



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](#)

2010년 02월
석사학위논문

유한요소법을 이용한 CFRP 구조
부재의 동적거동에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

정 주 영

유한요소법을 이용한 CFRP 구조
부재의 동적거동에 관한 연구

A Study of Dynamic Behavior of CFRP Structural
Members Using Finite Element Method

2009 년 02 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

정 주 영

유한요소법을 이용한 CFRP 구조
부재의 동적거동에 관한 연구

지도교수 김 지 훈

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2009년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

정 주 영

정주영의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 정 낙 규 ㉠

위 원 조선대학교 교수 양 인 영 ㉠

위 원 조선대학교 조교수 김 지 훈 ㉠

2007 년 11 월 일

조선대학교 대학원

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 연구동향	5
제 3 절 연구목적 및 방법	7
제 2 장 CFRP 구조 부재의 충격압괴실험	8
제 1 절 시험편	8
제 2 절 시험방법	11
제 3 절 실험결과	14
제 4 절 파괴경향 분석	19
제 3 장 CFRP 구조 부재 시뮬레이션	9
제 1 절 FE Model	29
제 2 절 Damage model	31
제 3 절 하중조건	34

제 4 절 Contact interface algorithms	3
제 4 장 결과 및 고찰	37
제 5 장 결론	51
참고 문헌	52

LIST OF TABLES

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet	9
Table 2 The Parameters of MAT_054	33

LIST OF FIGURES

Fig. 1 A numerical crashworthiness investigation model of thermoplastic composite crash boxes	6
Fig. 2 Comparison of failure morphologies predicted using 5mm×5mm shell elements.	6
Fig. 3 Configuration of square member	9
Fig. 4 Curing cycle of CFRP stacking specimen	01
Fig. 5 Impact testing setup for crushing	21
Fig. 6 Diagram of measurement system	31
Fig. 7 The Load–displacement curve of 15°member	5
Fig. 8 The Load–displacement curve of 45°member	6
Fig. 9 The Load–displacement curve of 90°member	7
Fig. 10 The Load–displacement curve of 90°/0°member	18
Fig. 11 Crushing Process of Continuous Fiber–Reinforced Composite Tubes	21
Fig. 12 Crushing Characteristics of Transverse Shearing Crushing Mode	22
Fig. 13 Crack Propagation Modes	23
Fig. 14 Crushing Characteristics of Lamina Bending Crushing Mode ..	4
Fig. 15 Friction Related Energy–Absorption Mechanism	52
Fig. 16 Crushing Characteristics of Brittle Fracturing Crushing Mode ..	6 2
Fig. 17 Crushing Characteristics of Local Buckling Crushing Mode	72
Fig. 18 Shell Model for FEA	8

Fig. 19 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 0°member	38
Fig. 20 The Collapse Shape of 15°member in Simulation	9
Fig. 21 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 15°member	40
Fig. 22 The Collapse Shape of 45°member in Simulation	4
Fig. 23 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 45°member	42
Fig. 24 The Collapse Shape of 90°member in Simulation	3
Fig. 25 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 90°member	44
Fig. 26 The Collapse Shape of 90°/0°member in Simulation	45
Fig. 27 Delaminated Surface during simulation of 45°member	6
Fig. 28 Comparing the Absorbed Energy of The Experiment and Simulation	47
Fig. 29 Comparing the Max Load of The Experiment and Simulation	48
Fig. 30 Comparing the Mean Load of The Experiment and Simulation	59

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo 1 The Volkswagen EcoRacer concept car: (a) complete vehicle, and (b) stripped continuous carbon fibre reinforced composite body structure.	4
Photo 2 Autoclave	10
Photo 3 Fracture section of the collapsed specimens	8 2

ABSTRACT

A Study of Dynamic Behavior of CFRP Structural Members Using Finite Element Method

Jeong, Joo–Yeong

Advisor : Prof. Kim, Ji–Hoon, Ph. D.

Dept. of advanced Part & Materials

Engineering Graduate School of

Chosun University

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) are widely used in a large number of industries by virtue of its light weight and excellent strength as compared to metal or other materials. In particular, unidirectional CFRP prepreg inter–layer structure with excellent compression strength is in wide use in aircraft building and lightweight vehicles.

This CFRP is an isotropic material and the material properties of the CFRP is determined by stacking sequence. So The CFRP shows different collapse characteristic than isotropic material. In addition, It shows local buckling, inter–laminar cracks and intra–laminar cracks during collapse. Thus, it is hard to predict and analysis behavior under various load.

But the progress of computer performance and the FEA(Finite Element Analysis) program help to predict behavior of CFRP member under dynamic

load. Thus many researchers are studying the FEA method of CFRP structural members. According to researches, FEA of the CFRP structural members has several difficulties. And the representative difficulty on FEA of the CFRP structural members is implementation of brittle fracturing and inter/intralaminar cracks.

In this paper, the FEA method of the CFRP structural members under dynamic load is studied with using the LS-Dyna3D and the result obtained from this study is as follows ;

1. The crushing response of composite member can be categorized into three basic modes: Lamina Bending, Transverse Shearing, and Local Buckling. But the biggest intra-lamina crack was broke out on the center interface of specimen on the almost case of experiment.

2. A split on corner and intra-lamina crack were shown on this simulation. Thus, an analysis method using 2 layer shell model with Contact interface algorithms is reasonable for analysis CFRP member with Mode I, Mode II and intra-lamina crack.

3. The load-displacement plot of simulation result is similar to the load-displacement plot of experiment. But the range of load-displacement plot of simulation is larger then the range of load-displacement plot of experiment. It seems that the TFAIL Parameter, which is time step size criteria for element deletion, influenced the result of simulation.

4. Simulation results shows 1.4~33.63% of the difference on absorbed energy, 2.6~14.61% of the difference on maximum load and 1.4~33.63% of the

difference on mean load comparison with experiment result.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

수송기계 등의 기계 구조물에 사용되는 구조 부재는 대부분이 일정 형상을 지닌 형강 혹은 중공부재를 사용한다. 이러한 구조 부재는 여러 가지 장치나 기구들을 고정하고 지지하며 충돌과 같은 사고가 발생 하였을 때는 충격을 흡수하는 역할을 한다.

특히 자동차에 사용되는 사이드 부재의 경우 엔진 및 현가장치 등의 여러 가지 부품을 지지하고, 충돌 사고 시 충격에너지를 흡수하여 승객을 보호하는 역할을 한다. 따라서 이러한 사이드 부재는 충돌시 안정적으로 압쇄되어 충돌에너지를 흡수할 수 있어야 하며 반복되는 하중 등에 의한 피로특성을 확보해 안전성과 내구성을 보장하여야 한다.

이와 더불어 최근의 수송기계 설계 동향은 석유자원의 고갈과 환경문제의 대두 등으로 경량화를 통해 에너지사용의 효율성을 증가시켜 배출가스를 감소시키고 수송원가를 절감시키려는 노력이 이루어지고 있다. 이미 유럽연합에서는 EURO-5, EURO-6¹⁾와 같은 규제를 두어 자동차의 연비 및 배출가스의 규제를 더욱 강화하고 있으며 다른 선진국도 이와 마찬가지로 배출가스와 관련된 여러 가지 규정을 도입하고 있다. 이러한 추세에 엄격한 배출가스규제를 만족하는 수송기계의 개발을 위해 배기가스 후처리장치, 희박연소기술, Auto Stop and GO와 같은 배출가스 저감을 위한 첨단 기술을 개발 및 적용하고 있으며 이와 더불어 수송기계의 경량화를 통해 배출가스를 줄이고 연비를 향상시킬 목적으로 차량에 사용되는 구조용 부재의 안전성과 신뢰성을 희생하지 않으면서 차체 구조물을 경량화 시키는 기술도 함께 개발하고 있다.

이러한 경량화와 신뢰성이라는 두 가지 목표를 동시에 충족하는 구조용 부재를 개발하는 데 있어 비강성, 비강도가 타 재료에 비해 현저히 높은 탄소섬유 강화

플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics; 이하 CFRP라 한다)이 주목받고 있으며, 이를 일반 양산차량에 적용하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 1988년 포드, 크라이슬러, GM은 공동으로 복합재료 자동차 컨소시엄(Automotive Composite Consortium-ACC)을 설립해 연구를 진행하였으며²⁾ Volkswagen의 경우 2010년부터 양산을 시작하는 초저연비 하이브리드자동차 L1의 Monocoque Body-Shell을 제작하는데 있어 CFRP를 이용하였고 Photo 1과 같이 EcoRacer concept 차량을 제작함에 있어도 CFRP를 1차부재로 활용하였다.³⁾ 이외의 다른 차량 제작 업체도 CFRP를 양산차량에 적용하기 위하여 많은 노력을 하고 있다.

CFRP를 차량의 1차 부재에 적용하기 위해서는 강도 강성의 확보와 함께 사고 시 효율적인 에너지 흡수와 함께 파괴되는 형상을 같이 고려해야 한다. 특히 차량에 사용되는 사이드 부재의 경우 엔진과 현가장치를 비롯한 각종 주행에 필요한 여러 가지 장치를 지지하고, 주행 중 생기는 차체의 뒤틀림 등을 적절히 제어하는 역할도 하지만, 차량 충돌 사고 시 효율적인 에너지 흡수와 함께 엔진, 현가장치 등의 부품이 승객실 안쪽으로 튀어 들어가 2차 상해가 발생하지 않도록 파괴 형상도 제어해야 한다.

하지만 CFRP 부재는 복잡한 파괴 거동을 보이므로 충돌 시 에너지 흡수 특성 및 파괴 형상을 예측하여 제어하는 것이 매우 어렵다. 이는 CFRP가 갖는 비선형적 특성에서 기인한다. 섬유와 기지의 조합으로 제작되는 CFRP의 특성상 사용한 섬유 및 기지의 종류와 적층 및 제작 방법에 따라 그 파괴특성이 현저하게 달라진다. 또한 CFRP 부재의 파괴는 층간, 층내크랙의 발생과 함께 여러 가지 거동이 복합적으로 나타난다.⁴⁾

이러한 CFRP 부재의 파괴 형상과 에너지 흡수 특성을 예측하기 위한 여러 가지 노력의 일환으로 유한요소해석 프로그램(Finite Element Analysis Program; 이하 FEA Program이라고 한다)을 이용해 CFRP 부재의 복잡한 파괴 거동과 에너지 흡수 특성을 예측하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 아직 FEA Program의 해석 결과와 실제 결과에서 많은 차이가 있지만, 이러한 프로그램을 이용한 수치적 접근은 각종 충돌실험에서 충분히 역할을 수행 한다고⁵⁾ 보편적으로 인식되고, 하드웨어

어와 소프트웨어의 급격한 발달로 유한요소해석 프로그램의 수치적 결과가 점점 실제 결과에 근사하는 해석 결과를 보이기 때문이다.

그러나 CFRP 부재의 압괴 현상은 기하학적 변형이 크고, 소성변형을 포함하는 비선형 거동을 하기 때문에 설계 또는 연구 시에 실험적 해석에 의존하고 있는 것이 현실이다. 특히 차량의 초기 설계 단계에서 차량 충돌성능을 파악 할 때 이러한 실험적 접근을 하게 되면 시간, 비용의 증가로 개발비용의 상승으로 이어지고, 단면 형상에 따라 압괴 특성이 달라지는 구조용 부재⁶⁾의 압괴 특성을 설계도면에 Feed-Back하는 것이 어렵게 된다. 따라서 CFRP 부재의 압괴특성을 정확히 이해하고 이것을 수치적으로 해석할 수 있는 기술 개발이 시급한 과제라고 생각한다.

(a)



(b)



Photo 1 The Volkswagen EcoRacer concept car: (a) complete vehicle, and (b) stripped continuous carbon fiber reinforced composite body structure.³⁾

제 2 절 연구동향

차체 구조용 부재에 CFRP를 적용하기 위한 연구와 정적·동적 압괴 특성과 형상을 예측하기 위한 연구는 국내외에서 활발히 이루어지고 있다.

실험적 연구로, 이⁷⁾는 충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가를 위해 사각형, 원형 단면 및 모자형 단면의 CFRP 및 혼성 충격흡수 부재를 연구하였다. 김^{8,9)}은 적층배향에 따라 바뀌는 CFRP의 기계적 특성을 연구하기 위해 섬유배향의 차이, 섬유 강도의 차이 및 초기 최대 하중을 평균 압괴하중에 근사시켜 점진적인압괴가 유발되도록 하는 트리거의 유·무에 따른 압괴 특성을 준정적 및 충격 압괴실험을 통해 고찰하였다.

그리고 수치적 연구로는 Haipeng Han¹⁰⁾은 LS-Dyna를 이용해 유리섬유와 탄소섬유를 이용한 복합재료 Pipe의 충격압괴를 연구 하였으며, Hamidreza Zarei¹¹⁾는 Fig. 1과 같이 단면형상에 따르는 열가소성플라스틱 복합재료의 충격압괴를 해석했다. Jiancheng Huang¹²⁾와 Carla J. McGregor¹³⁾는 CFRP 부재가 축 압괴를 할 때의 거동을 실험적/수치적 방법을 통해 해석을 하였다.

그리고 각종 경계조건과 재료의 설정 등에 관한 해석결과의 차이를 비교하기 위해 Xinran Xiao^{4),14~16)}는 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-Dyna를 이용한 Composite Tube의 충돌해석의 방법, 폴리프로필렌 수지를 이용한 CFRP의 인장 및 전단 거동의 FEM해석 및 물성치 입력에 따른 결과의 변화를 고찰하기 위해 MAT058과 CODAM을 이용하여 축 압괴 해석 결과의 비교를 하였고 Fig. 2와 같이 플러그를 이용한 CFRP 튜브의 압괴과정을 해석하였다.

