creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000236356

2008년 2월
박사학위논문

충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가

조 선 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

이 길 성

충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가

Evaluation of Safety Performance on Lightweight Vehicle Structural Members for the use of Impact Absorption

2008 년 *2* 월 *25* 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

이 길 성

충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2007 년 *10* 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

이 길 성

이길성의 박사학위 논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	심 재 기	㊞
위 원	조선대학교	교수	최 병 기	㊞
위 원	조선대학교	교수	김 지 훈	㊞
위 원	우석대학교	교수	임 광 희	㊞
위 원	조선대학교	교수	양 인 영	㊞

2007 년 *12* 월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES ..... Ⅰ
LIST OF FIGURES ..... Ⅱ
LIST OF PHOTOGRAPHS ..... Ⅶ
ABSTRACT ..... Ⅺ

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구배경 1
제 2 절 연구동향 4
1. 모자형 단면부재의 압궤특성에 관한 연구 4
2. 알루미늄 부재의 압궤특성에 관한 연구 5
3. CFRP 부재의 압궤특성에 관한 연구 6
제 3 절 연구목표 및 내용 9

제 2 장 실험방법 11
제 1 절 시험편 11
제 2 절 실험장치 16
제 3 절 압궤실험 20

제 3 장 사각 Al/CFRP 혼성 부재의 안전성능평가 22
제 1 절 적층각도 변화에 따른 압궤특성 23
제 2 절 계면수 변화에 따른 압궤특성 34
제 3 절 결과 및 고찰 40

1. 사각 Al/CFRP 혼성 부재의 압궤모드 ····· 40
2. 사각 Al/CFRP 혼성 부재의 에너지 흡수 특성 ····· 43

제 4 장 원형 Al/CFRP 혼성 부재의 안전성능평가 ····· 48
제 1 절 적층각도 변화에 따른 압궤특성 ····· 49
제 2 절 계면수 변화에 따른 압궤특성 ····· 60
제 3 절 결과 및 고찰 ····· 66
1. 원형 Al/CFRP 혼성 부재의 압궤모드 ····· 66
2. 원형 Al/CFRP 혼성 부재의 에너지 흡수 특성 ····· 69

제 5 장 모자형 CFRP 부재의 안전성능평가 ····· 74
제 1 절 적층각도 변화에 따른 압궤특성 ····· 76
제 2 절 계면수 변화에 따른 압궤특성 ····· 82
제 3 절 단면적비 변화에 따른 압궤특성 ····· 88
제 4 절 알루미늄 보강에 의한 모자형 혼성 부재의 압궤특성 ····· 92
제 5 절 결과 및 고찰 ····· 96
1. 모자형 CFRP 부재의 압궤모드 ····· 96
2. 모자형 CFRP 부재의 에너지 흡수 특성 ····· 99

제 6 장 결 론 ····· 106

참 고 문 헌 ····· 108

LIST OF TABLES

Table 1 Characteristics and use of the aluminum and CFRP ····· 13
Table 2 Material properties of the aluminum ····· 14
Table 3 Material properties of the CFRP prepreg sheet ····· 14
Table 4 Collapse modes and energy absorption mechanisms of square compound member ····· 42
Table 5 Static collapse test results for square compound member according to fiber orientation angle of CFRP ····· 45
Table 6 Impact collapse test results for square compound member according to fiber orientation angle of CFRP ····· 46
Table 7 Static collapse test results for square compound member according to interface number ····· 47
Table 8 Collapse modes and energy absorption mechanisms of circular compound member ····· 68
Table 9 Static collapse test results for circular compound member according to fiber orientation angle of CFRP ····· 71
Table 10 Impact collapse test results for circular compound member according to fiber orientation angle of CFRP ····· 72
Table 11 Static collapse test results for circular compound member according to interface number ····· 73
Table 12 Static collapse test results for hat shaped CFRP member according to fiber orientation angle of CFRP ····· 102
Table 13 Static collapse test results for hat shaped CFRP member according to interface number ····· 103
Table 14 Static collapse test results for hat shaped CFRP member according to sectional area ratio ····· 104
Table 15 Static collapse test results for hat shaped compound member ···· 105

LIST OF FIGURES

Fig. 1 The goal of automobile technology development ····· 3
Fig. 2 Collapse mode of hat shaped section member after experiment and simulation ····· 7
Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen ····· 15
Fig. 4 Impact testing setup for crushing ····· 18
Fig. 5 Diagram of measurement system ····· 19
Fig. 6 Configuration of square compound member ····· 22
Fig. 7 Load-displacement curve of square compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle) ····· 24
Fig. 8 Load-displacement curve of square compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle) ····· 25
Fig. 9 Load-displacement curve of square compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle) ····· 26
Fig. 10 Load-displacement curve of square compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 27
Fig. 11 Load-displacement curve of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 28
Fig. 12 Load-displacement curve of square compound member, $[+15_2/-15_2]_S$ (Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle) ····· 29
Fig. 13 Load-displacement curve of square compound member, $[+45_2/-45_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 45° fiber orientation angle) ····· 30
Fig. 14 Load-displacement curve of square compound member, $[90]_8$ (Impact energy: 833.07J, 90° fiber orientation angle) ····· 31
Fig. 15 Load-displacement curve of square compound member, $[0_2/90_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 0°/90°/0° fiber orientation angle) ····· 32

Fig. 16 Load-displacement curve of square compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 90°/0°/90° fiber orientation angle) ····· 33
Fig. 17 Load-displacement curve of square compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number) ····· 35
Fig. 18 Load-displacement curve of square compound member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number) ····· 36
Fig. 19 Load-displacement curve of square compound member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number) ····· 37
Fig. 20 Load-displacement curve of square compound member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number) ····· 38
Fig. 21 Load-displacement curve of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number) ····· 39
Fig. 22 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for square compound member (static) ····· 45
Fig. 23 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for square compound member (impact) ····· 46
Fig. 24 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for square compound member (static) ····· 47
Fig. 25 Configuration of circular compound member ····· 48
Fig. 26 Load-displacement curve of circular compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle) ····· 50
Fig. 27 Load-displacement curve of circular compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle) ····· 51
Fig. 28 Load-displacement curve of circular compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle) ····· 52
Fig. 29 Load-displacement curve of circular compound member, $[90/0]_4$ ((Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 53
Fig. 30 Load-displacement curve of circular compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 54

Fig. 31 Load-displacement curve of circular compound member, $[+15_2/-15_2]_S$ (Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle) ····· 55
Fig. 32 Load-displacement curve of circular compound member, $[+45_2/-45_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 45° fiber orientation angle) ····· 56
Fig. 33 Load-displacement curve of circular compound member, $[90]_8$ (Impact energy: 833.07J, 90° fiber orientation angle) ····· 57
Fig. 34 Load-displacement curve of circular compound member, $[0_2/90_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 0°/90°/0° fiber orientation angle) ····· 58
Fig. 35 Load-displacement curve of circular compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 90°/0°/90° fiber orientation angle) ····· 59
Fig. 36 Load-displacement curve of circular compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number) ····· 61
Fig. 37 Load-displacement curve of circular compound member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number) ····· 62
Fig. 38 Load-displacement curve of circular compound member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number) ····· 63
Fig. 39 Load-displacement curve of circular compound member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number) ····· 64
Fig. 40 Load-displacement curve of circular compound member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number) ····· 65
Fig. 41 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for circular compound member (static) ····· 71
Fig. 42 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for circular compound member (impact) ···· 72
Fig. 43 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for circular compound member (static) ····· 73
Fig. 44 Configuration of hat shaped member ····· 75
Fig. 45 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle) ····· 77

Fig. 46 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle) ····· 78
Fig. 47 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle) ····· 79
Fig. 48 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 80
Fig. 49 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 81
Fig. 50 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number) ····· 83
Fig. 51 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number) ····· 84
Fig. 52 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number) ····· 85
Fig. 53 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number) ····· 86
Fig. 54 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number) ····· 87
Fig. 55 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member (Static, sectional area ratio: 1.05) ····· 89
Fig. 56 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member (Static, sectional area ratio: 2.11) ····· 90
Fig. 57 Load-displacement curve of hat shaped CFRP member (Static, sectional area ratio: 5.27) ····· 91
Fig. 58 Load-displacement curve of hat shaped compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle) ····· 93
Fig. 59 Load-displacement curve of hat shaped compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 94

Fig. 60 Load-displacement curve of hat compound shaped member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 95
Fig. 61 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for hat shaped CFRP member (static) ····· 102
Fig. 62 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for hat shaped CFRP member (static) ····· 103
Fig. 63 Relationship between sectional area ratio and absorbed energy per unit mass for hat shaped CFRP member (static) ····· 104
Fig. 64 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy for hat shaped compound member and sum of the Al & the hat shaped CFRP member (static) ····· 105

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Collapse mode of Aluminum member according to change of thickness ····· 7
Photo. 2 Fracture section of the collapsed specimens ····· 8
Photo. 3 Autoclave ····· 15
Photo. 4 Universal testing machine ····· 17
Photo. 5 Collapse processing of square compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle) ····· 24
Photo. 6 Collapse processing of square compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle) ····· 25
Photo. 7 Collapse processing of square compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle) ····· 26
Photo. 8 Collapse processing of square compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 27
Photo. 9 Collapse processing of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 28
Photo. 10 Shape of collapsed square compound member, $[+15_2/-15_2]_S$ (Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle) ····· 29
Photo. 11 Shape of collapsed square compound member, $[+45_2/-45_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 45° fiber orientation angle) ····· 30
Photo. 12 Shape of collapsed square compound member, $[90]_8$ (Impact energy: 833.07J, 90° fiber orientation angle) ····· 31
Photo. 13 Shape of collapsed square compound member, $[0_2/90_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 0°/90°/0° fiber orientation angle) ····· 32
Photo. 14 Shape of collapsed square compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Impact energy: 833.07J, 90°/0°/90° fiber orientation angle) ····· 33

Photo. 15 Collapse processing of square compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Static, 2 interface number) ····· 35
Photo. 16 Collapse processing of square compound member, $[0_2/90_2]_2$
(Static, 3 interface number) ····· 36
Photo. 17 Collapse processing of square compound member, $[90/0]_{S2}$
(Static, 4 interface number) ····· 37
Photo. 18 Collapse processing of square compound member, $[90/0]_{2S}$
(Static, 6 interface number) ····· 38
Photo. 19 Collapse processing of square compound member, $[0/90]_4$
(Static, 7 interface number) ····· 39
Photo. 20 Typical collapse modes of square compound member ····· 42
Photo. 21 Collapse processing of circular compound member, $[+15/-15]_4$
(Static, 15° fiber orientation angle) ····· 50
Photo. 22 Collapse processing of circular compound member, $[+45/-45]_4$
(Static, 45° fiber orientation angle) ····· 51
Photo. 23 Collapse processing of circular compound member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle) ····· 52
Photo. 24 Collapse processing of circular compound member, $[90/0]_4$
(Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 53
Photo. 25 Collapse processing of circular compound member, $[0/90]_4$
(Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 54
Photo. 26 Shape of collapsed circular compound member, $[+15_2/-15_2]_S$
(Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle) ····· 55
Photo. 27 Shape of collapsed circular compound member, $[+45_2/-45_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 45° fiber orientation angle) ····· 56
Photo. 28 Shape of collapsed circular compound member, $[90]_8$
(Impact energy: 833.07J, 90° fiber orientation angle) ····· 57
Photo. 29 Shape of collapsed circular compound member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 0°/90°/0° fiber orientation angle) ····· 58

Photo. 30 Shape of collapsed circular compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 90°/0°/90° fiber orientation angle) ····· 59
Photo. 31 Collapse processing of circular compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Static, 2 interface number) ····· 61
Photo. 32 Collapse processing of circular compound member, $[0_2/90_2]_2$
(Static, 3 interface number) ····· 62
Photo. 33 Collapse processing of circular compound member, $[90/0]_{S2}$
(Static, 4 interface number) ····· 63
Photo. 34 Collapse processing of circular compound member, $[90/0]_{2S}$
(Static, 6 interface number) ····· 64
Photo. 35 Collapse processing of circular compound member, $[0/90]_4$
(Static, 7 interface number) ····· 65
Photo. 36 Typical collapse modes of circular compound member ····· 68
Photo. 37 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[+15/-15]_4$
(Static, 15° fiber orientation angle) ····· 77
Photo. 38 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[+45/-45]_4$
(Static, 45° fiber orientation angle) ····· 78
Photo. 39 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle) ····· 79
Photo. 40 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90/0]_4$
(Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 80
Photo. 41 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$
(Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 81
Photo. 42 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90_2/0_2]_S$
(Static, 2 interface number) ····· 83
Photo. 43 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[0_2/90_2]_2$
(Static, 3 interface number) ····· 84
Photo. 44 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{S2}$
(Static, 4 interface number) ····· 85

Photo. 45 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{2S}$
(Static, 6 interface number) ····· 86
Photo. 46 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$
(Static, 7 interface number) ····· 87
Photo. 47Collapse processing of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 1.05) ····· 89
Photo. 48 Collapse processing of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 2.11) ····· 90
Photo. 49 Collapse processing of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 5.27) ····· 91
Photo. 50 Collapse processing of hat shaped compound member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle) ····· 93
Photo. 51 Collapse processing of hat shaped compound member, $[90/0]_4$
(Static, 90°/0° fiber orientation angle) ····· 94
Photo. 52 Collapse processing of hat compound shaped member, $[0/90]_4$
(Static, 0°/90° fiber orientation angle) ····· 95
Photo. 53 Typical collapse modes of hat shaped CFRP member ····· 98

ABSTRACT

Evaluation of Safety Performance on Lightweight Vehicle Structural Members for the use of Impact Absorption

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

The purpose of this study is to evaluate the safety performance of lightweight vehicular members for the use of impact absorption. The recent trend in vehicular design is aimed at improving both the environment-friendly quality and collision safety requirements for the vehicles. For the former, the trend is toward light-weight of vehicles to improve fuel efficiency and reduce tail gas emission due to the heavier restriction on exhaust levels. For the latter, however, the trend is toward higher safety performance, comfort level, high-efficiency and multi-functional programs which all increase the weight demands. Therefore, the light weight of vehicle must be achieved in a status of securing safety of collision.

In this study, the lightweight vehicular members of impact absorption were made of aluminum and composite materials, which are representative light-weight materials. Those members were analyzed by collapse characteristics under axial loading. The axial collapse tests were

performed for square, circular and hat-shaped members which are basic shape of vehicle structural members. Because the carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are anisotropic materials whose mechanical properties, such as strength and elasticity, change with its stacking condition, special attention were given to the effects of the stacking condition on the collapse characteristics for the vehicular members of impact absorption.

Following the above study, conclusions are drawn as below;

1. The collapse modes for the square Al/CFRP compound member are classified into split mode, combination mode, folding mode and fragmentation and splaying mode. Those phenomena were mainly determined by the orientation angle of the CFRP. When the orientation angle of the CFRP was small, the members were separated the each member at the interface after the initial peak load. Those members absorbed energy by progressive deformation of the inner aluminum member and laminar bending of the outer CFRP members. As the orientation angle increases, the fiber withstands the load through the hoop stress. The inner aluminum member collapsed in progressive deformation and fiber of the outer CFRP member was inserted between the folding of inner aluminum member by local buckling.

2. The square Al/CFRP compound members showed better energy absorption as fiber orientation angle of CFRP becomes larger. The most effective energy absorption was shown when it was 0°/90° with 90° orientation angle of outer. And the characteristics of energy absorption are independent on the variation of interface number.

3. The collapse modes for the circular Al/CFRP compound member are

classified into split mode, combination mode, fragmentation mode and fragmentation and splaying mode. Those phenomena depend on the orientation angle of the CFRP. When the orientation angle of the CFRP was small, the members were separated the each member at the interface after the initial peak load. Those members absorbed energy by progressive deformation of the inner aluminum member and laminar bending of the outer CFRP members. As the orientation angle increases, the fiber withstands the load through the hoop stress. The inner aluminum member collapsed in progressive deformation and most of the fibers were broken without being inserted between the folding of the aluminum member because the gap in the folding is too small.

4. The circular Al/CFRP compound members showed better energy absorption as fiber orientation angle of CFRP becomes larger like the square Al/CFRP compound members. The most effective energy absorption was shown when it was 0°/90° with 90° orientation angle of outer. And the energy absorbing characteristics are independent on the variation of interface number.

5. The CFRP hat shaped section members were collapsed according to the different orientation angles by compounding of the 4 different modes: transverse shearing, laminar bending, brittle fracture, and local buckling. When the fiber orientation angle was small, the members absorbed energy by laminar bending. As the fiber orientation angle increases, the member was absorbed energy by local buckling and matrix crack due to transverse shearing.

6. As shown the absorbed energy decreases linearly, energy absorption

was most effective when the fiber orientation angle of CFRP was 0°/90° and 90°/0° as the fiber orientation angle increases. The absorbed energy increases to the 6 interlaminar number with increasing interlaminar number. However, decreasing trend is observed on moving to the 7 interlaminar number. The energy absorption capability of the members increases as the sectional area ratio (sectional area ratio of flat member to "∩" shaped member) increase due to stress concentration on their edges. The absorbed energy of hat shaped compound members is slightly lower than that of combined effect of the CFRP member and the aluminum members alone. The interaction effect was not shown because inner aluminum member applied load to the outer CFRP members in the form of hoop stress; therefore the CFRP and the aluminum member were split each other.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

최근 자동차에 적용되는 핵심기술의 개발은 차량의 고안전도 및 편의성 향상기술과 사회적인 측면에서 새로운 해결과제로 부각되고 있는 환경보호를 위한 차량기술로 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] 따라서 빠르게 변화하는 자동차 기술에 있어 사람의 생명을 보호하는 안전기술은 가장 중요하고 시급하게 개발해야 할 과제이다. 이러한 고안전도 차량의 비중이 부각되면서 충돌에 관한 차량의 성능규제와 이에 대한 법적 규제가 날로 강화되고 있다. 미국의 경우에는 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard)라 불리는 연방법규를 제정하여 적용하고 있으며 유럽에서도 ECE/EEC 위원회 등을 통해서 충돌성능에 대한 유럽 통합 법규를 제정하고 있다. 자동차의 안전 기술은 1950년대 시트 벨트의 장착을 시작으로 견고한 자동차 구조와 사고 후 승객의 거동을 제한하여 승객의 생명보호 및 승객상해의 최소화를 위한 수동 개념의 안전기술 (Passive Safety)이 개발되었으며 최근에는 자동차에 센서, 카메라 등을 장착하여 운전자의 인지와 판단을 지원하며 운전조작의 용이성 및 각종 주행 조건에서의 차량의 운동성능 향상을 위한 능동 개념의 안전기술 (Active Safety)을 개발하여 충돌사고를 미리 예방하는 예방안전 기술이 개발되고 있다.[2-4] 따라서 차량 설계적인 측면에서 훨씬 보강된 차체설계가 요구되며 다기능화에 필수적인 여러 가지 부품의 장착은 무게증가의 요인으로 작용되고 있다.

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 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다.[5-7)]

상기에서 살펴본 바와 같이 고안전 및 편의성을 위한 차량의 개발은 차량의 무게 증가를 요구하고 있는 반면, 환경보호 차원에서 요구되는 차량의 기술적 요구사항은 차량의 경량화를 요구하고 있다. 따라서 자동차의 설계는 안전성이 확보된 상태에서 차량의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다. Fig. 1은 자동차 기술개발의 목표를 나타내고 있다.

차체 구조의 경량화를 위한 연구는 최적 구조설계 기술과 재료 및 소재개발 기술이라는 두 가지 측면으로 추진되고 있다. 복잡한 형상을 가지고 있는 차체 구조의 최적설계를 위한 강성해석이나 충돌해석 등을 위해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며,[8-12)] 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.[13-35)] 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 충돌조건, 차량구조, 승객구속장치 등의 요건으로 결정된다. 특히, 자동차의 충돌에 의

한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 70% 정도로써 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다.[36-43]

일반적으로 차체는 차량을 구성하는 구조부재나 패널류로써 엔진이나 현가장치 등 주행시 필요한 계기류, 시트 등이 탑재되어 차량으로 구성된다. 차체 앞부분은 엔진이나 현가장치를 지지하고 여러 보조기기류를 격납하는 역할도 하지만, 전면충돌시 에너지를 흡수할 수 있는 구조로 되어야 한다. 많은 차량에서는 차체 앞부분의 내판을 모자형 단면형상의 강도부재로 구성하여 충돌사고시 전면부 골격부재는 소성변형하여 충돌에너지를 흡수하도록 설계하고 있다. 또한, 차실을 감싼 구조부재는 차체 앞부분이 소성변형하면서 에너지를 흡수하는 동안에 그 자체는 변형되지 않고 차실내의 공간을 유지하도록 설계하고 있다. 즉, 차실내의 구조부재는 에너지흡수라고 하는 관점과 차체 앞부분으로부터 전달된 하중을 흡수·분산을 통하여 차실의 변형이 적게 되도록 설계된다. 특히, 차량의 초기설계 단계에서는 차량 전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압궤거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

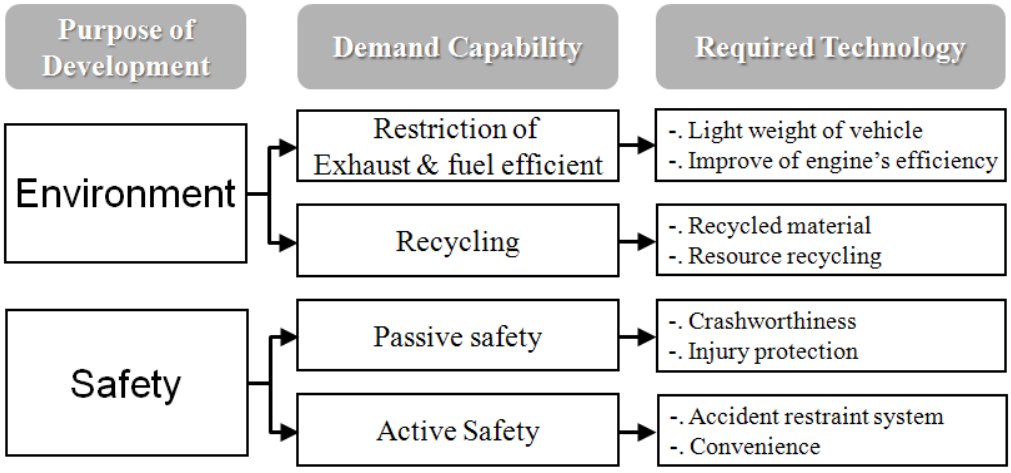


Fig. 1 The goal of automobile technology development

제 2 절 연구동향

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

지금까지의 차체구조부재의 압궤에 관한 연구동향을 살펴보면, 실제 차체구조부재인 점용접 모자형 단면부재에 대하여 seam용접상태에 있다는 가정하에서 Ohkubo 등[38-40]은 모자형 단면부재의 정적 평균압궤하중을 동역학적 분석을 활용하였으며, Wang 등은 알루미늄 폼이 충진된 모자형 단면부재의 알루미늄 폼의 변형에 의한 상호효과와 평균압궤하중을 이론적으로 해석하였다. 또한 사이드부재 형상을 모방한 상자형 단면을 기본으로 하는 여러 단면형상에 대해 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 복합재료 부재를 이용하여 축 방향 압궤실험을 행하였고 평균압궤응력을 이론적으로 해석함으로써 에너지 흡수 능력을 명확히 하고자 하였다. 최근에는 슈퍼컴퓨터와 FEM의 급격한 발달로 인해 구조부재의 충돌압궤 특성을 컴퓨터에서 예측하고자 하는 연구가 진행 중이다. 이러한 구조부재의 압궤특성에 관한 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

1. 모자형 단면부재의 압궤특성에 관한 연구

차[43]는 차량 전면부 사이드 부재의 기본형상인 점용접된 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재에 대하여 정적, 준정적 및 충격압궤하에서 두께 및 폭비의 변화와 플랜지 용접간격의 변화에 따른 압궤하중, 에너지 흡수능력, 변형모드와 같은 압궤특성을 정량적으로 평가할 수 있는 해석방법을 개발하기 위하여 압궤실험과 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 2와 같이 실험 및 시뮬레이션 결과 단일모자형 단면부재의 변형모드는 평판과 서로 마주보는 "ㅁ"자 단면부재의 벽면이 부재 외측방향으로 변형될 때 평판은 부재 내측방향으로 변형하는 평형모드가 되며, 이중모자형 단면부재는 압궤시 플랜지의 간섭에 의해서 불안전한 대칭모드가 지배적이였다. 정

적 및 준정적압궤시 흡수에너지 및 평균압궤하중은 단면부재의 폭비 변화에 큰 영향을 받지 않았지만 이중모자형 단면부재의 경우 충격압궤시에는 단면부재의 폭비가 클수록 높게 나타나는 경향이 있었으며 플랜지 용접간격에 따라서는 플랜지 용접간격이 짧을수록 높게 나타났다. 또한 압궤속도가 빠를수록 압궤하중 및 에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났다. 이중모자형 단면부재의 전체흡수에너지 및 평균압궤하중은 단일모자형 단면부재에 비하여 정적, 준정적인 경우에 약 55%, 충격압궤시 약 39% 높게 나타났으며, 최대압궤하중은 정적, 준정적인 경우에 약 13%, 충격압궤시 약 6.5% 높게 나타났다.

