

2013년 8월
석사학위논문

적층구성이 다른 경량화용 CFRP
적층부재의 동적특성

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

여 인 구

적층구성이 다른 경량화용 CFRP

적층부재의 동적특성

Dynamic Characteristics of CFRP Laminated member
for Lightweight with respect to Stacking Sequences

2013 년 8 월 23 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

여 인 구

적층구성이 다른 경량화용 CFRP
적층부재의 동적특성

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2013 년 8 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

여 인 구

여인구의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 경 석 ①인
위 원 조선대학교 부교수 김 지 훈 ①인
위 원 조선대학교 교수 양 인 영 ①인

2013 년 8 월 23 일

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	VIII
ABSTRACT	XIII
제 1 장 서 론	1
1-1 연구배경	1
1-2 연구목적 및 방법	4
제 2 장 시험편 및 실험방법	6
2-1 시험편	6
2-2 실험장치	11
2-3 압괴실험	15
제 3 장 CFRP 원형부재의 충격특성	17
3-1 계면수 변화에 따른 압괴	17
3-2 적층각 변화에 따른 압괴	36

제 4 장	CFRP 사각부재의 충격특성	46
4-1	계면수 변화에 따른 압괴	46
4-2	적층각 변화에 따른 압괴	65
제 5 장	실험 결과 및 고찰	75
5-1	압괴모드	75
5-2	에너지 흡수 특성	80
5-3	충격 특성	90
제 6 장	결론	95

참 고 문 헌

LIST OF TABLES

Table 1	Characteristics and use of Polyurethane foam and CFRP	8
Table 2	Material properties of the CFRP prepreg sheet(CU125NS)	9
Table 3	Collapse test results for circular members according to fiber orientation angles and impact velocity	83
Table 4	Collapse test results for Square members according to fiber orientation angles and impact velocity	84
Table 5	Collapse test results for Circular members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 0°)	85
Table 6	Collapse test results for Circular members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 90°)	86
Table 7	Collapse test results for Square members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 0°)	87
Table 8	Collapse test results for Square members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 90°)	88

LIST OF FIGURES

Fig. 1 The goal of automobile technology development	4
Fig. 2 Configuration of Specimens	7
Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen	10
Fig. 4 Impact testing setup for crushing	13
Fig. 5 Diagram of measurement system	14
Fig. 6 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 2)	18
Fig. 7 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 2)	19
Fig. 8 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 2)	20
Fig. 9 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 4)	21
Fig. 10 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 4)	22
Fig. 11 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 4)	23
Fig. 12 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 6)	24
Fig. 13 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 6)	25
Fig. 14 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 6)	26
Fig. 15 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J, Interface number 2)	27

Fig. 16 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 2)	28
Fig. 17 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 419.440J, Interface number 2)	29
Fig. 18 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J, Interface number 4)	30
Fig. 19 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 4)	31
Fig. 20 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J, Interface number 4)	32
Fig. 21 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J, Interface number 6)	33
Fig. 22 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 6)	34
Fig. 23 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J, Interface number 6)	35
Fig. 24 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [–15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)	37
Fig. 25 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [–15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 529.20J)	38
Fig. 26 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [–15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)	39
Fig. 27 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [–45/+45] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)	40
Fig. 28 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [–45/+45] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)	41
Fig. 29 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [–45/+45] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)	42
Fig. 30 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [90] ₈	

	(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)	43
Fig. 31	Load–displacement curve of CFRP Circular member, [90] ₈	
	(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)	44
Fig. 32	Load–displacement curve of CFRP Circular member, [90] ₈	
	(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)	45
Fig. 33	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J, Interface number 2)	47
Fig. 34	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J, Interface number 2)	48
Fig. 35	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J, Interface number 2)	49
Fig. 36	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J, Interface number 4)	50
Fig. 37	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J, Interface number 4)	51
Fig. 38	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J, Interface number 4)	52
Fig. 39	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J, Interface number 6)	53
Fig. 40	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J, Interface number 6)	54
Fig. 41	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J, Interface number 6)	55
Fig. 42	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J, Interface number 2)	56
Fig. 43	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J, Interface number 2)	57
Fig. 44	Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J, Interface number 2)	58

Fig. 45 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J, Interface number 4)	59
Fig. 46 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J, Interface number 4)	60
Fig. 47 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J, Interface number 4)	61
Fig. 48 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J, Interface number 6)	62
Fig. 49 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J, Interface number 6)	63
Fig. 50 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J, Interface number 6)	64
Fig. 51 Load–displacement curve of CFRP Square member, [–15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)	66
Fig. 52 Load–displacement curve of CFRP Square member, [–15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)	67
Fig. 53 Load–displacement curve of CFRP Square member, [–15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)	68
Fig. 54 Load–displacement curve of CFRP Square member, [–45/+45] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)	69
Fig. 55 Load–displacement curve of CFRP Square member, [–45/+45] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)	70

Fig. 56 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[-45/+45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)	71
Fig. 57 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)	72
Fig. 58 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)	73
Fig. 59 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)	74
Fig. 60 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity	83
Fig. 61 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity	84
Fig. 62 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity (Outer 0°)	85
Fig. 63 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity (Outer 90°)	86
Fig. 64 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity (Outer 0°)	87
Fig. 65 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity (Outer 90°)	88
Fig. 66 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact	

	velocity	89
Fig. 67	Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity	89
Fig. 68	Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity	92
Fig. 69	Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity	92
Fig. 70	Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity (outer angle 0°)	93
Fig. 71	Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity (outer angle 90°)	93
Fig. 72	Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity (outer angle 0°)	94
Fig. 73	Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity (outer angle 90°)	94

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave	10
Photo. 2 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 2)	18
Photo. 3 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 2)	19
Photo. 4 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 2)	20
Photo. 5 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 4)	21
Photo. 6 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 4)	22
Photo. 7 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 4)	23
Photo. 8 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 6)	24
Photo. 9 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 6)	25
Photo. 10 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 6)	26
Photo. 11 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J, Interface number 2)	27
Photo. 12 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 2)	28
Photo. 13 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J, Interface number 2)	29

Photo. 14	Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J, Interface number 4)	30
Photo. 15	Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 4)	31
Photo. 16	Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J, Interface number 4)	32
Photo. 17	Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 611.52J, Interface number 6)	33
Photo. 18	Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 6)	34
Photo. 19	Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 419.44J, Interface number 6)	35
Photo. 20	Shape of Collapse CFRP Circular member, [-15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J) ..	37
Photo. 21	Shape of Collapse CFRP Circular member, [-15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 529.20J) ..	38
Photo. 22	Shape of Collapse CFRP Circular member, [-15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J) ..	39
Photo. 23	Shape of Collapse CFRP Circular member, [-45/+45] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J) ..	40
Photo. 24	Shape of Collapse CFRP Circular member, [-45/+45] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 529.20J) ..	41
Photo. 25	Shape of Collapse CFRP Circular member, [-45/+45] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J) ..	42
Photo. 26	Shape of Collapse CFRP Circular member, [90] ₈ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J) ..	43
Photo. 27	Shape of Collapse CFRP Circular member, [90] ₈ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 529.20J) ..	44

Photo. 28	Shape of Collapse CFRP Circular member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J) ..	45
Photo. 29	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J, Interface number 2)	47
Photo. 30	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J Interface number 2)	48
Photo. 31	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J, Interface number 2)	49
Photo. 32	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J, Interface number 4)	50
Photo. 33	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J, Interface number 4)	51
Photo. 34	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J, Interface number 4)	52
Photo. 35	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 372.4J, Interface number 6)	53
Photo. 36	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 274.4J, Interface number 6)	54
Photo. 37	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0° (Impact Energy 223.44J, Interface number 6)	55
Photo. 38	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J, Interface number 2)	56
Photo. 39	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J, Interface number 2)	57
Photo. 40	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J, Interface number 2)	58
Photo. 41	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J, Interface number 4)	59

Photo. 42	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J, Interface number 4)	60
Photo. 43	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J, Interface number 4)	61
Photo. 44	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 372.4J, Interface number 6)	62
Photo. 45	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 274.4J, Interface number 6)	63
Photo. 46	Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90° (Impact Energy 223.44J, Interface number 6)	64
Photo. 47	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J) ...	66
Photo. 48	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J) ...	67
Photo. 49	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J) ·	68
Photo. 50	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J) ...	69
Photo. 51	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J) ...	70
Photo. 52	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J) ·	71
Photo. 53	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J) ...	72
Photo. 54	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J) ...	73
Photo. 55	Load–displacement curve of CFRP Square member, [-15/+15] ₄ (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J) ·	74

Photo.	56	Typical collapse modes of CFRP circular members according to interface number (Outer layer 0°)	77
Photo.	57	Typical collapse modes of CFRP circular members according to interface number (Outer layer 90°)	77
Photo.	58	Typical collapse modes of CFRP Square members according to interface number (Outer layer 0°)	78
Photo.	59	Typical collapse modes of CFRP Square members according to interface number (Outer layer 90°)	78
Photo.	60	Typical collapse modes of CFRP circular members according to fiber orientation angles	79
Photo.	61	Typical collapse modes of CFRP Square members according to fiber orientation angles	79

ABSTRACT

Dynamic Characteristics of CFRP Laminated member for Lightweight with respect to Stacking Sequences

Yeo, In-goo

Advisor : Prof. Yang, In-Young, Ph. D.
Dept. of Mechanical Design Engineering
Graduate School of Chosun University

Traffic accidents from automobile collision are mostly occurred in frontal and slant angle than side or rear collision. Therefore, safety performance of frontal collision is one of the biggest concerns. To reflect this demand, many studies on light-weighted vehicle have been conducted to improve not only fuel mileage and environment-friendliness but also passenger safety during structural design.

Therefore, crushing behavior and energy absorption characteristics of side member, which shows larger energy absorption and is in simple shape, should be precisely understood before predicting frontal collision behavior in design phase.

However, various features and safety requirements induced the attachment of many components and added the weight into vehicle. Design of car body should consider not only safety but also weight reduction.

Therefore, CFRP structural member, which has superior specific

strength and rigidity, and can have optimized characteristics according to stacking angle, is adopted for vertical collision test to study collision and crushing characteristics. Scale of impact energy is automatically adjusted by the falling of specially designed cross head. From the mass of cross head and falling speed, impact energy can be calculated.

Especially, influences of stacking configuration, shape of CFRP structural member shape (circular, rectangular), interface number, and stacking angle are quantitatively evaluated in terms of energy absorption and magnitude of collision speed.

Following the above study, conclusion are drawn as below;

1. CFRP structural member is considered to be adopted as side member of automobile, and change of cross-sectional shape, number of stacking interface, and angle of the outermost layer are evaluated in terms of impact resistance of CFRP. After test and results analysis, design data for side member with light weight can be acquired.
2. Vertical impact testing equipment with air cylinder is used to conduct three steps of impact speeds for the quantitative evaluation of impact characteristics along with different impact energies. Magnitude of impact speed is determined according to impact absorption characteristics of circular and rectangular CFRP member.
3. Impact characteristics of CFRP member are evaluated according to interface numbers, different shapes, and different impacts applied. Especially, absorption energy and dynamic properties are quantitatively evaluated in terms of changes in shape, interface numbers and fiber orientation angles. These results can be applicable to design and

development of transportation vehicle with light weight structural member.

5. Increase of impact energy is transferred to higher impact stress (linear increase). Especially, rectangular CFRP member has the higher slope than the circular one. Higher stacking angle is translated as higher stress. From this, rectangular CFRP member is more sensitive to impact than the circular one.
6. For both of rectangular and circular CFRP member, impact stress is linearly increased with the magnitude of impact energy, which is related to static crushing stress and change of impact energy. Rectangular CFRP shows higher slope for less interface number, but circular CFRP member is the opposite (higher slope for higher interface number).

제 1 장 서 론

1-1 연구배경

운송수단의 다변화와 복잡성에 기인하여 매년 충돌사고로 인한 사회적 손실은 경제적인 손실과 함께 많은 사람들의 생명에도 영향을 끼친다. 충돌사고는 자동차를 비롯하여 거의 모든 종류의 수송기계에서 다양하게 발생하고 있다. 이러한 수송기계의 충돌해석에 관한 연구는 안전에 대한 관심이 높아짐에 따라 대두되기 시작하여 열차, 항공기 및 자동차 등 모든 분야에서 활발하게 진행되고 있다.

자동차에 적용되는 핵심기술의 개발은 차량의 고안전도 및 편의성 향상기술과 사회적인 측면에서 새로운 해결과제로 부각되고 있는 환경보호를 위한 차량 기술로 집약될 수 있다.

고안전도의 측면에서 자동차의 정보화 시장조사에 의하면 자동차 구매 시의 중요 포인트로써 안전성능은 연비와 유지비, 환경에 대한 배려보다 높은 순위로 선정되었다. 이는 세계적으로 교통사고에 의한 사망자수가 매년 50만 명에 이르고 있으며 향후 노령 인구의 증가와 자동차의 지속적인 증가 등의 원인으로 2010년에는 100만 명에 육박할 것으로 예측됨에 따라 소비자들이 자신의 안전에 대하여 높은 관심을 가지고 있음을 나타낸다.¹⁾

일반적으로 차체는 차량을 구성하는 구조부재나 페널류로써 엔진이나 현가장치 등 주행 시 필요한 계기류, 시트 등이 탑재되어 차량으로 구성된다. 차체 앞부분은 엔진이나 현가장치를 지지하고 여러 보조기기류를 격납하는 역할도 하지만, 충돌사고 시 전면부 골격부재는 소성 변형하여 충돌에너지를 흡수하며, 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 앞부분으로부터 전달된 하중을 흡수, 분산을 통하여 차실의 변형이 적게 되도록 설계된다. 특히 차량의 초기설계 단계에서는 차량 전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 충돌 시 에너지 흡수량이 크고, 간단한

구조부재에 대한 압력거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

또한, 환경 보호적 측면에서 심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있는 실정이며 우리나라에서도 저공해 자동차 배기 규제를 더욱 강화하고 있다. 이러한 환경 보호 관련 자동차 기술개발의 동향은 무공해자동차, 전기자동차에 대한 연구와 함께 기존 자동차의 연비향상 뿐 아니라 차체 수명연장, 배기가스의 정화, 소음방지, 그리고 자원재활용을 위한 리사이클링 등을 위한 폭넓은 연구개발 투자가 이루어지고 있으며, 이를 위한 방법으로 엔진효율향상, 공기저항감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 소재의 경량화 등을 들 수 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로인해 연비향상을 도모할 수 있어서 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다.²⁻⁴⁾

차체구조의 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 유한 요소 해석을 수행하고 있으며,⁵⁻⁹⁾ 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.¹⁰⁻³⁰⁾ 따라서 이러한 경량화용 구조부재의 충돌안전성능 평가에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

자동차의 설계개발이란 승차감, 조정 안정성, 정숙성, 쾌적성 등 상품으로써의 요건을 만족하면서 법규로 정해진 규격에 적합하도록 종합성능을 실현하는데 있다. 이러한 성능 중 충돌 시에 승객을 보호하는 능력을 충돌안전성능이라 하는데 충돌 조건, 차량구조, 승객구속장치 등의 요건으로 결정된다. 특히, 자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 70% 정도로써 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다.³¹⁻³⁷⁾

따라서 자동차의 설계는 안전성이 확보된 상태에서 차량의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다. Fig. 1은 자동차 기술개발의 목표를 나타내고 있다.

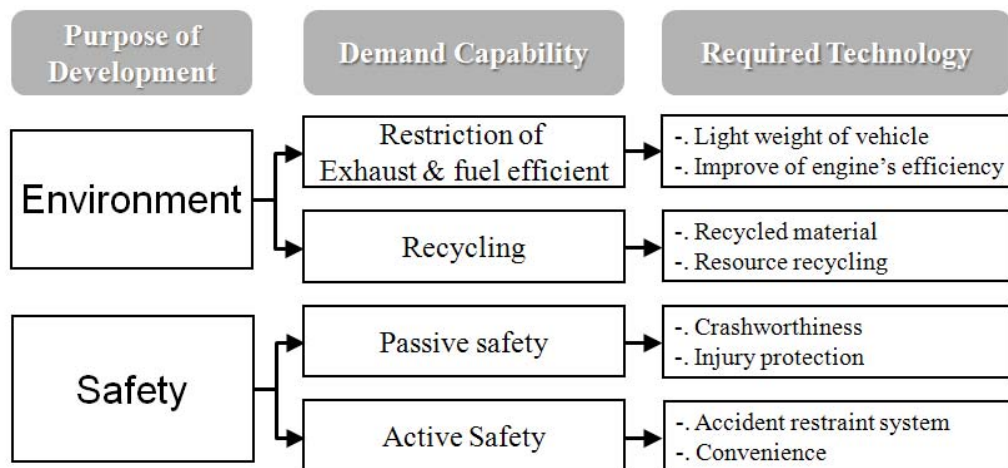


Fig. 1 The goal of automobile technology development

1-2 연구목적 및 방법

차체의 강도부재로 사용되고 있는 구조부재의 압축특성에 대한 연구는 충돌안전성의 측면과 경량화 측면에서 여러 가지 재질과 다양한 형상에 대해서 행해지고 있다.

자동차 충돌 시 외부로부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 안전 보호 공간의 확보를 위한 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 최종적으로 최대 가속도 크기를 최소화시킬 수 있는 안정된 축 방향 접힘 좌굴 모드를 유도하려는 설계의 개념이 차체 구조부재 설계에 이용되고 있다. 이러한 역할을 하는 것이 프런트 사이드 멤버로 정면충돌 시 충돌에너지의 50~70%를 흡수하며 박판 사각 및 원형 빔 형상을 가지고 있다. 특히, 프런트 사이드 멤버는 소성변형으로 대부분의 에너지를 흡수하게 되며 굽힘에 의한 변형보다 압축에 의한 변형으로 많은 에너지를 흡수한다. 최근에는 알루미늄, 플라스틱 등 경량화 재료를 이용한 설계가 연구의 초점이 되고 있다. 이러한 신소재를 사용하여 차체구조를 설계하면 경량화 이외에도 차량의 수동 안전도 향상, 소음 저감, 부식 방지, 내구성 증가 등 부수적으로 많은 장점을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 안전성능 및 연비 개선을 위한 경량화에 대한 방안으로 비강도 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유 강화 복합재료(Carbon fiber reinforced plastics; 이하 CFRP라 한다)를 이용하여 CFRP 원형부재 및 사각형 부재를 제작한 후 적층각도의 변화, 최외층각 변화, 계면수 변화에 따른 압축특성 및 에너지흡수특성을 고찰함으로써 최적의 구조부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계데이터를 얻고자 한다.

연구방법으로는 먼저, 프리프레그 시트(Prepreg sheet)를 금형위에 적절히 적층한 후 Autoclave 내에서 압력과 열을 가하여 경화시키는 기술인 Autoclave 성형법을 이용하여 CFRP 원형 부재와 사각부재에 각도, 최외층각, 계면수 변화 및 충격속도 변화에 따른 압축특성을 고찰 하였다. 또한 각 계면 및 최외층각 변화에 따른 정적에 대한 동적 특성을 고찰 하였다.

특히, CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이므로 적층구성의 변화에 따른 CFRP원형 및 사각형 부재의 에너지흡수 능력을 해석하고, 압궤하중과 변형모드의 고찰을 통해 최적의 충격 흡수용 경량화 차체부재의 안전성능을 평가하여 차체구조부재의 설계에 이용될 수 있는 기본적인 설계 자료를 얻고자 한다.

제 2 장 시험편 및 실험방법

2-1 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료인 CFRP를 이용하여 차량용 사이드멤버의 형상인 CFRP 원형 및 사각형 부재를 제작하여 시험편으로 사용하였으며, CFRP의 일반적인 특성 및 용도를 Table 1에 나타냈다.

CFRP 원형 및 사각형 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다.

