

論文

경량화 알루미늄-GFRP 혼성 사각관 보의 굽힘성능 및 붕괴 메커니즘

이성혁*, 김형진*, 장영욱**, 최낙삼***+

Bending Performances and Collapse Mechanisms of Light-weight Aluminum-GFRP Hybrid Square Tube Beams

Sung-Hyuk Lee*, Hyung-Jin Kim*, Young-Wook Chang**, Nak-Sam Choi***+

ABSTRACT

Bending collapse of light-weight square tubes used for vehicle structure components is a dominant failure mode in oblique collision and rollover of vehicles. In this paper bending performances of aluminum-GFRP hybrid tube beams were evaluated in relation with bending deformation behavior and energy absorption characteristics. Aluminum/GFRP hybrid tube beams fabricated by inserting adhesive film between prepreg and metal layer were used in the bending test. Failure mechanisms of hybrid tubes under a bending load were experimentally investigated to analyze the bending performance as a function of ply orientation and composite layer thickness. Ultimate bending moments and energy absorption capacity of hybrid tube beams were obtained from the measured load-displacement curves. It was found that aluminum/GFRP hybrid tubes could be converted to rather stable collapse mode showing excellent energy absorption capacity in comparison to the pure aluminum tube beams. In particular, the hybrid tube beam with $[0^\circ/90^\circ]_s$ composite layer showed a large improvement by about 78% in energy absorption capacity and by 29% in specific energy absorption.

초 록

자동차 충돌이나 전복사고에 있어서 부재들의 변형은 축방향 압축붕괴와 함께 굽힘붕괴가 혼합된 변형양상을 보여주고 있으며, 자동차에 사용되는 대부분의 박벽관 부재는 굽힘붕괴가 주된 붕괴형태로 나타나고 있다. 하지만 혼성 사각관의 굽힘붕괴에 대한 연구는 축방향 붕괴의 연구에 비해 많이 부족한 현실이다. 본 논문에서는 알루미늄-복합재료 혼성 사각관의 굽힘붕괴 거동 및 에너지 흡수 특성을 실험적 방법으로 연구하여 경량화 구조부재로서의 적용가능성을 조사하였다. 접착필름 삽입형 경화법으로 제작된 알루미늄-복합재료 혼성 사각관 보에 대해 복합 재료 층의 적층두께와 적층 각에 따른 굽힘 성능을 평가하였다. 본 혼성 사각관 보는 복합재료 만으로 구성된 사각관 보에서 발생할 수 있는 불안정한 붕괴모드를 안정적인 붕괴로 전환시키면서, 단순 알루미늄 사각관에 비해 에너지 흡수 능력이 향상되었고, 특히 $[0^\circ/90^\circ]_s$ 를 적용한 혼성 사각관의 경우 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관 시험편과 비교하여 흡수에너지가 1.78배 증가하였고 단위무게당 흡수에너지는 1.29배로 증가함을 보였다.

Key Words : 알루미늄-복합재료 혼성 사각관(Aluminum-composite Hybrid Square Tube Beam), 굽힘붕괴기구(Bending Collapse Mechanisms), 적층두께(Layup Thickness), 적층각(Ply Orientation), 에너지 흡수능력(Energy Absorption Capacity), 접착필름삽입(Adhesive Film Insertion)

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 화학공학과

***+ 한양대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail: nschoi@hanyang.ac.kr)

1. 서 론

연비향상을 위해 자동차메이커들이 노력을 기울이고 있는 분야는 엔진기술의 개량, 차체 경량화 등이다. 엔진기술의 개량은 엔진 및 구동계의 효율 향상과 에너지손실의 저감, 그리고 차체 경량화의 3가지 기술적 과제로 압축될 수 있다. 그러나 엔진기술과 관련해서는, 현 기술수준으로 차의 성능과 기능을 유지하면서 연비를 단기간에 획기적으로 향상시키는 데 한계가 있기 때문에 차체 경량화를 통한 연비향상이 가장 효과적인 대안으로 간주되고 있다.

차량 경량화 목표를 달성하기 위해서 최근 개발되고 있는 대표적인 기술로는 초경량 철강차체와 알루미늄과 복합재료 같은 경량재료를 이용한 차체를 들 수 있다. 특히 알루미늄의 사용이 크게 증가하여 주물 관련부품을 중심으로 실린더 블럭에서 실린더 헤드, 피스톤, 알루미늄 휠, 라디에이터, 범퍼 바디 하우징에 이르기까지 적용되고 차체 전체를 알루미늄으로 적용한 차량도 상용화 추세에 있다. 또한 Aluminum Space Frame(ASF)이란 구조의 경량차체는 선진 자동차업체를 중심으로 활발히 연구되어 ASF를 적용한 경량차체는 기존의 모노코크(monocoque) 방식의 강철 차체와 비교하여 기존 차체 무게를 40% 정도 경량화 할 수 있다고 한다. 하지만, 알루미늄은 강철 대비 중량 절감 효과에는 그 기여도가 크지만 강성이 떨어지고 강도가 낮아 변형을 집중이 생기기 쉬운 단점이 있다.

경량화에 이용되는 또 하나의 재료는 복합재료이다. 복합재료는 뛰어난 경량성과 더불어 비 강성 및 비 강도가 높고 피로특성과 진동감쇠특성, 치수안정성이 우수한 특징이 있는 반면 취성적이고 연신율이 낮다는 단점을 가진다. 박벽관 재료로 적용되어 인장, 압축 및 전단하중 작용 시, 섬유와 기지의 파단 및 섬유-기지의 계면 부 파손을 수반하면서 불안정한 파괴모드를 보인다[1, 2]. 또한 굽힘 하중에 대해 취약한 면이 있는 것으로 알려져 있다[3]. 이러한 알루미늄과 복합재료의 단점을 줄이고 장점을 살리려는 방법으로 복합재료로 피막 시킨 알루미늄-복합재료 혼성 사각관(Aluminum-Composite Hybrid Tube Beam)이 고려될 수 있다.

