



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2009년 2월
석사학위논문

경량화용 AI/CFRP 혼성구조부재의 굽힘특성

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 정 호

경량화용 Al/CFRP 혼성구조부재의
굽힘특성

Bending Characteristics of Light-Weight Members
of Al/CFRP Hybrid

2009 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 정 호

경량화용 AI/CFRP 혼성구조부재의 굽힘특성

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2008 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 정 호

김정호의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 전남대학교 부교수 김 영 완 ㉠

위 원 조선대학교 조교수 김 지 훈 ㉠

위 원 조선대학교 교수 양 인 영 ㉠

2008년 11 월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	V
ABSTRACT	VIII
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 방법	3
제 2 장 실험방법	4
제 1 절 시험편	4
제 2 절 굽힘실험장치 및 방법	13
제 3 장 CFRP 구조부재 굽힘 특성	17
제 1 절 CFRP 사각 구조부재 굽힘 특성	18
제 2 절 CFRP 원형 구조부재 굽힘 특성	25
제 3 절 절 결과 및 고찰	32

제 4 장 AI/CFRP 혼성 구조부재 굽힘 특성	42
제 1 절 AI/CFRP 혼성 사각 구조부재 굽힘 특성	43
제 2 절 AI/CFRP 혼성 원형 구조부재 굽힘 특성	50
제 3 절 AI/CFRP 혼성 모자형 구조부재 굽힘 특성	57
제 4 절 절 결과 및 고찰	65
제 5 장 결론	79
참 고 문 헌	81

LIST OF TABLES

Table 1 Characteristics and use of the aluminum and CFRP	7
Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet	8
Table 3 Material properties of the aluminum	8
Table 4 Definition of Specimens	9
Table 5 Bending test results for CFRP square members	33
Table 6 Bending test results for CFRP circle members	35
Table 7 Bending test results for Al/CFRP Hybrid square members ...	66
Table 8 Bending test results for Al/CFRP Hybrid circle members	68
Table 9 Bending test results for Al/CFRP Hybrid hat shaped members	70

LIST OF FIGURES

Fig. 1(a) Schematicview of fabrication of square member	10
Fig. 1(b) Schematicview of fabrication of circle member	10
Fig. 2 Schematic arrangement of specimen in the autoclave	11
Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen	11
Fig. 4 Configuration of CFRP members	17
Fig. 5 Cross-section shape of square	18
Fig. 6 Load-displacement curve of CQ[+0° /-0°] ₄	19
Fig. 7 Load-displacement curve of CQ[+15° /-15°] ₄	20
Fig. 8 Load-displacement curve of CQ[+45° /-45°] ₄	21
Fig. 9 Load-displacement curve of CQ[+90° /-90°] ₄	22
Fig. 10 Load-displacement curve of CQ[0° /90°] ₄	23
Fig. 11 Load-displacement curve of CQ[90° /0°] ₄	24
Fig. 12 Cross-section shape of circle	25
Fig. 13 Load-displacement curve of CR[+0° /-0°] ₄	26
Fig. 14 Load-displacement curve of CR[+15° /-15°] ₄	27
Fig. 15 Load-displacement curve of CR[+45° /-45°] ₄	28
Fig. 16 Load-displacement curve of CR[+90° /-90°] ₄	29
Fig. 17 Load-displacement curve of CR[0° /90°] ₄	30
Fig. 18 Load-displacement curve of CR[90° /0°] ₄	31
Fig. 19 Load-displacement curve of All CFRP square members	32
Fig. 20 Load-displacement curve of All CFRP Circle members	34
Fig. 21 Bending Strength of CFRP square members	37

Fig. 22 Bending Strength of CFRP circle members	37
Fig. 23 Comparison strength of CFRP square and CFRP circle	38
Fig. 24 Bending stiffness of CFRP square members	40
Fig. 25 Bending stiffness of CFRP circle members	40
Fig. 26 Comparison stiffness of CFRP square and CFRP circle	41
Fig. 27 Configuration of Al/CFRP Hybrid members	42
Fig. 28 Cross-section shape of Hybrid square	43
Fig. 29 Load-displacement curve of HQ[+0° /-0°] ₄	44
Fig. 30 Load-displacement curve of HQ[+15° /-15°] ₄	45
Fig. 31 Load-displacement curve of HQ[+45° /-45°] ₄	46
Fig. 32 Load-displacement curve of HQ[+90° /-90°] ₄	47
Fig. 33 Load-displacement curve of HQ[0° /90°] ₄	48
Fig. 34 Load-displacement curve of HQ[90° /0°] ₄	49
Fig. 35 Cross-section shape of Hybrid circle	50
Fig. 36 Load-displacement curve of HR[+0° /-0°] ₄	51
Fig. 37 Load-displacement curve of HR[+15° /-15°] ₄	52
Fig. 38 Load-displacement curve of HR[+45° /-45°] ₄	53
Fig. 39 Load-displacement curve of HR[+90° /-90°] ₄	54
Fig. 40 Load-displacement curve of HR[0° /90°] ₄	55
Fig. 41 Load-displacement curve of HR[90° /0°] ₄	56
Fig. 42 Cross-section Shape of Hat shaped	57
Fig. 43 Load-displacement curve of HH _s [+0° /-0°] ₄	59
Fig. 44 Load-displacement curve of HH _s [+15° /-15°] ₄	60
Fig. 45 Load-displacement curve of HH _s [+45° /-45°] ₄	61
Fig. 46 Load-displacement curve of HH _s [+90° /-90°] ₄	62
Fig. 47 Load-displacement curve of HH _s [0° /90°] ₄	63
Fig. 48 Load-displacement curve of HH _s [90° /0°] ₄	64
Fig. 49 Load-displacement curve of All Al/CFRP Hybrid square	

members	65
Fig. 50 Load-displacement curve of All Al/CFRP Hybrid circle	
members	67
Fig. 51 Load-displacement curve of All Al/CFRP Hybrid hat shpaed	
members	69
Fig. 52 Bending Strength of Hybrid square members	73
Fig. 53 Bending Strength of Hybrid circle members	73
Fig. 54 Bending Strength of Hybrid hat shaped square members	74
Fig. 55 Comparison strength of Hybrid square · circle · hat shaped	
members	74
Fig. 56 Bending Strength of Hybrid square members	77
Fig. 57 Bending Strength of Hybrid circle members	77
Fig. 58 Bending Strength of Hybrid hat shaped square members	78
Fig. 59 Comparison strength of Hybrid square · circle · hat shaped	
members	78

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1 Autoclave	12
Photo. 2 Three bending test device	15
Photo. 3 Three bending test device for circle cross-sectione	15
Photo. 4 Universal testing machine	16
Photo. 5 Bending processing of CQ[+0° /-0°] ₄	19
Photo. 6 Bending processing of CQ[+15° /-15°] ₄	20
Photo. 7 Bending processing of CQ[+45° /-45°] ₄	21
Photo. 8 Bending processing of CQ[+90° /-90°] ₄	22
Photo. 9 Bending processing of CQ[0° /90°] ₄	23
Photo. 10 Bending processing of CQ[90° /0°] ₄	24
Photo. 11 Bending processing of CR[+0° /-0°] ₄	26
Photo. 12 Bending processing of CR[+15° /-15°] ₄	27
Photo. 13 Bending processing of CR[+45° /-45°] ₄	28
Photo. 14 Bending processing of CR[+90° /-90°] ₄	29
Photo. 15 Bending processing of CR[0° /90°] ₄	30
Photo. 16 Bending processing of CR[90° /0°] ₄	31
Photo. 17 Picture of bending result of CFRP square members after 20 sec	33
Photo. 18 Picture of bending result of CFRP circle members after 20 sec	35
Photo. 19 Bending processing of HQ[+0° /-0°] ₄	44
Photo. 20 Bending processing of HQ[+15° /-15°] ₄	45
Photo. 21 Bending processing of HQ[+45° /-45°] ₄	46
Photo. 22 Bending processing of HQ[+90° /-90°] ₄	47

Photo. 23 Bending processing of HQ [0° /90°] ₄	48
Photo. 24 Bending processing of HQ [90° /0°] ₄	49
Photo. 25 Bending processing of HR [+0° /-0°] ₄	51
Photo. 26 Bending processing of HR [+15° /-15°] ₄	52
Photo. 27 Bending processing of HR [+45° /-45°] ₄	53
Photo. 28 Bending processing of HR [+90° /-90°] ₄	54
Photo. 29 Bending processing of HR [0° /90°] ₄	55
Photo. 30 Bending processing of HR [90° /0°] ₄	56
Photo. 31 Bending processing of HH _s [+0° /-0°] ₄	59
Photo. 32 Bending processing of HH _s [+15° /-15°] ₄	60
Photo. 33 Bending processing of HH _s [+45° /-45°] ₄	61
Photo. 34 Bending processing of HH _s [+90° /-90°] ₄	62
Photo. 35 Bending processing of HH _s [0° /90°] ₄	63
Photo. 36 Bending processing of HH _s [90° /0°] ₄	64

ABSTRACT

Bending Characteristics of Light-Weight Members of Al/CFRP Hybrid

Kim, Jung-Ho

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

Dept. Advanced Parts & Materials
Engineering.

Graduate School of Chosun University.

Applications of composite materials in various engineering fields have been extended significantly. Various researchers have written the rigidity and strength characteristics of composite material according to shaped structures and material direction. Strength and rigidity by design parameters should be determined during the composite material test. Design parameters, material systems, stacking direction, thickness, stacking sequence, etc are available. CFRP, which has been widely used in space/aviation industries, sports/leisure, and general structural applications due to dimensional stability, unchangeability of material property, high strength and rigidity, corrosion resistance, etc, was selected. For automobile application, integration, complex features, safety and environmental issues have been improved. To meet this demand, structural members and parts should be light-weight with high strength and rigidity.

To achieve structural members of CFRP with high strength and rigidity, theoretical approaches is limited to isotropic material, and empirical studies have been conducted. As with other composite materials, CFRP

shows different rigidity and strength according design parameters due to difference in properties in fiber and substrate material. Among the numerous design parameters, orientation angle is selected to find optimal condition for strength and rigidity about compression. Structural members receive not only compression but also bending and torsion. Therefore, respective study should be conducted. Studies on compression have been extensively made, but the study on torsion and bending is lacking. In addition, aluminum reinforcement is applied to prevent the shortcoming of CFRP—brittleness, strength reduction under external pressure.

In the study, For the mechanical properties like bending strength and rigidity, CFRP members and Hybrid members with aluminum reinforcement was manufactured by changing of cross-section and orientation angle and test three point bending. Stacking thickness and sequence among design parameters refers the one in previous study.

1. To prepare CFRP square and circle members with greater strength and stiffness, 0/90 and 90/0 stacking are best as like fabric
2. Regardless of shape as square or circular, $[+0/-0]_4$ showed bending fracture before reaching maximum load, and stacking in $[+0/-0]_4$ is not appropriate.
3. Comparison on strength and stiffness between square and round member, circular shape exhibited 2 times of square. For same stacking condition, round structure is preferred.
4. In hybrid square members, $HQ[+0^\circ /-0^\circ]_4$ is higher than $HQ[+15^\circ /-15^\circ]_4$ at bending strength and $HQ[+15^\circ /-15^\circ]_4$ is higher than $HQ[+0^\circ /-0^\circ]_4$ at bending stiffness. To prepare hybrid square

members with greater strength and stiffness, ± 0 or ± 15 stacking are best

4. In hybrid circle and hat shaped members, $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ is higher than other members at both strength and stiffness. To prepare hybrid circle and hat shaped members with greater strength and stiffness, ± 15 stacking is best
5. Comparison on strength and stiffness between square, circle and hat shaped member, Not special.
6. $[0^\circ / 90^\circ]_4$ and $[90^\circ / 0^\circ]_4$, are almost same in load-displacement, strength and stiffness. So not special whatever outside is stacking 0° or 90°

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

자동차·기차·항공기등 운송수단은 기능의 직접화, 고성능화 및 다기능화에 따른 여러 가지 장비 및 부품의 장착으로 중량이 증가되고 있으며, 자동차와 같은 수송차량은 2005년 2월 16일 온실가스를 1990년 대비 평균 5.2% 감축의 내용을 가진 교토의 정서가 발효된 지금 미국, 유럽과 일본에서는 온실가스의 주범인 자동차 배기가스를 줄이고자 대기정화법을 개정하여 수송차량의 배기가스 규제와 연비향상을 통한 환경오염의 저감을 요구하고 있다. 따라서 차량성능향상과 연비 개선이라는 과제를 동시에 만족시켜야 한다.

20세기초 초경량화 기술은 알루미늄합금의 개발에 의해 비약적인 발전을 이루었으며 이와 더불어 알루미늄합금보다 더 가볍고 비강도와 비강성이 우수한 섬유보강 복합재료 역시 많은 발전을 이루고 있다.

치수 안정성, 물성의 불변성, 고강도 및 고강성도, 내부식성 등 많은 장점을 가지는 복합재료는 여러 공학분야에서 꾸준히 활용이 증가되고 있다. 복합재료는 그 특성상 각각의 구조에 필요한 재료의 방향에 따른 강성, 강도 그리고 흡수에너지의 특성을 복합재료의 메커니즘 설계 방법에 따라 조절할 수 있다. 복합재료의 메커니즘 설계변수로는 여러 가지 다양한 재료시스템, 적층방향, 적층두께 그리고 적층순서 등이 있다. 복합재료를 설계에 활용할 시에 이와 같은 설계변수에 의한 강성, 강도 그리고 흡수에너지의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 섬유강화 복합재료를 활용하기 위한 설계데이터를 얻기 위하여 이론수식을 통해 응력해석(강성, 강도)을 구하여 분석비교 하기에는 일반 등방성 재료에 비해 섬유와 기지재료 각각의 물성치값과 섬유와 기지재료가 복합된 물성치값의 차이와 다양한 경향 때문에 그 해석 또한 매우 복잡하고 어려우며 인장, 압축 및 전단하중 작용시 불안정한 파괴모드를 보여 대부분 실험에 의존되고 있다.^{1~2)} Farely^{3~6)}은 복합재에 대한 구조부재의 압력에 관한 다양한 단면형상으로 적층각도, 두께 등의 영향인자에 따른 압력거동 및 압력특성에 대하여 고찰하였다. 이러한 섬유강화 복합재료는 단

점으로는 외부충격에 대해 매우 취약하여 충격이 가해진 이후 강도가 급격히 저하된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 경량화 재료이면서 자동차 구조부재 재료로 많이 사용되는 알루미늄 합금에 섬유보강 복합재료를 접합한 연구가 많이 진행되어지고 있다. Song⁷⁾과 Bouchet⁸⁾은 알루미늄-복합재료 혼성원형 튜브의 축하중 실험에서 혼성원형튜브가 우수한 강도와 흡수에너지를 보인다고 보고되어 있으며 Kim⁹⁾은 알루미늄/GFRP 혼성사각튜브는 축하중에 있어 GFRP 사각튜브보다 우수한 특성을 가진다고 보고되어져있고 Cha¹⁰⁾와 Yang¹¹⁾은 알루미늄/CFRP 사각 및 원형 구조부재의 두께와 적층각도 변화에 따른 축압축실험에 따른 흡수에너지 평가가 보고 되어져있다. 그러나 구조부재는 외부의 힘이 가해질 때 압축, 굽힘 그리고 비틀림이 동시에 작용되므로 압축, 굽힘 그리고 비틀림에 대한 각각의 연구가 필요하다. Triantafillou¹²⁾와 Broughton¹³⁾은 CFRP에 알루미늄 사각관의 일부를 보강할 경우 굽힘 강성과 강도가 향상됨을 보고하였고 Shin¹⁴⁾은 압축 및 굽힘하중 하에서의 알루미늄/유리섬유 복합재료 혼성사각관의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다.

그러나 섬유강화 복합재료를 이용한 구조부재의 굽힘특성은 대부분 강도와 흡수 에너지 평가하였으나 복합구조부재와 혼성 구조부재의 굽힘특성은 대부분 강도와 흡수에너지 평가가 되어져 있다. 그러나 굽힘특성은 굽힘강성에 대한 평가도 동시에 이루어져야 복합재료의 굽힘특성에 대하여 보다 정확한 설계데이터를 얻을 수 있다.

제 2 절 연구목적 및 방법

섬유강화 복합재료는 높은 무게비강도와 탄성계수, 낮은 열변형률을 가지고 있어서 우주항공 산업, 운동레저산업, 일반적인 구조부재 그리고 부품들을 포함한 여러 곳에 널리 사용되고 있다. 그러나 복합재료의 짧은 역사로 일반적 인식부족과 신뢰감을 주지 못하여 항공기나 우주선 분야에 있어서는 복합재료가 1차구조부재로는 채용되지 못하고 있는 실정이다. 1차 구조부재로써 사용되기 위해서는 다양한 재료시스템, 적층방향, 적층두께 그리고 적층순서등과 같은 메카니즘 설계 변수에 따른 시험평가가 필요하다. 섬유강화 복합재료를 구조부재로 사용할 경우 다양한 외부하중조건으로 축하중, 굽힘하중, 비틀림등의 설계변수가 존재할 것이므로 이러한 외력조건에의 검증에 위해 이에 따른 외력조건에의 설계데이터 확립이 필요하다. 그러나 섬유강화 복합재료의 축압축 실험은 많이 이루어져 충분한 데이터가 확립되어져 있으나 굽힘이나 비틀림 실험에 대한 데이터는 미비한 실정이다. 특히 굽힘실험은 안정성과 경량성 평가를 위한 강도와 흡수에너지에 따른 연구가 되고 있으나 경량성 1차 구조부재로써 굽힘하중에 파괴와 변형을 저항하는 척도를 나타내는 강도·강성 평가는 거의 되어 있지 않다.

본 연구에서는 섬유강화 복합재료중 하나인 CFRP를 사각과 원형단면을 가지는 CFRP 구조부재를 제작하고 굽힘실험 후 적층각도와 단면형상에 따른 굽힘강도와 굽힘강성을 비교하고자 하며 CFRP의 단점인 취성을 보완하고자 경량화 재료인 알루미늄 구조부재를 보강재로써 알루미늄 부재에 CFRP를 감은 사각원형 A/CFRP 혼성부재를 제작하여 적층각도와 단면형상에 따른 굽힘강도와 굽힘강성을 비교하였다. 그리고 A/CFRP 혼성구조부재를 실제차량에 사용되는 부품에 적용하고자 자동차 전면부에 사용되는 사이드부재와 같은 형상인 모자형 단면으로 제작하여 이것 또한 적층각도변화와 단면형상 변화에 따른 굽힘강도와 굽힘강성을 비교하였다.

제 2 장 실험방법

제 1 절 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료이며 이방성 특징을 가지는 섬유복합재료인 CFRP를 이용하여 구조부재에 기본 단면형상인 사각과 원형단면을 갖는 구조부재를 제작하여 시험편으로 사용하였고, CFRP의 단점인 취성특성을 보완하고자 경량화 재료중에 하나인 알루미늄을 보강재로 선택하여 알루미늄과 CFRP가 혼성된 A/CFRP 혼성 사각 구조부재와 원형 구조부재를 시험편으로 제작하였다. 또한 알루미늄과 CFRP가 혼성된 A/CFRP 혼성 시험편을 이용하여 자동차의 사이드 부재의 기본 형상인 모자형 단면으로 시험편을 제작하였다. CFRP와 알루미늄의 일반적인 특성 및 용도를 Table. 1에 나타냈다.

CFRP 사각 구조부재는 사각형상을 가진 맨드릴(Mandrel)을 제작하여 Fig. 1(a)와 같이 맨드릴에 이형필름을 감은 뒤 Carbon/epoxy 일방향 탄소섬유 프리프레그 시트(한국카본, Cu125NS, Carbon Fiber uni-direction 125g/m²)를 적층하였다. Fig. 2와 같이 적층된 CFRP 사각 구조부재에 이형필름, 사각형상을 고정시켜주는 지그, 진공팩과 진공테이프를 적층하여 오토클레이브 성형법으로 CFRP 사각 구조부재 시험편을 제작하였다.

CFRP 원형 구조부재는 Fig. 1(b)와 같이 CFRP 사각 구조부재와 동일하게 원형형상을 가진 맨드릴에 이형필름을 감고 CFRP 프리프레그 시트를 적층을 하고 적층된 CFRP 원형 구조부재에 수축테이프를 감아 Fig. 2와 같이 솜, 진공팩과 진공테이프로 원형형상이 나올 수 있도록 적층한 후 오토클레이브 성형법으로 CFRP 원형 구조부재시험편을 제작하였다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질은 Table. 2에 나타냈다.

A/CFRP 혼성 구조부재의 보강재로 사용된 알루미늄 부재는 6063-T5계열(서울메탈(주))로서 두께는 1.0mm이며, 사각 구조부재는 한변이 30mm인 정사각형 단면을 갖는 사각튜브이며 원형 구조부재는 외경 38mm 원형단면을 갖는 원형튜브이다. 알루미늄 사각과 원형구조부재는 동일한 성분으로 동일한 제작과

정을 거쳐 기계적 성질이 일치하며, 알루미늄의 기계적 성질은 Table. 3과 같다.

알루미늄과 CFRP를 결합한 AI/CFRP 혼성 사각 구조부재는 알루미늄 사각 외측표면에 샌딩 후 표면처리를 하였다. 표면처리된 알루미늄 사각 외측에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하고 CFRP 사각구조부재와 동일한 방법으로 적층한 후 혼성 시험편을 제작하였다. AI/CFRP 혼성 원형 구조부재는 AI/CFRP 혼성 사각 구조부재에서와 동일하게 표면처리된 알루미늄 원형에 적층하고 제작하였다. 알루미늄의 표면처리는 부식과 이물질을 제거하고 접촉면적을 넓게 함으로써 알루미늄 외측과 CFRP 프리프레 시트간 접착률을 좋게 해준다. 혼성 모자형 구조부재는 실제 자동차의 전면부 사이드 부재의 실제 단면 형상을 1/4크기로 설계모델화 하여 표면처리된 알루미늄 사각 구조부재에 폭(가로×세로)=32×32mm, 플랜지 길이=12mm로 "∩"형상 단면부재와 평판부재를 결합하여 오토클레이브 성형제작하였다.

CFRP는 이방성을 가지는 재료로 설계 메카니즘에 따라 여러 기계적 특성을 가지게 된다. 본 연구에서 강도와 강성이 높은 1차 구조부재로써 좋은 메카니즘을 얻고자 적층각도 변화에 따라 시험편을 제작하였다. 적층 각도는 $[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$ 으로 적층각도를 변하여 적층하였으며 Table. 4와 같이 시험편을 구분하였다.

시험편의 성형은 Photo. 1과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 돌레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레서(compressor)에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. Fig. 3은 시험편 제작 시 성형 사이클을 나타냈다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 시험편의 길이는 KS규격에서 일반적인 굽힘 시험편은 두께에 따라 시험편의 너비와 시험편이 길이가 규정 되어 있고 ASTM D6272-02에서는 시험편의 두께와 시험편의 길이(support span)가 1:16이고 굽힘작용시 필요한 여유길이는 10%를 규정하며 시험편의 너비는 길이의 1/4이상의 너비를

사용하게 되어 있다. 본 연구에서는 ASTM규격에 따라 시험의 총길이는 500mm으로 하였다.

