴 압궤모드와 국부좌굴 압궤모드의 조합 등을 알 수 있도록 압궤모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하고, 각 압궤모드의 조합으로 발생되는 복합재 박육부재의 최대하중, 평균하중 및 평균 압궤응력을 수식할 수 있는 기존의 압궤이론을 서술하였다.

제 3 장에서는

단면의 형상 및 계면수가 다른 탄소섬유강화 복합재 구조부재 적층 및 성형방법, 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 단면 탄소섬유강화 복합재 부재 및 이중단면 탄소섬유강화 복합재 모자형 부재의 압궤실험방법에 관해 기술하였고,

제 4 장에서는

단면의 형상 및 계면수가 다른 탄소섬유강화 복합재 구조부재 즉 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 단면 탄소섬유강화 복합재 부재 및 이중단면 탄소섬유강화 복합재 모자형 부재의 최대 압궤하중의 변화 관계, 흡수에너지의 변화관계 및 압궤시 발생하는 각각의 압궤 모드의 해석을 통해 어떠한 탄소섬유강화 복합재 구조부재가 압궤특성이 가장 우수한가를 고찰하였다.

제 5 장에서는 본 연구의 결과를 나타냈다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤관련 연구동향

제 2장에서는 탄소섬유강화 복합재 박육부재의 평균압궤하중, 평균압궤응력, 흡수에너지 등에 관한 이론을 서술하였다. 기존의 탄소섬유강화 복합재 박육부재의 정적압궤 특성에 관한 연구는 대부분 실험적 방법에 그치고 있으며, 그 실험 또한 실험을 수행한 연구자 및 실험환경에 따라 크게 좌우된다. 따라서 본 장에서는 축압궤 하중 시 발생하는 압궤모드의 이해와, 모드해석을 이용한 이론해석을 다룸으로써 복합재 박육부재의 정량적인 이론해석을 위한 기본적인 데이터를 얻고자 기존의 연구결과 를 토대로 하여 정적 및 충격압궤 실험결과와 비교·고찰하고자 한다.

제 1절 탄소섬유강화 복합재 박육부재의 압궤모드[16)]

섬유강화 복합재 박육부재에 축 압축하중이 작용 시 발생하는 압궤형상은 횡방향전단 압궤모드, 라미나 굽힘 압궤모드 및 취성파괴 압궤모드와 국부좌굴 압궤모드의 조합으로 나타난다.[17~19)] 본 절에서는 이러한 각각의 압궤모드에 의해 흡수되어지는 에너지를 역학적으로 해석하였으며, 각 압궤모드의 조합으로 발생되는 복합재 박육부재의 평균압궤응력을 수식화 하였다.

연속섬유 강화 복합재 박육부재의 압궤과정은 Fig. 3과 같다. 즉 하중이 압궤 Initiator의 끝단에 작용할 때 재료의 국부파손은 발생하고 미소한 층내/층간 크랙이 형성되며, 횡방향전단, 라미나 굽힘 또는 이러한 모드의 조합(취성파괴)에 의해 층내/층간 크랙의 길이, 라미나 묶음 파괴 및 압궤모드가 결정된다. 또한 모든 복합재 박육부재가 점진적으로 압궤 되는 것은 아니며, 박육부재가 점진적으로 압궤 되는지의 여부는 박육부재의 구조형상과 섬유, 기지의 조합에 의존하게 된다. 따라서 이러한 복합재 박육부재에 축하중이 작용할 경우 발생하는 압궤모드를 이해하기 위해서는 4가지의 기본적인 압궤모드의 이해가 선행되어야 한다.

첫째, 횡방향전단 압궤모드는 Fig. 4와 같이 일부분의 라미나 묶음으로 형성된 종방향 크랙과 하나 또는 다중의 짧은 층간 크랙에 의존하며, 박육부재의 압궤 면은 하중이 박육부재의 표면을 따라 일정치 않게 전파되는 것과 같은 부채꼴 모양의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

형태를 갖는다. 횡방향전단 압궤모드의 주요 에너지 흡수 메커니즘은 Fig. 4와 같이 라미나 묶음의 파괴이며 크랙의 수, 위치, 길이는 시험편의 구조형상과 성분 재료특성의 함수이다. 층간크랙 성장과 라미나 묶음파괴는 횡방향전단 압궤모드의 압궤과정을 제어한다. 층간크랙 성장은 기지의 역학적 특성, 라미네이트의 섬유배향각과 원주방향으로 적층된 섬유의 파손변형율 및 인장강성에 의해 제어된다. 층간크랙은 Fig. 5에 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 압궤모드가 존재하는 박육부재의 압궤과정의 에너지 흡수에 많은 기여를 한다. 라미나 묶음은 횡방향 굽힘 모멘트를 발생시키며, 라미나 묶음의 파괴는 라미나 묶음의 인장면에 대한 응력이 재료의 강도를 초과할 때 발생한다.

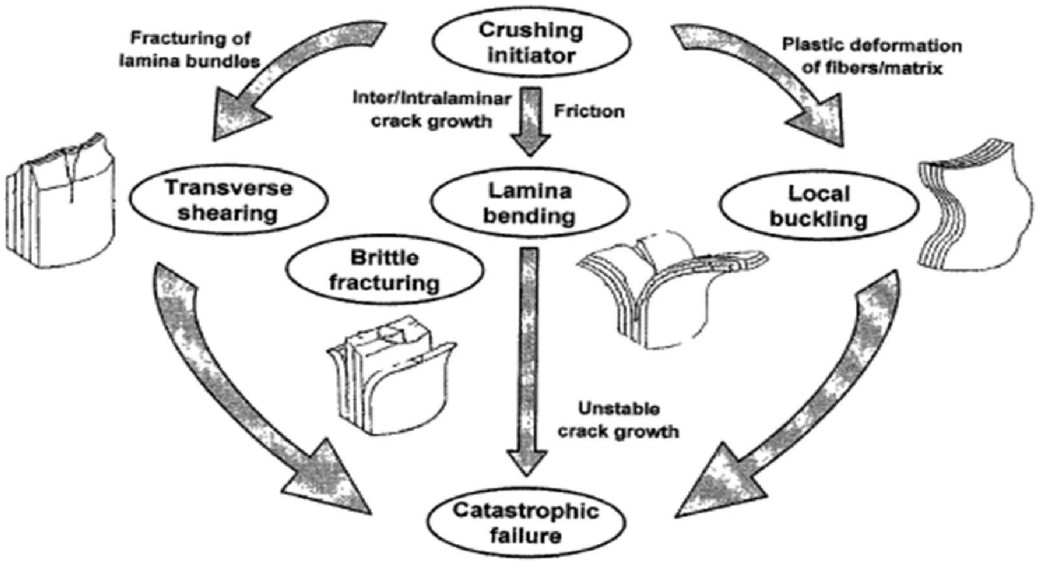


Fig. 3 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes[20)]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

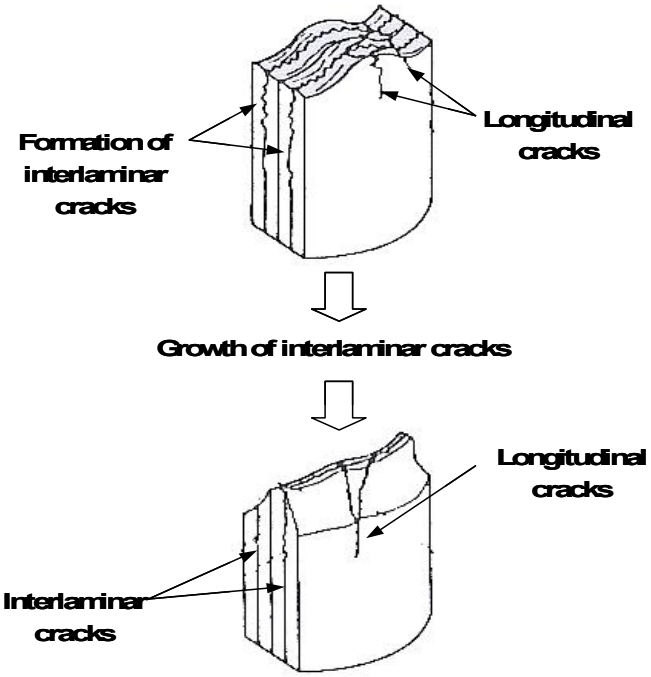


Fig. 4 Crushing characteristics of transverse shearing crushing mode

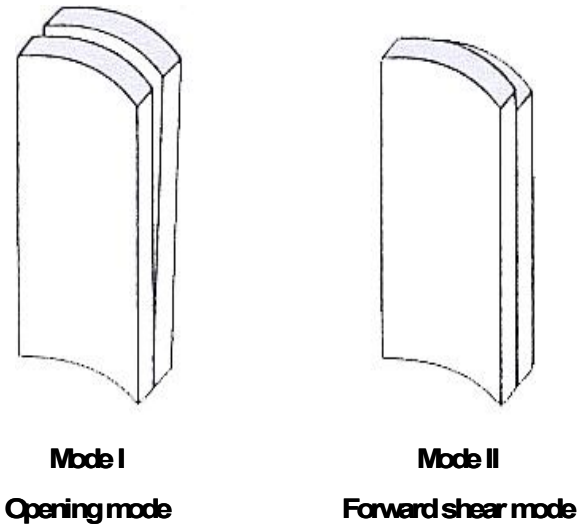


Fig. 5 Sketch of crack propagation modes

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

둘째, 라미나 굽힘 압궤모드는 Fig. 6과 같이 매우 긴 층간크랙 및 층내크랙과 섬유와 평행한 크랙이 나타나지만 라미나 묶음은 파괴되지 않는다. 즉, 주요 에너지 흡수 메커니즘은 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 흡수 메커니즘은 슬라이딩하는 다수의 라미나 묶음들 사이의 상대운동에 의한 저항으로 나타난다.

층간/층내 크랙 및 섬유의 수평방향 크랙의 성장과 마찰은 라미나 굽힘 압궤모드에 있어 압궤과정을 제어한다. 라미나 굽힘모드에 나타나는 크랙 진전은 횡방향 전단 모드와 유사하고, 라미나 묶음은 파괴되지 않으며 단지 압궤 면에 대한 저항으로 굽어질 뿐이다. 압궤표면을 따라 수반된 운동과 하중 면에 대한 라미나 묶음의 굽힘은 마찰력을 통해 에너지 흡수 메커니즘으로 나타나며, 마찰력은 Fig. 7과 같이 인접한 라미나 묶음의 상대운동으로부터 나타난다. 복합재료와 압궤표면사이에서 마찰계수와 근접한 라미나 묶음들간의 마찰계수는 압궤속도의 함수라 할 수 있다. 그러므로 에너지 흡수 능력은 압궤속도 변화에 따른 영향을 받는다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

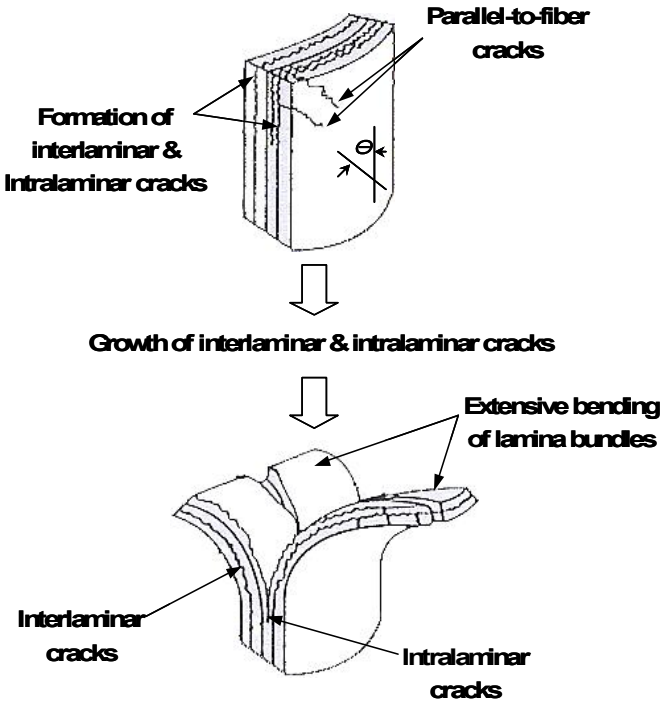


Fig. 6 Crushing characteristics of lamina bending crushing mode

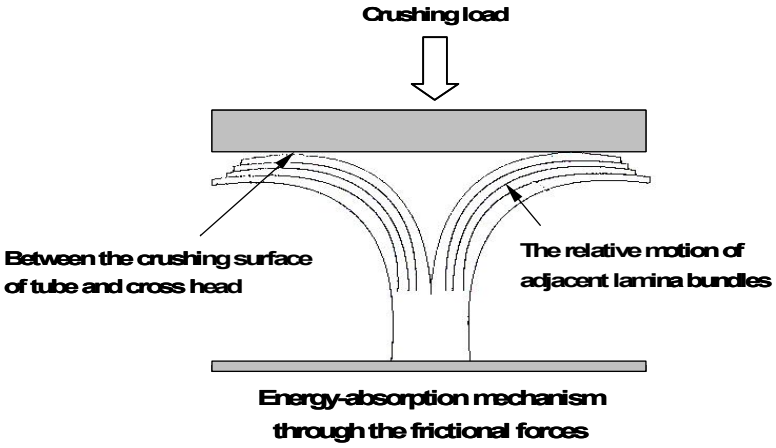


Fig. 7 Friction related energy-absorption mechanisms

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

셋째, 취성파괴 압궤모드는 횡방향전단과 라미나 굽힘 압궤모드의 조합이며, 취성섬유 강화 복합재 박육부재의 보고된 압궤결과의 대부분은 취성파괴 압궤모드이다. Fig. 8과 같은 취성파괴 압궤모드의 경우 라미나 묶음은 약간의 굽힘이 존재하고 파단에 가까우며, 라미나 묶음이 파단될 때 하중은 박육부재에 가해지고 크랙성장과 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복된다.