차량의 충돌 시 차량 전방 구조물에서의 에너지 흡수는 각각 2개씩 취부 되어 있는 Upper side rail과 Lower side rail에 의해 주로 이루어지며 이들 side rail은 연속적인 소성 변형을 통해 충돌 에너지의 약 70%를 흡수한다[4]. 이때 두 개의 사이드 멤버(side member)는 최소한의 단면으로 최대한의 에너지를 흡수하기 위하여 앞단에서 안정적인 압축붕괴를 유도하며 후단에서는 변형을 하지 않고 버티고 있어야 한다. 앞단에서 충분한 에너지를 흡수한 후에는 후단 측면부재에서 굽힘붕괴를 유도하여 에너지 흡수에 기여하도록 설계되어야 한다.

반면에 차량의 측면 충돌이나 전복사고에서는 전방충돌과는 달리 충돌에너지의 대부분을 흡수할 수 있는 구조물이 없고, 승객과 차량사이에 제한된 공간으로 인해서 승객에게 치명적인 상해를 줄 수 있다. 따라서 측면충돌이나 전복사고의

안전성을 확보하기 위해서는 차량 측면 부재인 필라(pillar)와 사이드 실(side sill)의 굽힘 강성 및 붕괴특성의 향상에 대한 연구가 필요하다. 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴 특성을 압괴 거동과 함께 규명하려는 해석 및 시험연구가 국내외에서 발표되었다[5~8]. Triantafillou[9]와 Broughton[10] 등은 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)로 알루미늄 사각관의 일부를 보강할 경우 굽힘 강성과 강도가 향상될 수 있다고 보고하였다. 또한 Shin[11]은 압축 및 굽힘 하중 하에서의 알루미늄/유리섬유 복합재료 혼성 사각관의 에너지 흡수특성을 연구하여 혼성 사각관이 안정적인 붕괴와 더불어 높은 에너지 흡수 능력을 가질 수 있다고 보고하였다. 송민철과 이정주[12]는 동시경화법으로 제작한 알루미늄/GFRP 혼성 사각관 보를 굽힘시험하여 알루미늄의 사각관과 복합재료만의 사각관에 대한 굽힘성능과 비교하였으며 최대굽힘모멘트와 에너지 흡수능력의 측면에서 혼성 사각관 보의 우수성을 시험결과로서 보여주었다. 저자들은 알루미늄/복합재료 혼성 사각관 보의 굽힘 성능 특성을 해석하기 위한 기초연구로 각종 보강 알루미늄 사각관 보의 굽힘 붕괴 메커니즘을 실험과 수치해석을 조합하여 조사한 바 있다[13].

본 연구에서는 Al층과 복합재료층 사이에 접합필름(adesive)을 삽입하여 동시경화법으로 알루미늄-복합재료 혼성 사각관을 제작하고 이에 대한 굽힘 시험을 수행하여 혼성 사각관의 굽힘물성을 알아보고 복합재료층의 적층두께와 적층각에 따른 붕괴 메커니즘 및 에너지 흡수특성을 관찰하여 굽힘성능을 해석하고자 한다. 또한, 단위 무게당 성능평가를 통해 경량화 부재로서의 우수성을 검토하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 알루미늄 사각관의 선정

본 연구에서 사용한 알루미늄 사각관 보 시험편은 AL-Cu-Si계의 6063T5 압출재료, 200℃ 이상에서 도장 후 소부경화성(paint bake hardening)에 의한 강도, 강성이 향상되어 주로 외관 등의 강도를 중시한 용도에 사용된다[14].

사각관보의 단면은 20mm×20mm이며, 길이는 가능한 순수 굽힘 조건에 가깝도록[15] 500mm로 정하였다. 사각관의 두께 선정을 위해 벽두께(wall thickness) 1mm와 2mm에 대해 굽힘 실험을 수행하여 벽 두께에 따른 알루미늄 사각관 보의 굽힘 붕괴 특성을 평가하였다.

Fig. 1은 벽두께 1mm와 2mm인 알루미늄 사각관 보의 삼점 굽힘붕괴 후의 변형 모습이며, Fig. 2는 알루미늄 사각관에 대한 정적 굽힘 시험 결과이다. 알루미늄 사각관에 대한 정적 굽힘 실험 결과, 벽두께 1mm에서는 압축영역에서 소성힌지(plastic hinge)에 의한 안정적인 붕괴모습을 보였고 벽두께 2mm에서는 인장영역에서 균열이 발생하는 불안정한 붕괴모습을 보였다. 벽두께 2mm인 알루미늄 사각관 보의 두께 1mm인 시편과 비교할 때 굽힘 강성 및 최대하중이 크게 증가하고 굽힘붕괴가 지연되는

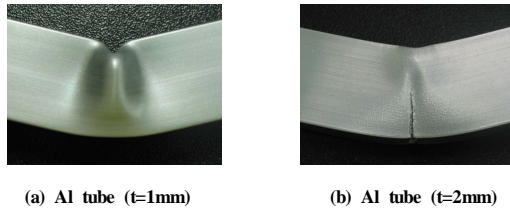


Fig. 1 Bending collapse behavior of aluminum tube beams obtained from three-point bending test.

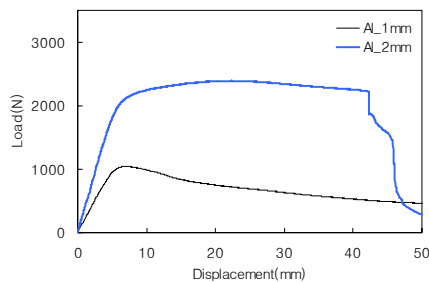


Fig. 2 Experimental load-displacement curves of aluminum tube beams.