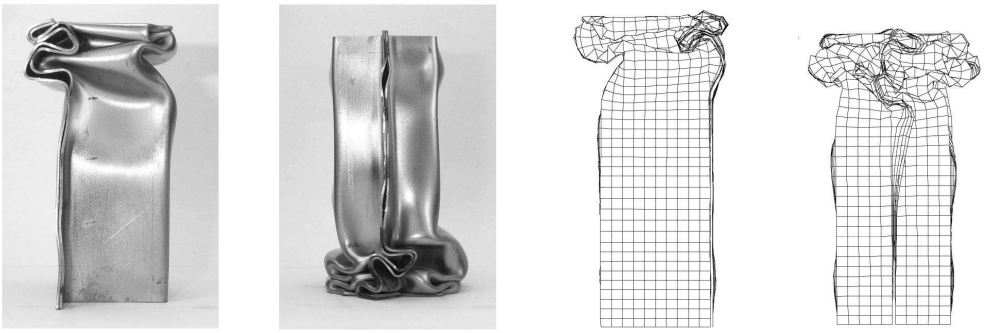
2. 알루미늄 부재의 압궤특성에 관한 연구

김[35]은 정하중하에서 축방향 압궤에 의한 알루미늄 박육부재의 에너지 흡수특성을 소성관절을 이용하여 이론해석한 후 실험에 의한 이론의 타당성을 고찰하고, 축방향압궤에 의한 에너지 흡수특성과 이것에 미치는 변형모드를 고찰하였다. 준정적 및 충격압궤실험의 경우 알루미늄 원형부재는 두께가 두꺼울수록 축대칭 모드로, 얇을수록 비축대칭 모드로 압궤되었으며, 알루미늄 사각부재는 두께가 얇을수록 축대칭모드로, 두꺼워질수록 혼합형 모드로 압궤되었다. Photo. 1에 알루미늄 원형 및 사각부재의 실험 후 압궤 모드를 나타내었다.

황[19]은 단면의 형상 및 재질의 변화없이 동일재료의 박육부재에 있어서 압궤가 진행되는 과정중의 하중과 변형관계를 이용하여 에너지 흡수능력을 증가시키기 위하여 제어기구를 고안하여 에너지 흡수제어특성을 고찰하였다. 에너지 흡수제어기를 이용하여 정적압궤실험 및 충격압궤실험을 행한 정사각단면 알루미늄 부재의 에너지흡수량 및 평균압궤하중이 제어기를 사용하지 않은 경우보다 15~20%정도 증가하였으며 에너지 흡수능력은 제어기의 높이가 높은 쪽에서 에너지흡수량이 증가하였다.

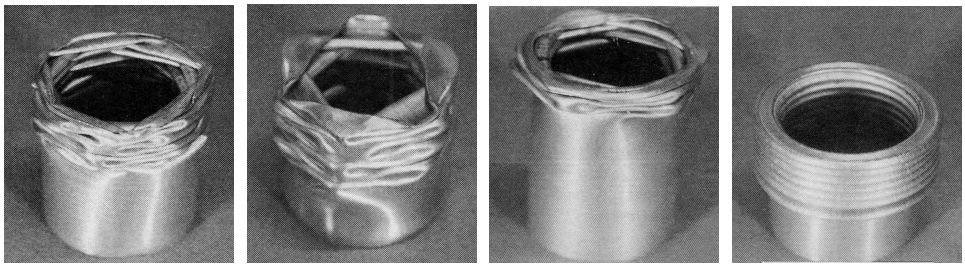
3. CFRP 부재의 압궤특성에 관한 연구

김[26,35]은 비강도, 비강성이 뛰어나며 적층배향에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료인 탄소섬유 강화 복합재료 (carbon fiber reinforced plastics; 이하 CFRP라 한다) 박육부재의 섬유배향의 차이, 섬유강도의 차이 및 초기 최대하중을 평균압궤하중에 근사시켜 점진적인 압궤가 유발되도록 하는 트리거(trigger)의 유·무에 따른 압궤특성을 준정적 및 충격압궤실험을 통하여 고찰하였다. 섬유의 적층각도에 따른 에너지 흡수능력을 비교하여 보면 15°로 적층된 경우가 가장 우수하였다. 또한, 0°와 90°시트를 각각 4매씩 사용하여 적층한 [0/90] 시험편의 경우 계면수가 6개이고, 최외층각도가 90°, 그리고 트리거가 있는 부재가 가장 우수한 에너지 흡수특성을 보였다. 압궤모드를 살펴보면 준정적 압궤하에서 계면수 변화 및 트리거 유/무에 관계없이 최외층 각도가 0°인 경우 쐐기형 압궤모드(wedge collapse mode)로 90°인 경우는 스플라인 압궤모드(splaying collapse mode)로 압궤되었다. 충격압궤 하에서는 최외층각도가 0°인 경우는 준정적압궤와 같이 쐐기형 압궤모드로 압궤되었으나, 90°인 박육부재의 경우에는 분열 압궤모드(fragmentation collapse mode)로 압궤되었다. Photo. 2에 각각의 압궤모드에 대한 단면을 나타내었다.

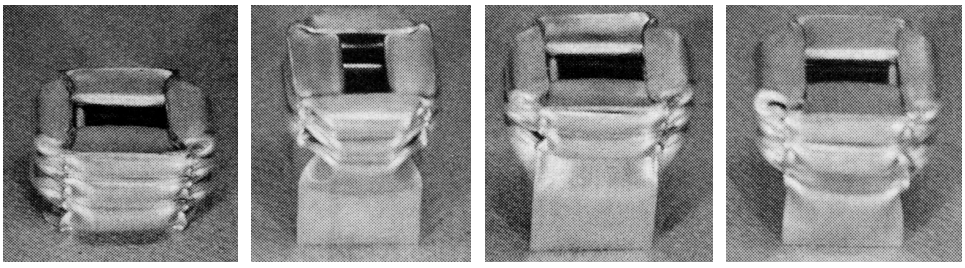


(a) single hat (Exp.) (b) Double hat (Exp.) (c) single hat (FEM) (d) Double hat (FEM)

Fig. 2 Collapse mode of hat shaped section member after experiment and simulation

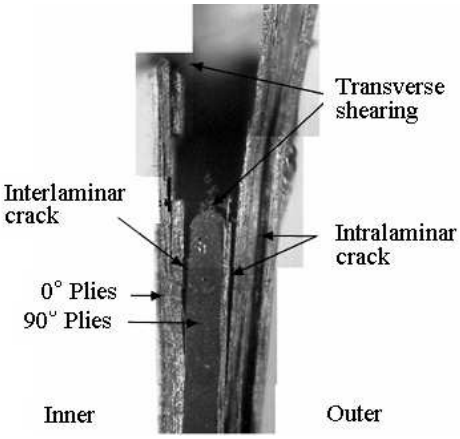


(a) t=0.7mm (b) t=0.95 (c) t=1.2mm (d) t=1.45mm

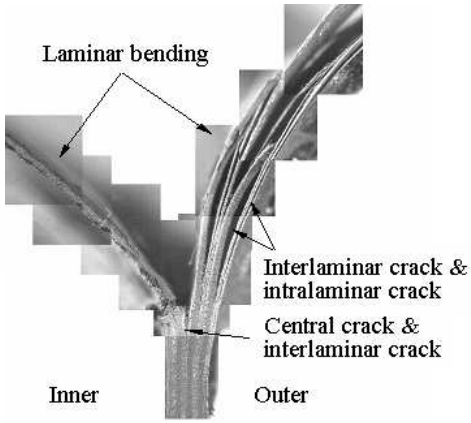


(e) t=0.7mm (f) t=0.95 (g) t=1.2mm (h) t=1.45mm

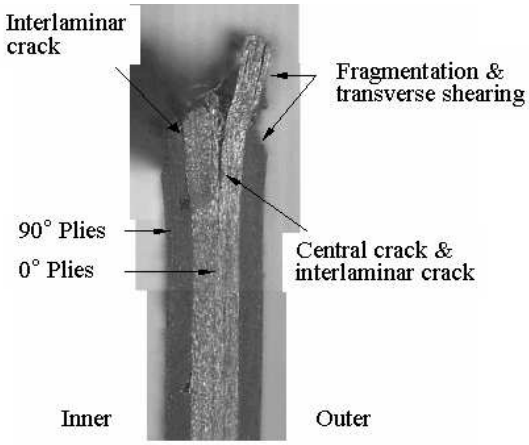
Photo. 1 Collapse mode of Aluminum member according to change of thickness



(a) Wedge collapse mode



(b) Splaying collapse mode



(c) Fragmentation collapse mode

Photo. 2 Fracture section of the collapsed specimens

제 3 절 연구목표 및 내용

자동차 충돌시 외부로부터 가해지는 충돌에너지를 자동차 중량 및 변형범위 내에서 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 승객이 안전 보호 공간의 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 최종적으로 승객상해 정도와 직결되는 최대가속도 크기를 최소화시킬 수 있는 안정된 축방향 접힘좌굴 모드를 유도하려는 설계의 개념이 차체 구조부재 설계에 이용되고 있다.[38-39] 이러한 역할을 하는 것이 전면부 사이드 부재로서 정면충돌시 충돌에너지의 50~70%를 흡수하며 단면형상은 약 0.8~1.2mm의 모자형 또는 박판 사각 및 원형 빔 형상을 가지고 있다. 특히, 사이드 부재 또는 엔진 부재 등의 종방향 부재는 소성변형으로 대부분의 에너지를 흡수하게 되며 굽힘에 의한 변형보다 압궤에 의한 변형으로 많은 에너지를 흡수한다. 이러한 차체구조부재의 경량화는 차량의 연비향상과 이를 통한 대기 오염 저감을 위하여 중요한 연구과제가 되고 있으며, 기존의 금속재료를 이용한 최적화 설계 방법에 의한 경량화는 한계가 있으므로 최근에는 알루미늄, 플라스틱 등 경량화 재료를 이용한 설계가 연구의 초점이 되고 있다.[13-35] 이러한 신소재를 사용하여 차체구조를 설계하면 경량화 이외에도 차량의 수동 안전도 향상, 소음 저감, 부식 방지, 내구성 증가 등 부수적으로 많은 장점을 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 충돌시 적절한 에너지를 흡수하여 승객의 안전을 도모할 수 있는 최적의 충격 흡수용 경량화 차체부재의 안전성능을 평가하고자 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 복합재료를 이용한 차체구조부재가 축방향 하중을 받을 때의 압궤특성을 고찰하여 실제 차량의 구조설계시 적용 가능한 정량적인 설계데이터를 얻고자 한다. 또한, 경량화 재료의 변화, CFRP의 적층구성의 변화 및 단면형상의 변화에 따른 안전성능을 정량적으로 평가하여 최적의 성능을 갖는 충격 흡수용 경량화 차체부재를 개발하고자 한다.

연구내용으로는 먼저, 3장과 4장에서 사각 및 원형 단면의 혼성 충격 흡수 부재에 대한 안전성능을 평가한다. 사각 및 원형 혼성 충격 흡수 부재는 알루미늄의 외면을 비강도, 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 CFRP로 감싸 강화시킨 혼성부

재 형태의 구조부재를 제작하여 에너지흡수 및 압궤모드를 고찰한다. 알루미늄 부재는 CFRP 부재에 비하여 비강성, 비강도는 낮지만 안정적인 소성변형에 의해 에너지를 흡수하며, CFRP 부재는 불안정한 취성 파괴에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 따라서 알루미늄과 CFRP 부재의 단점을 상호 보완하고, 알루미늄 부재의 안정적인 소성변형에 의한 에너지흡수와 CFRP 부재의 높은 비강성, 비강도에 의한 에너지 흡수라는 장점이 결합하여 효과적인 구조부재의 특성을 발휘할 것이라 생각된다.

5장에서는 일반적으로 자동차에 주로 사용되는 모자형의 압연 강판을 점용접하여 제작한 사이드 부재를 경량화 차원에서 CFRP로 제작 하여 모자형 충격 흡수 부재의 안전성능을 평가한다. 또한, 알루미늄 부재를 보강하여 혼성부재 형태의 충격 흡수 구조부재를 제작하여 에너지흡수 및 압궤모드를 고찰한다.

특히, CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이므로 적층구성의 변화에 따른 사각 및 원형 혼성 경량화 부재와 모자형 경량화 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 실험방법

제 1 절 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 CFRP를 이용하여 사이드 부재의 기본 형상인 모자형과 원형 및 사각형상의 부재를 제작하여 시험편으로 사용하였으며, 알루미늄과 CFRP의 일반적인 특성 및 용도를 Table 1에 나타냈다.

알루미늄 부재는 서울메탈(주)에서 가공한 6063-T5계열로서 두께는 1.0mm이며, 원형부재는 외경 38mm, 사각부재는 한 변의 길이가 30mm인 정사각형 단면이다. 알루미늄 원형 및 사각구조부재는 동일한 성분으로 동일한 제작과정을 거쳐 기계적 성질이 일치하며, 알루미늄의 기계적 성질을 Table 2에 나타냈다. CFRP 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 3에 나타냈다.

알루미늄과 CFRP를 결합한 원형 및 사각 혼성부재는 알루미늄 원형 및 사각부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 특히, CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이므로 적층구성에 따른 에너지흡수 능력과 압궤모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수의 변화에 따른 시험편을 제작하였다.

모자형 경량화 부재는 탭핑(tapping)된 맨드릴에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며, 실재 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 "ㅁ"자 단면부재와 평판부재를 결합하여 제작하였다. 적층구성의 변화에 따른 에너지 흡수 능력과 압궤모드를 고찰하기 위하여 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 또한, 강도부재가 축 하중을 받을 때 응력분포는 모서리부에서 대부분이 집중되면서 압궤되며 모자형 단면부재의 경우 일반적으로 "ㅁ"자 단면측보다 평판측의 좌굴하중이 낮기 때문에 평판측의 좌굴이 계기가 되어 압궤된다. 따라서 모서리 부분의 단

면적을 변화시키기 위해 평판부재와 "ㅁ"자형 부재의 단면적을 변화시켜 시험편을 제작하였다. 그리고 CFRP의 취성파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강한 모자형 혼성부재 형태의 시험편을 제작하였다.

시험편의 성형은 Photo. 3과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^{5} Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 3은 시험편 제작시 성형 사이클을 나타냈다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험시 압궤가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

Table 1 Characteristics and use of the aluminum and CFRP

분 류	특 성	사 용 범 위
Aluminum (6063계)	열처리 합금 내식성 표면처리성 성형가공성	새시 등의 건축용재, 토목용재, 가구, 가전제품 등
CFRP	비강성 비탄성	항공기(1차, 2차부재), 우주기기(태양열발전설비), 미사일, 로케트, 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 벽직류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패킹, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로케트 노즐, 항공기 엔진 등

Table 2 Material properties of the aluminum

Density	Poisson's ratio	Young's modulus	Yield stress	Tensile stress
2.68 [kg/m^3]	0.31	67.2 [GPa]	165 [MPa]	192 [MPa]

Table 3 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]

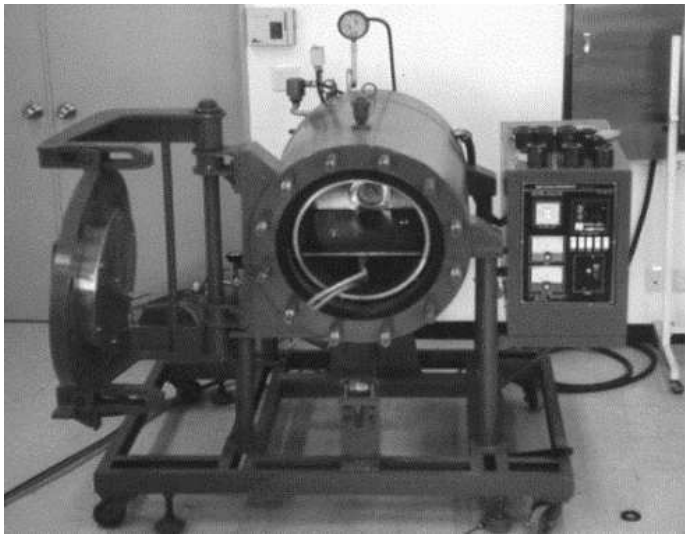


Photo. 3 Autoclave

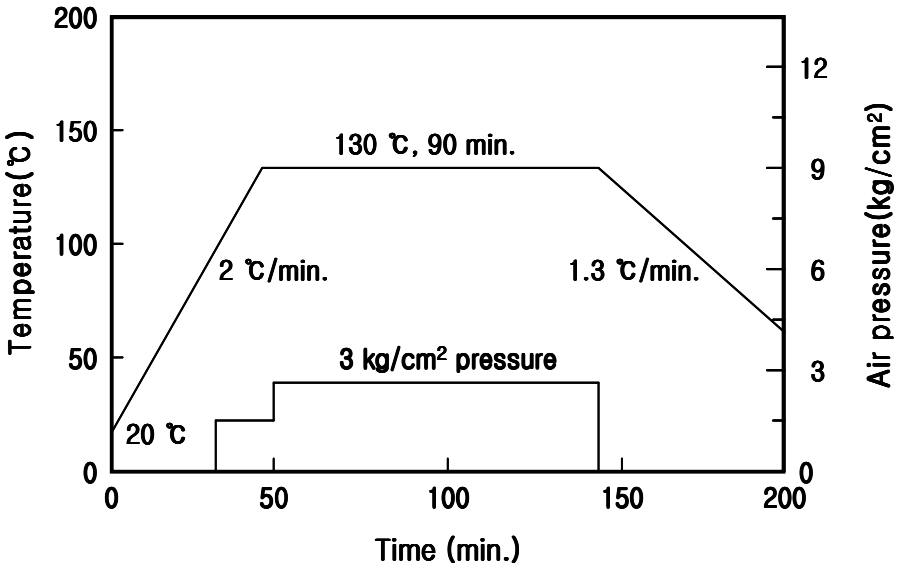


Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen

제 2 절 실험장치

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

충격압궤실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 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 충격압궤실험을 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. 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 strain

amplifier)를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO(digital storage oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다.

시험편의 압궤 시간변화 즉, 변위의 측정은 압궤가 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 달리할 수 있다. 여기서는 초점거리가 1080mm이며 최대 100mm의 이동량을 측정할 수 있는 100-10형 렌즈를 사용하여 측정하였다.

충격속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 레이저를 이용하여 측정하였다.

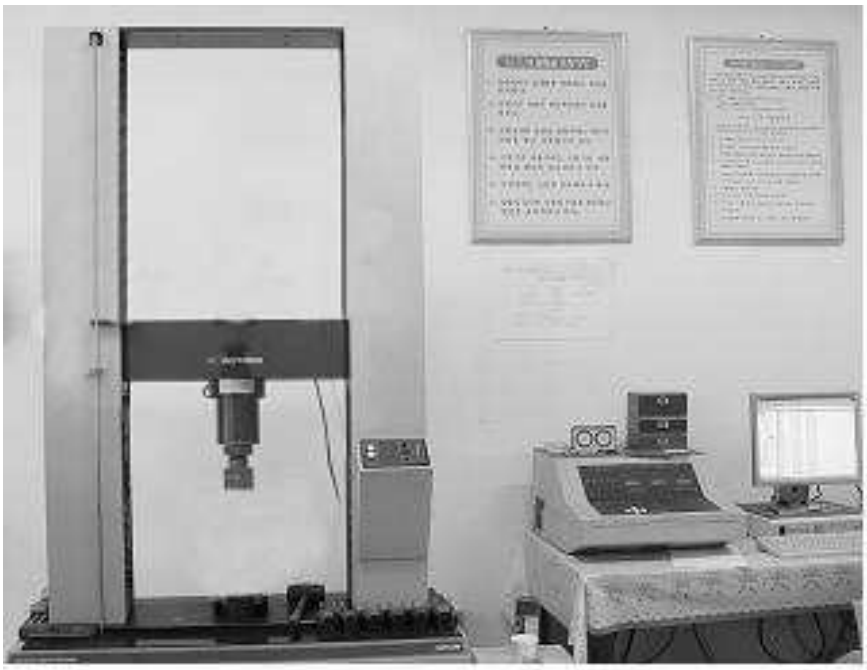


Photo. 4 Universal testing machine

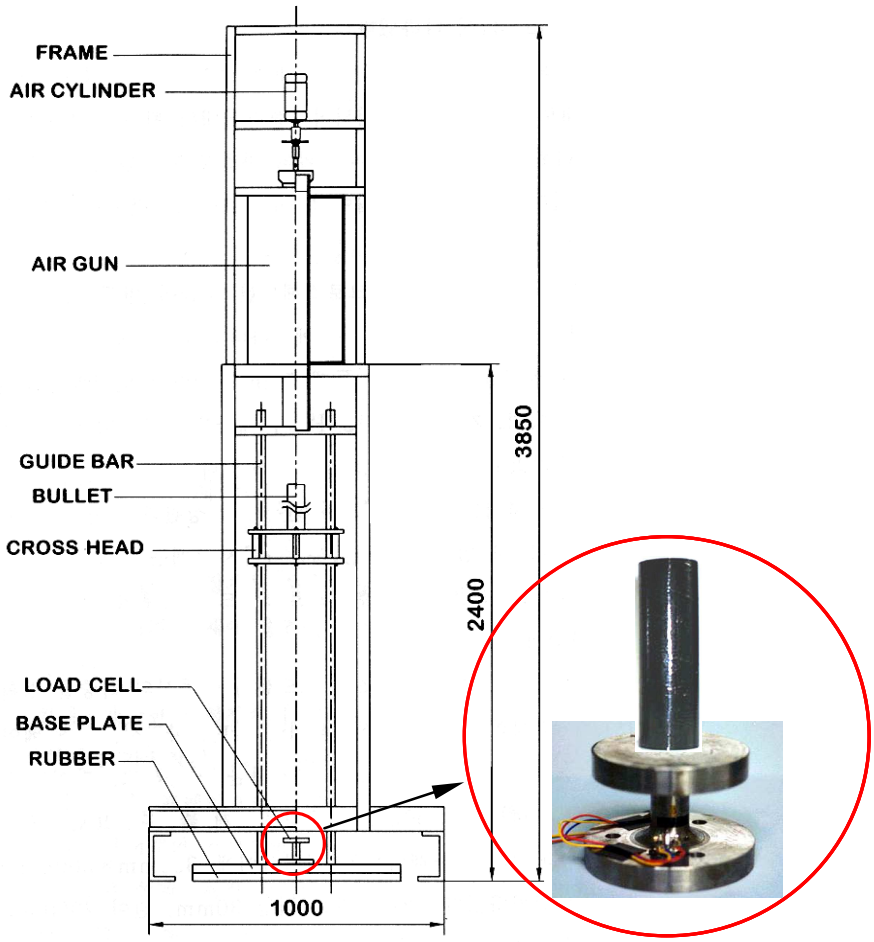


Fig. 4 Impact testing setup for crushing

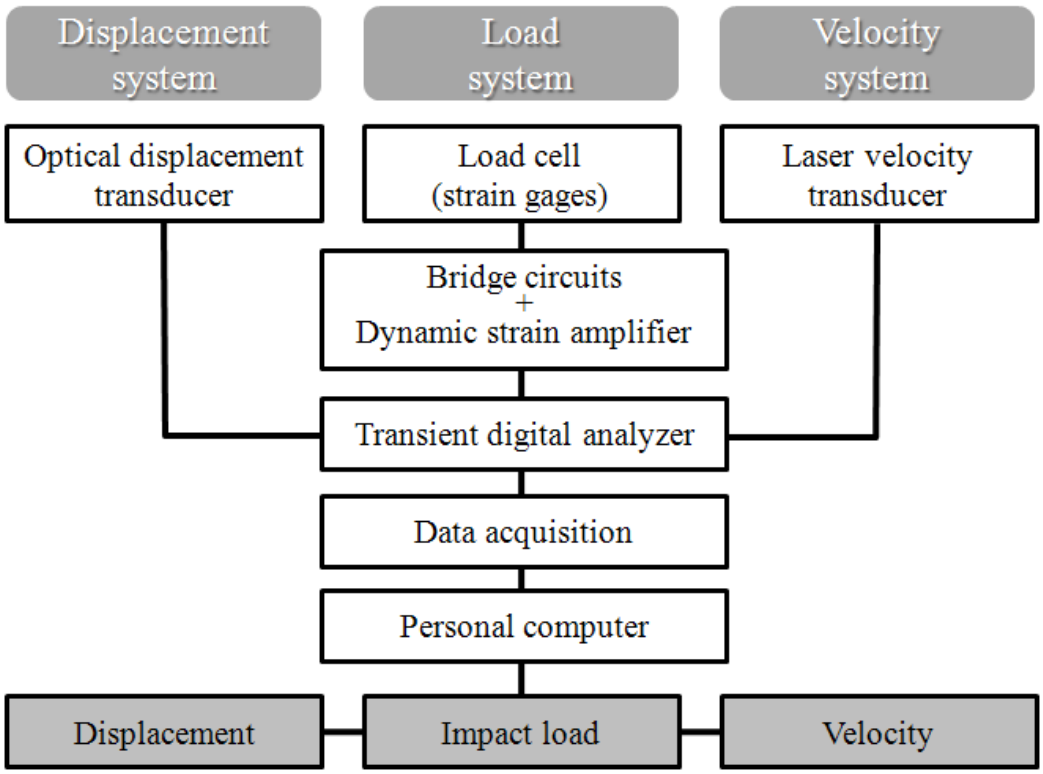


Fig. 5 Diagram of measurement system

제 3 절 압궤실험

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

$$E_a = \int_{l_0}^{l} P_{(l)} dl \tag{1}$$

여기서, E_a는 시험편에 흡수된 에너지이며, $P_{(l)}$은 압궤하중을 나타낸다. 그리고 단위체적당 흡수에너지는 흡수에너지를 압궤된 부분의 체적으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 구하였으며, 단위질량당 흡수에너지는 경량화 차원에서 흡수에너지를 고찰하기 위하여 흡수에너지를 압궤된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$E_v = \frac{E_a}{A \Delta l} \tag{2}$$

$$E_m = \frac{E_a}{\rho A \Delta l} \tag{3}$$

여기서, E_v는 단위체적당 흡수에너지, E_m은 단위질량당 흡수에너지, A는 시험편의 단면적 그리고 ρ는 시험편의 밀도를 나타낸다.