넷째, 취성 및 연성 섬유강화 복합재에 존재하는 국부좌굴 모드는 연성 금속에 존재하는 것과 유사하다. 이러한 압궤모드는 Fig. 9과 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 압궤된 후 손상되지 않은 부분이 존재하게 되며, 이는 섬유의 분리와 섬유 파손이 없는 기지의 소성변형에 의한 결과이고 섬유가 파단되지 않을 때 박육부재는 횡방향전단과 취성파괴 압궤모드에 존재하는 재료의 점진적인 파손의 저항으로 인해 손상 없이 국부좌굴 형상으로 압궤된다.

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 압궤모드를 나타낸다. 또한 섬유와 기지의 소성항복은 국부좌굴 압궤모드의 압궤과정을 제어한다. 국부좌굴 모드로 압궤되는 연성 섬유강화 복합재료는 섬유와 기지 모두의 항복으로 나타나며, 취성 섬유강화 복합재료는 단지 기지의 항복만 있는 국부좌굴 모드로 압궤된다.

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

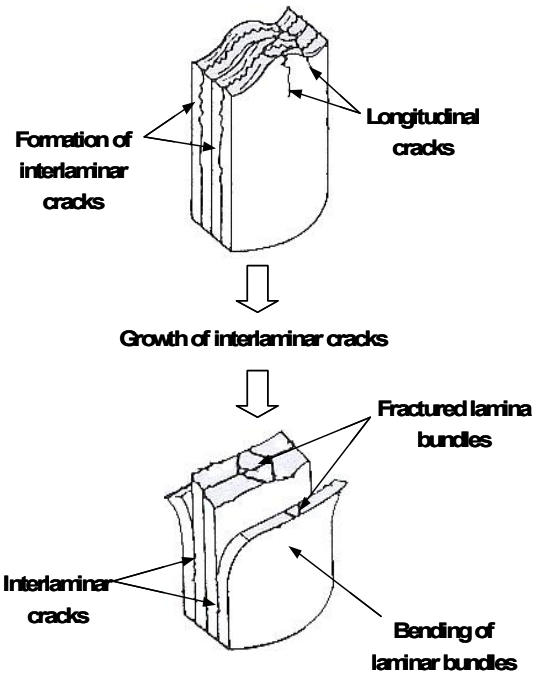


Fig. 8 Crushing characteristics of brittle fracturing crushing mode

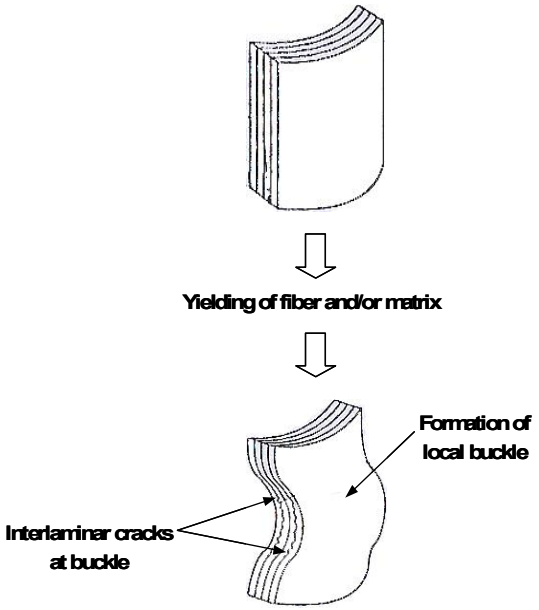


Fig. 9 Crushing characteristics of local buckling crushing mode

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

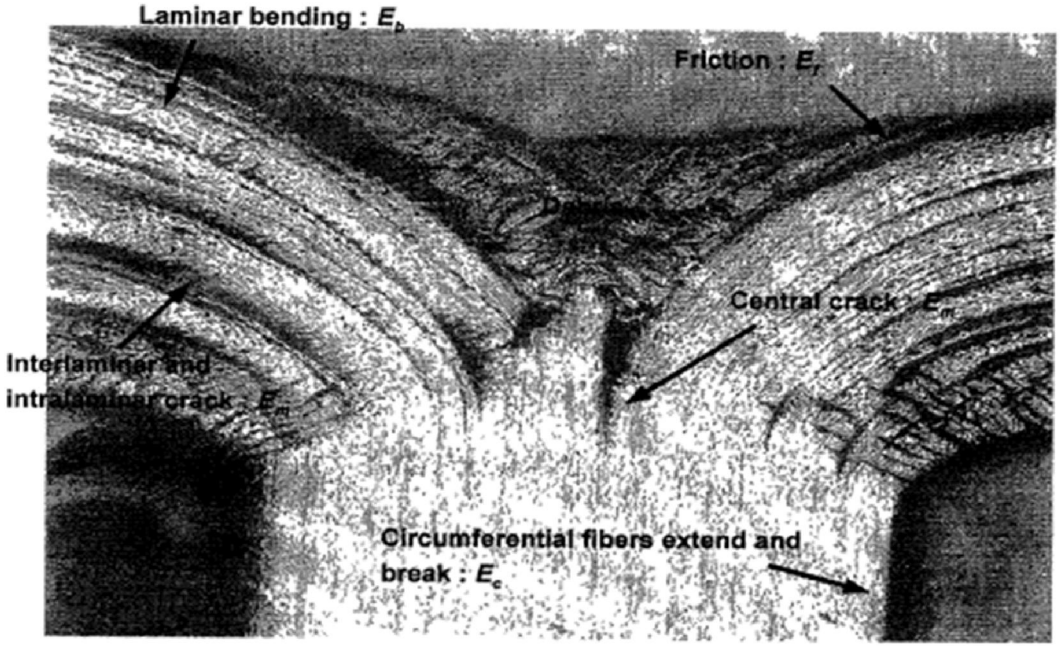


Photo. 1 The crush zone of Carbon/Epoxy tube with half circle cross-section[22)]

제 2 절 탄소섬유강화 복합재 박육부재의 압궤이론[16)]

복합재 원통박육부재가 압궤될 때 에너지 흡수특성을 지배하는 인자는 Photo. 1과 같이 기지(matrix)에 의해 흡수되는 에너지(E_m), 스플라인 형상으로 압궤되면서 흡수되는 굽힘 에너지(E_b)와 압궤되는 축 방향에 직각으로 발생되는 원주방향 에너지(E_c) 및 충격 판과 시험편에서 발생되는 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[22~23)] 의 기본적인 압궤이론 수식에 계면수 변화의 함수 $g(k)$를 보정함으로써 복합재 박육부재의 압궤이론 수식을 유도하고자 한다. 먼저 튜브에 가해지는 압궤 에너지는 앞에서 제시한 횡방향전단 모드에 의한 변형에 의해 흡수되어지며, 기지의 전단응력(τ_{my})과 크랙진전 위치까지의 전단변형율(γ)과 체적 및 계면수에 의존한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$E_m = \tau_{my} \cdot \gamma \cdot V \cdot g(k) = \tau_{my}(\frac{\delta_r}{l})2\pi Rtl \cdot g(k)$$
$$= 2\pi Rt \cdot \tau_{my}\delta_r \cdot g(k) \quad (1)$$

여기서 τ_{my}는 기지의 전단응력(항복강도의 45%), γ와 V는 중심크랙이 진전한 위치까지의 전단변형율과 체적, $g(k)$는 계면수 변화 함수이며 δ_r은 섬유의 원주 방향 변위, l은 중심크랙 길이(Length of Central crack)를 나타낸다.

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

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

또한 복합재 원통 박육부재의 대표적인 압궤형상은 Fig. 10(a)와 같은 원통벽의 단면 중앙에 생긴 쐐기형 크랙의 점진적인 진전과 함께 원통벽의 내측과 외측으로 확장하는 형상으로 압궤되어진다. 이러한 압궤모드는 라미나 묶음의 굽힘에 의한 에너지를 수반하며, 반지름(R)과 작용 모멘트(M) 및 쐐기형 크랙의 축 경사각(Θ)에 비례한다.

$$E_b = 4\pi RM\Theta \quad (3)$$

라미네이트의 최대 굽힘 모멘트(M)는 다음과 같다.

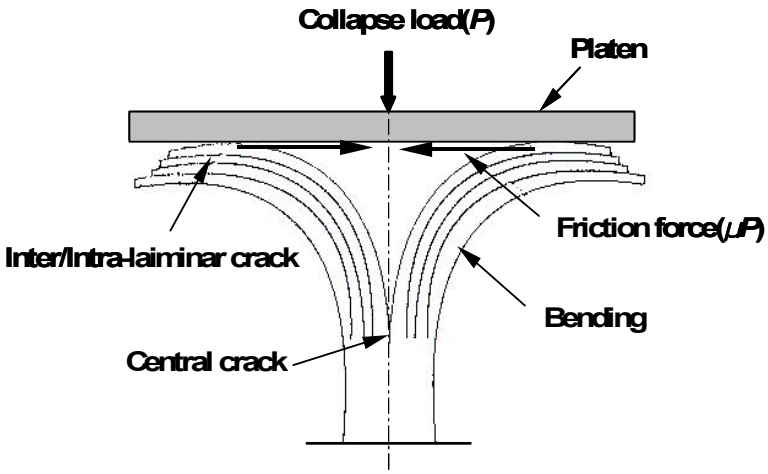
$$M = \frac{\left\{f_y\left(\frac{t}{2}\right)^2\right\}}{4} \quad (4)$$

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

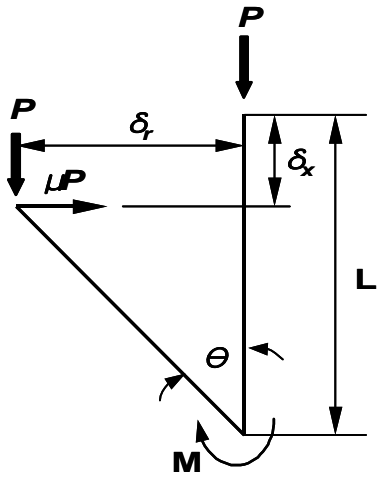
$$E_b = \pi R\left[\frac{f_y \cdot t^2 \cdot \Theta}{4}\right] \quad (5)$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Actual collapse pattern



(b) Ideal collapse pattern

Fig. 10 Collapse pattern of the composite tube under axial-compress load

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

$$E_c = \int \sigma_\Theta \cdot d\varepsilon \cdot dV \tag{6}$$

δ_r의 변형량에 의한 후프 스트레인(hoop strain), $d\varepsilon$은

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

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

$$E_c = \pi l^2 t \cdot \sigma_\Theta . \sin\Theta \tag{8}$$

튜브와 압축판의 마찰에 의해 흡수되어지는 에너지는

$$E_f = \mu P \delta_r \tag{9}$$

여기서 μ는 시험장치 압축판의 마찰계수이다.