A.G. Mamalis¹⁸⁾는 정적하중과 충격하중을 받는 CFRP 사각관을 LS-Dyna로 해석하여 단순한 이중 Shell Model로 층간 박리를 구현할 수 있음을 보였다.

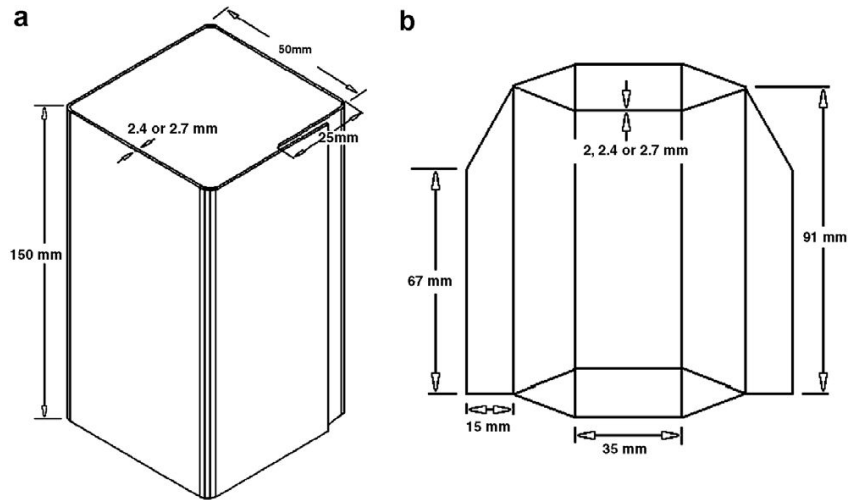


Fig. 1 A numerical crashworthiness investigation model of thermoplastic composite crash boxes;
 (a) Square crash box (b) Hexagonal crash box.¹¹⁾

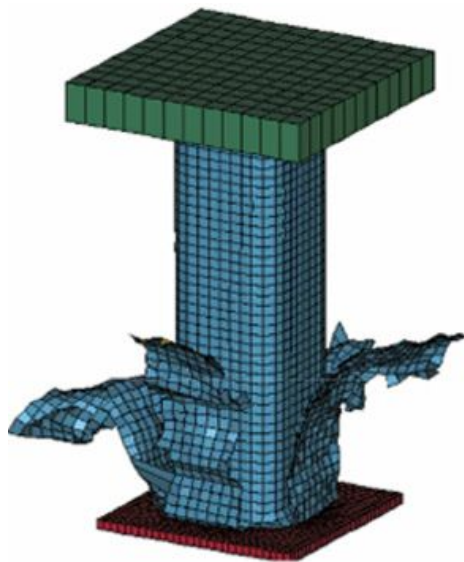


Fig. 2 Comparison of failure morphology predicted using 5mm×5mm shell elements.¹⁴⁾

제 3 절 연구목적 및 방법

축 하중을 받는 구조부재의 압괴특성에 관한 연구는 경량화 측면과 충돌 시 승객의 안전을 도모할 수 있도록 많은 에너지를 흡수할 수 있는 구조부재를 개발하기 위한 방향으로 행해지고 있다.⁵⁻⁹⁾ 하지만 CFRP 복합재료를 이용하여 만든 구조용 부재는 CFRP가 갖는 이방성으로 인해 Steel재료나 Al-합금 등의 등방성 재료에 비해 해석을 수행하는 것이 상당히 어렵고 이로 인해 실제 구조물에 적용하는 것이 상당히 어렵다.

본 연구에서는 지금까지 행해진 연구들을 분석하여 CFRP 부재의 파괴 형상과 경향을 도출하고 이것을 이용해 유한요소 모델(Finite Element Model; 이하 FE Model이라 한다)을 작성하고, 이것을 토대로 수치적 해석을 하여 적극적인 설계수단으로 활용할 수 있는 방법을 연구하고자 한다.

실험을 통해 CFRP 부재가 파괴되는 과정을 분석하면 크게 층간크랙, 층내크랙, 기지파괴, 섬유파단으로 나눌 수 있다. 층내크랙, 기지파괴, 섬유파단은 미소한 섬유와 기지의 조합에 의해 나타난다. 하지만 미소한 섬유와 기지의 조합으로 구성된 적층수와 적층각도를 전부 모델링하면 FE Model이 복잡해지고 이에 따라서 해석시간이 길어지게 된다.

본 연구에서는 FE Model을 간단하게 하기 위해 적층수와 적층각도에 따라 달라지는 CFRP 부재의 파괴특성은 MATERIAL CARD의 Parameter들을 조정하였으며 적층수와 적층각도는 Shell Model의 적분점에 각도 및 적층수를 부여하였다. 층간크랙의 구현 및 해석은 Contact interface algorithm을 이용해 구현한 사례^{2-4),11-18)}를 참고하여 Shell Model을 이중으로 하여 마주보는 Surface사이에 특정조건을 부여하여 해석한 다음 그 결과를 실험과 비교하여 타당성을 평가한다.

이러한 CFRP 부재의 충격압괴 해석을 통해 CFRP 부재의 안전성능을 수치적으로 평가하는 방법을 개발하여 향후 개발될 경량화 차체 설계에 CFRP를 적용하기 위한 기본적인 설계기법을 얻고자 한다.

제 2 장 CFRP 구조용 부재의 충격압괴실험

제 1 절 시험편

본 연구에서는 최근 경량화 재료로 주목받고 있는 CFRP를 이용하여 사이드 부재의 기본 형상인 사각형상의 부재를 Fig. 3과 같이 제작하여 실험하였다. 이 실험에서 사용된 CFRP의 일반적인 특성을 Table.1에 나타냈다. 이 실험에 사용된 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 프리프레그 시트(CU125NS)를 사각형 맨드릴 위에 적층하고 오토클레이브를 사용하여 성형한 것이다. 시험편의 크기는 실제 사이드부재의 1/4 크기인 30×30mm(가로×세로)로 하고 시험편의 길이는 오일러좌굴이 발생하지 않고 실험 시 압괴가 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

시험편의 성형은 Photo 2 와 같은 오토클레이브를 사용하여 이것의 내부에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간 90분인 Fig. 4와 같은 경화 사이클을 통해 제작되었다. 그리고 수지로부터 발생하는 휘발성분을 제거하고 프리프레그 시트 사이의 층간 접합을 완전하게 하기 위하여 진공펌프로 진공백의 내부를 10^{-1} Pa 까지 진공시키고 압축공기를 이용해 진공백 외측을 3×10^5 Pa 정도로 가압하였다. 성형이 끝난 시험편은 잔류응력이 발생하지 않도록 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다.

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]

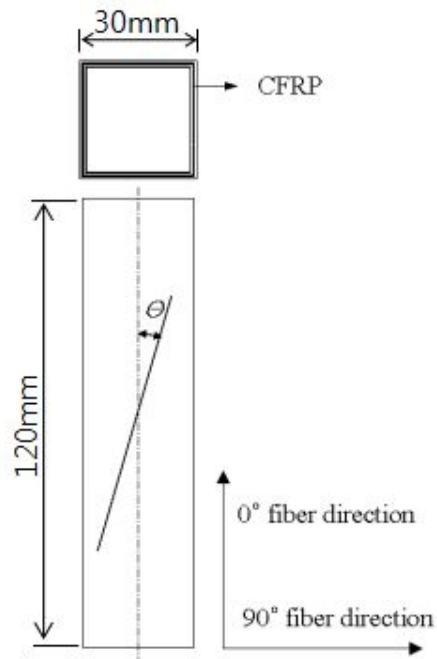


Fig. 3 Configuration of square member

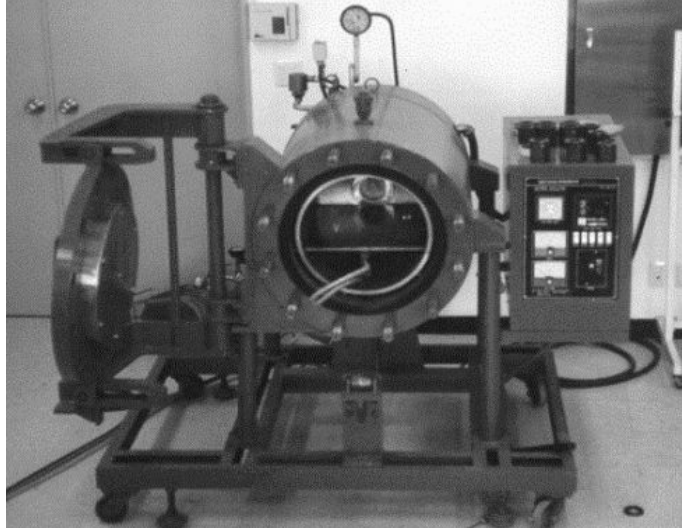


Photo 2 Autoclave



Fig. 4 Curing cycle of CFRP stacking specimen

제 2 절 시험방법

충격 흡수용 경량화 차체 구조부재의 안전성능 평가를 위한 충격압괴실험에서 공기압식 충격장치를 사용하였다. 이것은 공기압 가속장치를 이용한 실험 장치로, 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 또는 공기압을 이용한 가속을 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 장치이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 5에 나타냈으며, Fig. 6는 실험장치의 계측시스템의 구성도를 나타냈다.

시험기는 공기압 가속장치인 에어건과 에어실린더, 시험편에 직접적인 충격을 가하는 크로스헤드, 충격하중을 계측할 수 있는 로드셀 및 가이드 바, 베이스 플레이트, 방진고무, 프레임 등으로 구성되어있다. 특히, 가이드 바를 4개로 구성하고 크로스헤드를 2층 구조로 제작하여 크로스헤드가 시험편에 편심 되어 충격이 가해지는 것을 방지하였으며, 재현성 있는 충격압괴실험을 할 수 있도록 하였다. 또한, 로드셀은 2개의 원판을 원주로 연결한 형태로서 연강환봉을 절삭하여 제작하였으며, 위쪽 원판 위에 시험편을 위치시키고, 아래쪽 원판에 3개의 볼트구멍을 만들어 베이스 플레이트에 고정하였다.

시험편의 압괴 시간변화 즉, 변위의 측정은 압괴가 진행하고 있는 사이 시험편의 변위량과 크로스헤드의 이동량이 일치한다고 보고 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식 변위계(Zimmer OHG사, 100F)로 비접촉 계측하여 변위 데이터를 구하였다. 광학식 변위계는 광학렌즈를 이용하여 렌즈 측정범위 내에 있는 표적의 백색부와 흑색부의 경계선(edge)의 이동량을 전압변화로 측정하는 것이며, 렌즈의 교환에 따라 측정범위를 달리 할 수 있다. 여기서는 초점거리가 1080mm이며 최대 100mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다.

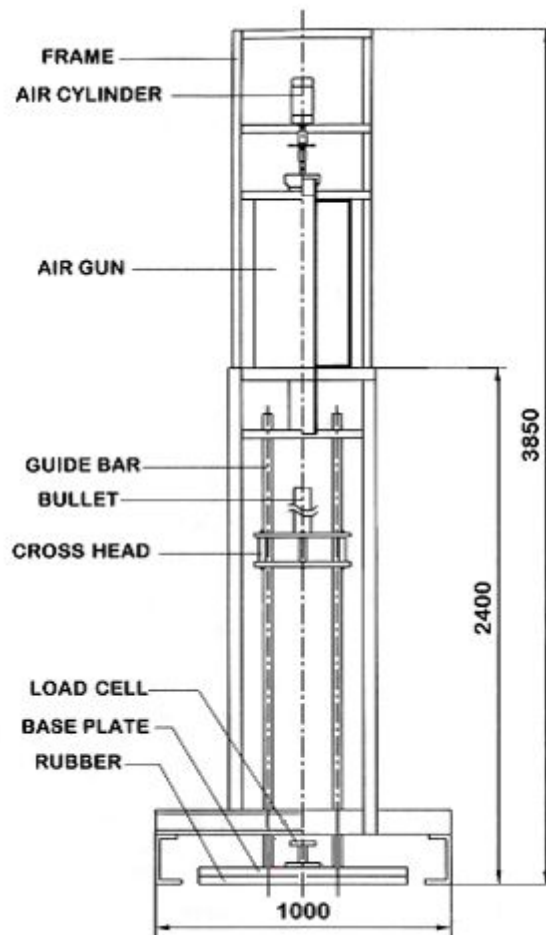


Fig. 5 Impact testing setup for crushing

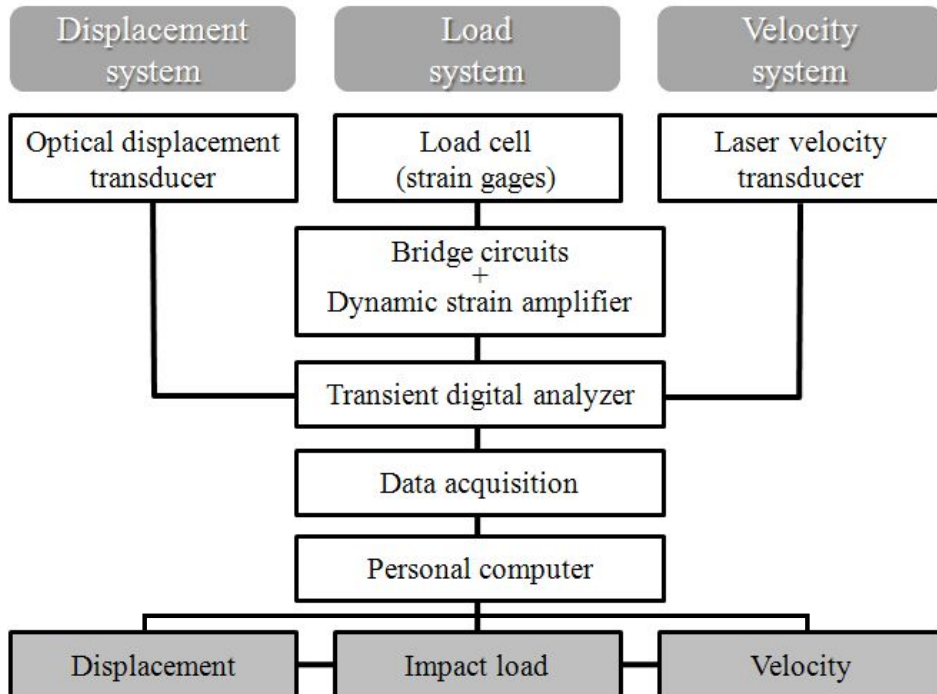


Fig. 6 Diagram of measurement system

제 3 절 실험결과

충격 압력실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위 선도를 식(2.1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l P(l)dl \quad (2.1)$$

여기서, E_a 는 시험편에 흡수된 에너지이며, $P(l)$ 는 압력하중을 나타낸다.
충격 압력 실험결과에서 얻어진 하중-변위선도를 Fig. 7~10에 나타냈다.