Table. 1 Characteristics and use of the aluminum and CFRP

분 류	특 성	사 용 범 위
Aluminum (6063계)	내식성 표면처리성 성형가공성	새시 등의 건축용재, 토목용재, 가구, 가전제품, 전선관, pipe류, 열교환기 부품, 철도 실내·바닥구조, 자동차 ream 등
CFRP	비강성 비탄성	항공기(1차, 2차부재), 우주기기(태양열발전 설비), 미사일, 로켓, 인공위성, 자동차, 고 속차량, 경주용차, 오토바이, 보트, 자전거, 섬 유기계, 스포츠용품, 낚싯대, 등산용구, 카메 라, 원심분리기, 플라이휠, 그라인더 휠, 타이 어, 벨트, 회전 프로펠러, 제지기 로울러 등
	비강성 감쇠성	오디오 기기, 악기, 풍작기계, 진동 컨베어 스 프링, 자동차(drive shaft, leaf spring) 등
	강성 비크리프성	FRP배, 탱크, 저장고(싸이로) 등
	강성 비열팽창	우주기기 안테나, 밀리파 안테나, 마이크로메 타, 타이밍 벨트, 저온 탱크, 제도기기 등
	x선 투과성 강도, 강성	X선 카세트, X 선의료기기 등
	전기전도성 발열	약품 탱크, 대전방지 로울러, 정전도장 벽직 류, 전극, 전지 등
	내식성	화학 플랜트, 패킹, 열 교환기 등
	단열성 내열성	로켓트 노즐, 항공기 엔진 등

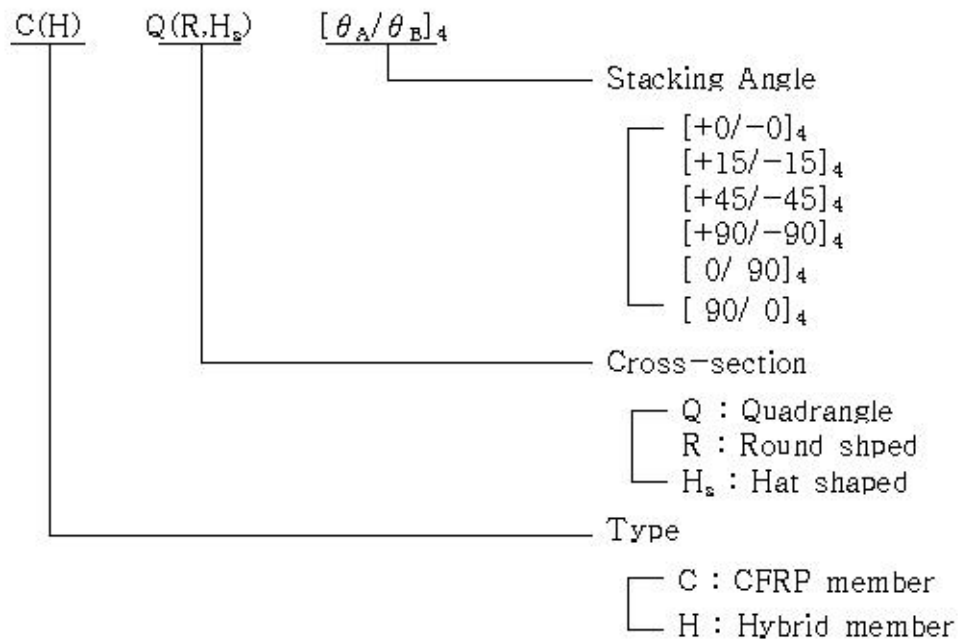
Table. 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet

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

Table. 3 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. 4 Definition of Specimens



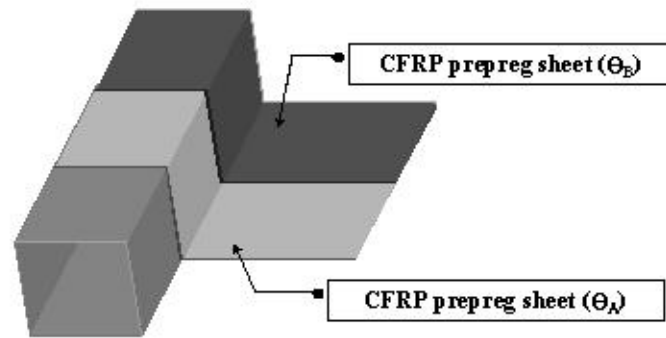


Fig. 1(a) Schematicview of fabrication of square member

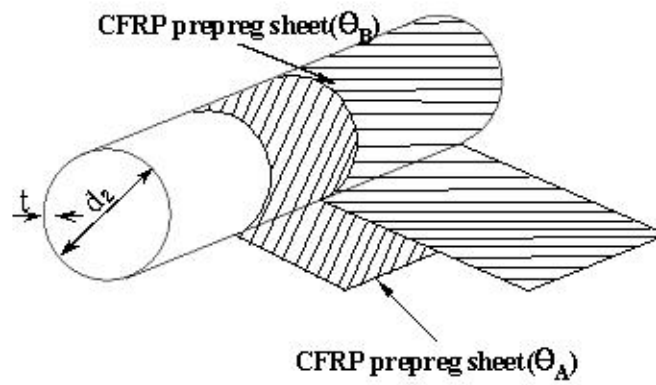


Fig. 1(b) Schematicview of fabrication of circle member

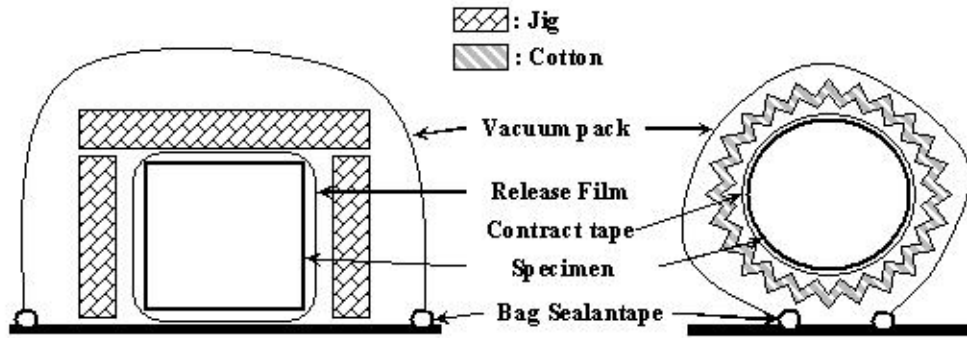


Fig. 2 Schematic arrangement of specimen in the autoclave

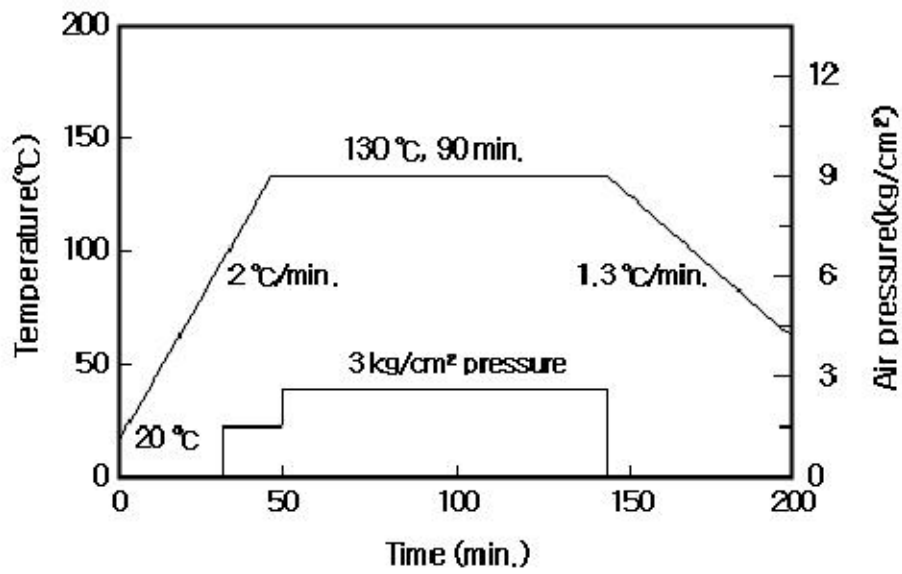


Fig. 3 Curing cycle of CFRP stacking specimen

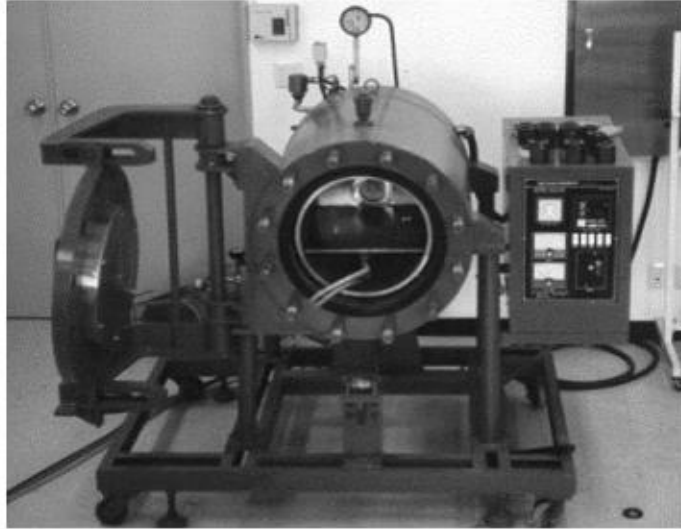


Photo. 1 Autoclave

제 2 절 굽힘실험장치 및 방법

굽힘실험방법에는 3점 굽힘 실험법과 4점 굽힘 실험이 있다. 본 연구에서는 굽힘실험방법이 쉽고 간단하여 많이 사용되는 3점 굽힘 실험법을 적용하였다. 일반적인 3점 굽힘장치는 Photo. 2와 같이 지지대(supports)의 반경이 30 mm이며 미플립을 방지하고자 자유단고정으로 하며, 하중단>Loading nose) 반경은 10mm이고 시험편의 중앙에 위치하는 3점 굽힘장치를 제작하였다. 단면형상이 원형인 부재인 경우 일반적인 3점 굽힘실험장치를 굽힘실험에 적용하기에는 점 접촉 하중에 의한 응력집중이 작용되어 순수굽힘력보다는 응력집중에 의한 굽힘이 높게 나타나 하중단이 시험편에 선하중이 작용될 수 있도록 Photo. 3와 같이 측면 반경 30mm와 수직반경 30mm를 가지는 지지대와 측면 반경 10mm와 수직반경 10mm를 가지는 하중단을 제작하였다.

이러한 3점 굽힘시험장치를 Photo. 4와 같은 만능재료시험기(UTM)에 로드셀과 액추에이터 사이에 하중단장치>Loading nose device)와 지지장치(Supports device)를 설치하고 시험편을 지지대 장치 위에 놓고 하중단 장치가 시험편 중앙에서 중력방향으로 10mm/min 속도로 이송시켜 3점 굽힘실험을 하였다.

3점 굽힘 실험 후 얻어진 하중-변위선도에서 식(1)와 식(2)으로 굽힘강도와 굽힘강성을 구하였다. 대부분 시험편은 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였다. 이는 전단력에 의한 모드Ⅱ로의 층간파괴가 발생하는 것으로 최대하중점까지를 굽힘특성으로 보고 강도와 강성 특성을 해석하였다.

$$\sigma_b = \frac{P L}{4I} y \quad (1)$$

여기서, σ_b 는 굽힘강도, P는 최대하중, L은 지지점간 길이, I는 2차 모멘트 그리고 y는 도심축이다. 단위는 각각 MPa, N, mm, mm⁴, mm이다.

$$E \delta = \frac{PL^3}{488I}$$

(2)

여기서, E 는 굽힘강성 그리고 δ 은 최대하중점의 처짐길이이다. 단위는 각각 MPa, mm이다

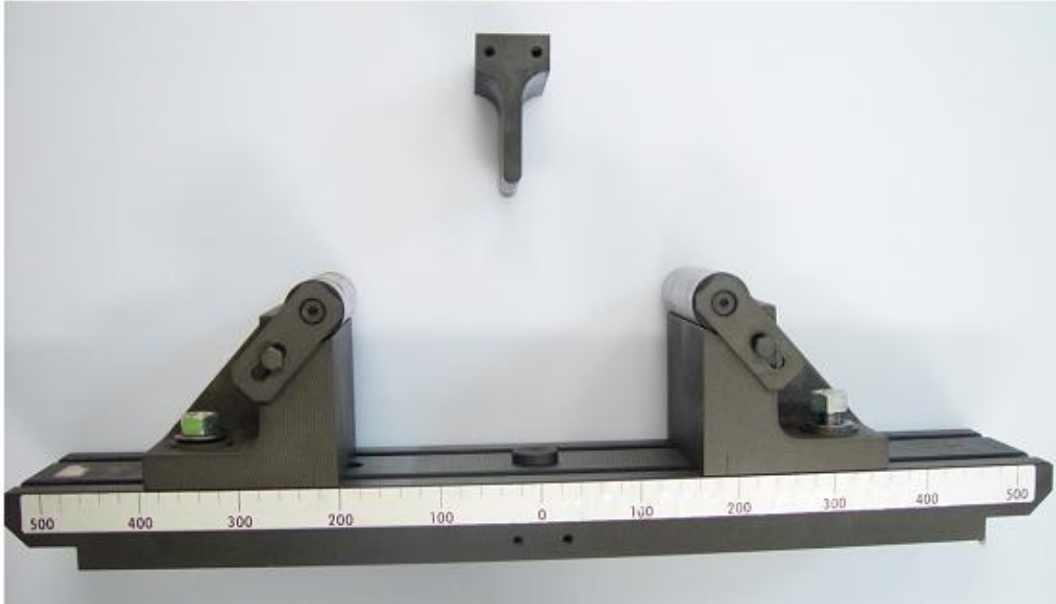


Photo. 2 Three bending test device



Photo. 3 Three bending test device for circle cross-section



Photo. 4 Universal testing machine(UTM)

제 3 장 CFRP 구조부재 굽힘특성

CFRP 사각과 원형 구조부재는 맨드릴에 이형필름을 감은 뒤 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며 강도와 강성이 높은 1차 구조부재를 얻고자 여러 설계 메카니즘 중 적층각도를 변수로 두어 시험편을 제작하였다. 그밖에 두께, 적층순서는 1mm와 $[\theta_A/\theta_B]_4$ 으로 일정하게 하였으며 적층각도 종류는 $[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$ 으로 하였다.

적층각도의 기준은 Fig. 4와 같이 시험편 길이방향을 0° 으로 정하였고, 본 장에서는 Fig. 5와 Fig. 12와 같은 사각과 원형 단면 형상을 가진 CFRP 구조부재를 3점 굽힘 실험을 행하고 실험 후 얻어진 하중-변위선도에서 각 시험편의 굽힘강도와 굽힘강성값을 얻어 적층각도와 단면형상 별로 평가하였다.

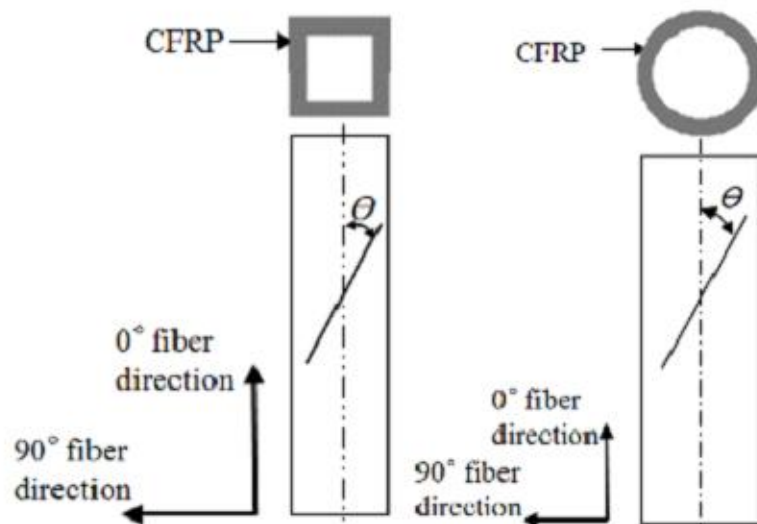


Fig. 4 Configuration of CFRP members

제 1 절 CFRP 사각 구조부재 굽힘 특성

본 절에서는 적층각도 변화에 따른 CFRP 사각 구조부재의 굽힘특성을 살펴보고자 3점 굽힘실험 후 하중-변위그래프와 굽힘현상을 나타내었다. 실험에 쓰인 CFRP 사각 구조부재의 단면모양과 크기는 보강재로 사용된 알루미늄 사각과 같은 크기로 Fig. 5에 나타내었다.

적층각도 변화에 따른 CFRP 사각 구조부재($[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$)를 3점 굽힘 실험 후 얻어진 각각의 하중-변위선도를 Fig. 6 ~ 11에 나타내었으며, 각 시험편의 굽힘과정을 Photo. 5 ~ 10에 나타내었다.

대부분 시험편은 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 이는 전단력에 의한 모드II로의 층간파괴가 발생하는 것으로 최대하중점까지를 굽힘특성으로 보고 강도와 강성 특성을 해석하였다.