모습을 보였다. 이 경우에는 알루미늄 사각관의 변형이 충분히 진행되어 에너지를 흡수하기 이전에, 인장응력을 받는 시험편 하단 플랜지에서의 인장파단으로 인해 하중이 급격하게 감소하여 에너지 흡수부재로서의 역할은 기대하기 힘들다. Meadow[16]의 보고에 따르면, 알루미늄 튜브가 굽힘 하중을 받을 때 압축 영역에서 소성변형 발생에 의한 안정적인 붕괴와 인장영역에서의 파단(fracture)에 의한 불안정한 붕괴의 두 가지 붕괴 모드를 보일 수 있으며, 이는 탄성계수와 기하학적 특성(폭과 벽두께)에 의존한다는 것을 보였다. 고등기술원의 전기자동차 차량 및 시스템 기술개발 연구보고서[17]에서는 알루미늄 사각관의 폭(b)/벽두께(t)의 비율이 12.5보다 큰 경우 압축영역의 소성변형에 의한 안정적인 붕괴가 발생하지만 12.5보다 작은 경우에는 인장영역에서의 파단으로 인해 불안정한 붕괴모드가 발생한다고 하였다. 즉, 알루미늄 사각관이 구조물에 적용될 경우 벽두께와 폭의 비율을 적절하게 선정해야만 불안정한 붕괴모드를 예방할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 벽 두께에 따른 혼성 알루미늄 사각관 보의 굽힘붕괴 특성 평가를 위해 벽두께 1mm의 알루미늄 사각관을 기본 구조재로 선정 하였다

2.2 알루미늄-GFRP 혼성 사각관의 제작

알루미늄 사각관 보의 표면을 복합재료층과의 접합력을 향상시키기 위해 인산처리(phosphoric acid anodizing, PAA)하였고, 복합재료층은 (주)한국 화이버의 glass fabric/epoxy prepreg와 일방향 유리섬유 복합재(UD GFRP) prepreg를 이용하여 제작하였다.

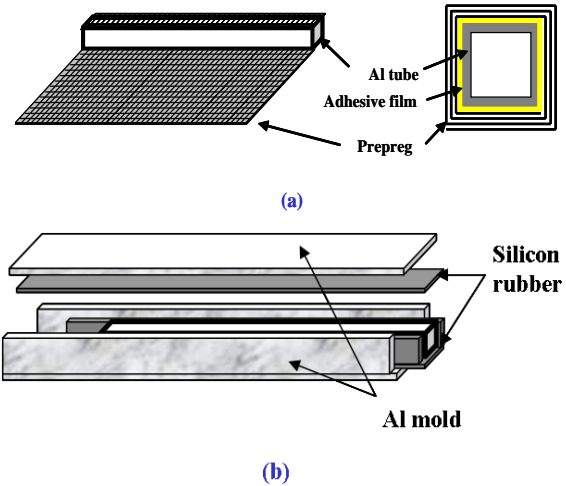


Fig. 3 Manufacturing process for the hybrid tube beams.

Fig. 3은 알루미늄 혼성 사각관 시편의 제작에 사용한 알루미늄합금 재료의 형틀(몰드)과 제작방법을 보여주고 있다. 알루미늄 몰드는 내면 크기가 가로130mm, 세로90mm이고 두께는 20mm 길이는 500mm이며, 4면이 각각 분리된 상태에서 각 면을 볼트로 조이면서 성형물에 면압을 가할 수 있다. 이 조립식 몰드를 이용하여 알루미늄 사각관의 각 측면에 적층된 프리프레그에 균일한 압력을 가하여 성형할 수 있다.

복합재료 적층직전에 알루미늄 사각관의 외측 표면부에 접착필름 Bondex 206((주)한국 화이버)을 한 겹으로 삽입하고 그 위에 프리프레그를 적층하였다. 프리프레그층 위에는 경화시에 발생하는 잉여레진을 흡수하기 위한 흡수 천과, 경화 후 분리를 용이하게 하기 위한 separation layer를 차례로 배치하였다. 이렇게 제조 준비된 시편을 알루미늄 몰드에 집어넣고, 빈 공간에 실리콘 고무를 삽입하여 볼트로 조여 고정했다. 실리콘 고무는 경화 시에 온도에 의한 열팽창을 하게 되며 열팽창을 한 실리콘 고무는 적층된 프리프레그에 압력을 가하는 역할을 하였다. 완성된 알루미늄 진공호스를 부착시키고 진공백으로 감싼 후에 공기를 빼내어 진공상태를 만들고 몰드 전체를 오토클레이브에 넣어 온도만을 상승시켜 복합재료/알루미늄 혼성 사각관 보를 제작하였다.

Fig. 4에 시편 제작에 사용된 경화 사이클을 나타낸다. 제조사에서 추천하는 프리프레그의 경화 사이클은 80℃, 30분이지만, 제작에 사용된 알루미늄 몰드의 두께는 20mm이기 때문에 충분한 열전도를 위하여 80℃에서 60분 동안 경화시켰다.

접착 필름이 혼성 사각관 보의 굽힘 특성에 미치는 효과를 알아보기 위하여 알루미늄-glass fabric/epoxy 시험편에 대해서 접착 필름을 삽입한 경우와 삽입하지 않고 동시 경화시킨 시편을 각각 제작하였다. 또한 적층각도와 적층두께에 따른 혼성 사각관 보의 굽힘 특성을 알아보기 위하여 일방향 유리섬유 에폭시(UD GFRP)

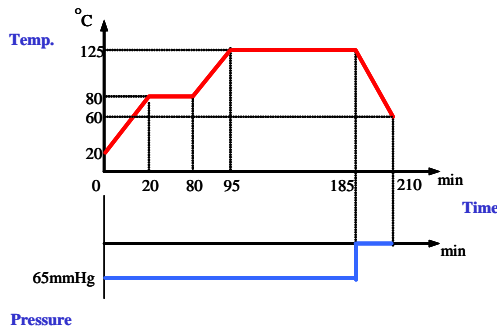


Fig. 4 Curing cycle for manufacturing hybrid tube beams.