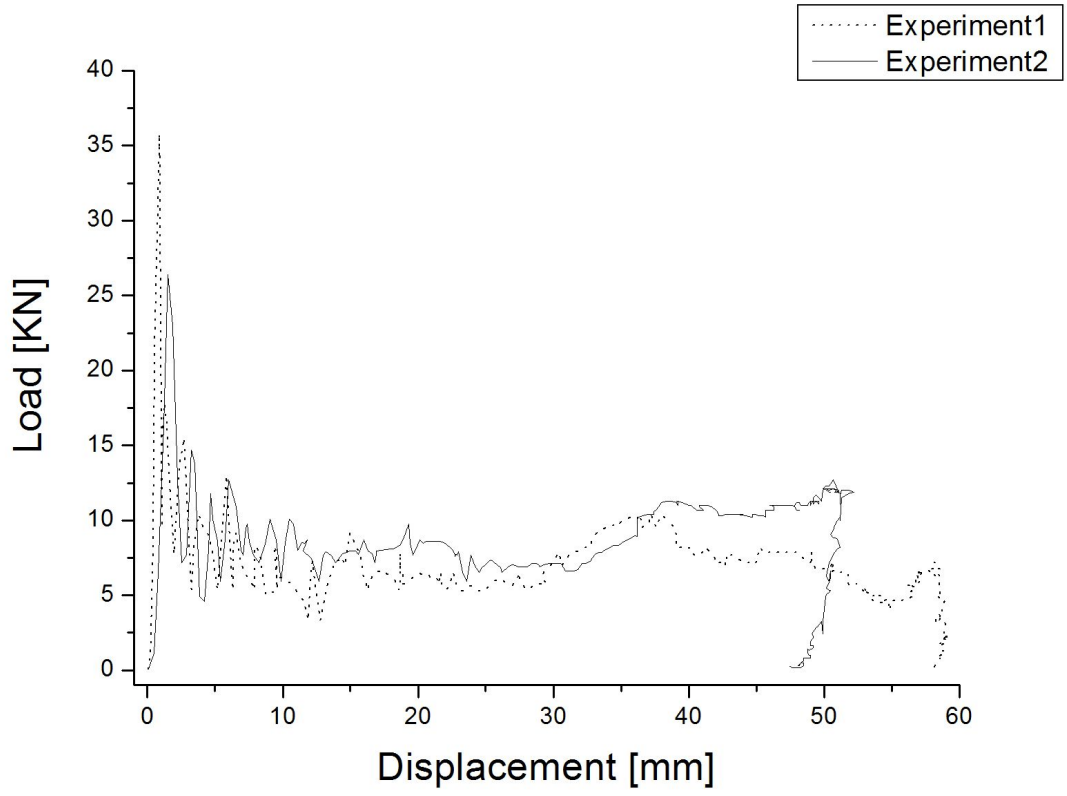


Fig. 7 The Load–displacement curve of 15°member

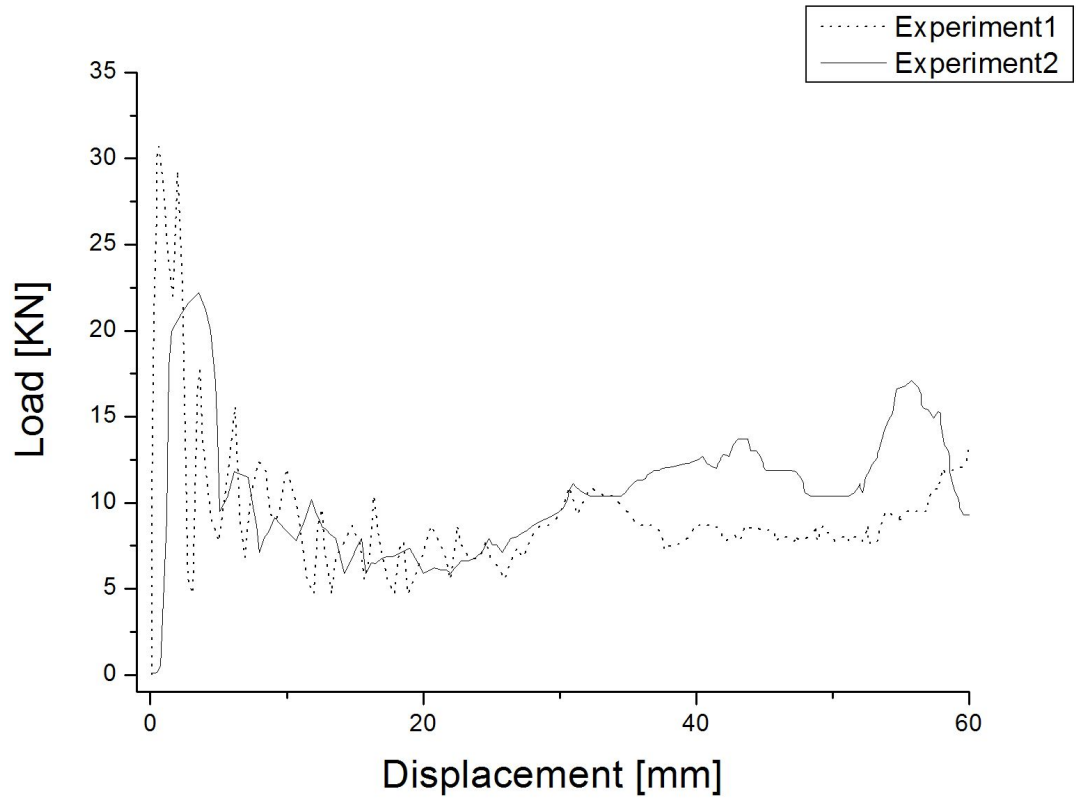


Fig. 8 The Load–displacement curve of 45°member

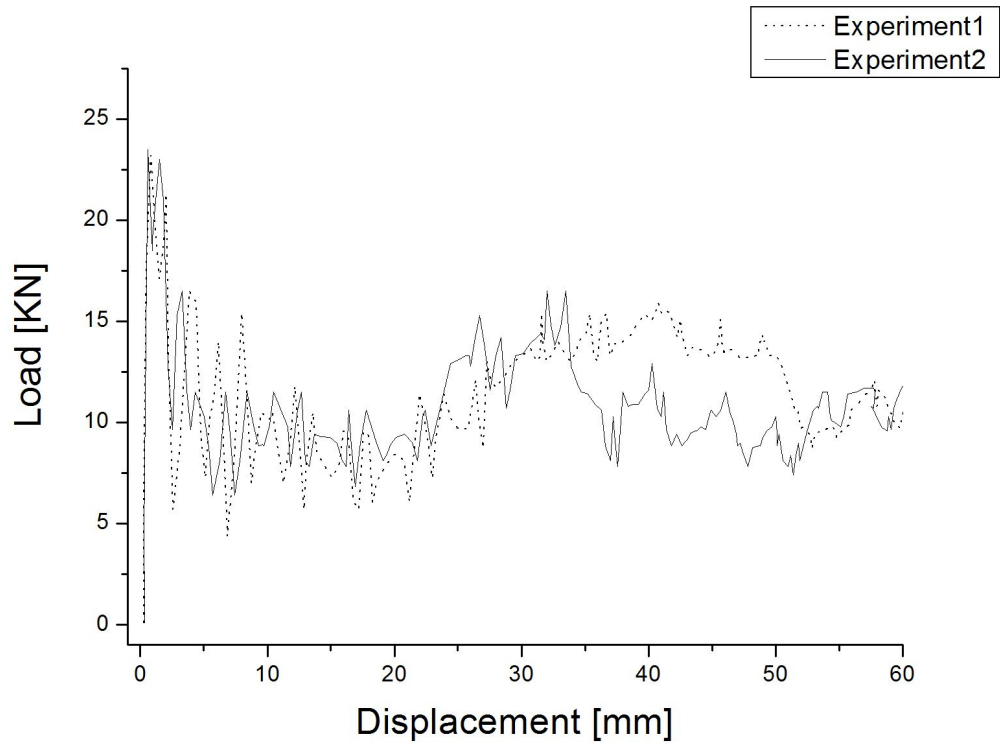


Fig. 9 The Load–displacement curve of 90°member

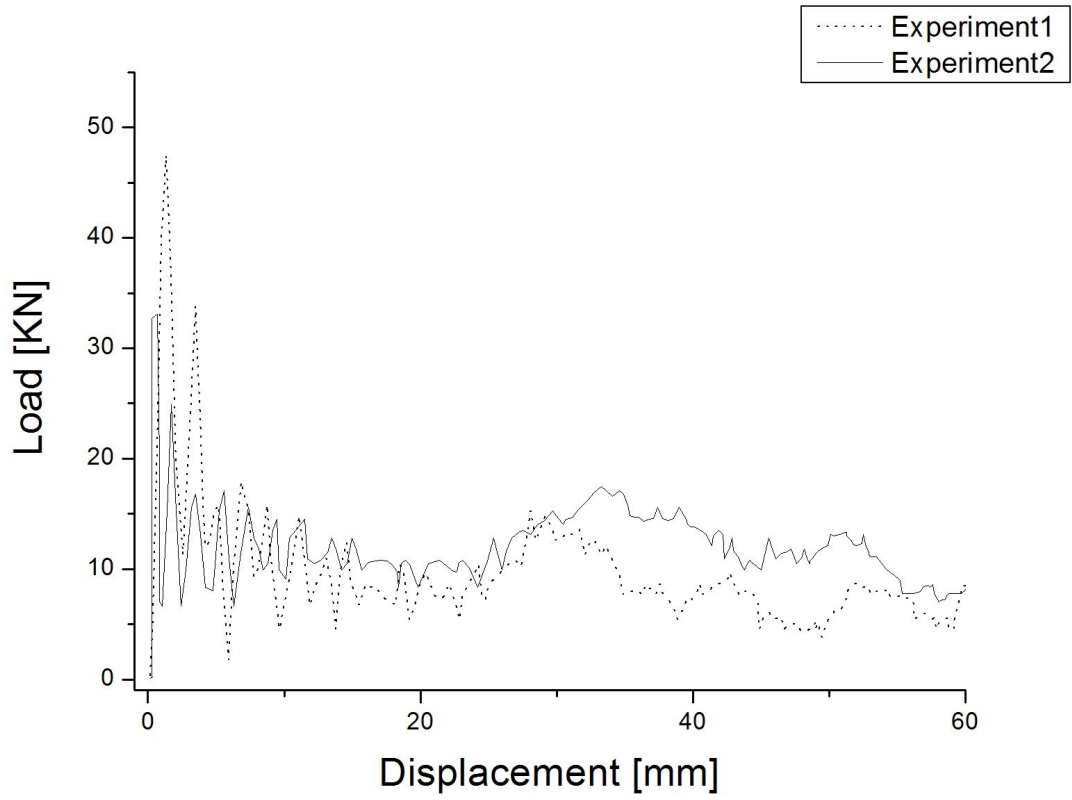


Fig. 10 The Load–displacement curve of 90°/0°member

제 4 절 파괴경향 분석

CFRP 부재에 하중이 작용하기 시작하면 Fig. 11과 같이 파손이 시작된다. 먼저 재료의 국부파손이 발생하고 미소한 층간/층내크랙이 형성되며 횡방향 전단, 라미나 굽힘 또는 MODE의 조합에 의해 층간/층내크랙의 길이, 라미나 묽음파괴 및 압레모드가 결정된다. 또한 모든 CFRP 부재가 점진적으로 압레되는 것은 아니며 CFRP 부재의 구조, 형상, 섬유/기지의 조합에 의존한다.

따라서 이러한 CFRP 부재에 하중이 가해지는 경우 발생하는 압레모드를 이해하기 위해서는 4가지 기본적인 압레모드의 이해가 선행되어야 한다.

첫째 횡방향 압레모드는 Fig. 12와 같이 일부 라미나 묽음으로 형성된 종방향 크랙과 하나 또는 다중의 짧은 층간크랙에 의존하며 CFRP 부재의 압레 면은 하중이 CFRP 부재의 표면을 따라 불균일하게 전파되는 것과 같은 부채꼴 모양의 형태를 갖는다. 횡방향 전단 압레모드의 주요 에너지 흡수 메커니즘은 Fig. 12와 같이 라미나 묽음의 파괴이며 크랙의 구, 위치, 길이는 시험편의 구조형상과 성분재료의 특정 함수다. 층간크랙의 성장과 라мина 묽음파괴는 횡방향 전단 압레모드의 압레 과정을 제어한다. 층간크랙 성장은 기지의 역학적 특성, 섬유의 배향각과 섬유의 파손 변형을 및 인장강성에 의해 제어된다. 층간크랙은 Fig. 13에 나타난 것과 같이 MODE I, MODE II로 성장하게 되고 이때 크랙의 성장은 기지의 파괴인성과 섬유의 배향각에 의해 결정된다.