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

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

또한 총 흡수에너지는 평균압궤하중과 압궤된 길이의 곱으로 나타낼 수 있으며,

$$E_t = P_{av}\delta_x \tag{11}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

$$P_{av}\delta_x - \mu P\delta_r = 2\pi Rt(\tau_{my}\delta_r + \frac{1}{8} f_y t\Theta + \frac{l^2}{2R}\sigma_\Theta \cdot \sin\Theta)$$

$$P_{av} = \frac{\tau_{my}\delta_r \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t\Theta + \frac{l^2}{2R}\sigma_\Theta \cdot \sin\Theta}{\delta_x - \mu\delta_r} 2\pi Rt \qquad (12)$$

본 연구에서 구하고자하는 평균 압궤응력은 식 (12)를 정리하여 구한 평균압궤하중을 시험편의 단면적으로 나누어줌으로써 얻을 수 있다. 단, $Sin\Theta = \delta_r / l = d\varepsilon R / l$, Θ는 0°에서 90°가 될 때까지 압궤되며 그 결과 $\Theta = \pi/2$, $l = \delta_r = \delta_x$ 가 된다.

$$\sigma_{av} = \frac{P_{av}}{A} = \frac{P_{av}}{2\pi Rt}$$

$$= \frac{\tau_{my}\delta_r \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t\Theta + \frac{l^2}{2R}\sigma_\Theta \sin\Theta}{\delta_x - \mu\delta_r}$$

$$= \frac{1}{\delta_x - \mu\delta_r}(\tau_{my} l \sin\Theta \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t\frac{\pi}{2} + \frac{l^2}{2R}\sigma_\Theta \frac{d\varepsilon R}{l})$$

$$= \frac{l}{\delta_x - \mu\delta_r}(\tau_{my}\sin\Theta \cdot g(k) + f_y \frac{\pi t}{16l} + \sigma_\Theta \frac{d\varepsilon}{2})$$

$$= \frac{1}{1-\mu}(\tau_{my}\sin\Theta \cdot g(k) + f(\frac{\pi t}{16l} + \frac{d\varepsilon}{2})) \qquad (13)$$

여기에서 f는 라미네이트의 인장강도로서 축 방향의 인장강도(f_y)와 원주방향 응력(σ_Θ)과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실 험 방 법

제 1절 시험편

본 연구에서는 자동차 경량화 재료로 비강도(인장강도/밀도), 비강성(탄성계수/밀도)이 우수한 탄소섬유강화 복합재 부재가 사용될 것을 상정하고 경량화 차량용 사이드 부재에 탄소섬유강화 복합재 원형 단면 부재, 탄소섬유강화 복합재 사각 단면 부재, 탄소섬유강화 복합재 single hat 단면 부재 및 탄소섬유강화 복합재 double hat 단면 부재를 적용하였을 경우 외부의 충격하중에 의해 단면의 형상이 서로 다른 탄소섬유강화 복합재부재에 생기는 최대압궤하중의 크기, 흡수에너지의 크기를 고찰하여 단면의 형상의 변화 및 적층구성의 차 (계면수의 차)에 따른 경량화 부재의 압궤특성을 고찰 하고져 하였다. 탄소섬유강화 복합재 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 탄소섬유강화 복합재 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 탄소섬유강화 복합재 원형부재 및 사각형 부재는 원형 및 사각형 알루미늄 부재 외측에 탄소섬유강화 복합재 프리프레그 시트 8매를 계면수를 2,3,4,6,7로 달리 적층한 후 오토클레이브로 성형하여 제작 하였다. 시험편 적층법 및 성형법은 조선대학교 충격공학 실험실의 실험방법[24)]을 이용했다.

탄소섬유강화 복합재 single hat 부재는 알루미늄 사각부재에 탄소섬유강화 복합재 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며, 실재 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 "ㄷ"자 단면부재와 평판부재를 결합하여 제작하였고, 탄소섬유강화 복합재 double hat 부재도 단일형 모자부재와 같은 방법으로 성형 제작하였다. 단면의 형상 및 계면수가 다른 적층구성의 변화에 따른 에너지 흡수 능력을 고찰하기 위하여 원형, 사각, single hat 및 double hat 단면의 형상 변화와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다.

이방성 재료인 탄소섬유강화 복합재의 적층구성의 변화에 따른 압궤특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 적층하였으며, 최외층각이 90°가 되도록 계면수의 변화를 주었다. 최외층각이 90°로 적층한 계면수와 적층순서를

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2에 나타내었다. 제작된 탄소섬유강화 복합재 원형단면 부재, 탄소섬유강화 복합재 사각단면 부재, 탄소섬유강화 복합재 single hat 단면 부재 및 탄소섬유강화 복합재 double hat 단면 부재의 형상을 Fig. 11에 나타내었으며, Fig. 12에 대표적으로 최 외층각이 0°이고 7 계면인 single hat 시험편의 적층방법을 나타냈다.

탄소섬유강화 복합재재는 취성에 약하기 때문에 압궤초기 최대압궤하중이 생긴 이후 급격한 파괴로 인해 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 시험편의 하중이 작용하는 끝단을 45°로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하여 축 압궤실험을 행했다.

시험편의 성형은 Photo. 2와 같은 오토클레이브를 이용하여 챔버내부 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. 13은 시험편 제작 시 성형 사이클을 나타냈다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압궤가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet

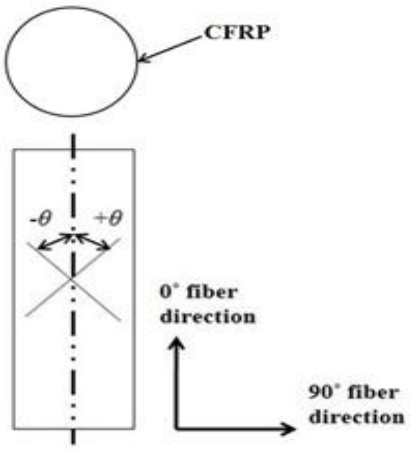
Types / Characteristics	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density	1.83×10^{3} [kg/m^{3}]	1.24×10^{3} [kg/m^{3}]	-
Poisson's ratio	-	-	0.3
Young's modulus	240 [GPa]	3.60 [GPa]	132.7 [GPa]
Tensile stress	4.89 [GPa]	0.08 [GPa]	1.85 [GPa]
Breaking elongation	2.1 [%]	3.0 [%]	1.3 [%]
Resin content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

Collection @ chosun

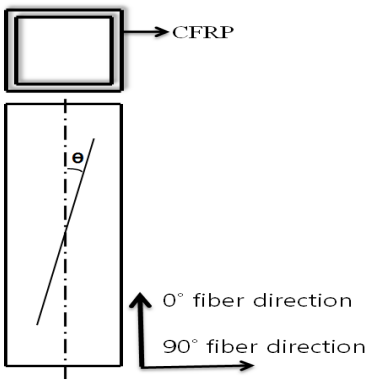
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2 Stacking sequence of CFRP specimen

Interface numbers	Stacking sequence
2	$[90^0_2/0^0_2]_S$: $[90^0_2/0^0_2 \cdot 0^0_2/90^0_2]$
3	$[0^0_2/90^0_2]_2$: $[0^0_2/90^0_2/0^0_2/90^0_2]$
4	$[90^0/0^0]_{S2}$: $[90^0/0^0 \cdot 0^0/90^0 \cdot 90^0/0^0 \cdot 0^0/90^0]$
6	$[90^0/0^0]_{2S}$: $[90^0/0^0/90^0/0^0 \cdot 0^0/90^0/0^0/90^0]$
7	$[0^0/90^0]_4$: $[0^0/90^0/0^0/90^0/0^0/90^0/0^0/90^0]$



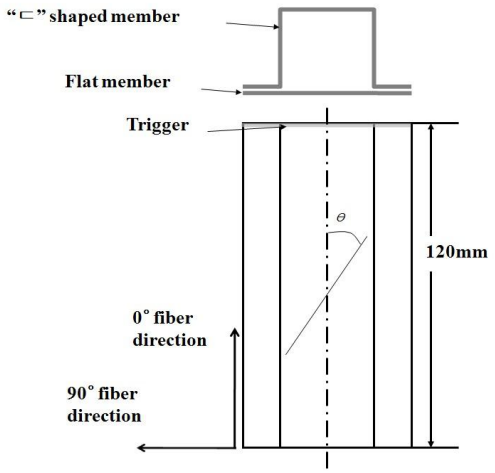
(a) Circular member



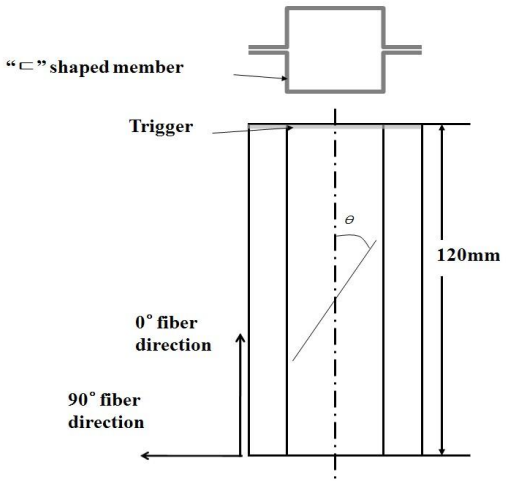
(b) Square member

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) Single hat shaped member

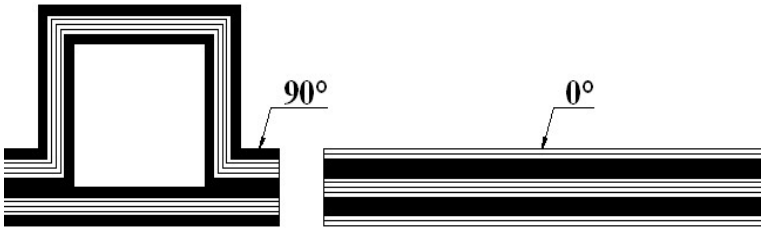


(d) Double hat shaped member

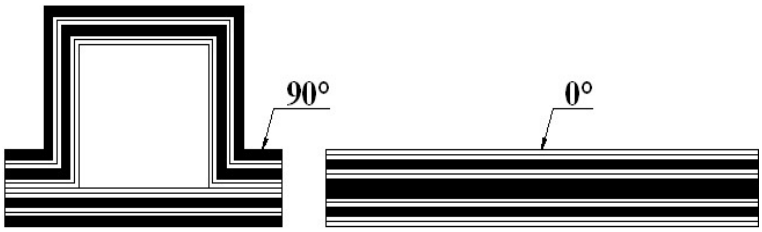
Fig. 11 Configuration of Specimens

Collection @ chosun

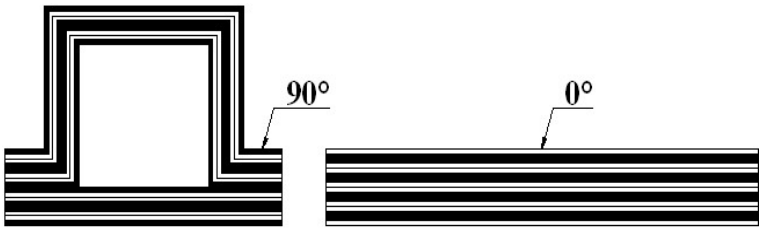
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 2 interface (outer angle 90°)



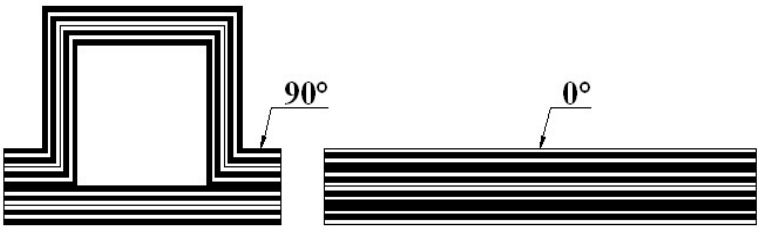
(b) 3 interface (outer angle 90°)



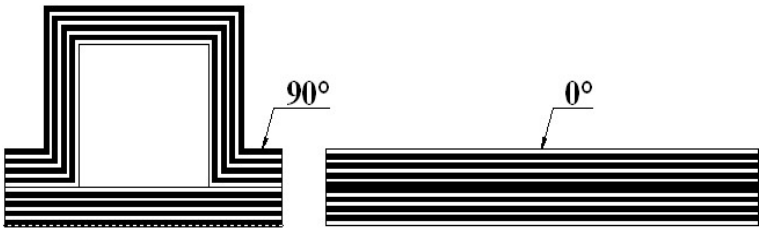
(c) 4 interface (outer angle 90°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(d) 6 interface (outer angle 90°)



(e) 7 interface (outer angle 90°)

Fig. 12 Stacking conditions of CFRP single hat shaped section members (outer angle 90°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Photo. 2 Autoclave