충격실험은 시험장치의 한계로 인하여 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위 내에서 자유낙하 실험과 0.3MPa 및 0.5MPa의 공기압에서 각각의 충격속도 4.82m/sec와 6.45m/sec 및 7.54m/sec로 충격 압궤실험을 행하였다.

충격에너지 E_I는 식 (4)를 이용하여 구했으며, 크로스헤드의 운동에너지와 동일하므로 속도 4.82m/sec에서는 약 465.96J, 6.45m/sec에서는 약 833.07J이며 속도 7.54m/sec에서는 약 1136.64J이며 이다.

$$E_I = \frac{1}{2}mv^2 \tag{4}$$

여기서, m은 크로스헤드의 질량(40kg)이며, v는 충격압궤속도이다.

제 3 장 사각 Al/CFRP 혼성 부재의 안전성능평가

본 장에서는 사이드 부재의 형상을 모방한 사각형 단면을 갖는 알루미늄과 CFRP 부재가 결합된 사각 혼성 부재에 대하여 에너지흡수 능력과 압궤모드를 고찰하여 안전성능을 평가하였다.

사각 혼성 부재는 Fig. 6과 같이 알루미늄 사각 부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압궤특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0° 로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 적층수 n을 2, 3, 4, 6 및 7계면수에 맞추어 적층하여 제작하였다.

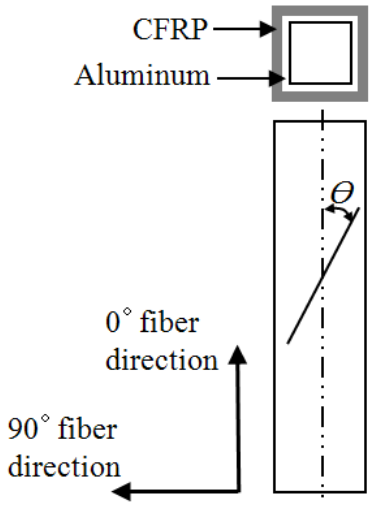


Fig. 6 Configuration of square compound member

제 1 절 적층각도 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 사각 혼성 부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤와 충격압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

Figs. 7~11에 적층수 8ply를 갖는 사각 혼성 부재에 대하여 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90°의 적층각의 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 5~9에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

Figs. 12~16에는 적층수 8ply를 갖는 사각 혼성 부재에 대하여 15, 45, 90, 90/0 및 0/90의 적층각의 변화에 따른 충격압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 10~14에 시험편이 압궤된 후의 형상을 각각 나타내었다. 충격실험은 공기압 0.3Mpa에서 충격속도 6.45m/sec로 약 833.07J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다. 단, 적층각도가 15°인 시험편의 경우 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 한계로 인하여 자유낙하상태에서 충격속도 4.82 m/sec로 약 465.96J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다. 시험편은 충격압궤시 약 92~96%정도의 충격에너지를 흡수하여 변형되었으며, 약 4~6%는 충격압궤시 시험편의 반발에너지, 마찰에너지, 열에너지 등으로 소실되었다고 사료된다.

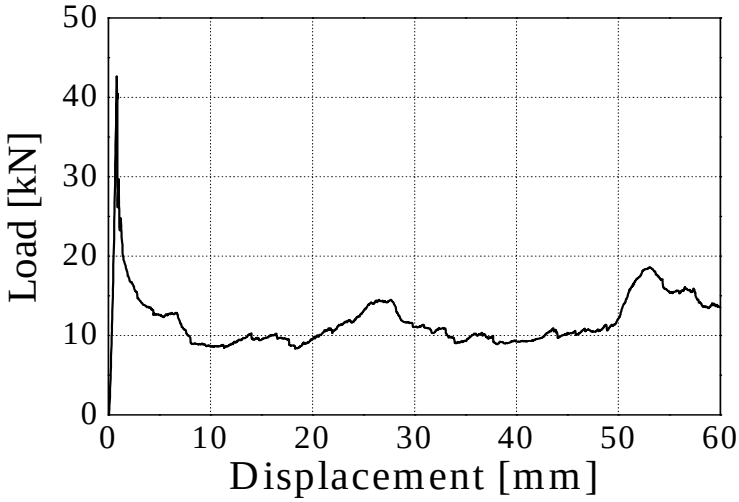
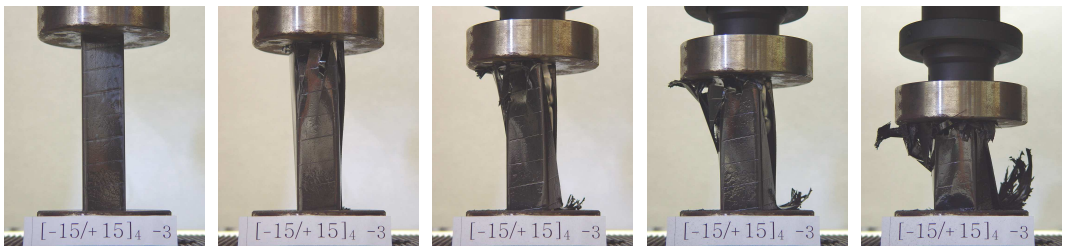


Fig. 7 Load−displacement curve of square compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 5 Collapse processing of square compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle)

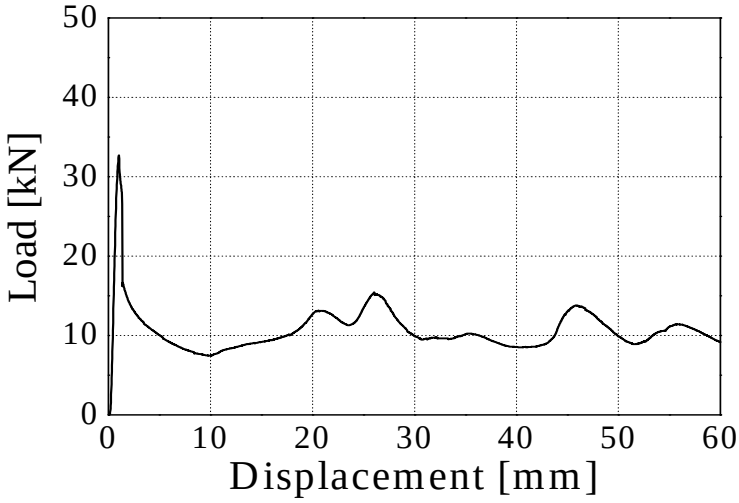
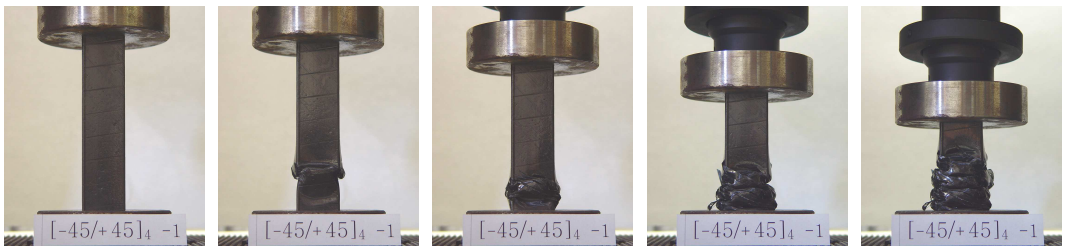


Fig. 8 Load−displacement curve of square compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 6 Collapse processing of square compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle)

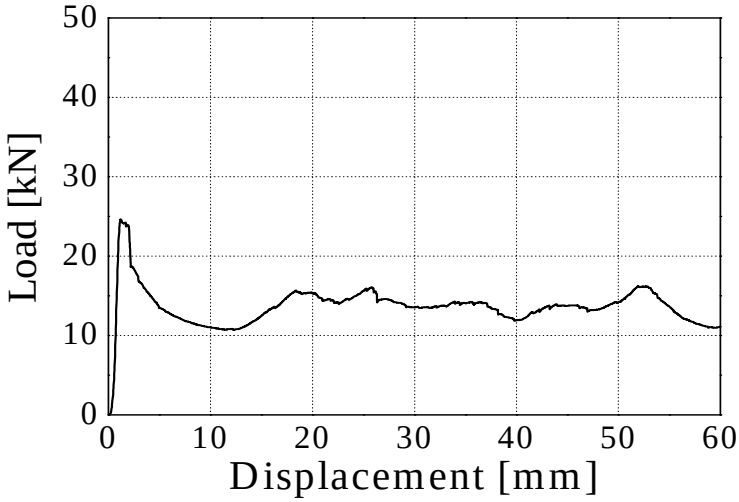
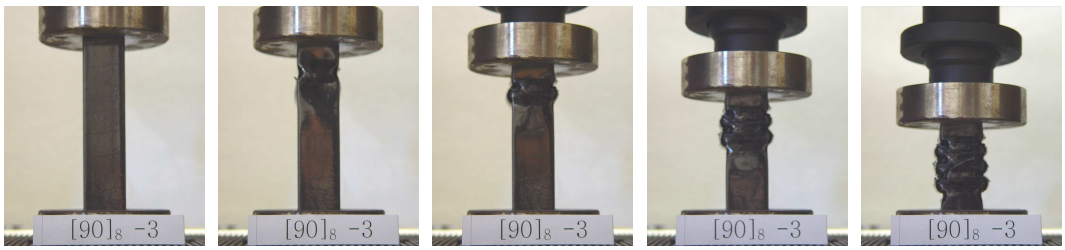


Fig. 9 Load−displacement curve of square compound member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 7 Collapse processing of square compound member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle)

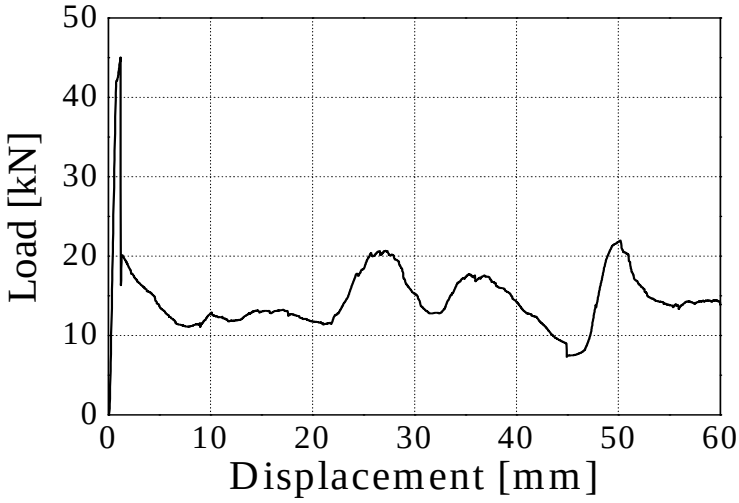
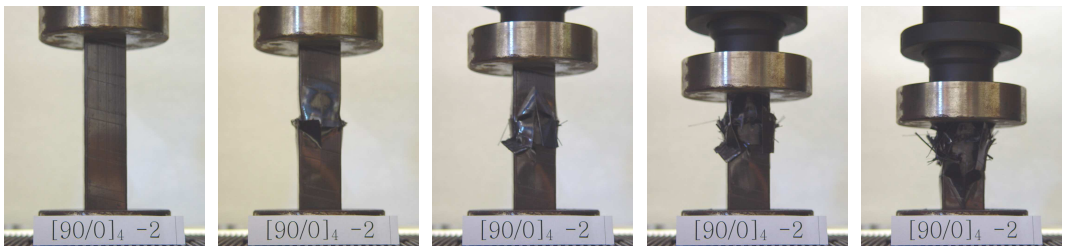


Fig. 10 Load−displacement curve of square compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 8 Collapse processing of square compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle)

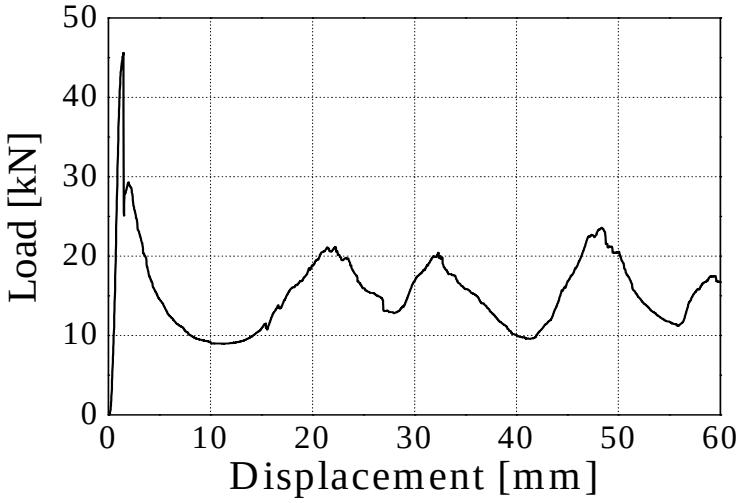
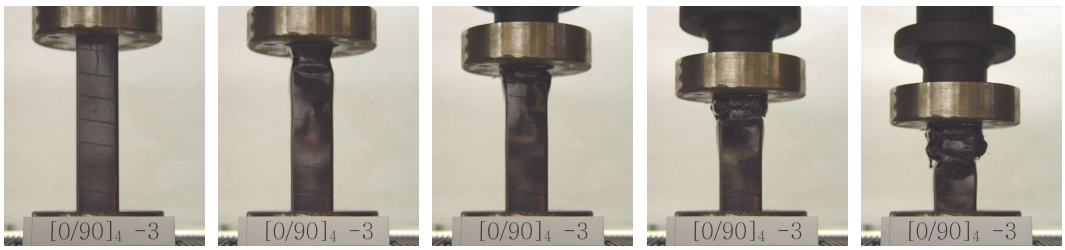


Fig. 11 Load−displacement curve of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 9 Collapse processing of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)

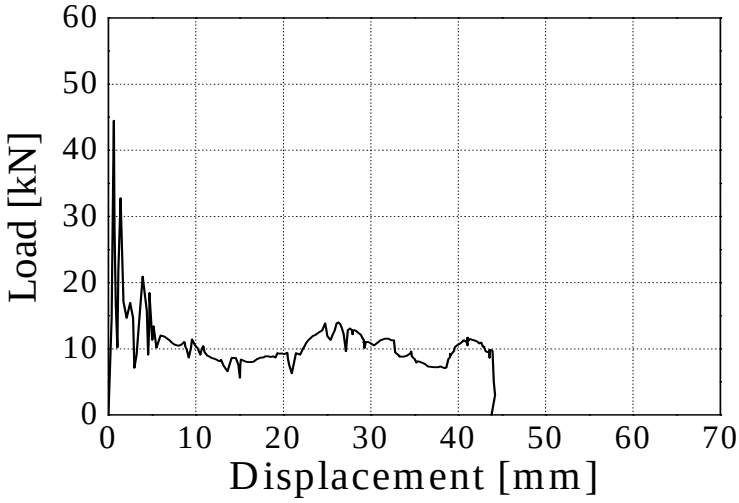


Fig. 12 Load-displacement curve of square compound member, $[+15_2/-15_2]_S$
(Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle)

Photo. 10 Shape of collapsed square compound member, $[+15_2/-15_2]_S$
(Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle)

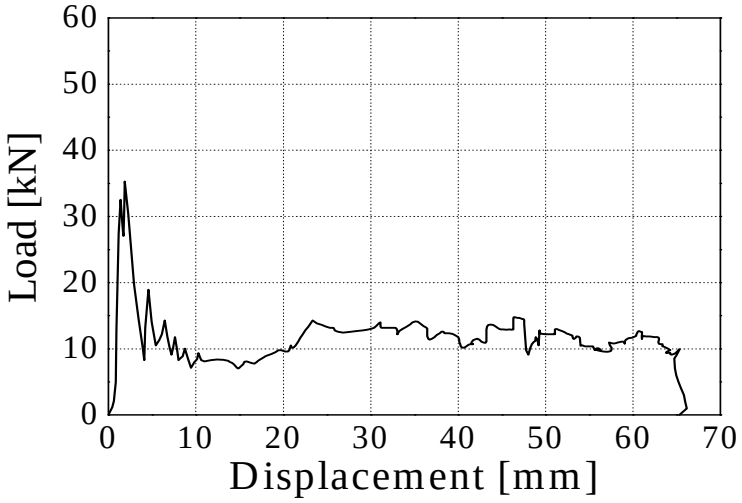


Fig. 13 Load-displacement curve of square compound member, $[+45_2/-45_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 45° fiber orientation angle)

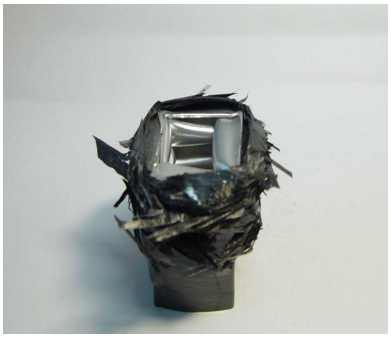


Photo. 11 Shape of collapsed square compound member, $[+45_2/-45_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 45° fiber orientation angle)

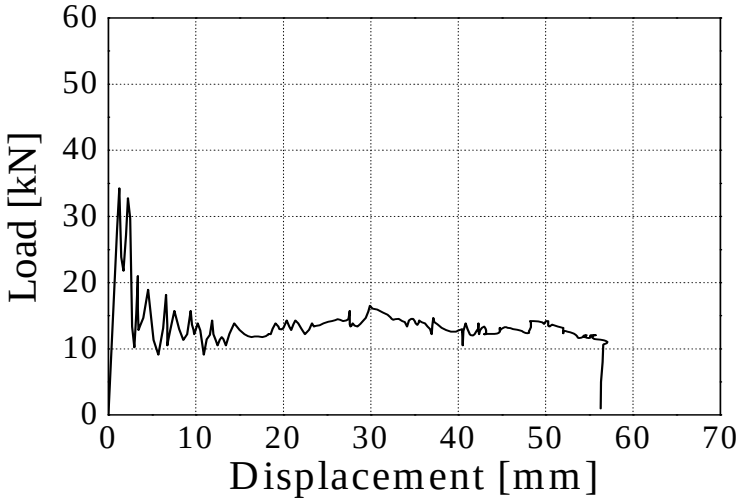


Fig. 14 Load-displacement curve of square compound member, $[90]_8$
(Impact energy: 833.07J, 90° fiber orientation angle)

Photo. 12 Shape of collapsed square compound member, $[90]_8$
(Impact energy: 833.07J, 90° fiber orientation angle)

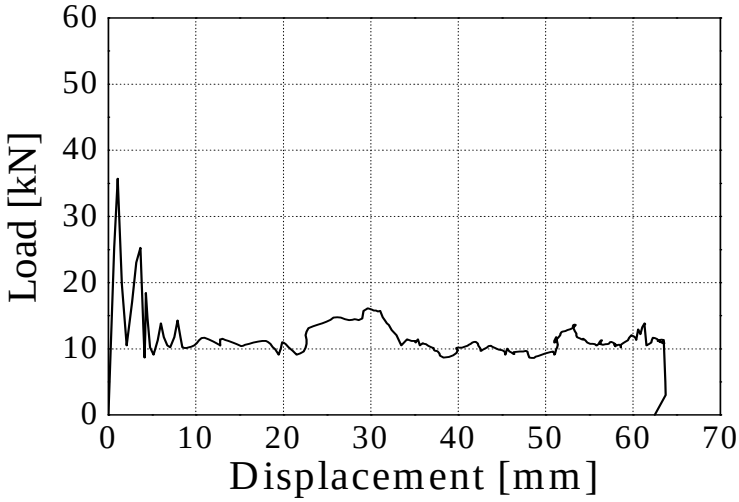


Fig. 15 Load-displacement curve of square compound member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 0°/90°/0° fiber orientation angle)

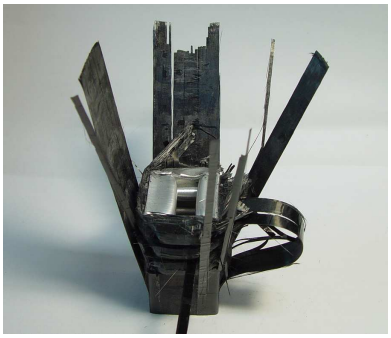


Photo. 13 Shape of collapsed square compound member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 0°/90°/0° fiber orientation angle)

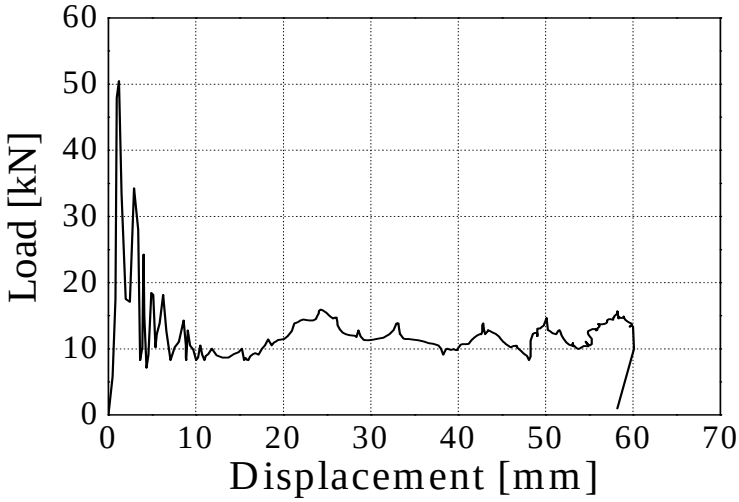


Fig. 16 Load-displacement curve of square compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 90°/0°/90° fiber orientation angle)

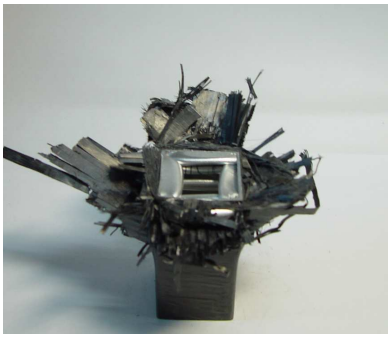


Photo. 14 Shape of collapsed square compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Impact energy: 833.07J, 90°/0°/90° fiber orientation angle)

제 2 절 계면수 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 사각 혼성 부재에 대하여 계면수의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

시험편의 적층각도는 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압궤특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°를 선택하여 계면수 변화에 따라 압궤실험을 행하였다.