둘째 라мина 굽힘 압레모드는 Fig. 14와 같이 매우 긴 층간크랙 및 층내크랙과 섬유와 평행한 크랙이 나타나지만 라мина 묽음 파괴는 되지 않는다. 즉, 주요 에너지 흡수 메커니즘은 크랙의 성장이며 층간크랙이 인접한 층의 상호 관계로서 진전하고 형성되는 반면 층내크랙은 각의 층에서 성장한다. 섬유와 평행한 크랙은 일반적인 섬유배향을 갖는 다수의 인접한 라미나 또는 Ply의 섬유방향에 평행하게 전

파하며 라미나 묶음은 굽힘 변형을 수반하지만 파괴되지 않는다. 또한 마찰과 관계된 에너지 흡수 메커니즘은 슬라이딩하는 다수의 라미나 묶음들 사이의 상대운동에 의한 저항으로 나타난다.

압케 표면을 따라 수반된 운동과 하중면에 대한 라미나 묶음 굽힘은 마찰력을 통한 에너지 흡수 메커니즘으로 나타나며 마찰력은 Fig. 15와 같이 라미나 묶음의 상대운동으로 나타난다.

셋째 취성과 파괴 압케모드는 횡방향 전단과 라미나 굽힘 압케모드의 조합이며, CFRP 부재의 압케 결과는 대부분 취성과 파괴 압케모드이다. Fig. 16과 같이 취성과 파괴 압케모드의 경우 라미나 묶음에 약간의 굽힘이 존재하고, 파단에 가까우며, 라미나 묶음이 파단 될 때 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복된다.

넷째, 취성 및 연성에 의한 파괴는 연성금속에서의 그것과 유사하다. 이러한 압케 모드는 Fig. 17과 같이 재료의 소성변형에 의해 국부 좌굴의 변형으로 구성된다. 이 때 일어난 좌굴은 국부적인 층간분리를 발생시킨다.

Photo 3은 각각의 압케모드에 대한 단면을 나타내었다. Photo 3에 보이는 것과 같이 CFRP 부재의 파괴는 라미나 굽힘, 섬유 파단, 기지 파괴, 등의 다양한 파괴의 상호작용으로 이루어지지만 대부분의 경우 중앙계면에서 가장 큰 박리가 일어나는 것을 확인할 수 있다.

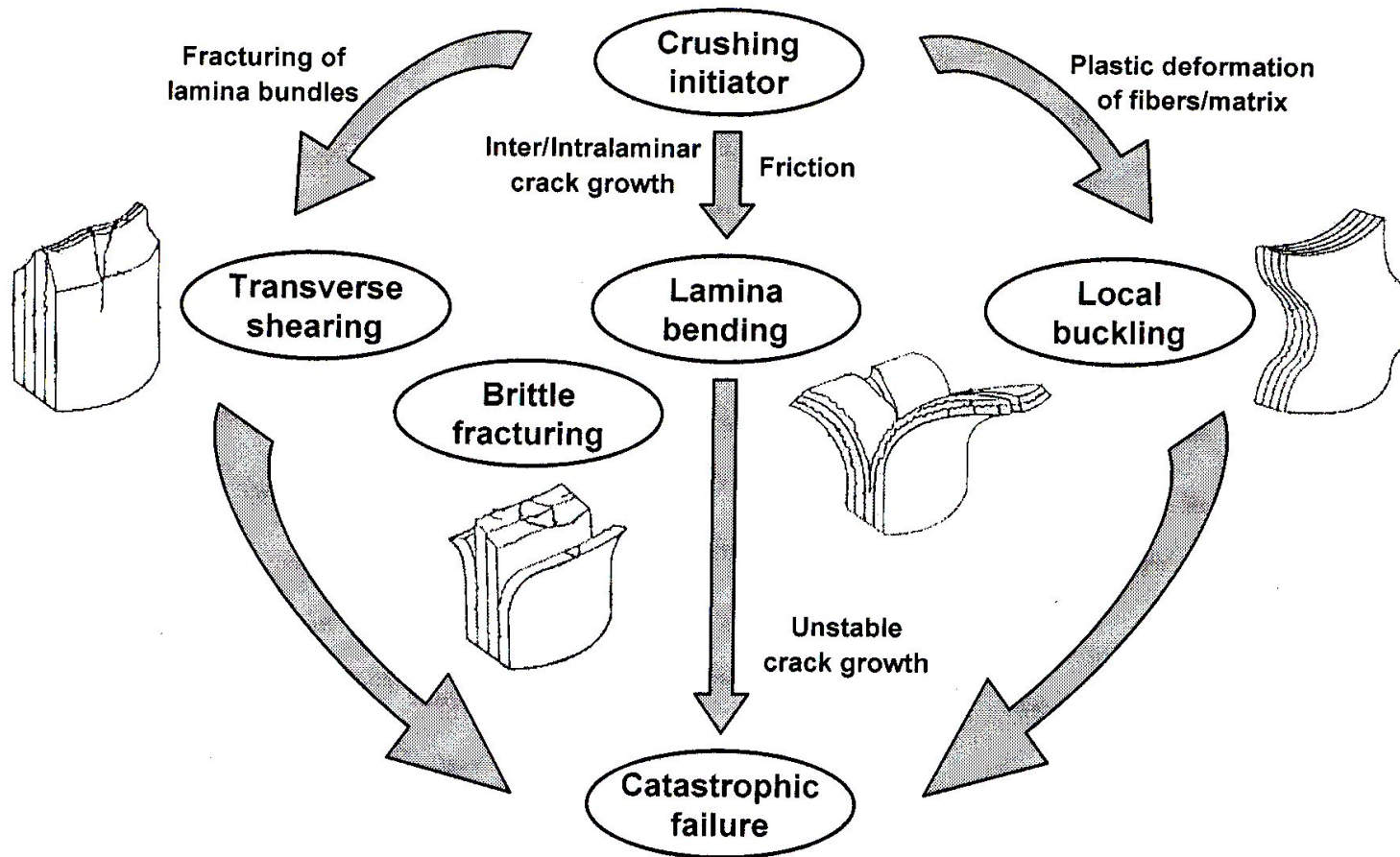


Fig. 11 Crushing Process of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes⁴⁾

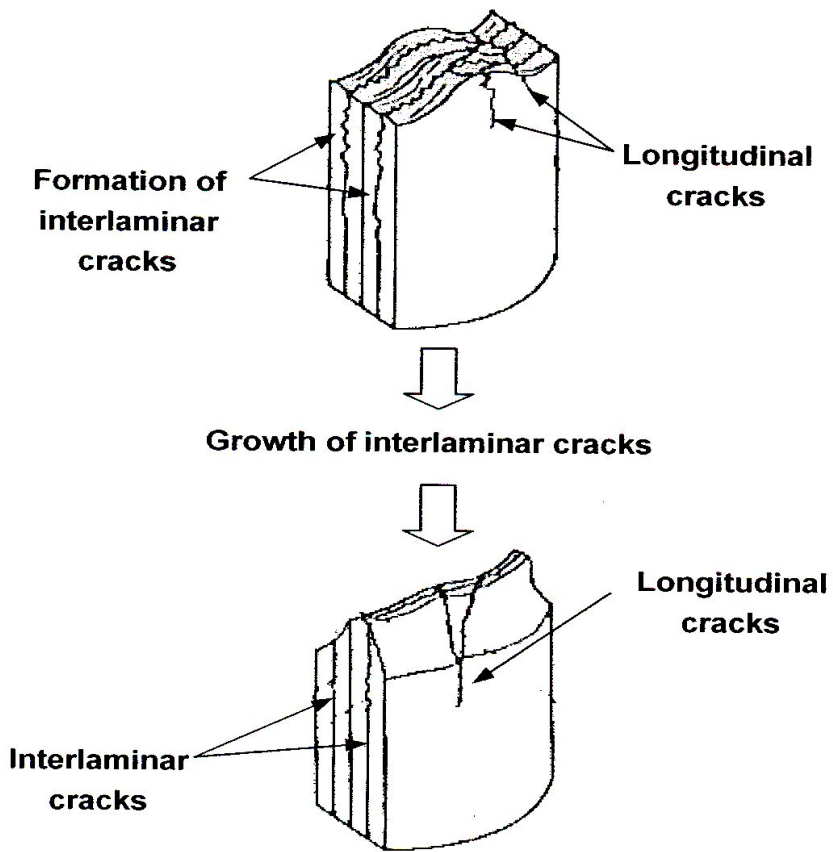
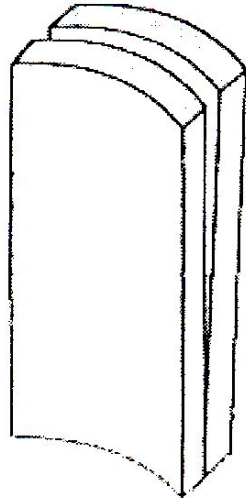
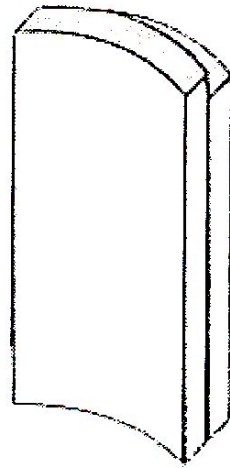