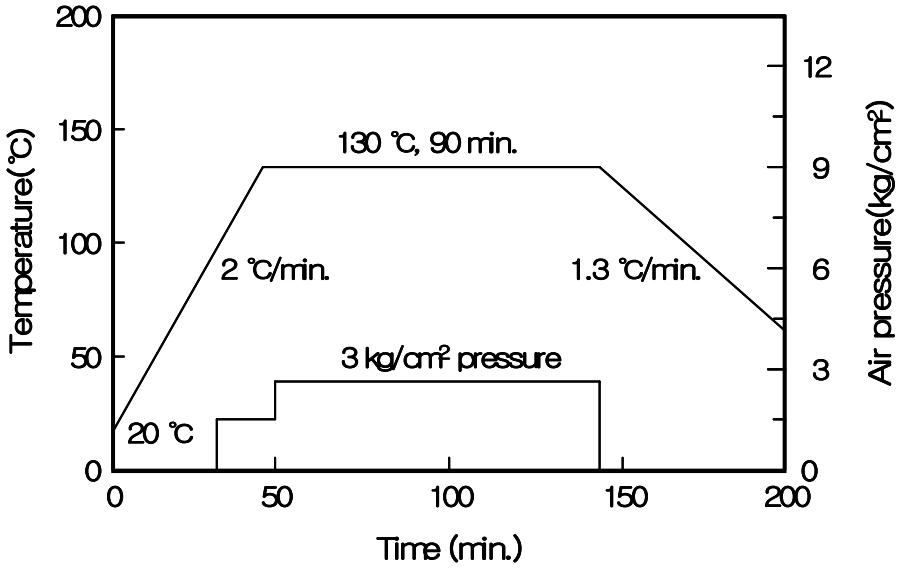


Fig. 13 Curing cycle of CFRP stacking specimen

Fig. 14 에 오토클레이브의 개략도를, Fig. 15 에 프리프레그 시트의 적층 레이 업(lay-up)을 나타냈다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

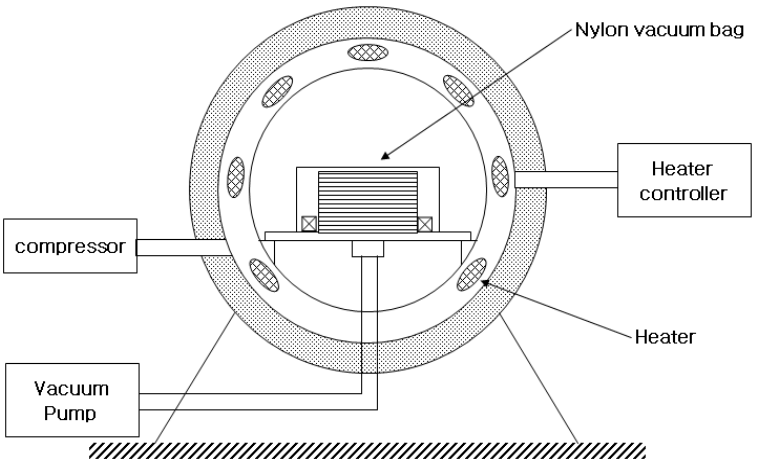


Fig. 14 Schematic diagram of autoclave

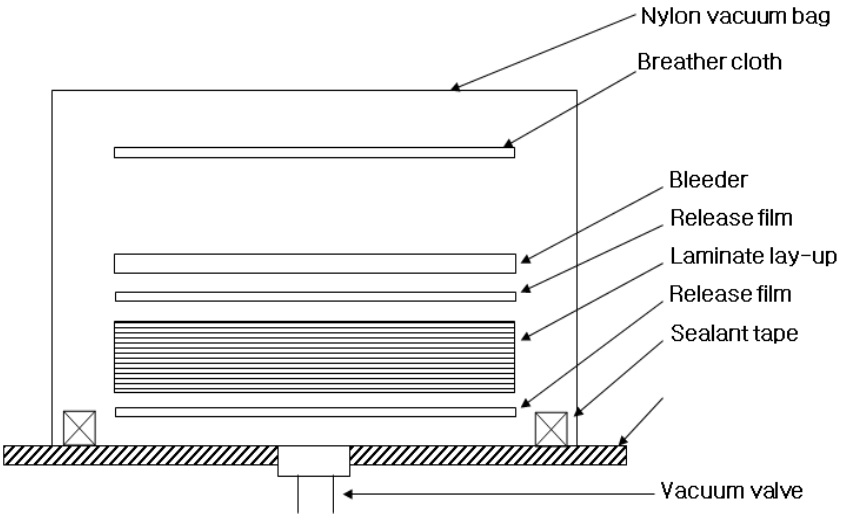


Fig. 15 Autoclave laminate stack lay-up CFRP Flate specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 축압궤실험

탄소섬유강화 복합재 부재 단면의 형상이 원형 단면 부재, 사각 단면 부재, single hat 단면 부재 및 double hat 단면 부재이며 계면수가 2, 3, 4, 6, 7 계면 이고 최외층 적층각이 90°로 적층된 적층구성이 서로 다른 4종류의 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤 특성을 고찰하고자 축방향 압축실험을 행하여 하중-변위선도를 얻었다. 하중-변위선도로 부터 각 탄소섬유강화 복합재부재에 생기는 최대압궤하중이 크기, 흡수에너지의 크기를 고찰하여 단면의 형상의 변화 및 계면수의 차에 따른 탄소섬유강화 복합재부재에 압궤특성을 고찰 하고자 하였다.

정적압궤실험은 Photo. 3과 같은 만능재료시험기(AG-1S, 100kN)를 사용하였으며, 로드셀과 액츄에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min의 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해지도록 실험을 행하였다. 실험결과에 단부효과가 나타나지 않고 순차적인 압궤가 주기적으로 발생하도록 하였으며 60mm까지 변형되도록 변위를 제어하면서 연속적으로 압궤실험을 행하였다. 정적 압궤실험 후 얻어진 하중-변위선도와 충격 압궤실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(14)와 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.[24)]

$$E_a = \int_{l_0}^{l} P_{(l)} dl \qquad (14)$$

여기서, E_a는 시험편에 흡수된 에너지이며, $P_{(l)}$ 은 압궤하중을 나타낸다.

Photo. 3 Universal testing machine

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 16에 탄소섬유강화 복합재 부재 단면의 형상이 원형인 7계면 탄소섬유강화 복합재 시험편의 압궤실험결과 얻은 하중-변위선도를 나타냈고, Photo. 4에 압궤과정을 나타냈으며, Fig. 17에 탄소섬유강화 복합재 부재 단면의 형상이 single hat인 7계면 탄소섬유강화 복합재 시험편의 압궤실험결과 얻은 하중-변위선도를, Photo. 5에 압궤과정을 나타내었다. 실험데이터는 황[25]의 실험결과를 이용하였다.

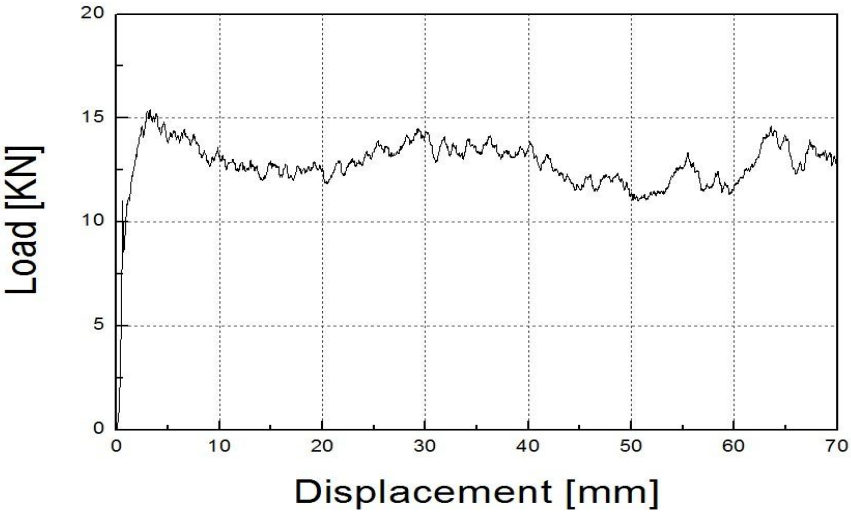


Fig. 16 Load-displacement curve of CFRP circular member, $[0/90]_4$ (7 interface number)

(a) δ =0mm (b) δ =20mm (c) δ =60mm

Photo. 4 Collapse processing of CFRP circular member, $[0/90]_4$ (7 interface number)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

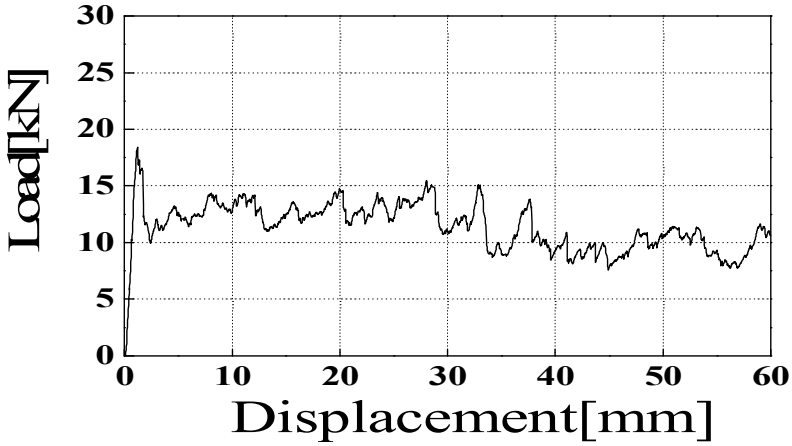
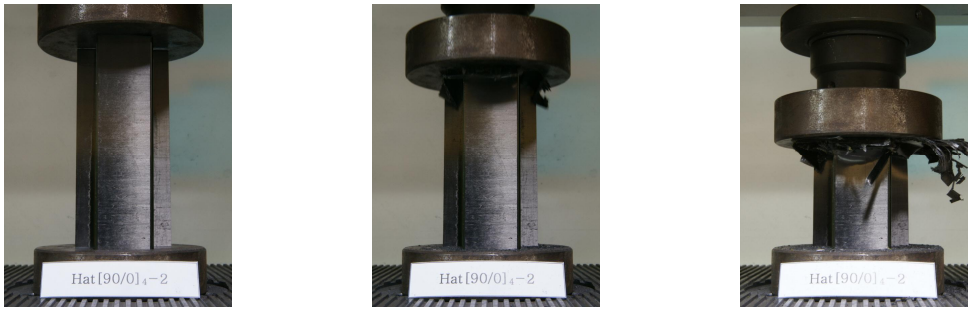


Fig. 17 Load-displacement curve of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$ (7 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =20mm (c) δ =60mm

Photo. 5 Collapse processing of CFRP single hat shaped member, $[90/0]_4$ (7 interface number)

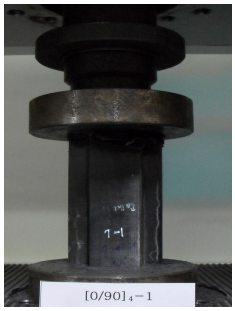
Fig. 18 에 탄소섬유강화 복합재 부재 단면의 형상이 double hat인 7계면 탄소섬유강화 복합재 시험편의 압궤실험결과 얻은 하중-변위선도를 Photo. 6에 압궤과정을 나타냈다.

Collection @ chosun

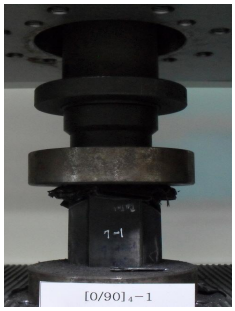
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 18 Load-displacement curve of CFRP double hat shaped member, $[0/90]_4$ (7 interface number)

(a) δ =0mm



(b) δ =20mm



(c) δ =60mm

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 실험결과 및 고찰

본 장에서는 탄소섬유강화 복합재 구조부재가 구조경량화용 차체 부재로 사용될 것을 상정하여 단면의 형상이 원형 단면 부재, 사각 단면 부재, single hat 단면 부재 및 double hat 단면 부재이며 계면수가 2, 3, 4, 6, 7 계면 이고 최외층 적층각이 90°로 적층된 적층구성이 서로 다른 4종류의 탄소섬유강화 복합재 부재의 최대 압궤하중, 흡수에너지등 축압궤 특성을 고찰하였다. 압궤실험으로부터 얻은 하중-변위선도로 부터 각 탄소섬유강화 복합재부재에 생기는 최대압궤하중의 크기, 흡수에너지의 크기를 고찰하여 단면의 형상의 변화 및 계면수의 차에 따른 탄소섬유강화 복합재부재에 압궤특성을 고찰 하고져 하였다.