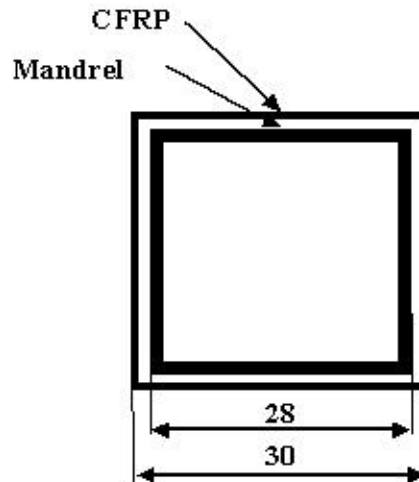


Fig. 5 Cross-section shape of square

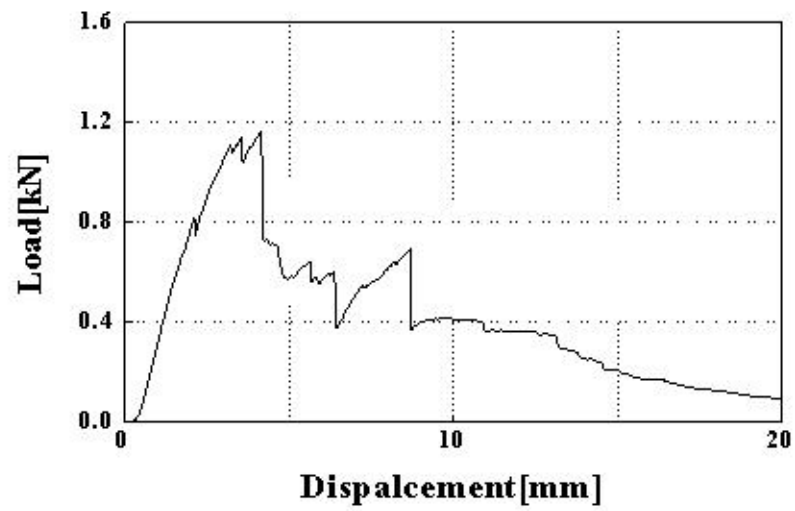


Fig. 6 Load-displacement curve of CQ[+0° / -0°]₄

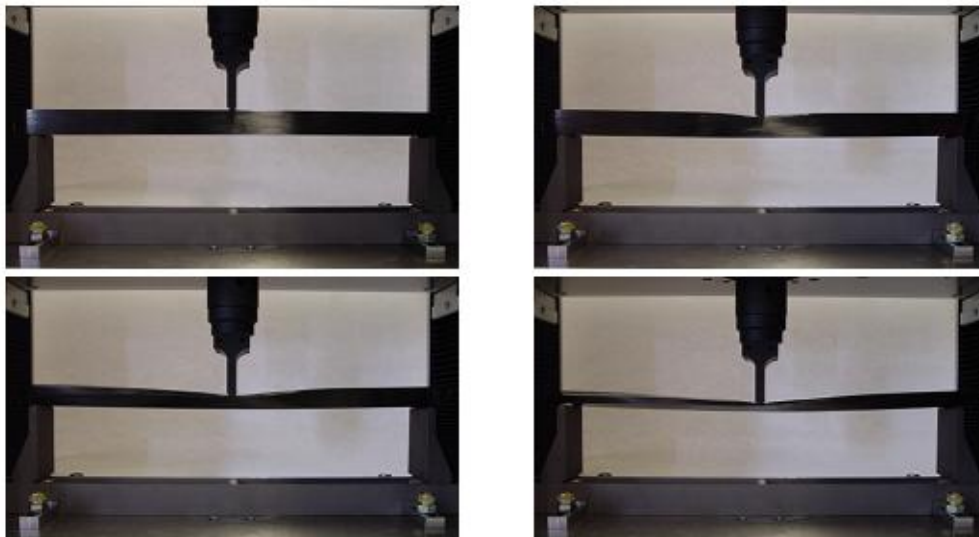


Photo. 5 Bending processing of CQ[+0° / -0°]₄

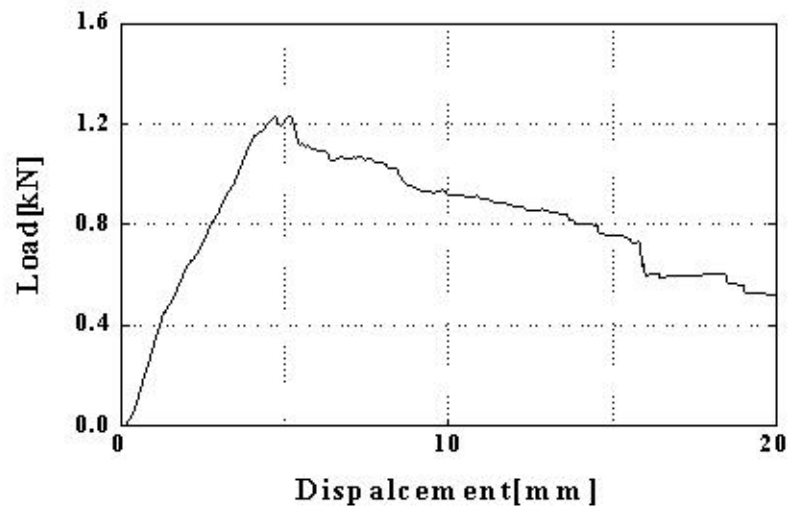


Fig. 7 Load-displacement curve of CQ[+15° /-15°]₄

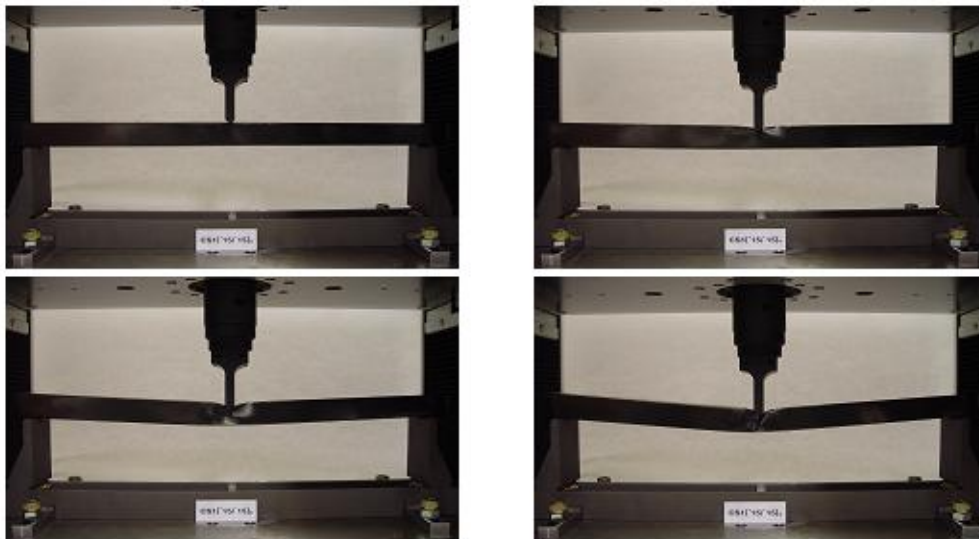


Photo. 6 Bending processing of CQ[+15° /-15°]₄

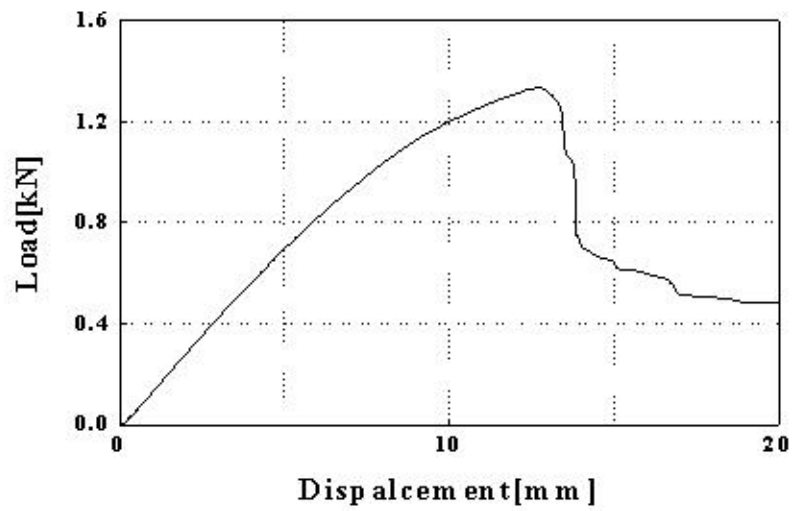


Fig. 8 Load-displacement curve of CQ[+45° /-45°]₄

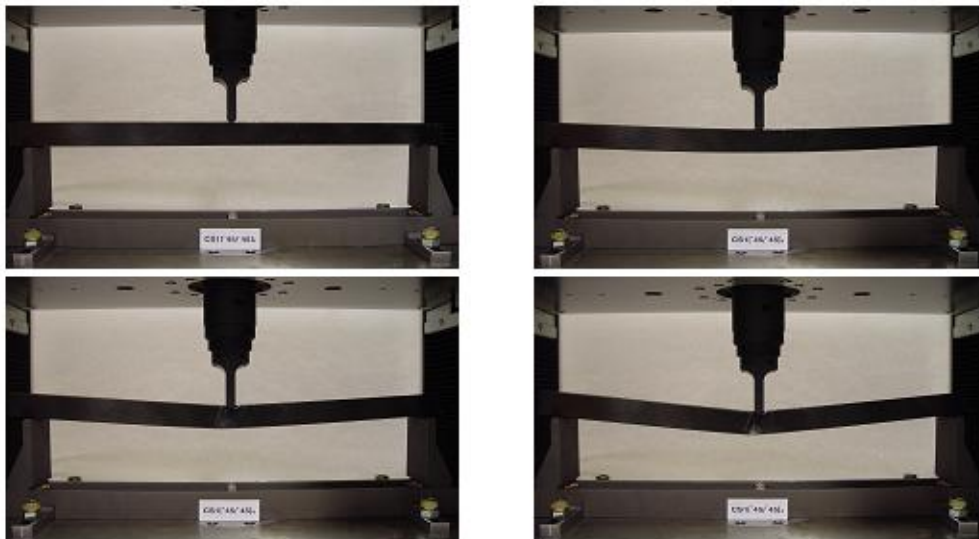


Photo. 7 Bending processing of CQ[+45° /-45°]₄

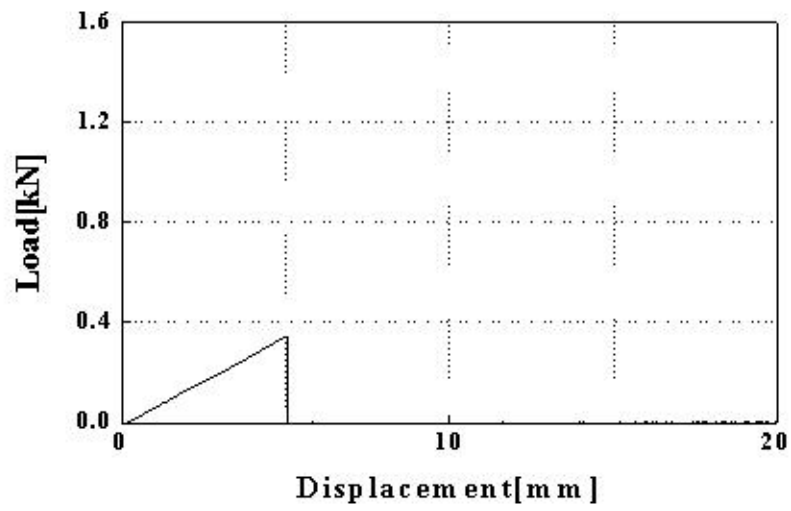


Fig. 9 Load-displacement curve of CQ[+90° / -90°]₄

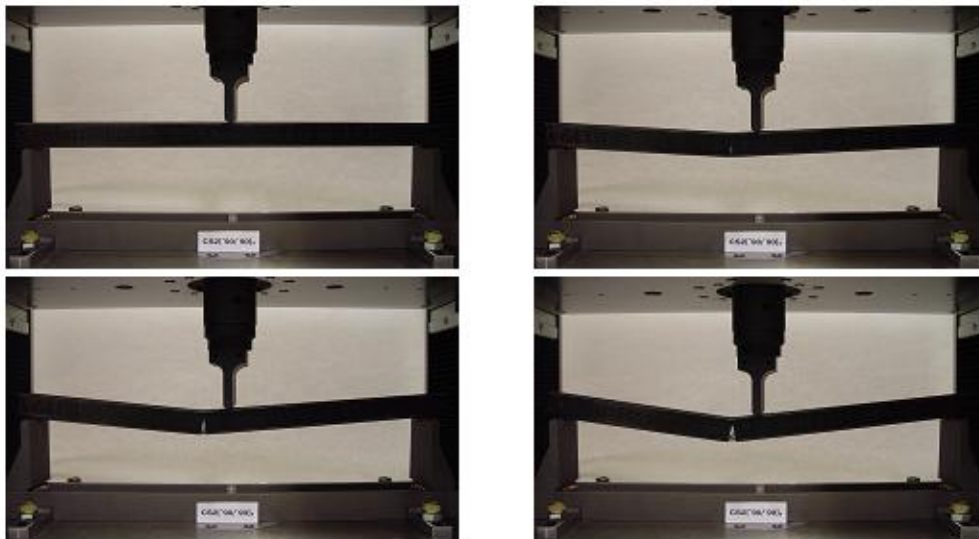


Photo. 8 Bending processing of CQ[+90° / -90°]₄

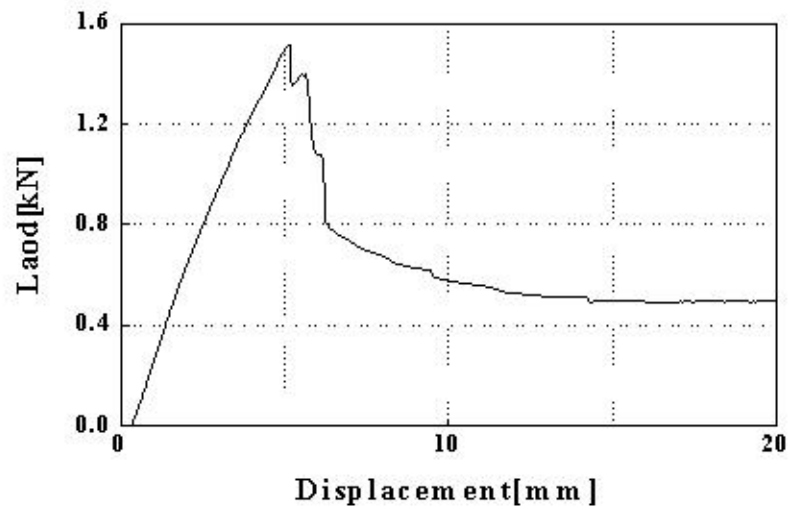


Fig. 10 Load-displacement curve of CQ[0°/90°]₄

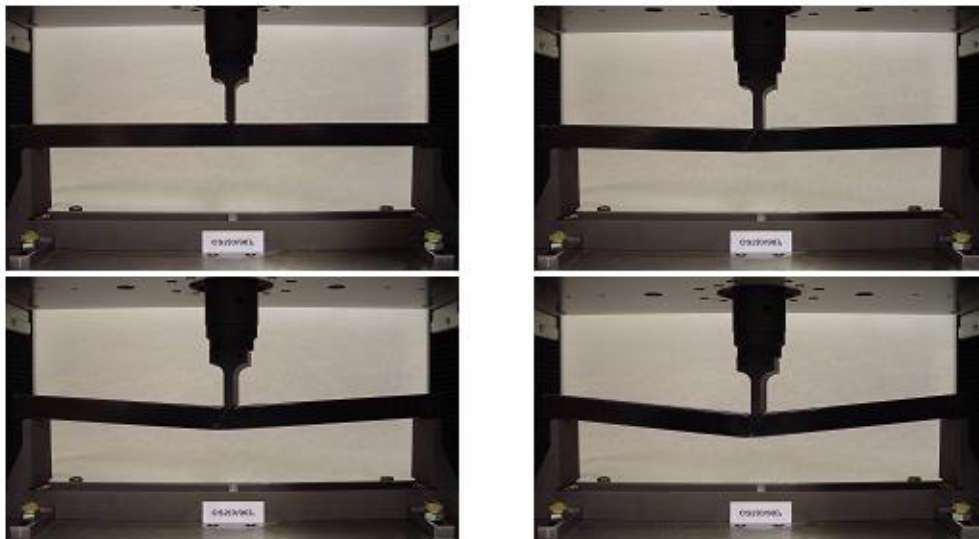


Photo. 9 Bending processing of CQ[0°/90°]₄

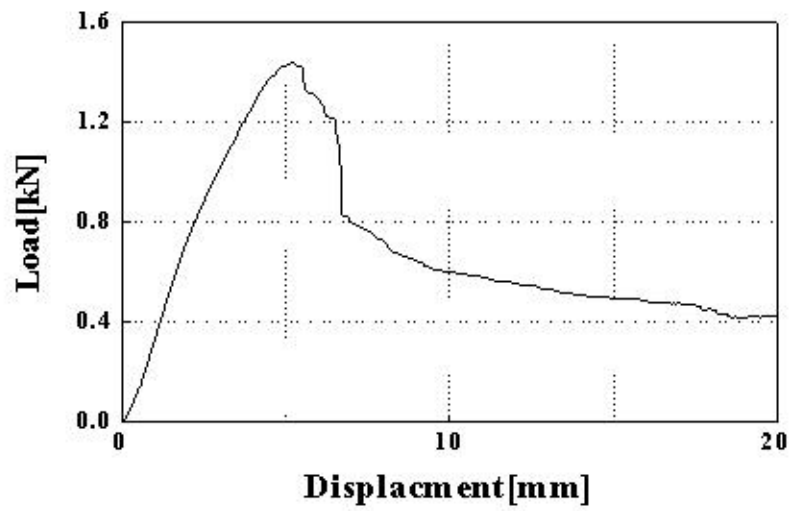


Fig. 11 Load-displacement curve of CQ[90° / 0°]₄

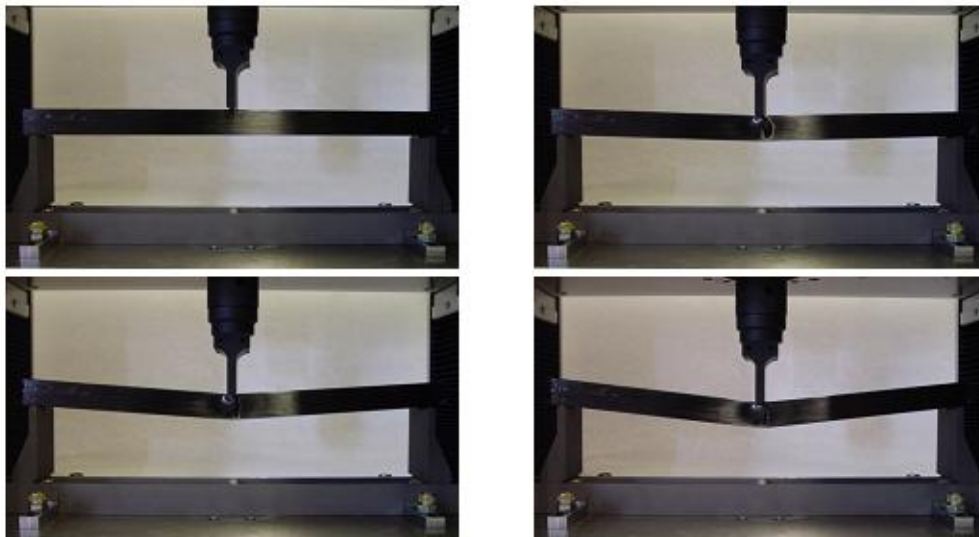


Photo. 10 Bending processing of CQ[90° / 0°]₄

제 2 절 CFRP 원형 구조부재 굽힘 특성

본 절에서는 층각도 변화에 따른 CFRP 원형 구조부재의 굽힘특성을 살펴보고자 3점 굽힘실험 후 하중-변위그래프와 굽힘현상을 나타내었다. 실험에 쓰인 CFRP 원형 구조부재의 단면모양과 크기는 보강재로 사용된 알루미늄 사각과 같은 크기로 Fig. 12에 나타내었다.

적층각도 변화에 따른 CFRP 사각 구조부재($[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$)를 3점 굽힘 실험 후 얻어진 각각의 하중-변위선도를 Fig. 13 ~ 18에 나타내었으며, 각 시험편의 굽힘과정을 Photo. 11 ~ 16에 나타내었다.

대부분 시험편은 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 이는 전단력에 의한 모드II로의 층간파괴가 발생하는 것으로 최대하중점까지를 굽힘특성으로 보고 강도와 강성 특성을 해석하였다.