Fig. 12 Crushing Characteristics of Transverse Shearing Crushing Mode⁴⁾



Mode I
Opening mode



Mode II
Forward shear mode

Fig. 13 Crack Propagation Modes⁴⁾

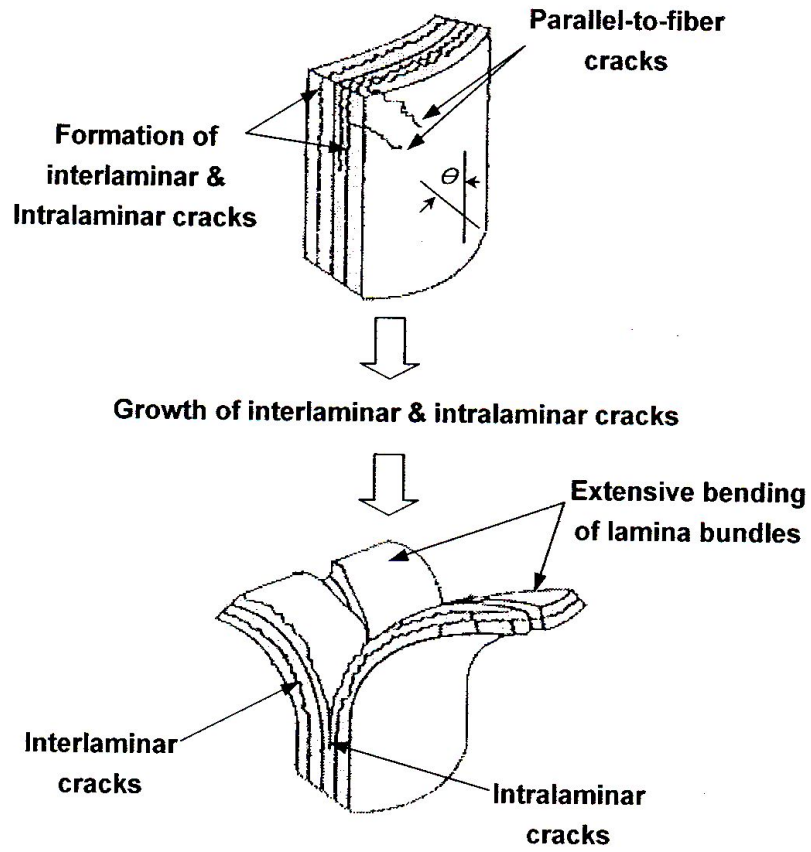


Fig. 14 Crushing Characteristics of Lamina Bending Crushing Mode⁴⁾

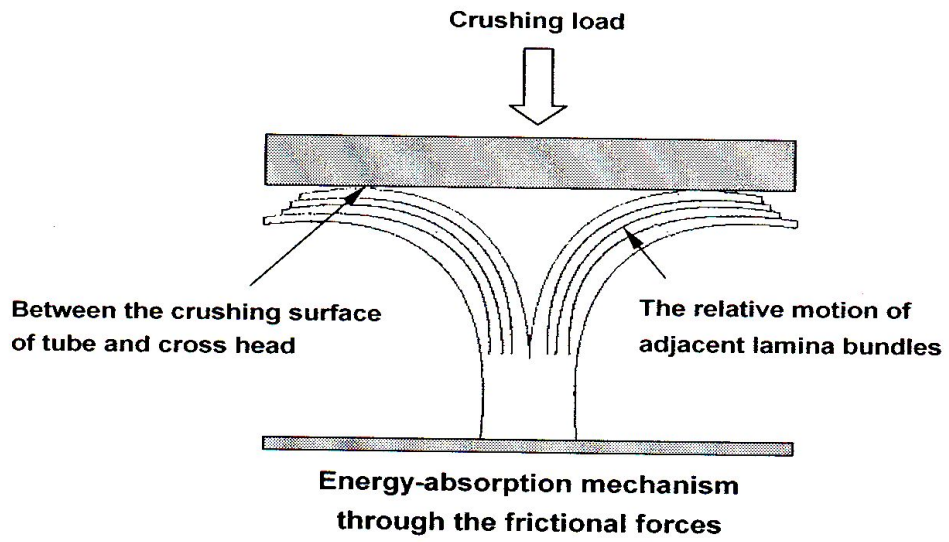


Fig. 15 Friction Related Energy-Absorption Mechanism⁴⁾

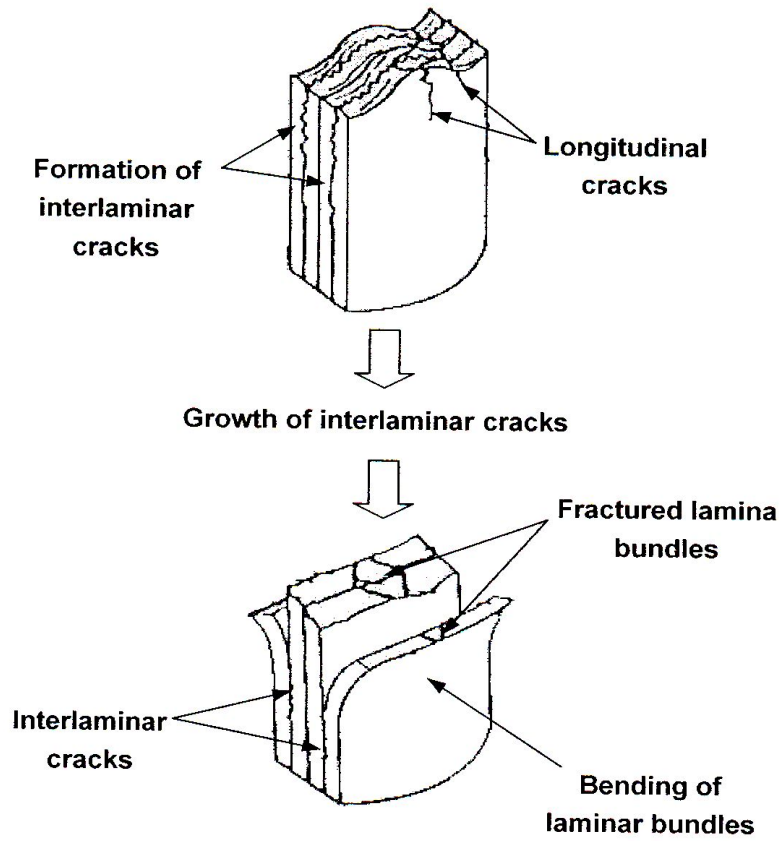


Fig. 16 Crushing Characteristics of Brittle Fracturing Crushing Mode⁴⁾

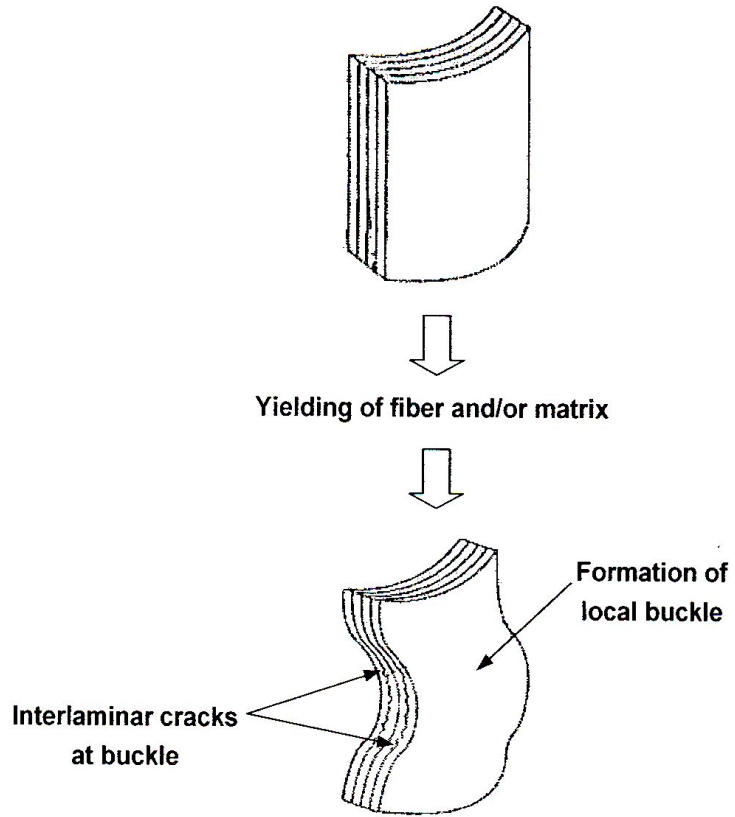
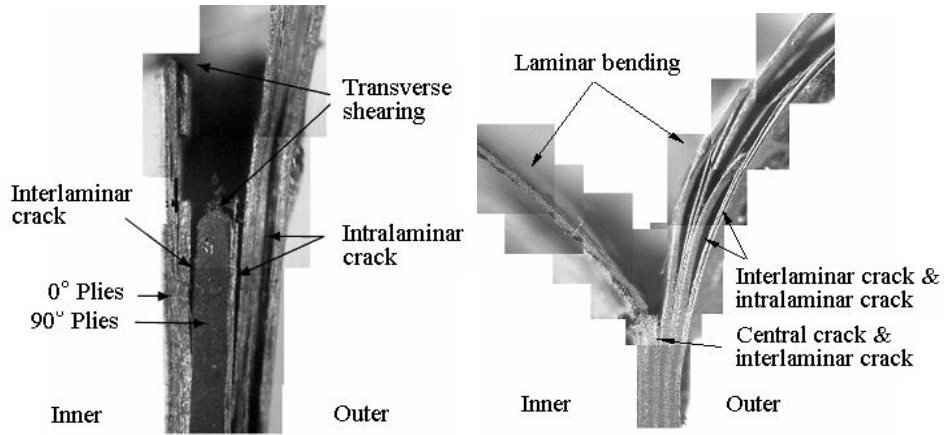
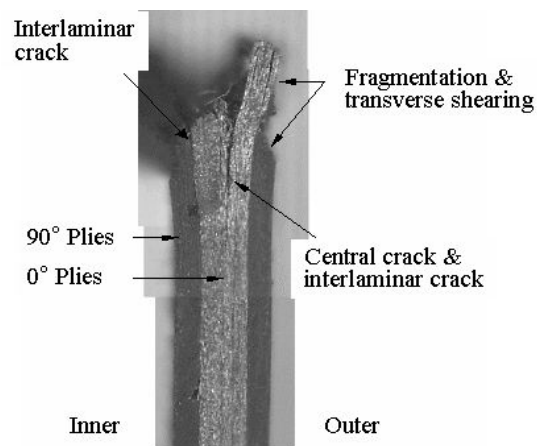


Fig. 17 Crushing Characteristics of Local Buckling Crushing Mode⁴⁾



(a) Wedge collapse mode

(b) Splaying collapse mode



(c) Fragmentation collapse mode

Photo 3 Fracture section of the collapsed specimens⁸⁾

제 3 장 CFRP 구조 부재 시뮬레이션

제 1 절 FE Model 생성

본 연구에서 FEA에 사용될 시험편 FE Model의 CAD 모델링 작업은 Simens NX4¹⁹⁾를 이용하였으며 전처리기(Pre-Processor)는 Simens FEMAP 10.02²⁰⁾와 ETA VPG 3.1.1²¹⁾을 이용하였다. LS-Dyna3D를 통해 도출된 해석 결과의 확인을 위하여 후처리기(Post-Processor)인 LS-PrePost 2.1²²⁾을 이용하였다.

먼저 Simens NX4를 이용하여 작성한 CAD Model을 FEMAP 10.02에 Import 시켜 변환 한 후 내측 Shell Model과 외측 Shell Model에 각각 2×2mm크기로 4개의 질점을 갖는 Belychiko-tsay cell 요소를 생성시키고 물성치를 부여한 다음 VPG 3.1.1을 이용해 하중조건, 접촉조건(Contact interface algorithm), 구속조건을 입력하였다.

일반적으로 CFRP 부재가 파괴되는 동안 Mode I과 Mode II, 국부좌굴, 층간크랙 및 층내크랙이 발생하는 것을 알 수 있다.^{3,6-9)} 층내크랙과 국부 좌굴의 경우 기술적 한계로 완벽한 구현이 거의 불가능하다. 하지만 Mode I과 Mode II, 층간크랙은 앞서 2장에서 살펴본 바와 같이 거의 대부분 중앙 계면을 중심으로 일어나므로 Fig. 18과 같이 2개의 Shell Model을 이용해 Mode I과 Mode II, 층간크랙을 구현할 수 있도록 하였다.

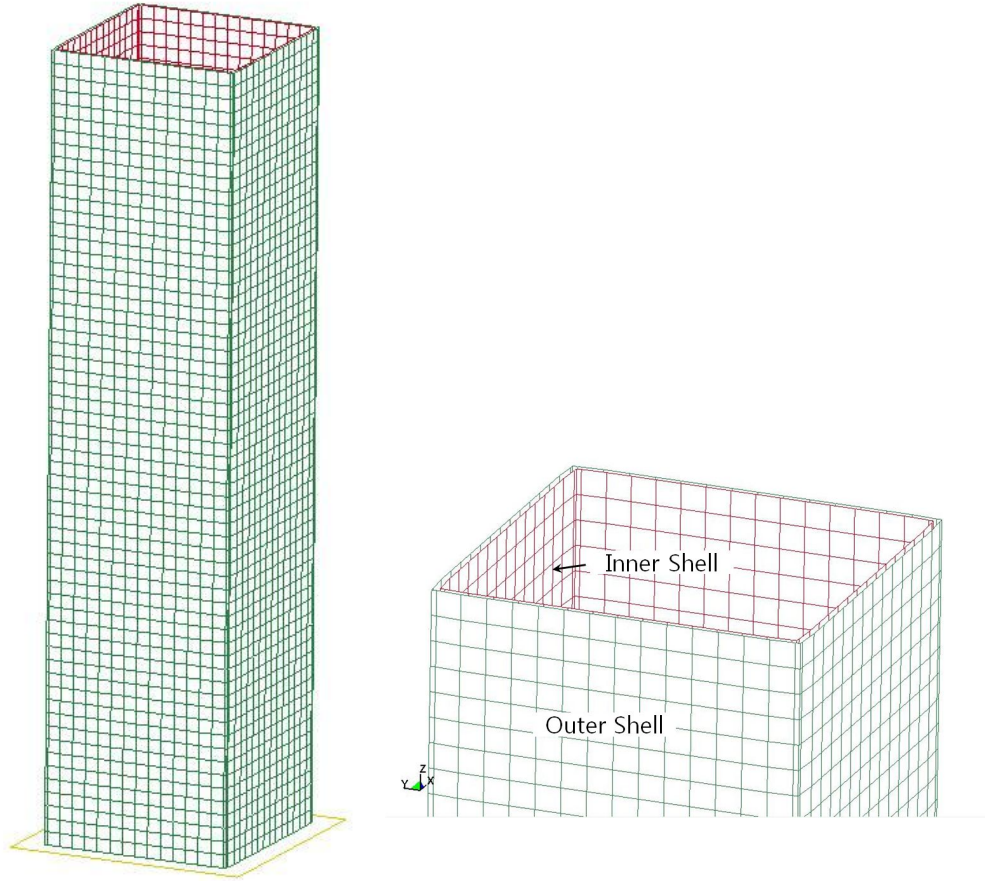


Fig. 18 Shell Model for FEA

제 2 절 Damage model

2장 4절에서 알아본 바와 같이 CFRP 부재의 파괴는 크게 거시적 파괴와 미시적 파괴의 복합적인 상호작용으로 이루어진다. 하지만 시뮬레이션을 행할 때 미시적인 부분까지 전부 구현하여 해석하는 것은 FE Model을 작성하는 것이 상당히 까다롭고 해석하는데도 시간이 오래 걸려 비효율적이므로 본 연구에서는 거시적인 부분과 미시적인 부분을 구분하여 시뮬레이션을 행하였다. 미시적인 재료의 강도 저하는 Material Card의 parameter를 조절하여 구현하였으며 거시적인 부분의 구현은 다음 4장에서 서술할 Contact interface algorithm을 이용해 구현하였다.

본 연구에서 사용한 Damage Model은 일반적으로 CFRP 및 GFRP의 Damage Model에 자주 사용되는 Chang-Chang failure criteria에 기반 한 MATERIAL TYPE 054를 이용하였다. 이 MATERIAL TYPE 054는 사용자가 임의로 재료의 이방성 물성치를 입력할 수 있고 각종 parameter를 이용하여 CFRP의 취성적 특성, 최대하중 이후 강도의 저하 등을 조절 할 수 있다.

Chang-Chang failure criteria에 기반 한 MATERIAL TYPE 054의 failure criterion은 다음과 같다.^{23,24)}

Tensile fiber mode의 경우

$$\sigma_{aa} > 0 \text{ then } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right) + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{X_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0$$

Compressive fiber mode의 경우

$$\sigma_{aa} < 0 \text{ then } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

(3.2)

$$E_a = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0$$

Tensile matrix mode의 경우

$$\sigma_{bb} > 0 \text{ then } e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

(3.3)

$$E_b = \nu_{ba} = 0. \rightarrow G_{ab} = 0$$

Compressive matrix mode의 경우

$$\sigma_{bb} < 0 \text{ then } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2s_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$E_b = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0. \rightarrow G_{ab} = 0$$

일반적으로 CFRP부재에 충격이 가해지면 층내크랙, 층간크랙, 기지파괴, 섬유파단 등의 이유로 인해 강도가 저하된다. 이것을 정의하기 위해 MATERIAL TYPE 054의 FRBT와 YCFAC Parameter를 조정하였다. 이와 아울러 CFRP의 취성적 특성의 구현을 위해 TFAIL Parameter를 조정하였다. 이 TFAIL Parameter는 Time step에 기초해 Element를 삭제하는 역할을 한다. 그리고 여기에 사용한 parameter들의 설명과 입력한 값들은 Table 2와 같다.