CFRP 원형부재 및 사각형 부재는 알루미늄 부재에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하여 제작한 후 알루미늄 파이프를 제거하여 제작하였다. 적층구성의 변화와 충격속도 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압괴 모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 또한, 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압괴특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0° 로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$ 의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ 는 15° , 45° , 90° , 로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 계면수를 2, 4 및 6계면에 맞추어 적층하여 제작하였다. 제작된 CFRP 원형부재 및 사각형 부재의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 또한 최외층 적층각을 0° 와 90° 로 변화 시켜 시험편을 제작 하였다.

CFRP의 가장 취약한 특성은 취성문제이며, 압괴초기에 최대하중 이후 급격한 파괴로 인한 층내 및 층간 등의 크랙 성장으로 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 일반적으로 한쪽 끝단에 Initiator 또는 고의의 결함을 주어 순차적이고 국부적인 압괴를 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 하는데, 본 연구에서는 시험편의 하중이 작용하는 끝단을 45° 로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다.

시험편의 성형은 Photo. 1과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C , 경화시간을 90

분으로 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. 3는 시험편 제작 시 성형 사이클을 나타냈다. 시험편 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압축이 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

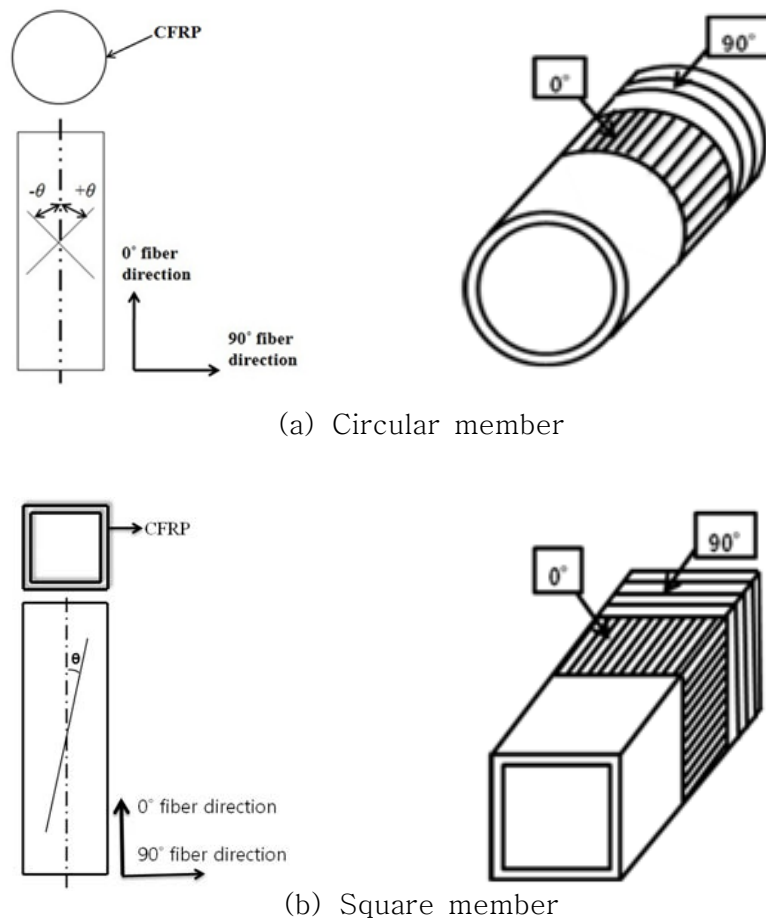


Fig. 2 Configuration of Specimens

Table 1 Characteristics and use of Polyurethane foam and CFRP

분 류	특 성	사 용 범 위
CFRP	비강성 비탄성	항공기(1차, 2차부재), 우주기기(태양열발전 설비), 미사일, 로켓, 인공위성, 자동차, 고속차량, 경주용차, 오토바이, 보트, 자전거, 섬유기계, 스포츠용품, 낚싯대, 등산용구, 카메라, 원심분리기, 플라이휠, 그라인더 휠, 타이어, 벨트, 회전 프로펠러, 제지기 로울러 등
	비강성 감쇠성	오디오 기기, 악기, 공작기계, 진동 컨베어 스프링, 자동차(drive shaft, leaf spring) 등
	강성 비크리프성	FRP배, 탱크, 저장고(싸이로) 등
	강성 비열팽창	우주기기 안테나, 밀리파 안테나, 마이크로메타, 타이밍 벨트, 저온 탱크, 제도기기 등
	x선 투과성 강도, 강성	X선 카세트, X 선의료기기 등
	전기전도성 발열	약품 탱크, 대전방지 로울러, 정전도장 벽지류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패키징, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로켓트 노즐, 항공기 엔진 등

Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet(CU125NS)

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]



Photo. 1 Autoclave

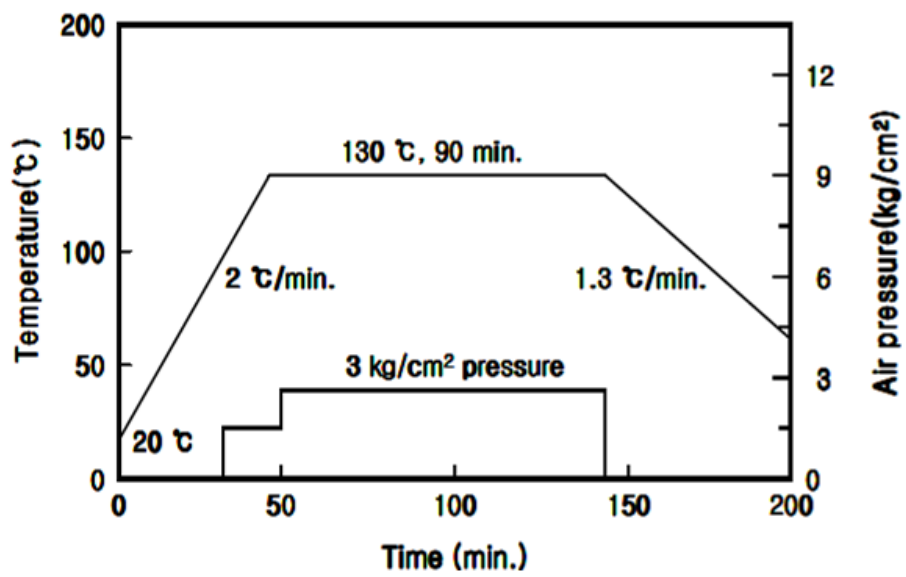


Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen

2-2 실험장치

충격압력실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험 장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 일반 강판으로 제작된 크로스헤드 위치 컨트롤러는 충격시험기의 사이트에 고정되어 공기압을 통해 크로스헤드의 높이를 제어함으로써 자동으로 일정한 위치에너지를 가지게 하는 장치이다. 작동은 스위치를 통하여 공기압을 주입하거나 쉼 때 자동으로 제어되기 때문에 최소한의 오차손실을 줄이기 위함이다. 충격시험기의 개략도를 Fig. 4에 나타냈으며, Fig. 5는 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 편심되어 충격이 가해지는 것을 방지하였으며, 재현성 있는 충격압력실험을 할 수 있도록 하였다. 또한, 로드셀은 2개의 원판을 원주로 연결한 형태로서 연강환봉을 절삭하여 제작 하였으며, 위쪽 원판 위에 시험편을 위치시키고, 아래쪽 원판에 3개의 볼트구멍을 만들어 베이스 플레이트에 고정하였다. 시험편에 작용하는 충격하중의 계산은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 스트레인게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 중심축을 중심으로 각각 축 방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여 굽힘과 비틀림의 영향을 제거하여 구하였으며, 스트레인게이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다. 충돌 시에 나타나는 스트레인게이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스(bridge circuits)와 동적변형증폭기(dynamic strainamplifier)를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO(digital storage oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다.

시험편의 압력 시간변화 즉, 변위의 측정은 압력이 진행하고 있는 사이 시험편의 변위량과 크로스헤드의 이동량이 일치한다고 보고 크로스헤드에 부착된 표적의 움

직입을 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 달리할 수 있다. 여기서는 초점거리가 1080mm이며 최대 100mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다. 충격 속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 레이저를 이용하여 측정하였다.

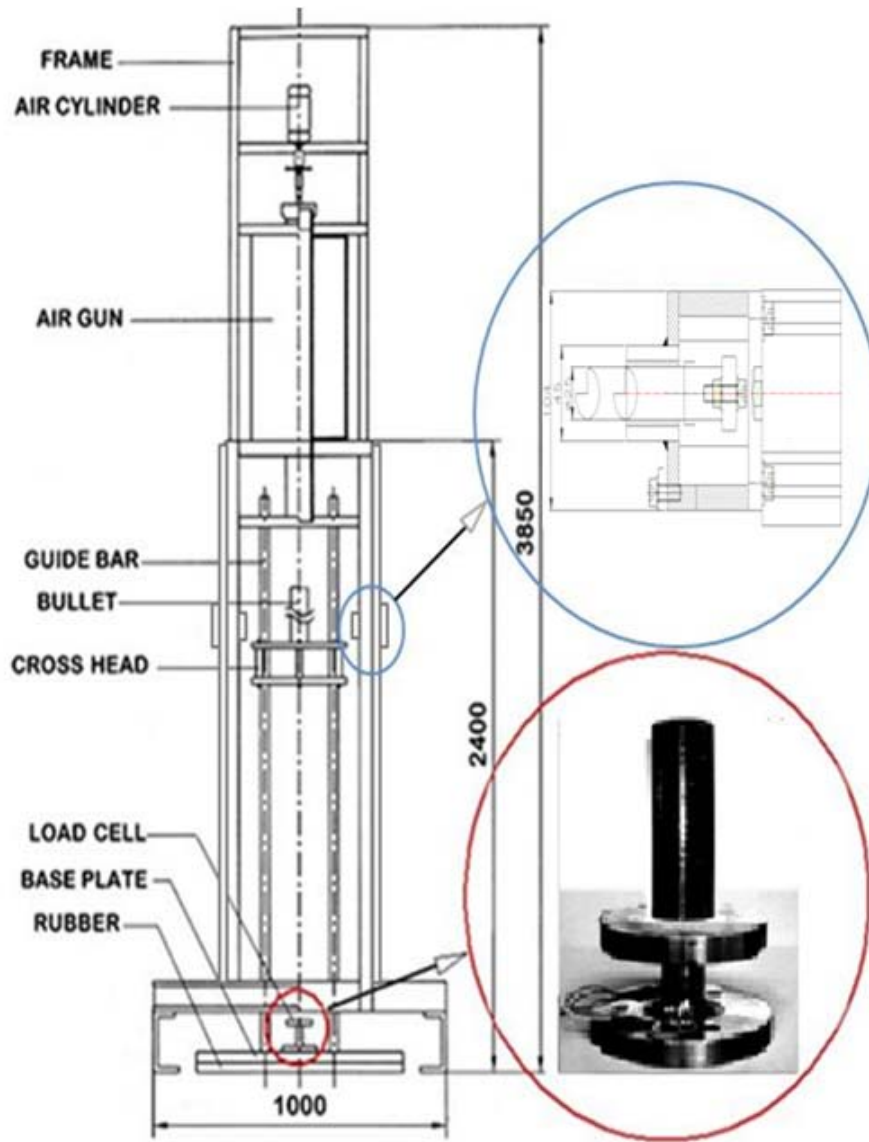


Fig. 4 Impact testing setup for crushing

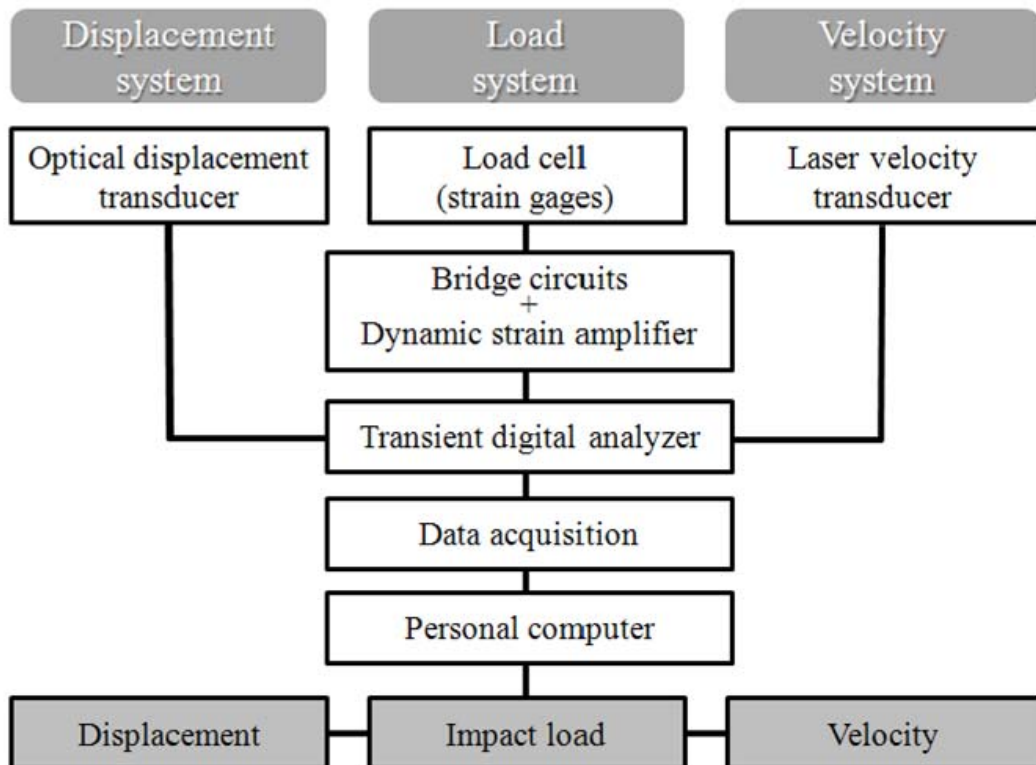


Fig. 5 Diagram of measurement system

2-3 압괴실험

충격 압괴실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_0^{\delta} P dS \quad (1)$$

여기서 E_a 는 총 흡수에너지, P 는 압괴하중, S 는 압괴과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

충격압괴 실험은 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위 내에서 자유낙하를 하였다. 또한 각 시험편에 4~5회의 충격 압괴실험을 행하였고, 압괴과정에서 시간에 대한 하중 및 변위를 측정하였다. 흡수에너지 E_a , 전체흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지흡수특성에 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압괴되었다고 가정하여 식 (2)과 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압괴효율의 역수⁽¹²⁾를 사용하여 식 (3)를 이용한 총 흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (2)$$

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

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (3)$$

여기서, E_T 는 천체흡수에너지, E_a 는 흡수에너지 이다.

충격에너지 E_m 은 식 (4)를 이용하여 구하였으며, 크로스헤드의 운동에너지와 동일하므로 CFRP 원형부재의 경우 4.57m/sec에서는 약 419.44J, 5.14m/sec에서는 529.20J이며 속도 5.52m/sec에서는 약 611.52J이다. 하지만 CFRP 사각형부재의 경우 견딜 수 있는 충격의 한계로 인하여 원형부재보다 낮은 속도인 1.67m/sec에서는 223.44J, 1.85m/sec에서는 274.4J 그리고 2.16m/sec에서는 372.4J로 충격에너지를 정하였다.

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

여기서, m 은 크로스헤드의 질량(40kg)이며, v 는 충격압계속도이다.

충격흡수시설은 구성부재가 파손 또는 변형됨으로 인해 차량의 충돌에너지를 소산시키는 Sacrificial Structure(차체의 파손을 전제로 하는 구조물)이므로 적절한 변형거리를 확보하여야 한다. 또한 충격흡수시설의 구조적 강성과 구성부재의 재료에 따라 다양한 충돌거동을 보이며 충돌시험 결과에도 많은 영향을 준다. 충돌 모델은 매우 다양한 충돌 모델을 사용하는데, 본 논문에서는 식(4)와같이 단순하게 충격에너지를 계산하였다.

제 3 장 CFRP 원형부재의 충격특성

본 장에서는 CFRP 원형부재에 대하여 적층각도 및 계면수의 변화와 충격에너지의 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴 실험에서 얻은 압괴형상을 나타내었다.

3-1 계면수 변화에 따른 압괴

본 절에서는 CFRP 원형부재의 계면수 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴 하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 6~23에 적층수 8ply를 갖는 CFRP 원형부재에 대하여 각각 최외적층각이 0° , 90° 일 때 2, 4 및 6의 계면수의 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 2~19에 각 시험편에 대하여 충격에너지가 각각 419.4J, 529.2J 그리고 611.52J일 때 계면수 변화에 따른 충격압괴 실험 시험편의 형상을 나타내었다.

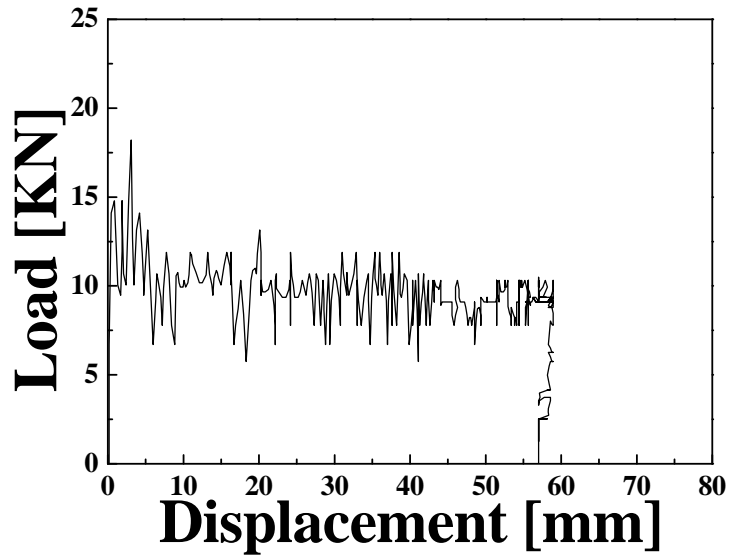


Fig. 6 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 2)



Photo. 2 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 2)

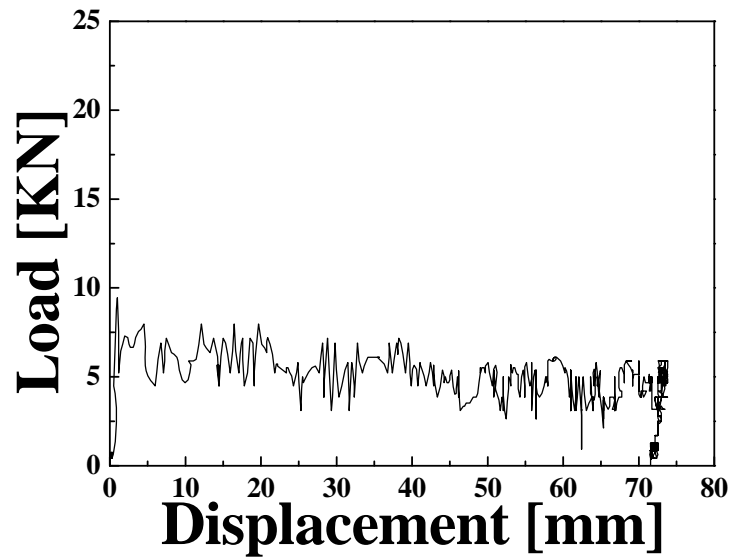


Fig. 7 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 2)



Photo. 3 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 529.20J, Interface number 2)

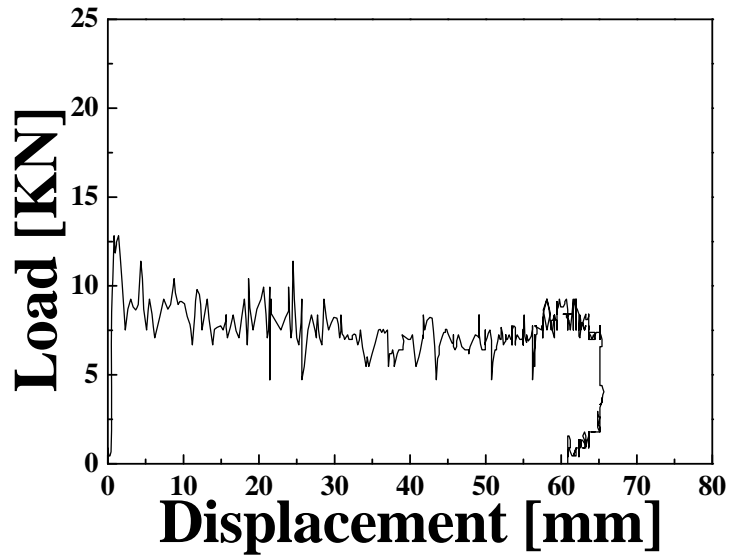


Fig. 8 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 2)