Figs. 17~21에 최외층 각도가 90°인 적층각도 0°/90°의 사각 혼성 부재에 대하여 2, 3, 4, 6 및 7계면의 계면수 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 15~19에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

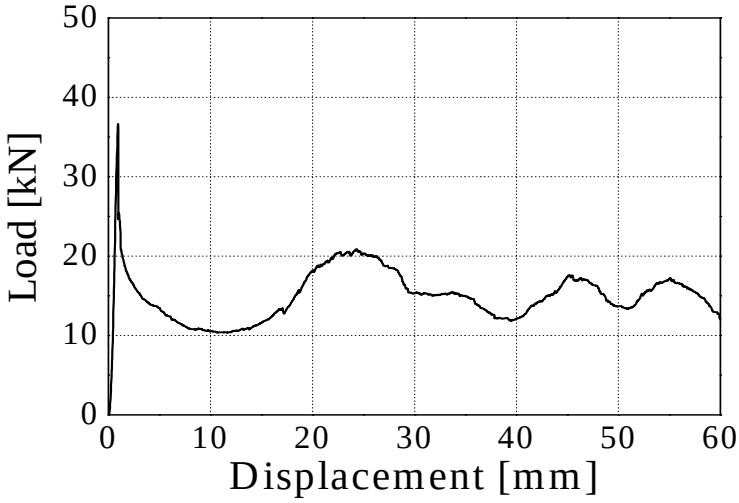
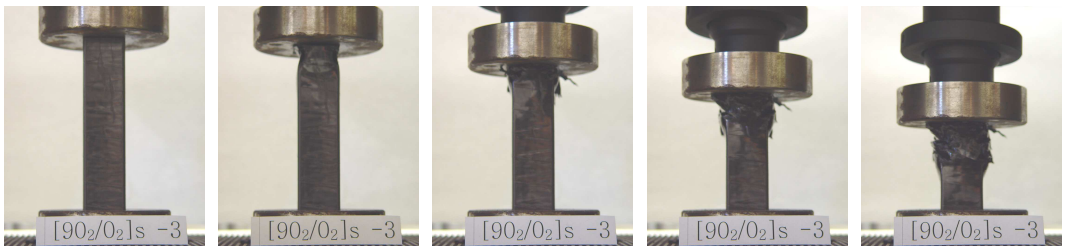


Fig. 17 Load−displacement curve of square compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 15 Collapse processing of square compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number)

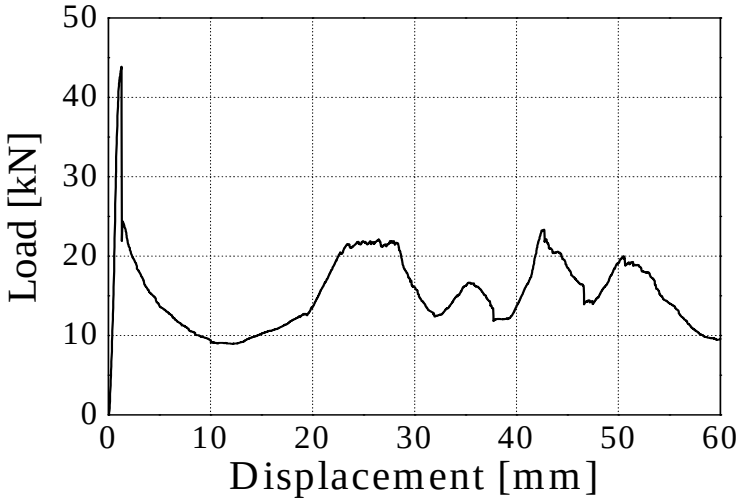
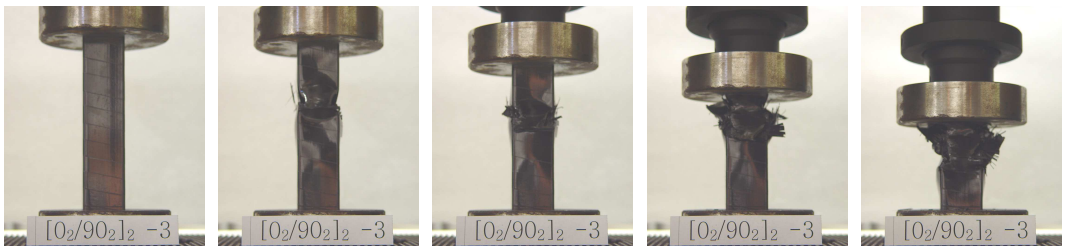


Fig. 18 Load−displacement curve of square compound member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 16 Collapse processing of square compound member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number)

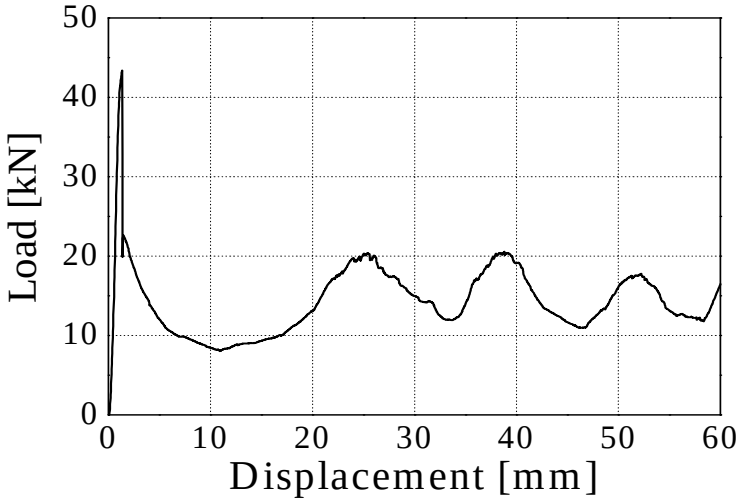
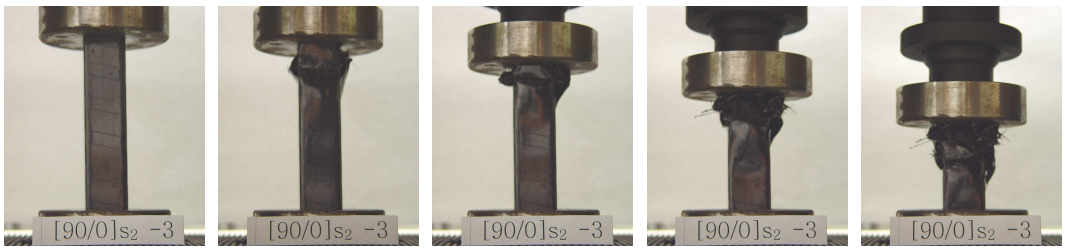


Fig. 19 Load−displacement curve of square compound member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 17 Collapse processing of square compound member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number)

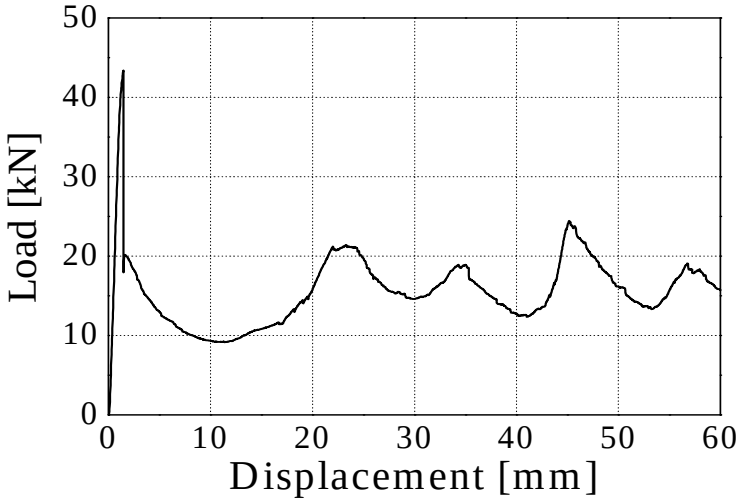
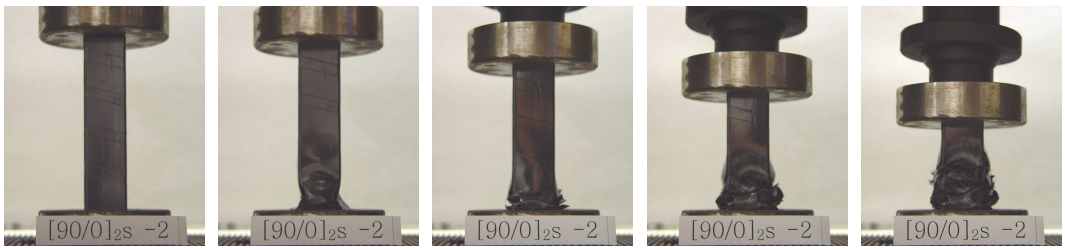


Fig. 20 Load−displacement curve of square compound member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 18 Collapse processing of square compound member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number)

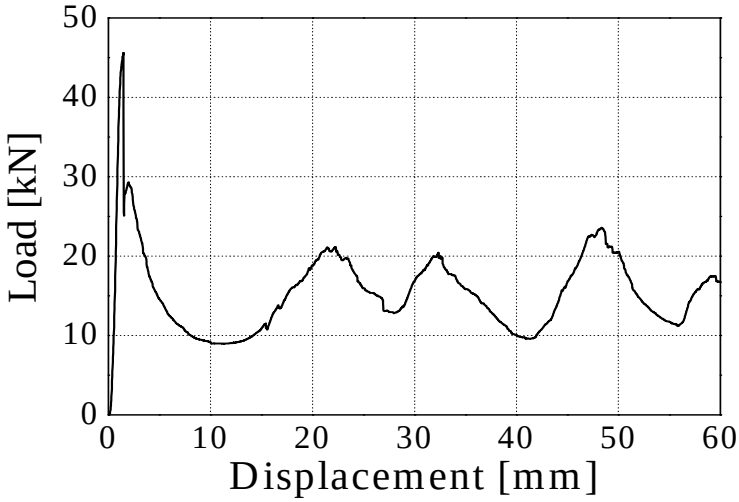
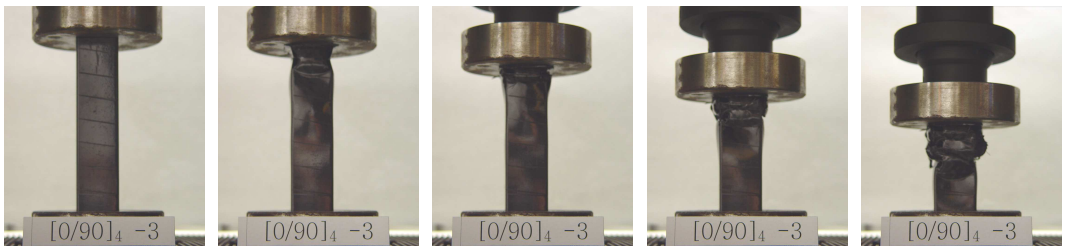


Fig. 21 Load−displacement curve of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 19 Collapse processing of square compound member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number)

제 3 절 결과 및 고찰

1. 사각 Al/CFRP 혼성 부재의 압궤 모드

알루미늄 사각 부재는 크게 축대칭 모드와 비축대칭 모드를 이루면서 순차적이고 안정적으로 압궤된다.[14-18] 그러나 CFRP 부재의 경우는 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 결정되며, Farley and Jones[20]가 정의한 연속섬유강화 복합재 튜브의 세가지 압궤모드는 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부좌굴을 의미한다. 대부분의 취성 섬유 강화 직물 부재는 횡방향 전단 및 라미나 굽힘 모드의 조합으로 압궤된다. 이러한 조합된 압궤모드는 취성파괴 압궤로 불린다.

본 연구에서 사각 혼성 부재는 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압궤모드가 결합된 4가지 형태의 압궤모드로 압궤되었다. 이는 CFRP 적층각에 의해서 주로 결정되어진다. Photo. 20에 사각 혼성 부재의 압궤실험 후 나타난 압궤모드를 나타내었다.

Photo. 20(a)는 CFRP 적층각도가 15°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재는 축대칭모드로 압궤되지만 외부 CFRP 부재의 모서리 부분에서 기지와 섬유의 파단과 분열을 계기로 알루미늄 부재와 분리되면서 압궤되는 분열 모드(split mode)의 형태로 압궤되었다. 분열 모드의 압궤현상은 주로 섬유가 축방향과 비슷하게 적층된 경우에 나타나며, 축방향 섬유의 영향으로 축하중이 작용되면 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재 사이의 계면에서 서로 분리되는 현상이 나타난다. Photo. 20(b)는 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유가 끼어 들어가지만 나머지 섬유는 끼어 들어가지 못하고 파단되는 조합 모드(combination mode)의 형태로 압궤되었다. Photo. 20(c)는 CFRP 적층각도가 90°로 적층된 시험편으로 CFRP 부재의 섬유가 알루미늄 부재의 접힘 사이로 대부분 끼어 들어가면서 압궤되는 접힘모드(folding mode)의 형태로 압궤되었다. 접힘모드는 주로 CFRP 적층각도가 축방향에 대하여 직교하는 방향으로 적층된 경우, 즉 적층각도가 큰 경우에

나타나며, 알루미늄 부재와 결합하여 매우 안정적인 압궤모드를 보이며 압궤되었다. Photo. 20(d)와 (e)는 0°와 90°의 CFRP 적층각도가 조합된 시험편으로 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단되면서 압궤되는 파쇄 확장 모드(fragmentation and splaying mode)의 형태로 압궤되었다. 파쇄 확장 모드는 축방향 0°의 섬유가 부재의 외측으로 확장되어 알루미늄 부재와 분리되려하지만 90°의 섬유의 영향으로 확장되면서 90°의 섬유와 함께 파단되면서 압궤된다.

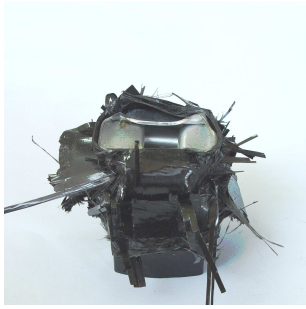
Table. 4는 압궤모드와 에너지 흡수 메커니즘과의 관계를 나타내었다.

CFRP 적층각도가 축방향과 비슷한 방향으로 적층이 되어 적층각이 적을 때, 축하중이 작용되면 초기 피크 하중 이후 CFRP 부재와 알루미늄 부재의 계면에서의 분리로 인해 내부 알루미늄 부재는 순차적인 압궤에 의해서, CFRP 부재는 라미나 굽힘에 의해서 분리되면서 에너지를 흡수한다. 이 경우는 순수 CFRP 부재와 알루미늄 부재를 함께 압궤하였을 때의 에너지 흡수와 비슷하였다. CFRP 적층각도가 커질수록 CFRP 섬유는 hoop stress 형태로 하중을 지지한다. 내부 알루미늄 부재는 순차적으로 압궤가 진행되지만 CFRP 부재는 알루미늄 부재의 접힘에 의해서 섬유의 파단과 알루미늄 부재 접힘 사이로 끼어 들어가는 국부좌굴에 의해서 에너지를 흡수한다. CFRP 적층각도가 축방향에 대해 직교하는 방향으로 가까워지면 알루미늄 부재의 접힘 사이로 대부분의 섬유가 끼어들어가면서 국부좌굴에 의해서 에너지를 흡수한다. 또한 0°와 90°의 CFRP 적층각도가 조합된 경우는 0°의 섬유의 라미나 굽힘과 90°섬유의 국부좌굴이 조합되어 섬유의 파단을 유도하면서 라미나 굽힘, 국부좌굴 및 섬유 파단에 의해서 에너지를 흡수한다.

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

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

(c) $[90]_8$

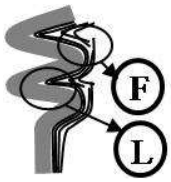
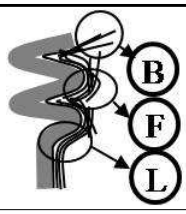


(d) $[90/0]_4$

(e) $[0/90]_4$

Photo. 20 Typical collapse modes of square compound member

Table 4. Collapse modes and energy absorption mechanisms of square compound member

Fracture pattern Aluminum CFRP				
Orientation angle	15°	45°	90°	0°/90°, 90°/0°
Collapse mode	Split	Combination	Folding	Fragmentation and splaying
Energy absorption mechanisms	B: Laminar bending	F: Fiber breaking L: Local buckling	L: Local buckling	B: Laminar bending F: Fiber breaking L: Local buckling

2. 사각 Al/CFRP 혼성 부재의 에너지 흡수 특성

Tables 5, 6은 8ply로 적층된 사각 혼성 부재의 적층각 변화에 의한 정적압궤 및 충격압궤실험 결과의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중의 데이터 값을 나타내었다. Figs. 22, 23은 Tables 5, 6의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Tables 5, 6과 Figs. 22, 23으로부터 정적 및 충격압궤 모두, 일방향 각도로 적층된 경우는 CFRP 적층각이 클 때 즉, 90°로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외각층이 90°인 0°와 90°섬유로 조합된 부재가 적층각의 변화에 따라 가장 많은 에너지를 흡수하였다. 이는 혼성 사각 부재의 CFRP 적층각이 작을 경우, 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재 사이의 계면에서 분리가 일어나면서 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 결합으로 인한 상호작용이 크게 나타나지 않았기 때문이다. 그러나 CFRP 적층각이 커질수록 CFRP 부재의 섬유가 hoop stress 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄 부재의 접힘을 방해하면서 전체적으로 높은 하중에서 접힘 이루어지며, 이때 CFRP 부재의 섬유는 알루미늄 부재의 접힘사이로 끼어들어가면서 두 부재의 결합에 의한 상호작용이 효과적으로 발휘가 되어 안정적인 압궤를 보이며 많은 에너지를 흡수하였다. 또한 0°와 90°섬유로 조합된 시험편의 경우, 0°섬유의 높은 압궤 하중과 90°섬유의 알루미늄 부재 접힘 방해로 인해 높은 하중에서 접힘이 이루어지면서 압궤가 되어 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외층 각도가 90°인 경우가 내부 0°섬유의 외측으로 확장하려는 라미나 굽힘을 방해하면서 0°섬유가 파단이 되어 더 많은 섬유의 파단으로 인해 가장 많은 에너지를 흡수하였다.

Table 7은 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압궤특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°의 사각 혼성 부재의 계면수 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 데이터의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중을 나타내었다. Fig. 24는 계면수의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 7과 Fig. 24로부터 압궤하중과 에너지 흡수는 계면수의 변화에 크게 영

향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 CFRP 부재의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 섬유의 파단 및 크랙 진전이며, 크랙 진전은 크게 층간 크랙(interlaminar cack)과 층내 크랙(intralaminar crack) 및 중심 크랙(central crack)으로 나눌 수 있다. 따라서 CFRP 부재의 경우, 계면수의 증가에 따라 층간 크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가하여 에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났지만,[26] 알루미늄과 CFRP가 결합된 혼성 부재의 경우는 계면수의 변화에 따라 발생하는 크랙 진전에 의한 에너지 흡수량의 변화가 알루미늄 부재의 압궤에 의한 에너지 흡수량에 비해 미세하여 크랙 진전보다 알루미늄 부재의 소성변형과 섬유의 파단에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 같은 적층각도를 갖는 혼성 부재의 경우에 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 사료된다.

Table 5. Static collapse test results for square compound member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angel of CFRP	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	698.26	23.21	48.49	41.64
45°	629.80	20.93	43.74	34.34
90°	825.82	27.45	57.35	26.43
90°/0°	884.96	29.41	61.44	44.52
0°/90°	895.04	29.75	62.15	45.13

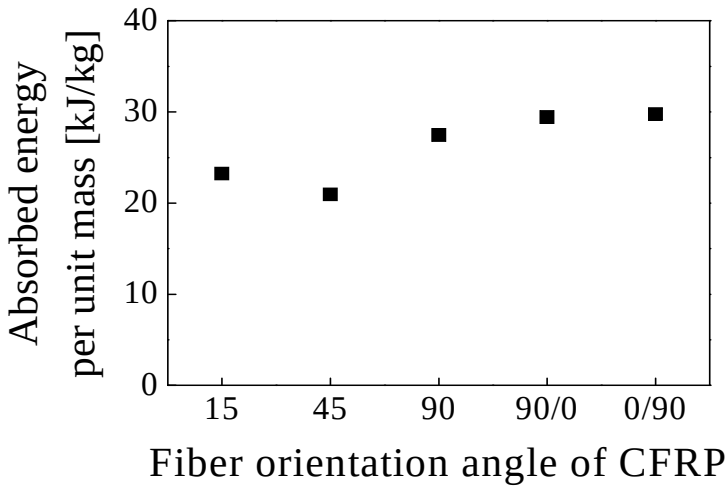


Fig. 22 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for square compound member (static)

Table 6. Impact collapse test results for square compound member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angel of CFRP	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	472.06	21.48	44.87	44.46
45°	813.80	24.86	51.94	36.26
90°	810.93	28.74	60.04	34.28
0°/90°/0°	807.18	25.77	53.84	35.7
90°/0°/90°	792.05	27.14	56.70	50.49

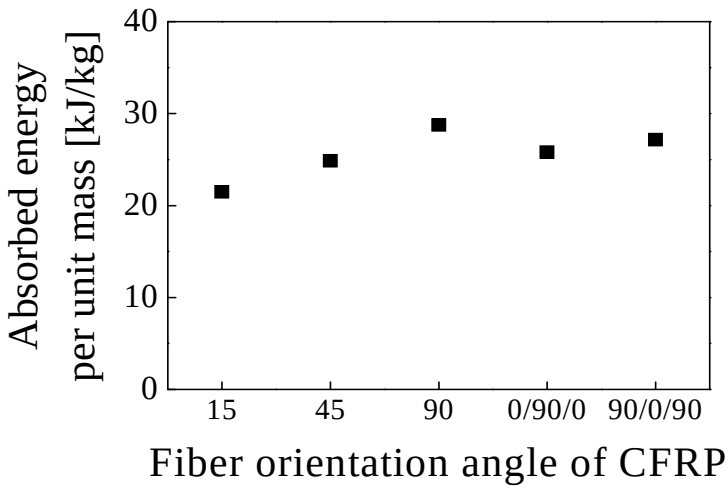


Fig. 23 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for square compound member (impact)

Table 7. Static collapse test results for square compound member according to interface number

Interface number	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
2	897.42	29.84	62.33	36.67
3	916.43	30.46	63.64	44.49
4	872.52	29.00	60.58	43.73
6	920.70	30.60	63.94	40.19
7	895.04	29.75	62.15	45.13

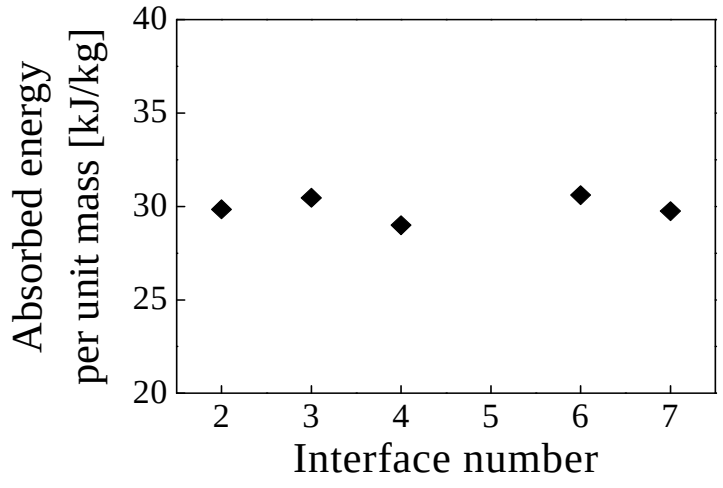


Fig. 24 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for square compound member (static)

제 4 장 원형 Al/CFRP 혼성 부재의 안전성능평가

본 장에서는 원형 단면을 갖는 알루미늄과 CFRP 부재가 결합된 원형 혼성 부재에 대하여 에너지흡수 능력과 압궤모드를 고찰하여 안전성능을 평가하였다.

원형 혼성 부재는 Fig. 25와 같이 알루미늄 원형 부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압궤특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 적층수 n을 2, 3, 4, 6 및 7계면수에 맞추어 적층하여 제작하였다.

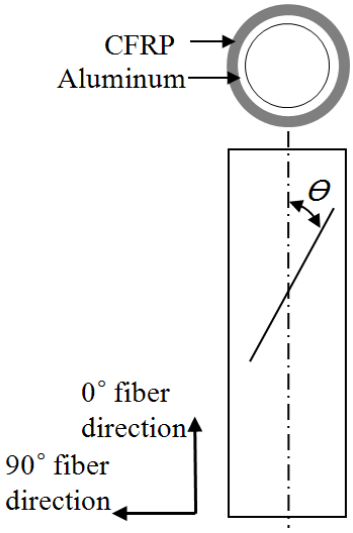


Fig. 25 Configuration of circular compound member

제 1 절 적층각도 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 원형 혼성 부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤와 충격압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

Figs. 26~30에 적층수 8ply를 갖는 원형 혼성 부재에 대하여 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90°의 적층각의 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 21~25에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

Figs. 31~35에는 적층수 8ply를 갖는 원형 혼성 부재에 대하여 15, 45, 90, 90/0 및 0/90의 적층각의 변화에 따른 충격압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 26~30에 시험편이 압궤된 후의 형상을 각각 나타내었다. 충격실험은 공기압 0.5Mpa에서 충격속도 7.54m/sec로 약 1136.64J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다. 단, 적층각도가 15°인 시험편의 경우 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 한계로 인하여 자유낙하상태에서 충격속도 4.82 m/sec로 약 465.96J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다. 시험편은 충격압궤시 약 92~96%정도의 충격에너지를 흡수하여 변형되었으며, 약 4~6%는 충격압궤시 시험편의 반발에너지, 마찰에너지, 열에너지 등으로 소실되었다고 사료된다.