Table 2 The Parameters of MAT_054 Used in Simulation

Parameter	Explanation	Value
ALPH	Nonlinear shear stress parameter	0.0
BETA	Weighting factor for shear term in tensile fiber mode	0.0
FBRT	Reduction factor for tensile strength in fiber direction after matrix compressive failure	1.0
YCFAC	reduction factor for compressive fiber strength after matrix compressive failure	3.0
TFAIL	time step size criteria for element deletion	0.4
SOFT	Softening reduction factor for material strength in crash front elements	0.8
EFS	Effective failure strain	0.95

제 3 절 하중조건

시험편이 받는 하중은 상단과 하단으로 나누어 생각할 수 있다. 실제 실험에서 부재의 하단은 로드셀로 지지되어 움직임이 없으므로 모든 자유도를 구속하였다. 시험편의 상단에는 Cross Head를 정의하기 위해 RIGIDWALL_PLANAR_FINITE_MOVING을 이용하였다. 이 Stone Wall의 질량은 40kg이고 해석 시간을 절약하기 위해 시험편으로부터 0.5mm떨어진 곳에서 충격임계속도 4.5m/s로 정의하였다. 이때의 충격임계속도는 실제 실험에서 측정한 속도를 이용하였다.

제 4 절 Contact interface algorithms

시험편 FE Model과 Stone Wall 사이의 Penetration을 막기 위해 CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE를 사용하였다. 이 Contact interface algorithm에서 Master는 Stone Wall, Slave는 Shell Model로 하였고 Stone Wall과 Shell Model 사이의 마찰계수는 0.2로 하였다

일반적으로 CFRP 부재가 파괴되는 동안 섬유파단, 기지파괴, 층간크랙, 층내크랙, Mode I과 Mode II 등이 동시에 일어난다.^{4,7-9)} 이 중 섬유파단, 기지파괴, 층내크랙을 완전히 구현하는 것은 극히 어렵고 해석하는데 시간이 오래 걸려 효율이 떨어진다. 따라서 섬유파단, 기지파괴, 층내크랙 등의 미시적인 요인에 따라 나타나는 강도저하는 2절에서 알아본 바와 같이 Damage model에서 구현하고 압축시 중앙계면에서 진행되는 박리 및 MODE I, MODE II에 의한 파괴의 구현을 위해 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK를 이용하였다. 이 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK Contact interface algorithm은 두 Surface가 Bonding 혹은 이와 유사한 어떤 조건에 의하여 접촉하여 고정되었으나 특정 조건에 도달하면 접촉면 사이에 분리 및 파괴가 일어날 때 사용한다. 2장 4절에서 서술한 것과 같이 CFRP부재의 경우 파괴가 일어날 때 중간 계면에서 주로 층간 박리가 일어나므로 외측과 내측의 Shell Model을 작성하고 이 Contact interface algorithm을 이용해 Mode II와 층간박리가 일어나도록 하였다.

CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK의 Tiebreak criteria는 다음과 같다.²⁴⁾

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFSL}\right)^2 \geq 1 \quad (3.5)$$

여기서 σ_n 은 Normal stress, σ_s 은 Shear stress , $NFLS$ 는 Normal failure stress, $SFSL$ 는 Shear failure stress이다. 이 Contact interface algorithm에서 요구하는 $NFLS$ 와 $SFSL$ 는 Resin의 물성치인 1.85GPa를 사용하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

본 연구에서는 Livermore Software Technology Co.의 범용 유한 해석프로그램인 LS-Dyna²⁵⁾를 사용하여 CFRP 부재에 관한 충격압력 실험을 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과, 모서리부의 찢어짐, 계면 간 박리 등이 일어나며 파괴가 진행되었고, 이것으로 2개의 Shell Model을 이용해 Mode I과 Mode II, 층간크랙을 구현하는 해석에 타당성이 있음을 확인하였다. 각 각도별 시험편의 Time Step별 변형 형상을 각각 Fig. 20, Fig. 22, Fig. 24, Fig. 26에 나타냈으며, Fig. 19, Fig. 21, Fig. 23, Fig. 25에는 각 각도별 시험편의 실험결과와 시뮬레이션 결과의 하중-변위 선도를 나타내었다. 각각의 Fig. 19, Fig. 21, Fig. 23, Fig. 25에 나타난 바와 같이 시뮬레이션 결과의 하중-변위 선도 경향은 실제 실험과 비슷하게 나타났다. 하지만 시뮬레이션의 하중-변위 선도가 실험의 하중-변위 선도보다 변동의 폭이 큰 것은 Damage model에서 설정한 TFAIL Parameter가 Time step에 기초해 Element를 삭제하는 것이 하중에 영향을 준 것이라고 사료된다.