Photo. 4 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 419.44J, Interface number 2)

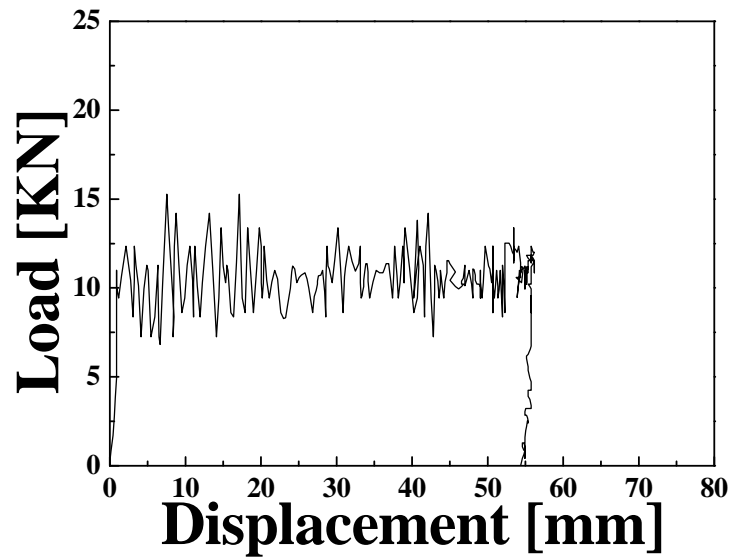


Fig. 9 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 4)



Photo. 5 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 0° (Impact Energy 611.52J, Interface number 4)

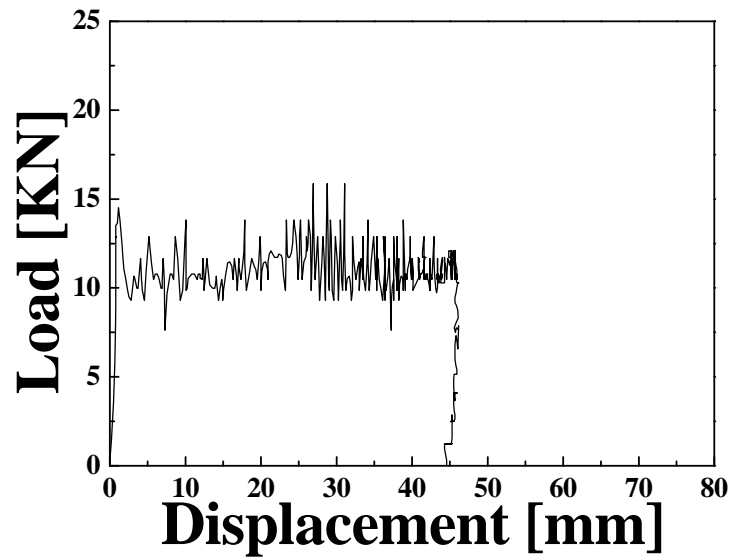


Fig. 10 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 4)



Photo. 6 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 4)

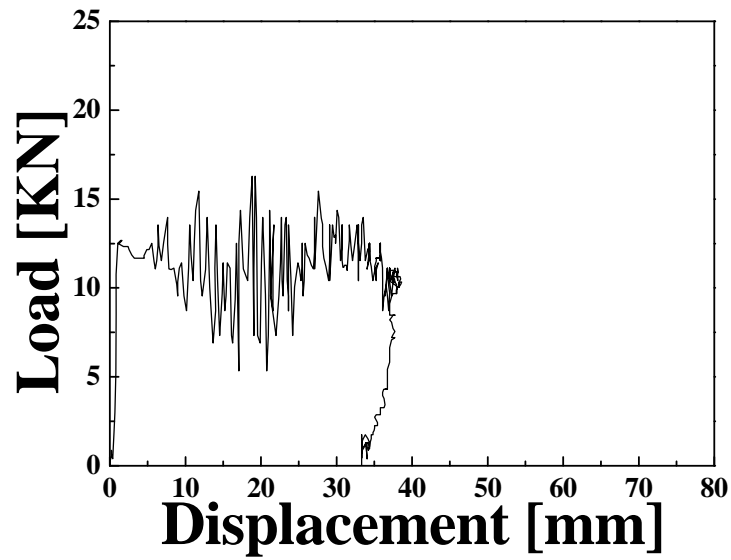


Fig. 11 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 4)



Photo. 7 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 4)

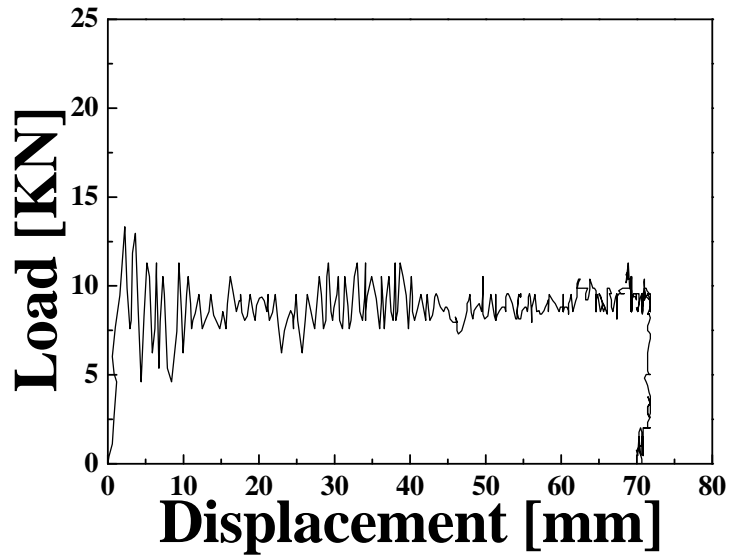


Fig. 12 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 6)



Photo. 8 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 6)

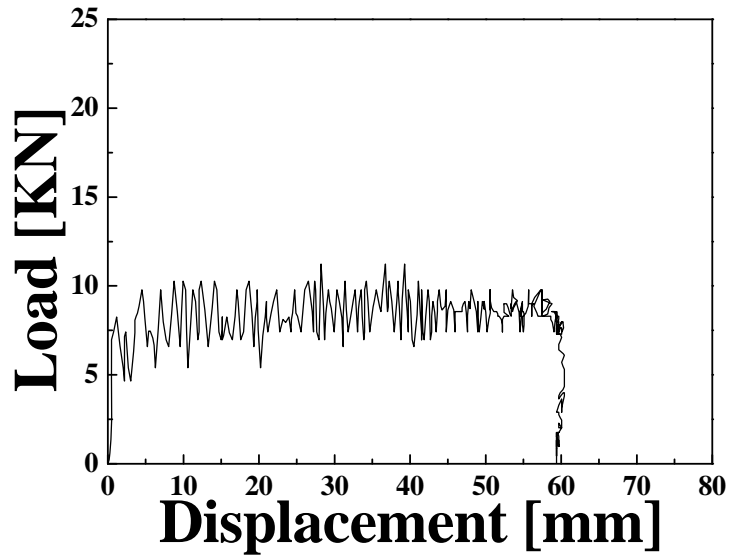


Fig. 13 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 6)



Photo. 9 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 6)

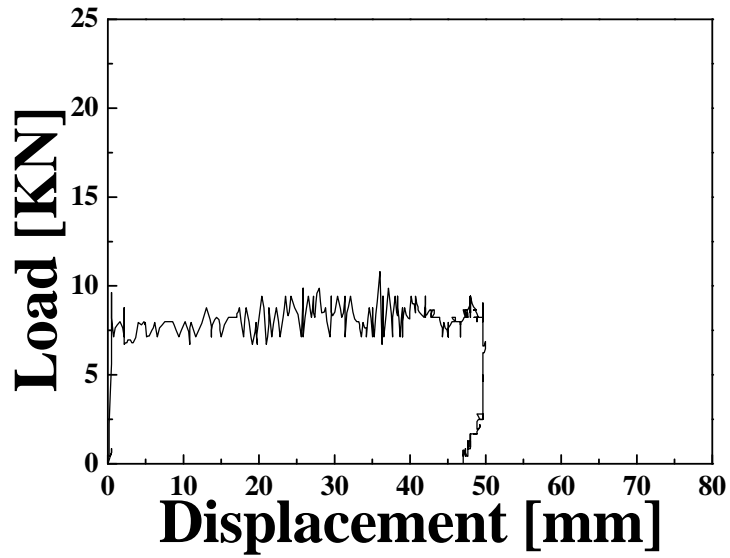


Fig. 14 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 6)



Photo. 10 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 6)

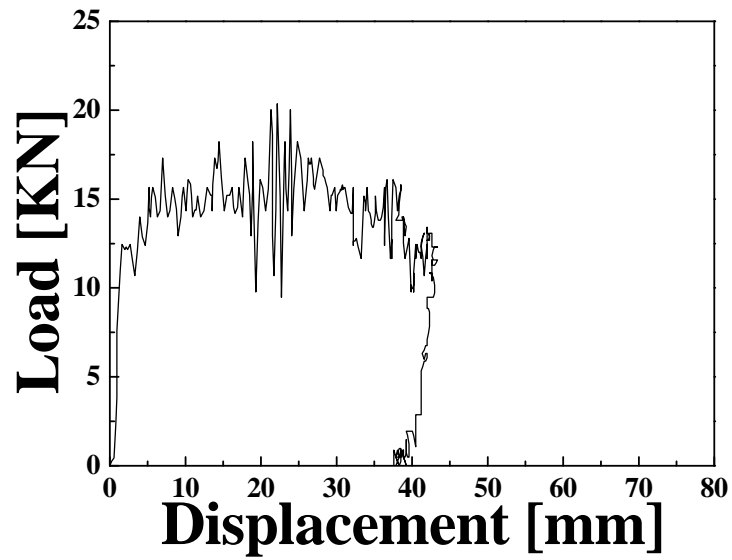


Fig. 15 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 2)



Photo. 11 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 2)

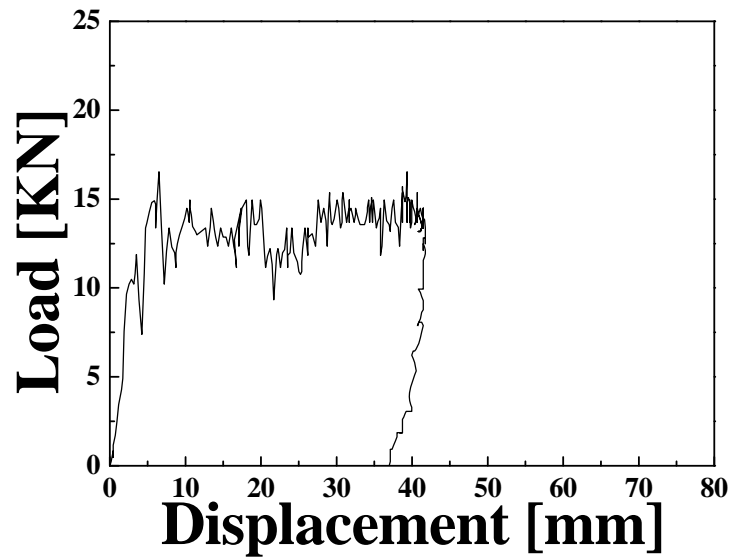


Fig. 16 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 2)



Photo. 12 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 2)

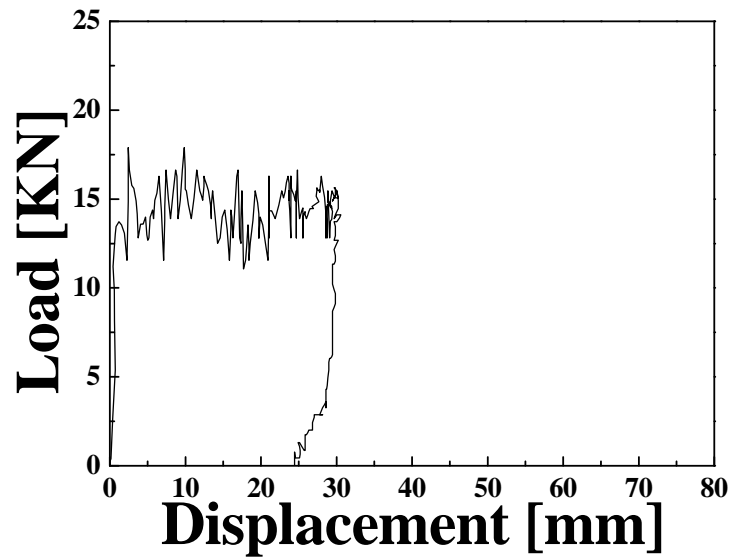


Fig. 17 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 2)



Photo. 13 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 2)

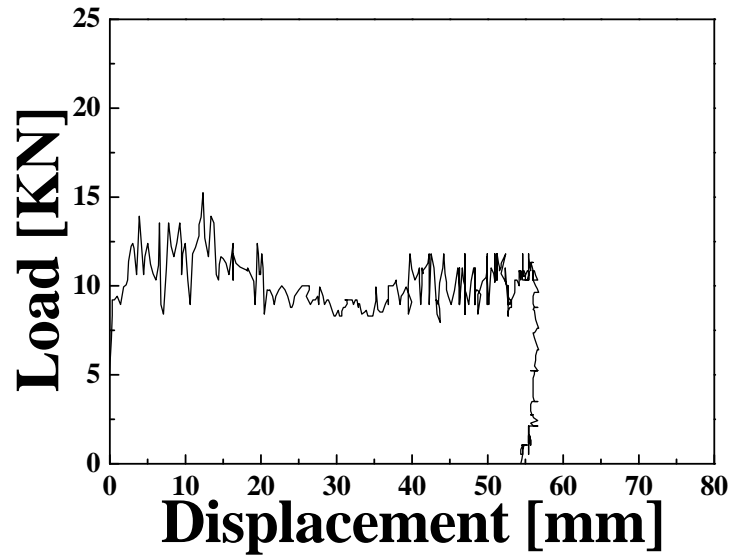


Fig. 18 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 4)



Photo. 14 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 4)

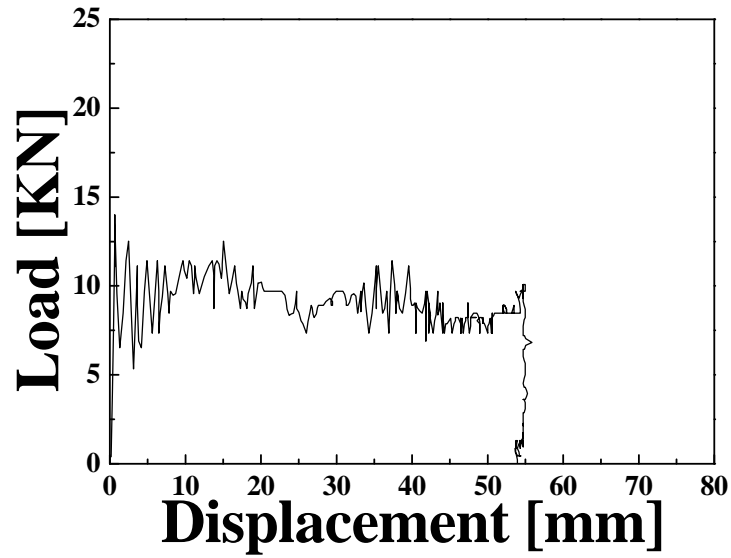


Fig. 19 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 4)



Photo. 15 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 529.20J, Interface number 4)

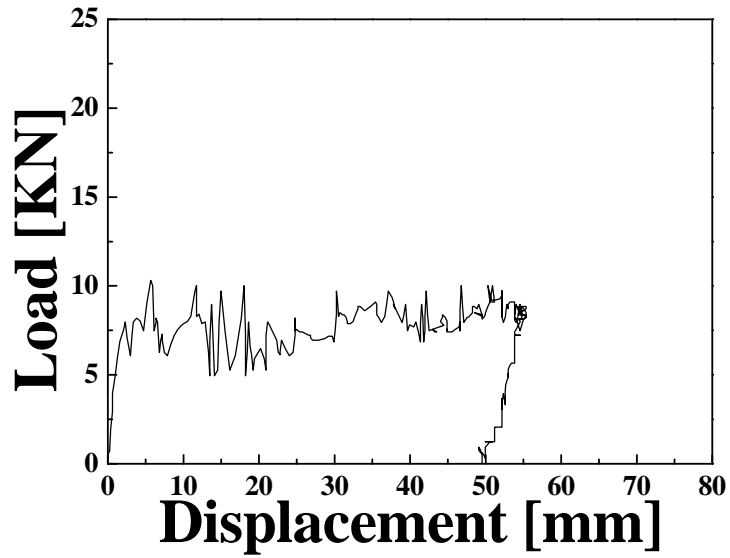


Fig. 20 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 4)



Photo. 16 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 4)

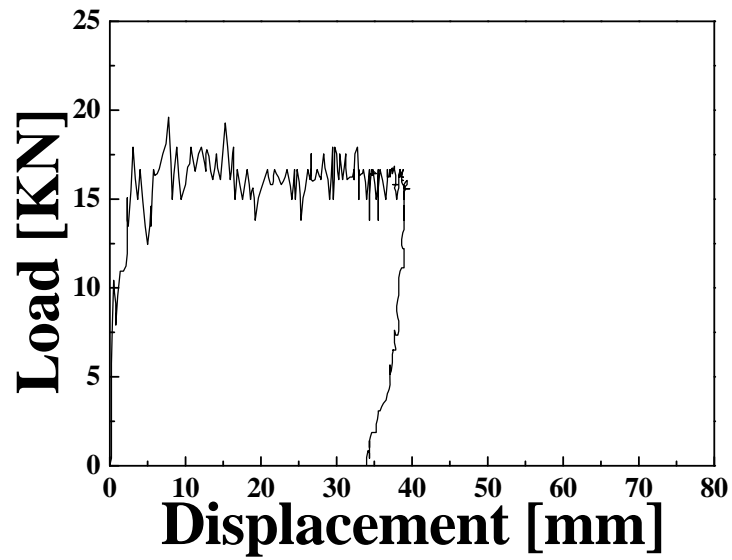


Fig. 21 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 6)



Photo. 17 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 611.52J, Interface number 6)

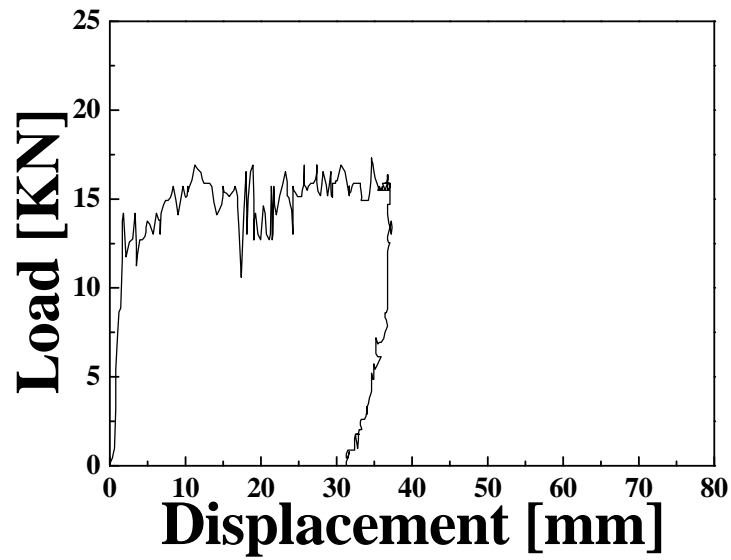


Fig. 22 Load–displacement curve of CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 6)



Photo. 18 Shape of Collapse CFRP Circular member with orientation angle 90° (Impact Energy 529.20J, Interface number 6)

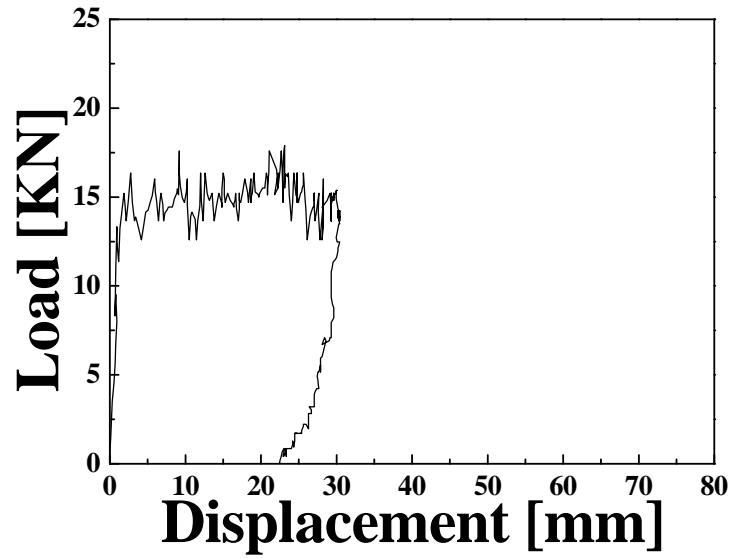


Fig. 23 Load–displacement curve of CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 6)



Photo. 19 Shape of Collapse CFRP Circular member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 419.44J, Interface number 6)

3-2 적층각 변화에 따른 압괴

본 절에서는 CFRP 원형부재에 대하여 적층각의 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴 하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 24~32에 적층수 8ply를 갖는 CFRP 원형부재에 대하여 각각 적층각도가 15° , 45° 및 90° 일 때 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 20~28에 각 시험편에 대하여 충격에너지가 각각 419.4J, 529.2J 그리고 611.52J일 때 적층각 변화에 따른 충격압괴실험 시험편의 형상을 나타내었다.