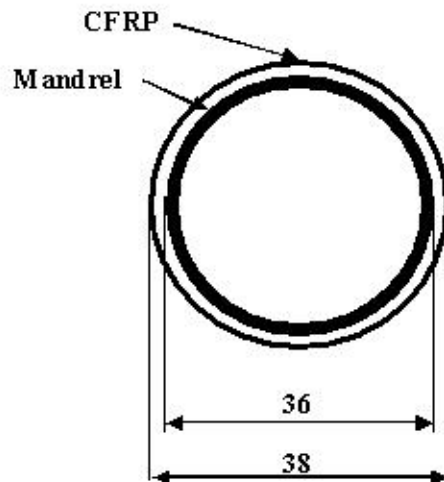


Fig. 12 Cross-section shape of circle

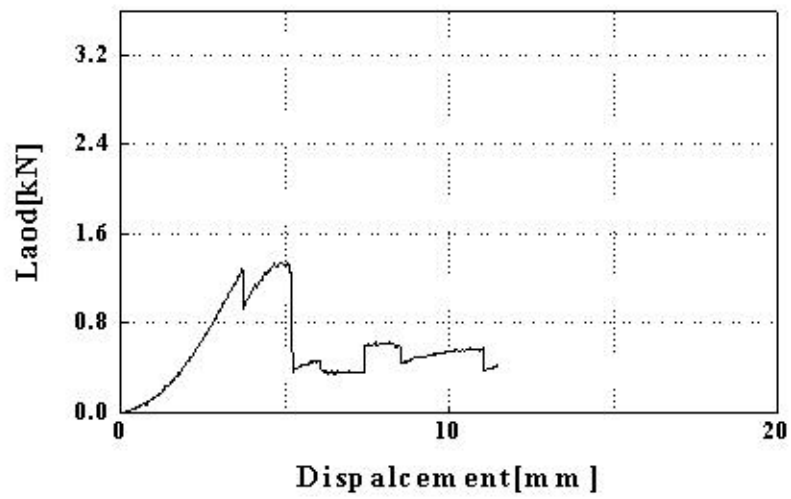


Fig. 13 Load-displacement curve of CR[+0° / -0°]₄

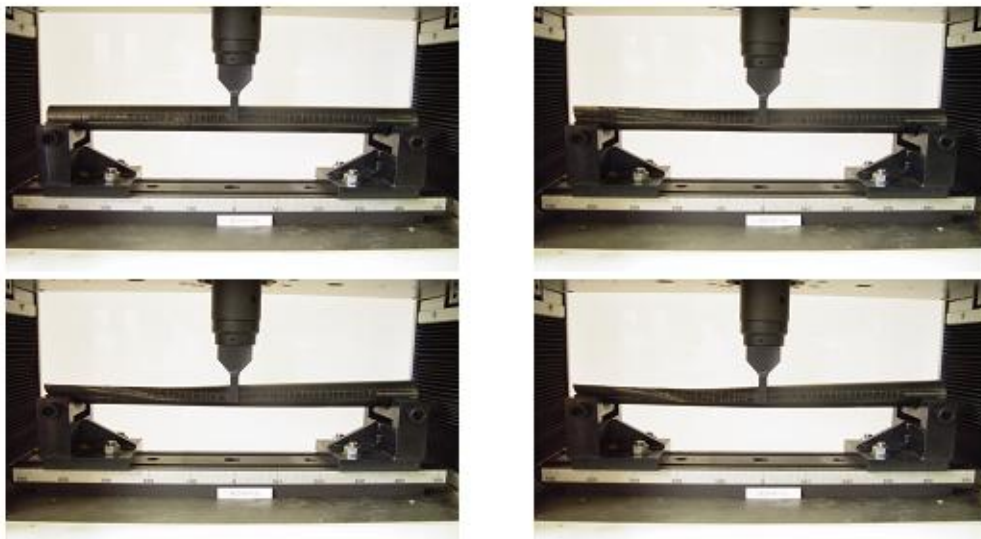


Photo. 11 Bending processing of CR[+0° / -0°]₄

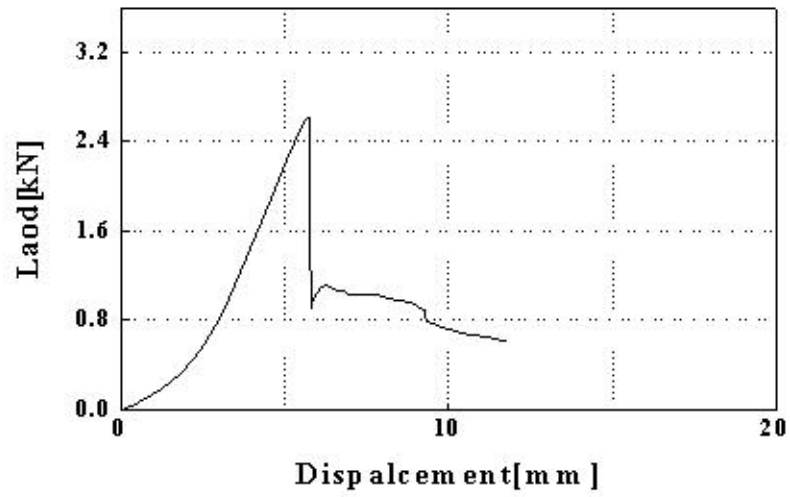


Fig. 14 Load-displacement curve of CR[+15° / -15°]₄

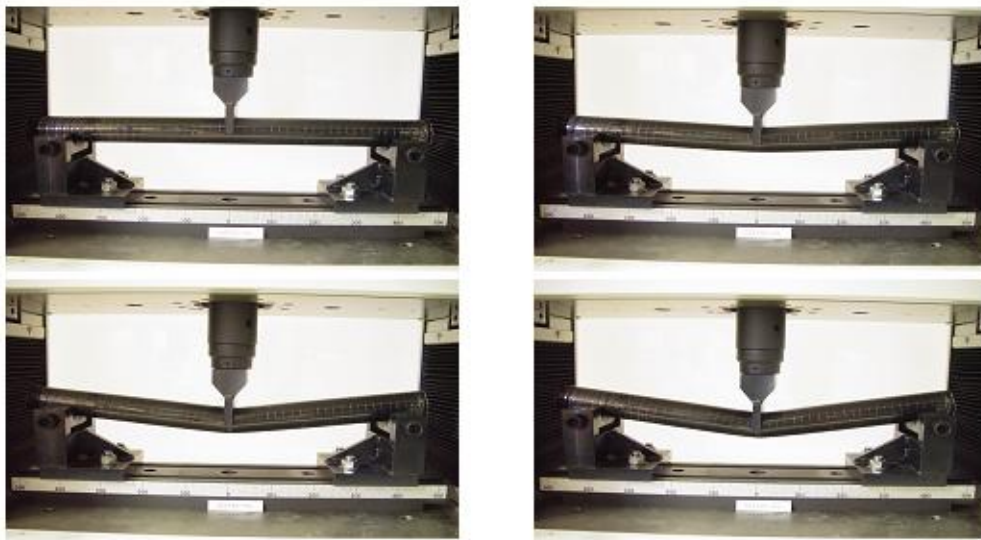


Photo. 12 Bending processing of CR[+15° / -15°]₄

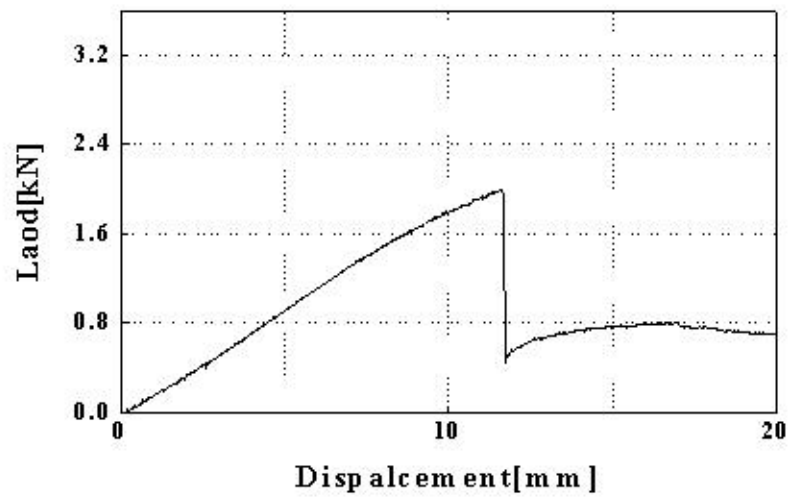


Fig. 15 Load-displacement curve of CR[+45° / -45°]₄

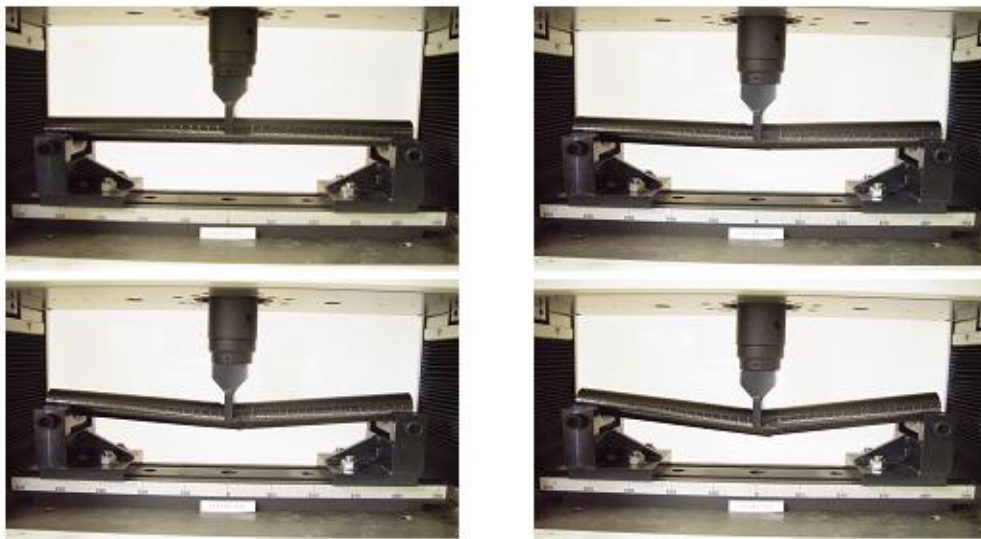


Photo. 13 Bending processing of CR[+45° / -45°]₄

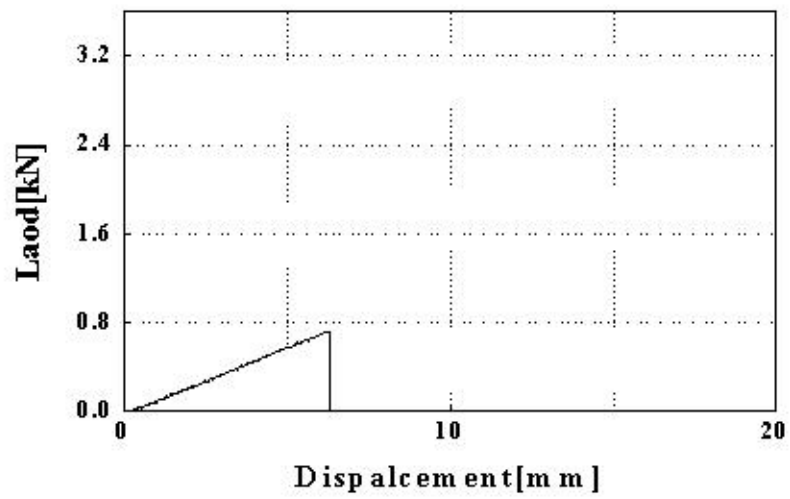


Fig. 16 Load-displacement curve of CR[+90° / -90°]₄

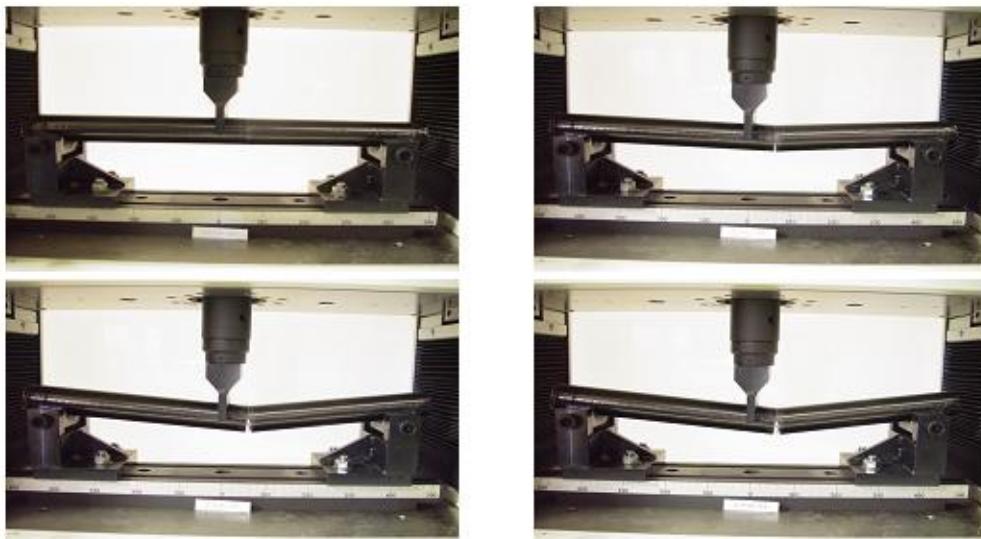


Photo. 14 Bending processing of CR[+90° / -90°]₄

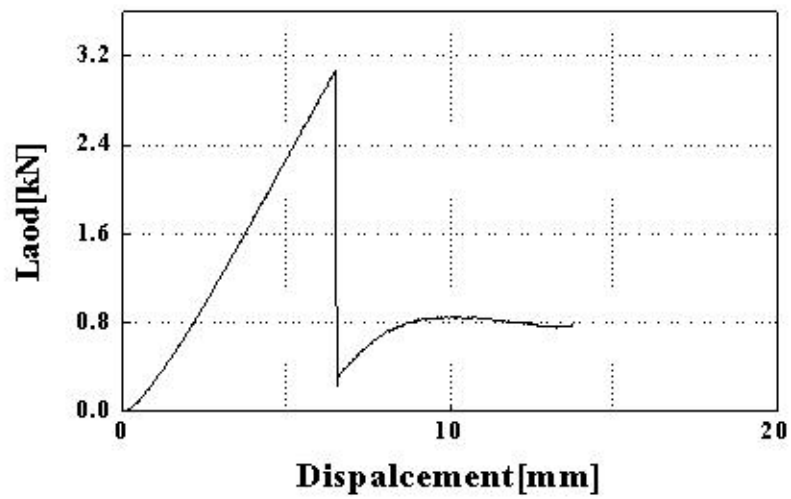


Fig. 17 Load-displacement curve of CR[0° / 90°]₄

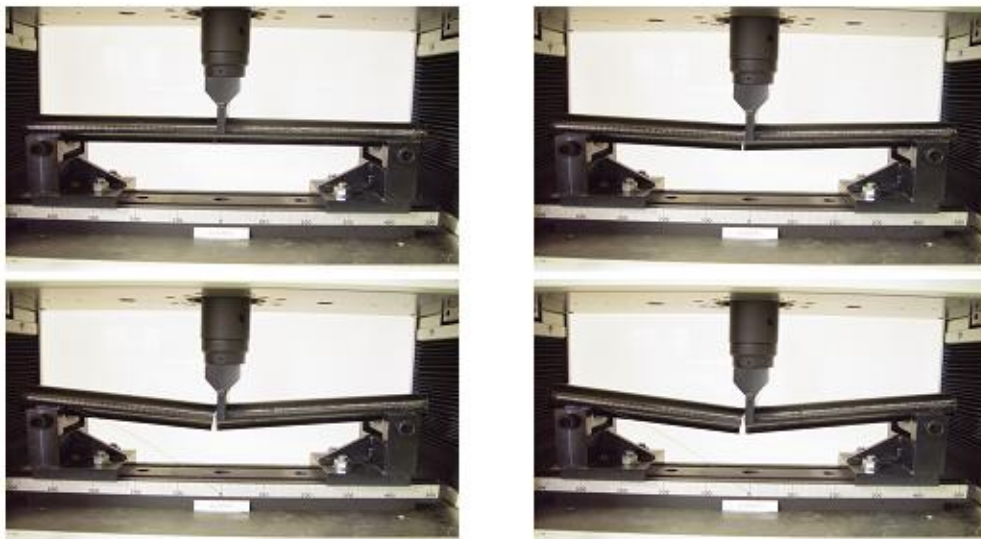


Photo. 15 Bending processing of CR[0° / 90°]₄

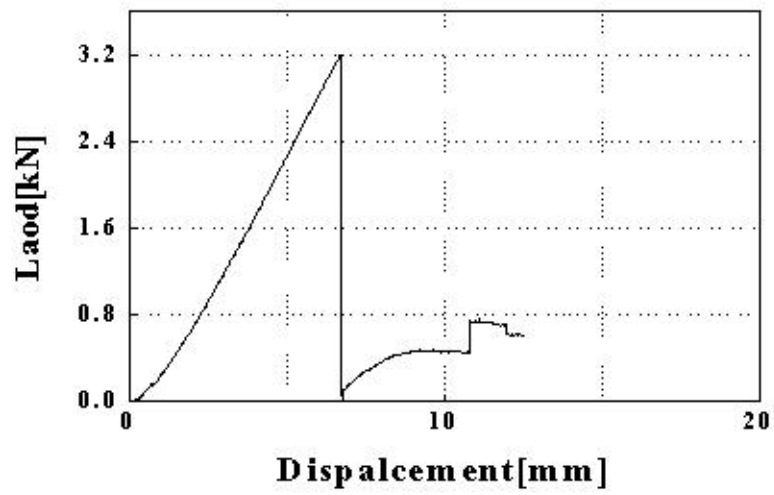


Fig. 18 Load-displacement curve of CR[90° / 0°]₄

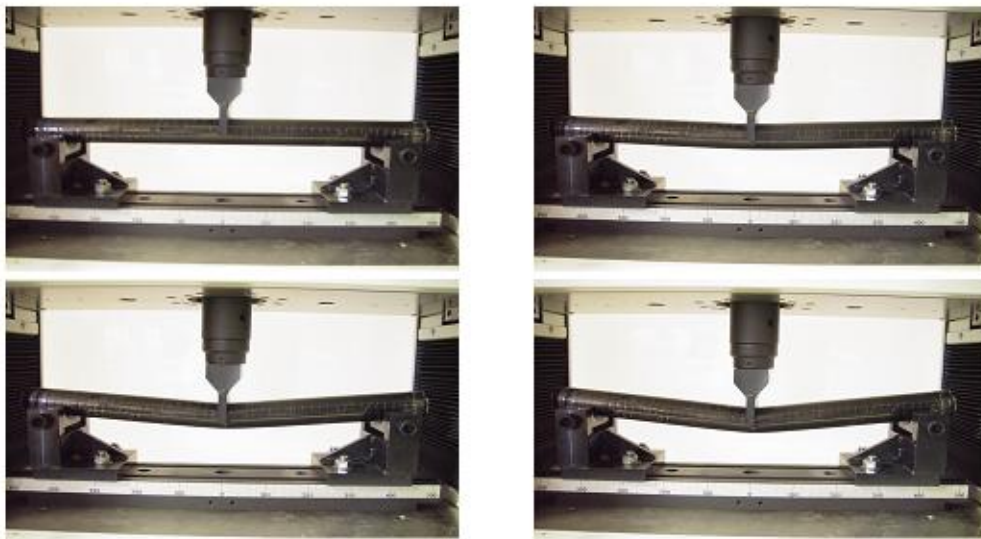


Photo. 16 Bending processing of CR[90° / 0°]₄

제 3 절 결과 및 고찰

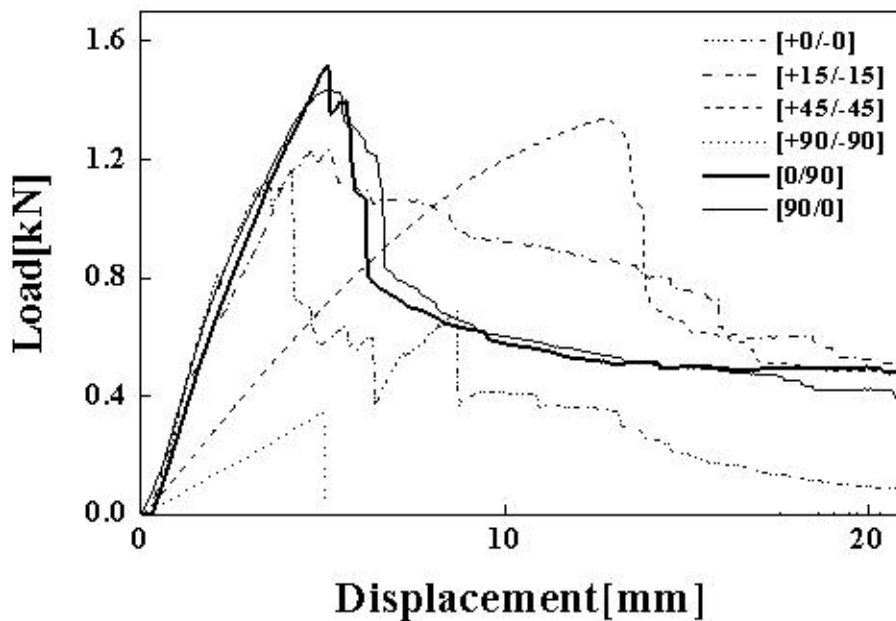


Fig. 19 Load-displacement curve of All CFRP square members

Fig. 19는 적층각도에 따른 CFRP 사각구조부재의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 대부분 CFRP 사각구조부재는 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 그 중 CQ[+45° / -45°]₄는 완만한 포물선을 그리며 파괴되는 그래프를 보여주었다. CQ[90° / 0°]₄와 CQ[0° / 90°]₄의 하중-변위 그래프는 두 부재가 유사함을 보였고 CQ[+90° / -90°]₄은 매우 낮은 하중에서 파괴됨을 보였다.

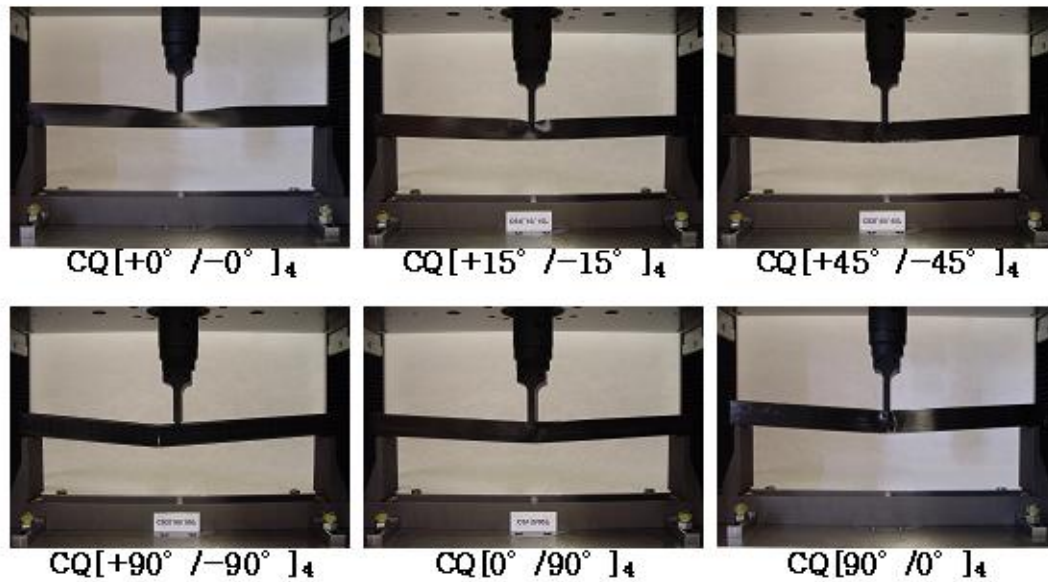


Photo. 17 Picture of bending result of CFRP square members after 20 sec

Table. 5 Bending test results for CFRP square members

Specimens	Max Load [N]	Dispalcement [mm]	Flexural Stress [MPa]	Flexural Stiffness [GPa]
[+0° / -0°] ₄	1,164.0630	4.1550	120.6706	32.6725
[+15° / -15°] ₄	1,234.0630	5.1570	127.9270	27.9073
[+45° / -45°] ₄	1,383.9060	12.7730	143.4602	12.6331
[+90° / -90°] ₄	346.2500	5.0280	35.8934	8.0310
[0° / 90°] ₄	1,421.7185	5.3280	147.3800	31.2156
[90° / 0°] ₄	1,439.6870	5.1880	149.2427	32.3628

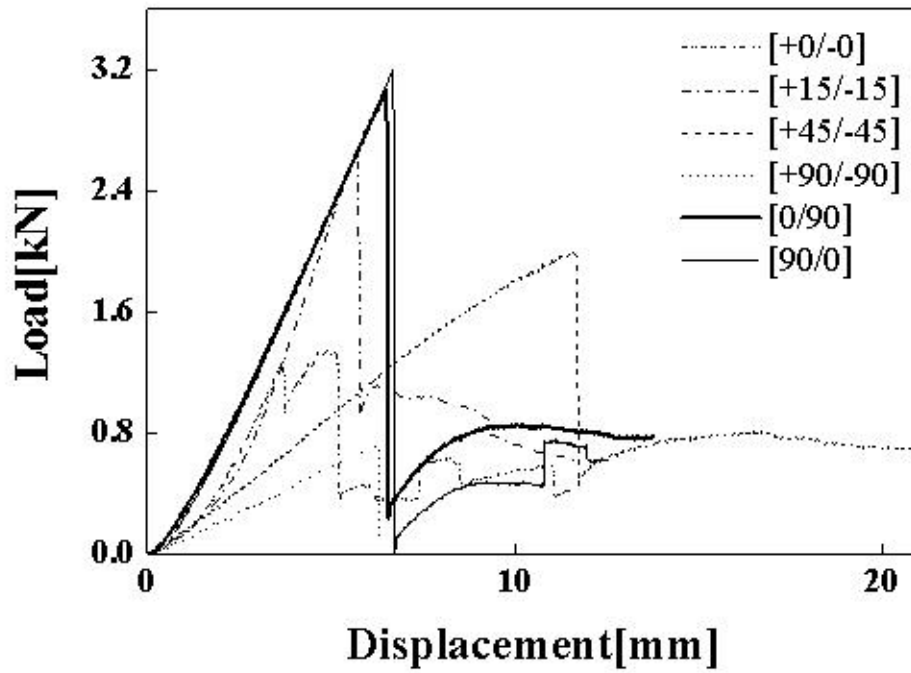


Fig. 20 Load-displacement curve of All CFRP Circle members

Fig. 20는 적층각도에 따른 CFRP 원형구조부재의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 대부분 CFRP 사각구조부재는 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 그 중 CR $[+45^{\circ} / -45^{\circ}]_4$ 는 완만한 포물선을 그리며 낮은하중에 파괴되는 그래프를 보여주었다. CR $[90^{\circ} / 0^{\circ}]_4$ 와 CR $[0^{\circ} / 90^{\circ}]_4$ 의 하중-변위그래프는 두 부재가 유사함을 보였고 CR $[+90^{\circ} / -90^{\circ}]_4$ 은 매우 낮은 하중에서 파괴됨을 보였다.

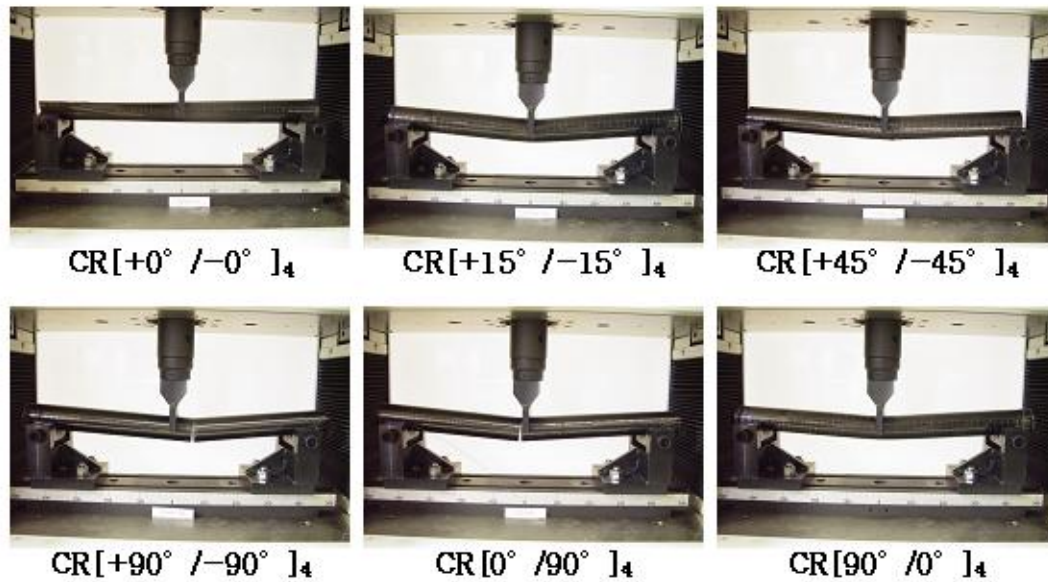


Photo. 18 Picture of bending result of CFRP circle members after 20 sec

Table. 6 Bending test results for CFRP circle members

Specimens	Max Load [N]	Dispalcement [mm]	Benidng Stress [MPa]	Stiffness [GPa]
[+0° / -0°] ₄	1.222.2917	4.1537	131.3164	28.0114
[+15° / -15°] ₄	2.620.0000	5.7270	281.4787	43.6524
[+45° / -45°] ₄	1.940.9380	17.3940	208.5239	10.6475
[+90° / -90°] ₄	666.5625	5.4890	71.6119	11.6713
[0° / 90°] ₄	3.141.4060	7.4555	337.4957	40.7645
[90° / 0°] ₄	3.203.1250	6.6890	344.1265	45.6927

1. CFRP 구조부재의 강도 특성

Fig. 21과 Fig. 22는 각각 CFRP 사각구조부재의 강도와 CFRP 원형구조부재의 강도를 적층각도에 따라 나타내었다. CFRP 사각구조부재의 굽힘강도는 굽힘실험 후 하중-변위 그래프에서 최대하중이 제일 높게 나타난 CQ[90°/0°]₄, CQ[0°/90°]₄ 그리고 CQ[+45°/-45°]₄이 제일 높은 강도 값을 보였으며, CFRP 원형구조부재의 하중-변위 그래프에서도 역시 최대하중이 제일 높게 나타난 CR[90°/0°]₄와 CR[0°/90°]₄이 제일 높은 강도 값을 보였다.

강도 높은 CFRP 사각과 원형 구조부재를 제작할 때 [90°/0°]₄, [0°/90°]₄와 같은 직물형으로 구조부재를 제작하는 것이 더 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있는 것으로 본다.

Fig. 23은 CFRP 사각구조부재와 CFRP 원형구조부재의 강도를 서로 비교해 놓은 것이다. 여기서 알 수 있듯이 직물형 구조부재에서 원형구조부재가 2배이상 원등히 높은 것을 볼 수 있다. 이는 강도가 높은 CFRP 구조부재를 사용할 경우 직물형이고 원형단면으로 구조부재를 제작하는 것이 제일 좋다고 보여진다.

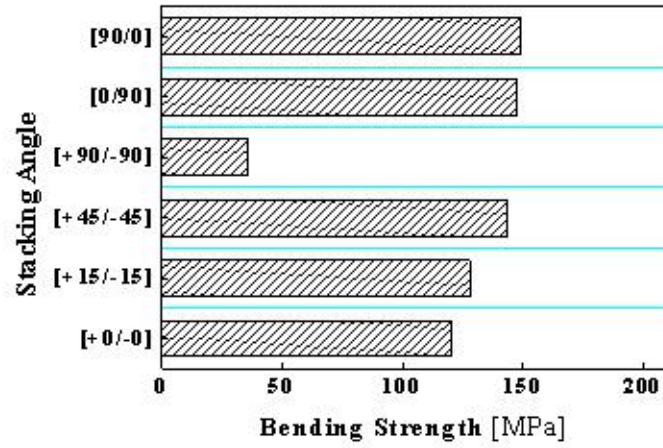


Fig. 21 Bending Strength of CFRP square members

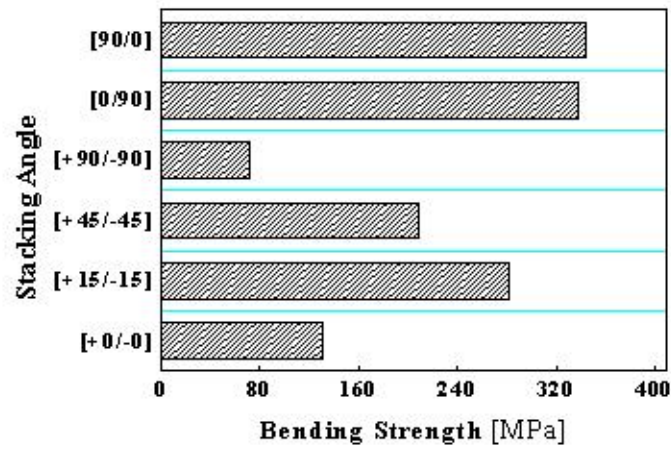


Fig. 22 Bending Strength of CFRP circle members

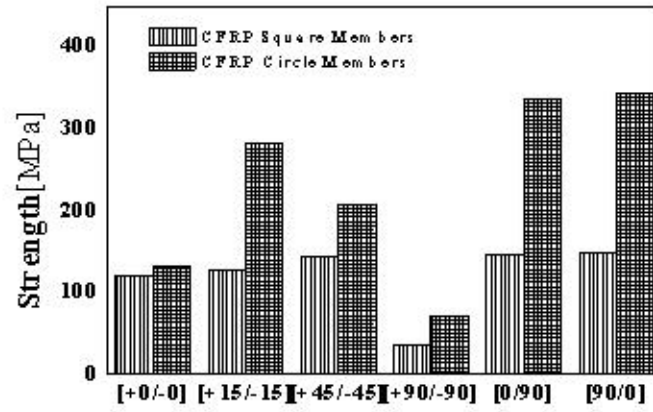


Fig. 23 Comparison strength of CFRP square and CFRP circle

2. CFRP 구조부재의 강성특성

Fig. 24와 Fig. 25는 CFRP 사각구조부재의 강성과 CFRP 원형구조부재의 강성을 적층각도에 따라 나타내었다. CFRP 사각구조부재의 굽힘강성에서는 하중-변위에서 최대하중이 높으며 변형길이가 짧은 즉 최대하중 까지 급한 기울기를 가지는 CQ[90° /0°]₄, CQ[0° /90°]₄ 그리고 CQ[+0° /-0°]₄가 제일 높게 나타났다. 그러나 CQ[+0° /-0°]₄은 하중-변위그래프에서 최대하중이 이르기 전 2~3회 파괴가 나타나고 Photo. 5에서 굽힘실험이 진행되는 동안 굽힘이 작용되는 것이 아닌 압축이 나타남을 볼 수 있다. 이는 +0/-0가 수치상으로는 높은 강성을 보였으나 굽힘이 아닌 압축이 작용되어 굽힘부재로써 용이하지 않다고 판단되어 강성이 높은 부재라고 말할 수 없다. CFRP 원형구조부재의 강성은 최대하중까지 변형된 길이가 적은 CR[90° /0°]₄, CR[0° /90°]₄ 그리고 CR[+15° /-15°]₄이 제일 높게 나타났다. CFRP 원형구조부재 실험에서도 CR[+0° /-0°]₄가 CFRP 사각구조부재와 동일한 현상이 나타나 굽힘부재로써 용이하지 않다.

Fig. 26은 CFRP 사각구조부재와 CFRP 원형구조부재의 강성을 서로 비교해 놓은 것이다. 단면끼리의 강성 비교시 2차 모멘트를 곱하여 비교를 해야 올바른 비교이다. 각 부재의 EI[Nmm²]값을 서로 비교해 놓았다. CFRP 사각 구조부재에 비하여 최대 2배 이상 높음을 보였고 강성이 높은 CFRP 구조부재를 사용할 경우 원형으로 구조부재를 제작하는 것이 더 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있는 것으로 본다.

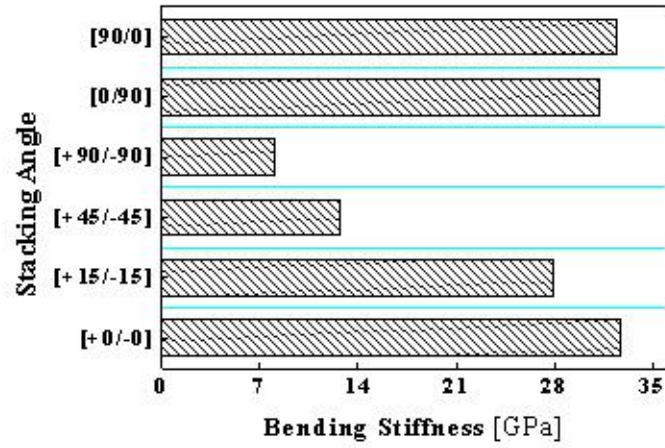


Fig. 24 Bending stiffness of CFRP square members

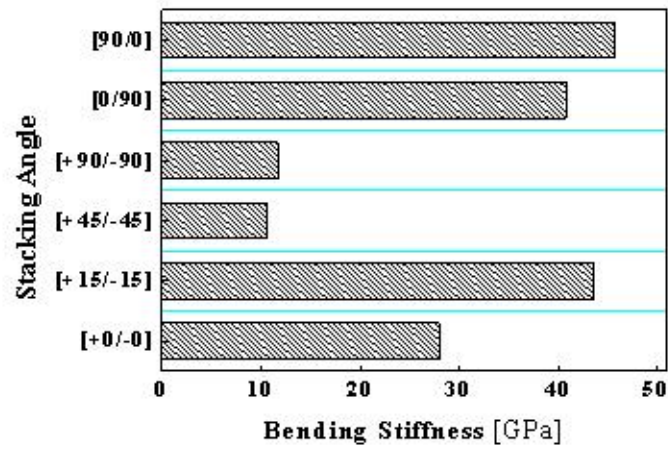


Fig. 25 Bending stiffness of CFRP circle members

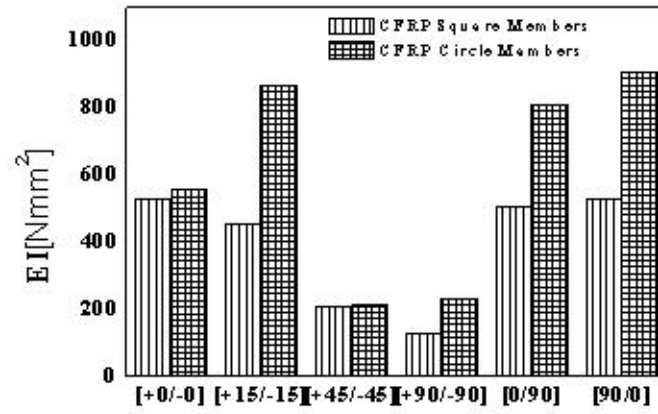


Fig. 26 Comparison stiffness of CFRP square and CFRP circle

제 4 장 Al/CFRP 혼성 구조부재 굽힘 특성

Al/CFRP 혼성 사각 구조부재는 알루미늄 튜브에 표면처리를 하고 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며 강도와 강성이 높은 1차 구조부재를 얻고자 여러 설계 메카니즘 중 적층각도를 바꾸어 시험편을 제작하였다. 그밖에 두께, 적층순서는 2mm와 $[\theta_A/\theta_B]_4$ 으로 일정하게 하였으며 적층각도 종류는 $[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$ 으로 하였다.

적층각도의 기준은 Fig. 27과 같이 시험편 길이방향을 0° 으로 정하였으며 본 장에서는 사각, 원형 그리고 모자형 단면 형상을 가진 Al/CFRP 혼성 구조부재를 3점 굽힘 실험을 하고 실험 후 얻어진 하중-변위선도에서 각 시험편의 굽힘강도와 굽힘강성을 적층각도와 단면형상별로 평가하였다.