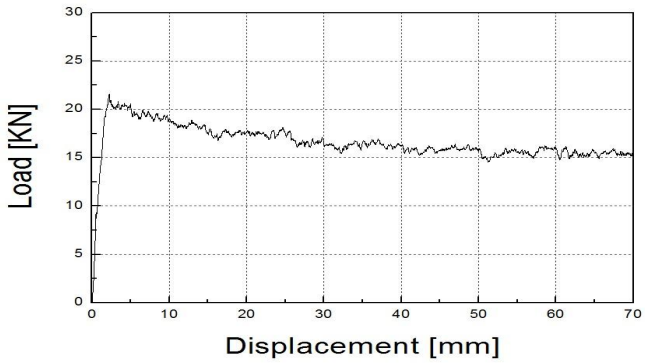
제 1절 압궤 실험결과

Fig. 19 에 탄소섬유강화 복합재 원형 부재에 대하여 계면수의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 축압축 하중하에서 하중-변위관계를 나타내었다.

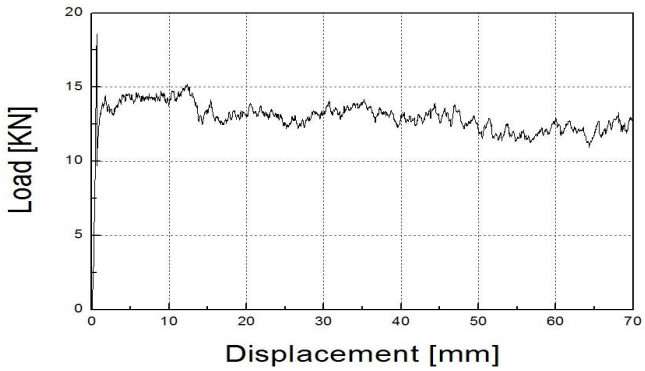
Fig. 19(a)는 2계면으로 적층된 탄소섬유강화 복합재 원형부재에 대하여 압궤실험 결과 얻어진 하중-변위 선도를, Fig. 19(b)는 3계면으로 적층된 탄소섬유강화 복합재 원형부재에 대하여 압궤실험 결과 얻어진 하중-변위 선도를, Fig. 19(c)는 4계면으로 적층된 탄소섬유강화 복합재 원형부재에 대하여 압궤실험 결과 얻어진 하중-변위 선도를, Fig. 19 (d)는 6계면으로 적층된 탄소섬유강화 복합재 원형부재에 대하여 압궤실험 결과 얻어진 하중-변위 선도를, Fig. 19(e) 는 7계면으로 적층된 탄소섬유강화 복합재 원형부재에 대하여 압궤실험 결과 얻어진 하중-변위선도를 나타냈다. 또한, Fig. 20 에는 탄소섬유강화 복합재 single hat 부재에 대하여 계면수의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 축압축 하중하에서 하중-변위관계를 나타내었고 Fig. 21 에는 탄소섬유강화 복합재 double hat 부재에 대하여 계면수의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 축압축 하중하에서 하중-변위관계를 나타내었다. Fig. 20(a)(b)(c)(d)(e) 및 Fig. 21 (a)(b)(c)(d)(e) 또한 계면수가 2,3,4,5,6계면의 경우의 하중-변위선도를 나타냈다.

Collection @ chosun

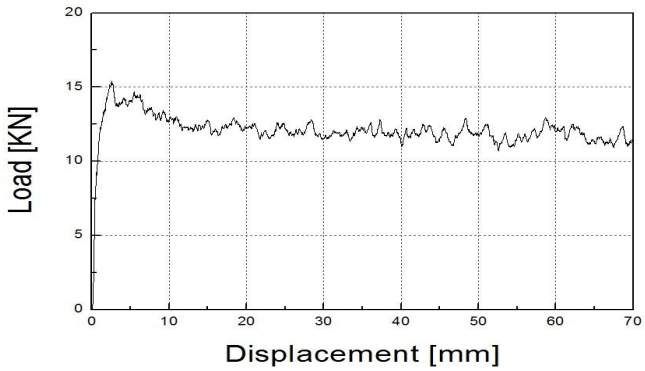
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)$[90_2/0_2]_S$



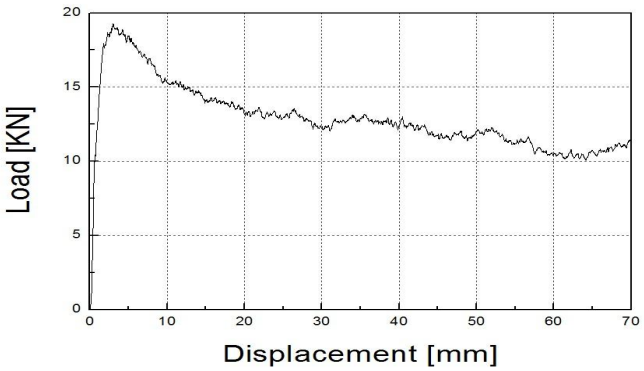
(b)$[0_2/90_2]_2$



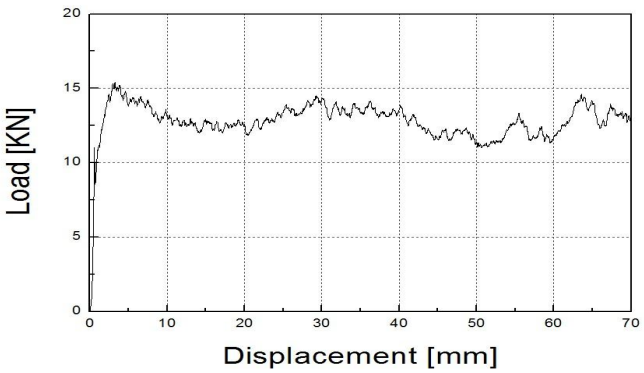
(c)$[90/0]_{S2}$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(d)$[90/0]_{2S}$

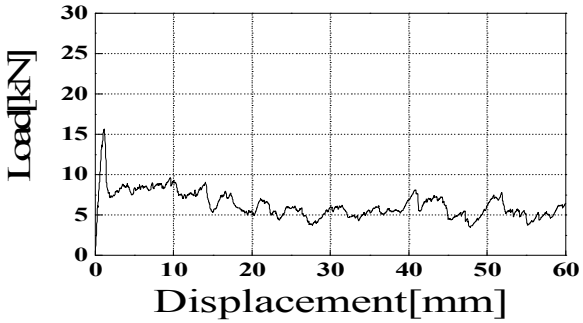


(e)$[0/90]_4$

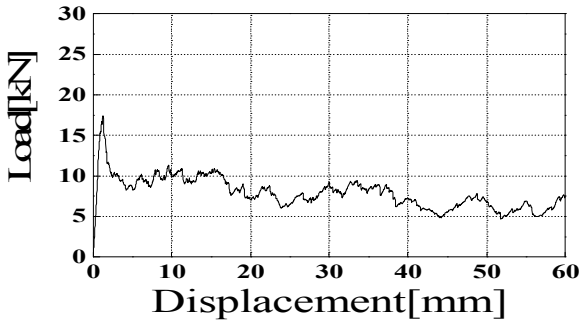
Fig. 19 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Circular section

Collection @ chosun

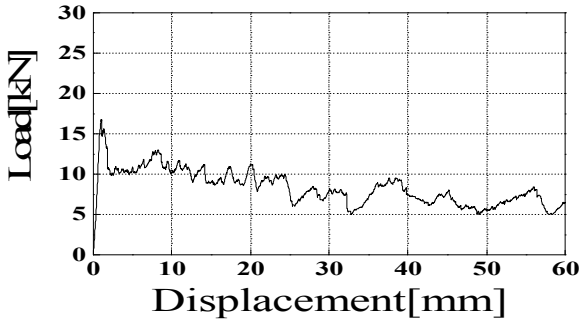
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) $[90_2/0_2]_S$



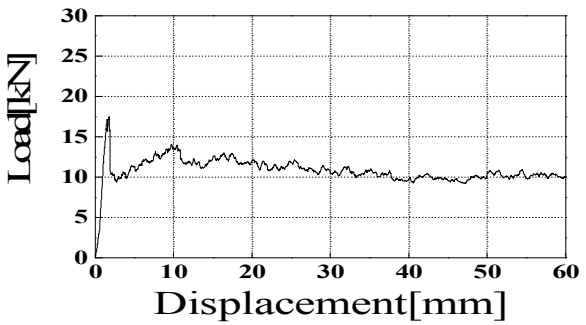
(b) $[0_2/90_2]_2$



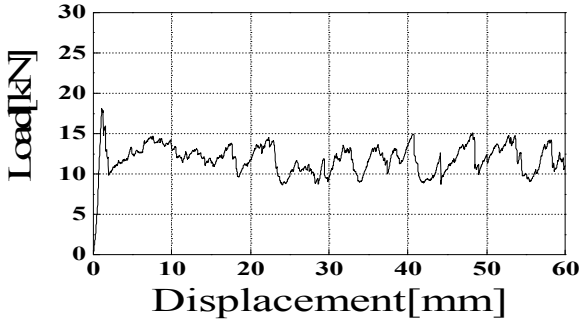
(c) $[90/0]_{S2}$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(d) $[90/0]_{2S}$

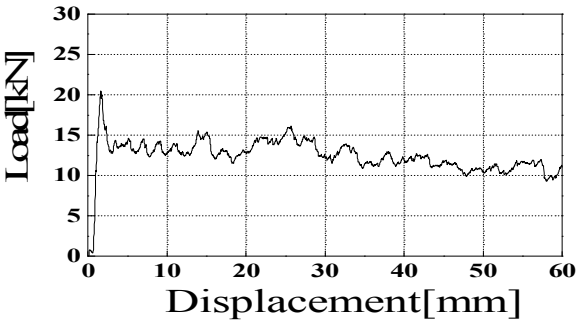


(e) $[0/90]_4$

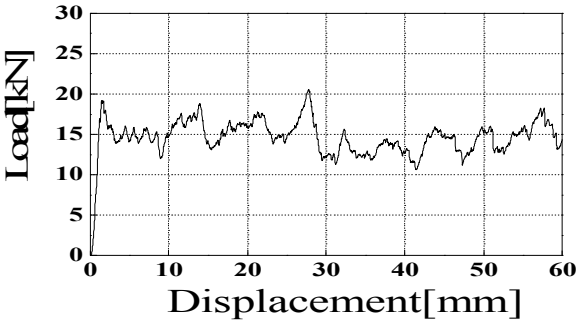
Fig. 20 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Single hat section

Collection @ chosun

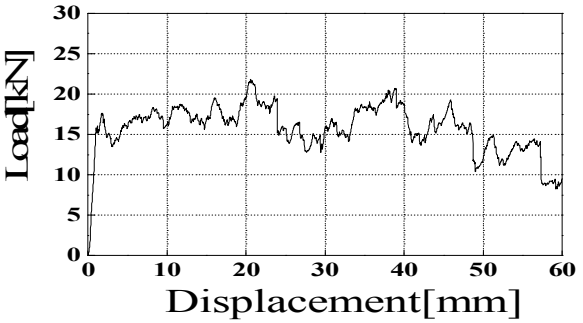
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) $[90_2/0_2]_S$



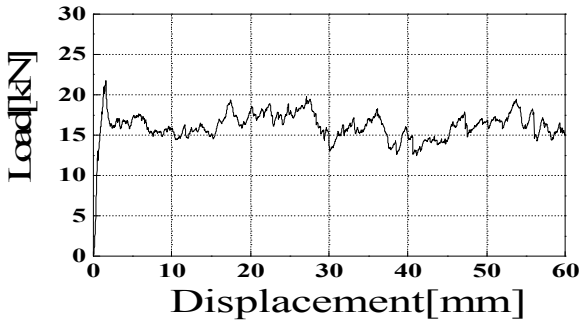
(b) $[0_2/90_2]_2$



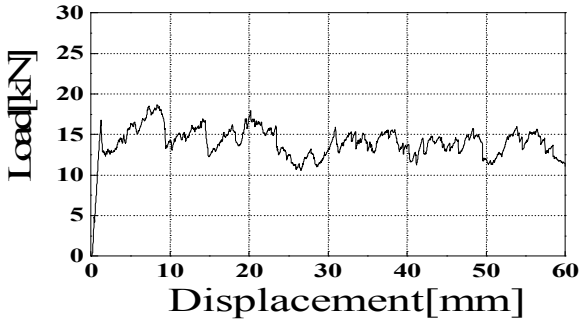
(c) $[90/0]_{S2}$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(d) $[90/0]_{2S}$