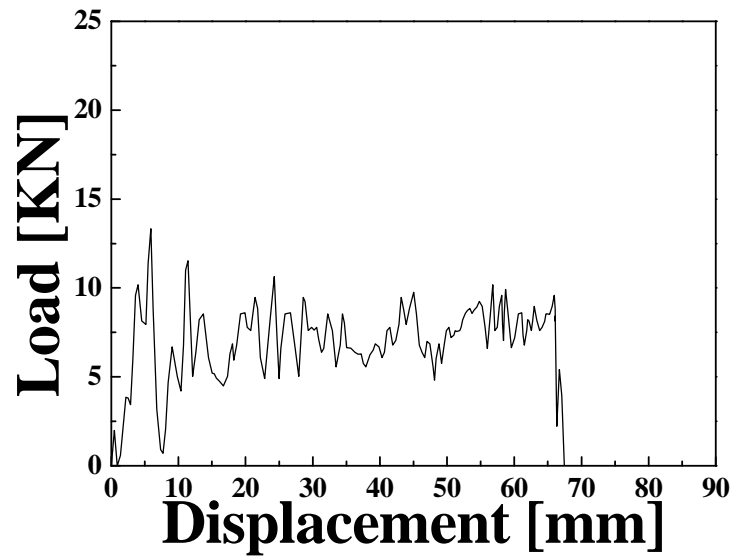


Fig. 24 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)



Photo. 20 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)

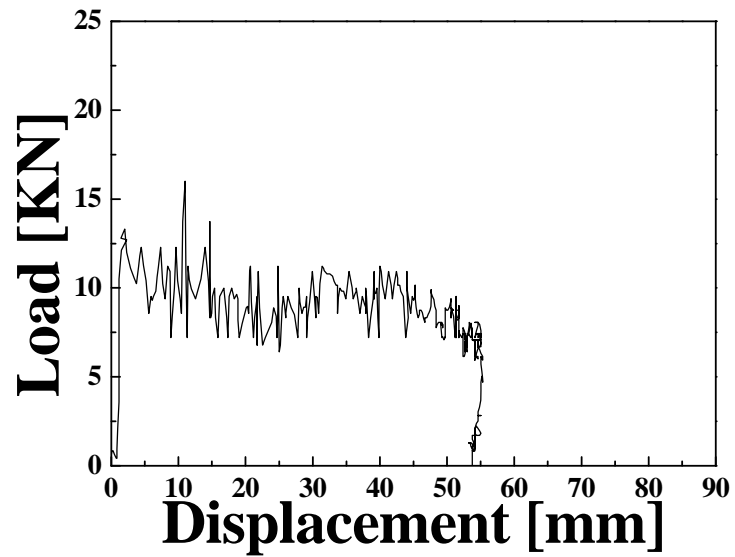


Fig. 25 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)



Photo. 21 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)

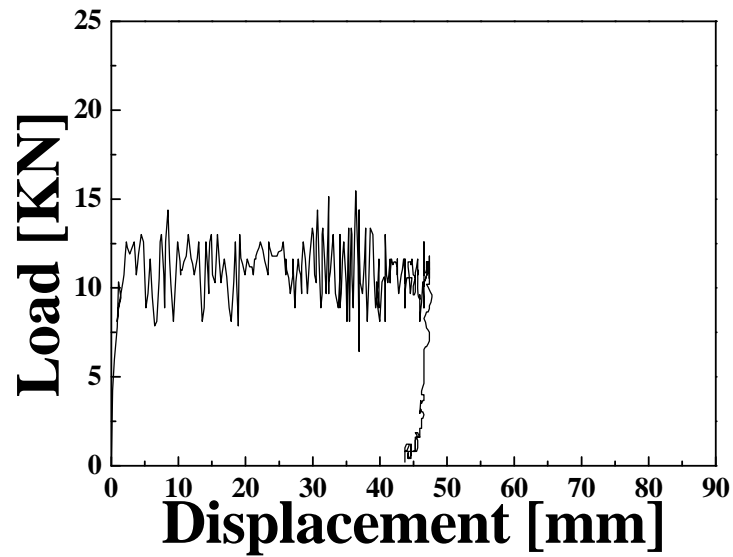


Fig. 26 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)



Photo. 22 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)

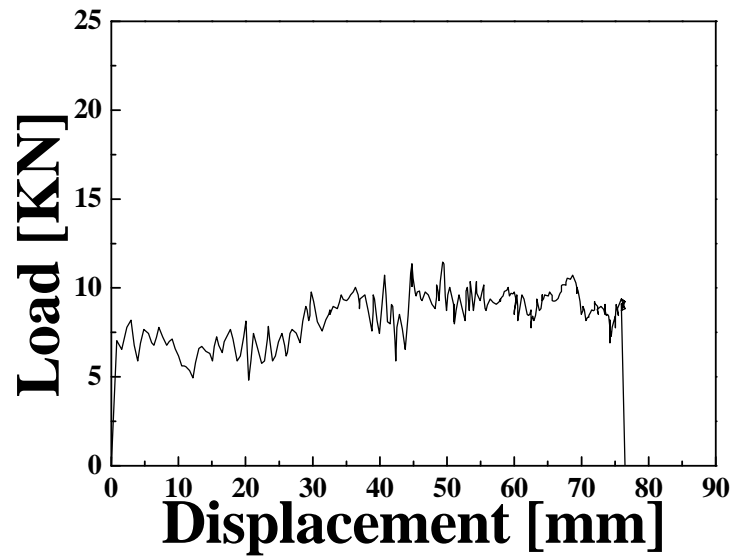


Fig. 27 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)



Photo. 23 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)

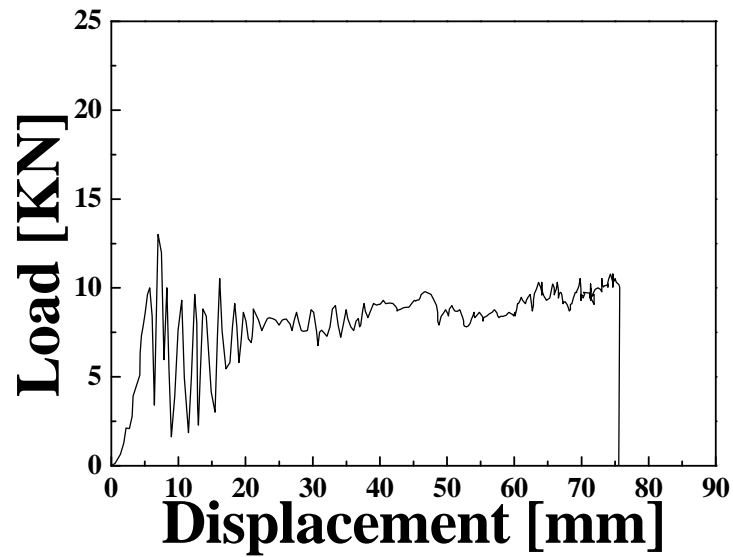


Fig. 28 Load-displacement curve of CFRP Circular member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)



Photo. 24 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)

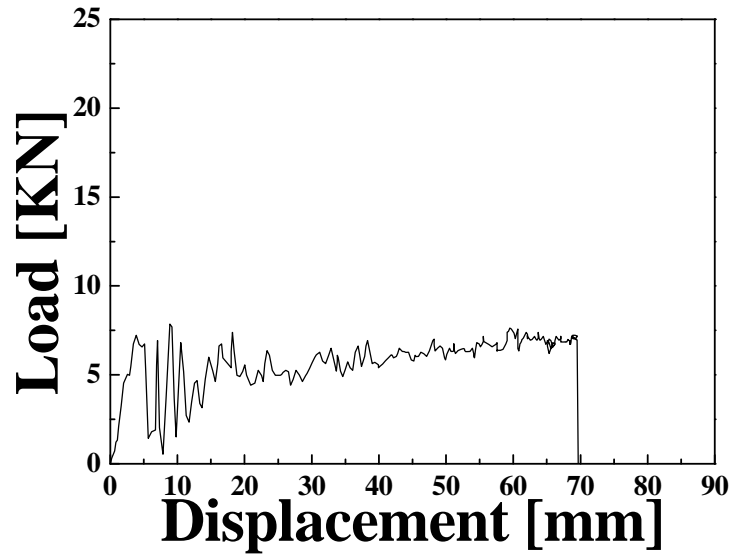


Fig. 29 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)



Photo. 25 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)

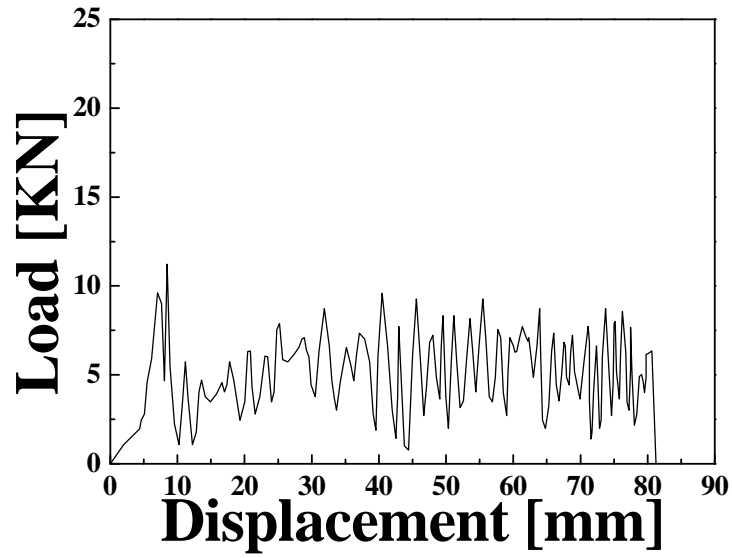


Fig. 30 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[90]_8$
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)



Photo. 26 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[90]_8$
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 611.52J)

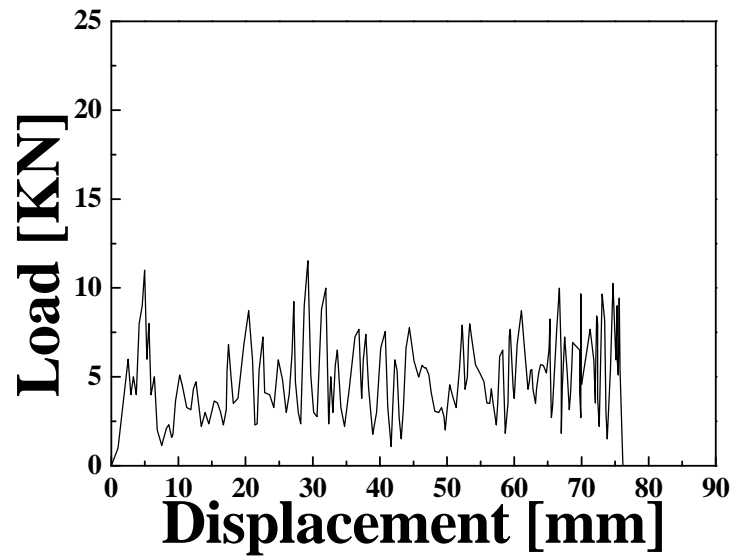


Fig. 31 Load–displacement curve of CFRP Circular member, [90]₈
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)



Photo. 27 Shape of Collapse CFRP Circular member, [90]₈
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 529.2J)

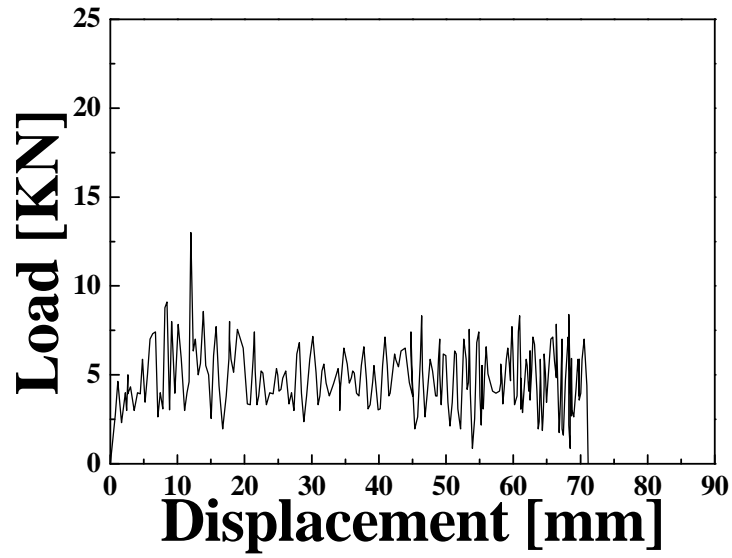


Fig. 32 Load–displacement curve of CFRP Circular member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)



Photo. 28 Shape of Collapse CFRP Circular member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 419.44J)

제 4 장 CFRP 사각형부재의 충격특성

본 장에서는 CFRP 사각형부재에 대하여 적층각도 및 계면수의 변화와 충격에너지의 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴 실험에서 얻은 압괴형상을 나타내었다.

4-1 계면수 변화에 따른 압괴

본 절에서는 CFRP 사각형부재의 계면수 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴 하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 33~50에 적층수 8ply를 갖는 CFRP 사각형부재에 대하여 각각 최외적층각이 0° , 90° 일 때 2, 4 및 6의 계면수의 변화에 따른 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 29~46에 각 시험편에 대하여 충격에너지가 각각 223.44J, 274.4J 그리고 372.4J일 때 계면수 변화에 따른 충격압괴실험 시험편의 형상을 나타내었다.

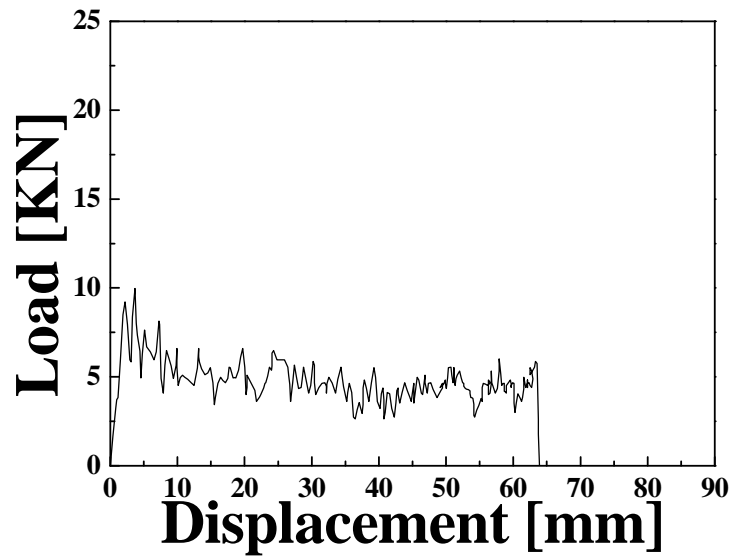


Fig. 33 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 2)



Photo. 29 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 2)

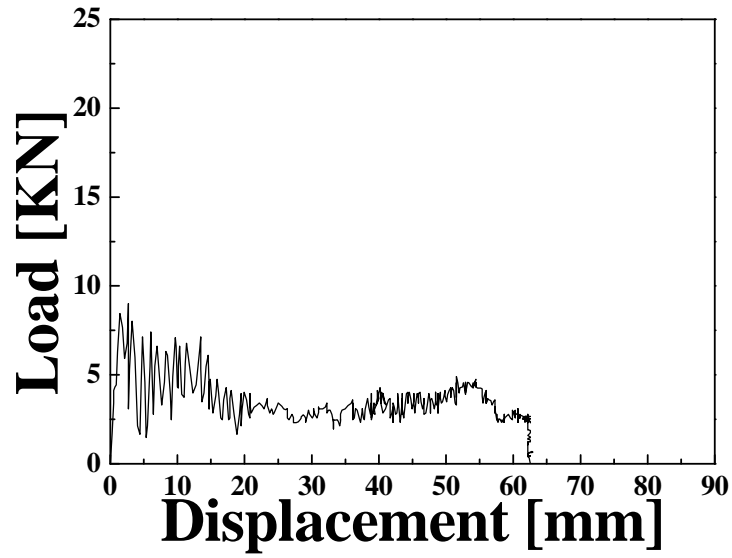


Fig. 34 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 2)



Photo. 30 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 2)

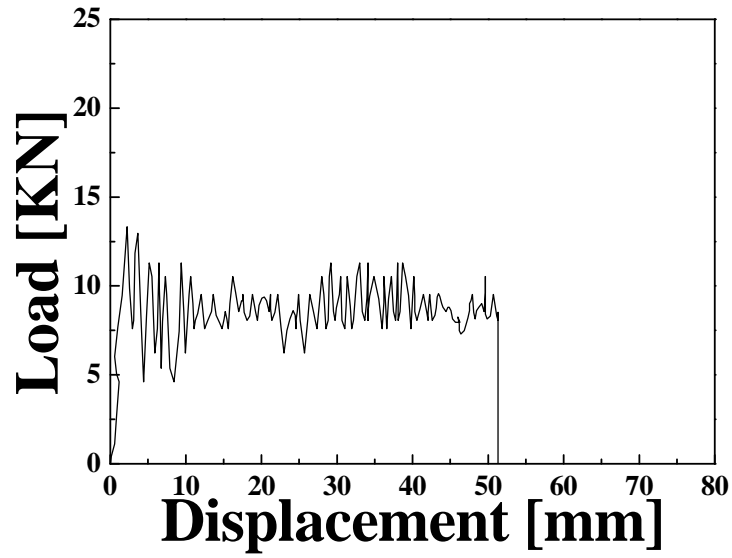


Fig. 35 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 2)



Photo. 31 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 2)