Table 1 Designations of various aluminum-glass fabric/epoxy hybrid tube beam specimens (a: outer width, b: outer height, t: thickness).

| Specimen | Cross-sectional dimension $a \times b \times t$ (mm) |
|------------------------------------|---|
| Al - fabric 2 ply (with co-curing) | 20.5 × 20.5 × 1.25 |
| Al - fabric 2 ply (with adhesive) | 20.5 × 20.5 × 1.25 |
| Al - fabric 4 ply (with co-curing) | 21 × 21 × 1.5 |
| Al - fabric 4 ply (with adhesive) | 21 × 21 × 1.5 |

프리프레그를 이용하여 알루미늄 사각관 전체를 보강한 혼성 사각관 보 시험편을 제작하였다. 제작된 알루미늄-glass fabric/epoxy 시험편과 알루미늄-UD GFRP 시험편의 종류를 Table 1과 Table 2에 나타낸다. 완성된 시험편의 종류는, glass fabric/epoxy 2ply, 4ply를 적층시킨 경우에 대해 접착필름을 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우로 나누어 4가지이며, UD GFRP에 대해서는 적층각을 축방향에 대하여 0°, 90°, 0°/90°, 90°/0°, 45°/-45°로 2ply, 4ply로 적층시켜 10가지, 모두 14가지 시험편에 대해 실험을 수행하였다.

2.3 굽힘 시험

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 삼점 하중 형 단순보의 굽힘 시험을 하였다. 삼점 하중 형 단순보의 시험 형태는 하중을 가하는 부위가 굽힘 모멘트에 의해 발생한 소성힌지의 자연스런 진행을 방해하기도 하지만 사점 굽힘 시험법과 비교하여 최대하중 및 붕괴 후 거동에서도 큰 차이를 보이지 않아 굽힘붕괴 효과를 쉽게 관찰할 수 있다.

하중속도는 10mm/min, 하중 축과 지지대 사이의 거리는 200mm로 하였다. 굽힘 실험 중 혼성 사각관의 변형 및 파괴과정을 관찰하기 위하여 시험기 정면에 비디오 광학 현미경을 위치시키고 실시간으로 사진을 찍었다. Fig. 6에 실험 장치의 모식도를 나타낸다.

삼점 굽힘 시험을 통하여 알루미늄 사각관보의 중앙부에서 굽힘 모멘트 형 국부좌굴을 유도하고 하중-변위 곡선을 검토하였다.

Table 2 Designations of various aluminum-UD GFRP hybrid tube beam specimens (a: outer width, b: outer height, t: thickness)

| Specimen | Dimension $a \times b \times t$ (mm) | Specimen | Dimension $a \times b \times t$ (mm) |
|-------------------------|---|------------------------------|---|
| Al - [0°] ₂ | 20.5 × 20.5 × 1.25 | Al - [0°/90°] ₈ | 21 × 21 × 1.5 |
| Al - [0°] ₄ | 21 × 21 × 1.5 | Al - [90°/0°] ₈ | 20.5 × 20.5 × 1.25 |
| Al - [90°] ₂ | 20.5 × 20.5 × 1.25 | Al - [90°/0°] ₈ | 21 × 21 × 1.5 |
| Al - [90°] ₄ | 21 × 21 × 1.5 | Al - [45°/-45°] ₈ | 20.5 × 20.5 × 1.25 |
| Al - [0°/90°] | 20.5 × 20.5 × 1.25 | Al - [45°/-45°] ₈ | 21 × 21 × 1.5 |

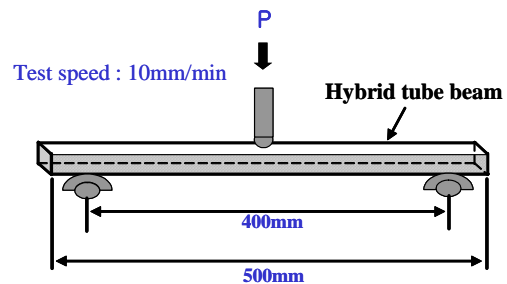


Fig. 5 Schematic diagram of three-point bending test.

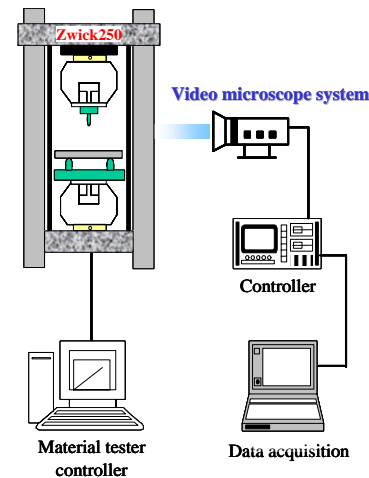


Fig. 6 Experimental set-up for three point bending test.

또한 알루미늄-복합재료 혼성 사각관 보의 굽힘붕괴 시험을 수행하고 굽힘특성 및 에너지 흡수능력을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 알루미늄-glass fabric/epoxy 혼성 사각관 보

혼성 사각관의 제작 시 Bondex 206접착필름을 알루미늄 금속층과 복합재료층 사이에 삽입하여 계면강도를 향상시킴으로써

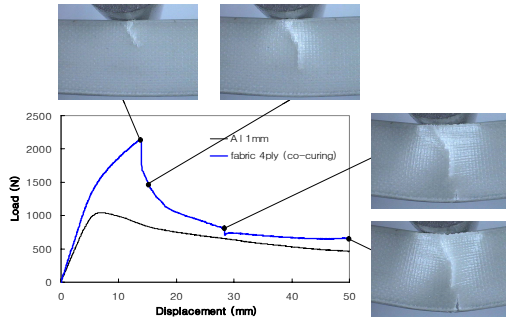


Fig. 7 Experimental load-displacement curve and bending collapse photos of fabric 4ply(with co-curing) hybrid tube beam.