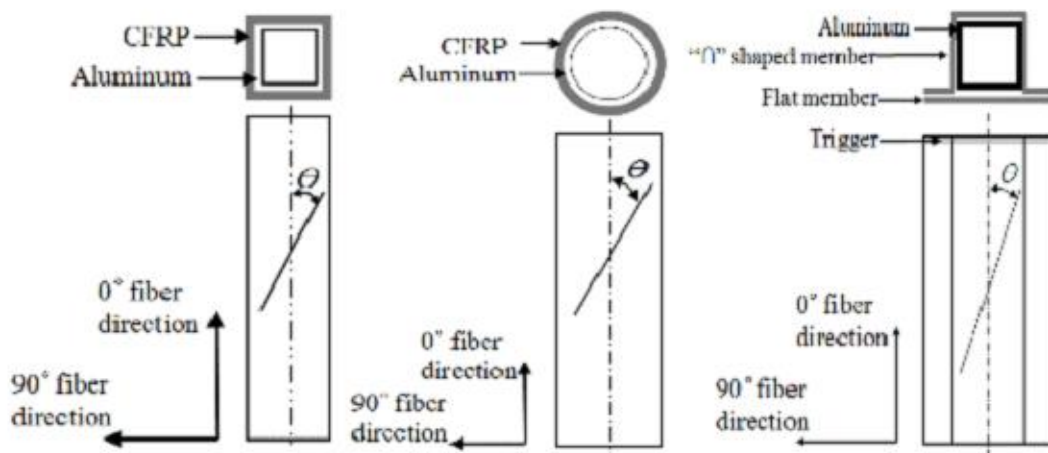


Fig. 27 Configuration of Al/CFRP Hybrid members

제 1 절 Al/CFRP 혼성 사각 구조부재 굽힘 특성

본 절에서는 적층각도 변화에 따른 Al/CFRP 혼성 사각 구조부재의 굽힘특성을 살펴보고자 3점 굽힘실험 후 하중-변위그래프와 굽힘현상을 나타내었고 실험에 쓰인 혼성 사각구조부재의 단면모양과 크기는 Fig. 28에 나타내었다.

적층각도 변화에 따른 Al/CFRP 혼성 사각 구조부재($[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$)를 3점 굽힘 실험 후 얻어진 각각의 하중-변위선도를 Fig. 29~34에 나타내었으며, 각 시험편의 굽힘과정을 Photo. 19 ~ 24에 나타내었다.

대부분 시험편은 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 이는 전단력에 의한 모드II로의 층간파괴가 발생하는 것으로 최대하중점까지를 굽힘특성으로 보고 강도와 강성 특성을 해석하였다.

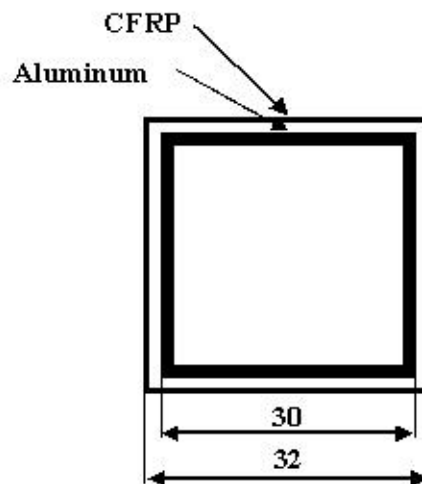


Fig. 28 Cross-section shape of Hybrid square

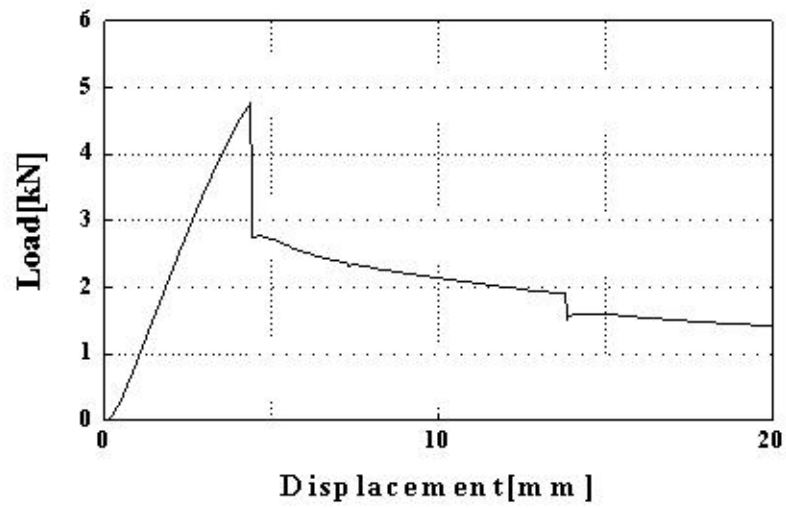


Fig. 29 Load-displacement curve of HQ [+0° / -0°]₄

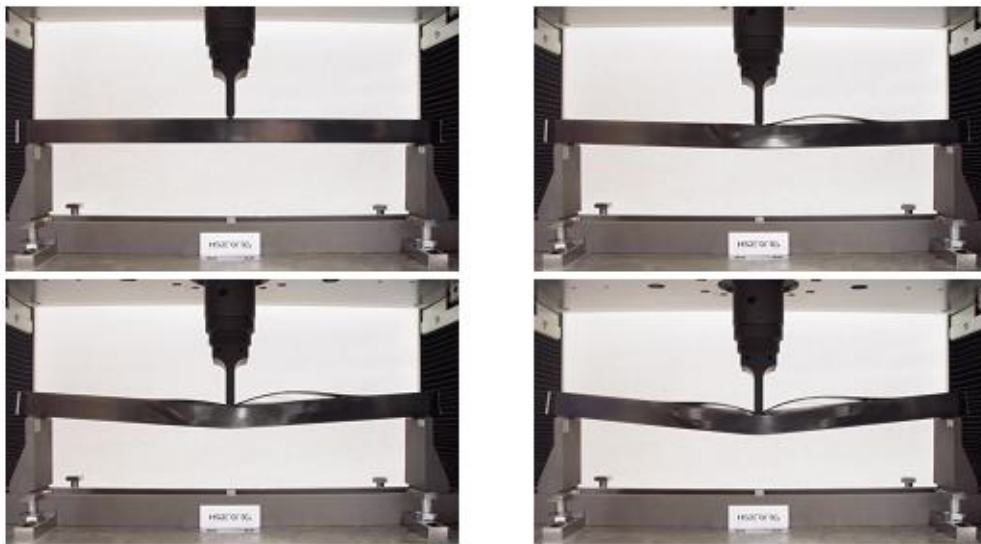


Photo. 19 Bending processing of HQ [+0° / -0°]₄

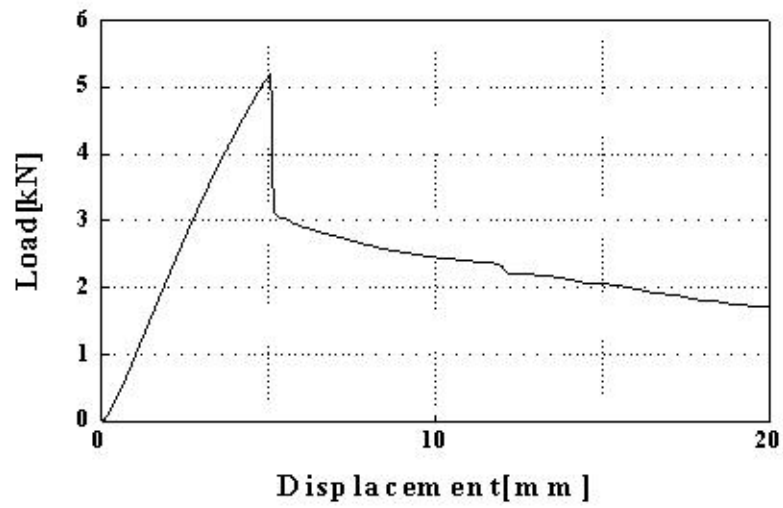


Fig. 30 Load-displacement curve of HQ[+15° / -15°]₄

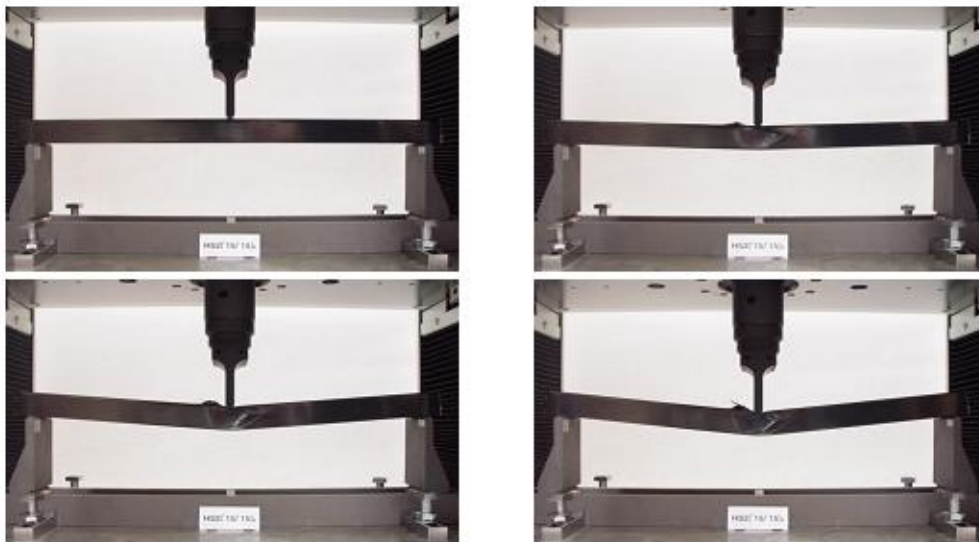


Photo. 20 Bending processing of HQ[+15° / -15°]₄

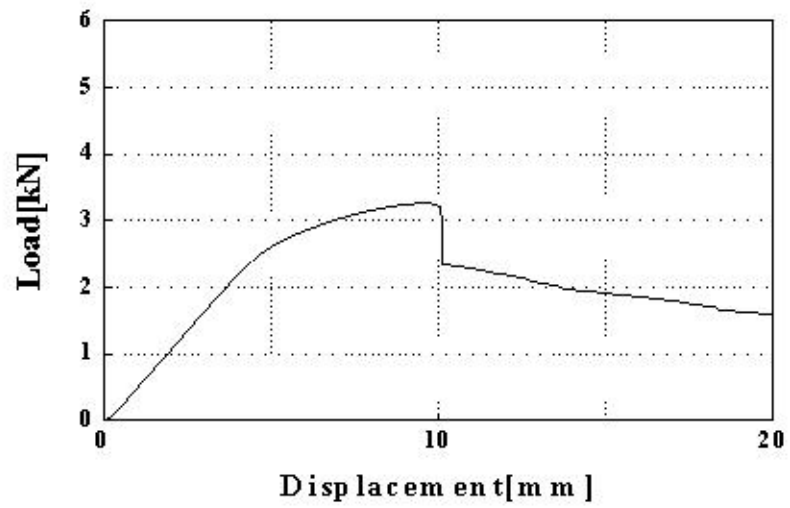


Fig. 31 Load-displacement curve of HQ[+45° / -45°]₄

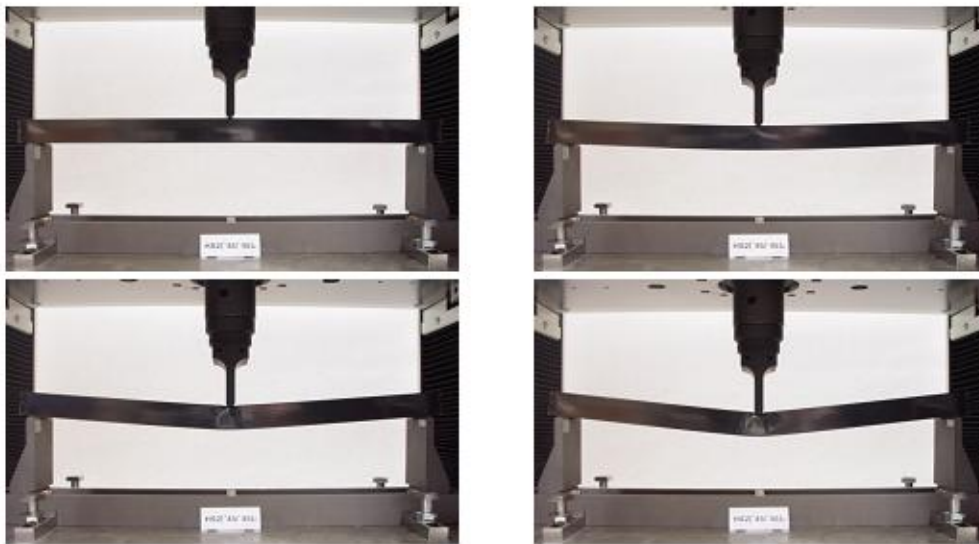


Photo. 21 Bending processing of HQ[+45° / -45°]₄

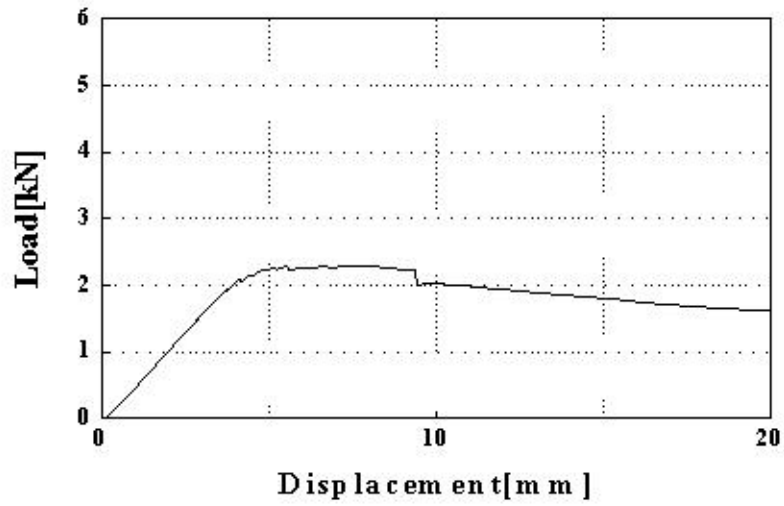


Fig. 32 Load-displacement curve of HQ[+90° / -90°]₄

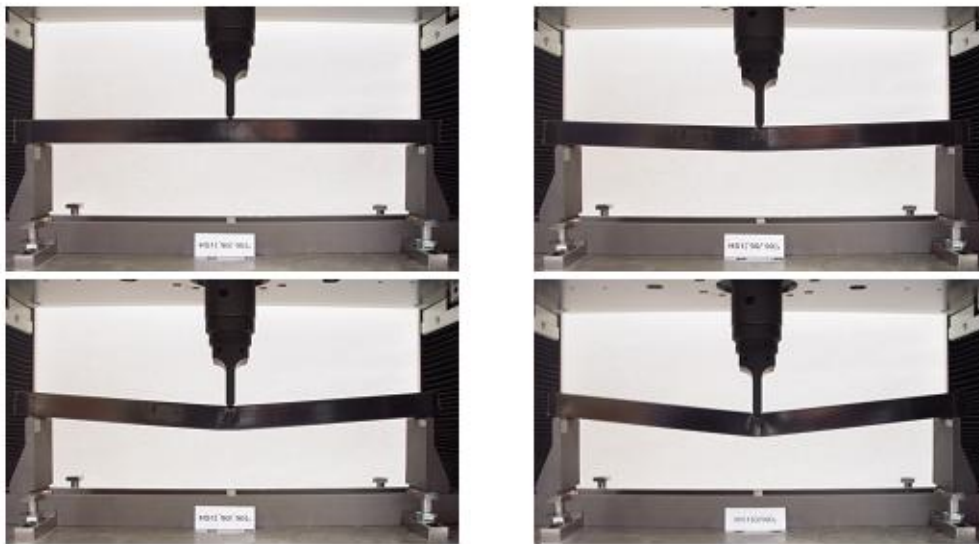


Photo. 22 Bending processing of HQ[+90° / -90°]₄

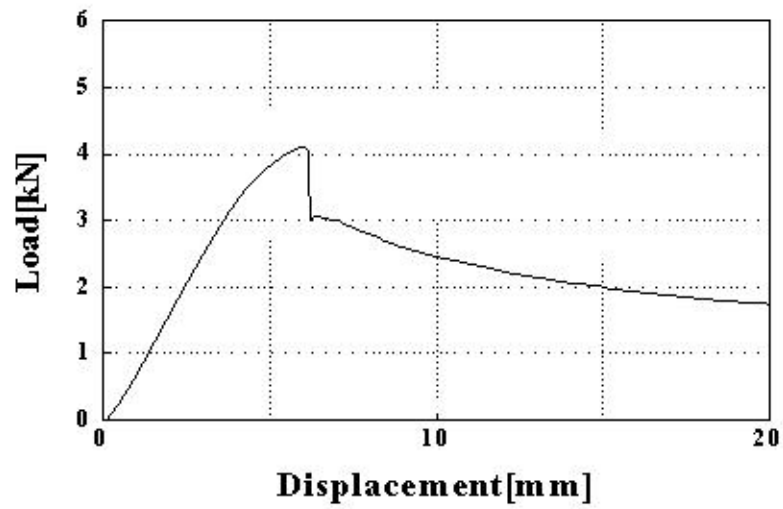


Fig. 33 Load-displacement curve of HQ[0°/90°]₄

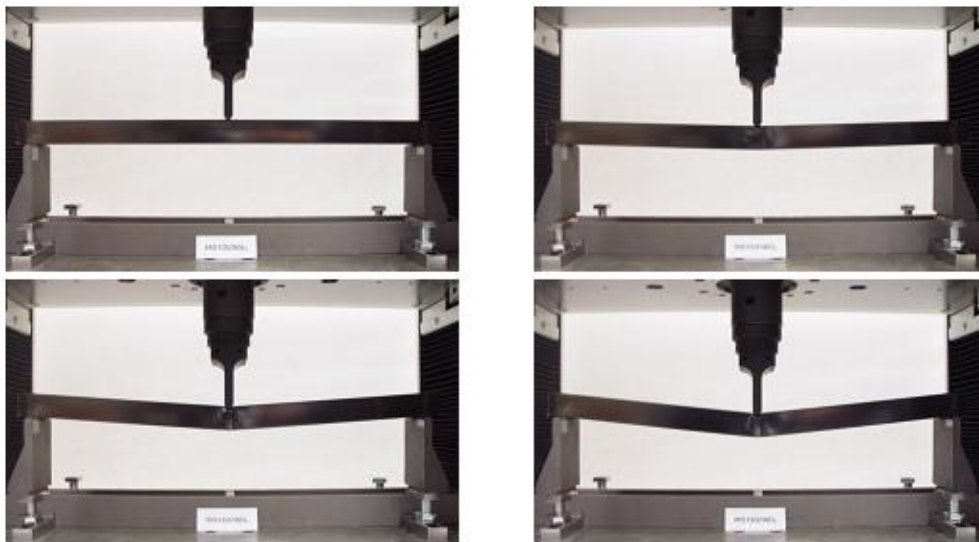


Photo. 23 Bending processing of HQ[0°/90°]₄

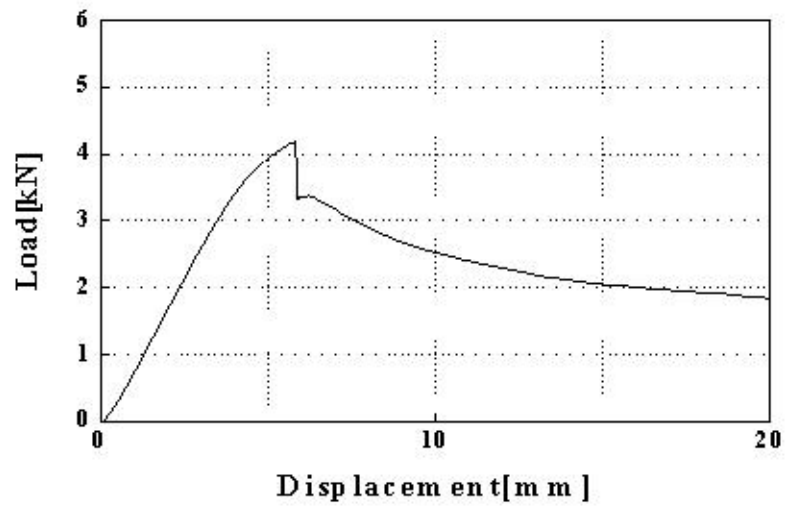


Fig. 34 Load-displacement curve of HQ[90° / 0°]₄

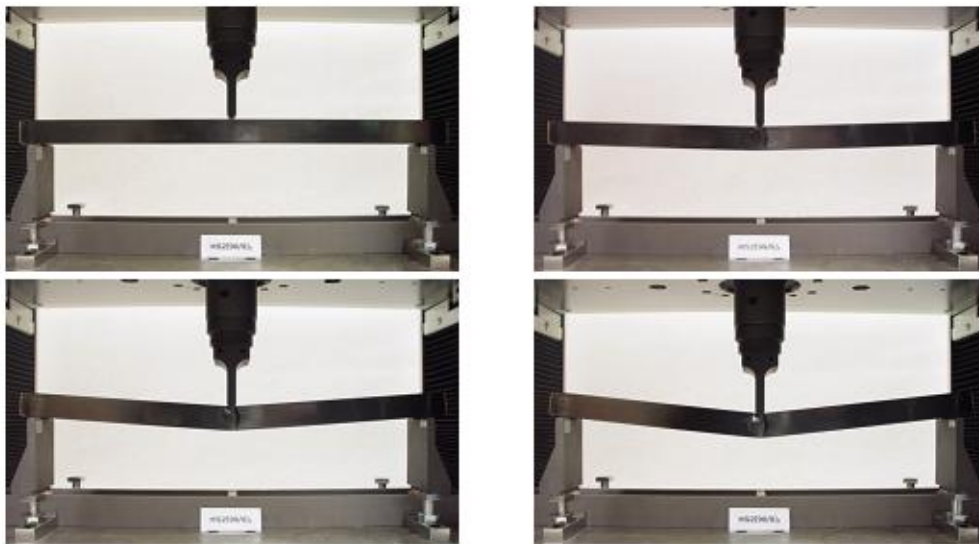


Photo. 24 Bending processing of HQ[90° / 0°]₄

제 2 절 A/CFRP 혼성 원형 구조부재 굽힘 특성

본 절에서는 A/CFRP 혼성 원형 구조부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 굽힘특성을 살펴보고자 3점 굽힘실험 후 하중-변위그래프와 굽힘현상을 나타내었다. 실험에 쓰인 혼성 원형구조부재의 단면모양과 크기는 Fig. 35에 나타내었다.

적층각도 변화에 따른 A/CFRP 혼성 원형 구조부재($[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$)를 3점 굽힘 실험 후 얻어진 각각의 하중-변위선도를 Fig. 36 ~ 41에 나타내었으며, 각 시험편의 굽힘과정을 Photo. 25 ~ 30에 나타내었다.

대부분 시험편은 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 이는 전단력에 의한 모드II로의 층간파괴가 발생하는 것으로 최대하중점까지를 굽힘특성으로 보고 강도와 강성 특성을 해석하였다.