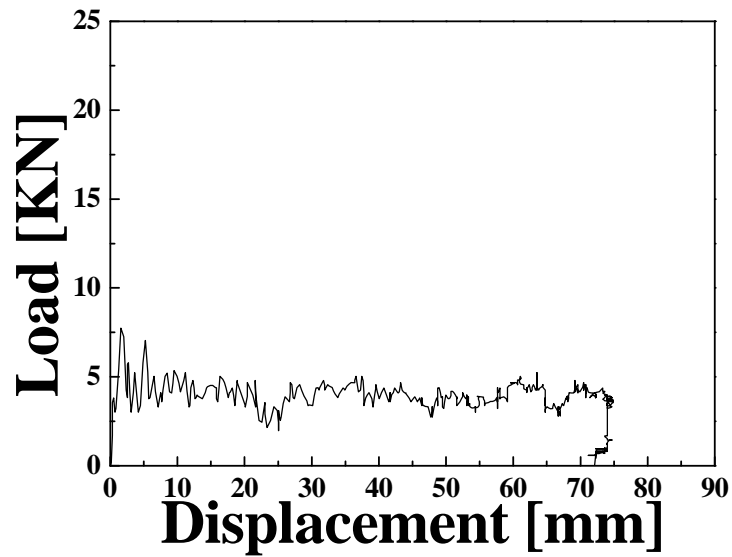


Fig. 36 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 4)



Photo. 32 Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 4)

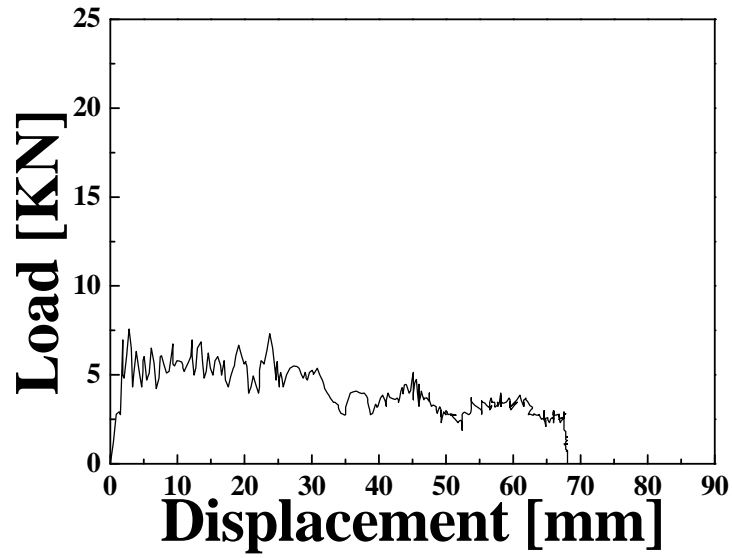


Fig. 37 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 4)



Photo. 33 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 4)

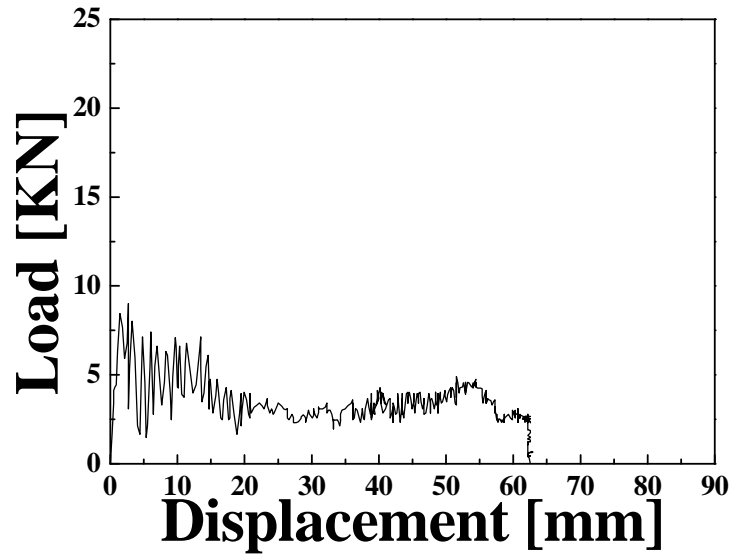


Fig. 38 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 4)



Photo. 34 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 4)

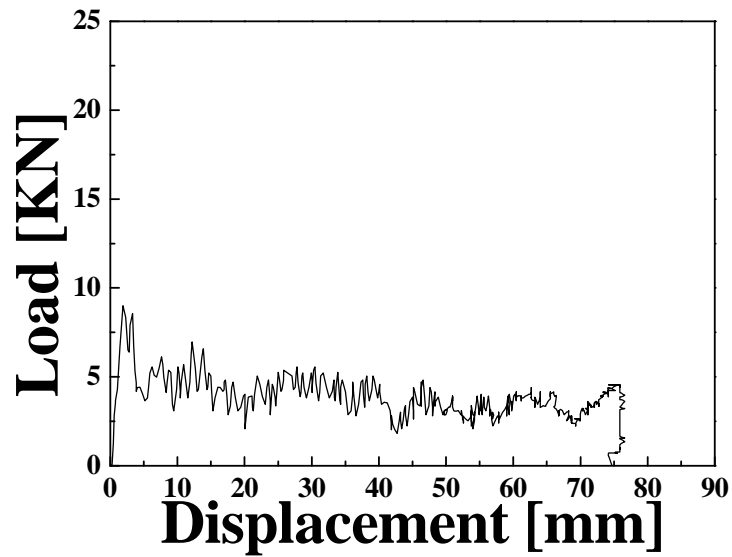


Fig. 39 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 6)



Photo. 35 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 6)

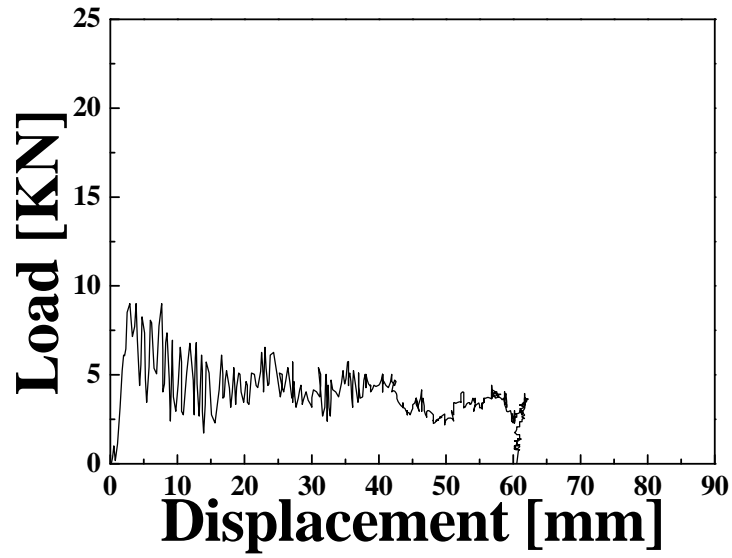


Fig. 40 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 6)



Photo. 36 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 6)

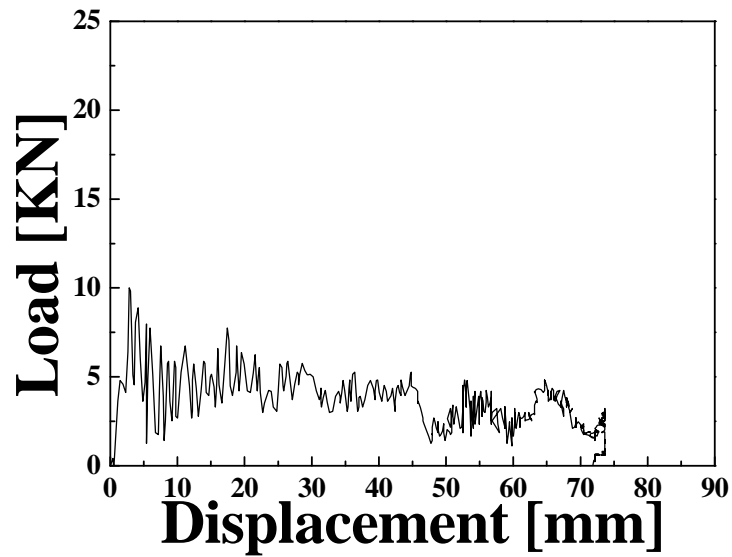


Fig. 41 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 6)



Photo. 37 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 0°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 6)

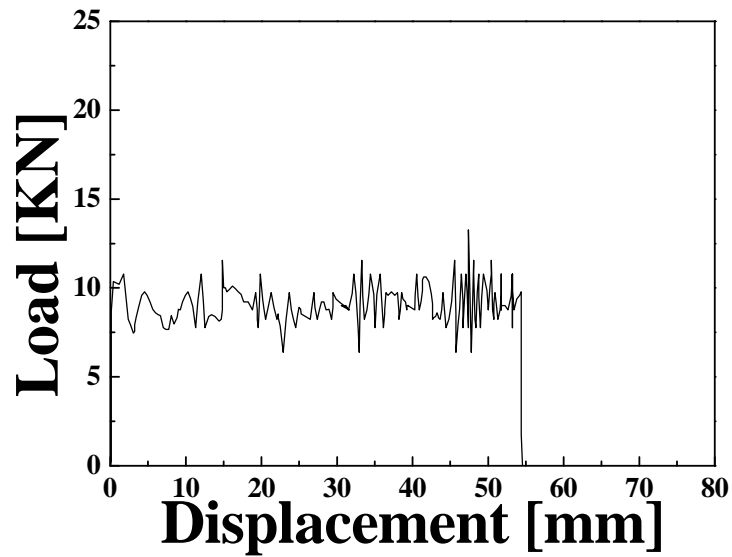


Fig. 42 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 2)



Photo. 38 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 2)

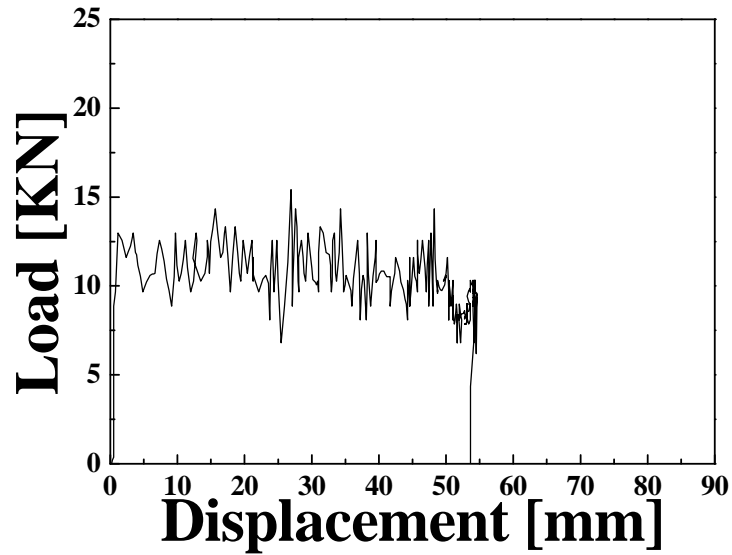


Fig. 43 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 2)



Photo. 39 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 2)

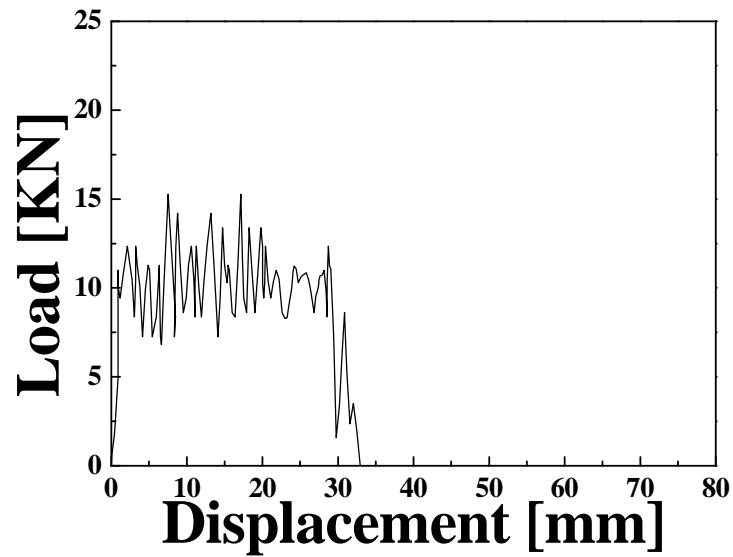


Fig. 44 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 2)



Photo. 40 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 2)

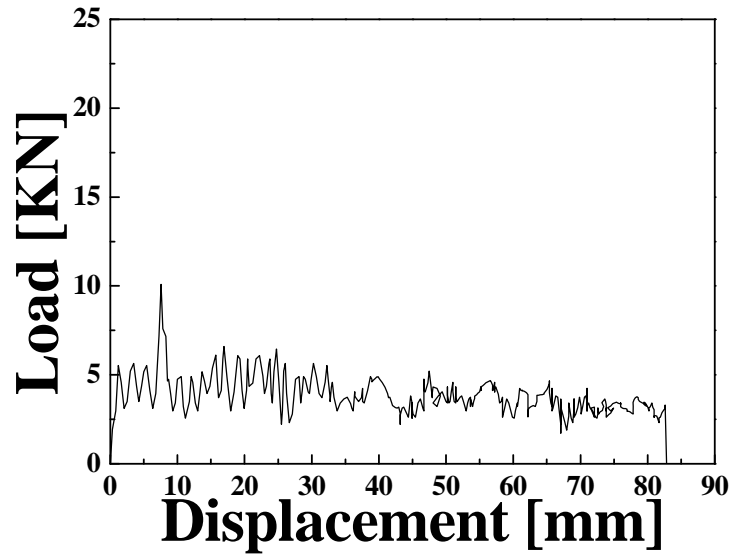


Fig. 45 Load–displacement curve of CFRP Square member with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 4)



Photo. 41 Shape of Collapse CFRP Square member with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 4)

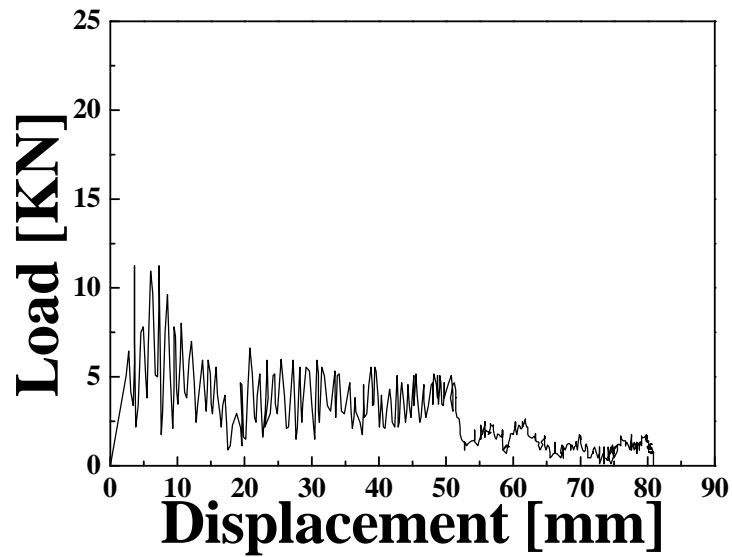


Fig. 46 Load-displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 4)



Photo. 42 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 4)

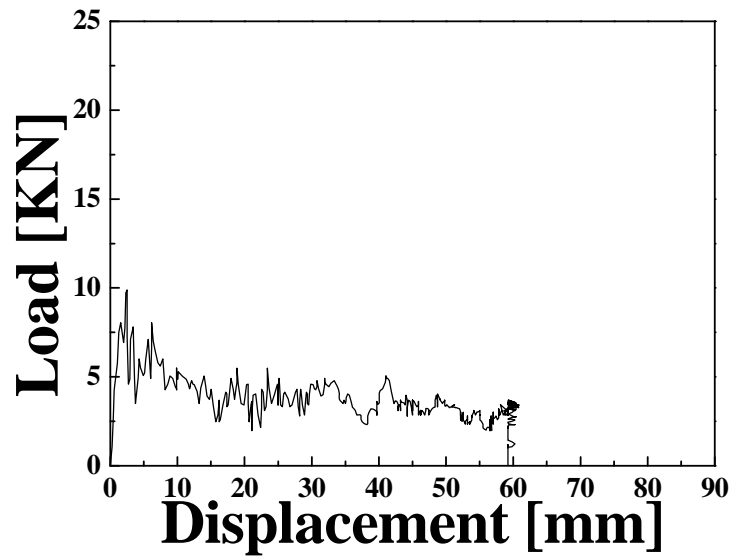


Fig. 47 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 4)



Photo. 43 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 4)

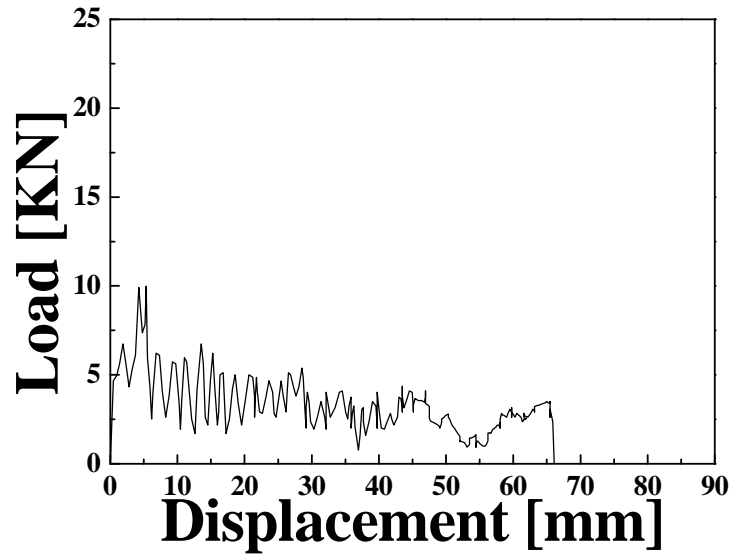


Fig. 48 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 6)



Photo. 44 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 372.4J, Interface number 6)

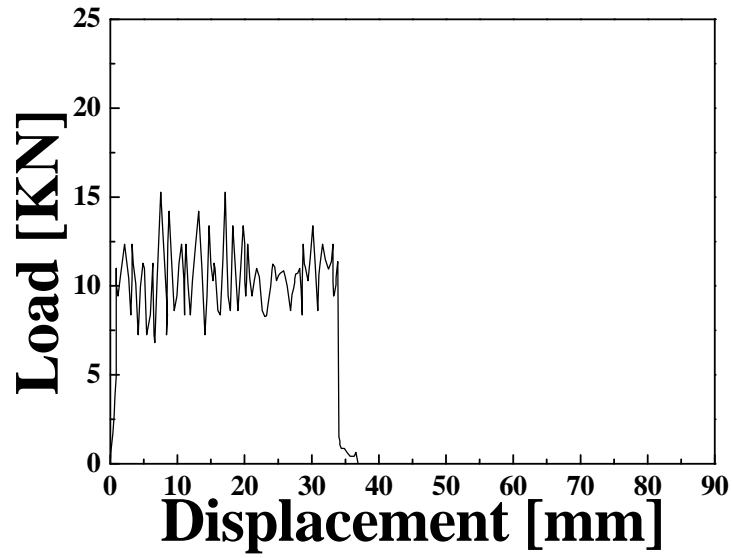


Fig. 49 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 6)



Photo. 45 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 274.4J, Interface number 6)

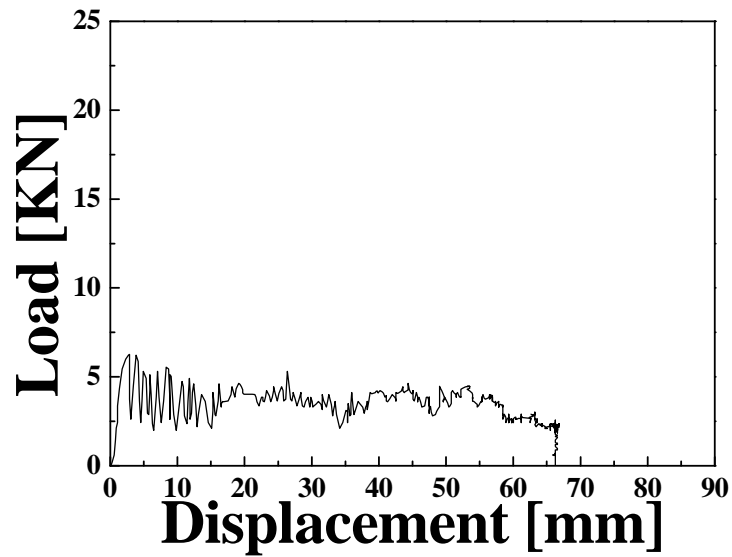


Fig. 50 Load–displacement curve of CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 6)



Photo. 46 Shape of Collapse CFRP Square member
with orientation angle 90°
(Impact Energy 223.44J, Interface number 6)

4-2 적층각 변화에 따른 압괴

본 절에서는 CFRP 사각형부재의 적층각 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압괴 하에서 하중-변위관계와 압괴형상을 나타내었다.