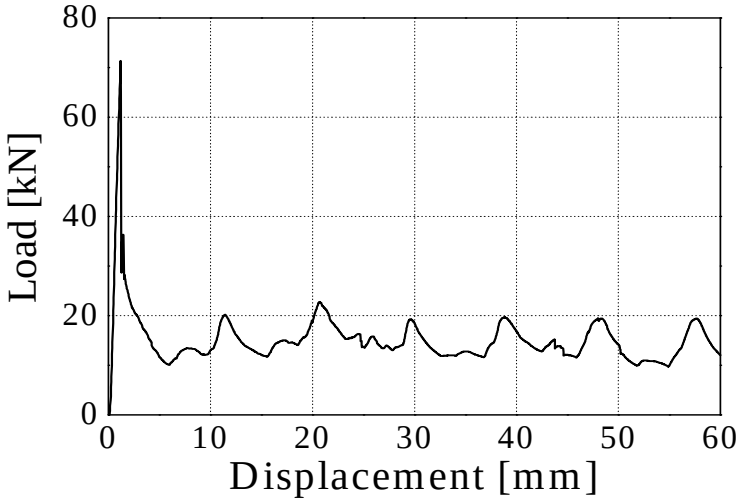
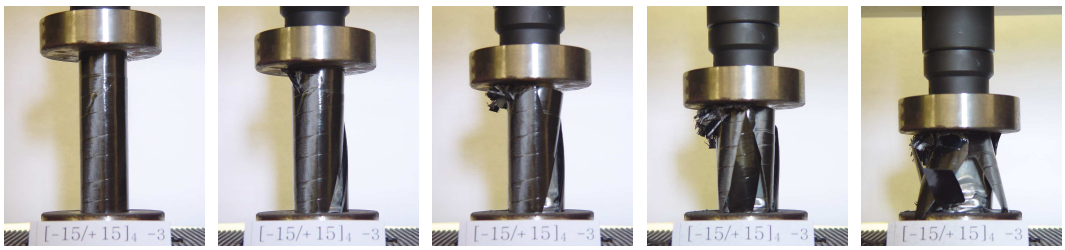


Fig. 26 Load−displacement curve of circular compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 21 Collapse processing of circular compound member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle)

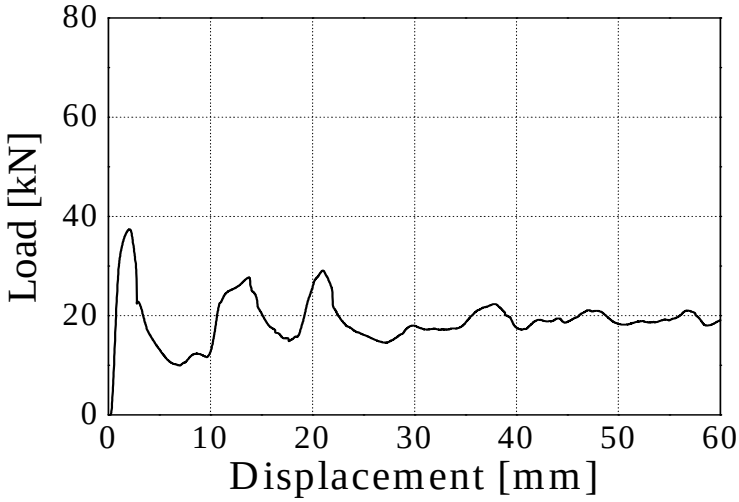
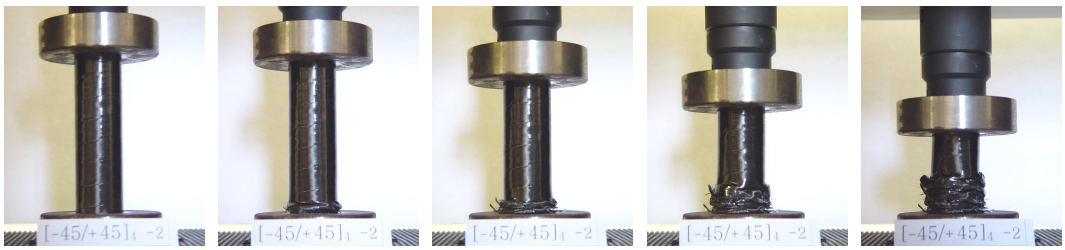


Fig. 27 Load−displacement curve of circular compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 22 Collapse processing of circular compound member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle)

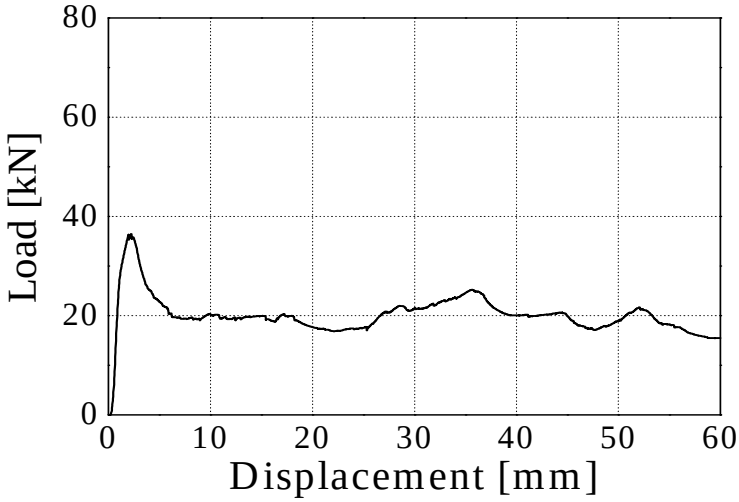
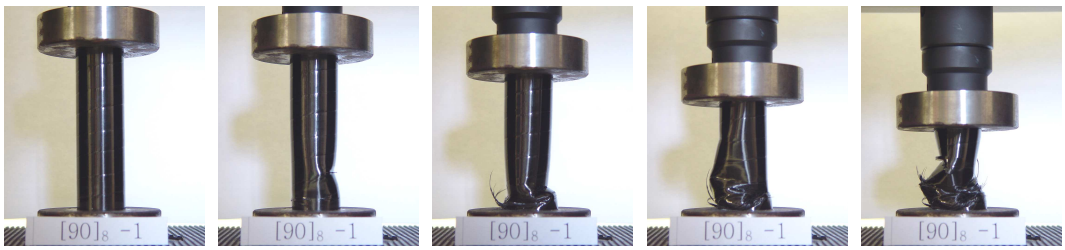


Fig. 28 Load−displacement curve of circular compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 23 Collapse processing of circular compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle)

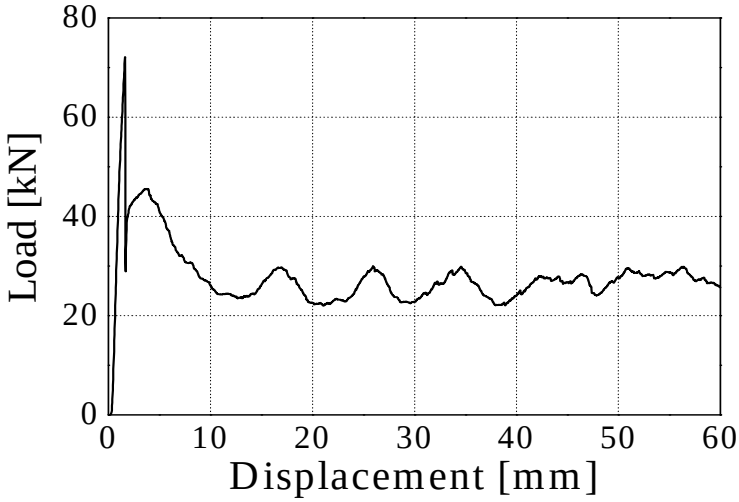
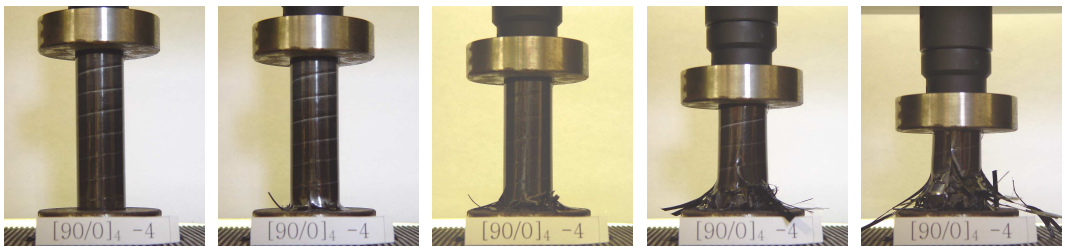


Fig. 29 Load−displacement curve of circular compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 24 Collapse processing of circular compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90°/0° fiber orientation angle)

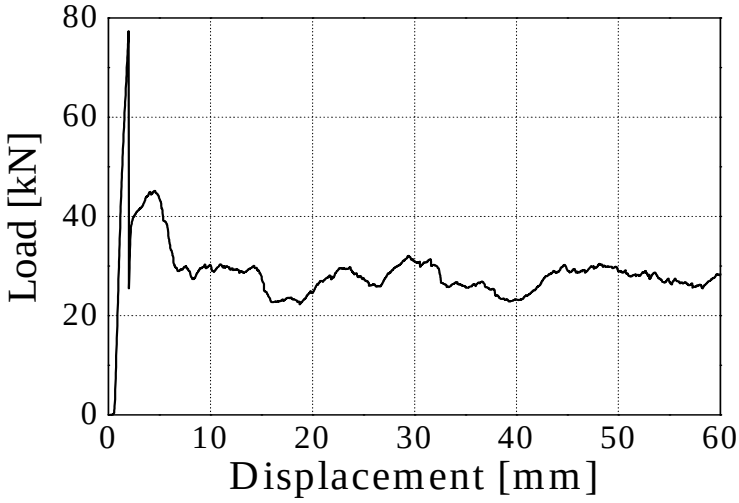
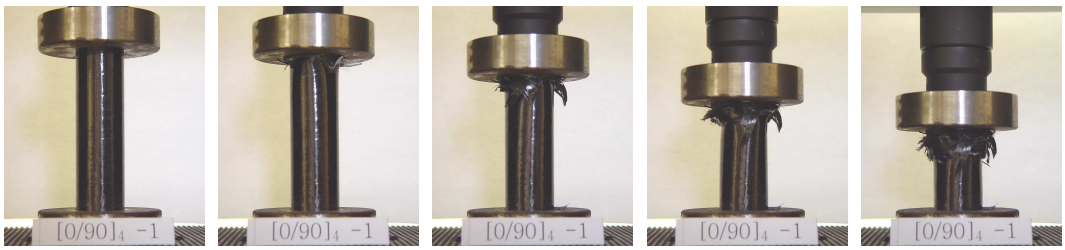


Fig. 30 Load−displacement curve of circular compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 25 Collapse processing of circular compound member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)

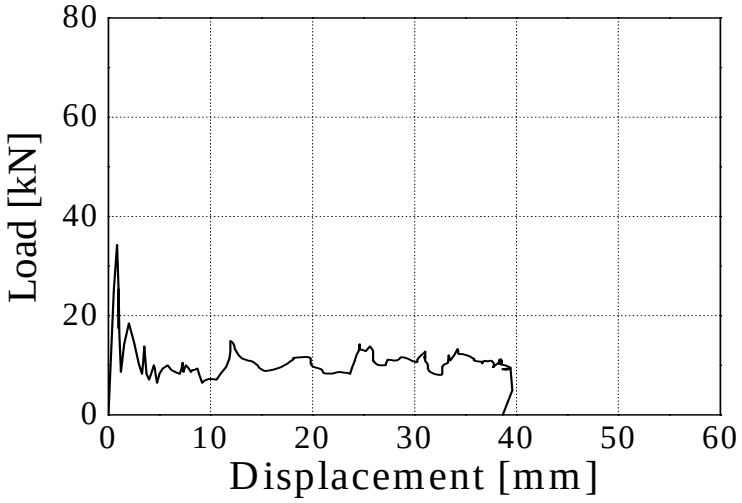


Fig. 31 Load−displacement curve of circular compound member, $[+15_2/-15_2]_S$
(Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle)

Photo. 26 Shape of collapsed circular compound member, $[+15_2/-15_2]_S$
(Impact energy: 465.96J, 15° fiber orientation angle)

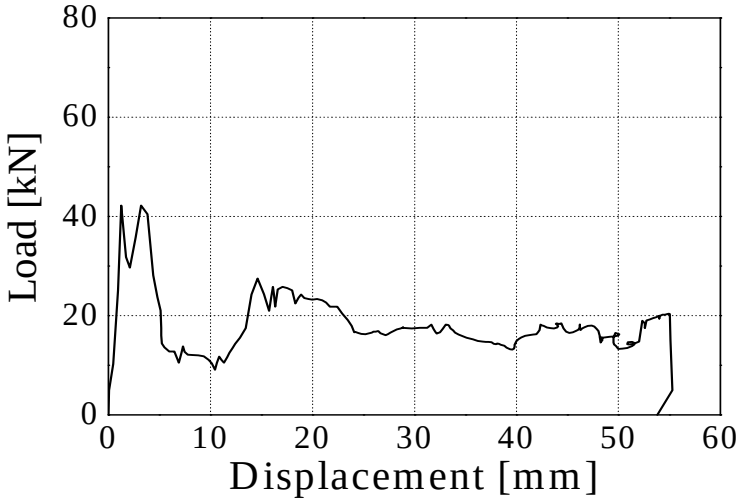


Fig. 32 Load−displacement curve of circular compound member, $[+45_2/-45_2]_S$
(Impact energy: 1136.64J, 45° fiber orientation angle)

Photo. 27 Shape of collapsed circular compound member, $[+45_2/-45_2]_S$
(Impact energy: 1136.64J, 45° fiber orientation angle)

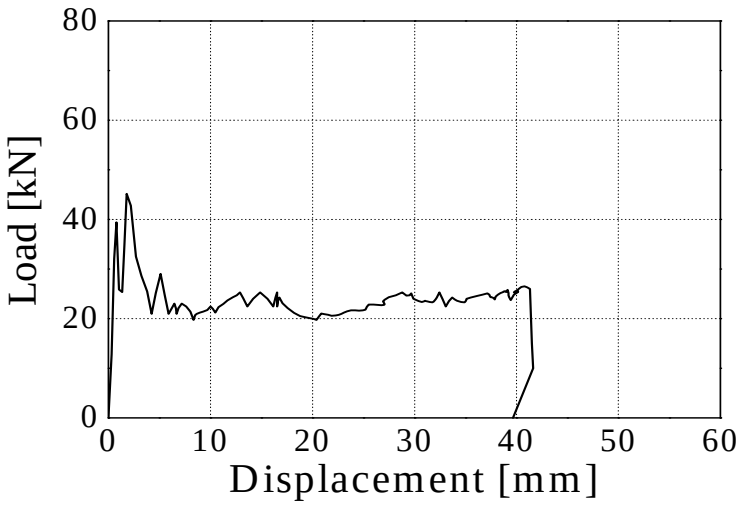


Fig. 33 Load-displacement curve of circular compound member, $[90]_8$
(Impact energy: 1136.64J, 90° fiber orientation angle)

Photo. 28 Shape of collapsed circular compound member, $[90]_8$
(Impact energy: 1136.64J, 90° fiber orientation angle)

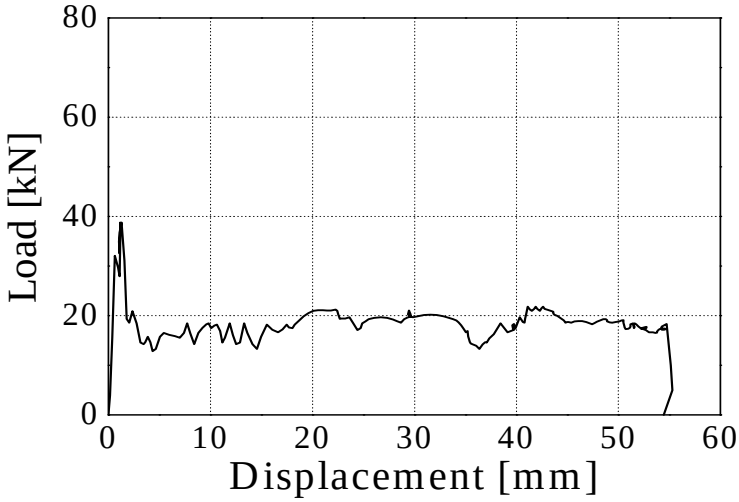


Fig. 34 Load-displacement curve of circular compound member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact energy: 1136.64J, 0°/90°/0° fiber orientation angle)

Photo. 29 Shape of collapsed circular compound member, $[0_2/90_2]_S$
(Impact energy: 1136.64J, 0°/90°/0° fiber orientation angle)

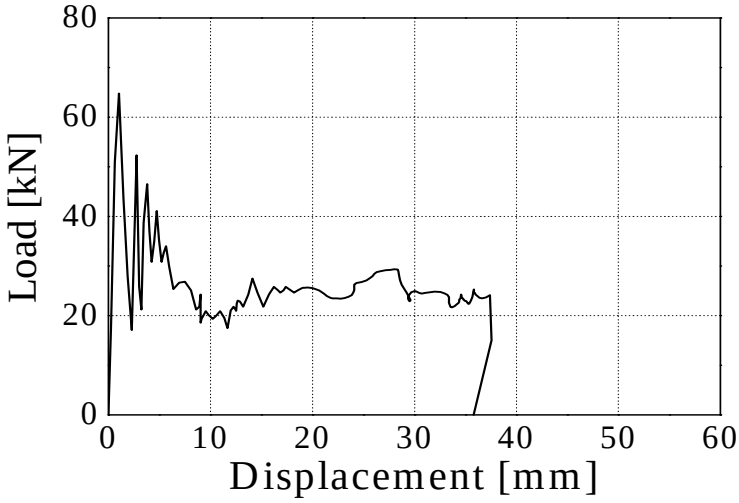


Fig. 35 Load-displacement curve of circular compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Impact energy: 1136.64J, 90°/0°/90° fiber orientation angle)

Photo. 30 Shape of collapsed circular compound member, $[90_2/0_2]_S$
(Impact energy: 1136.64J, 90°/0°/90° fiber orientation angle)

제 2 절 계면수 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 원형 혼성 부재에 대하여 계면수의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

시험편의 적층각도는 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압궤특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°를 선택하여 계면수 변화에 따라 압궤실험을 행하였다.

Figs. 36~40에 최외층 각도가 90°인 적층각도 0°/90°의 원형 혼성 부재에 대하여 2, 3, 4, 6 및 7계면의 계면수 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 31~35에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

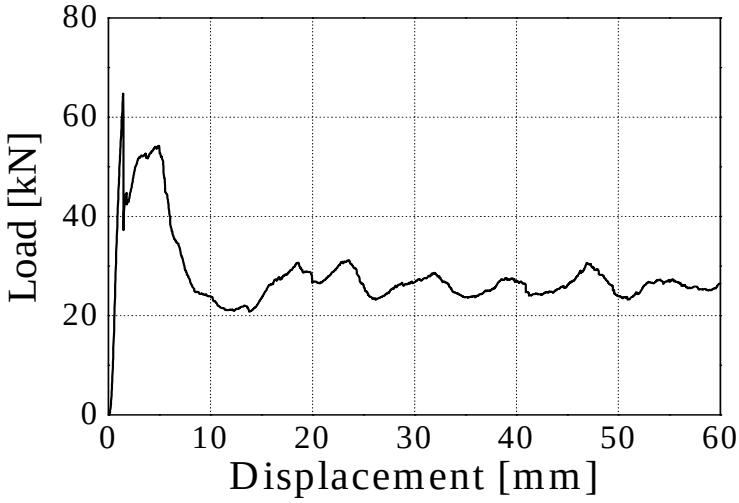
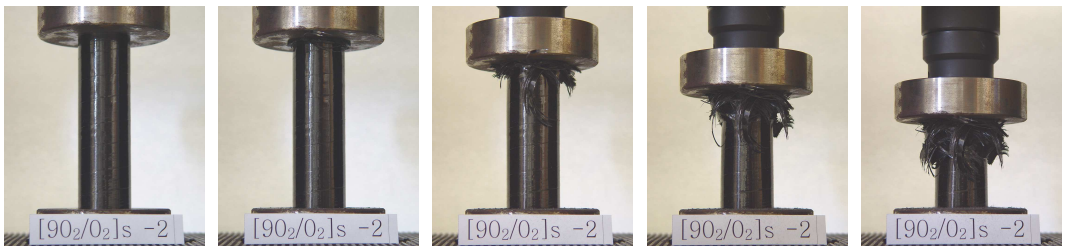


Fig. 36 Load−displacement curve of circular compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 31 Collapse processing of circular compound member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number)

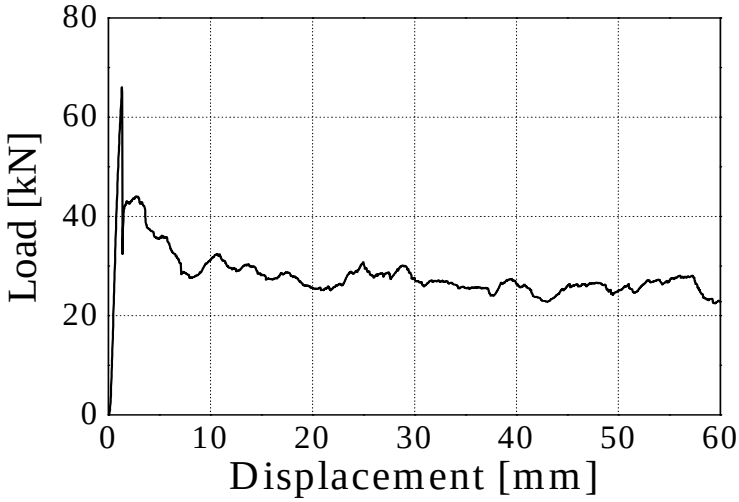
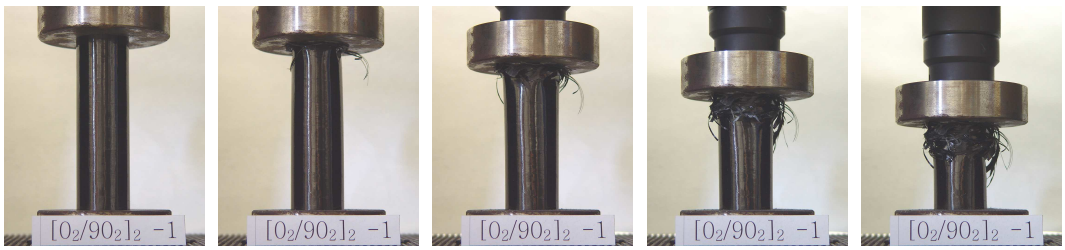


Fig. 37 Load−displacement curve of circular compound member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 32 Collapse processing of circular compound member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number)

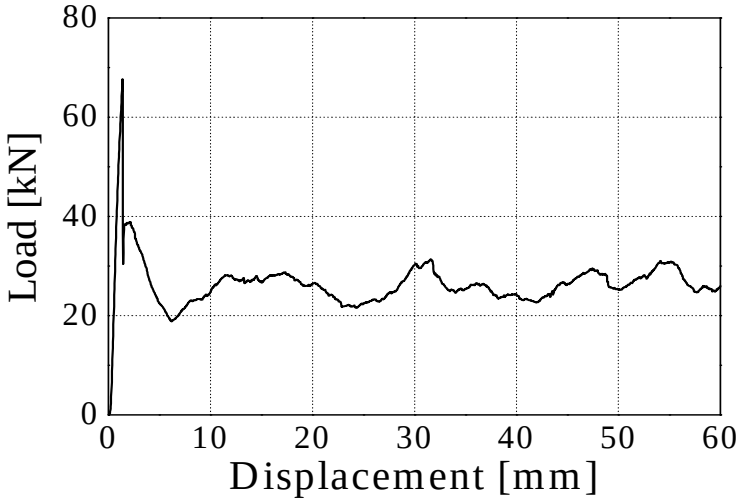
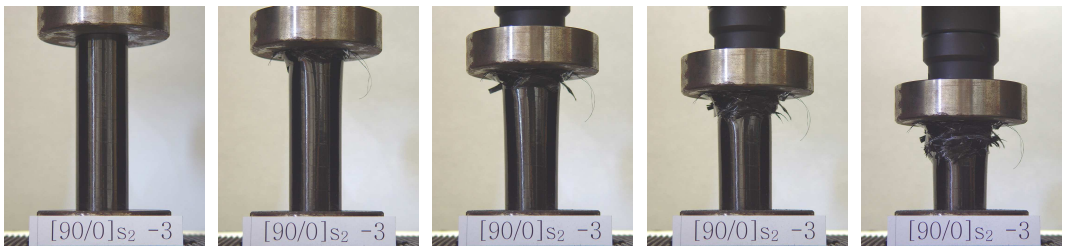


Fig. 38 Load−displacement curve of circular compound member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 33 Collapse processing of circular compound member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number)

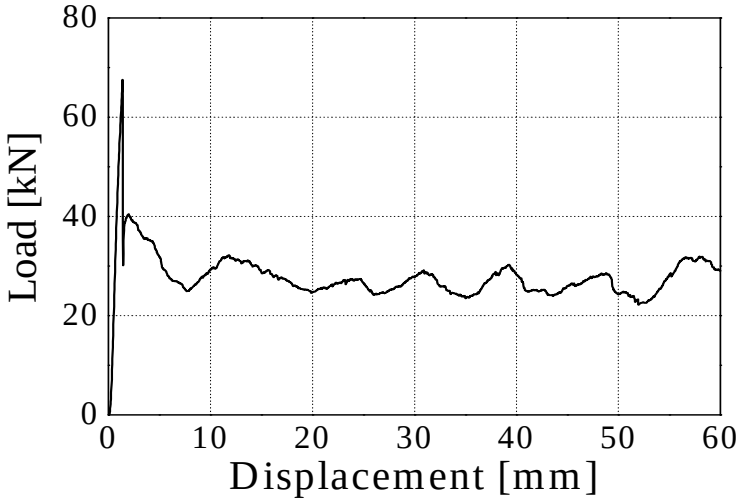
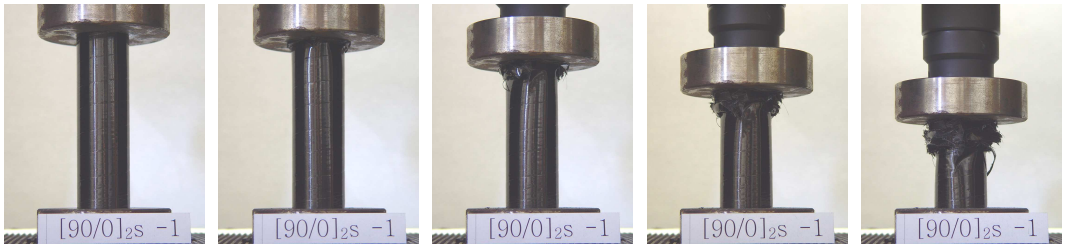


Fig. 39 Load−displacement curve of circular compound member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 34 Collapse processing of circular compound member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number)

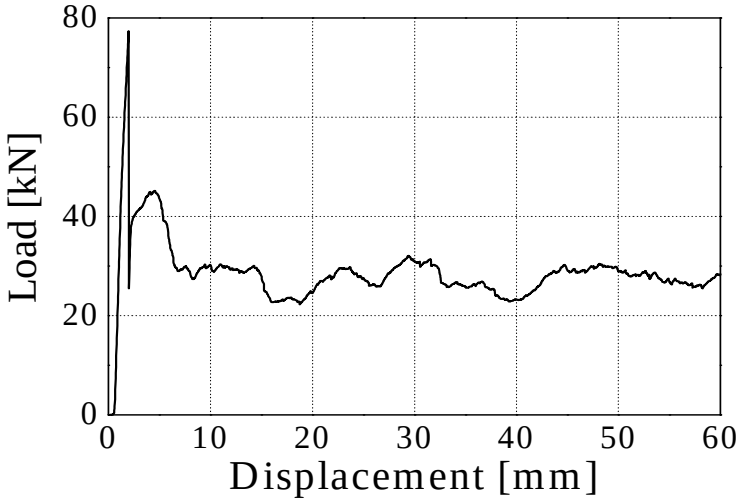
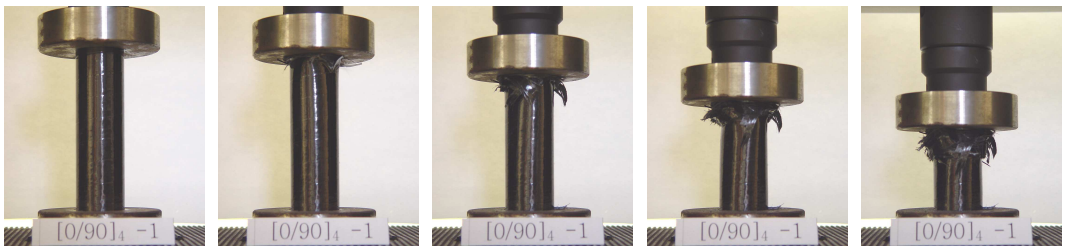


Fig. 40 Load−displacement curve of circular compound member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 35 Collapse processing of circular compound member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number)

제 3 절 결과 및 고찰

1. 원형 Al/CFRP 혼성 부재의 압궤 모드

알루미늄 원형 부재는 크게 축대칭 모드, 비축대칭 모드 그리고 축대칭 모드와 비축대칭 모드가 혼합된 압궤 모드를 이루면서 순차적이고 안정적으로 압궤된다.[14-18] 그러나 CFRP 부재의 경우는 앞서 3장에서 설명한 바와 같이 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 횡방향 전단, 라미나 굽힘 또는 국부좌굴에 의해서 압궤된다.