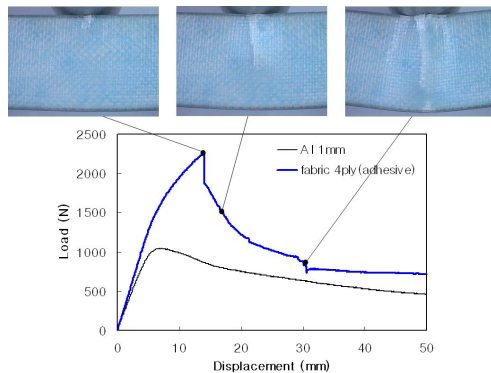


Fig. 8 Experimental load-displacement curve and bending collapse photos of fabric 4ply(with adhesive) hybrid tube beam

혼성 사각관 보의 굽힘붕괴 특성이 어느 정도 개선되는지 검토하였다. 알루미늄-glass fabric/epoxy 혼성 사각관 보의 하중-변위 선도와 각 변위에서의 굽힘붕괴 모습에 대해 접착 필름의 삽입이 없는 경우와 있는 경우를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸다. 각 시편의 굽힘붕괴 모습은 굽힘 실험 시 정면에 배치된 비디오 광학 현미경으로 찍었으며 여기에서는 실험 종료 후, 최대 하중 점, 최대 하중 점 기준으로 추가 변위 3mm 직후 및 추가 변위 15mm 직후에 촬영한 사진을 제시한다.

혼성 사각관 보의 붕괴는 탄성변형을 한 후에 비선형적 소성변형이 나타나고 최대 하중점 직후부터 굽힘붕괴가 시작되어 하중이 급격히 감소(제1차 하중급감점)하는 영역이 나타났다. 혼성 사각관 보 시험편의 위쪽 플랜지의 압축영역에서 복합재료층의 국부적 압쇄 파단 및 알루미늄 층으로부터의 박리가 일어나면서 하중은 최대점에서 급격히 대폭 저하하였다. 이후 알루미늄층의 국부적 좌굴 변형으로 소성현상이 형성되어 위 플랜지부가 오목하게 변형하고 측벽에서는 볼록하게 튀어나오는 변형현상을 일으키면서 복합재료층의 국부적 파단 및 층간박리가 확대 되어 하중감소가 계속 진행되다가, 아래 플랜지부의 복합재료층에서 인장파단이 발생하면서 하중이 다시 급격하게 감소되는 현상이 발생하였던 것이다.

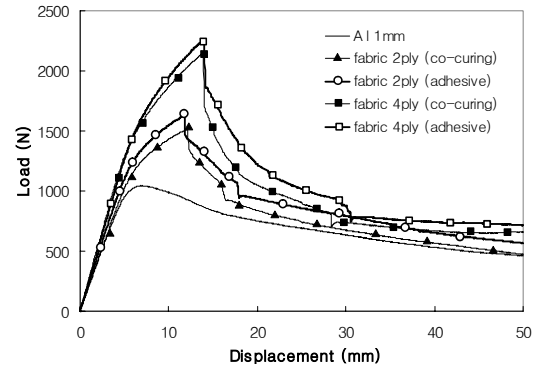


Fig. 9 Experimental load-displacement curves of aluminum-glass fabric/epoxy hybrid tube beams.

접착필름을 삽입한 시편은 삽입하지 않은 시편보다 프리프 레그를 2ply, 4ply로 적층한 모든 경우에서 최대 굽힘하중이 100N이상 증가하였으며, 아래 플랜지부의 복합재료층의 인장 파단으로 인한 하중의 제2차 급감점에 대응하는 변위가 약 2mm가량 더 지연됨을 확인 하였다. 접착필름을 삽입하지 않은 시편의 경우(Fig. 7의 사진 참조), 측벽에서의 복합재료층 박리 현상이 넓은 범위(Fig. 7의 사진에서 측벽 볼록한 부위의 흰색영역)로 전파되어 AL사각관보에 대한 강화효과를 약하게 하였다. 반면에 접착필름을 삽입한 경우 (Fig. 8)에서는 알루미늄 사각관 보의 굽힘좌굴 및 붕괴와 함께 복합재료층에서는 측벽 상부에서 국부적 압쇄파단이 주로 일어나고 층간 박리는 압쇄 파단부 이외에는 별로 관찰되지 않았다.

Fig. 9의 각종 Al-fabric 혼성 사각관의 굽힘하중-변위곡선에서 알 수 있듯이, 혼성 사각관의 경우는 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관과 비교하여 보강효과로 인해 굽힘 강성 및 최대하중이 개선되었다. glass fabric/epoxy 2ply로 적층·보강한 혼성 사각관의 굽힘 강성은 벽두께 1mm인 알루미늄 시험편의 결과보다 크게 증가하지 않았지만 최대하중은 약 1.6배 이상 증가하였으며 4ply로 적층·보강한 혼성 사각관의 최대하중은 2.2배 이상 증가하였다.

Table 3에 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관 시험편과 알루미늄-glass fabric/epoxy 혼성 사각관 시험편의 최대모멘트(최대하중 × 지지점간 거리(0.4m)/4)와 에너지 흡수 능력을 비교하였다. 에너지 흡수 능력은 하중-변위 선도에서 변위 50mm까지의 점유면적값이며 벽두께 1mm의 알루미늄 사각관 보 시험편을 기준으로 하여 백분율로 표시하였다. 최대모멘트 및 에너지 흡수 능력은 접착필름을 삽입하고 glass fabric/epoxy 4ply로 적층·보강한 혼성 사각관 시험편에서 가장 컸으며, 접착필름을 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우를 비교했을 때 접착필름을 삽입한 시편이 최대모멘트와 에너지 흡수능력에서 각각 10%, 15% 정도의 더 큰 증가를 보였다.