Figs. 51~59에 적층수 8ply를 갖는 CFRP 사각형부재에 대하여 각각 적층각도가 15° , 45° 및 90° 일 때 충격압괴실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 47~55에 각 시험편에 대하여 충격에너지가 각각 223.44J, 274.4J 그리고 372.4J일 때 적층각의 변화에 따른 충격압괴실험 시험편의 형상을 나타내었다.

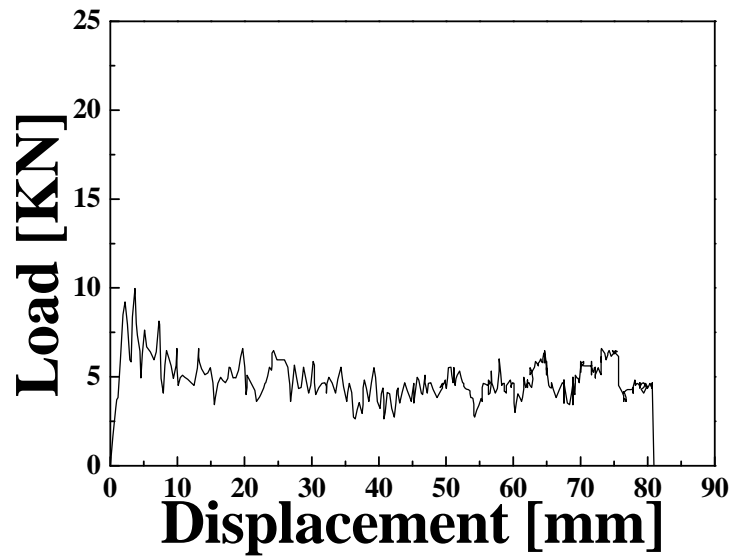


Fig. 51 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)



Photo. 47 Shape of Collapse CFRP Square member, $[-15/+15]_4$
 (Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)

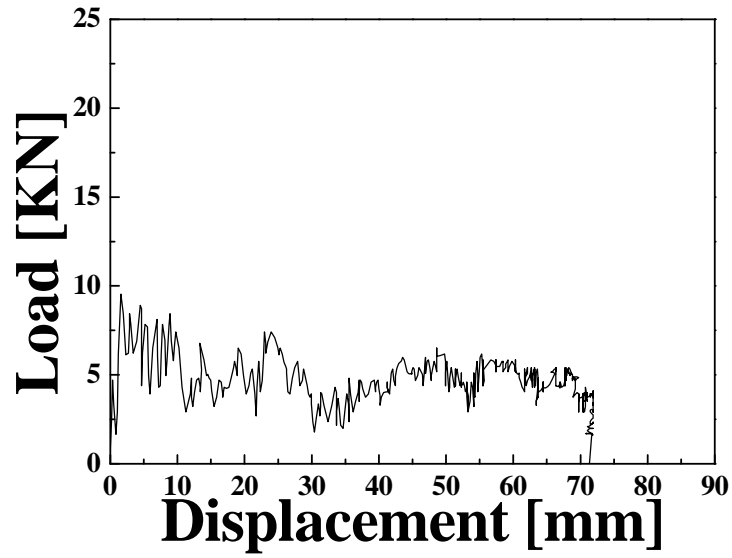


Fig. 52 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[-15/+15]_4$
(Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)



Photo. 48 Shape of Collapse CFRP Square member, $[-15/+15]_4$
(Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)

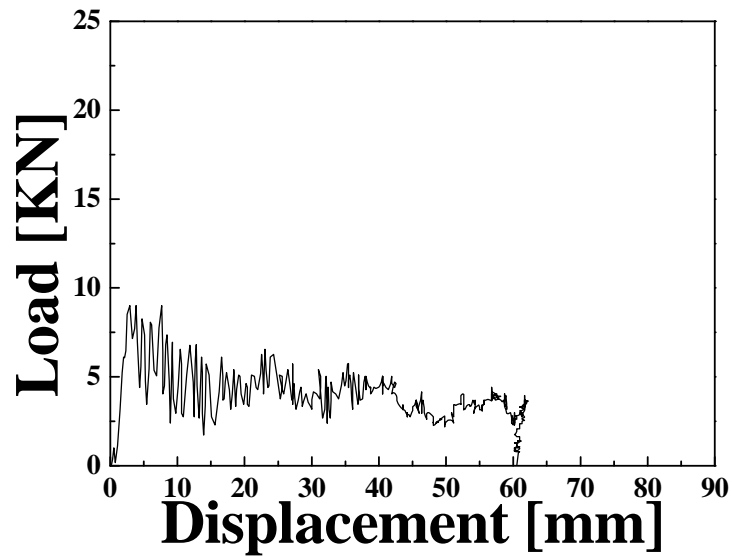


Fig. 53 Load-displacement curve of CFRP Square member, $[-15/+15]_4$
(Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)



Photo. 59 Shape of Collapse CFRP Square member, $[-15/+15]_4$
(Static, 15° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)

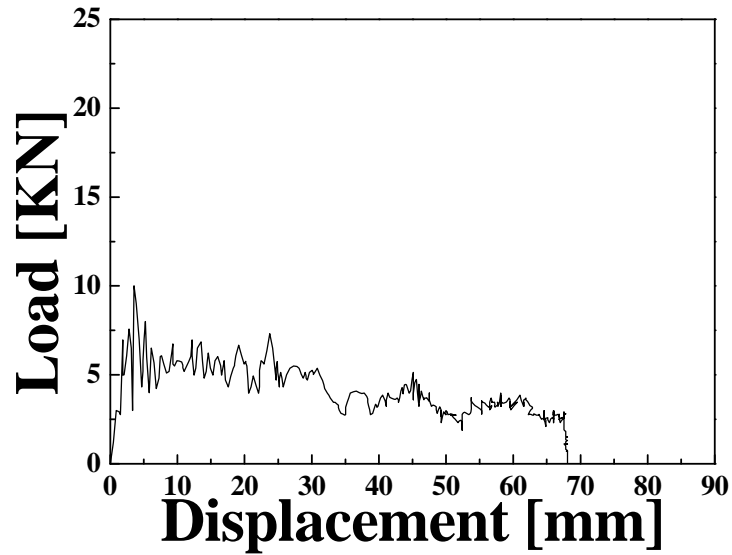


Fig. 54 Load-displacement curve of CFRP Square member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)



Photo. 50 Shape of Collapse CFRP Square member, $[-45/+45]_4$
 (Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)

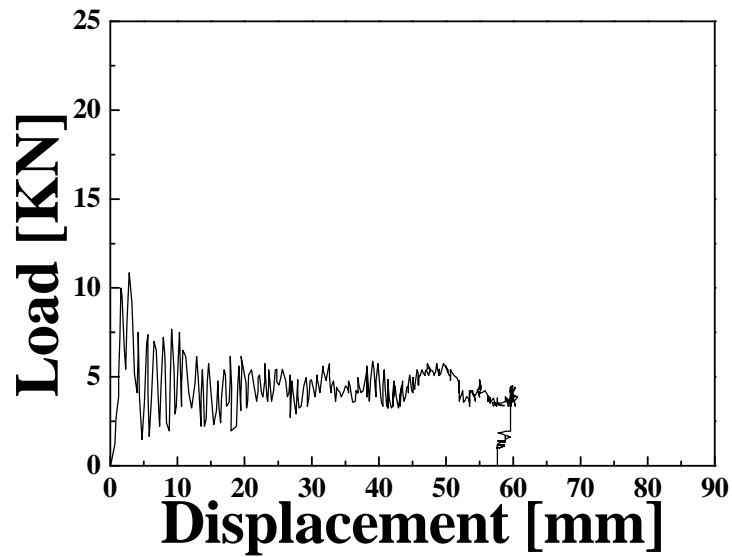


Fig. 55 Load-displacement curve of CFRP Square member, $[-45/+45]_4$
(Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)



Photo. 51 Shape of Collapse CFRP Square member, $[-45/+45]_4$
(Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)

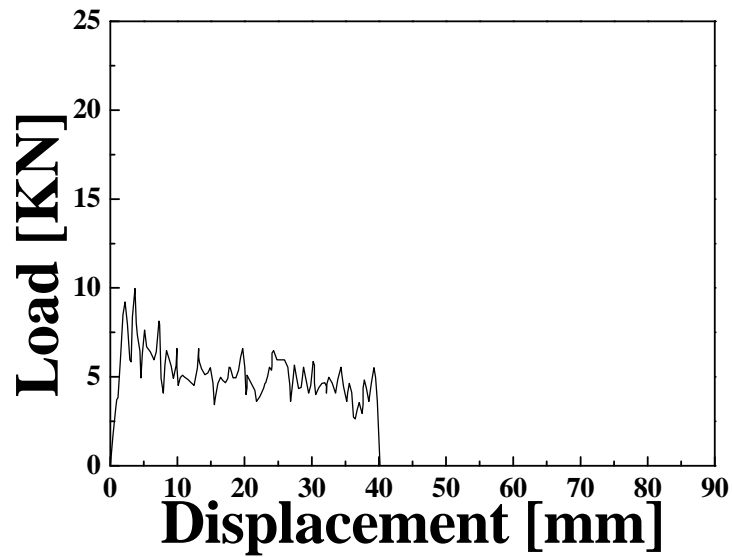


Fig. 56 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[-45/+45]_4$
(Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)



Photo. 52 Shape of Collapse CFRP Square member, $[-45/+45]_4$
(Static, 45° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)

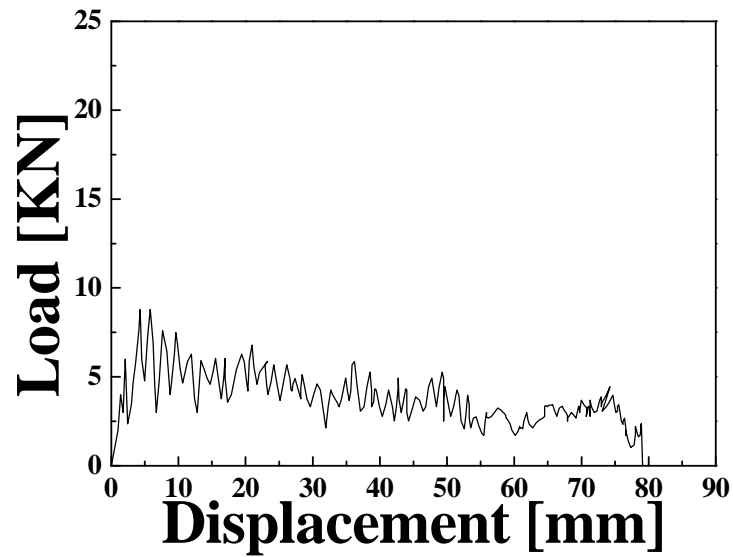


Fig. 57 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[90]_s$
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)



Photo. 53 Shape of Collapse CFRP Square member, $[90]_s$
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 372.4J)

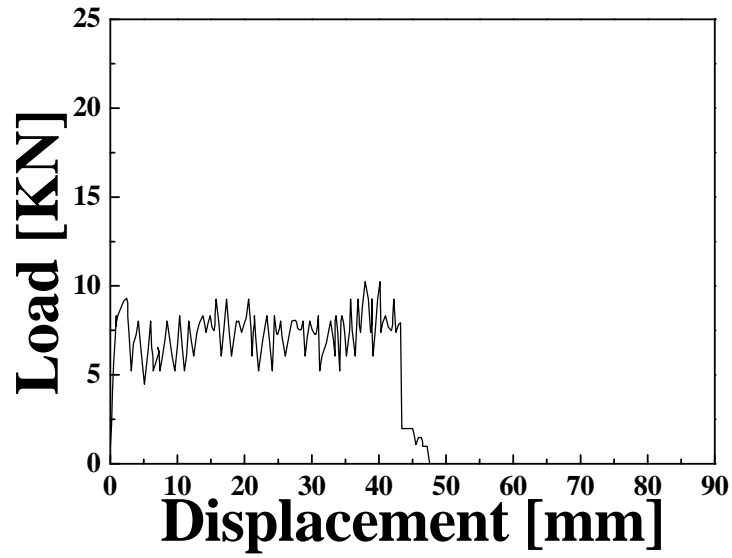


Fig. 58 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)



Photo. 54 Shape of Collapse CFRP Square member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 274.4J)

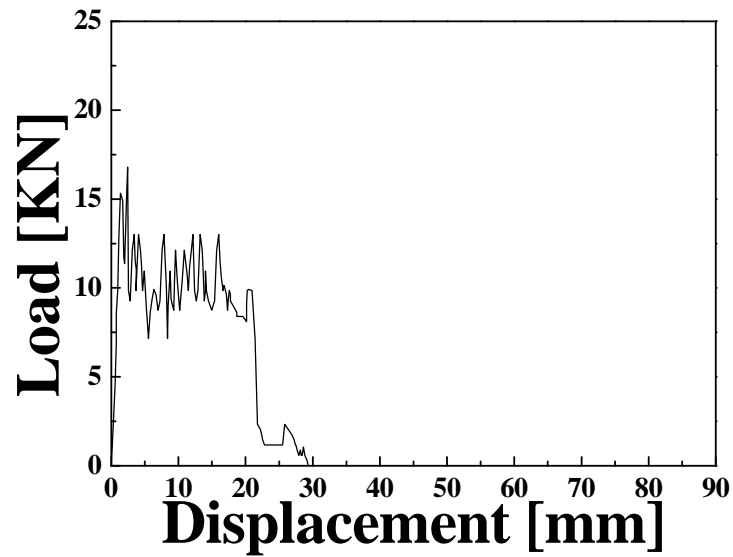


Fig. 59 Load–displacement curve of CFRP Square member, $[90]_8$
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)



Photo. 55 Shape of Collapse CFRP Square member, $[90]_8$
 (Static, 90° fiber orientation angle, Impact Energy 223.44J)

제 5 장 실험결과 및 고찰

5-1 압케 모드

CFRP 부재의 경우는 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 횡방향 전단, 라мина 굽힘 또는 국부좌굴에 의해서 압케된다.

본 연구에서는 CFRP 원형 부재 및 사각형 부재의 적층 각도를 15° , 45° 및 90° 로 변화시켜가며 적층각 및 계면수 변화에 따른 충격압케실험을 행하였다. Photo. 56~59에 각각 CFRP 원형부재와 사각형부재의 계면수 변화에 따른 압케형상을 나타내었고, Photo. 60, 61에 CFRP 원형부재와 사각형부재의 적층각도 변화에 따른 압케형상을 나타내었다. Photo. 56~59의 경우 0° 와 90° 의 CFRP 적층각도가 조합된 시험편으로 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단 되면서 압케되는 파쇄확장모드(fragmentation and splaying mode)의 형태로 압케되었다. 파쇄확장모드는 충격압케 시 축방향 0° 의 섬유가 부재의 외측으로 확장되려 하지만 90° 의 섬유의 영향으로 확장되면서 90° 의 섬유와 함께 파단 되면서 압케된다. Photo. 58, 59에서 CFRP 사각형부재의 경우 CFRP 부재의 모서리 부분에서 기지와 섬유의 파단과 분열을 일으키면서 압케되는 분열모드(split mode)의 형태로 압케되었다.

Photo. 60, 61에서 적층각 15° 와 45° 로 적층된 시험편의 경우 약간의 스플라인 모드와 혼합된 섬유 파단을 보여주었으며, 섬유방향으로 파괴가 된 것을 보여주고 있다. 적층각 90° 로 적층된 시험편의 경우는 섬유의 국부좌굴에 의해서 안정적인 굽힘을 보이며 압케되었다.

CFRP의 적층각도가 축 방향과 비슷한 방향으로 적층이 되어 있을 때, 축 하중이 작용하면 초기 피크 하중 이후 CFRP부재는 라мина 굽힘에 의해서 에너지를 흡수한다. CFRP 적층각도가 증가할수록 CFRP 섬유는 hoop stress 형태로 하중을 지지한다. CFRP 적층각도가 축 방향에 대해 직교하는 방향으로 가까워지면 원주방향으로 적층된 대부분의 섬유가 파단에 의해서 에너지를 흡수하였다. 또한 0°

와 90° 의 CFRP 적층각도가 조합된 경우는 0° 의 섬유 라미나 굽힘과 90° 섬유 굽힘의 국부좌굴이 조합되어 섬유의 파단을 유도하면서 라미나 굽힘, 국부좌굴 및 섬유 파단에 의해서 에너지를 흡수한다.



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

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

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

Photo. 56 Typical collapse modes of CFRP circular members according to interface number (Outer layer 0°)



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

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

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

Photo. 57 Typical collapse modes of CFRP circular members according to interface number (Outer layer 90°)



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

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

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

Photo. 58 Typical collapse modes of CFRP Square members according to interface number (Outer layer 0°)



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

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

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

Photo. 59 Typical collapse modes of CFRP Square members according to interface number (Outer layer 90°)



(a) $[+15/-15]_4$

(b) $[+45/-45]_4$

(c) $[90]_8$

Photo. 60 Typical collapse modes of CFRP circular members according to fiber orientation angles



(a) $[+15/-15]_4$

(b) $[+45/-45]_4$

(c) $[90]_8$

Photo. 61 Typical collapse modes of CFRP Square members according to fiber orientation angles

5-2 에너지 흡수 특성

앞서 기술한 것과 같이 CFRP 부재는 충격 압케되면 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 횡 방향 전단, 라미나 굽힘, 또는 국부좌굴에 의해서 압케됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 적층각 및 형상의 변화에 따른 CFRP 구조부재의 충격특성을 정량적으로 고찰하기 위하여 충격압케실험 시 얻은 하중-변위선도로부터 적층구성의 변화에 따른 흡수에너지 특성을 고찰 하였다. Table 3, 4에 적층각도 및 형상 변화에 따른 각각의 흡수에너지, 총 흡수에너지, 평균하중 및 최대하중을 표로 나타내었다.

Fig. 60, 61은 각각 8ply로 적층된 CFRP원형부재와 사각형부재의 적층각의 변화에 의한 총 흡수에너지를 나타내었다.

CFRP 원형부재와 사각부재 모두 3단계의 충격속도변화를 주어 실험했다. 속도 변화에 따른 에너지흡수 특성을 고찰하고자 CFRP원형 구조부재의 경우는 419.44J, 529.2J 및 611.52J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였고, CFRP 사각형 시험편의 경우 흡수할 수 있는 에너지의 한계로 인하여 자유낙하 상태에서 223.44J, 274.4J 및 372.4J의 충격에너지를 가하여 실험하였다.

Fig. 60, 61로부터 알 수 있는 바와 같이 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 적층각이 15° 일 때가 흡수에너지가 가장 컸으며, 적층각이 45° , 90° 의 순으로 낮게 나타났다. 다만, 적층각이 45° 인 경우 원형 CFRP부재가 사각 부재보다 흡수에너지가 높게 나타난 것은 원형의 경우는 대칭압케 형상을 나타내고, 사각의 경우는 사각 모서리 부분의 압케 시 비대칭으로 압케되기 때문이라 생각된다. 또한, 충격력이 클수록 총 흡수에너지도 증가한다는 것을 알 수 있었고, CFRP의 에너지 흡수 인자는 크랙의 진전이며, 충격압케실험은 짧은 시간에 충격하중이 가해지기 때문에 순간적인 크랙진전을 보여준다고 사료된다.