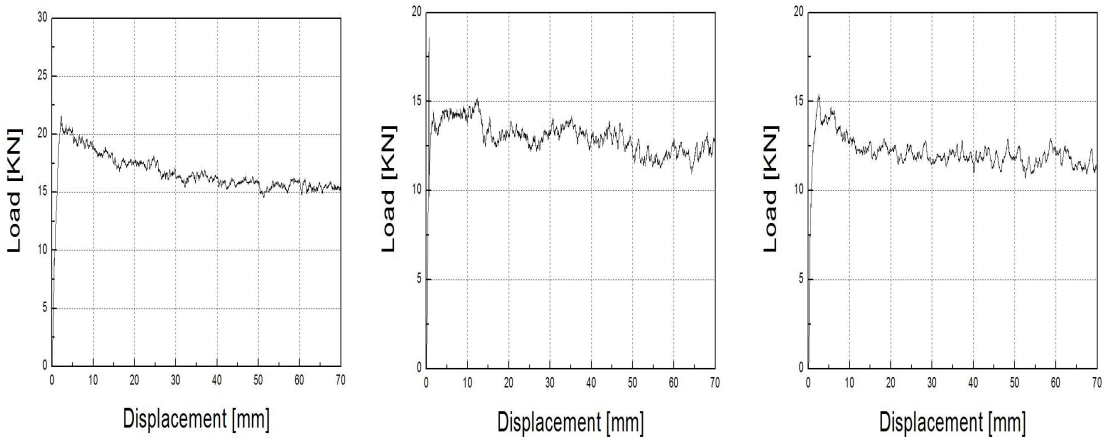
(e) $[0/90]_4$

Fig. 21 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Double hat section

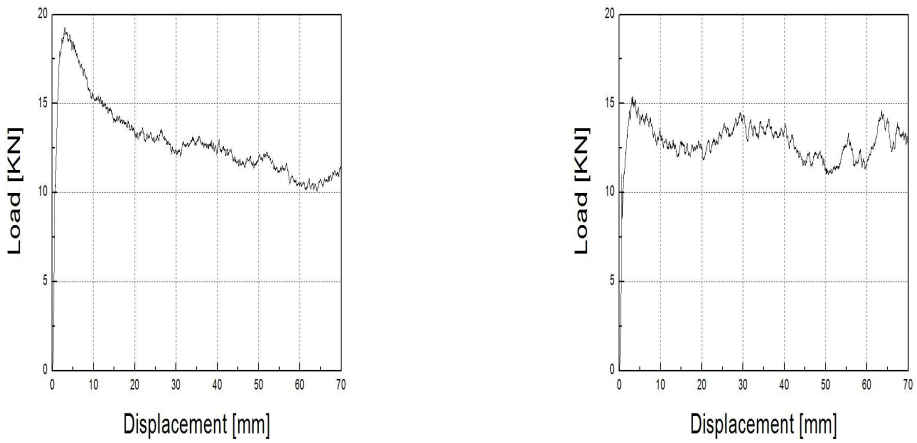
Fig. 22 (a)(b)(c)(d)(e)에 원형 탄소섬유강화 복합재 시험편의 계면수가 2,3,4,6,7인 경우의 압궤실험결과인 p-w 선도를 나타냈다. Fig. 22 (a)(b)(c)(d)(e)로부터 알 수 있는 바와같이 계면수의 변화에 따라 최대압궤하중의 크기가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 원형 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 2계면 일 때가 최대압궤하중의 크기가 약 22 KN으로 가장 크게 나타났고,4계면과 7계면 일 때 약 15.6 KN으로 2계면 탄소섬유강화 복합재 시험편이 약 41% 높게 나타났다. 6계면의 경우는 최대압궤하중은 약 20 KN으로 크게 나타났으나 순식간에 갑작스럽게 압궤가 이루어져 압궤저항력이 가장 낮게 나타났다. 따라서 원형 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 2계면일 때가 가장 압궤특성이 우수하다고 생각된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) $[90_2/0_2]_S$ (b) $[0_2/90_2]_2$ (c)$[90/0]_{S2}$



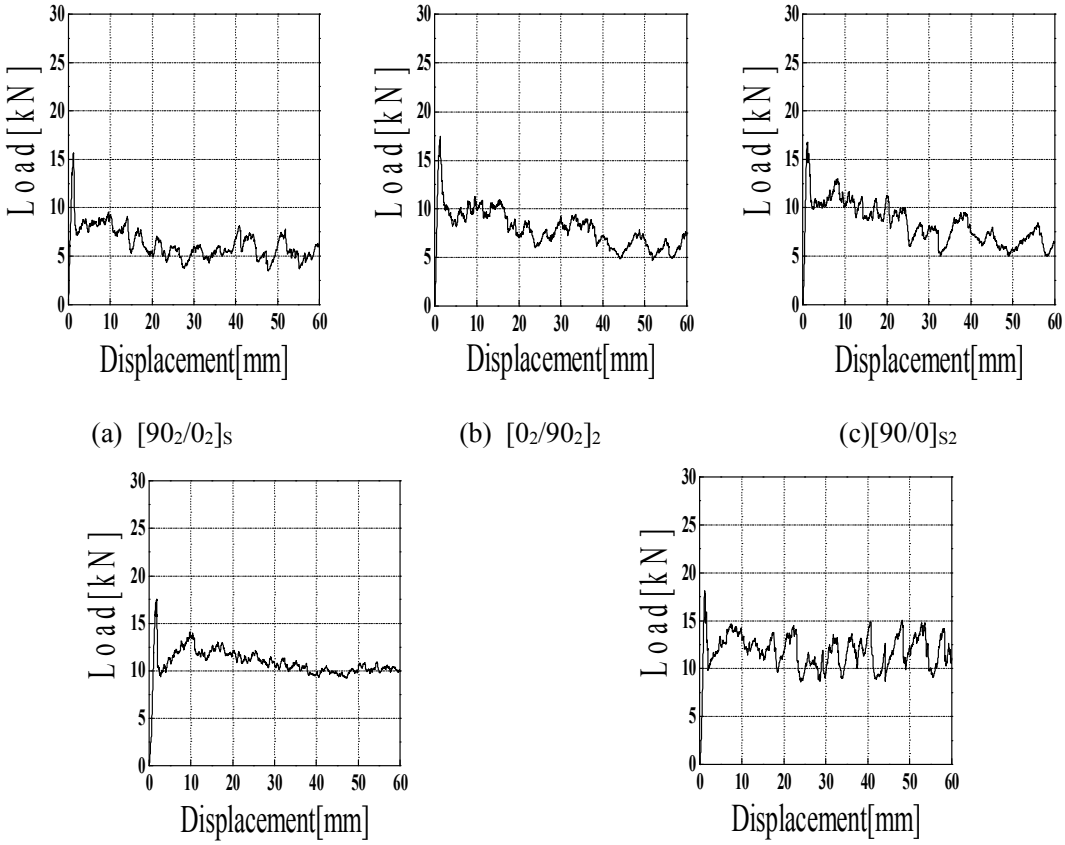
(d)$[90/0]_{2S}$ (e)$[0/90]_4$

Fig. 22 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Circular member section

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 23 (a)(b)(c)(d)(e)에 single hat 탄소섬유강화 복합재 시험편의 계면수가 2,3,4,6,7인 경우의 압궤실험결과인 p-w 선도를 나타냈다. Fig. 23 (a)(b)(c)(d)(e)로부터 알 수 있는 바와같이 계면수의 변화에 따라 최대압궤하중의 크기가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. Single hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 3계면 일 때가 최대압궤하중의 크기가 약 18.5 KN으로 가장 크게 나타났고, 2,4,7계면 일 때 약 16 KN으로 3계면 single hat 탄소섬유강화 복합재 시험편이 약 12% 높게 나타났다. 이상으로 부터 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 6, 7 계면의 경우가 가장 안정적으로 압궤됨을 알 수 있었다. 따라서 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 계면수가 많을수록 압궤특성이 우수하다고 생각된다.



(a) $[90_2/0_2]_S$ (b) $[0_2/90_2]_2$ (c)$[90/0]_{S2}$

(d)$[90/0]_{2S}$ (e)$[0/90]_4$

Fig. 23 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Single hat section

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 24 (a)(b)(c)(d)(e)에 double hat 탄소섬유강화 복합재 시험편의 계면수가 2,3,4,6,7인 경우의 압궤실험결과인 p-w 선도를 나타냈다. Fig. 24 (a)(b)(c)(d)(e)로부터 알 수 있는 바와같이 계면수의 변화에 따라 최대압궤하중의 크기가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. Double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 4계면일 때가 최대압궤하중의 크기가 약 22.5 KN으로 가장 크게 나타났고, 2,3,6계면 일때 약 20.1 KN으로 4계면 double hat 탄소섬유강화 복합재 시험편이 약 12% 높게 나타났다. Fig. 24로부터 6계면의 경우가 가장 안정적으로 압궤됨을 알 수 있다. 따라서 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 경우 6계면일 때가 최대 압궤하중, 흡수 에너지등을 고려하면 가장 압궤특성이 우수하다고 생각된다.

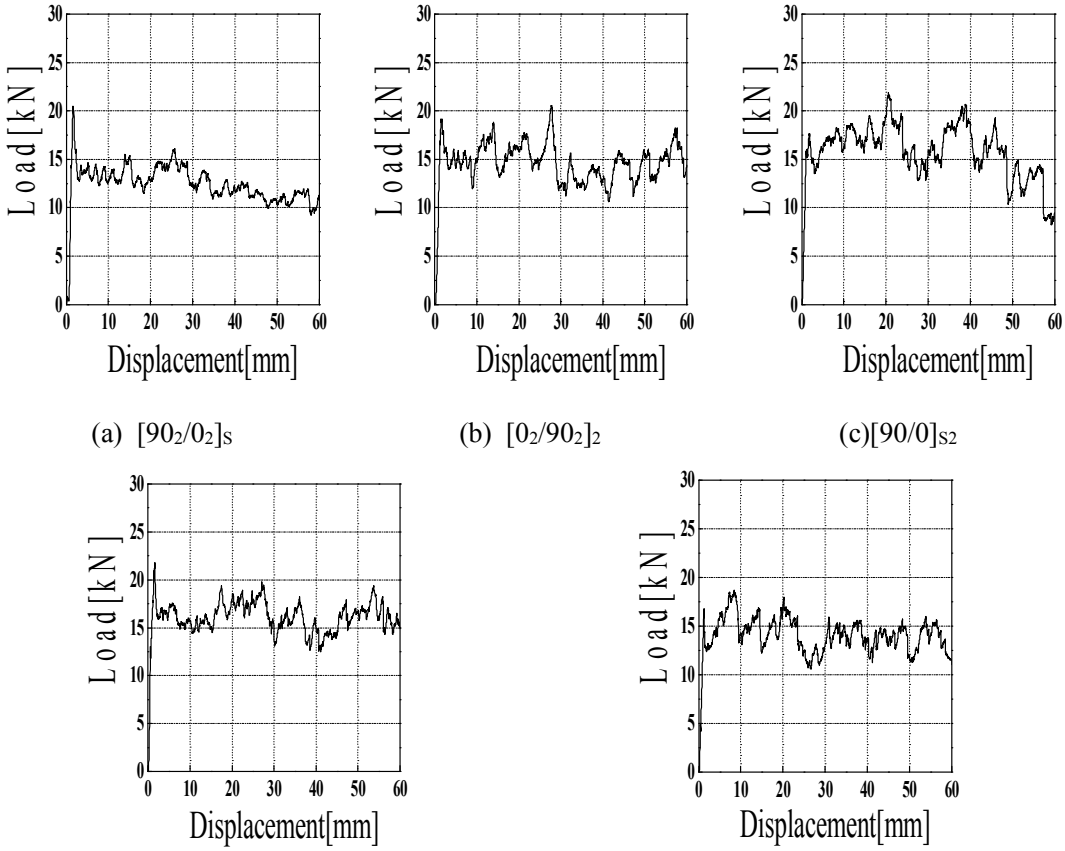


Fig. 24 Load-displacement curve of CFRP laminates according to interfaces number on Double hat section

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 압궤 특성평가 결과

본 절에서는 경량화 차량 전면부 사이드 부재에 탄소섬유강화 복합재 단면 부재가 상용될 것을 상정하여 기본형상인 원형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재에 대하여 정적 압궤 실험을 통하여 에너지흡수 능력과 압궤모드를 고찰하여 안전성능을 평가하였다.