Table 3 Bending performance enhancement of aluminum-glass fabric/epoxy hybrid tube beams: Each value in the table is average one

| Specimen type | Maximum moment (N·m) | % | Absorbed energy (J) | % |
|-----------------------------------|-------------------------|-----|------------------------|-----|
| Al 1mm | 104.51 ±1.6 | 100 | 33.76 ±0.5 | 100 |
| Fabric - 2ply (with co-curing) | 151.21 ±2.8 | 145 | 39.15 ±0.5 | 116 |
| Fabric - 2ply (with adhesive) | 162.63 ±0.8 | 156 | 44.04 ±1.2 | 130 |
| Fabric - 4ply (with co-curing) | 214.55 ±10.8 | 205 | 48.07 ±0.8 | 142 |
| Fabric - 4ply (with adhesive) | 225.56 ±9.1 | 216 | 54.31 ±1.5 | 161 |

Table 4 Bending performances per unit weight of the various aluminum-glass fabric/epoxy hybrid tube beams: Each value in the table is average one

| Specimen type | Maximum moment/weight (N·m/Kg) | % | Absorbed energy/weight (J/Kg) | % |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| Al 1mm | 1.02 | 100 | 0.33 | 100 |
| Fabric - 2ply (with co-curing) | 1.25 | 123 | 0.32 | 97 |
| Fabric - 2ply (with adhesive) | 1.34 | 131 | 0.36 | 110 |
| Fabric - 4ply (with co-curing) | 1.54 | 151 | 0.34 | 103 |
| Fabric - 4ply (with adhesive) | 1.61 | 158 | 0.39 | 118 |

Table 4는 Table 3의 각종 혼성 사각관의 굽힘성능을 각 사각관의 무게로 나눈 값을 나타내며 경량화 성능지표로 활용될 수 있다. glass fabric/epoxy 4 ply로 보강한 혼성사각관의 경량화 성능지표가 최대모멘트와 에너지흡수능력 양쪽에서 모두 가장 우수하였음을 알 수 있다.

3.2 알루미늄-UD GFRP 혼성 사각관 보

알루미늄-UD GFRP 혼성 사각관 보에 대해서 복합재료층의 적층각 및 적층두께에 따른 굽힘거동 특성을 검토하였다. Fig. 10에서 Fig. 13까지 각 종류의 알루미늄-UD GFRP 혼성 사각관 보의 굽힘 하중-변위 선도와 굽힘붕괴 모습을 나타낸다. 혼성 사각관 보는 변형 초기에 기본적으로 알루미늄 사각관 보의 굽힘 변형거동을 따르지만 복합재료층의 섬유 방향에 따라 다른 붕괴 메커니즘을 보였다.

Al-[0°]2혼성 사각관 보의 최대하중은 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관 보의 1.8배, Al-[0°]4혼성 사각관 보의 최대하중은 알루미늄 사각관 보의 2.2배로 다른 종류의 시편에 비해 높은 최대하중을 나타내지만 최대 하중점 직후에 급격한 하중 저하를 보였다. 즉, 시편의 축방향과 섬유방향의 같은 Al-[0°]n의 경우 0°방향의 섬유가 혼성 사각관의 굽힘 강성과 최대하중을 현저히 증가시키지만 붕괴 후에 별다른 효과가 없이 저하됨을 알 수 있다. Fig. 10과 같이 위쪽 플랜지 근처의 복합재료층에서 압축형 파괴가 발생함에 따라 하중은 비선형적으로 최대값에 이르게 되고, 이후 섬유방향 균열 및 이에 따른 층간박리현상 그리고 압축형 파괴가 계속하여 진행되면서 하중이 급히 저하하였으며, 아래 플랜지

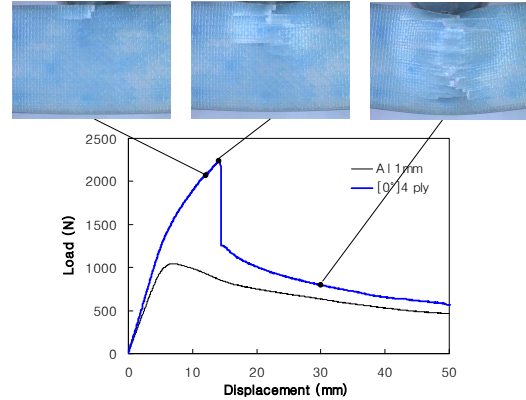


Fig. 10 Experimental load-displacement curve and bending collapse photos of aluminum-UD GFRP [0°]4 hybrid tube beam.

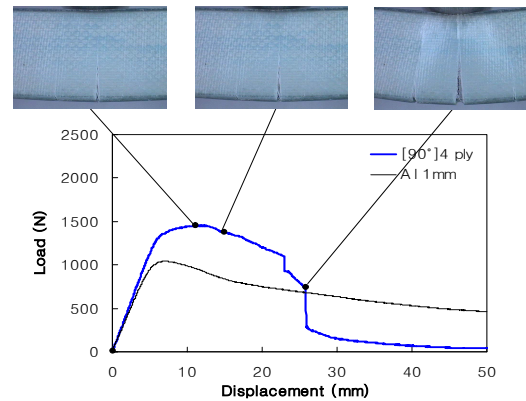


Fig. 11 Experimental load-displacement curve and bending collapse photos of aluminum-UD GFRP [90°]4 hybrid tube beam.

근처의 인장 변형영역에서 0°방향의 섬유가 파단 되지 않고 계속하여 하중을 지지함으로써 하중의 추가적인 급감현상은 나타나지 않았다.

Al-[90°]n의 경우(Fig. 11) 섬유수직방향의 강도와 강성이 섬유방향에 비해 매우 작기 때문에 혼성 사각관 보의 굽힘 강성과 최대하중의 증가에 미치는 영향이 약하지만 최대하중점을 지난 후에 90°방향의 섬유 사이에 있는 수지부가 알루미늄 층의 소성 힌지의 발생과 함께 변형함으로써 최대 하중점 후에 하중 감소가 느리게 진행하였다. 하지만 변형이 어느정도 이상 진행되면서 인장 응력을 받는 아래 플랜지 근처에서 90° 섬유사이에 응력이 집중하여 복합재료층에 인장형 균열이 발생하고 알루미늄 층까지 인장형 균열을 유발시켜 하중이 급격하게 떨어졌다. 이러한 인장균열의 발생 거동은 적층 ply수가 많아질수록 커지며 Al-[90°]2에 비해 Al-[90°]4는 최대 하중은 높게 나타났지만 전체적인 흡수 에너지는 인장형 균열의 전파로 오히려 낮아졌다.