Table 5~8에 계면수 변화에 따른 각각의 흡수에너지, 총 흡수에너지, 평균하중 및 최대하중을 표로 나타내었다. Fig. 62~65는 형상 및 계면수 변화에 따른 총 흡

수에너지를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 66, 67은 CFRP 원형부재와 사각형부재의 속도변화에 따른 총 흡수에너지를 비교하기 위한 그래프이다. Fig. 66, 67 중에서 ○, △, □ 표시는 최외층 적층각이 90° 인 경우이며 ●, ▲, ■ 표시는 최외층 적층각이 0° 인 경우를 나타낸다. 또한, 충격에너지의 크기는 크로스헤드를 (40kg) 수직식 충격시험장치의 4개의 guide rail에 위치를 고정시켜 낙하시키는 Jig를 설계 제작하여 실험 시 충격에너지 크기의 재현성을 확보하였다.

Fig. 66은 원형 CFRP부재가 여러 단계의 충격하중을 받았을 때의 계면수의 변화와 최외층 적층각의 변화에 따른 에너지흡수특성을 나타냈다.

Fig. 66으로 부터 알 수 있는 바와 같이 Fig. 67의 사각 CFRP부재와 흡수에너지의 변화가 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나, 계면수가 2, 6계면의 경우 사각 CFRP부재보다 최외층각도의 변화에 따라 2계면일 때 41.66%, 6계면일 때 39.97%정도의 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 2계면의 경우가 최외층각도의 변화에 민감함을 알 수 있다.

Fig. 67은 사각형 CFRP부재가 여러 단계의 충격하중을 받았을 때의 계면수의 변화와 최외층 적층각의 변화에 따른 에너지흡수특성을 나타냈다. Fig. 67 에서 알 수 있는바와 같이 동일한 형상의 CFRP부재라 하더라도 계면수 및 최외층 적층각의 변화에 따라 흡수에너지가 크게 변화함을 알 수 있었다. 계면수가 2계면과 6계면일 때, 충격에너지가 증가할수록 흡수에너지도 증가했으며 최외층 적층각이 90° 일 때가 0° 일때 보다 각각 2계면일 때 18.32%, 6계면일 때 12.53% 정도 많은 에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있었고 계면수가 6계면일 때는 2계면일 때 보다 최외층각도의 변화에 따른 에너지흡수의 차가 약간 작게 나타났다. 그러나, 계면수가 4계면일 때는 최외층 적층각의 변화에 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 이는 충격압력 시 압력 MODE의 해석으로부터 알 수 있는데, CFRP부재의 가장 큰 에너지 흡수인자는 섬유 파단 및 크랙 진전이며, 크랙 진전은 크게 층간 크랙과 층내 크랙 및 중심 크랙으로 나눌 수 있다. 따라서 CFRP 부재의 경우, 계면수의 증가에 따라 층간 크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가하여 에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났다. 이는 충격압력하중을 받을 시 섬유방향이 90° 일때가 좀더 하중에 견디는 힘이 크기 때문에 90° 로 적층된 섬유의 두께가 얇아질수록

총흡수에너지 또한 낮게 나타난다고 사료된다.

그러나 2, 6계면의 경우 파쇄확장모드로 압계되며 많은 에너지를 흡수하였는데 이는, 축방향 0° 의 섬유가 외측으로 확장되어 벗어나려 하지만 90° 의 섬유의 영향으로 확장되면서 90° 의 섬유와 함께 파단 되어 압계된다. 또한, 0° 와 90° 의 CFRP 적층각도가 조합된 경우는 0° 의 섬유의 라미나 굽힘과 90° 섬유의 국부좌굴이 조합되어 섬유의 파단을 유도하면서 라мина 굽힘, 국부좌굴 및 섬유파단에 의해서 에너지를 흡수하기 때문으로 사료된다.

Table 3 Collapse test results for circular members according to fiber orientation angles and impact velocity

Fiber orientation angle of CFRP		Absorbed energy	Total absorbed energy	Mean load	Maximum collapse load
		E_a [J]	E_L [J]	P_m [kN]	P_{max} [kN]
15°	611.52J	757.53	1026.67	9.27	13.08
	529.20J	667.40	963.88	9.05	16.07
	419.44J	477.33	766.29	7.01	14.53
45°	611.52J	709.49	906.10	7.69	11.65
	529.20J	596.54	900.56	8.27	13.85
	419.44J	404.45	706.20	5.96	7.97
90°	611.52J	541.92	583.85	3.63	11.70
	529.20J	489.84	549.04	3.85	10.67
	419.44J	401.05	553.61	4.75	9.55

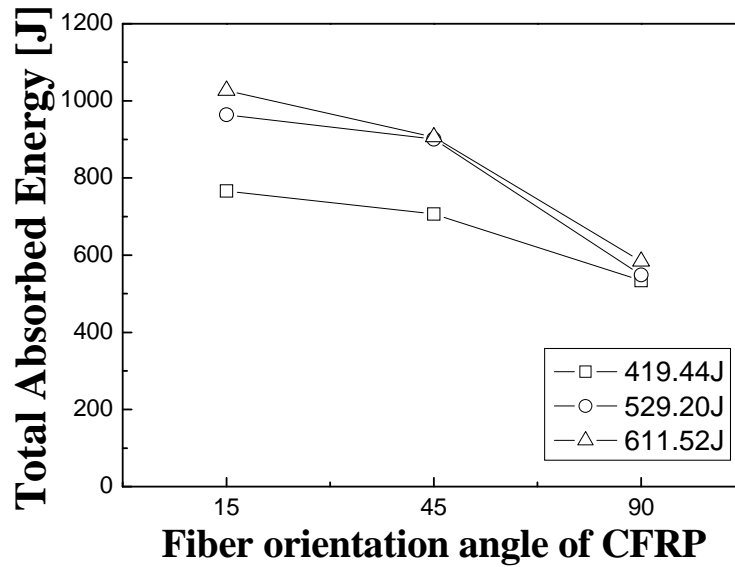


Fig. 60 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity

Table 4 Collapse test results for Square members according to fiber orientation angles and impact velocity

Fiber orientation angel of CFRP		Absorbed energy	Total absorbed energy	Mean load	Maximum collapse load
		E_a [J]	E_L [J]	P_m [kN]	P_{max} [kN]
15°	372.4J	321.91	417.95	3.50	9.92
	274.4J	241.95	407.16	3.15	7.85
	223.4J	215.85	382.95	3.37	8.12
45°	372.4J	312.14	348.55	3.31	7.77
	274.4J	223.94	339.64	3.18	7.25
	223.4J	203.84	301.96	3.09	8.91
90°	372.4J	309.50	324.23	3.19	8.11
	274.4J	217.64	311.27	3.10	9.94
	223.4J	194.91	279.90	3.02	8.21

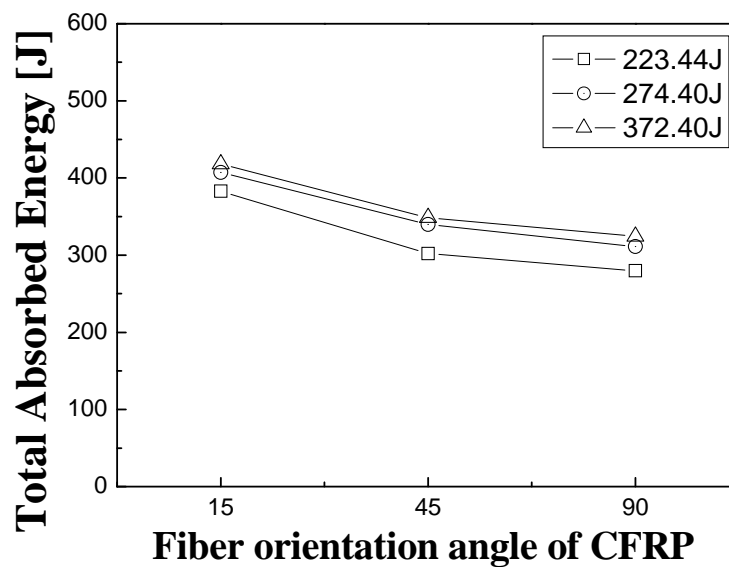


Fig. 61 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity

Table 5 Collapse test results for Circular members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 0°)

Interface number of CFRP		Absorbed energy	Total absorbed energy	Mean load	Maximum collapse load
		E_a [J]	E_L [J]	P_m [kN]	P_{max} [kN]
2I	611.52J	568.61	680.43	7.8	14.23
	529.20J	500.82	1048.12	6.45	14.21
	419.44J	385.66	1058.6	4.34	9.98
4I	611.52J	583.99	1331.99	8.85	16.38
	529.20J	504.74	1382.12	8.99	15.43
	419.44J	400.43	1398.54	8.94	14.57
6I	611.52J	576.25	975.09	7.79	12.74
	529.20J	499.13	1038.22	7.13	11.51
	419.44J	399.74	1080.5	6.53	11.01

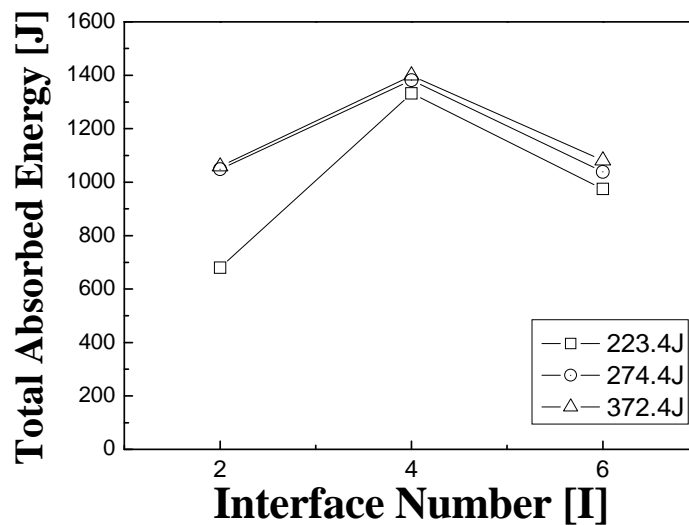


Fig. 62 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity (Outer layer 0°)

Table 6 Collapse test results for Circular members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 90°)

Interface number of CFRP		Absorbed energy	Total absorbed energy	Mean load	Maximum collapse load
		E_a [J]	E_L [J]	P_m [kN]	P_{max} [kN]
2I	372.4J	585.41	1762.48	10.56	18.97
	274.4J	511.19	1796.51	11.29	17.49
	223.4J	407.71	1800.95	12.42	19.15
4I	372.4J	578.17	1078.72	8.67	15.12
	274.4J	503.79	1094	7.17	12.12
	223.4J	399.88	1293.37	6.99	12.13
6I	372.4J	586.79	1695.01	12.53	19.38
	274.4J	513.04	1729.5	11.71	17.17
	223.4J	403.84	1815.96	10.46	17.45

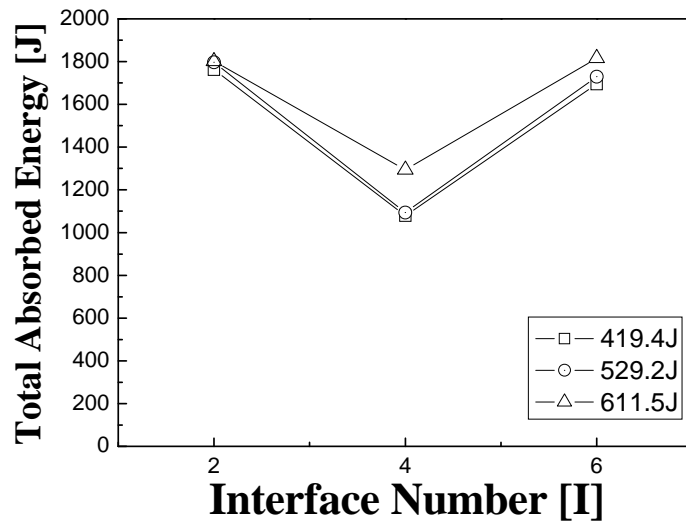


Fig. 63 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity (Outer layer 90°)

Table 7 Collapse test results for Square members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 0°)

Interface number of CFRP		Absorbed energy	Total absorbed energy	Mean load	Maximum collapse load
		E_a [J]	E_L [J]	P_m [kN]	P_{max} [kN]
2I	372.4J	367.63	400.74	4.82	9.66
	274.4J	297.78	408.83	3.1	7.41
	223.4J	236.53	440.52	4.55	9.37
4I	372.4J	378.68	451	3.92	8.5
	274.4J	270.23	496.33	3.73	8.98
	223.4J	218.73	506.35	3.54	10.85
6I	372.4J	374.64	449.99	10.45	10.4
	274.4J	275.66	449.98	3.72	9.01
	223.4J	224.56	470.74	3.84	9.51

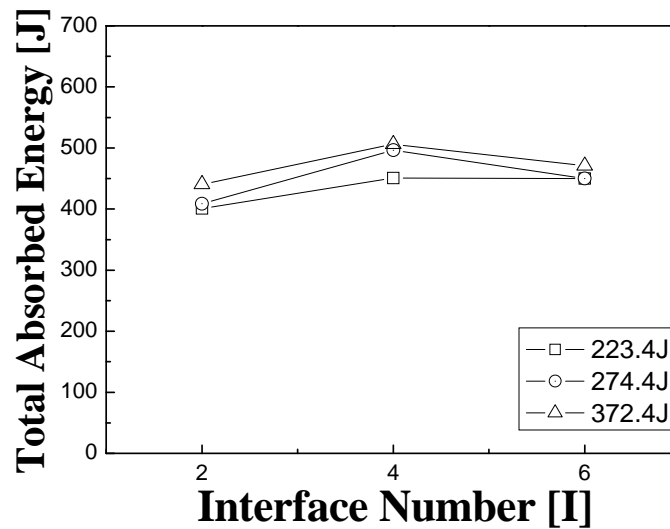


Fig. 64 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity (Outer layer 0°)

Table 8 Collapse test results for Square members according to interface numbers and impact velocity (Outer layer 90°)

Interface number of CFRP		Absorbed energy	Total absorbed energy	Mean load	Maximum collapse load
		E_a [J]	E_L [J]	P_m [kN]	P_{max} [kN]
2I	372.4J	357.49	500.55	3.75	10.98
	274.4J	273.76	473.65	3.58	9.13
	223.4J	213.95	570.03	3.85	10.11
4I	372.4J	365.21	456.19	2.85	3.94
	274.4J	249.38	393.1	3.04	8.94
	223.4J	223.77	492.48	3.57	8.87
6I	372.4J	367.66	514.44	3.78	8.47
	274.4J	266.01	504.75	4.09	6.25
	223.4J	222.81	532.71	3.89	6.93

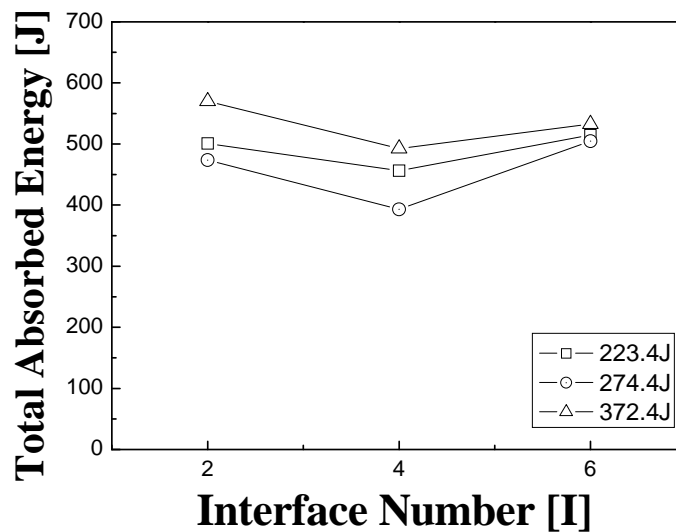


Fig. 65 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity (Outer layer 90°)

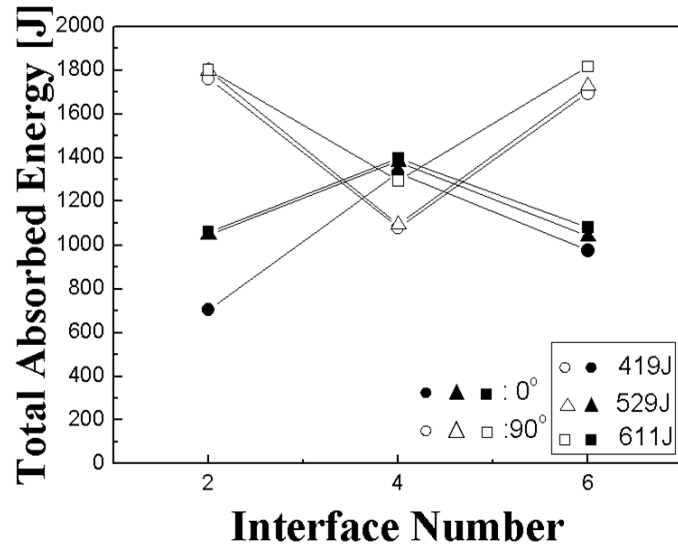


Fig. 66 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity

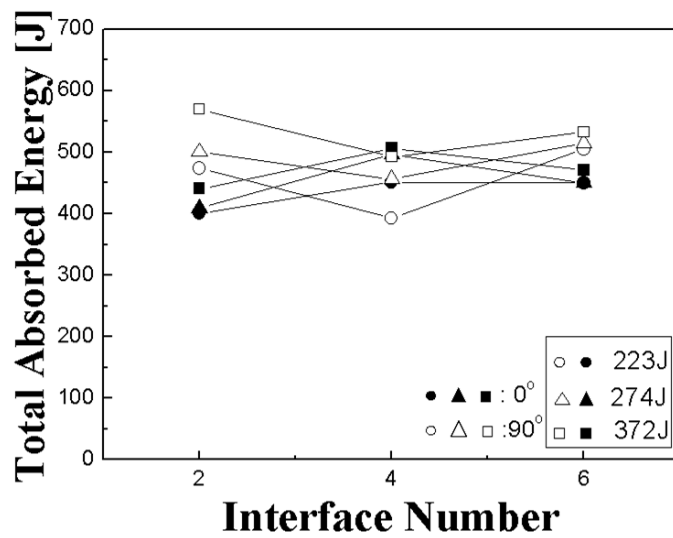


Fig. 67 Relationship between interface number of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity

5-3 충격 특성

본 연구에서는 적층각 및 형상이 다른 CFRP 구조부재에 충격에너지가 변화 할 때의 충격특성을 정량적으로 평가하기 위하여 자체 제작한 수직식 공기압 충격 시험장치를 이용하여 충격 압력실험을 행하였다.

충격속도는 CFRP 적층재의 흡수능력을 고려하여 결정하였다. Fig. 68, 69는 충격속도의 변화에 따른 원형 CFRP구조부재 및 사각형 CFRP구조부재의 동적특성과 적층각과의 관계를 최소자승법으로 Plot하여 나타냈다.

Fig. 68, 69에서 ○ : 15°, △ : 45°, □ : 90의 적층각을 나타내고, 각각 적층각이 15°, 45°, 90° 인 원형 및 사각형 CFRP 구조부재의 충격에너지 변화에 따른 충격응력의 변화관계를 나타냈다. 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 원형 구조부재의 경우는 기울기가 적층각 15° 일 때 0.000556, 45° 일 때 0.000786 그리고 90° 일 때 0.000835 이고, 사각형 부재의 경우는 기울기가 15° 일 때 0.001639, 45° 일 때 0.002177, 그리고 90° 일 때 0.002312로써 사각형 CFRP 구조부재가 원형 CFRP 구조부재보다 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 빠르게 증가함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 Fig. 68, 69에서 동적특성을 나타내는 동적특성계수 ϕ 로 나타냈다.