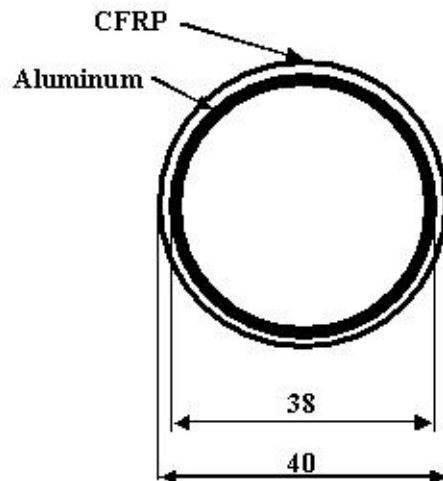


Fig. 35 Cross-section shape of Hybrid circle

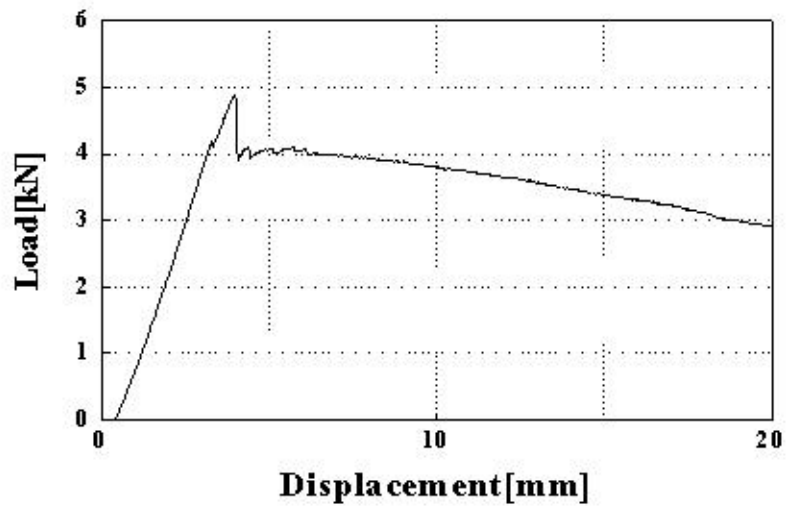


Fig. 36 Load-displacement curve of HR[+0° / -0°]₄

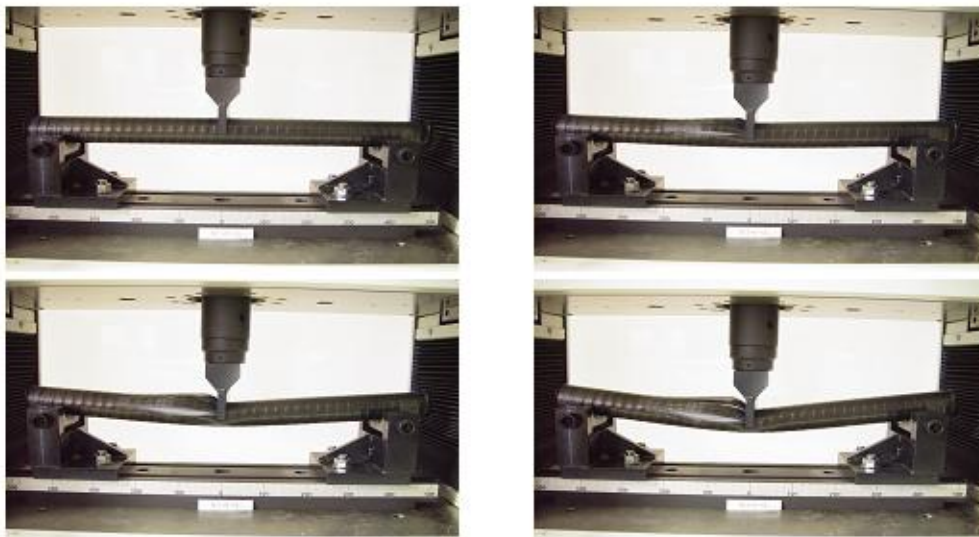


Photo. 25 Bending processing of HR[+0° / -0°]₄

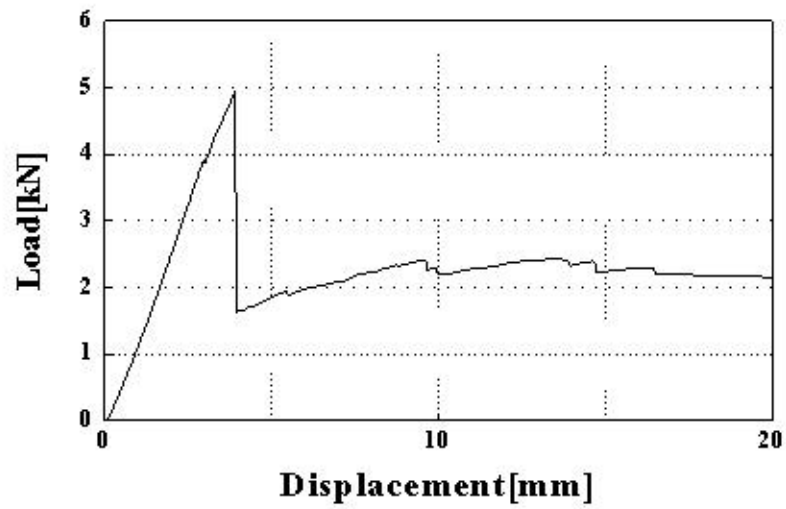


Fig. 37 Load-displacement curve of HR[+15° / -15°]₄



Photo. 26 Bending processing of HR[+15° / -15°]₄

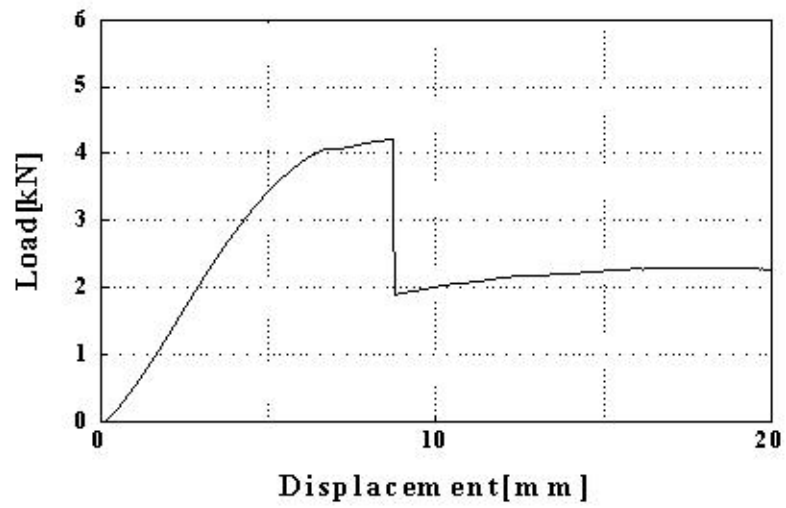


Fig. 38 Load-displacement curve of HR[+45° / -45°]₄

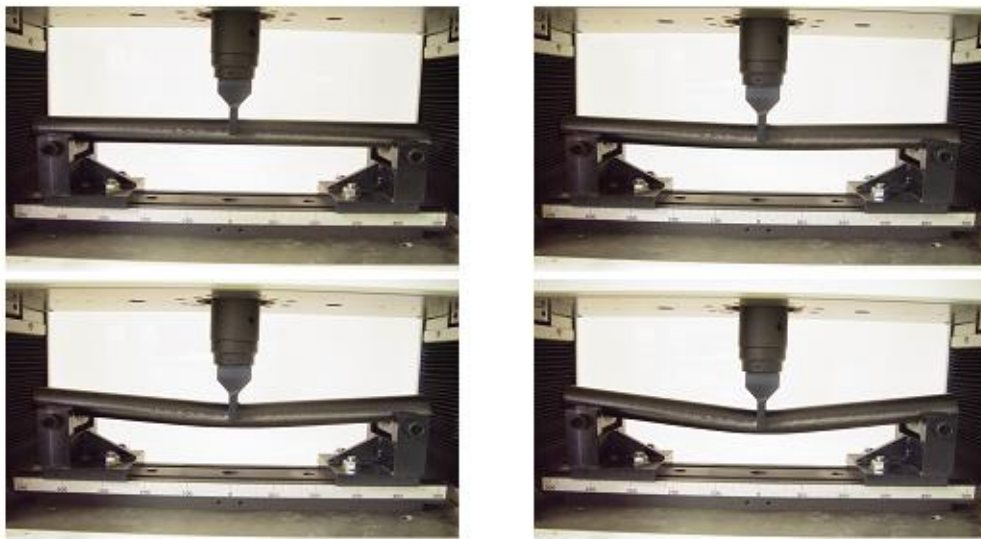


Photo. 27 Bending processing of HR[+45° / -45°]₄

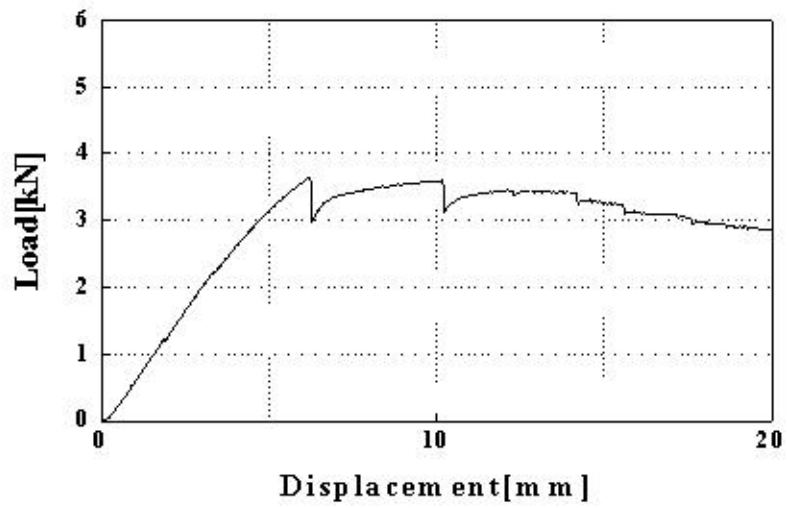


Fig. 39 Load-displacement curve of HR[+90° / -90°]₄

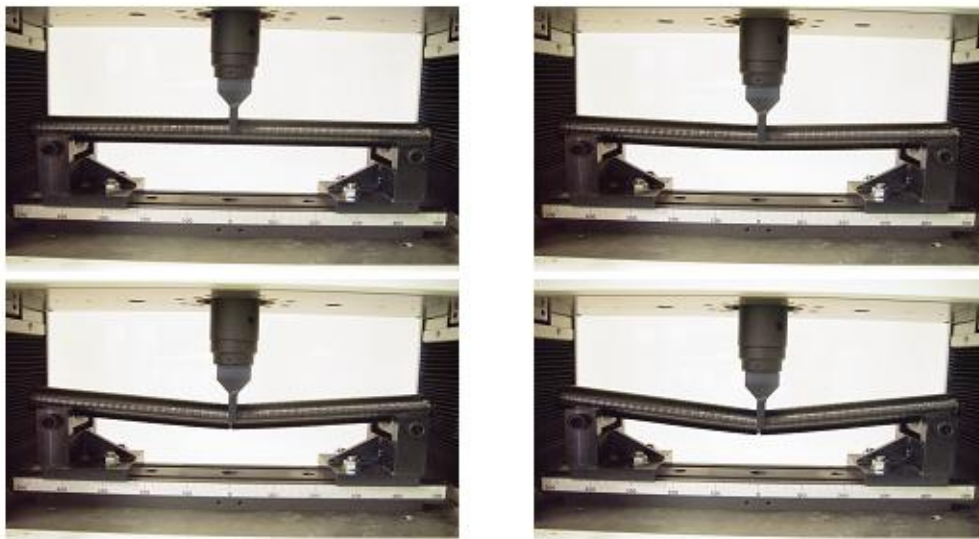


Photo. 28 Bending processing of HR[+90° / -90°]₄

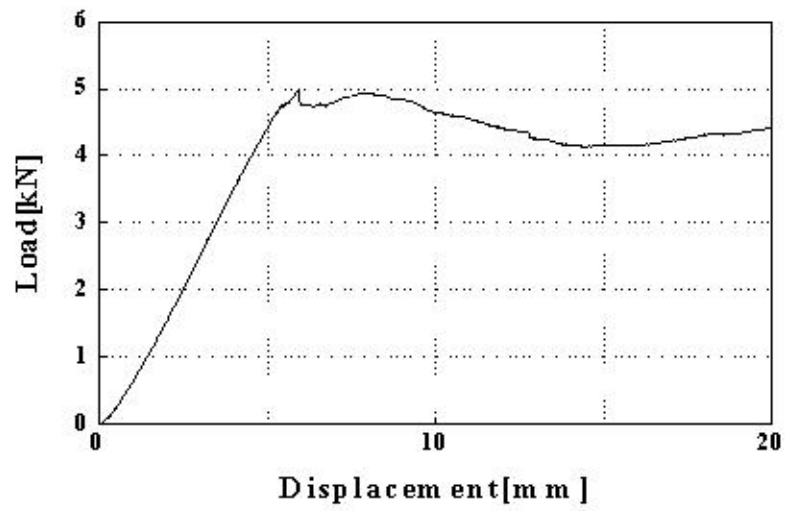


Fig. 40 Load-displacement curve of HR [0° /90°]₄

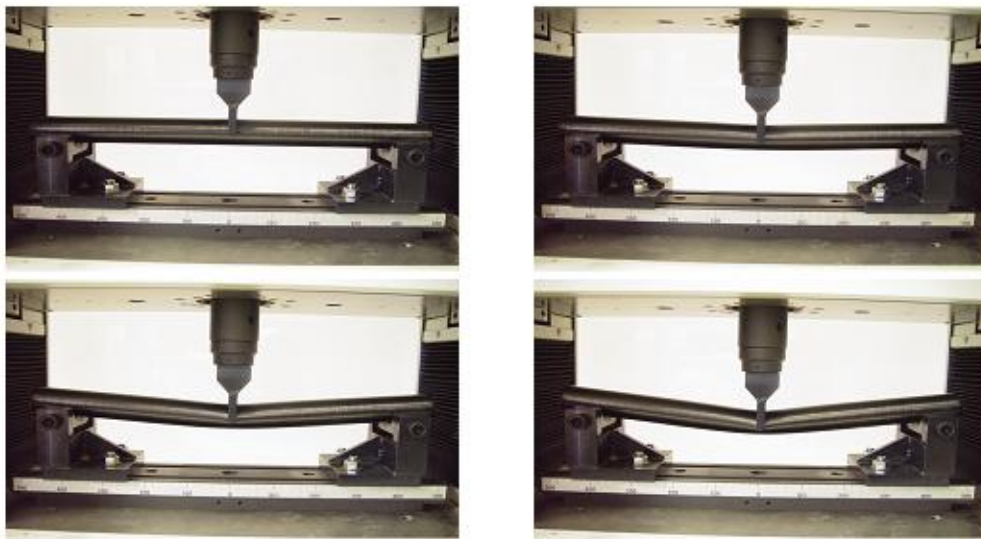


Photo. 29 Bending processing of HR [0° /90°]₄

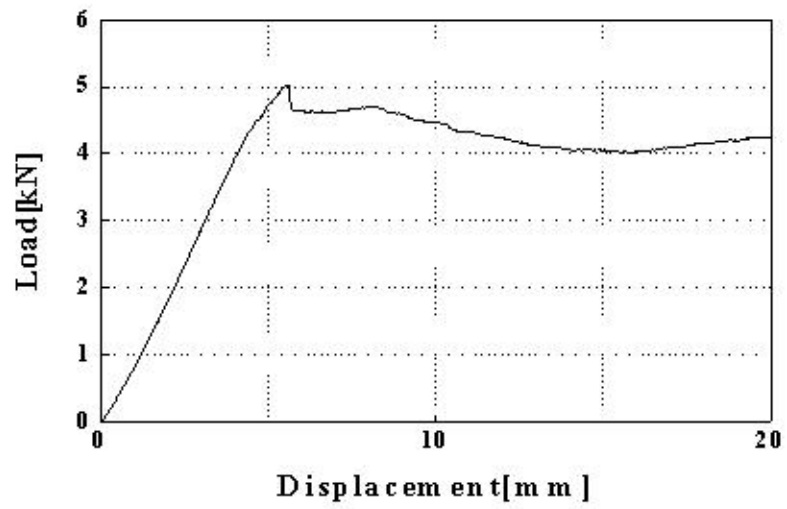


Fig. 41 Load-displacement curve of HR [90° / 0°] 4



Photo. 30 Bending processing of HR [90° / 0°] 4

제 3 절 Al/CFRP 혼성 모자형 구조부재 굽힘 특성

본 절에서는 Al/CFRP 혼성 모자형 구조부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 굽힘특성을 살펴보고자 3점 굽힘실험 후 하중-변위그래프와 굽힘현상을 나타내었다. 실험에 쓰인 Hybrid 모자형 구조부재의 단면모양과 크기는 Fig. 42에 나타내었다.

적층각도 변화에 따른 Al/CFRP 혼성 모자형 구조부재($[+0^\circ / -0^\circ]$, $[+15^\circ / -15^\circ]$, $[+45^\circ / -45^\circ]$, $[+90^\circ / -90^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$, $[90^\circ / 0^\circ]$)를 3점 굽힘 실험 후 얻어진 각각의 하중-변위선도를 Fig. 43 ~ 48에 나타내었으며, 각 시험편의 굽힘과정을 Photo. 31 ~ 36에 나타내었다.

대부분 시험편은 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 이는 전단력에 의한 모드II로의 층간파괴가 발생하는 것으로 최대하중점까지를 굽힘특성으로 보고 강도와 강성 특성을 해석하였다.

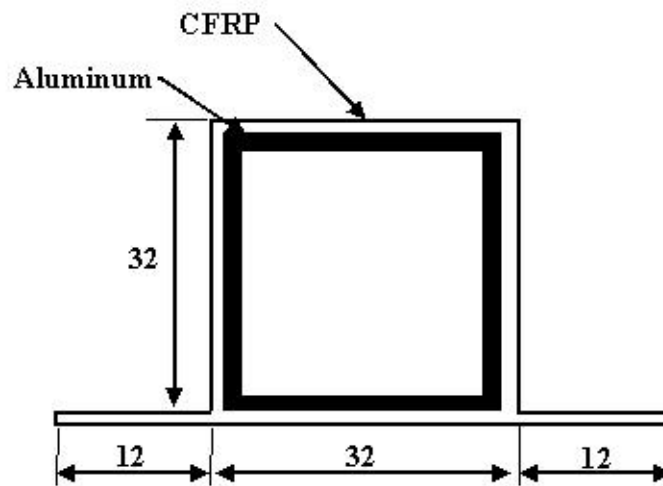
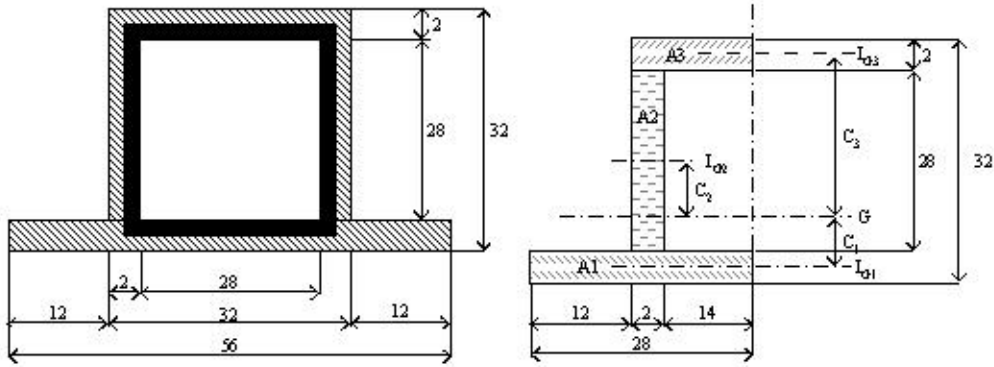


Fig. 42 Cross-section Shape of Hat shaped



$$C_1 = \frac{28 \times 2 \times 1 + 2 \times 28 \times (14 + 2) + 16 \times 2 \times (1 + 28 + 2)}{28 \times 2 + 2 \times 28 + 16 \times 2}$$

$$C_2 = C$$

$$C_3 = 32 - C$$

$$d_1 = C$$

$$d_2 = 14$$

$$d_3 = C$$

$$I_G = (I_{G_1} + A_1 d_1^2) + (I_{G_2} + A_2 d_2^2) + (I_{G_3} + A_3 d_3^2)$$

$$= \left(\frac{28 \times 2^3}{12} + 28 \times 2 \times 12.5^2 \right) + \left(\frac{2 \times 28^3}{12} + 2 \times 28 \times 2.5^2 \right) + \left(\frac{16 \times 2^3}{12} + 16 \times 2 \times 28^2 \right)$$

$$I = .$$

굽힘 강도와 굽힘강성 식에 사용될 A/CFRP 혼성 모자형의 2차 모멘트의 값은 45176mm^4 이다.