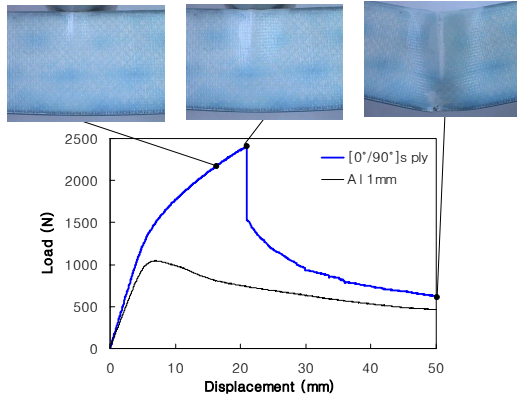


Fig. 12 Experimental load-displacement curve and bending collapse photos of aluminum-UD GFRP [0°/90°]S hybrid tube beam.

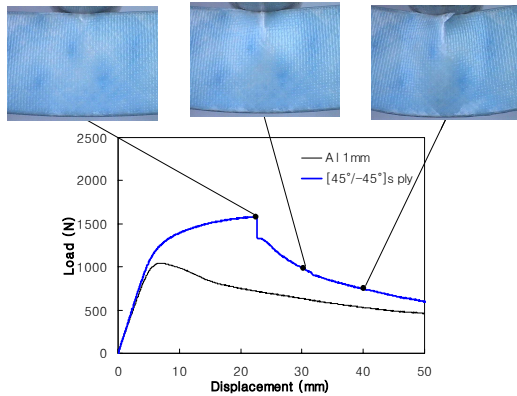


Fig. 13 Experimental load-displacement curve and bending collapse photos of aluminum-UD GFRP [45°/-45°]S hybrid tube beam.

Fig. 12에서 관찰되는 바와 같이 Al-[90°/0°]와 Al-[0°/90°]s는 사각관의 축방향과 같은 0°방향 섬유 하중 지지로 인해 굽힘 강성과 최대 하중이 증가하였으며 또한 90°방향 섬유층에서의 수지의 유연한 변형으로 최대 하중시의 변위도 다른 적층각의 혼성 사각관에 비해 가장 커서 흡수에너지가 매우 우수하였다. 최대하중점 직후의 하중 급저하시에는 위쪽 플랜지부 근처의 측벽에서 0°섬유층의 압쇄형 파괴가 발생하였으며 그 후에는 90°방향의 섬유층이 알루미늄층의 하중변형과 소성 힌지의 발생 및 성장을 억제함으로써 하중이 비교적 완만하게 감소했던 것으로 생각된다. Al-[90°/0°]에 비해 Al-[0°/90°]s는 최대 하중에서 1.5배 이상 증가하였으며 최대하중시의 변위도 약40% 더 컸다. Al-[0°/90°]와 Al-[90°/0°]s의 경우는 Al-[90°/0°], Al-[0°/90°]s와 비슷한 거동을 보였지만 최대 하중값이 약간 낮게 나타났다. 또한 최대하중점 이후에 Al-[90°/0°], Al-[0°/90°]s 시편의 아래 플랜지에서는 0°방향 섬유층의 하중지지 효과로 인장 파단의 모습이 거의 나타나지 않았지만 90°방향의 섬유층이 외벽표면부에 위치한 [90°/0°]s에서는 표층의 인장 파단으로 인한 하중급감점이 뚜렷이

Table 5 Bending performance enhancement of aluminum-UD GFRP hybrid tube beams: Each value in the table is average one

| Specimen type | Maximum moment (N·m) | % | Absorbed energy (J) | % |
|---------------|----------------------|-----|---------------------|-----|
| Al 1mm | 104.51 ±1.6 | 100 | 33.76 ±0.5 | 100 |
| [0°]₂ | 182.77 ±5.5 | 175 | 45.40 ±1.3 | 135 |
| [0°]₄ | 223.04 ±3.4 | 213 | 48.87 ±0.7 | 145 |
| [90°]₂ | 127.37 ±6.7 | 122 | 36.70 ±6.4 | 109 |
| [90°]₄ | 145.42 ±12.8 | 139 | 25.87 ±5.9 | 77 |
| [0°/90°] | 157.08 ±6.6 | 150 | 42.13 ±3.6 | 125 |
| [0°/90°]ₛ | 240.23 ±12.3 | 230 | 59.90 ±4.1 | 178 |
| [90°/0°] | 148.95 ±3.9 | 143 | 40.90 ±0.5 | 121 |
| [90°/0°]ₛ | 220.82 ±4.9 | 211 | 55.08 ±3.4 | 163 |
| [45°/-45°] | 140.50 ±1.8 | 134 | 46.31 ±1.2 | 137 |
| [45°/-45°]ₛ | 157.86 ±6.0 | 151 | 51.93 ±2.9 | 154 |

Table 6 Bending Performance per unit weight of various aluminum-UD GFRP hybrid tube beams: Each value in the table is average one

| Specimen type | Maximum moment/weight (N·m/Kg) | % | Absorbed energy/weight (J/Kg) | % |
|---------------|--------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| Al 1mm | 1.0162 | 100 | 0.3283 | 100 |
| [0°]₂ | 1.4934 | 147 | 0.3710 | 113 |
| [0°]₄ | 1.5662 | 154 | 0.3001 | 105 |
| [90°]₂ | 1.0407 | 102 | 0.1817 | 91 |
| [90°]₄ | 1.0211 | 100 | 0.3451 | 55 |
| [0°/90°] | 1.2867 | 127 | 0.4224 | 105 |
| [0°/90°]ₛ | 1.6942 | 167 | 0.3350 | 129 |
| [90°/0°] | 1.2201 | 120 | 0.3884 | 102 |
| [90°/0°]ₛ | 1.5573 | 153 | 0.3803 | 118 |
| [45°/-45°] | 1.1509 | 113 | 0.3662 | 116 |
| [45°/-45°]ₛ | 1.1133 | 110 | 51.93 | 112 |