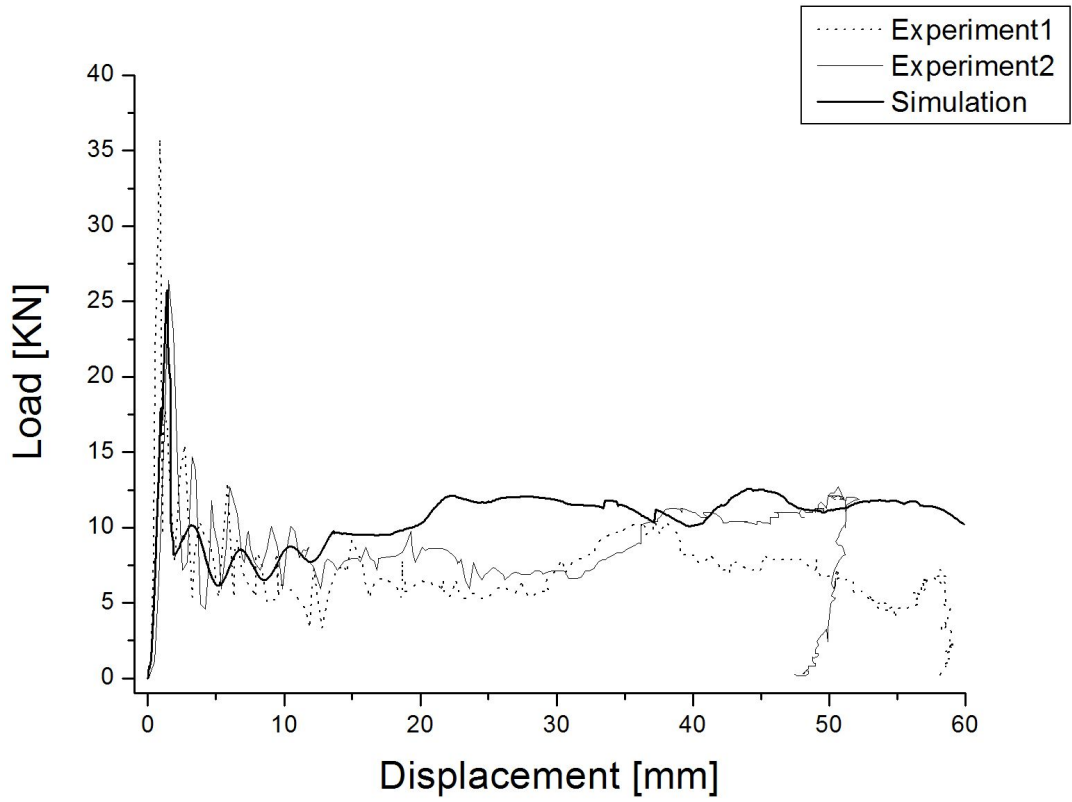


Fig. 19 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 15°member



Fig. 20 The Collapse Shape of 15°member in Simulation

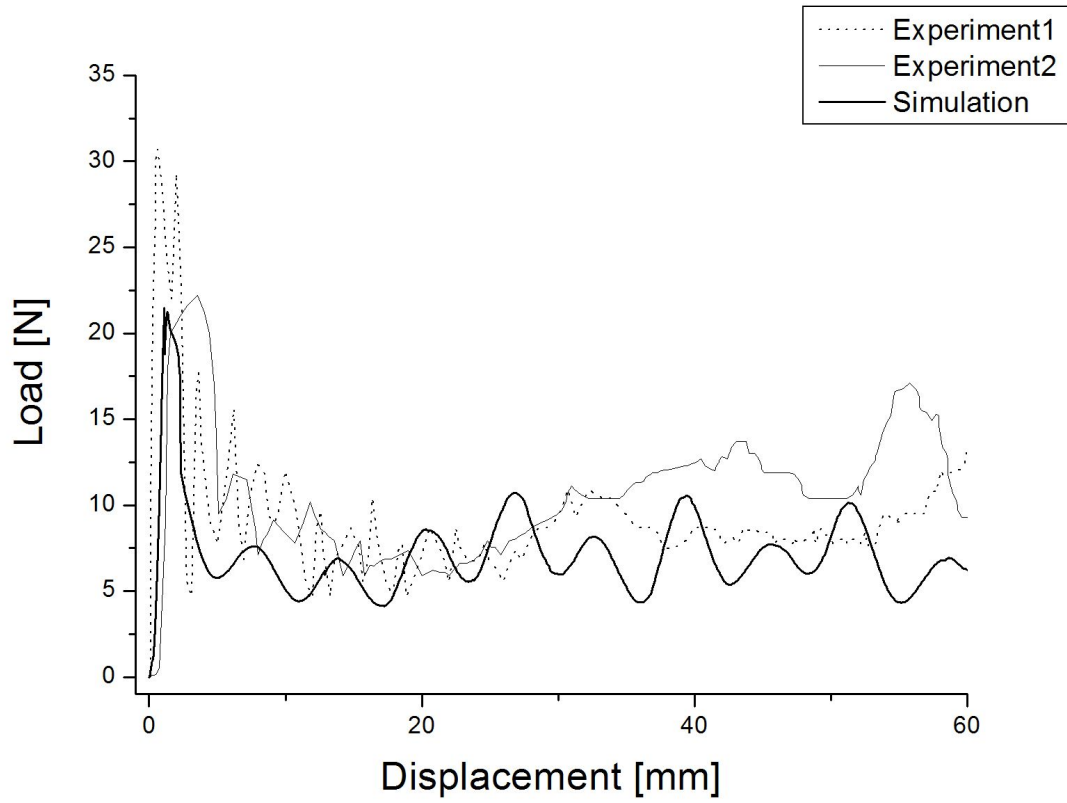


Fig. 21 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 45°member



Fig. 22 The Collapse Shape of 45°member in Simulation

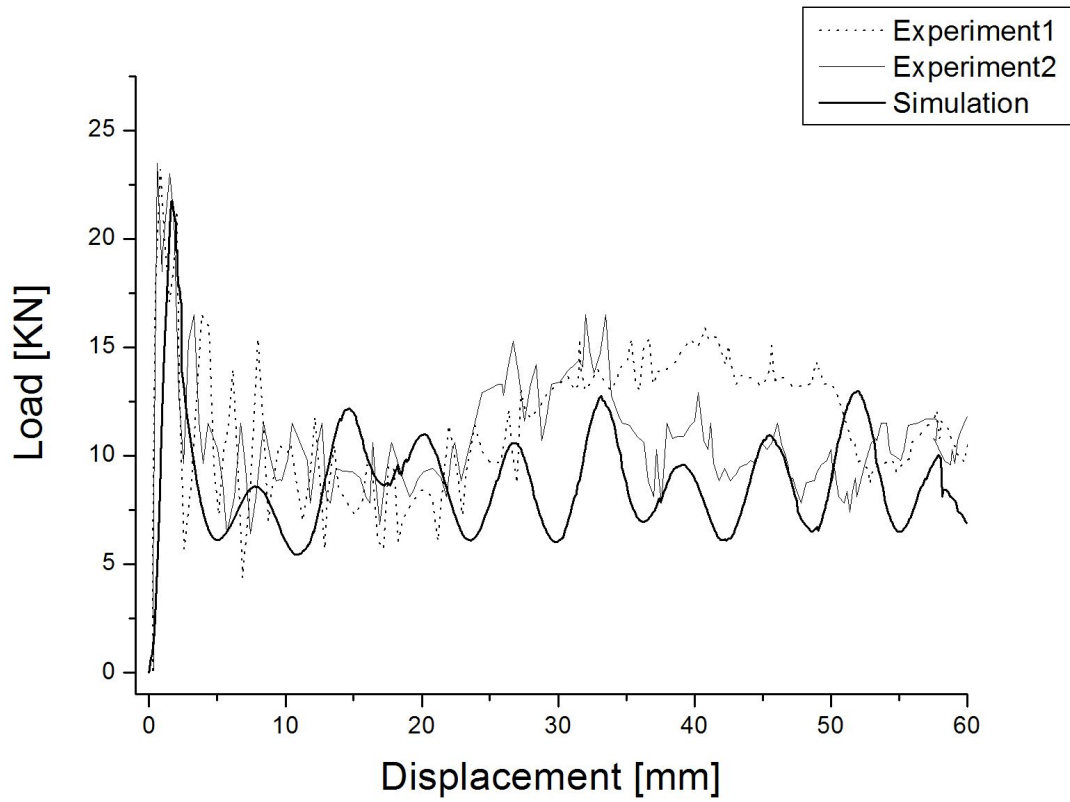


Fig. 23 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 90°member

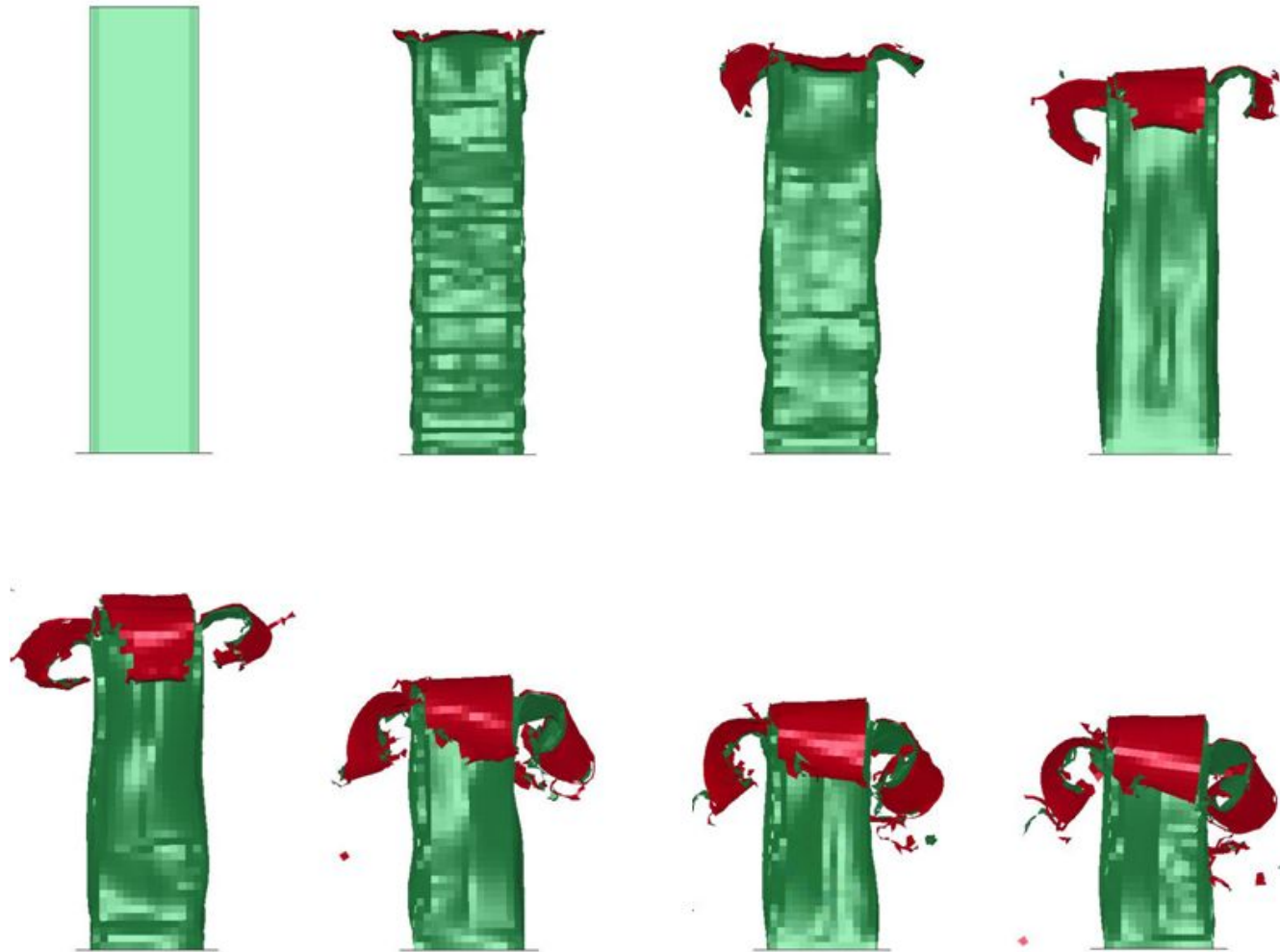


Fig. 24 The Collapse Shape of 90°member in Simulation

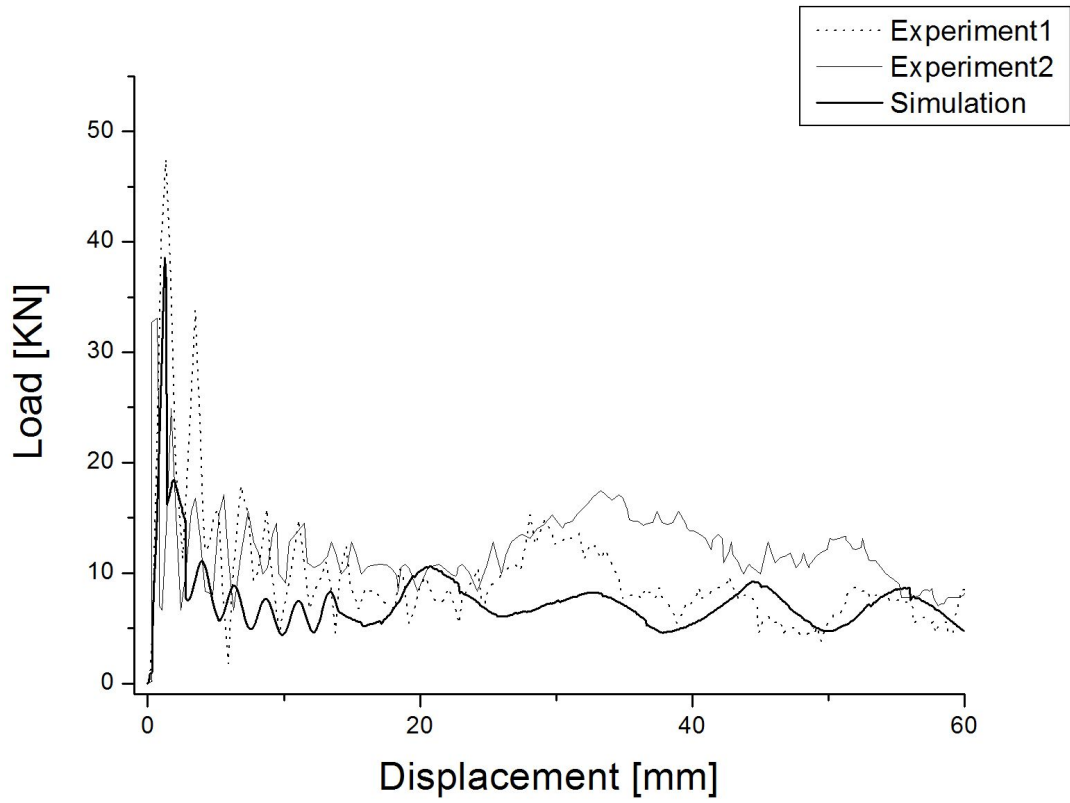


Fig. 25 The Load–displacement curve of Experiment and Simulation Result of 90°/0°member

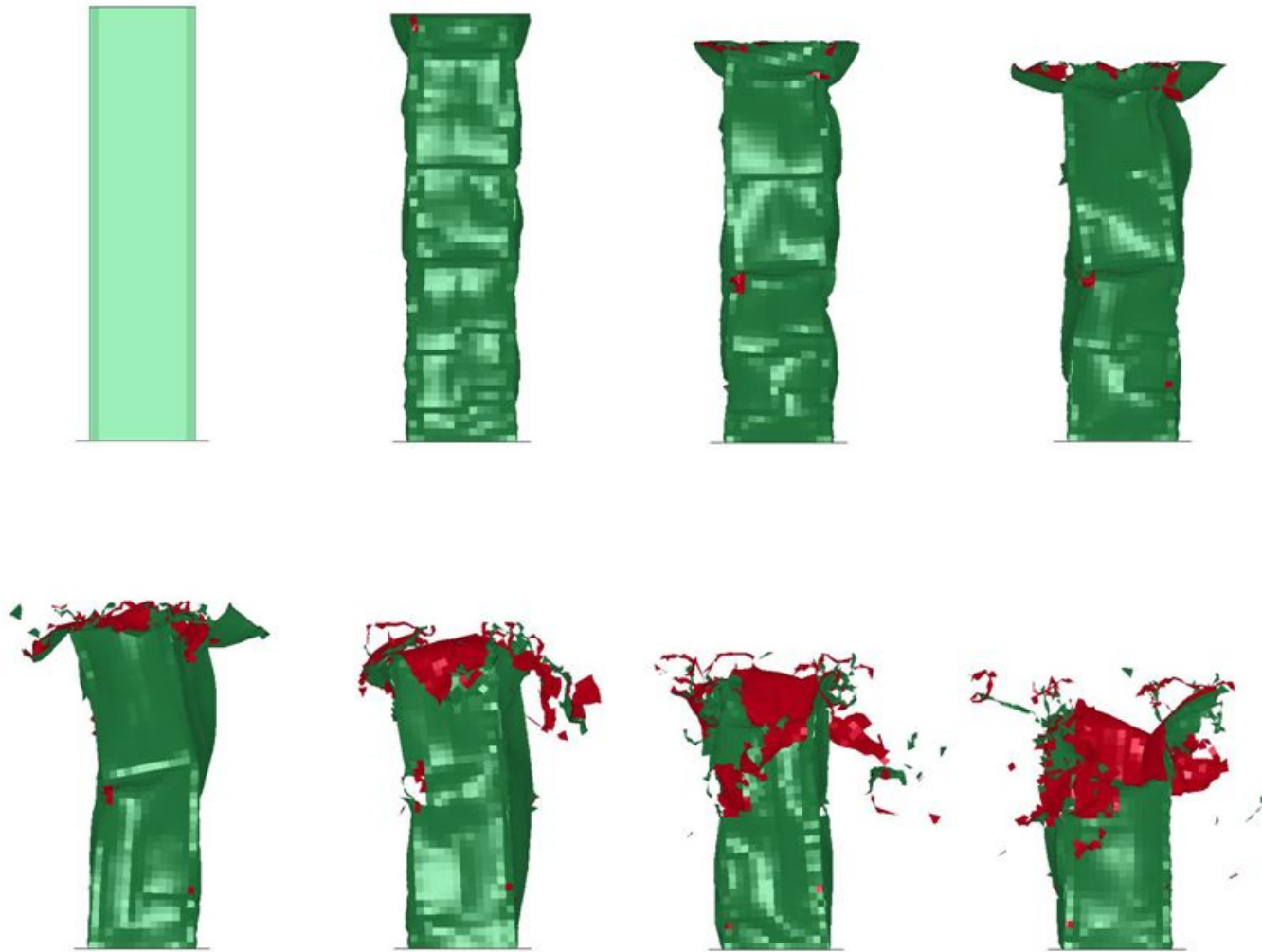


Fig. 26 The Collapse Shape of 90°/0°member in Simulation

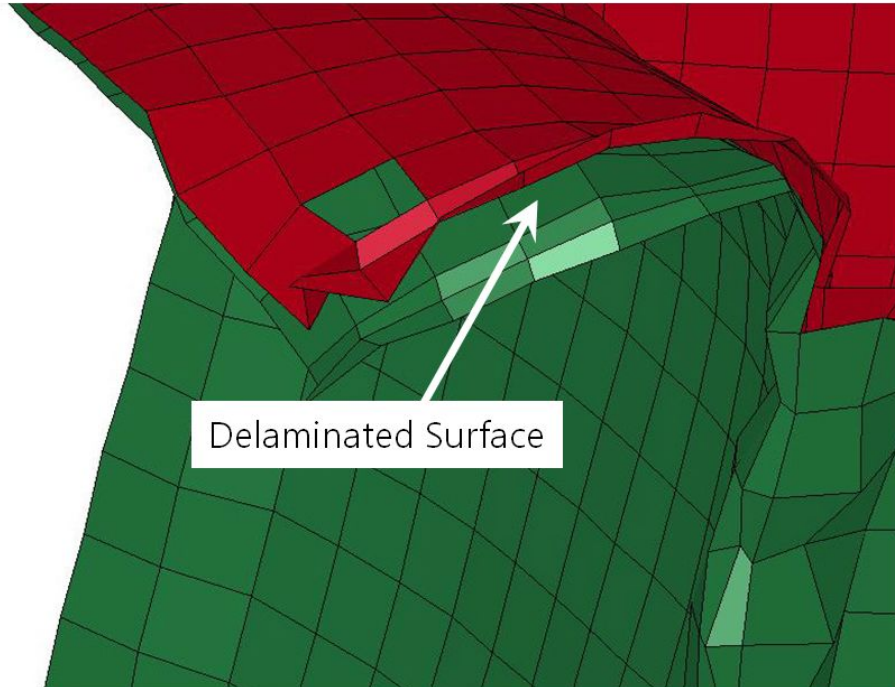


Fig. 27 Delaminated Surface during simulation of 45°member

Fig. 28은 실험결과와 시뮬레이션 결과의 흡수에너지를 비교한 것이다. 여기에 나타낸 흡수에너지는 식(2.1)에 의해 계산하였다.

가장 큰 오차를 보인 결과는 15°CFRP 부재로 실험의 결과가 423.79J이었고 시뮬레이션의 결과는 638.6J로 시뮬레이션의 결과가 약 33.63% 정도 높게 나왔다. 가장 작은 오차를 보인 결과는 90°/0°CFRP 부재로서 실험의 결과가 440.41J이었고 시뮬레이션의 결과는 446.96J로 시뮬레이션의 결과가 약 1.4% 정도 높게 나왔다. 나머지 45°CFRP 부재와 90°CFRP 부재는 각각 178.92J, 137.96J정도 낮은 결과를 보이며 각각 약 29.41%, 20.66%정도의 오차를 보였다.