본 연구에서 원형 혼성 부재는 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압궤모드가 결합된 4가지 형태의 압궤모드로 압궤되었다. 이는 CFRP 적층각에 의해서 주로 결정되어진다. Photo. 36에 원형 혼성 부재의 압궤실험 후 나타난 압궤모드를 나타내었다.

Photo. 36(a)는 CFRP 적층각도가 15°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재는 축대칭 모드로 압궤되지만 외부 CFRP 부재의 기지 파단으로 인해 알루미늄 부재와 분리되면서 압궤되는 분열 모드(split mode)의 형태로 압궤되었다. 분열 모드의 압궤현상은 주로 섬유가 축방향과 비슷하게 적층된 경우에 나타나며, 축방향 섬유의 영향으로 축하중이 작용되면 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재 사이의 계면에서 서로 분리되는 현상이 나타난다. Photo. 36(b)는 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유가 끼어 들어가지만 나머지 섬유는 끼어 들어가지 못하고 파단되는 조합 모드(combination mode)의 형태로 압궤되었다. Photo. 36(c)는 CFRP 적층각도가 90°로 적층된 시험편으로 내부 알루미늄 부재의 접힘을 외부의 CFRP 부재가 방해하면서 비축대칭 모드로 압궤되고 CFRP 부재의 섬유는 대부분 절단되는 파쇄 모드(fragmentation mode)의 형태로 압궤되었다. 이 모드는 CFRP 적층각도가 축방향에 대하여 직교하는 방향으로 적층된 경우, 즉 적층각도가 큰 경우에 나타나며, 원주방향으로 적층된 섬유가 내부의 알루미늄 부재

의 접힘을 방해하면서 파단되어 압궤가 된다. Photo. 36(d)와 (e)는 0°와 90°의 CFRP 적층각도가 조합된 시험편으로 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단되면서 압궤되는 파쇄 확장 모드(fragmentation and splaying mode)의 형태로 압궤되었다. 파쇄 확장 모드는 축방향 0°의 섬유가 부재의 외측으로 확장되어 알루미늄 부재와 분리되려하지만 90°의 섬유의 영향으로 확장되면서 90°의 섬유와 함께 파단되면서 압궤된다.

Table. 8은 압궤모드와 에너지 흡수 메커니즘과의 관계를 나타내었다.

CFRP 적층각도가 축방향과 비슷한 방향으로 적층이 되어 적층각이 적을 때, 축하중이 작용되면 초기 피크 하중 이후 CFRP 부재와 알루미늄 부재의 계면에서의 분리로 인해 내부 알루미늄 부재는 순차적인 압궤에 의해서, CFRP 부재는 라미나 굽힘에 의해서 분리되면서 에너지를 흡수한다. 이 경우는 순수 CFRP 부재와 알루미늄 부재를 함께 압궤하였을 때의 에너지 흡수와 비슷하였다. CFRP 적층각도가 커질수록 CFRP 섬유는 hoop stress 형태로 하중을 지지한다. 내부 알루미늄 부재는 순차적으로 압궤가 진행되지만 CFRP 부재는 알루미늄 부재의 접힘에 의해서 섬유의 파단과 알루미늄 부재 사이로 끼어 들어가는 국부좌굴에 의해서 에너지를 흡수한다. CFRP 적층각도가 축방향에 대해 직교하는 방향으로 가까워지면 사각 혼성 부재와는 다르게 원형 혼성 부재의 내부 알루미늄 부재의 접힘 간의 길이가 짧아 접힘 사이로 끼어 들어가지 못하고 원주방향으로 적층된 대부부의 섬유가 파단에 의해서 에너지를 흡수하였다. 또한 0°와 90°의 CFRP 적층각도가 조합된 경우는 0°의 섬유의 라미나 굽힘과 90°섬유의 국부좌굴이 조합되어 섬유의 파단을 유도하면서 라미나 굽힘, 국부좌굴 및 섬유 파단에 의해서 에너지를 흡수한다.

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

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

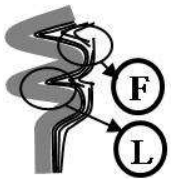
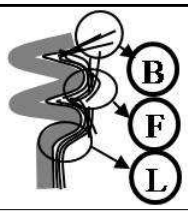
(c) $[90]_8$

(d) $[90/0]_4$

(e) $[0/90]_4$

Photo. 36 Typical collapse modes of circular compound member

Table 8. Collapse modes and energy absorption mechanisms of circular compound member

Fracture pattern Aluminum CFRP				
Orientation angle	15°	45°	90°	0°/90°, 90°/0°
Collapse mode	Split	Combination	Fragmentation	Fragmentation and splaying
Energy absorption mechanisms	B: Laminar bending	F: Fiber breaking L: Local buckling	F: Fiber breaking	B: Laminar bending F: Fiber breaking L: Local buckling

2. 원형 Al/CFRP 혼성 부재의 에너지 흡수 특성

Tables 9, 10은 8ply로 적층된 원형 혼성 부재의 적층각 변화에 의한 정적압궤 및 충격압궤실험 결과의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중의 데이터 값을 나타내었다. Figs. 41, 42는 Tables 9, 10의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Tables 9, 10과 Figs. 41, 42로부터 정적 및 충격압궤 모두, 일방향 각도로 적층된 경우는 CFRP 적층각이 클 때 즉, 90°로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외각층이 90°인 0°와 90°섬유로 조합된 부재가 적층각의 변화에 따라 가장 많은 에너지를 흡수하였다. 이는 혼성 원형 부재의 CFRP 적층각이 작을 경우, 초기 피크하중은 높지만 그 이후 알루미늄 부재와 CFRP 부재 사이의 계면에서 분리가 일어나면서 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 결합으로 인한 상호작용이 크게 나타나지 않았기 때문이다. 그러나 CFRP 적층각이 커질수록 CFRP 부재의 섬유가 hoop stress 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄 부재의 접힘을 방해하면서 전체적으로 높은 하중에서 접힘 이루어지며, 이때 CFRP 부재의 원주방향으로 적층된 섬유는 내부 알루미늄 부재의 접힘에 의해서 파단되면서 많은 에너지를 흡수하였다. 또한 0°와 90°섬유로 조합된 시험편의 경우, 0°섬유의 높은 압궤 하중과 90°섬유의 알루미늄 부재 접힘 방해로 인해 높은 하중에서 접힘이 이루어지면서 압궤가 되어 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외층 각도가 90°인 경우가 내부 0°섬유의 외측으로 확장하려는 라미나 굽힘을 방해하면서 0°섬유가 파단이 되어 더 많은 섬유의 파단으로 인해 가장 많은 에너지를 흡수하였다.

Table 11은 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압궤특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°의 원형 혼성 부재의 계면수 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 데이터의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중을 나타내었다. Fig. 43은 계면수의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 11과 Fig. 43으로부터 압궤하중과 에너지 흡수는 사각 혼성 부재와 같이 계면수의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 앞서 3장의

사각 혼성 부재에서 고찰했던 것과 같이, 계면수의 변화에 따라 발생하는 크랙진전에 의한 에너지 흡수량의 변화가 알루미늄 부재의 압궤에 의한 에너지 흡수량에 비해 미세하여 크랙 진전보다 알루미늄 부재의 소성변형과 섬유의 파단에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 같은 적층각도를 갖는 혼성 부재의 경우에 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않는 것으로 사료된다.

Table 9. Static collapse test results for circular compound member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angel of CFRP	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	901.85	30.39	62.98	68.05
45°	1139.01	38.37	79.53	37.42
90°	1207.92	40.70	84.35	36.44
90°/0°	1670.66	56.30	116.69	71.64
0°/90°	1714.96	57.78	119.76	77.37

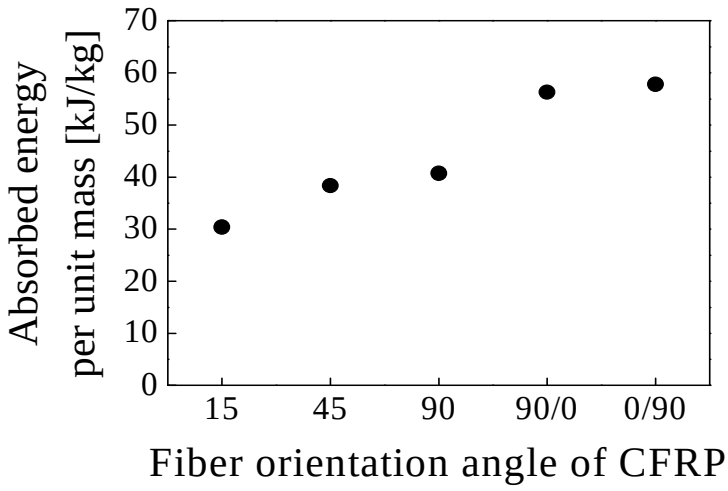


Fig. 41 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for circular compound member (static)

Table 10. Impact collapse test results for circular compound member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angel of CFRP	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	452.45	23.67	49.05	34.28
45°	1075.24	40.41	83.75	42.21
90°	1029.23	52.48	108.77	45.18
0°/90°/0°	1079.16	40.30	83.53	38.80
90°/0°/90°	1011.91	57.16	118.48	64.80

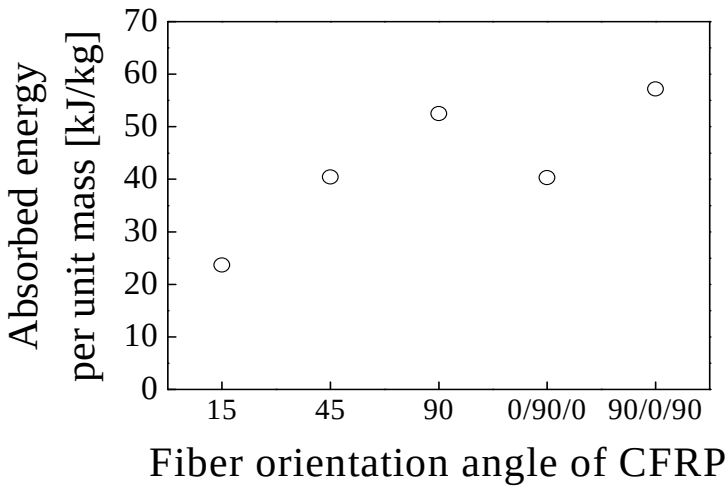


Fig. 42 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for circular compound member (impact)

Table 11. Static collapse test results for circular compound member according to interface number

Interface number	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
2	1671.81	56.34	116.76	64.04
3	1681.54	56.66	117.44	69.47
4	1671.56	56.33	116.74	66.34
6	1670.03	56.27	116.63	68.43
7	1714.96	57.78	119.76	77.37

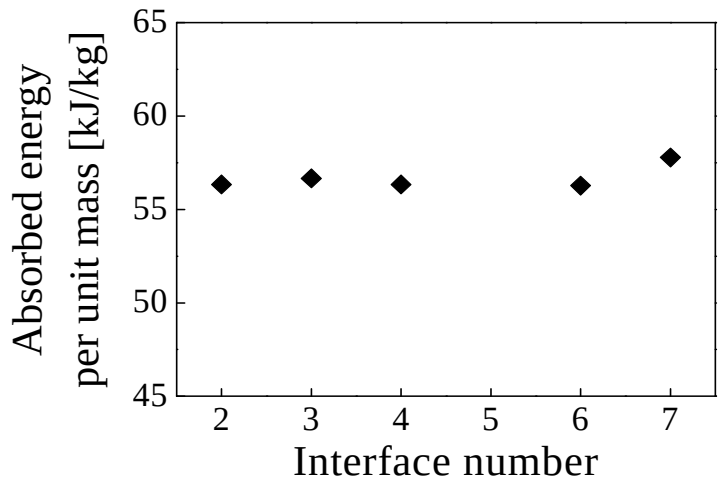


Fig. 43 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for circular compound member (static)

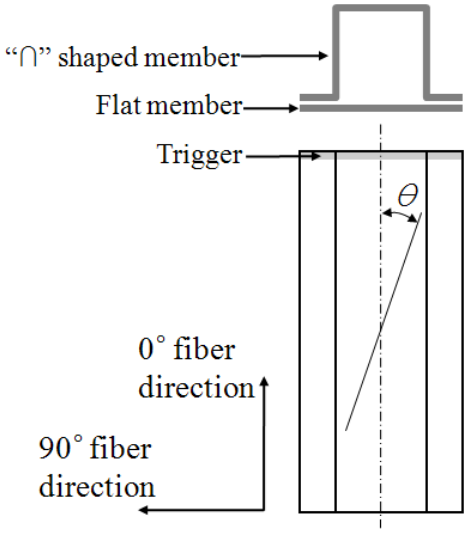
제 5 장 모자형 CFRP 부재의 안전성능평가

본 장에서는 차량 전면부 사이드 부재의 기본형상인 단일모자형 단면을 갖는 모자형 CFRP 부재에 대하여 에너지흡수 능력과 압궤모드를 고찰하여 안전성능을 평가하였다.

모자형 CFRP 부재는 탭핑(tapping)된 맨드릴에 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며, Fig. 44와 같이 "⊓"자형 부재와 평판 부재를 결합하여 제작하였다. 이방성 재료인 CFRP의 적층구성의 변화에 따른 압궤특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 $[+\theta_n/-\theta_n]$의 적층구성으로 적층각도와 계면수 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 여기서 적층각 θ는 15°, 45°, 90°, 0°/90° 및 90°/0°로 하여 적층각도를 변화시켰으며, 적층수 n을 2, 3, 4, 6 및 7계면수에 맞추어 적층하여 제작하였다. 또한, 강도부재가 축하중을 받을 때 응력분포는 대부분 모서리 부분에서 집중되면서 압궤된다. 따라서 모서리 부분의 단면적을 변화시키기 위하여 평판 부재에 대한 "⊓"자형 부재의 단면적을 변화시킨 단면형상 변화에 따른 압궤특성을 고찰하였다. 단면적비는 평판 부재의 단면적에 대한 "⊓"자형 부재의 단면적("⊓"의 단면적 / "—"의 단면적)으로 정의하고, 1.05, 2.11 및 5.27의 단면적비에 대하여 평판 부재와 "⊓"자형 부재의 프리프레그 적층수를 각각 12ply:6ply, 8ply:8ply 및 4ply:10ply로 적층하여 각 부재의 적층수(두께)에 따라 단면형상을 변화시켰으며, "⊓"자형 부재와 평판 부재의 단면적의 합이 모두 비슷하게 하여 제작하였다. 그리고 CFRP의 취성파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강한 모자형 혼성 부재의 압궤특성을 고찰하였다. 제작된 모자형 부재의 각각의 형상을 Fig. 44에 나타내었다.

CFRP의 가장 취약한 특성은 취성문제이며, 압궤초기에 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 압궤를 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 하는데, 본 연구에서는 시험편의

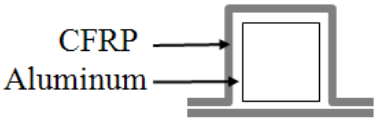
하중이 작용하는 끝단을 45˚로 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다.



(a) hat shaped CFRP member

㉠ 1.05 ㉡ 2.11 ㉢ 5.27

(b) Section of specimen according to change of sectional area ratio



(c) Section of hat shaped compound member

Fig. 44 Configuration of hat shaped member

제 1 절 적층각도 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 모자형 CFRP 부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

Figs. 45~49에 적층수 8ply를 갖는 모자형 CFRP 부재에 대하여 15°, 45°, 90°, 90°/0° 및 0°/90°의 적층각의 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 37~41에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

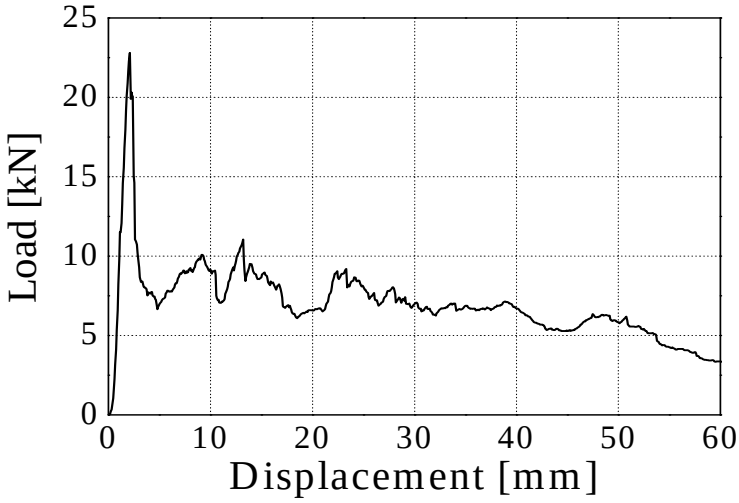
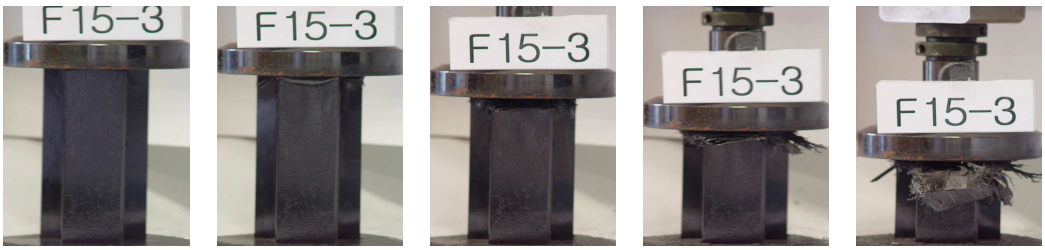


Fig. 45 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 37 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[+15/-15]_4$ (Static, 15° fiber orientation angle)

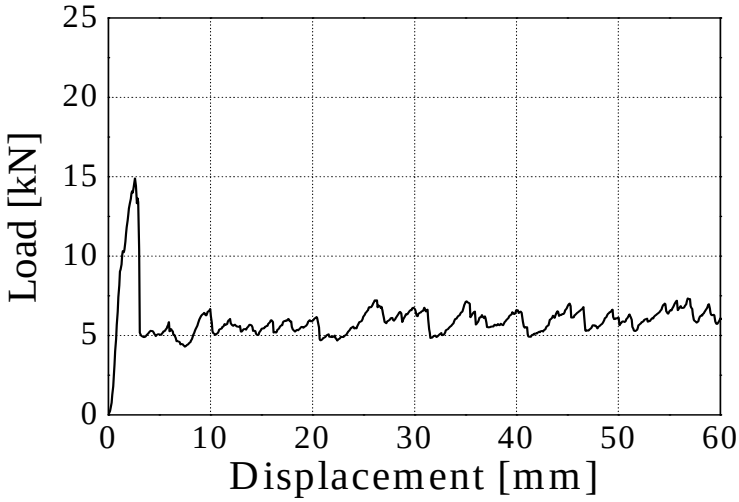
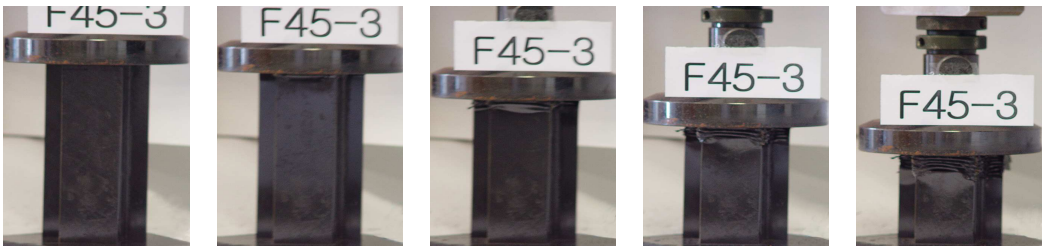


Fig. 46 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 38 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[+45/-45]_4$ (Static, 45° fiber orientation angle)

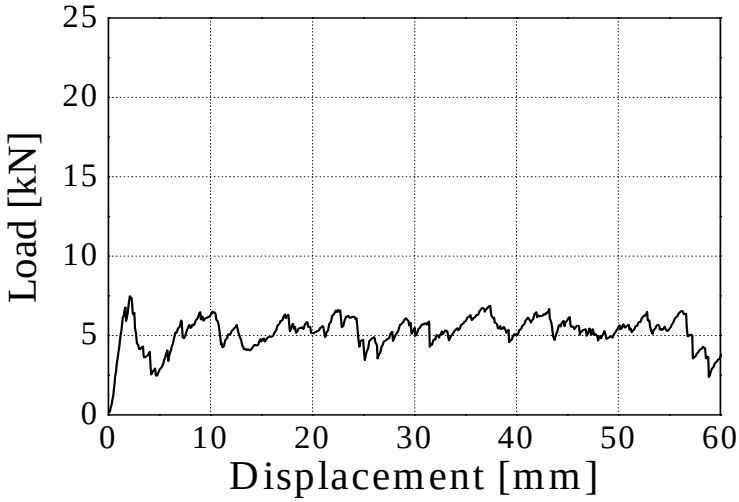
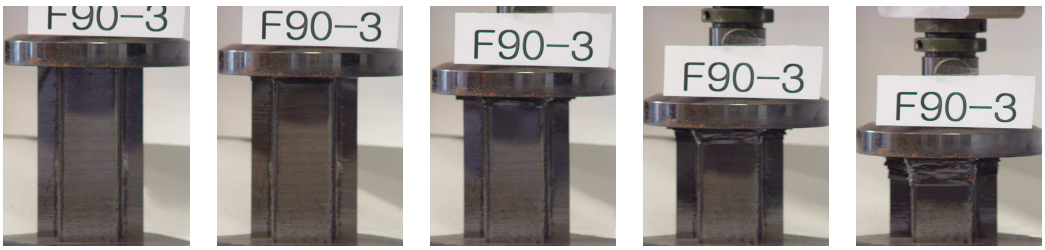


Fig. 47 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 39 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90]_8$
(Static, 90° fiber orientation angle)

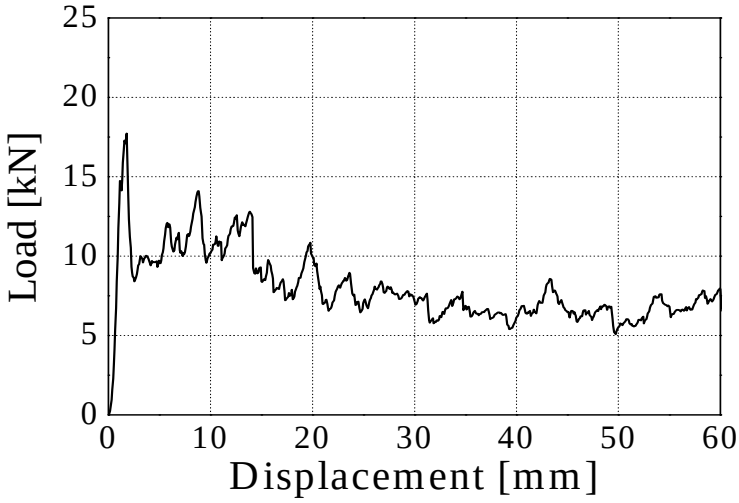
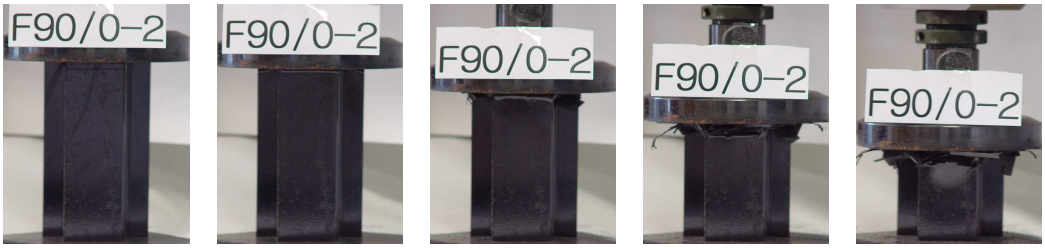


Fig. 48 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90/0]_4$ (Static, 90˚/0˚ fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 40 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90/0]_4$ (Static, 90˚/0˚ fiber orientation angle)

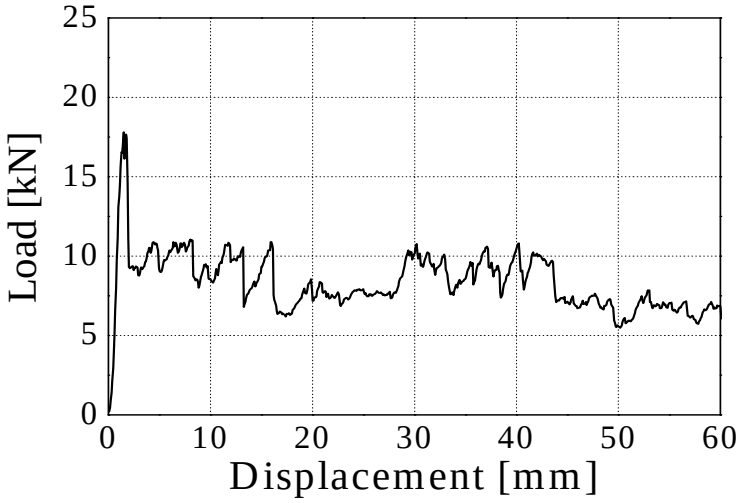
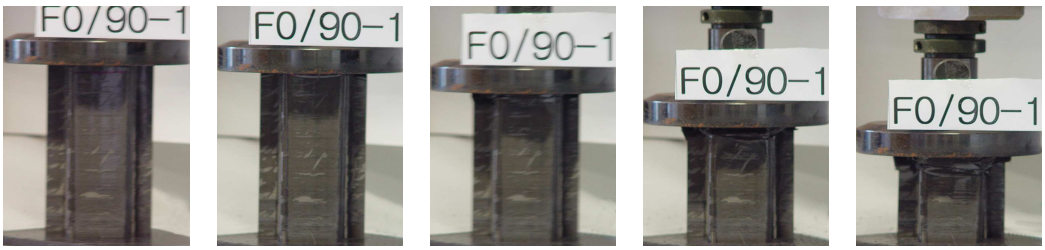


Fig. 49 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 41 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)

제 2 절 계면수 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 모자형 CFRP 부재에 대하여 계면수의 변화에 다른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

시험편의 적층각도는 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압궤특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°를 선택하여 계면수 변화에 따라 압궤실험을 행하였다.