적층구성의 변화 즉 단면의 형상과 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압궤모드를 고찰하기 위하여 단면의 형상과 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 이방성 재료인 탄소섬유강화 복합재의 적층구성의 변화에 따른 압궤특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$의 적층구성으로 최외층 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다.

적층수 n을 2, 3, 4, 6 및 7계면수에 맞추어 적층하여 제작하였고, 최외층각도를 90°로 하여 압궤특성을 고찰하였다.

탄소섬유강화 복합재 부재 단면의 형상의 변화 및 계면수의 변화에 따른 압궤특성 즉, 탄소섬유강화 복합재 부재에서의 최대압궤하중 Pmax [KN], 흡수에너지 E_a [J]에 관해 실험적으로 고찰 하였다. Table 3에 탄소섬유강화 복합재 부재 단면의 형상(원형 단면 부재, 사각 단면 부재, single hat 단면 부재 및 double hat 단면 부재) 및 계면수 (2,3,4,6,7계면)의 변화에 따른 압궤실험결과를 나타냈다. Table 중 Pmax [KN] 은 각각의 탄소섬유강화 복합재 부재에서의 최대압궤하중을, E_a [J] 는 식(1)에서 얻은 각각의 탄소섬유강화 복합재 부재에서의 흡수에너지를 나타냈다.

Fig. 25에 단면의 형상이 다른 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤실험 결과 계면수의 변화에 따른 최대압궤하중의 변화 관계를 나타냈다. 계면수가많을수록 최대 압궤하중이 낮아지는 경향을 보였으나 3 계면일 때가 최대압궤하중이 낮아지는 경향을 보였으며 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재가 사각단면 탄소섬유강화 복합재부재보다 약 25% 정도 압궤하중이 크게 나타났는데 이는 압궤시 원형단면 탄소섬유강화 복합재부재는 순차적으로 압궤되는데에 비해 사각부재는 모서리부분이 찢어지며 순간적으로 부안정적으로 압궤되기 때문이라 생각된다. Fig. 26에 단면의 형상이 다른 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤실험 결과 계면수의 변화에 따른 흡수에너지의 변화 관계를 나타냈다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 Static collapse test results for CFRP laminates according to interface number and cross section configuration

Cross section configuration	Number of interface [No.]	Maximum collapse load P_{max} [KN]	Absorbed energy E_a [J]
Squar	2	15.4	724.8
	3	13.1	406.7
	6	13.5	637.7
	7	12.2	462.0
Circle	2	21.7	996.5
	3	18.6	777.0
	4	15.7	725.5
	6	19.5	774.0
	7	15.7	767.6
Single hat	2	15.9	399.3
	3	18.6	455.7
	4	16.4	484.9
	6	17.1	648.8
	7	16.5	624.3
Double hat	2	20.4	756.4
	3	20.8	836.0
	4	22.5	953.1
	6	20.7	979.6
	7	22.3	865.8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 25의 계면수의 변화에 따른 최대압궤하중의 변화 관계와 유사하게 계면수가 많을 수록 흡수에너지가 낮아지는 경향을 보였으며 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재가 사각단면 탄소섬유강화 복합재부재보다 약 25% 정도 흡수에너지가 크게 나타났는데 이는 압궤시 최대압궤하중의 크기가 흡수에너지에 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 27에 단면의 형상이 다른 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재와 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤실험 결과 계면수의 변화에 따른 최대압궤하중의 변화 관계를 나타냈다. 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재에서와는 달리 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재와 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재모두 계면수가 증가할수록 최대 압궤하중이 약간씩 증가함을 알 수 있었으며 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 보다 약 25% 정도 크게 나타남을 알 수 있었고 특히, double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 최대압궤 하중은 계면수의 변화에 큰 변화가 없었다.

Fig. 28에 단면의 형상이 다른 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재와 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤실험 결과 계면수의 변화에 따른 흡수에너지의 변화 관계를 나타냈다. Fig. 28로부터 흡수에너지는 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재와 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재 모두 계면수가 증가할수록 흡수에너지가 크게 나타났으며 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 보다 약 40% 정도 크게 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

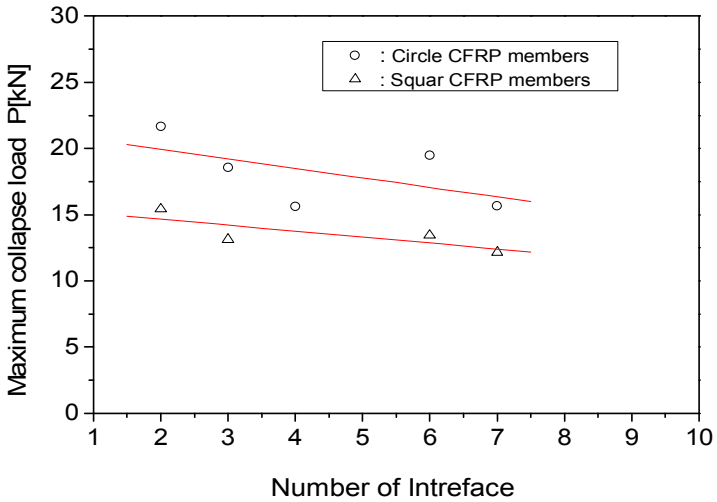


Fig. 25 Relationship between Interface numbers and Maximum collapse load for CFRP circle shaped member and CFRP square shaped member

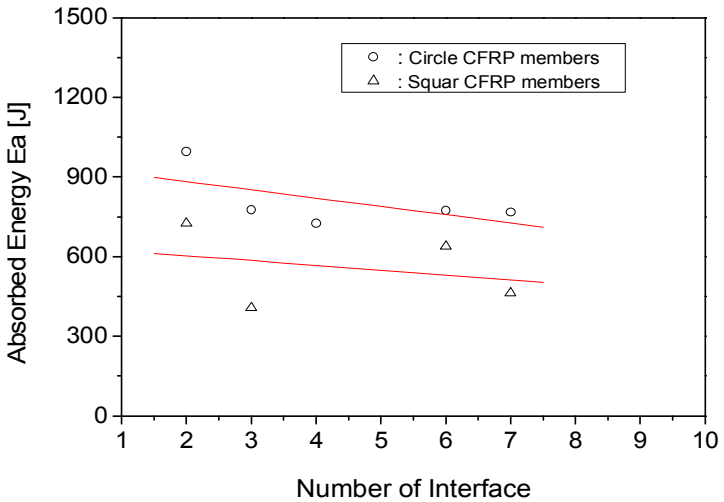


Fig. 26 Relationship between Interface numbers and Absorbed Energy for CFRP circle shaped member and CFRP square shaped member

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

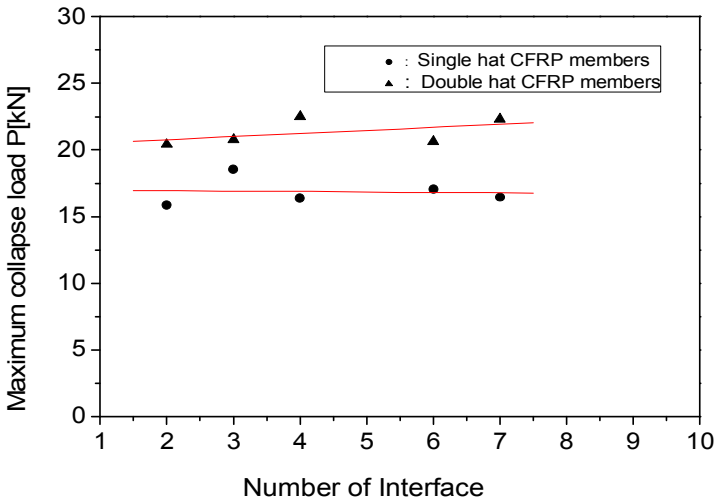


Fig. 27 Relationship between Interface numbers and Maximum collapse load for Single hat CFRP members and Double hat CFRP members

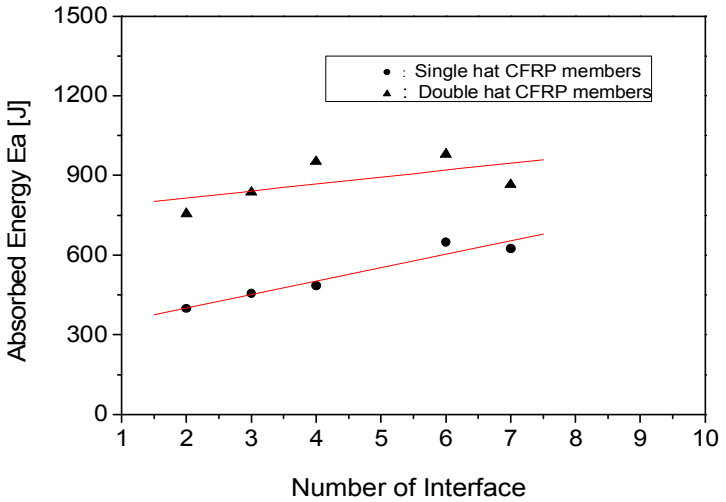


Fig. 28 Relationship between Interface numbers and Absorbed Energy for Single hat CFRP members and Double hat CFRP members

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 29에 단면의 형상이 다른 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤실험 결과 계면수의 변화에 따른 최대압궤하중의 변화 관계를 나타냈다. Fig. 29 로부터 알 수 있는 바와 같이 전반적으로 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 가장 컸으며, 그 다음으로 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재, 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재 순으로 낮게 나타났으며, double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 계면수의 변화와 관계없이 가장 안정적으로 압궤 되었으며 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재가 최대압궤하중이 가장 낮게 나타났고 계면수가 증가함에 따라 불안정적으로 압궤 되었다.

또한, Fig. 30에 단면의 형상이 다른 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤실험 결과 계면수의 변화에 따른 흡수에너지 변화 관계를 나타냈다.

Fig. 30으로 부터 알 수 있는 바와 같이 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재는 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 약간씩 감소함을 알 수 있으며, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 와 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재는 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 점진적으로 증가함을 알 수 있었다.

결론적으로 흡수에너지 관점에서 보면 계면수가 많은 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 가장 안정적으로 압궤 되었으며, 그 다음으로 계면수가 적은 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재가 안정적으로 압궤됨을 알 수 있었으며, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재는 최대 압궤하중이나 흡수에너지 관점에서 가장 불안정적 이었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

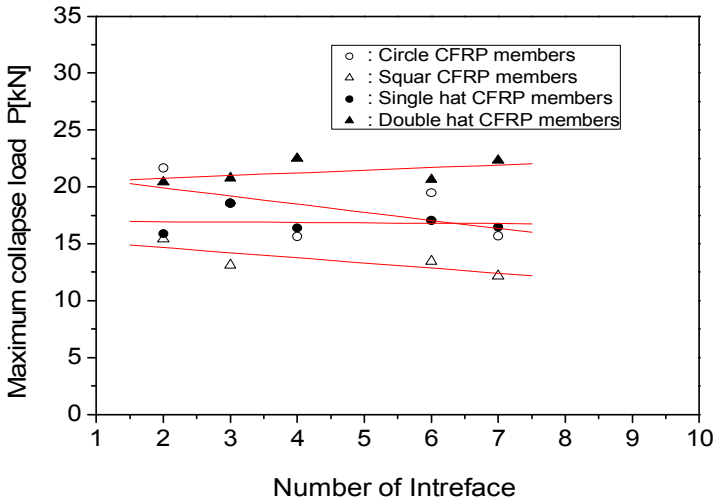


Fig. 29 Relationship between Interface numbers and Maximum collapse load according to change of CFRP member sections

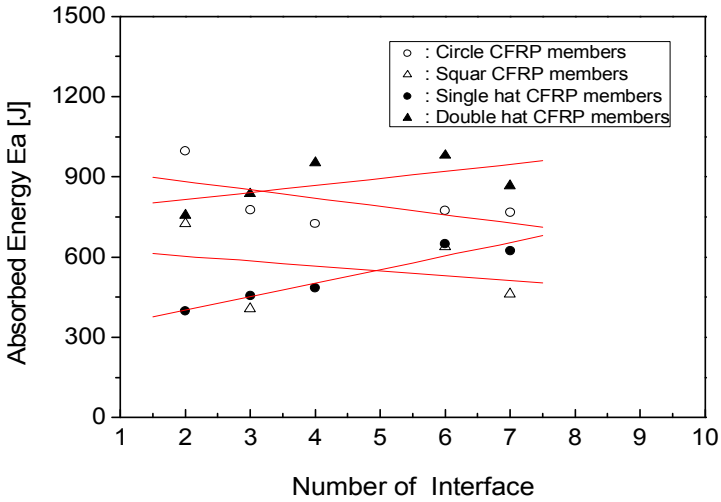


Fig. 30 Relationship between Interface numbers and Absobed Energy according to change of CFRP member sections

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3절 압궤모드 해석

본 절에서는 경량화 차량 전면부 사이드 부재에 탄소섬유강화 복합재 단면 부재가 상용될 것을 상정하여 기본형상인 원형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 축하중을 받을 때 에너지흡수 능력과 압궤모드를 고찰하였다.