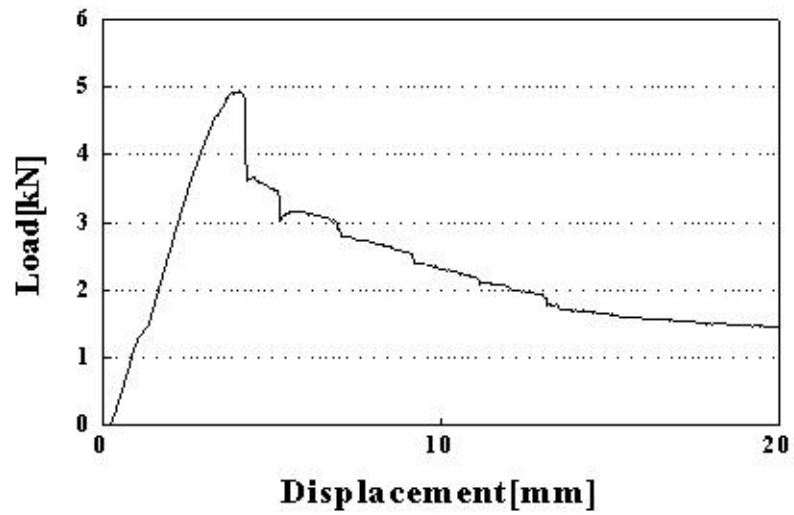


Fig. 43 Load-displacement curve of $HH_5[+0^\circ / -0^\circ]_4$

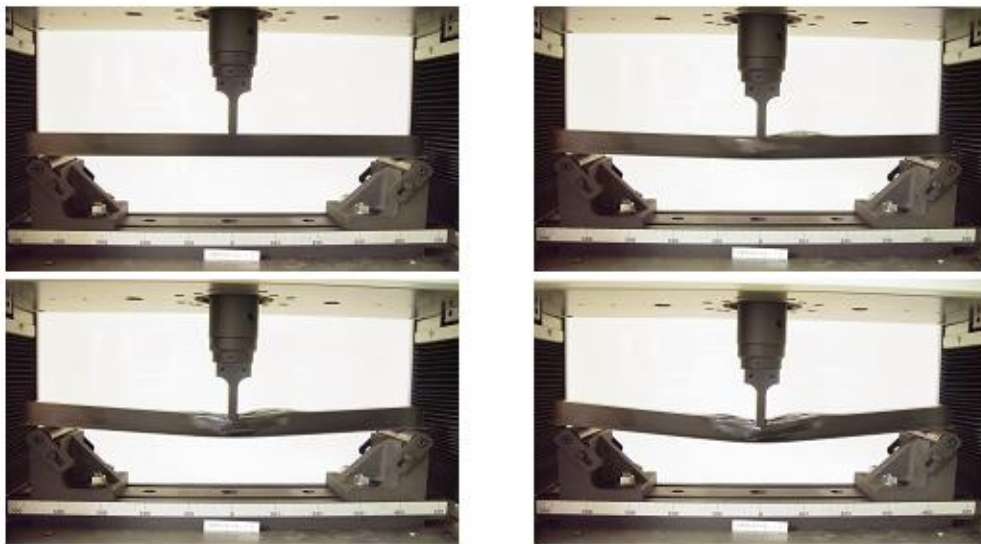


Photo. 31 Bending processing of $HH_5[+0^\circ / -0^\circ]_4$

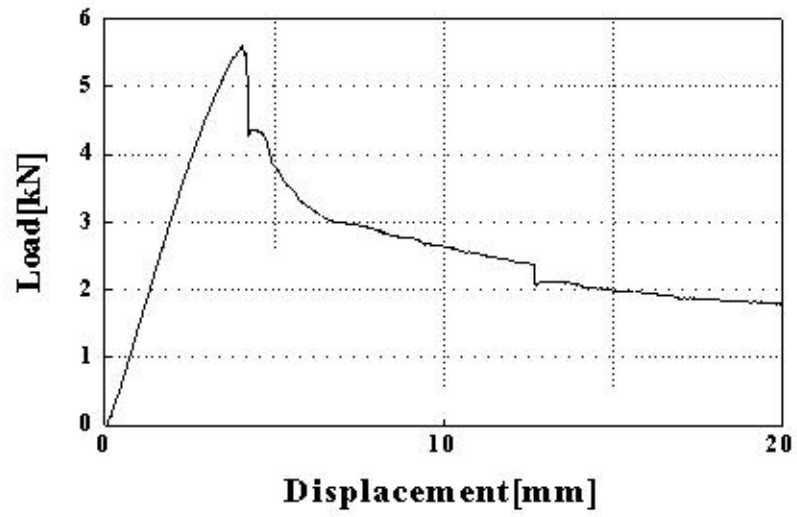


Fig. 44 Load-displacement curve of $HH_s[+15^\circ /-15^\circ]_4$

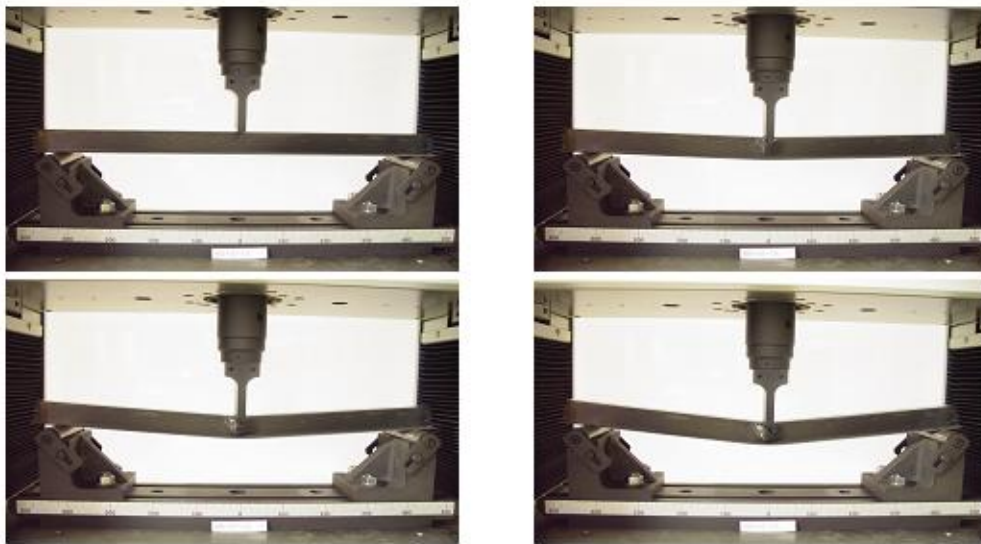


Photo. 32 Bending processing of $HH_s[+15^\circ /-15^\circ]_4$

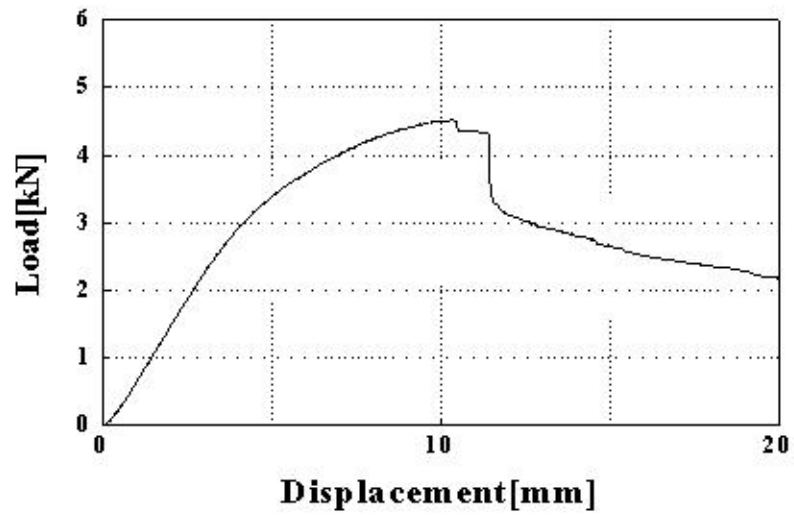


Fig. 45 Load-displacement curve of $HH_5[+45^\circ / -45^\circ]_4$

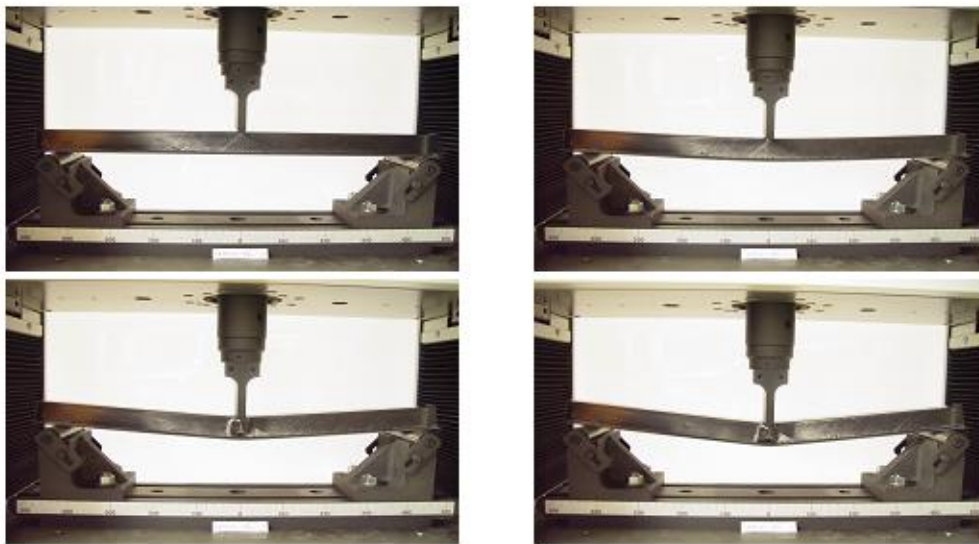


Photo. 33 Bending processing of $HH_5[+45^\circ / -45^\circ]_4$

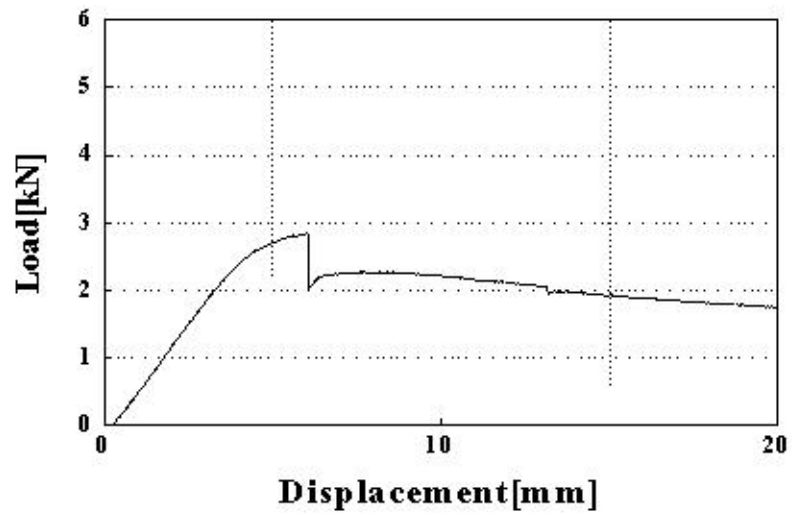


Fig. 46 Load-displacement curve of $HH_5[+90^\circ / -90^\circ]_4$

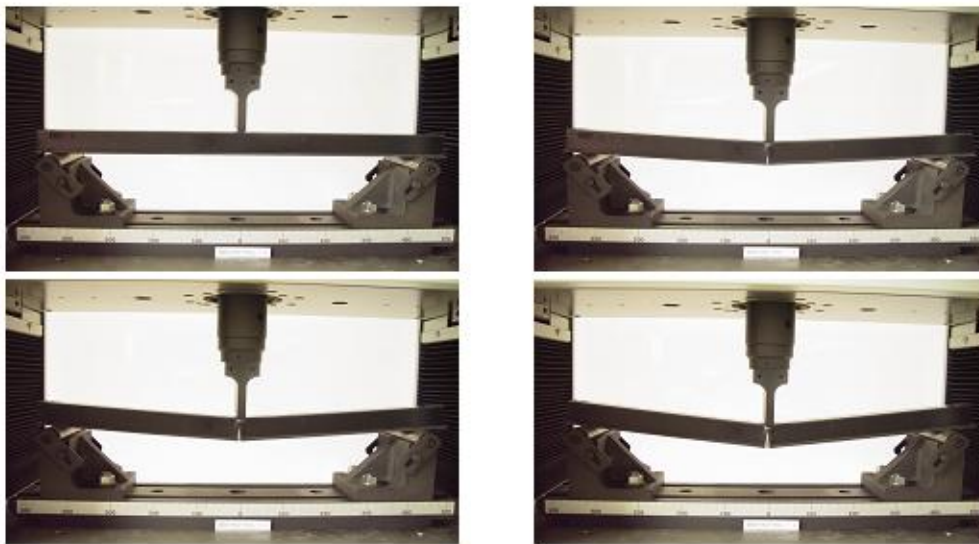


Photo. 34 Bending processing of $HH_5[+90^\circ / -90^\circ]_4$

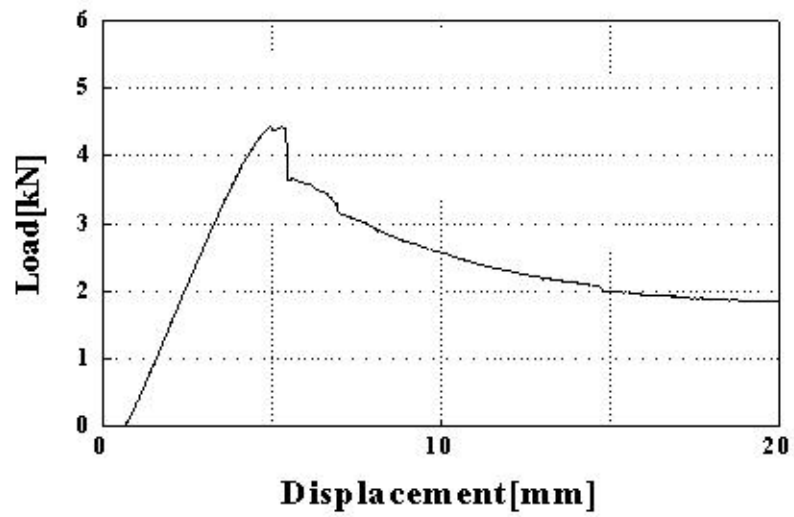


Fig. 47 Load-displacement curve of $HH_5[0^\circ / 90^\circ]_4$

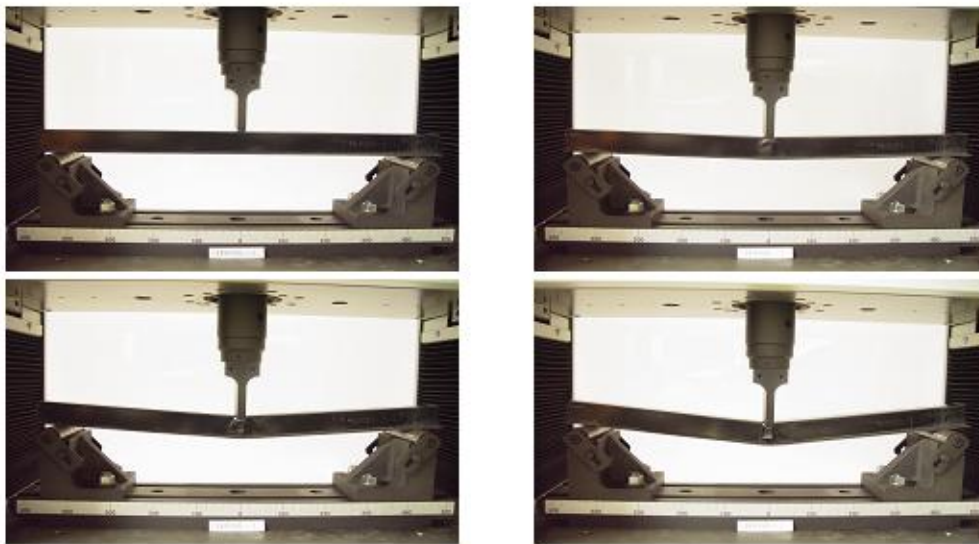


Photo. 35 Bending processing of $HH_5[0^\circ / 90^\circ]_4$

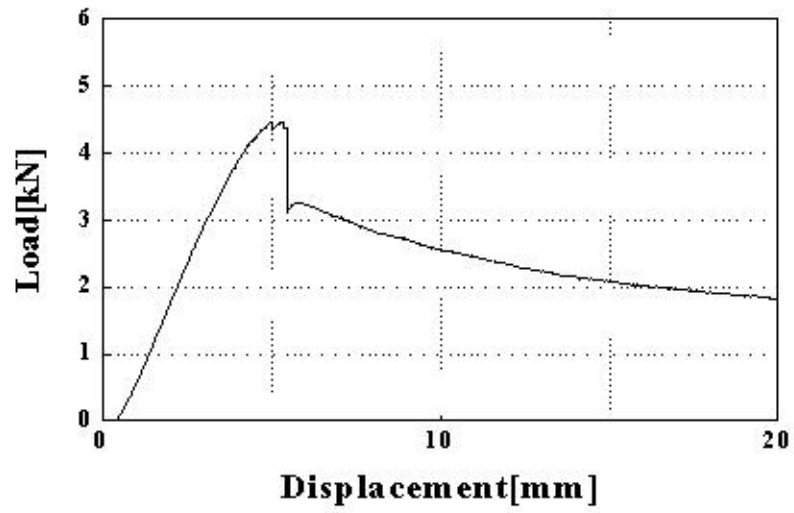


Fig. 48 Load-displacement curve of $HH_5[90^\circ / 0^\circ]_4$

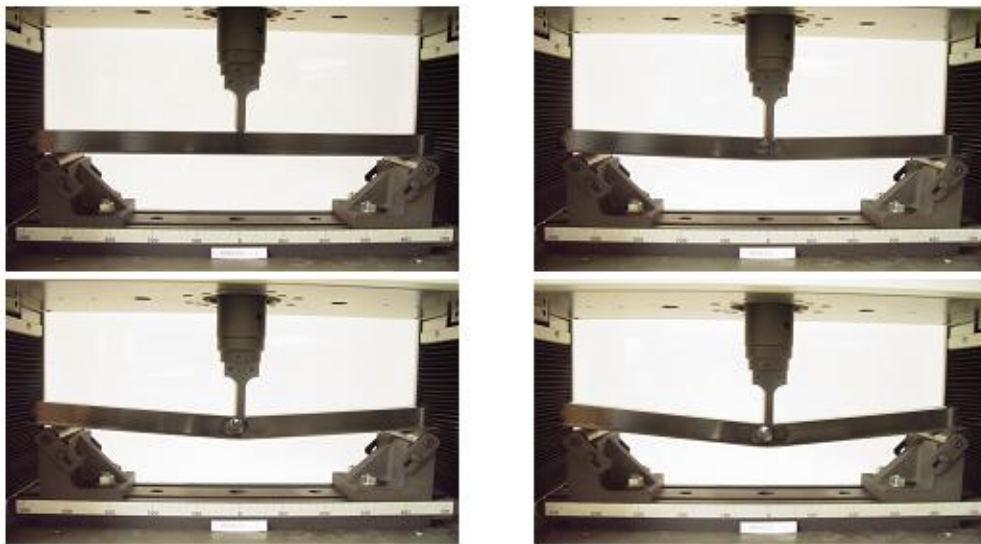


Photo. 36 Bending processing of $HH_5[90^\circ / 0^\circ]_4$

제 4 절 결과 및 고찰

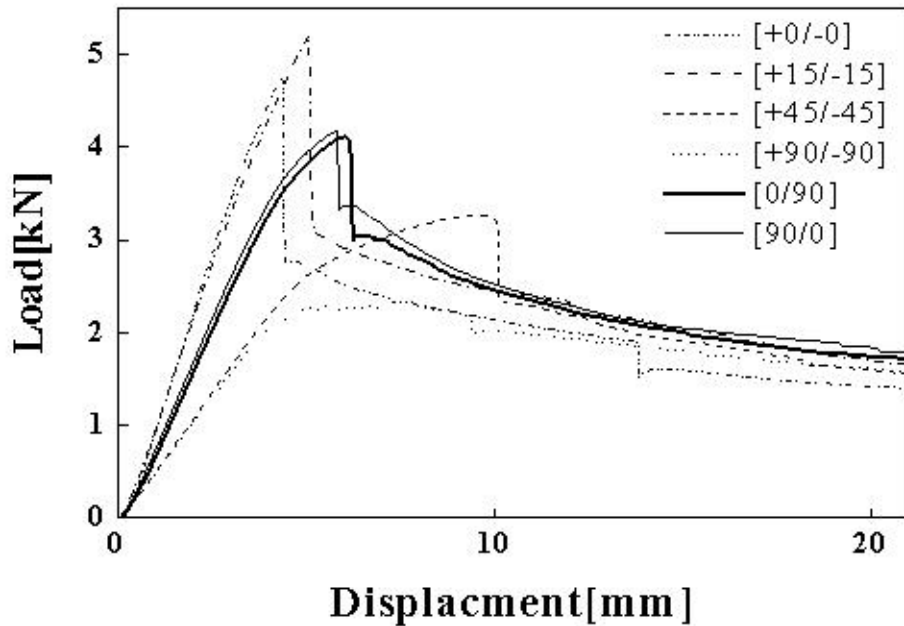


Fig. 49 Load-displacement curve of All Al/CFRP Hybrid square members

Fig. 49는 적층각도에 따른 혼성 사각구조부재의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 대부분 Al/CFRP 혼성 사각구조부재는 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 그 중 HQ[+45° /-45°]₄는 낮은 하중에 완만한 포물선을 그리며 파괴되는 그래프를 보여주었고 HQ[+15° /-15°]₄가 최대하중이 제일 높았으며 다음 순으로 HQ[+0° /-0°]₄이 높았다. HQ[90° /0°]₄와 CQ[0° /90°]₄의 하중-변위 그래프는 두 부재가 유사함을 보였다.

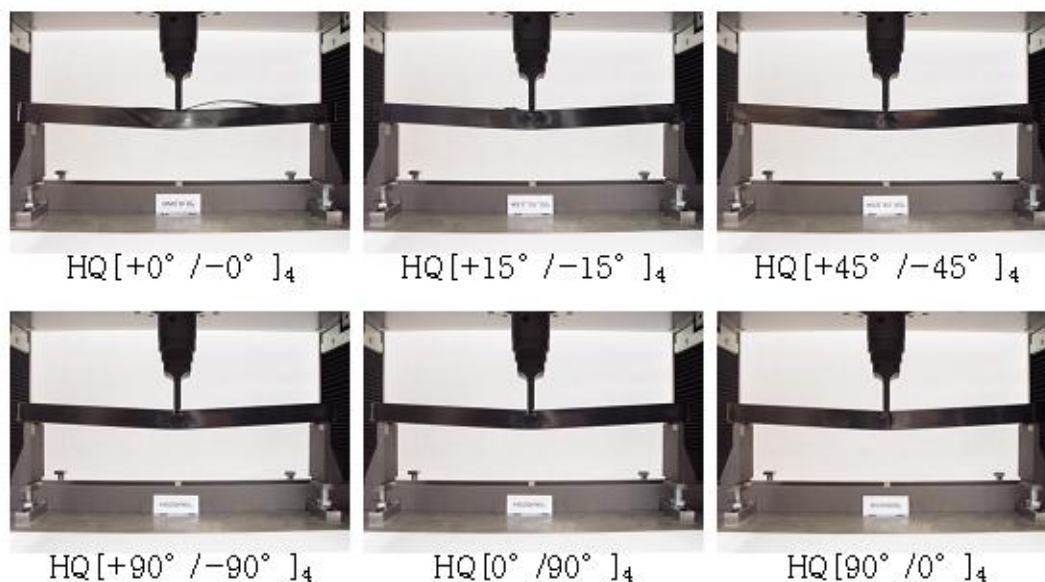


Photo. 37 Picture of bending result of Al/CFRP Hybrid square members after 20 sec

Table. 7 Bending test results for Al/CFRP Hybrid square members

Specimens	Max Load [N]	Dispalcement [mm]	Benidng Stress [MPa]	Stiffness [GPa]
[+0° / -0°] ₄	4.859.2190	4.5580	241.8859	56.0275
[+15° / -15°] ₄	5.018.7500	4.9755	249.8272	52.9380
[+45° / -45°] ₄	3.272.3440	9.6075	162.8932	17.8828
[+90° / -90°] ₄	2.574.9997	8.4697	128.1803	15.9939
[0° / 90°] ₄	4.207.6560	6.1625	209.4519	35.8516
[90° / 0°] ₄	4.192.3435	5.8780	208.6897	37.4512

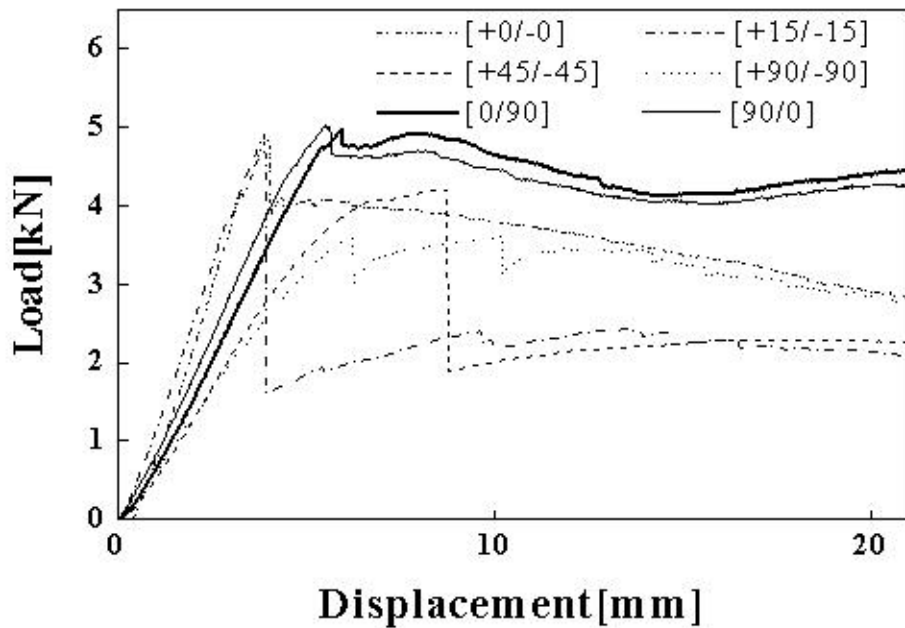


Fig. 50 Load-displacement curve of All A/CFRP Hybrid circle members

Fig. 50은 적층각도에 따른 혼성 원형구조부재의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 대부분 A/CFRP 혼성 사각구조부재는 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으며 HQ[+0° / -0°]₄, HR[+15° / -15°]₄, HR[90° / 0°]₄ 그리고 HR[0° / 90°]₄의 최대하중이 거의 비슷함을 보였고 변위는 HR[+15° / -15°]₄가 제일 짧으며 그다음으로는 HQ[+0° / -0°]₄이 짧았다. 그리고 HR[90° / 0°]₄와 HR[0° / 90°]₄의 하중-변위그래프가 거의 유사함을 보였다. 그 중 HR[+45° / -45°]₄는 낮은 하중에 완만한 포물선을 그리며 파괴되는 그래프를 보여주었다.

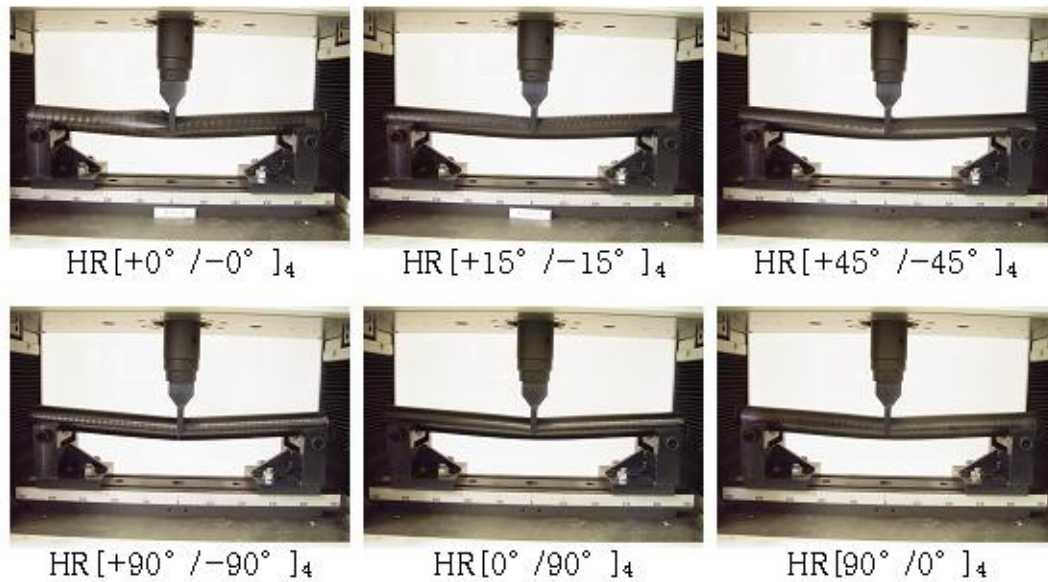


Photo. 38 Picture of bending result of Al/CFRP Hybrid circle members after 20 sec

Table. 8 Bending test results for Al/CFRP Hybrid circle members

Specimens	Max Load [N]	Dispalcement [mm]	Bending Stress [MPa]	Stiffness [GPa]
[+0° / -0°] ₄	4.843.6460	4.6573	252.3092	46.6101
[+15° / -15°] ₄	4.929.6880	3.8940	256.7912	55.6414
[+45° / -45°] ₄	4.209.3750	8.7230	219.2695	21.2093
[+90° / -90°] ₄	3662.5	6.073	190.782	26.5063
[0° / 90°] ₄	4.780.0000	6.0760	248.9938	34.6312
[90° / 0°] ₄	4.564.8435	6.0010	237.7862	34.0984

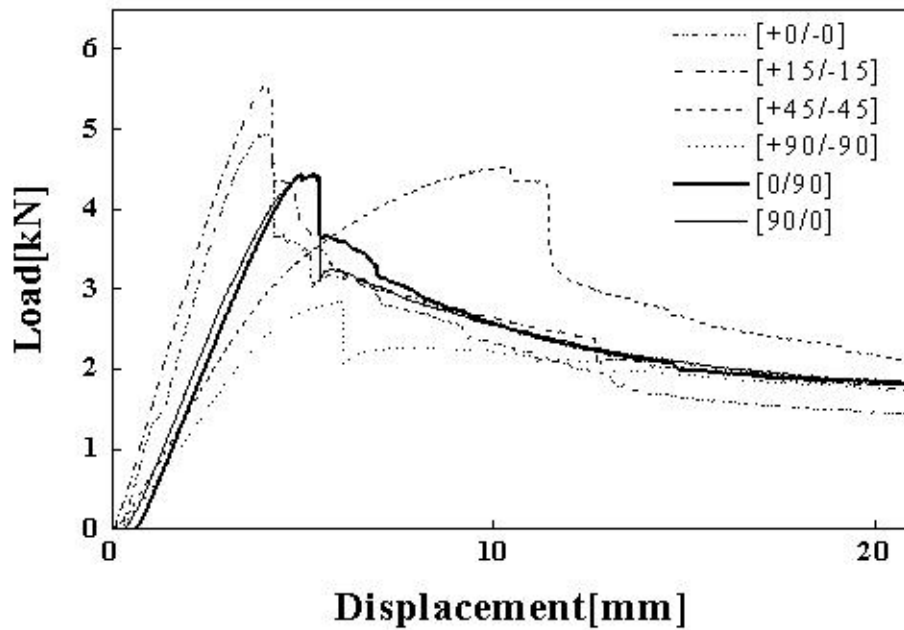


Fig. 51 Load-displacement curve of All Al/CFRP Hybrid hat shaped members

Fig. 51은 적층각도에 따른 혼성 모자형구조부재의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 대부분 Al/CFRP 혼성 사각구조부재는 최대하중 이후 하중단 근처에서 파괴가 일어나면서 급격한 하중감소를 보였으나 $HH_s[+45^\circ / -45^\circ]_4$ 는 낮은 하중에 길고 완만한 포물선을 그리며 파괴되는 그래프를 보여주었으며 $HH_s[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 의 최대하중이 제일 높았으며 다음 순으로 $HH_s[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 이고 그 다음으로 $HH_s[90^\circ / 0^\circ]_4$, $HH_s[0^\circ / 90^\circ]_4$ 그리고 $HH_s[+45^\circ / -45^\circ]_4$ 의 최대하중이 높았다. 그리고 $HH_s[90^\circ / 0^\circ]_4$ 그리고 $HH_s[0^\circ / 90^\circ]_4$ 의 하중-변위그래프는 거의 유사함을 보였다.