Figs. 50~54에 최외층 각도가 90°인 적층각도 0°/90°의 모자형 CFRP 부재에 대하여 2, 3, 4, 6 및 7계면의 계면수 변화에 따른 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 42~46에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

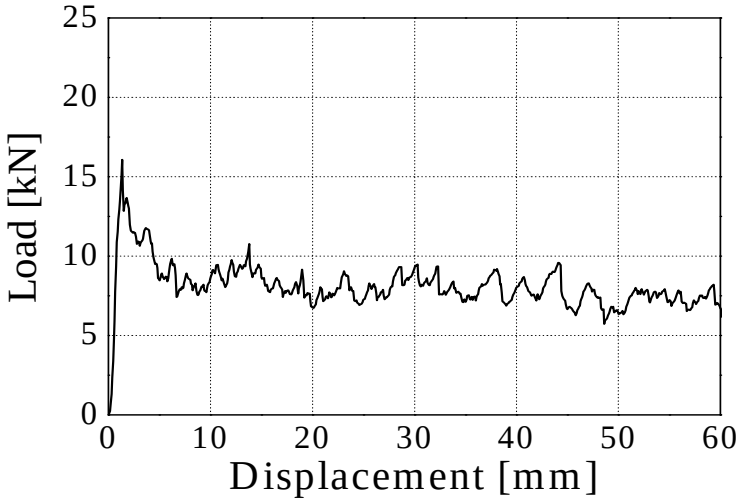


Fig. 50 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number)

(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 42 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90_2/0_2]_S$ (Static, 2 interface number)

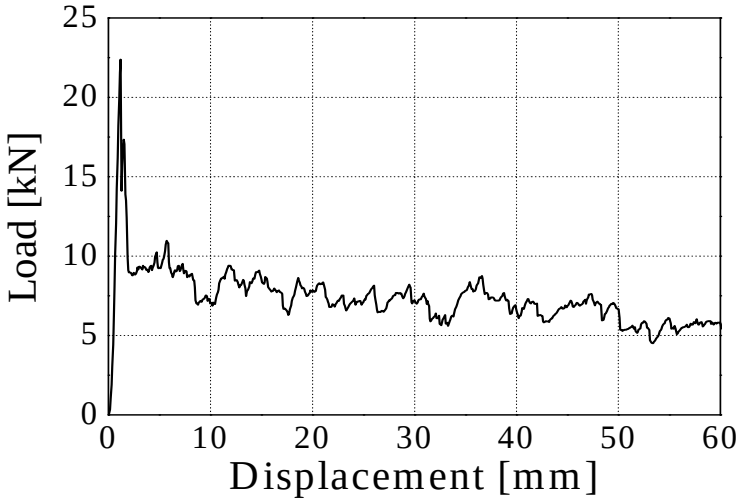
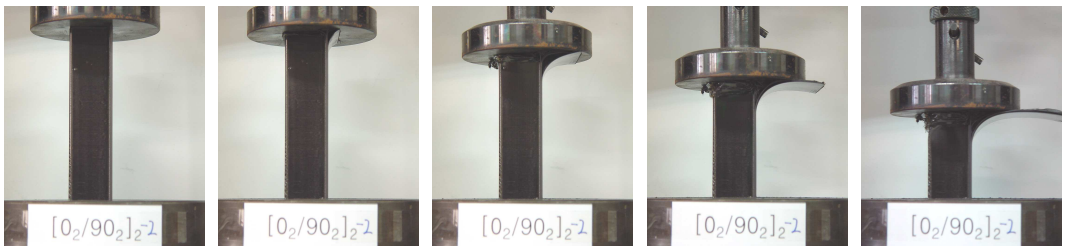


Fig. 51 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 43 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[0_2/90_2]_2$ (Static, 3 interface number)

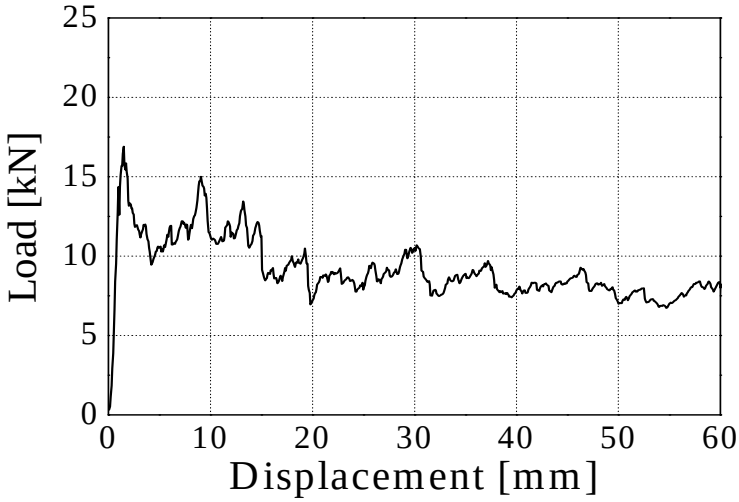
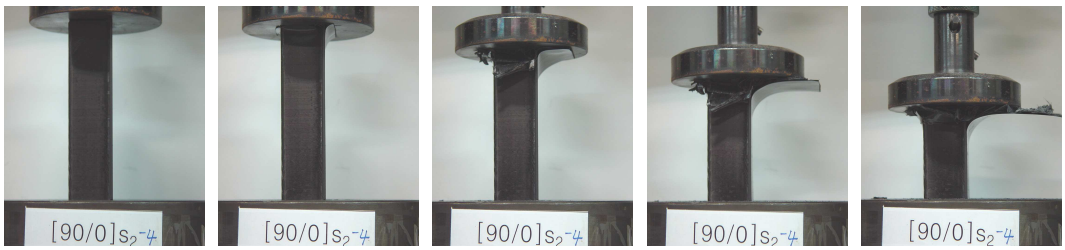


Fig. 52 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 44 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{S2}$ (Static, 4 interface number)

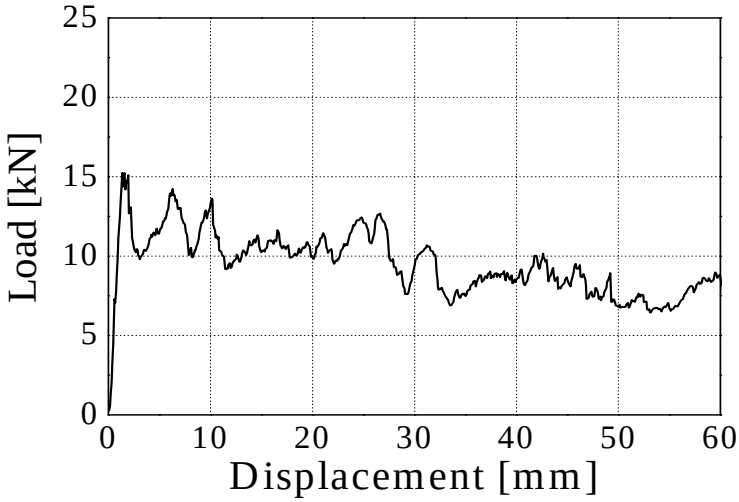
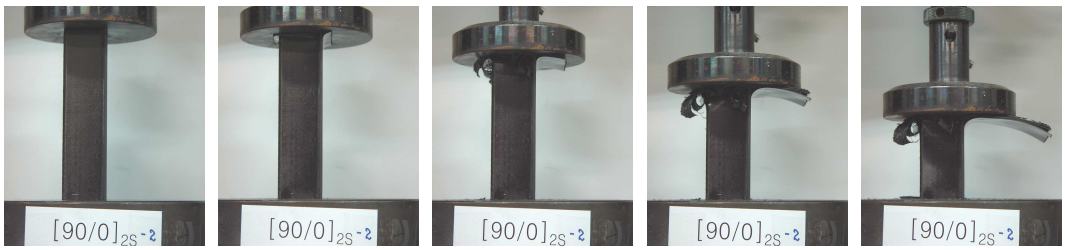


Fig. 53 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 45 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[90/0]_{2S}$ (Static, 6 interface number)

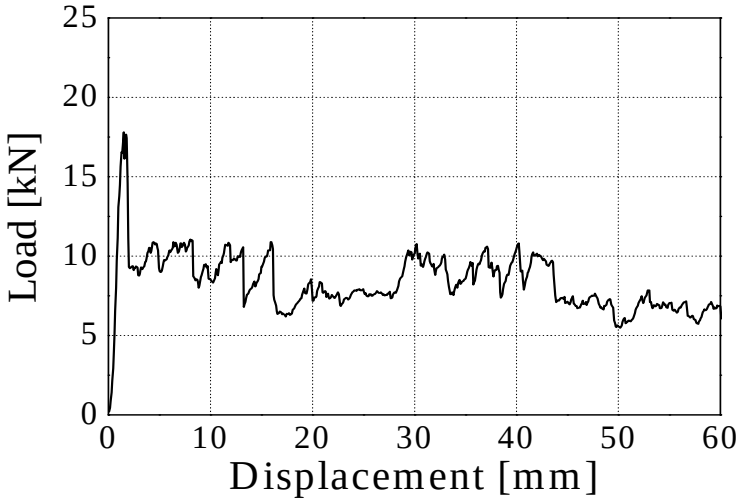
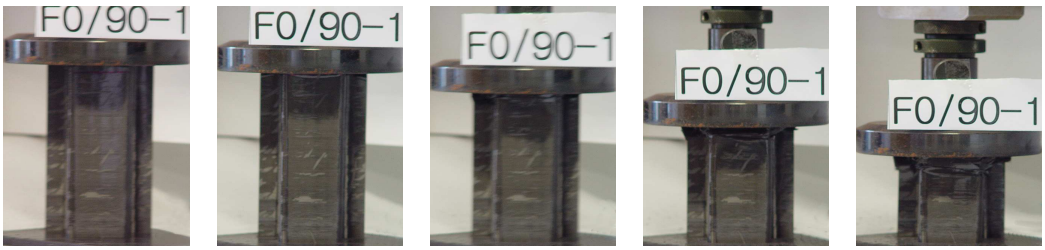


Fig. 54 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 46 Collapse processing of hat shaped CFRP member, $[0/90]_4$ (Static, 7 interface number)

제 3 절 단면적비 변화에 따른 압궤특성

본 절에서는 모자형 CFRP 부재에 대하여 모서리 부분의 단면적을 변화시켜 강성을 증가시키기 위해 평판 부재에 대한 "ㅁ"자형 부재의 단면적을 변화시킨 단면형상 변화에 따른 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

시험편의 적층각도는 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 압궤특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°를 선택하여 평판 부재에 대한 "ㅁ"자형 부재의 단면적비의 변화에 따라 압궤실험을 행하였다.

Figs. 55~57에 모자형 CFRP 부재에 대하여 단면적비를 1.05, 2.11 및 5.27로 변화시켜 정적압궤실험을 행한 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 47~49에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤과정을 나타내었다.

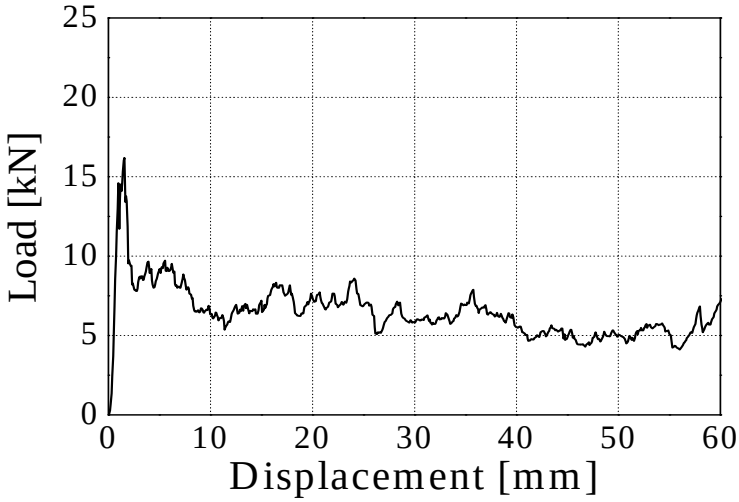
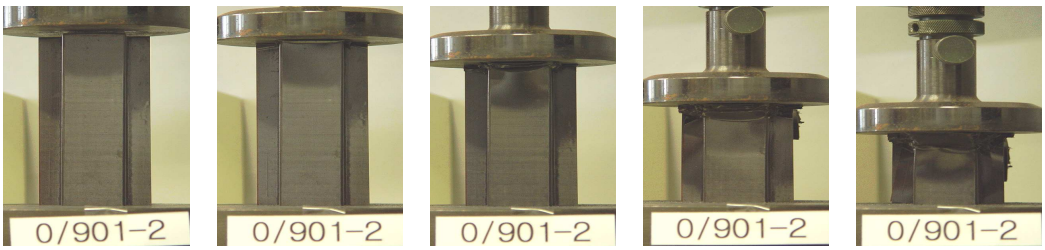


Fig. 55 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 1.05)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 47 Collapse processing of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 1.05)

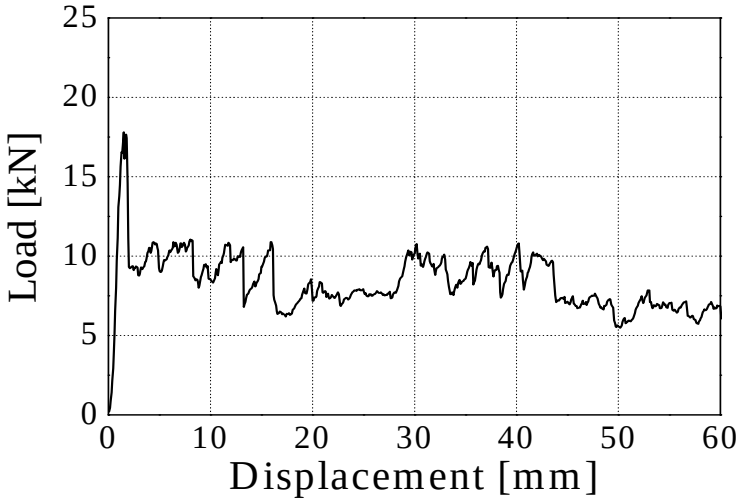
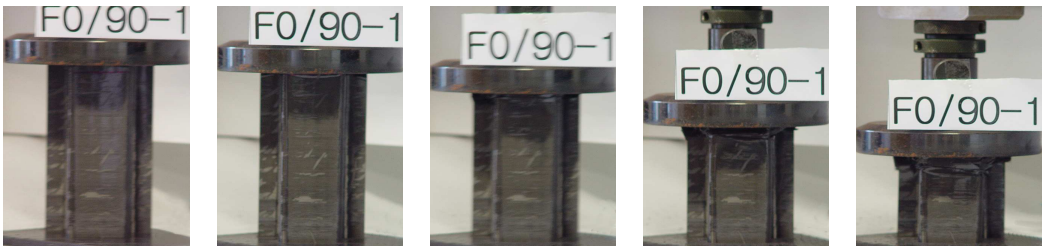


Fig. 56 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 2.11)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 48 Collapse processing of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 2.11)

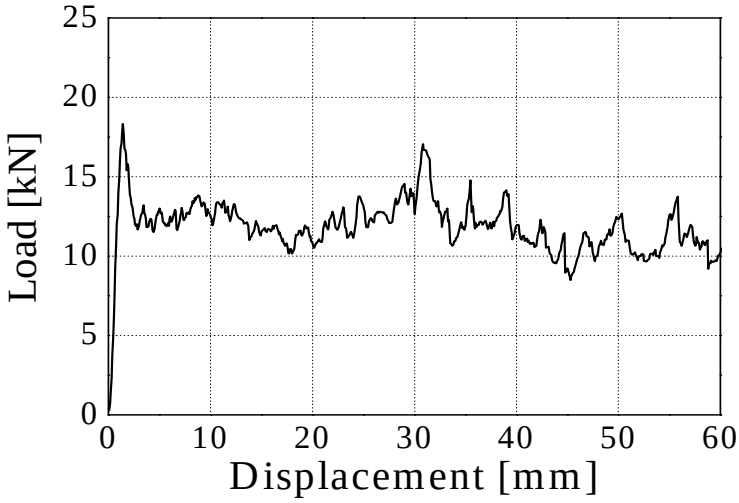
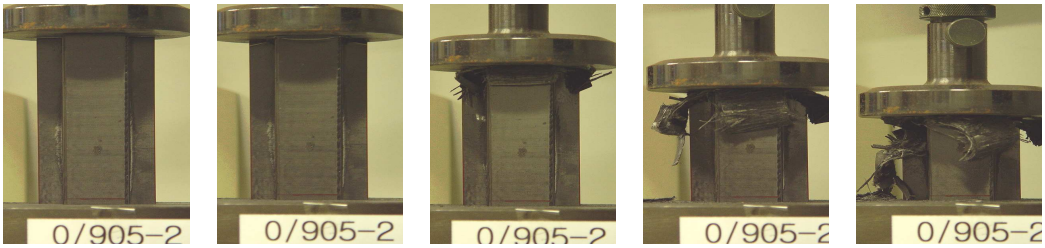


Fig. 57 Load−displacement curve of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 5.27)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 49 Collapse processing of hat shaped CFRP member
(Static, sectional area ratio: 5.27)

제 4 절 알루미늄 보강에 의한 모자형 혼성 부재의 압궤특성

본 절에서는 CFRP의 취성파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강한 모자형 혼성 부재에 대한 압궤특성을 살펴보고자 정적압궤하에서 하중-변위관계와 압궤현상을 나타내었다.

시험편의 적층각도는 적층각도의 변화에 따라 효과적인 압궤특성을 보인 0°와 90°섬유의 조합으로 이루어진 90°/0°, 0°/90° 및 모자형상을 모방한 사각 혼성 부재에서 가장 안정적인 압궤모드를 보인 90°를 선택하여 알루미늄 부재를 보강한 모자형 혼성 부재에 대하여 압궤실험을 행하였다.

Figs. 58~60에 적층수 8ply를 갖는 모자형 혼성 부재에 대하여 정적압궤실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었으며, Photos. 50~52에 각 시험편에 대하여 변형량(δ)이 각각 0mm, 5mm, 20mm, 40mm 및 60mm일 때의 압궤 과정을 나타내었다.

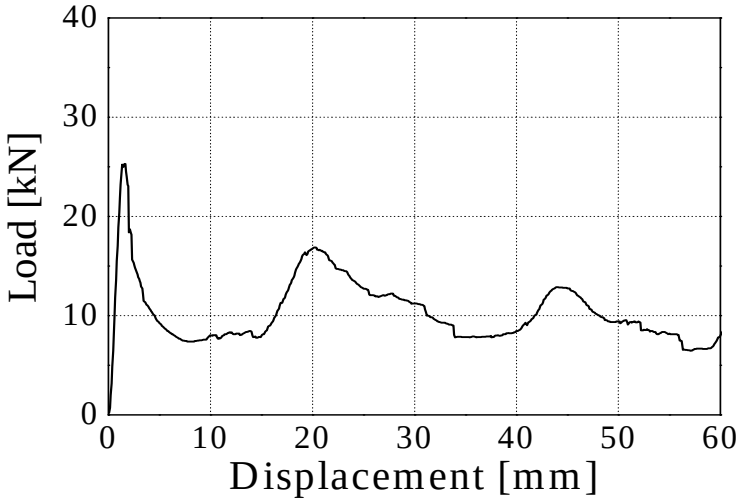
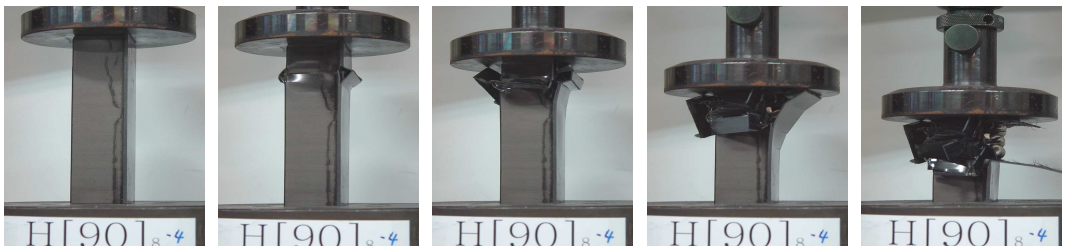


Fig. 58 Load−displacement curve of hat shaped compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 50 Collapse processing of hat shaped compound member, $[90]_8$ (Static, 90° fiber orientation angle)

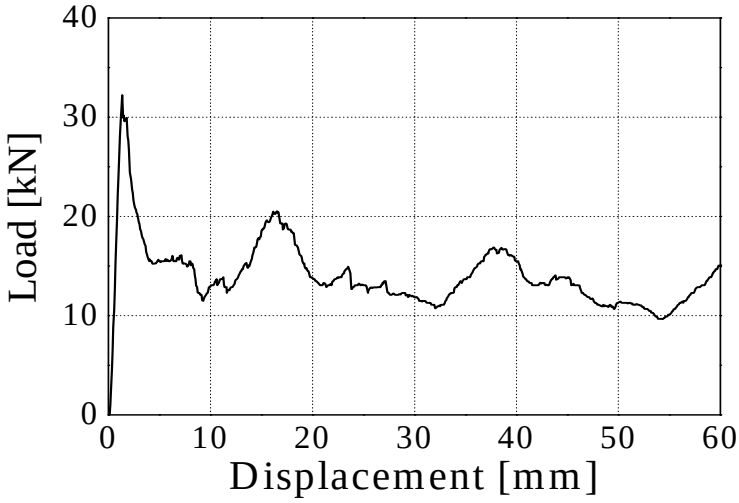
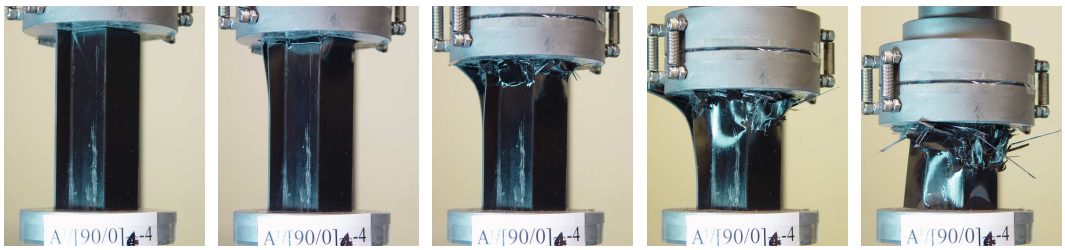


Fig. 59 Load−displacement curve of hat shaped compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90˚/0˚ fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 51 Collapse processing of hat shaped compound member, $[90/0]_4$ (Static, 90˚/0˚ fiber orientation angle)

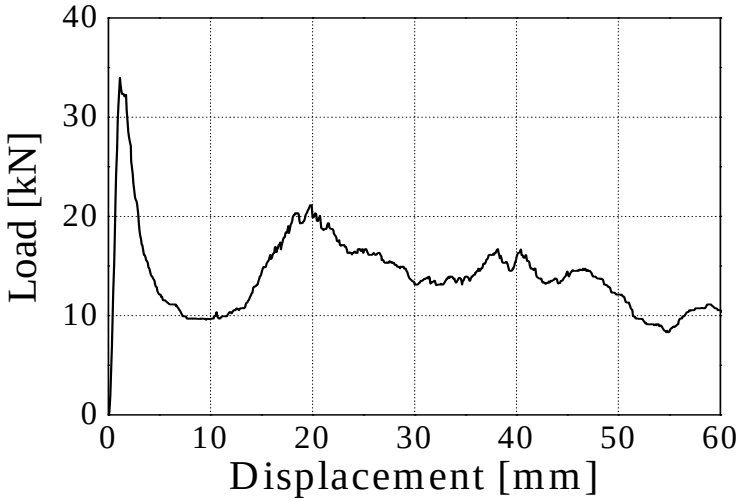
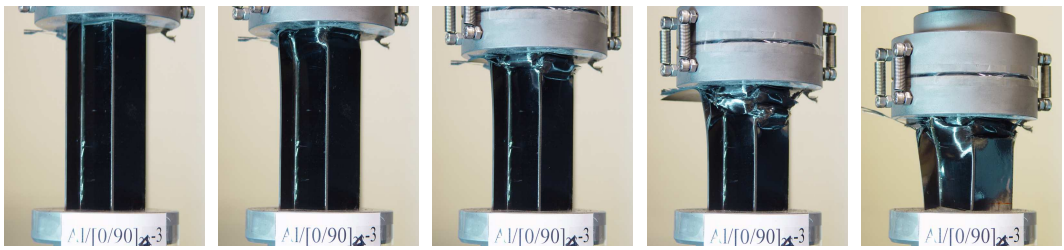


Fig. 60 Load−displacement curve of hat compound shaped member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)



(a) δ =0mm (b) δ =5mm (c) δ =20mm (d) δ =40mm (e) δ =60mm

Photo. 52 Collapse processing of hat compound shaped member, $[0/90]_4$ (Static, 0°/90° fiber orientation angle)

제 5 절 결과 및 고찰

1. 모자형 CFRP 부재의 압궤 모드

모자형 CFRP 부재의 압궤모드는 적층각에 따라 Farley and Jones[20]가 정의한 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 모드로 압궤되었다. Photo. 53에 모자형 CFRP 부재의 압궤실험 후 나타난 압궤모드를 나타내었다.