Photo. 7(a)에 최외층 각도가 90°로 적층된 6계면 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤형상을, Photo. 7(b)에 최외층 각도가 90°로 적층된 6계면 사각형단면 탄소섬유강화 복합재부재의 압궤형상을 나타냈다. 또한 Photo. 7(c)에 최외층 각도가 90°로 적층된 7계면 single hat 탄소섬유강화 복합재부재의 압궤형상을, Photo. 7(d)에 최외층 각도가 90°로 적층된 7계면 double hat 탄소섬유강화 복합재부재의 압궤형상을 나타냈다. Photo. 7으로부터 알 수 있는 바와 같이 원형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재 모두 축 압축하중을 받으면 횡방향 전단 압궤모드, 라미나 굽힘 압궤모드(Lamina bending) 및 국부좌굴 압궤모드(Local buckling)와 횡방향 전단(Transverse shearing)과 라미나 굽힘 모드가 조합된 취성파괴모드의 4가지의 압궤모드로 압궤됨을 알 수 있었다.

원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 Photo. 7(a)에서와 같이 최외층각이 90°로서 축 압축하중 작용시 0°방향의 축방향 섬유가 탄소섬유강화 복합재 부재의 외측으로 확장되려 하지만 90°의 원주방향 섬유에 의해 확장되면서 함께 파단 되면서 압궤되는 파쇄확장모드 (fragmentation and splaying mode)의 형태로 압궤되었다. 이상으로부터 원형 단면 탄소섬유강화 복합재 부재는 축 하중이 작용하면 초기 피크 하중이 생긴 이후 섬유는 hoop stress 형태로 하중을 지지함을 알 수 있었다.

사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 Photo. 7(b)에서와 같이 축 압축하중 작용할 때 사각형단면 부재에 층간 크랙과 층내 크랙이 함께 생성되며 사각형 탄소섬유강화 복합재부재의 4변 평판 외측으로 확장하는 스플라인 모드로 압궤되었다.

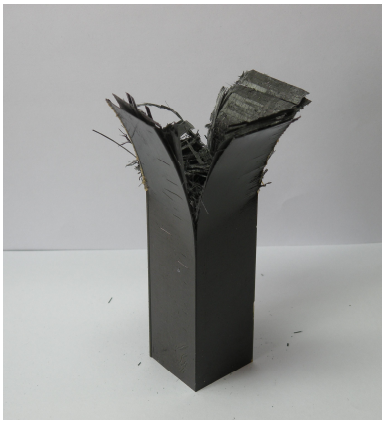
이는 사각형 탄소섬유강화 복합재부재의 4변 평판부재에 생기는 층간크랙, 층내크랙 및 라미나 굽힘에 의하여 외부 하중에 의한 에너지를 흡수하며, 모서리 부재

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압궤되었다. 특히, 사각형 탄소섬유강화 복합재부재의 4변 평판의 모서리 부분 섬유의 급격한 파단에 의한 것으로 생각 된다.

(a) Circle shaped member



(b) Square shaped member

(c) Single hat shaped member

(d) Double hat shaped member

Photo. 7 Collapse shape of CFRP members

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Single hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 연구동향에서 언급한 바와 같이 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 모드로 압궤되었다. Photo. 7(c) 으로부터 최외층각이 90°로 적층된 평판부재에서 층간 크랙, 층내 크랙이 진전하면서 single hat 탄소섬유강화 복합재 판부재의 외측으로 확장되며 취성파괴 모드로 압궤되었는데 0°로 적층된 라미나 묶음은 층간 크랙, 층내 크랙의 진전에 의해 부재 외측으로의 라미나 굽힘을 발생시키는 반면 90°로 적층된 섬유는 라미나 묶음의 굽힘을 방해하면서 파단 됨을 알 수 있었다.

Double hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤형상과 마찬가지로 횡방향 전단(Transverse shearing), 라미나 굽힘(Lamina bending) 그리고 국부 좌굴(Local buckling)의 모드가 조합된 모드로 압궤되었다. Photo. 7(d) 로부터 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤형상을 보면 최외층각이 90°로 적층된 부재의 "ㄷ"자형 부재는 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 압궤모드와 유사한 횡방향 전단과 라미나 굽힘 모드가 조합된 압궤 모드로 압궤되었으며. single hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서 크게 나타나지 않았던 라미나 묶음의 파단이 조합된 압궤모드로 파괴 되었는데 이와 같은 안정적인 압궤 모드로 인해 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재보다 에너지흡수특성이 더 좋은 것으로 사료된다. 이와 같은 이유로 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재보다 최대 압궤하중 및 흡수에너지가 크게 나타난 것으로 생각된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

1. 원형단면 및 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재모두 계면수가 많을수록 최대 압궤하중이 낮아지는 경향을 보였으나 3계면일 때가 최대압궤하중이 낮았으며 원형단면 탄소섬유강화 복합재부재가 사각단면 탄소섬유강화 복합재부재보다 약 25% 정도 압궤하중이 크게 나타났는데 이는 압궤시 원형단면 탄소섬유강화 복합재부재는 순차적으로 압궤되는 데에 비해 사각부재는 모서리부분이 찢어지며 순간적으로 불안정적하게 압궤되기 때문이라 생각되며 흡수에너지도 유사하게 나타났는데 이는 압궤시 최대압궤하중의 크기가 흡수에너지에 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

2. Single hat 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재모두 계면수가 증가할수록 최대 압궤하중이 약간씩 증가함을 알 수 있었으며 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 보다 약 25% 정도 크게 나타났고, double hat 탄소섬유강화 복합재 부재의 최대압궤 하중은 계면수의 변화에 큰 변화가 없었다. 흡수에너지도 single hat 및 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재 모두 계면수가 증가할수록 흡수에너지가 크게 나타났으며 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재 보다 약 40% 정도 크게 나타났다.

3. 최대압궤하중은 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 가장 컸으며, 그 다음으로 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재 순으로 낮게 나타났다. 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재와 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재는 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 약간씩 감소하였으며, single hat 탄소섬유강화 복합재 부재와 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재는 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 점진적 으로 증가하였다. 결론적으로 흡수에너지 관점에서 보면 계면수가 많은 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 가장 안정적으로 압궤 되었으며, 그 다음으로 계면수가 적은 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재가 안정적으로 압궤됨을 알수 있었으며, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재는 최대 압궤하중이나

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

흡수에너지 관점에서 가장 불안정적 이었다.

4. 모든 탄소섬유강화 복합재 부재에서 횡방향 전단 압궤모드, 라미나 굽힘 압궤모드, 국부좌굴 압궤모드 및 횡방향 전단과 라미나 굽힘 모드가 조합된 취성파괴 모드의 4가지의 압궤모드로 압궤되었으며 원형단면 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 0°방향의 축방향 섬유가 탄소섬유강화 복합재 부재의 외측으로 확장되려 하지만 90°의 원주방향 섬유에 의해 확장되면서 함께 파단되는 파쇄확장모드의 형태로 압궤되었으며, 사각형단면 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 축 압축하중 작용할 때 사각형단면 부재에 층간 크랙과 층내크랙의 함께 생성되며, 평판 외측으로 확장하는 스플라인 모드로 압궤되었으며 4변 평판의 모서리 부분 섬유의 급격한 파단에 의해 흡수에너지가 급격히 낮아졌다.

5. Single hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 최외층각이 90°로 적층된 평판부재에서 층간 크랙, 층내 크랙이 진전하면서 외측으로 확장되며 취성파괴 모드로 압궤되었는데 0°로 적층된 라미나 묶음은 층간 크랙, 층내 크랙의 진전에 의해 부재 외측으로의 라미나 굽힘을 발생시키는 반면 90°로 적층된 섬유는 라미나 묶음의 굽힘을 방해하면서 파단 됨을 알 수 있었다. double hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서는 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재에서 크게 나타나지 않았던 라미나 묶음의 파단이 조합된 압궤모드로 파괴 되었는데 이와 같은 이유로 double hat 탄소섬유강화 복합재 부재가 single hat 탄소섬유강화 복합재 부재보다 최대 압궤하중 및 흡수에너지가 크게 나타난 것으로 생각된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참고문헌】

1. 2012년도 특별보고서 ,“자동차용 복합재료의 현황과 전망보고서 (제4부 : 탄소섬유 복합재료의 자동차 적용)”, A&D 컨설턴트, p. 73, 2012.
2. Automotive World Car Industry Forecast Report, Global Insight, 2004
3. 김정호. "경량화용 차체 구조부재의 충격 압궤특성에 관한 연구." 조선대학교 박사학위논문, 1996.
4. Kim, S. K., Im, K. H., Kim, Y. N., Park, J. W., Yang, I. Y.and Adachi, T.. "On the characteristics of energy absorption control in thin-walled members for the use of vehicular structures." Key Engineering Materials ***233-236***:239-244, 2003.
5. 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.
6. 황창숙. "축압궤 하중을 받는 Al 박육부재의 에너지흡수제어특성." 조선대학교 석사학위논문, 2003.
7. Farley, G. L.. "Relationship between mechanical-property and energy-absorption trends for composite tubes." NASA Technical paper, OMB 0704-0188, 1992.
8. 김영남, 차천석, 양인영. CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘에 관한 실험적 연구.” 한국자동차공학회논문집』***10***:149-157, 2002.
9. Kim, Y. N., Im, K. H., Kim, S. K., and Yang, I. Y.. "Energy absorption characteristics of CFRP composite tubes under axial compression load." Key Engineering Materials ***233-236***:245-250, 2003.
10. Kim, Y. N., Hwang, J. J., Baek, K. Y., Cha, C. S., and Yang, I. Y.. "Impact collapse characteristics of CF/Epoxy composite tubes for light-weights." KSME International Journal ***17***:48-56, 2003.
11. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B. and Papapostolou, D. P.. "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental." Composite Structures ***63*** :347-360, 2004.
12. Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M. and Du, X. W.. "Axial impact behavior and energy absorption effciency of composite wrapped metal tubes." International Journal of Impact Engineering ***24***:385-401, 2000.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

13. Bouchet, J., Jacquelin, E. and Hamelin, P.. "Dynamic axial crushing of combined composite aluminum tube: the role of both reinforcement and surface treatments." Composite Structures ***56***:87-96, 2002.
14. Andre Laoie, J., and Kellas, S.. "Dynamic crush tests of energy-absorbing laminated composite plates." Composite : part A ***27A***:467-475, 1996.
15. Hanefi, E. I. and Wierzbicki, T.. "Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes." Composite : part B ***27B***:387-396,1996.
16. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압궤특성." 조선대학교 박사학위논문, 2002.
17. G. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes."Journal of Composite Materials 26:37-50,1992
18. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes."Journal of Composite Materials 26:78-80,1992
19 G. L. Farley, R.M. Jones."Crushing Characteristics of composite Tubes with "Near-Elliptical" Cross Sections."Journal of Composite Materials 26:1741-1751,1992
20. G. L. Farley, R.M. Jones."Prediction of Energy-Absorption Capability Composite Tubes ."Journal of Composite Materials 26:388-404,1991
21. H. Hamada, S .Ramakrishna, M. Nakamura, Z. Maekawa, T. Nishiwaki. "Energy-Absorption Characteristics of Composite Tubes with Different Cross-Sectional Shapes. "Proceeding of the 10th Annual ASM/ESD Advanced Composites Conference: 523-534,1994.
22. 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.
23. N. K. Gupta, R. Velmurugan, S. K. Gupta."An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes."Journal of Composite Materials 31:1262-1286,1997.
24. 양용준. "열습 환경하에서 CFRP 모자형 단면부재의 충격특성 평가." 조선대학교 박사학위논문, 2011.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

25. 황우채. "차체구조용 CFRP 모자형부재의 충돌 안전성능평가." 조선대학교 박사학위논문, 2012.

Collection @ chosun