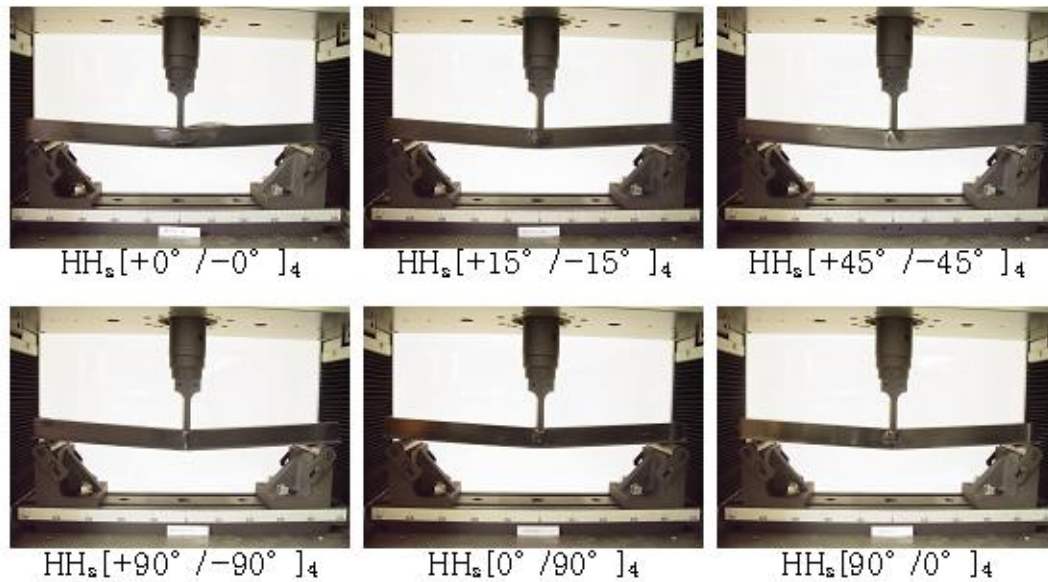


Photo. 39 Picture of bending result of Al/CFRP Hybrid hat shaped members after 20 sec

Table. 9 Bending test results for Al/CFRP Hybrid hat shaped members

Specimens	Max Load [N]	Dispalcement [mm]	Bending Stress [MPa]	Stiffness [GPa]
[+0° / -0°]₄	4967.1875	4.9755	197.9134	41.9681
[+15° / -15°]₄	5654.6875	4.335	225.3063	55.0085
[+45° / -45°]₄	4470.3125	10.324	178.1159	18.1957
[+90° / -90°]₄	2853.125	5.989	113.6804	20.0196
[0° / 90°]₄	4376.5625	5.0585	174.3805	36.3822
[90° / 0°]₄	4357.8125	4.986	173.6334	36.7385

1. AI/CFRP 혼성 구조부재 강도

Fig. 52~54는 AI/CFRP 혼성 사각·원형·모자형 구조부재를 각각 적층각도에 따른 굽힘강도를 나타내었다.

AI/CFRP 혼성 사각 구조부재 굽힘강도에서는 Fig. 51에서 최대하중이 높은 HQ[+15° / -15°]₄이 제일 높았고 그다음으로 HQ[+0° / -0°]₄이 높았다. 그리고 HQ[0° / 90°]₄과 HQ[90° / 0°]₄은 거의 비슷하였다.

혼성 원형 구조부재에서 Fig. 50에서 보여지듯이 HR[+0° / -0°]₄, HR[+15° / -15°]₄, HR[0° / 90°]₄, HR[90° / 0°]₄의 최대하중은 거의 비슷하나 HR[+15° / -15°]₄이 약간 높았다. 혼성 원형 구조부재에서는 HR[+90° / -90°]₄과 HR[+45° / -45°]₄을 제외한 모든시편은 적층각도에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

혼성 모자형 구조부재에서 Fig. 51에서와 같이 최대하중은 HH_s[+15° / -15°]₄이 제일 높아 강도 역시 제일 높았으며 HH_s[+0° / -0°]₄이 두 번째로 강도가 높고 HH_s[0° / 90°]₄, HH_s[90° / 0°]₄, HH_s[+45° / -45°]₄ 순으로 나타났다.

AI/CFRP 혼성 사각·원형·모자형 구조부재 모두 공통적으로 [+0° / -0°]₄과 [+15° / -15°]₄는 다른 시험편과 달리 하중단 지점에서 시작으로 파괴면적이 넓게 나타났고 이는 파괴면적이 크기가 강도가 높고 낮음에 영향을 미친다고 보여지며 [+45° / -45°]₄는 긴 포물선을 보이며 다른 시험편들은 대부분 변위 5mm에서 파괴를 보이는것과 달리 10mm 근방에서 파괴됨을 보였다. 그리고 [+90° / -90°]₄는 기지파괴만이 작용되어 모든 형상에서 제일 낮은 강도를 보였으며 [0° / 90°]₄과 [90° / 0°]₄은 하중-변위가 거의 비슷함을 보이고 이는 최 외각층이 0° 이든 90° 이든 별다른 영향력이 없는 것으로 보여진다.

Fig. 57은 AI/CFRP 혼성 사각·원형·모자형 구조부재의 강도를 같은 그래프에 나타내었다. 단면형상에서는 AI/CFRP 혼성 원형 구조부재가 다른 단면형상 구조부재보다 높은 굽힘강도를 나타냈다. 이는 사각, 원형, 모자형 구조부재중 원

형단면을 가지는 구조부재의 강도면에서 우월하다고 볼 수 있다.

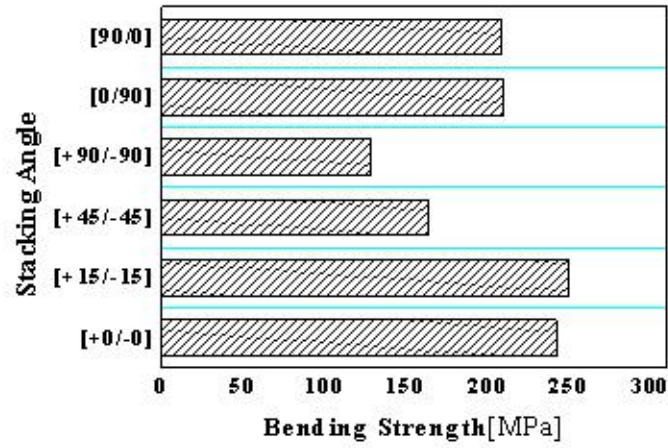


Fig. 52 Bending Strength of Hybrid square members

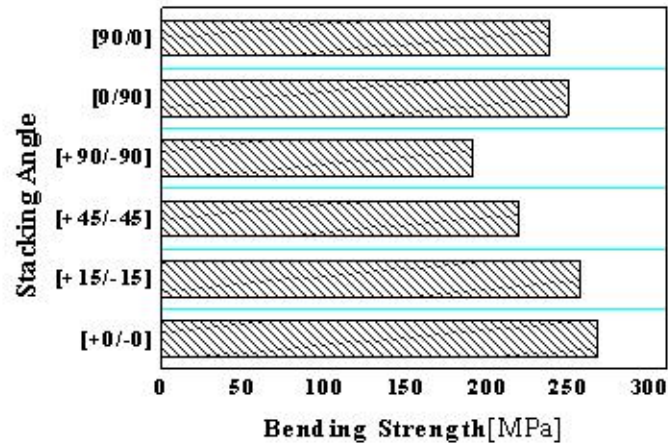


Fig. 53 Bending Strength of Hybrid circle members

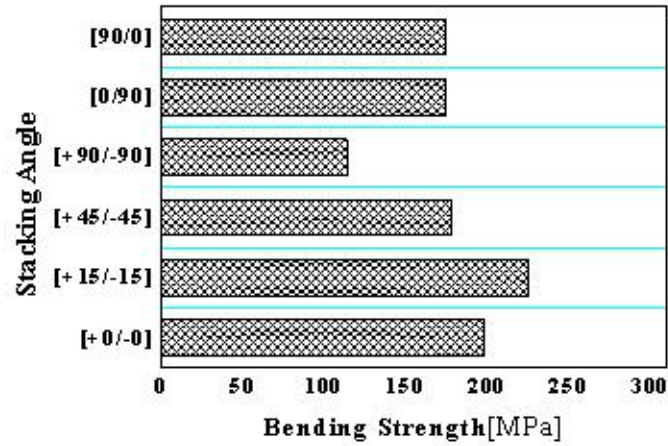


Fig. 54 Bending Strength of Hybrid hat shaped square members

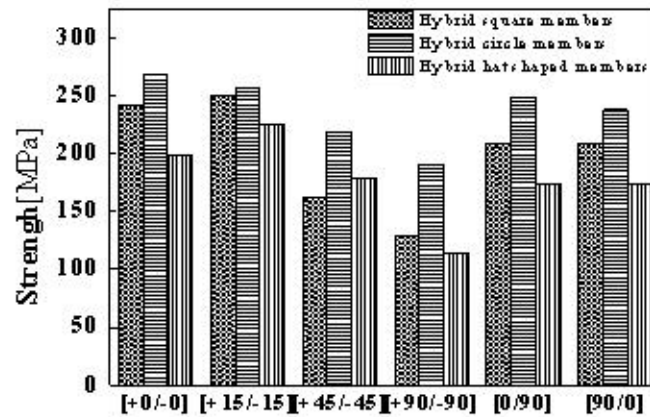


Fig. 55 Comparison strength of Hybrid square · circle · hat shaped members

2. AI/CFRP 혼성 구조부재 강성

Fig. 56 ~ 58은 AI/CFRP 혼성 사각·원형·모자형 구조부재의 강성을 각각 적층각도에 따라 나타내었다.

AI/CFRP 혼성 사각 구조부재에는 $HQ[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 이 제일 높고 $HQ[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 이 두 번째로 높았다. 그러나 최대하중에서는 $HQ[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 가 $HQ[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 보다 높았으나 최대하중점까지의 변위는 $HQ[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 이 $HQ[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 보다 짧아서 강성이 좀 높게 나타났다.

AI/CFRP 혼성 원형 구조부재에는 $HR[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 가 원등히 높고 다음으로 $HR[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 이 높았다. 최대하중점에서는 $HR[+0^\circ / -0^\circ]_4$, $HR[+15^\circ / -15^\circ]_4$, $HR[0^\circ / 90^\circ]_4$, $HR[90^\circ / 0^\circ]_4$ 이 거의 비슷하였으나 최대하중점까지의 변위는 $HR[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 가 제일 작고 $HR[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 과 $HR[0^\circ / 90^\circ]_4$ · $HR[90^\circ / 0^\circ]_4$ 순으로 작아 $HR[+15^\circ / -15^\circ]_4$, $HR[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 과 $HR[0^\circ / 90^\circ]_4$ · $HR[90^\circ / 0^\circ]_4$ 순으로 강성이 높게 나타났다.

AI/CFRP 혼성 모자형 구조부재에서는 AI/CFRP 혼성 원형 구조부재의 강성특성과 유사하게 $HH_s[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 이 제일 높고 $HH_s[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 이 두 번째로 높고 $HH_s[0^\circ / 90^\circ]_4$ 과 $HH_s[90^\circ / 0^\circ]_4$ 이 3번째로 높았다. AI/CFRP 혼성 구조부재의 강성특징에서 공통적으로 $[+45^\circ / -45^\circ]_4$ 는 완만한 포물선을 그리며 최대하중점에 이르는 변위가 제일 길어 강성이 제일 낮게 측정되었고 $[0^\circ / 90^\circ]_4$ 과 $[90^\circ / 0^\circ]_4$ 은 하중-변위 그래프가 거의 같아 강성 또한 거의 같게 측정되었다. 이는 최외각층이 0° 이든 90° 이든 별다른 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 59은 AI/CFRP 혼성 사각·원형·모자형 구조부재의 강성을 비교한 그래프이며 단면끼리의 강성 비교를 위해 2차 계수 곱을 행하여 비교를 해야 올바른 비교이다. 각 부재의 $EI[Nmm^2]$ 값을 서로 비교해 놓았다. AI/CFRP 혼성 사각 구조부재만이 $[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 의 강성이 높게 나타났고 AI/CFRP 혼성 원형·모자

형 구조부재의 강성은 $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 가 높게 나타났고 강성면에서는 A/CFRP 혼성 구조부재 강도와 달리 단면형상에 따른 강성의 차이점은 보이지 않았다.

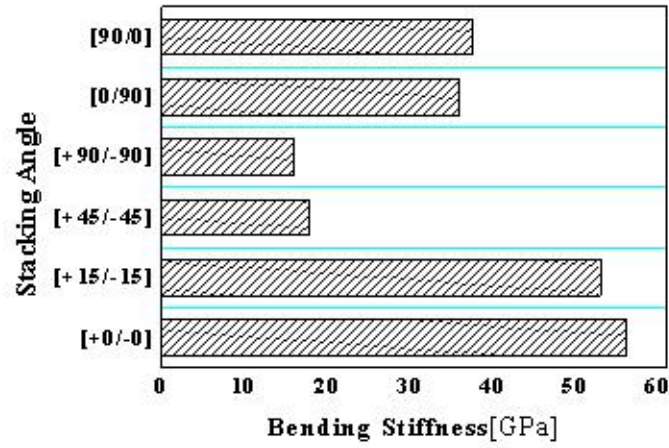


Fig. 56 Bending Strength of Hybrid square members

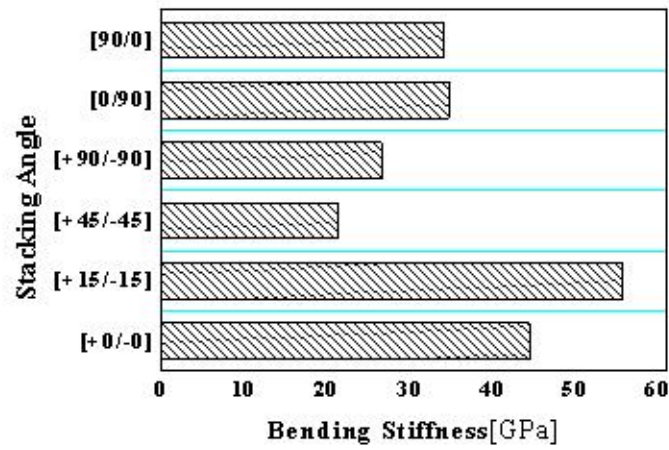


Fig. 57 Bending Strength of Hybrid circle members

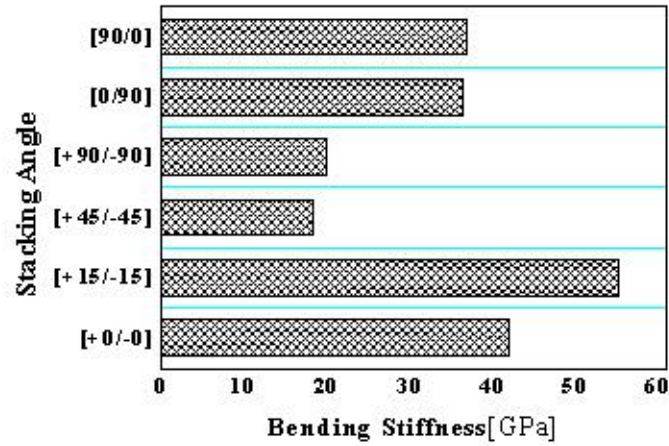


Fig. 58 Bending Strength of Hybrid hat shaped square members

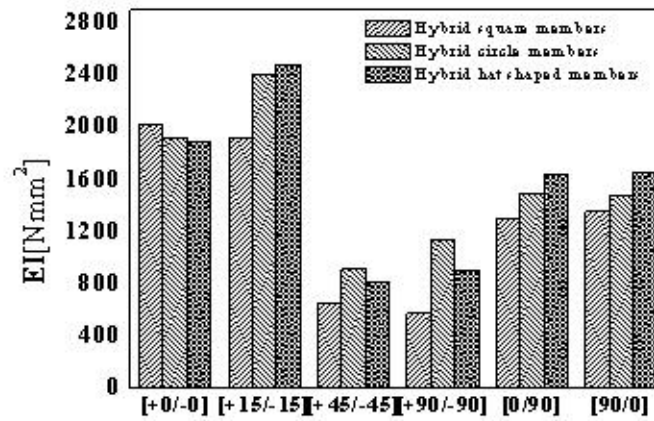


Fig. 59 Comparison strength of Hybrid square · circle · hat shaped members

제 5 장 결 론

강도와 강성이 높은 1차 구조부재를 얻기 위해 단면형상과 적층각도에 따른 CFRP 구조부재를 제작·굽힘실험을 하여 강도와 강성 특성을 비교 하였으며, CFRP의 단점인 취성을 보완하고자 알루미늄 구조부재를 보강재로 사용하여 A/CFRP 혼성 구조부재를 CFRP 구조부재와 동일한 방법으로 제작·굽힘실험하고 강도와 강성특성을 비교하였다. CFRP구조부재와 A/CFRP 혼성 구조부재의 강도와 강성특성을 형상별, 적층각도별로 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. CFRP 사각 구조부재는 $[90^\circ / 0^\circ]_4$ 와 $[0^\circ / 90^\circ]_4$ 에서 강도와 강성 모두 높게 측정되고 CFRP 원형 구조부재 또한 CFRP 사각 구조부재와 동일하게 $[90^\circ / 0^\circ]_4$ 와 $[0^\circ / 90^\circ]_4$ 에서 강도와 강성 모두 높게 측정되어 CFRP 사각·원형 구조부재는 직물형으로 적층하여 제작된 구조부재가 제일 적합하다.
2. $[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 으로 적층된 CFRP 구조부재는 하중-변위그래프에서 최대하중이 이르기 전 2~3회 파괴가 나타나고 Photo. 5, 11에서 굽힘실험이 진행되는 동안 굽힘이 작용되는 것이 아닌 압축이 나타나 굽힘부재로써 용이하지 않다.
3. 단면형상변화에 따른 CFRP 구조부재는 CFRP 원형 구조부재가 강도와 강성 모두 최대 2배정도 높게 나타나 단면형상별로는 단면적이 같더라도 사각보다는 원형구조부재가 강도와 강성의 성능이 더 좋게 나타났다.
3. A/CFRP 혼성사각 구조부재에서는 강도면에서 $[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 이 $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 보다 높게 나타났고 강성면에서는 $[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 이 $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 보다 높게 나타났다. 이는 강도와 강성이 높은 혼성 사각부재를 제작할 때는 $[+0^\circ / -0^\circ]_4$ 또는 $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 으로 적층하는 것이 더 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있는 것으로 본다.

4. Al/CFRP 혼성원형·모자형 구조부재는 $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 가 강도와 강성모두 높게 나타났고 이는 단면형상에 원형이나 모자형인 혼성구조부재를 제작할 때는 $[+15^\circ / -15^\circ]_4$ 으로 적층하는 것이 더 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있는 것으로 본다.
5. Al/CFRP 혼성 구조부재는 단면형상별로 비교해 볼 때 강도면에서는 원형단면이 높음을 보였으나 강성에서는 별다른 특징이 나타나지 않았다.
6. $[0^\circ / 90^\circ]_4$ 과 $[90^\circ / 0^\circ]_4$ 으로 적층하여 제작한 모든 시험편은 하중-변위 그래프가 거의 비슷하여 강도와 강성도 거의 비슷하게 나타났다. 이는 최외각층이 0° 이든 90° 이든 별다른 영향력이 없는 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. P. H Thorn and P. J Edwards, "Energy absorption in composite tube", *J. Composite Materials*, Vol.16, pp.521~545, 1982.
2. A. G. Mamalis and D. E. Manolakos, "Analytical modeling of the static and dynamic axial collapse of thin-walled fiberglass composite conical shells", *Int. J. Impact Engineering*, Vol.19, pp.477~492, 1997.
3. G. L. Farley, "Relationship between mechanical-property and energy-absorption trends for composite tubes." *NASA Technical paper*, OMB 0704-0188, 1992.
4. Y. N. Kim, K. H. Im, S. K. Kim and I. Y. Yang, "Energy absorption characteristics of CFRP composite tubes under axial compression load." *Key Engineering Materials* Vol.233-236 pp.245-250, 2003.
5. Y. N. Kim, J. J. Hwang, K. Y. Baek, C. S. Cha and I. Y. Yang, "Impact collapse characteristics of CF/Epoxy composite tubes for light-weights." *KSME International Journal* 17:48-56, 2003.
6. A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis and D. P. Papapostolou, "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental." *Composite Structures*, Vol. 63, pp.347-360, 2004.
7. H. W. Song, Z. M. Wan, Z. M. Xia and X. W. Du, "Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tube", *Int. J. Impact Engineering*, Vol.24, pp.385~401, 2000.
8. J. Bouchet, E. Jacquelin and P. Hamelin, "Dynamic axial crushing of combined composite aluminum tube : the role of both reinforcement and surface treatments", *Composite Structure*, Vol.56, pp.87~96, 2002.
9. K.H. Kim, K.C. Shin and J.J. Lee, "Axial crush and energy absorption characteristics of aluminum/GFRP hybrid square tube", *Key Engineering*

Materials, Vol.183~187, 2000.

10. C.S Cha, K.S. Kee, J.O. Chung, H.K. Min, S.B. Pyeon and I.Y. Yang, "Energy absorption characteristics in square or circular shaped aluminum/CFRP composite tubes under axial compression", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.6, No. 5, pp.501~506, 2005.

11. I. Y. Yang, K. S. Lee, Y. N. Kim, J. O. Chung and C. S. Cha, "Axial crushing behavior and energy absorption capability of Al/CFRP square tubes for light-weights", *Key Engineering Materials*, Vol.306~308, pp. 297~302, 2006.

12. T. C. Triantafillou, P. Kim and U. Meier, "Optimization of hybrid aluminum/CFRP box beam", *Int. J. Mechanical Science*, Vol.33, pp. 729~739, 1991.

13. J. C. Broughen, A. Beevers and A. R. Hutchinson, "Carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) strengthening of aluminum extrusions", *Int. J. Adhesion and Adhesive*, Vol.17, No.3, pp.269~278, 1997.

14. K. C. Shin, J. J. Lee, K. H. Kim, M. C. Song and J. S. Huh, "Axial crush and bending collapse of an aluminum/CFRP hybrid square tube and its energy absorption capability", *Composite Structures*, Vol.57, pp.279~287, 2002.

15. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, D790-03

16. 이성혁, "알루미늄-복합재료 혼성 사각관의 굽힘해석." 한양대학교 박사논문, 2005.

17. 홍찬성, "복합재료를 이용한 경량구조물의 강도설계기법 개발." 한국과학재단, 1988.

18. 홍창선, 이인, 윤성호, 김동민, 김용완, 심재열, 이재화, 전재수, "두꺼운 고등 복합재료 적층판 제작 및 설계기법 개발," [KOSEF] 기초과학연구사업 학술

기사, 1991.

19. 신재윤 "굴곡진 보강섬유를 가진 두꺼운 복합재료의 비선형 거동에 관한 연구," 연세대학교 석사논문, 1999.

20. 이길성. "충격 흡수용 경량화 차체구조부재의 안전성능 평가." 조선대학교 박사논문, 2008.

21. 김영남. "수송기계용 경량화 CFRP 복합재 박육부재의 축 압재특성." 조선대학교 박사논문, 2002

22. 김영남, 차천석, 양인영. "CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘에 관한 실험적 연구." 한국자동차공학회논문집』 10:149-157, 2002.

23. 차천석. "박육단면 차체구조부재의 충격압재 특성평가." 조선대학교 박사논문, 2000.

24. B. J. Kim and S. J. Heo, "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles" *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, pp. 141-147, 2003.

25. S. K. Kim, K. H. Im, Y. N. Kim, J. W. Park, I. Y. Yang and T. Adachi, "On the characteristics of energy absorption control in thin-walled members for the use of vehicular structures." *Key Engineering Materials* Vol. 233-236, pp. 239-244, 2003.

26. A. G. Mamilis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous and W. Johnson, "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating Systems." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, pp. 185-196, 1991.

27. D. Kecman, "Bending collapse of rectangular and square section tube," *Int. J. Mechanical Science*, Vol. 25, No. 9-10, pp.623-636, 1983.

28. T. Wierzbicki, W. Abramowicz, T. Gholami and J. Huang, "Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading II-bending," *Computers and Structures*, Vol. 51, No. 6, pp.625-636,

1994.

29. T. H. Kim and S. R. Reid, "Bending collapse of thin-walled rectangular section columns," *Computers and structures*, Vol. 79, pp.1897~1911, 2001.

30. S. J. Cimpoeru and N. W. Murray, "The large deflection pure bending properties of a square thin-walled tube," *Int. J. Mechanical science*, Vol. 35, No.3~4, 1993.

31. P. Drazetic, F. Payen, P. Ducrocq and E. Markiewicz, "Calculation of the deep bending collapse response for complex thin-walled columns I. pre-collapse and collapse phases," *Thin-Walled Structures*, Vol. 33, pp.155~176, 1999.

32. P. Drazetic, F. Payen, P. Ducrocq and E. Markiewicz, "Calculation of the deep bending collapse response for complex thin-walled columns II. post-collapse and collapse phases," *Thin-Walled Structures*, Vol. 33, pp.177~210, 1999.

33. T. V. Parry and S. Wronski, "Selective reinforcement of an aluminum ally by adhesive bonding with uniaxially aligned carbon fibre/epoxy composite," *Composites*, Vol. 12, pp. 249~255, 1981.

34. K. C. Shin, J. J. Lee, K. H. Kim, M. C. Song and J. S. Huh, "Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability," *Composite Structures*, Vol. 57, pp 279~287, 2002.

35. H. Fukuda, T. Watanabe, M. Itabashi and Atsushi Wada, "Compression bending test for CFRP pipe," *Composite Science and Technology*, Vol. 62, pp. 2075~2081, 2002.

36. H. Fukuda and M. Itabashi, "Simplified compression bending test method for advanced composites," *Composite: Part A*, Vol. 30, pp. 249~256, 1999.

37. S. C. Quda, K. W. Shahwan and V. Agaram, "Failure mechanics of triaxially braided carbon composites under combined bending-compression loading," *Composite Science and Technology*, Vol 66, pp. 2548~2556, 2006.