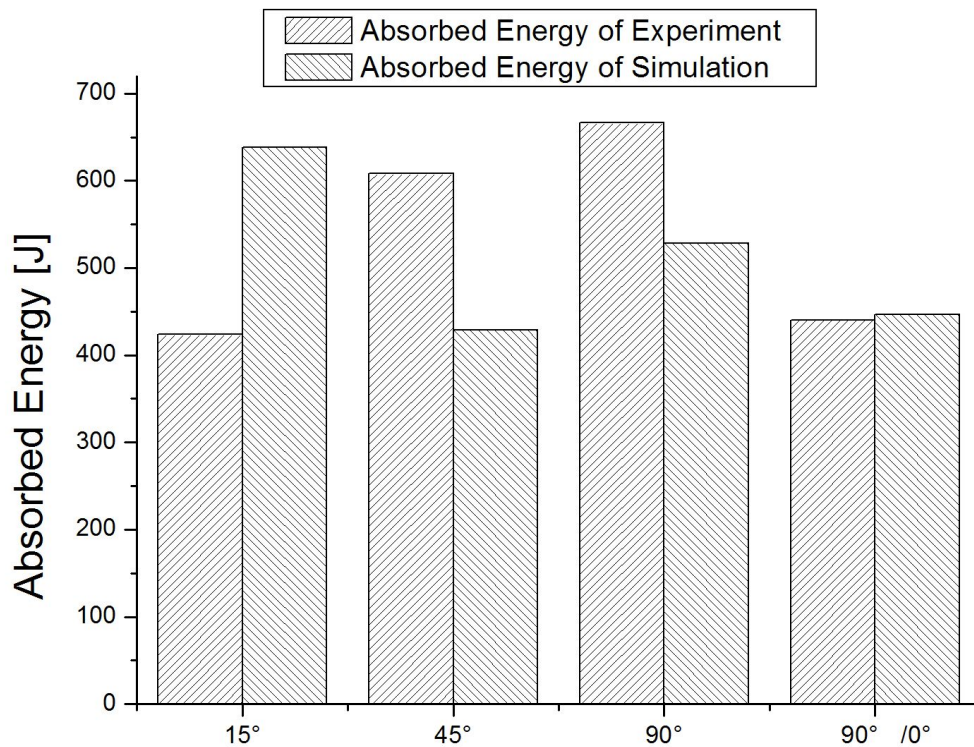


Fig. 28 Comparing the Absorbed Energy of The Experiment and Simulation

Fig. 29는 실험결과와 시뮬레이션 결과의 최대하중을 비교한 것이다. 모든 각도에서 시뮬레이션의 결과가 실험 결과보다 낮게 나왔다. 이 중 가장 큰 오차를 보인 결과는 45°CFRP 부재로 실험의 결과가 25.13KN이었고, 시뮬레이션의 결과는 21.46KN로 시뮬레이션의 결과가 약 14.61% 정도 낮게 나왔다. 가장 작은 오차를 보인 결과는 90°/0°CFRP 부재로 실험의 결과가 37.73KN이었고 시뮬레이션의 결과는 38.55KN으로 시뮬레이션의 결과가 약 2.1% 정도 높게 나왔다. 나머지 15°CFRP 부재와 90°CFRP 부재는 각각 4KN, 1.3KN정도 낮은 결과를 보이며 각각 약 13%, 5.6%정도의 오차를 보였다.

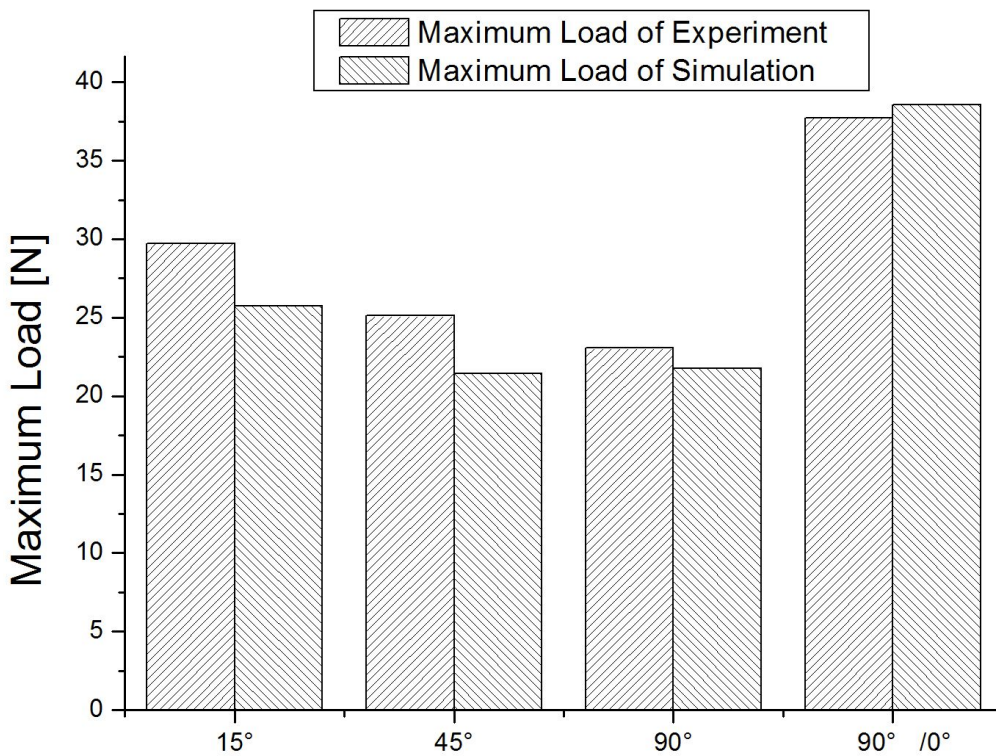


Fig. 29 Comparing the Maximum Load of The Experiment and Simulation

Fig. 30은 실험결과와 시뮬레이션 결과의 평균하중을 비교한 것이다. 여기서 구한 평균하중은 식(2.1)로 계산한 흡수에너지를 압레 길이 60mm로 나눈 값이다. 이 중 가장 큰 오차를 보인 결과는 15°CFRP 부재로 실험의 결과는 7.06KN이었으나 시뮬레이션의 결과는 10.63KN로 시뮬레이션의 결과가 약 33.63% 정도 높게 나왔다. 그리고 가장 작은 오차를 보인 결과는 90°/0°CFRP 부재로 실험의 결과는 7.34KN이었으나 시뮬레이션의 결과는 7.44KN으로 시뮬레이션의 결과가 약 1.46% 정도 높게 나왔다. 나머지 45°CFRP 부재와 90°CFRP 부재는 각각 2.982KN, 2.295KN정도 낮은 결과를 보이며 각각 29.41%, 20.66% 정도의 오차를 보였다.

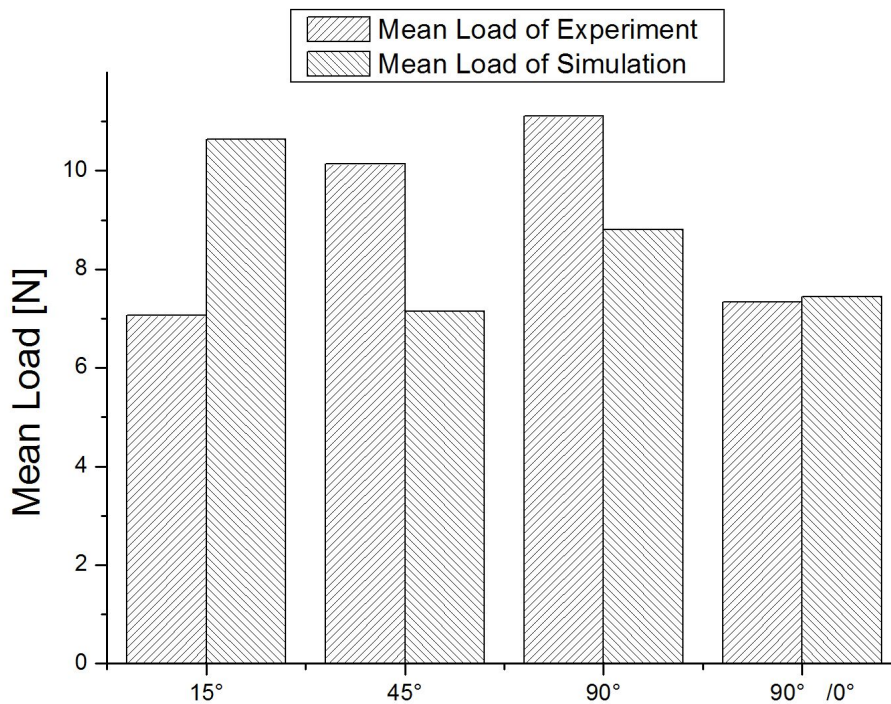


Fig. 30 The Comparing the Mean Load of The Experiment and Simulation

제 5 장 결 론

본 논문에서는 실험을 통해 CFRP 부재의 압축 하중과 변형 거동을 분석하고 이를 토대로 FE Model을 작성하여 시뮬레이션을 하였으며 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFRP 부재의 파괴는 라미나 굽힘, 섬유 파단, 기지 파괴, 등의 다양한 파괴의 상호작용으로 이루어지지만 대부분의 경우 중앙계면에서 가장 큰 박리가 일어나는 것을 확인할 수 있다.
2. 시뮬레이션 결과에서 모서리부의 찢어짐 계면간 박리 등이 일어나며 파괴가 진행되었고, 이것으로 2개의 Shell Model을 이용해 Mode I과 Mode II, 층간크랙을 구현하는 해석에 타당성이 있음을 확인했다.
3. 시뮬레이션 결과의 하중-변위 선도 경향은 실제 실험과 비슷하게 나타났다. 하지만 시뮬레이션의 하중-변위 선도가 실험의 하중-변위 선도보다 변동의 폭이 더 크게 나타났다. 이것은 본 연구에서 사용한 Damage model에서 설정된 TFAIL Parameter가 Time step에 기초해 Element를 삭제하는 것이 하중에 영향을 준 것이라고 사료된다.
4. 시뮬레이션과 실험결과를 비교한 결과 90°/0° CFRP 부재는 1.4~2.1% 정도의 오차를 보였고, 15°CFRP부재는 14~33% 정도의 오차를 나타냈다. 나머지 45°, 90°CFRP 부재는 흡수에너지와 평균하중에서 20~30% 정도의 오차를 보였으며 최대하중에서는 5.6~13% 정도의 오차를 보였다.

참 고 문 헌

1. Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, 2007
2. Xinran Xiao. "Axial crush simulation of braided carbon tubes using MAT58 in LS-DYNA." *Thin-Walled Structures* 47 p740-749, 2009
3. L. Greve. "Experimental testing and phenomenological modelling of the fragmentation process of braided carbon/epoxy composite tubes under axial and oblique impact." *Composites Part B: Engineering* Vol. 39, p1221-1232, 2008
4. Farley, G.L. and Jones, R.M. "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes." *Journal of Composite Materials* Vol 26 No.1 p37-50, 1992
5. 민한기. "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 프레임 구조 차량의 동적거동에 관한 연구." 조선대학교 박사논문, 2003
6. 차천석. "박육단면 차체구조부재의 충격압괴 특성평가." 조선대학교 박사논문, 2000
7. 이길성. "충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가." 조선대학교 박사논문, 2008
8. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP복합재 박육부재의 축 압괴특성." 조선대학교 박사논문, 2002
9. 김정호. "경량화용 차체 구조부재의 충격 압괴특성에 관한 연구." 조선대학교 박사논문, 1996

10. Haipeng Han. "A numerical study on the axial crushing response of hybrid pultruded and ± 45 braided tubes." *Composite Structures* 80 p253-264, 2007
11. Hamidreza Zarei. "An experimental and numerical crash worthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes." *Composite Structures* 85 p245-257, 2008
12. Jiancheng Huang. "Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes." *Composite Structures* 91 p222-228, 2009
13. Carla J. McGregor. "Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression." *Composites: Part A* 38 p2247-2259, 2007
14. Xinran Xiao. "Evaluation of a composite damage constitutive model for PP composites." *Composite Structures* 79 p163-173, 2007
15. Xinran Xiao. "Progress in braided composite tube crush simulation." *International Journal of Impact Engineering* 36 p711-719, 2009
16. Xinran Xiao. "Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations." *Computational Materials Science* XXX pXXX-XXX
17. A.G. Mamalis. "Axial collapse of hybrid square sandwich composite tubular components with corrugated core: numerical modelling." *Composite Structures* 58 p571-582, 2002
18. Carla McGregor. "Finite Element Modelling of the Progressive Crushing of Braided Composite Tubes under Axial Impact." *International Journal of Impact Engineering* xxx p1-11, 2009
19. Siemens PLM Software, California, USA, NX4
20. Siemens PLM Software, California, USA, FEMAP 10.01

- 21.Engineering Technology Associates(ETA), Inc., Miami, USA, VPG 3.1.1
- 22.Livermore Software Technology Corporation, California, USA,
LS-PrePost 2.1
- 23.LS-DYNA3D THEORY MANUAL, LSTC, Livermore, California, 1998
- 24.LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL, LSTC, Livermore, California,
1998
- 25.Livermore Software Technology Corporation, California, USA, LS-DYNA
971
- 26.A.G. Mamalis. "The static and dynamic axial collapse of CFRP square
tubes : Finite element modelling." *Composite Structures* 74 p213-225,
2006
- 27.A.G. Mamalis. "Axial collapse of hybrid square sandwich composite
tubular components with corrugated core: numerical modelling."
Composite Structures 58 p571-582, 2002
- 28.A.M. Elmarakbi. "Finite element simulation of delamination growth in
composite materials using LS-DYNA." *Composites Science and
Technology* Volume 69 p2383-2391 , 2009
- 29.김지훈. "J적분을 이용한 CFRP적층판의 동적파괴인성 평가." 조선대학교 박
사논문, 2001
- 30.최영민. "경량화용 자동차 전면부 사이드부재의 충돌안전성 평가." 조선대학
교 석사논문, 2007
- 31.Xinran Xiao. "Virtual testing of sandwich core structures using dynamic
finite element simulations." *Computational Materials Science* XXX pXXX-
XXX
- 32.Simon Chan. "Ballistic limit prediction using a numerical model with
progressive damage capability." *Composite Structures* 77 p466-474, 2007
- 33.Tomonori Kaneko. "Finite element method failure analysis of a

pressurized FRP cylinder under transverse impact loading."Thin-Walled Structures 46 p898-904, 2008

34.S. Ryan. "Numerical simulation of hypervelocity impact on CFRP/Al HC SP spacecraft structures causing penetration and fragment ejection." International Journal of Impact Engineering 33 p703-712, 2006

35.M. Yong. "On the application of genetic algorithms for optimising composites against impact loading." International Journal of Impact Engineering Vol. 35, p1293-1302, 2008