15˚로 적층된 부재에서는 Photo. 53의 (a)와 같이 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스플라인 형상으로 압궤되었으며, 이러한 압궤모드는 층간 크랙 및 층내 크랙 진전에 의한 라미나 굽힘과 압궤표면을 따라 수반된 운동과 하중면에 대한 라미나 묶음의 마찰에 의하여 주로 에너지를 흡수하며, 모서리 부분에서는 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 45˚로 적층된 부재에서는 Photo. 53의 (b)와 같이 평판 부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㅁ"자형 부재는 연성 금속에 존재하는 것과 유사한 접힘모드의 형상으로 압궤되었다. 이러한 압궤모드는 섬유의 분리와 섬유의 파손이 없이 기지의 소성변형에 의해 국부좌굴의 변형으로 구성되며, 섬유는 좌굴된 섬유의 인장면을 따라 분리되고 각 계면 사이에서 국부적인 층간분리를 발생한다. 90˚로 적층된 부재에서는 Photo. 53의 (c)와 같이 횡방향의 기지 파단으로 인한 파쇄모드의 형상으로 압궤되었다. 이러한 압궤모드는 주로 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 기지 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 90˚/0˚로 적층된 부재에서는 Photo. 53의 (d)와 같이 평판 부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㅁ"자형 부재는 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 굽힘모드가 조합된 형상으로 압궤되었다. 이러한 압궤모드는 최외각층에 0˚로 적층된 라미나 묶음에 의해 나타나는 라미나 굽힘이 두드러지게 나타났으며, 상대적으로 0˚/90˚에서 주로 나타났던 섬유의 파단은 적게 나타났다. 0˚/90˚로 적층된 부재에서는 Photo. 53의 (e)와 같이 평판 부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의

점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장되지만, "ㅁ"자형 부재는 취성파괴 모드의 형상으로 압궤되었다. 이러한 압궤모드는 주로 평판 부재의 층간 크랙 및 층내 크랙의 진전에 의한 라미나 굽힘과 "ㅁ"자형 부재의 횡방향 전단모드에 의한 라미나 묶음의 섬유 및 기지 파단과 라미나 묶음의 굽힘과 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 이는 0°로 적층된 라미나 묶음은 층간 크랙 및 층내 크랙 진전에 의해 부재 외측으로의 라미나 굽힘을 발생시키지만 축 방향에 대하여 90°로 적층된 섬유는 0°로 적층된 라미나 묶음의 라미나 굽힘을 방해하면서 파단된다. 즉, 섬유는 굽힘이 존재하나 파단에 가까우며 크랙성장과 라미나 묶음의 굽힘/파괴가 반복적으로 나타난다.

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

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

(c) $[90]_8$

(d) $[90/0]_4$

(e) $[0/90]_4$

Photo. 53 Typical collapse modes of hat shaped CFRP member

2. 모자형 CFRP 부재의 에너지 흡수 특성

Tables 12는 8ply로 적층된 모자형 CFRP 부재의 적층각 변화에 의한 정적압궤실험을 행한 결과의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중의 데이터 값을 나타내었다. Fig. 61은 Table 12의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 12와 Fig. 61를 보면 일방향 각도로 적층된 경우 적층각도가 90°에서 15°로 작아질수록 단위질량당 흡수에너지가 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 축하중이 작용될 때 적층각이 작은 경우는 라미나 굽힘과 섬유의 파단에 의하여 에너지를 흡수하지만 각도가 커질수록 섬유의 파단이 없이 횡방향 전단모드로 인한 기지의 파단에 의해 에너지를 흡수한다. 따라서 적층각이 작은 경우 섬유의 파단을 동반하여 더 많은 에너지를 흡수하는 것으로 사료된다. 또한 0°와 90°섬유로 조합된 90°/0°와 0°/90°의 적층각을 갖는 시험편의 경우, 축방향 90° 섬유의 파단과 0°섬유의 라미나 굽힘을 90°의 섬유가 방해하여 더 높은 하중에서 섬유파단과 라미나 굽힘이 일어나므로 가장 효과적인 에너지 흡수특성을 보였다. 최외층 각도의 영향을 보면, 최외층 각도가 90°인 경우와 0°인 경우의 에너지 흡수는 비슷하게 나타났다.

Table 13은 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 에너지 흡수특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°로 적층된 모자형 CFRP 부재에 대하여 계면수를 변화시켜 정적 압궤실험을 행한 결과의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중의 데이터 값을 나타내었다. Fig. 62는 Table 13의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 13과 Fig. 62를 보면 계면수가 증가함에 따라 6계면을 갖는 시험편 까지는 증가하다가 7계면을 갖는 시험편에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 CFRP 부재의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 크랙 진전이며, 크랙은 크게 층간 크랙과 층내 크랙 및 중심 크랙으로 나눌 수 있다. 따라서 계면수가 증가한다는 의미는 층간 크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수가 증가한다는 의미이며, 결국 흡수에너지는 증가하게 된다. 그러나 7계면이 되면, 즉 어느 한계를 넘어서게 되면 층

간 크랙수가 증가함에 따라 층 두께의 감소로 인하여 층내 크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수는 감소하게 되며, 결국 층간 크랙 수의 증가로 인하여 다소 흡수에너지는 증가하나 이와 더불어 층내 크랙 수의 감소로 인하여 층내 크랙 진전이 충분히 일어나지 않아 결국 단위질량당 흡수에너지는 감소하게 된다고 사료된다. 또한 6계면을 갖는 시험편의 경우 두께의 중앙($t/2$)을 기준으로 대칭구조로 적층되며, 이렇게 적층될 경우 7계면으로 적층된 시험편에서는 볼 수 없는 중앙부에 중심 크랙이 존재하게 되며 이 크랙진전에 의해 더 많은 에너지를 흡수하리라 사료된다. 따라서 층간 크랙과 층내 크랙 진전이 충분히 일어날 수 있는 계면수 및 층 두께를 고려한다면 정적 압궤 하중 하에서 최적의 압궤특성을 갖는 CFRP 부재의 제작이 가능 할 것이다.

Table 14는 적층각도의 변화에 따라 가장 효과적인 에너지 흡수특성을 보인 최외층 각도가 90°인 0°/90°로 적층된 모자형 CFRP 부재에 대하여 단면적비를 1.05와 2.11 및 5.27로 변화시켜 정적 압궤실험을 행한 결과의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중의 데이터 값을 나타내었다. Fig. 63은 Table 14의 데이터 값 중 단위질량당 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 14와 Fig. 63을 보면 단면적비가 증가할수록 단위질량당 흡수에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 강도부재가 축 하중을 받을 때 응력분포는 모서리 부분에서 대부분 집중되면서 압궤되며 단일 모자형 단면부재의 경우 일반적으로 "ㅁ"자형 부재보다 평판 부재의 좌굴하중이 낮기 때문에 평판 부재의 좌굴이 계기가 되어 압궤된다. 따라서 평판 부재에 대한 "ㅁ"자형 부재의 단면적이 증가할수록 모서리 부분에서 더 많은 응력이 집중이 되고 높은 하중에서 압궤가 시작되고 전체적으로 많은 에너지를 흡수하면서 압궤되는 것으로 사료된다.

Table 15는 CFRP의 취성파괴에 대한 단점을 보완하기 위하여 내부에 알루미늄을 보강하여 CFRP를 90°/0°, 0°/90° 및 90°로 적층한 모자형 혼성 부재에 대하여 실험을 행한 결과의 평균값으로 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 및 최대압궤하중의 데이터 값을 나타내었다. 또한 알루미늄 보강에 의한 상호작용으로 흡수에너지의 상승효과를 고찰하기 위하여 알루미늄 부재를 동

일한 조건으로 압궤실험한 후 결과의 평균값을 나타내었다. Fig. 64는 Table 15의 데이터 값 중 흡수에너지를 비교한 그림이다.

Table 15와 Fig. 64를 보면 모자형 혼성 부재의 흡수에너지는 알루미늄 사각 부재와 모자형 CFRP 부재의 흡수에너지의 합 보다 적음을 알 수 있다. 이는 내부 알루미늄 부재가 접힘(국부좌굴)을 일으키며 외부로 돌출되면서 "Π"자형 부재와 평판 부재가 결합된 모자형 CFRP 부재를 서로 분리시키면서 두 부재의 결함으로 인한 상호작용이 발휘가 되지 않았기 때문으로 사료된다. 그러나 사각 및 원형 혼성 부재와 같이 서로 분리 되지 않고 압궤가 진행되도록 한다면 두 부재 결합으로 인한 상호작용이 효과적으로 발휘되어 흡수에너지의 상승효과가 나타날 것으로 사료된다.

Table 12. Static collapse test results for hat shaped CFRP member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angel of CFRP	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
15°	421.14	28.24	41.79	22.80
45°	367.96	24.67	36.51	15.41
90°	316.03	21.20	31.37	7.80
90°/0°	503.81	33.76	49.96	18.06
0°/90°	519.59	34.84	51.55	19.53

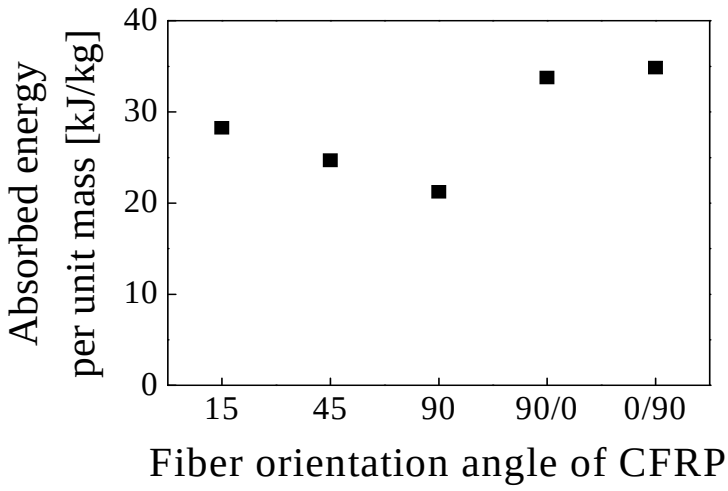


Fig. 61 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy per unit mass for hat shaped CFRP member (static)

Table 13. Static collapse test results for hat shaped CFRP member according to interface number

Interface number	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
2	460.44	30.87	45.68	16.03
3	474.25	31.80	47.05	21.37
4	521.88	35.00	51.79	16.77
6	567.34	38.03	56.28	15.53
7	519.59	34.84	51.55	19.53

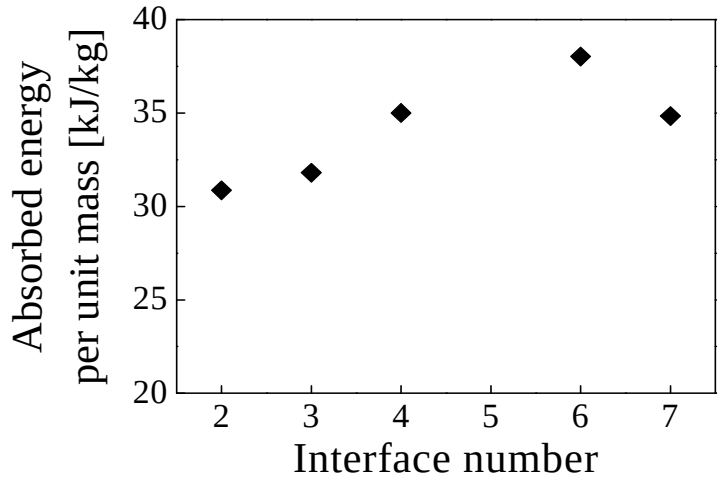


Fig. 62 Relationship between interface number and absorbed energy per unit mass for hat shaped CFRP member (static)

Table 14. Static collapse test results for hat shaped CFRP member according to sectional area ratio

Sectional area ratio	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
1.05	368.15	24.90	36.85	16.00
2.11	519.59	34.84	51.55	19.53
5.27	657.79	43.70	64.68	18.45

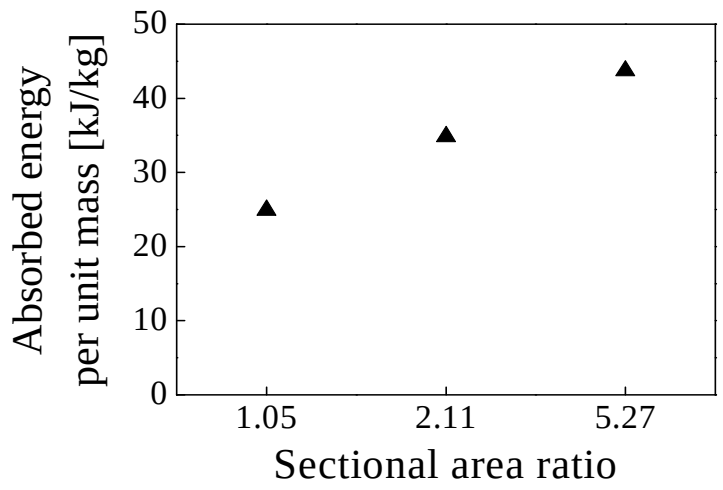


Fig. 63 Relationship between sectional area ratio and absorbed energy per unit mass for hat shaped CFRP member (static)

Table 15. Static collapse test results for hat shaped compound member

Fiber orientation angle	Absorbed energy E_a [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume E_v [MJ/m^3]	Maximum collapse load P_{max} [kN]
Aluminum	421.38	22.53	60.55	14.47
90	620.55	18.46	36.42	24.27
90/0	822.81	24.47	48.29	34.08
0/90	844.01	25.10	49.52	33.76

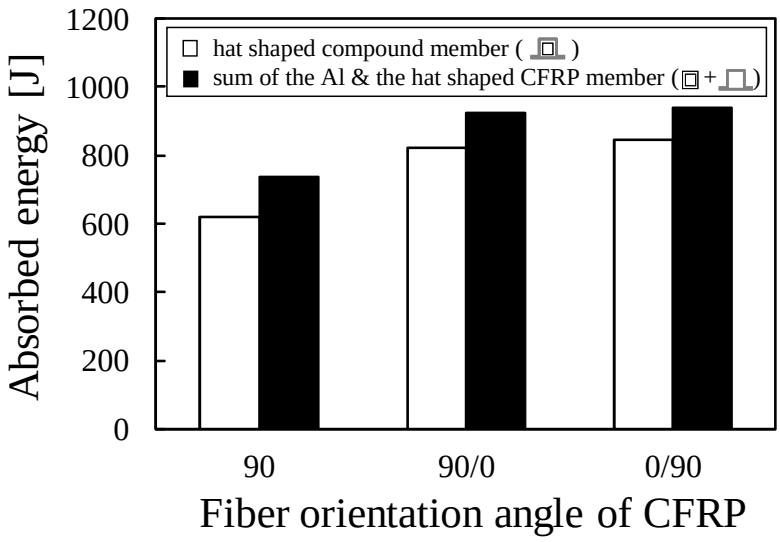


Fig. 64 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and absorbed energy for hat shaped compound member and sum of the Al & the hat shaped CFRP member (static)

제 6 장 결 론

충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능을 평가하고자 대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 복합재료를 이용한 차체구조부재가 축방향 하중을 받을 때의 압궤특성을 고찰하였다. 차체구조부재의 기본 형상인 사각 및 원형 단면과 사이드 부재의 기본 형상인 모자형 단면의 충격 흡수 부재에 대하여 CFRP 적층각도와 계면수의 변화에 따라 압궤실험을 행하여 압궤하중, 에너지 흡수 능력 및 변형 모드의 해석을 통해 안전성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사각 Al/CFRP 혼성 부재는 CFRP 적층각에 따라 분열 모드, 조합 모드, 접힘 모드 및 파쇄 확장 모드로 압궤되었고, CFRP 적층각이 작을 경우 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 서로 분리되면서 알루미늄 부재의 순차적인 압궤와 CFRP 부재의 라미나 굽힘에 의해서 에너지를 흡수하지만, CFRP 적층각이 커질수록 알루미늄 부재의 접힘 사이로 끼어 들어가는 국부좌굴에 의해서 에너지를 흡수하였다.

2. 사각 Al/CFRP 혼성 부재는 일방향 각도로 적층된 경우는 CFRP 적층각이 클 때 즉, 90˚로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외각층이 90˚인 0˚와 90˚섬유로 조합된 부재가 가장 많은 에너지를 흡수하였다. 그러나 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않았다.

3. 원형 Al/CFRP 혼성 부재는 CFRP 적층각에 따라 분열 모드, 조합 모드, 파쇄 모드 및 파쇄 확장 모드로 압궤되었고, CFRP 적층각이 작을 경우 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 서로 분리되면서 알루미늄 부재의 순차적인 압궤와 CFRP 부재의 라미나 굽힘에 의해서 에너지를 흡수하지만, CFRP 적층각이 커질수록 알루미늄 부재의 접힘으로 인한 섬유의 파단에 의해서 에너지를 흡수하였다.

4. 원형 Al/CFRP 혼성 부재는 사각 혼성 충격 흡수 부재와 동일하게 일방향 각도로 적층된 경우는 CFRP 적층각이 클 때 즉, 90°로 적층된 시험편이 많은 에너지를 흡수하였으며, 최외각층이 90°인 0°와 90°섬유로 조합된 부재가 가장 많은 에너지를 흡수하였다. 그러나 계면수의 변화에 따른 에너지 흡수 특성의 영향은 크게 나타나지 않았다.

5. 모자형 CFRP 부재는 적층각에 따라 횡방향 전단, 라미나 굽힘, 취성파괴 및 국부좌굴이 조합된 형태로 압궤되었다. CFRP 적층각도가 작을 경우에는 주로 라미나 굽힘에 의해 에너지를 흡수하지만, CFRP 적층각도가 커질수록 국부좌굴 및 기지 파단에 의한 횡방향 전단모드에 의해 주로 에너지를 흡수하였다.

6. 모자형 CFRP 부재는 일방향 각도로 적층된 경우 적층각도가 90°에서 15°로 작아질수록 흡수에너지가 거의 선형적으로 증가하였으며, 0°와 90°섬유로 조합된 경우가 일방향 각도로 적층된 부재보다 많은 에너지를 흡수하였다. 또한 계면수가 증가함에 따라 흡수에너지는 증가하다가 7계면에서는 감소하는 경향을 보였다.

7. 모자형 CFRP 부재의 단면적비가 증가할수록 모서리 부분에서 더 많은 응력이 집중이 되고 높은 하중에서 압궤가 진행되어 전체적으로 많은 에너지를 흡수하였으나, 알루미늄 보강에 의한 모자형 Al/CFRP 혼성 부재는 알루미늄 부재와 CFRP 부재가 분리되면서 상호작용이 발휘되지 않아 효과적인 에너지 흡수 특성이 나타나지 않았다.

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. Kevin Jost.. "Air bag technology trends." *Automotive engineering* 67-80, 1996.
3. 전완주. "금속 및 복합재료 충격흡수부재의 에너지흡수특성 비교연구." 『자동차공학회지』 ***15***:15-21, 1993.
4. 한국자동차공학회. 『자동차 기술 핸드북 ; 시험평가편』, SAE Korea, 1996, pp. 339-350.
5. 곽규섭. "자동차 경량화의 현황과 전망." 『자동차경제 』, 24-29, 1997
6. 권문식. "한국자동차 신기술의 동향 (Ⅵ)." 『자동차공학회지』 ***26***:30-35, 2004.
7. 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.
8. Huh, H., Kim, K. P., Kim, S. H., Song, J. H., and Hong, S. K.. "Crashworthiness assessment of frond side members in an auto-body considering the fabrication histories." *Int. J. Mech. Sci.* ***45***:1645-1660, 2003.
9. 김기풍·송정한·허훈·김현섭·홍석길. "성형 효과를 고려한 차체 구조 부재의 충돌특성."『한국정밀공학회논문집』 ***12***:91-98, 2004.
10. Kim, B. J. and Heo, S. J.. "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles" *Inernational Journal of Automotive Technology* ***4***:141-147, 2003.
11. 김범진·허승진. "알루미늄 경량 차체의 충돌에너지 흡수 성능 향상을 위한 설계 개선 연구." 『자동차공학회 논문집』 ***11***:155-160, 2003.

12. 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.
13. 김천욱·한병기·원종진·임채홍. "자동차 충돌특성 연구동향." 『자동차공학회지』 ***18***:1-17, 1996.
14. Li, S. and Reid, S. R.. "Relationship Between the Elastic Bucking of Square Tubes and Rectangular Plates." *International Journal of Applied Mechanics* ***57***:969-973, 1990.
15. 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.
16. Singace, A. A.. "Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-mode." *Int. J. Mech. Sci.* ***41***:865-890, 1999.
17. 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.
18. 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.
19. 황창숙. "축압궤 하중을 받는 Al 박육부재의 에너지흡수제어특성." 조선대학교 석사논문, 2003.
20. Farley, G. L. and Jones, R. M.. "Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes", *Journal of Composite Materials*, ***26***:388-404, 1991.
21. Farley, G. L.. "Relationship between mechanical-property and energy-absorption trends for composite tubes." *NASA Technical*

paper, ***OMB*** 0704-0188, 1992.

22. 김영남·차천석·양인영. “CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘에 관한 실험적 연구.” 한국자동차공학회논문집』***10***:149-157, 2002.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압궤특성." 조선대학교 박사논문, 2002
27. Mamilis, 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.
28. Andre Laoie, J., and Kellas, S.. "Dynamic crush tests of energy-absorbing laminated composite plates." *Composite : part A* ***27A***:467-475, 1996.
29. Hanefi, E. I. and Wierzbicki, T.. "Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes." *Composite : part B* ***27B***:387-396, 1996.
30. 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.

31. Wu, E. and Jiang, W. W.. "Axial Crush of Metallic Honeycombs." *International Journal of Impact Engineering* ***19***:439-456, 1997.
32. Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M. and Du, X. W.. "Axial impact behavior and energy absorption effciency of composite wrapped metal tubes." *International Journal of Impact Engineering* ***24***:385-401, 2000.
33. 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.
34. 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.
35. 김정호. "경량화용 차체 구조부재의 충격 압궤특성에 관한 연구." 조선대학교 박사논문, 1996.
36. 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.
37. Ohkubo Y, Akamatsu T. and Shirasawa K.. "Mean Crushing strength of closed-hat section members." *Society of Automotive Engineers paper* No. 740040, 1974.
38. Aya N. and Takahashi K.. "Energy absorption characteristics of vehicls body structure." *Japan Society of Automotive Engineers Bulletin* ***7***:65-74, 1976.
39. Tani M. and Funahashi A.. "Energy absorption by the plastic deformatin of body structural members." *Paper 783068 presented at S.A.E. Annual Meeting,* Detroit, February 1978. 2002.
40. 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.

41. 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.
42. 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
43. 차천석. "박육단면 차체구조부재의 충격압궤 특성평가." 조선대학교 박사논문, 2000.

감사의 글

부족함이 많은 논문을 마감하면서 감사의 마음을 이글로 대신합니다.

“양인영 교수님, 진심으로 감사드립니다.” 몸소 본을 보여주시며 조언과 격려로 지도해 주시고 일관된 모습으로 항상 저에게 귀감이 되어주셔서 연구자의 자세를 가르쳐주신 양인영 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한, 부족한 논문을 검토하는 과정에서 조언과 격려를 해주시고 지도편달을 아끼지 않으신 심재기 교수님, 최병기 교수님, 우석대학교 임광희 교수님과 김지훈 교수님께 감사드립니다.

그리고 학부과정부터 10년 넘게 항상 따뜻한 격려의 말씀으로 저를 이끌어 주신 양광영 교수님, 나기대 교수님, 김택현 교수님, 정낙규 교수님, 그리고 김경석 교수님께 감사드립니다.

오랜 기간 동안 실험실에서 저에게 항상 지도 편달 해 주셨던 송원대학 정종안 교수님, 익산대학 김선규 교수님, 성화대학 민한기 교수님 그리고 바쁘신 중에도 늘 최선을 다하는 모습을 보여주신 나승우 선생님, 김정호 선생님, 김영남 선생님 그리고 양순호 사장님과 모든 일들을 자신의 일처럼 도와주시고 관심을 가져 주신 동강대학 차천석 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 이제는 졸업하고 본인을 자리에서 최선을 다하고 있는 김성훈, 조영재, 허욱 그리고 박상국, 박준우, 양용준, 황우채, 김정호, 서현경 후배들에게도 그간 부족한 저를 믿고 함께 해 준 것에 감사드리고 그 외에 함께 박사학위 과정 중에 했던 정밀공학과 김진우, 신호준, 양호동, 기계공학과 김광호, 최병희, 이승철 건축공학과 김무오, 전기공학과 고필주 학우님께도 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 못난 자식을 마음 졸이시며 지켜봐 주신 사랑하는 어머님과 가족들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

그 외의 모든 분들이 계셨기에 지금의 제가 있을 수 있었으며, 앞으로의 시간을 위해 최선을 다해 열심히 하겠습니다.

무엇보다도 늘 기도하면서 믿어주고 참고 견뎌준 나의 사랑하는 아내에게 진심으로 감사드리며 저를 아는 모든 분들에게 감사의 글을 올립니다.

저작물 이용 허락서

학 과	기계설계공학과	학 번	20057419	과 정	박사
성 명	한글: 이 길 성 한문: 李 吉 成 영문: Lee Kil Sung				
주 소	광주광역시 동구 학동 백화 아파트 507호				
연락처	E-mail : ks2994@nate.com				
논문제목	한글: 충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가				
	영문: Evaluation of Safety Performance on Lightweight Vehicle Structural Members for the use of Impact Absorption				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포・전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함.

동의여부 : 동의(∨) 반대( )

2008 년 2 월 일

저작자: 이 길 성 (인)

조선대학교 총장 귀하