$\phi = \frac{\sigma_I}{\sigma_s}$ (정적압력응력을 σ_s , 충격압력응력을 σ_I)를 나타낸다. $\phi = 1$ 인 경우는

$\frac{\sigma_I}{\sigma_s}$ 로서 정적 압력상태이며 충격에너지가 증가할수록 정적압력응력에 기울기를 더한 값만큼 충격응력이 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 70, 71은 각각 2, 4, 6계면의 원형 CFRP 구조부재에 대하여 충격에너지 변화에 따른 충격응력의 변화관계를 나타냈고, Fig. 72, 73은 각각 2, 4, 6계면의 사각형 CFRP 구조부재의 충격에너지 변화에 따른 충격응력의 변화관계를 나타냈다. 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 70, 71로부터 최외각 0° 로 적층된 원형

CFRP부재의 경우 2계면에서 기울기가 0.001736, 4계면일 때 0.001777 그리고 6계면일 때 0.002052로 6계면일 때 기울기가 가장 높았다고, 최외각 90° 인 경우 역시 2계면일 때 0.001521, 4계면일 때 0.001618 그리고 6계면일 때 0.001751로써 6계면일 때의 기울기가 가장 높았다. 또한 Fig. 72, 73로부터 최외각 0° 로 적층된 사각형 CFRP부재의 경우 기울기가 2계면일 때 0.002876, 4계면일 때 0.002807 그리고 6계면일 때 0.002153으로 2계면일 때 기울기가 가장 높았고, 최외각 90° 로 적층된 사각형 부재의 경우 역시 2계면일 때 0.002621, 4계면일 때 0.002807 그리고 6계면일 때 0.002579 의 기울기를 나타냈다. 이로써 사각형 CFRP구조부재가 원형 CFRP 구조부재 보다 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 증가함을 알 수 있었다.

충격에너지의 변화에 따른 충격응력의 변화를 정리하면, 사각형 CFRP구조부재의 경우 최외각층에 관계없이 2계면일 때 가장 높은 충격응력의 증가를 보여주었고, 반대로 원형 시험편의 경우 최외각층에 관계없이 6계면 일 때 가장 높은 충격응력의 증가를 보여주었다.

향후 더 많은 충격 실험을 통하여 충격압력 시 시험편의 변형에 어느 정도의 에너지가 소요되는지, 시험장치의 반발에너지, 마찰에너지 등의 영향은 없는지를 검토하면 더욱더 정량적인 자료를 얻을 수 있으리라 생각된다.

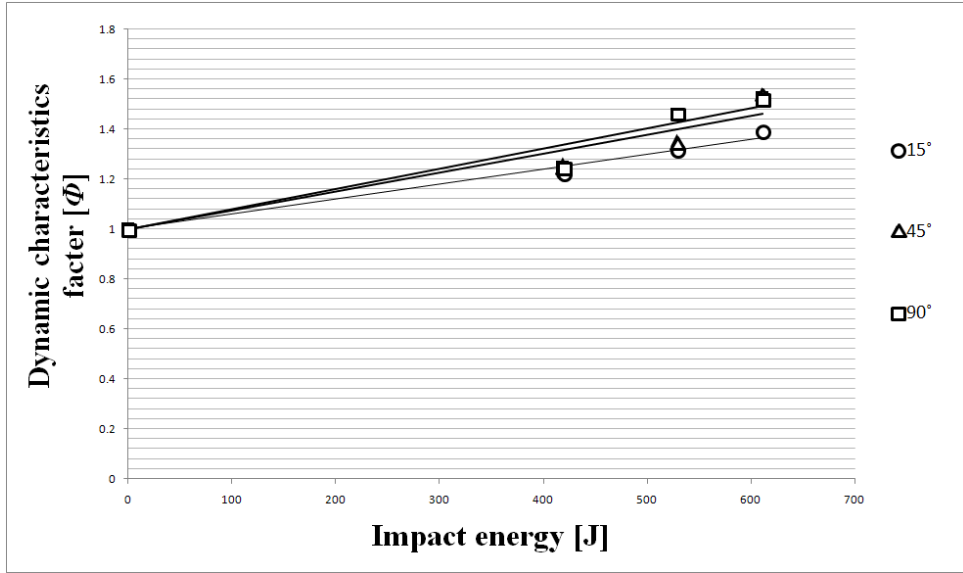


Fig. 68 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity

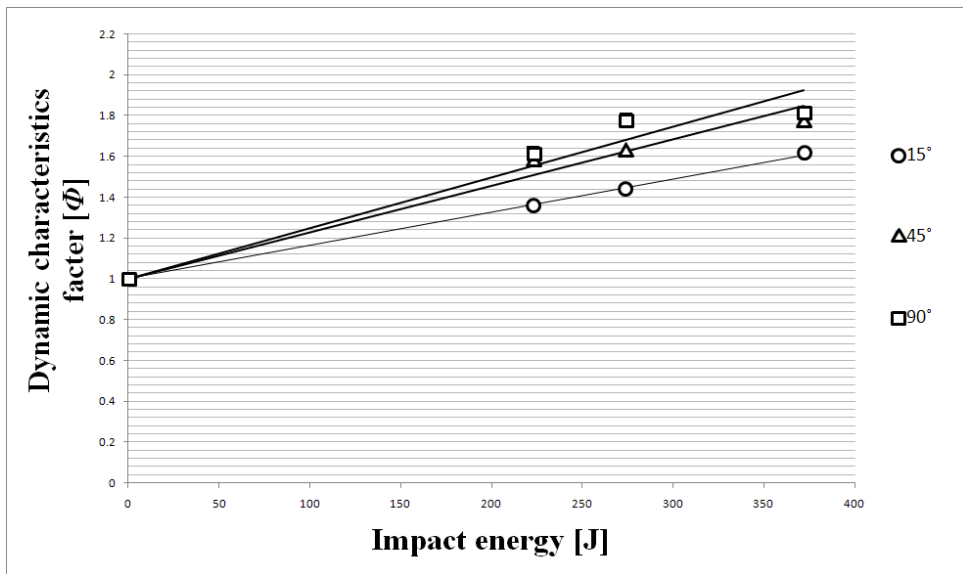


Fig. 69 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity

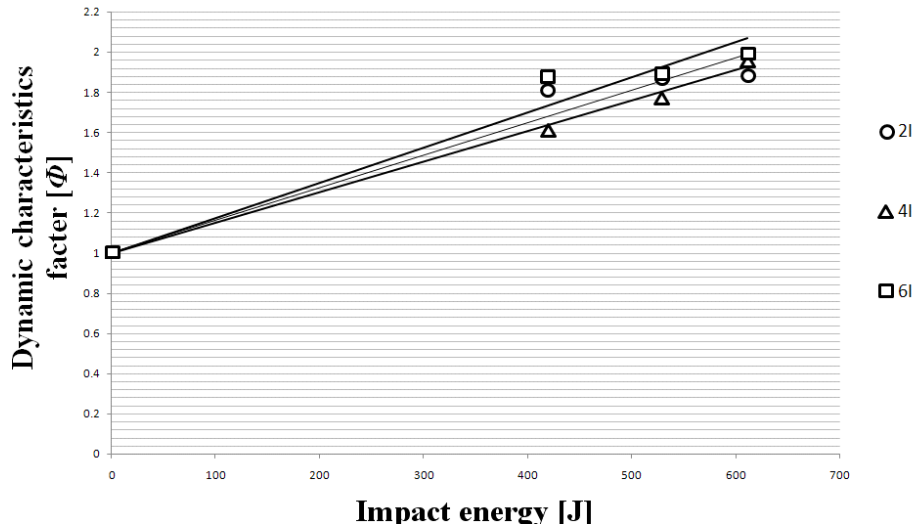


Fig. 70 Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity (outer angle 0°)

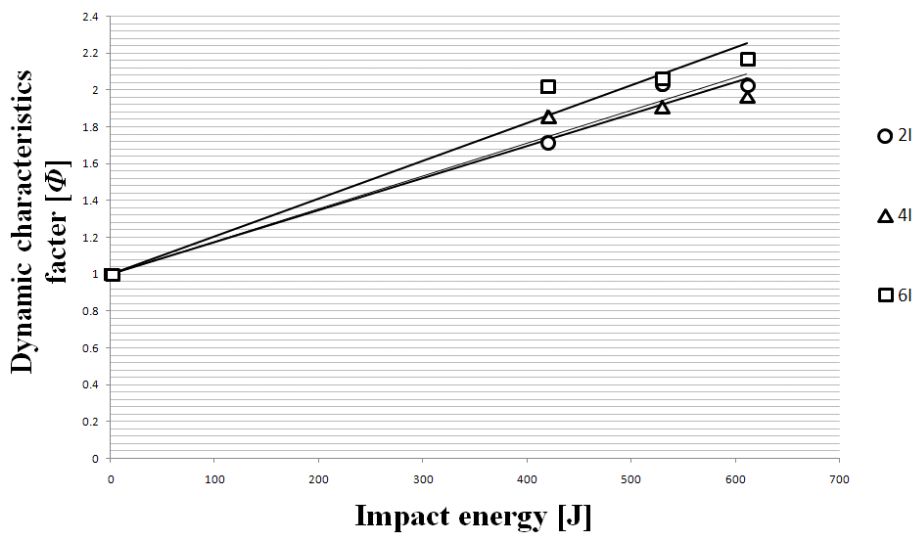


Fig. 71 Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity (outer angle 90°)

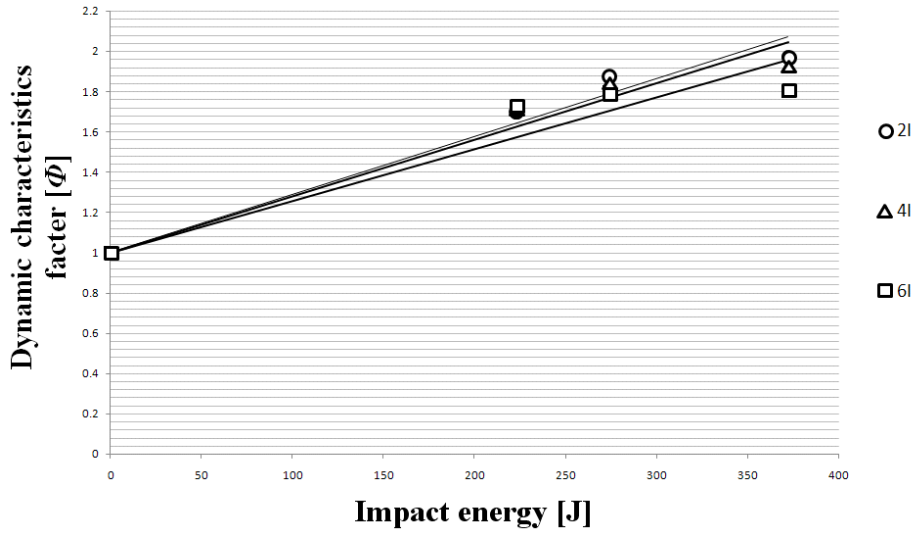


Fig. 72 Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity (outer angle 0°)

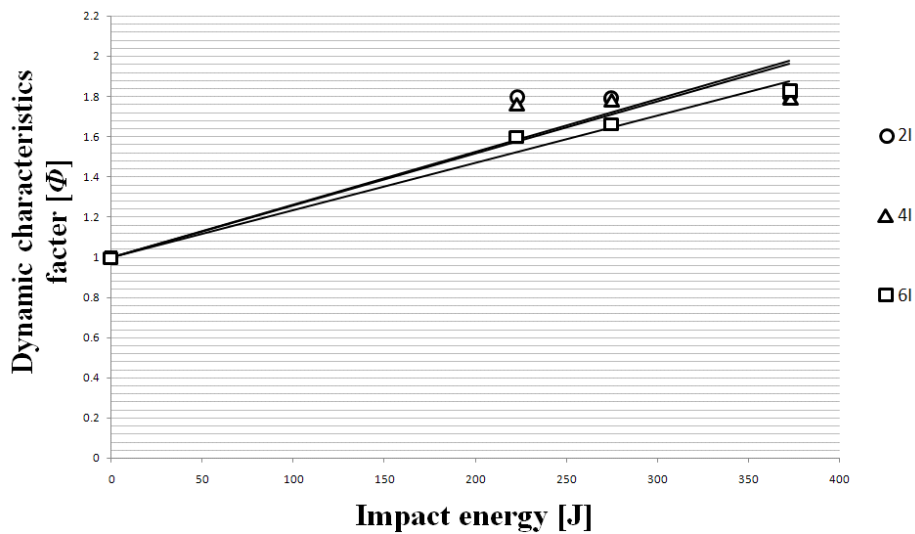


Fig. 73 Relationship between interface number of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity (outer angle 90°)

제 6 장 결 론

본 연구에서는 충격속도 변화에 따른 적층구성 및 형상이 다른 CFRP 구조부재에 다양한 충격이 가해질 때의 CFRP 구조부재의 충격특성을 고찰 하였다. 특히, 각각의 형상의 변화, 계면수 및 적층각의 변화에 따른 흡수에너지 및 동적특성을 정량적으로 고찰하여 경량화를 고려한 수송기계의 개발 및 설계 시 유용한 자료를 얻고자 하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 적층각이 15° 일 때 흡수에너지가 가장 크게 나타났으며 적층각이 45° , 90° 순으로 낮게 나타났고, 적층각 15° 인 부재는 스플라인 모드로 압괴 되었으며, 적층각 45° 인 부재의 경우는 스플라인 모드와 섬유 파단이 혼합된 혼합모드로 압괴 되었다. 또한, 적층각 90° 인 부재의 경우는 섬유의 국부좌굴에 의한 안정적인 굽힘을 보이며 압괴되었다.
2. 사각형 CFRP 부재의 경우 계면수 및 최외층각의 변화에 따라 충격에너지가 크게 변화 하였는데, 최외층각이 90° 인 경우 0° 일 때 보다 2계면일 때 약 18.3%, 6계면일 때 12.5%정도 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있었고, 원통 CFRP 부재의 경우 사각형 CFRP 부재와 비슷한 경향을 보이고 있으나, 최외층각이 90° 일 때 가 0° 일 때 보다 각각 66%, 40% 이상 많은 에너지를 흡수하였다. 특히, 2계면일 때가 최외층각도의 변화에 민감함을 알 수 있었다. 이는 최외층각이 90° 일 때 섬유의 파단에 의해 섬유의 굽힘이 혼합되어 나타나는 취성파괴의 특성 때문이라 생각된다.
3. 충격에너지가 증가할수록 충격응력은 크게 나타났다. 특히, 원형 CFRP구조부재 보다 사각형 CFRP구조부재의 동적특성을 나타내는 기울기가 더 크게 나타났고, 적층각이 클수록 크게 나타났다. 이로부터 원형 CFRP부재보다 사각형 CFRP부재가 충격에 더 민감함을 알 수 있다.

4. 사각형 및 원형 CFRP부재 모두 충격에너지의 크기에 따라 충격응력이 선형적으로 증가하였으며, 정적압축응력에 충격에너지의 변화에 따른 기울기 값을 더한 값만큼 선형적으로 증가 하였다. 사각형 CFRP부재는 계면수가 적을수록 원형 CFRP부재는 계면수가 많을수록 큰 기울기를 나타낸다.

참 고 문 헌

1. Kwon, M. S.. "Trend of Korea Automotive Technology (IV)." *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* **26**:32-36, 2004
2. 광규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 『자동차경제』, 24-29, 1997
3. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (VI)." 『자동차공학회지』 **26**:30-35, 2004.
4. Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H. and Park, G. G.. "Light weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments." *Transactions of KSAE* **10**:125-132, 2002.
5. 김범진·허승진. "알루미늄 경량 차체의 충돌에너지 흡수 성능 향상을 위한 설계 개선 연구." 『자동차공학회 논문집』 **11**:155-160, 2003.
6. Hanssen, A. G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S.. "Optimum design for energy absorption of square aluminum columns with aluminium foam filler." *Int. J. Mech. Sci.* **43**:153-176, 2001.
7. 김천욱·한병기·원종진·임채홍. "자동차 충돌특성 연구동향." 『자동차공학회지』 **18**:1-17, 1996.
8. Li, S. and Reid, S. R.. "Relationship Between the Elastic Buckling of Square Tubes and Rectangular Plates." *International Journal of Applied Mechanics* **57**:969-973, 1990.
9. Avalle, M. and Belingardi, G.. "Experimental evaluation of the strain field history during plastic progressive folding of aluminum circular tubes." *Int. J. Mech. Sci.* **39**:575-583, 1997.
10. Singace, A. A.. "Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-mode." *Int. J. Mech. Sci.* **41**:865-890, 1999.
11. 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.
12. Minoru, Y., Manabu, G. and Yasuhiko S.. "Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections numerical simulation and experiment." *Journal of Materials Processing Technology* **140**:59-64, 2003.
 13. Farley, G. L. and Jones, R. M.. "Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes", *Journal of Composite Materials*, **26**:388-404, 1991.
 14. Farley, G. L.. "Relationship between mechanical-property and energy-absorption trends for composite tubes." *NASA Technical paper, OMB* 0704-0188, 1992.
 15. 김영남·차천석·양인영. "CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘에 관한 실험적 연구." 『한국자동차공학회논문집』 **10**:149-157, 2002.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압괴특성." 조선대학교 박사논문, 2002
 20. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Demosthenous, G. A. and Johnson, W.. "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy

- Dissipating Systems." *International Journal of Impact Engineering* **11**:185–196, 1991.
21. Andre Laoie, J., and Kellas, S.. "Dynamic crush tests of energy-absorbing laminated composite plates." *Composite : part A* **27A**:467–475, 1996.
 22. Hanefi, E. I. and Wierzbicki, T.. "Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes." *Composite : part B* **27B**:387–396, 1996.
 23. Broughton, J. G., Beevers, A. and Hutchinson, A. R.. "Carbon-fibre-reinforced Plastic(CFRP) strengthening of aluminum extrusions." *Int. J. Adhesion and adhesives* **17**:269–278, 1997.
 24. Wu, E. and Jiang, W. W.. "Axial Crush of Metallic Honeycombs." *International Journal of Impact Engineering* **19**:439–456, 1997.
 25. Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M. and Du, X. W.. "Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes." *International Journal of Impact Engineering* **24**:385–401, 2000.
 26. 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.
 27. Shin, K. C., Lee, J. J., Kim, K. H., Song, M. C. and Huh, J. S.. "Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability." *Composite Structures* **57**:279–287, 2002.
 28. 광성복·문찬성. "고분자 적용 크래쉬 패드 부품 성형 기술." 『한국자동차공학회 오토저널』 **12**:26–34, 2010.
 29. 유승을·정선경. "자동차용 미래 섬유 개발 동향." 『한국자동차공학회 오토저널』 **12**:35–43, 2010.
 30. Aya N. and Takahashi K., "Energy absorption characteristics of

vehicles body structure." *Japan Society of Automotive Engineers Bulletin* 7:65-74, 1976.

31. White, M. D. and Jones, N.. "Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections." *Int. J. Mech. Sci.*41:179-208, 1999.
32. Ohkubo Y, Akamatsu T. and Shirasawa K.. "Mean Crushing strength of closed-hat section members." Society of Automotive Engineers paper No. 740040, 1974.
33. Tani M. and Funahashi A.. "Energy absorption by the plastic deformation of body structural members." Paper 783068 presented at S.A.E. Annual Meeting, Detroit, February 1978. 2002.
34. Cha, C. S., Chung, J. O., Park, J. W., Kim, Y. N., and Yang, I. Y.. "Collapse analysis of spot welded thin section members in a vehicle body structure at various impact velocities." *KSME International Journal* 17:501-510, 2003.
35. Wang, Q., Fan, Z. and Gui, L.. "Theoretical analysis for axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections." *Int. J. Mech. Sci.* 49:515-521, 2007.
36. Song, H, Fan, Z., Yu, G., Wang, Q. and Tobota, A.. "Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections." *Int. J. Solids and Structures* 42:2575-2600, 2005
37. 차천석. "박육단면 차체구조부재의 충격압력 특성평가." 조선대학교 박사논문, 2000.