나타났다. Al-[90°/0°], Al-[0°/90°]s의 경우는 0°방향의 섬유가 혼성 사각관의 외벽표면부에 위치함으로써 표면에 크게 형성되는 수직응력을 강도가 큰 0°섬유층이 지지하여 혼성 사각관 보의 최대하중을 증가시킨 것으로 생각된다. 즉, 혼성 사각관의 굽힘성능을 향상시키기 위해서는 0°방향 섬유의 적층 수와 함께 적층 순서도 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Al-[45°/-45°]와 Al-[45°/-45°]s에서는 다른 혼성 사각관에 비해 최대하중이 크게 증가하지는 않았지만 최대하중시의 발생하는 변위는 가장 크게 나타났다. 이는 섬유방향이 [45°/-45°]인 복합재료층으로 혼성 사각관을 제작할 경우 굽힘 붕괴를 지연시키고 굽힘흡수에너지를 크게 증가시킬 수 있음을 나타낸다. 최대하중 이후에는 위쪽 플랜지 근처의 압축영역에서 최대하중이후에는 복합재료층의 압쇄파괴가 측벽에서 시편의 횡방향으로 매우 느리게 진행하여 하중이 완만하게 감소했음을 알 수 있다.

Table 5에 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관과 알루미늄-UD GFRP 혼성 사각관 시험편의 최대모멘트와 에너지 흡수 능력을 비교하였다. 에너지 흡수 능력은 하중-변위 선도에서 변위가 50mm까지의 면적으로 측정했다. 최대모멘트와 흡수에너지는 Al-[0°/90°]s의 경우에서 가장 크게 나타났으며 특히 흡수

에너지는 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관과 비교하여 80%가량의 큰 증가를 보였다. $[0^\circ]_4$ 의 최대 굽힘 모멘트는 알루미늄 시험편의 2배 이상 크게 증가하였으나 최대하중점 이후에 급격한 하중 저하로 인해 흡수에너지는 45%의 증가만을 보였다. $Al-[90^\circ]_n$ 의 경우 아래쪽 플랜지 근처의 인장변형부에서의 파단으로 인해 에너지 흡수 능력이 크게 떨어졌다.

Table 6은 Table 5의 혼성 사각관 보에 대해 굽힘성능을 사각관 보의 무게로 나눈 값을 나타내며 $Al-[0^\circ/90^\circ]_s$ 의 경우가 경량화 성능지표인 단위 무게당 최대 모멘트와 에너지 흡수능력이 각각 67%, 29% 만큼 향상되었음을 보여준다.

3.3 실험 결과의 고찰

$Al-[0^\circ/90^\circ]_s$ 의 경우 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관 시험편과 비교하여 흡수 에너지가 1.7배 이상 증가하여 가장 우수한 굽힘 성능을 보였다. 0° 방향 섬유층의 하중 지지로 높은 최대 굽힘 모멘트 값을 나타내고, 최대하중점 이후에는 알루미늄층의 좌굴변형과 소성 한지의 성장을 억제하는 90° 방향 섬유층의 효과로 하중이 완만하게 감소함으로써 굽힘 성능이 크게 향상된 것이다. 최대하중시의 변위는 $Al-[45^\circ/-45^\circ]$, $Al-[45^\circ/-45^\circ]_s$ 의 경우에서 가장 크게 나타났다. 이는 섬유방향이 $Al-[45^\circ/-45^\circ]$ 인 복합재료를 이용하여 혼성 사각관을 제작할 경우 굽힘붕괴가 발생하기까지의 변위(처짐) 값을 크게 하여 붕괴의 지연효과를 크게 할 수 있음을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 동시경화법으로 제작된 알루미늄-복합재료 혼성 사각관에 대한 굽힘시험을 수행하여 혼성 사각관의 굽힘 붕괴 메커니즘을 알아보고 복합재료 층의 적층두께와 적층 각에 따른 굽힘성능 및 에너지 흡수특성을 평가하였다. 또한, 이들 혼성 사각관에 대해 경량화 부재로서의 적용가능성을 검토하였다.

- (1) 혼성 사각관 보의 굽힘 시험결과, 벽두께 1mm인 알루미늄 사각관 보에 비해서 최대모멘트 및 에너지 흡수능력이 크게 향상되었으며, 알루미늄층의 굽힘좌굴 및 소성현상 발생과 결부된 파괴로 인해 안정적인 붕괴가 진행될 수 있었다.
- (2) Al 층과 복합재료층 사이의 계면부에 접착필름을 삽입하지 않은 시편에서는 층간 박리가 쉽게 일어난 것에 비해 접착필름을 삽입한 시편에서는 알루미늄 사각관 보의 굽힘붕괴와 함께 층간 박리가 균열발생부위로 제한적으로 일어나 복합재료층의 파괴가 안정적으로 진행했으며, 접착필름을 삽입하고 glass fabric/epoxy 4ply로 적층·보강한 혼성 사각관의 에너지 흡수 능력은 삽입하지 않은 경우와 비교하여 13%가량 향상되었다.

- (3) 알루미늄- $[0^\circ/90^\circ]_s$ 혼성 사각관은 0° 방향 섬유층의 하중 지지로 최대 굽힘모멘트 값을 나타냈고, 벽두께 1mm인 알루미늄 시험편과 비교하여 흡수 에너지가 1.7배 이상 증가함으로써 가장 우수한 굽힘 특성을 보였다.
- (4) 알루미늄- $[90^\circ]_n$ 혼성 사각관은 아래쪽 플랜지 근처의 인장변형영역에서 섬유 사이의 응력집중으로 알루미늄 층과 함께 파단이 일어나 하중이 급격히 저하되어 에너지 흡수 보강재로서 부적절했다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2005-000-10566-0)에 의해 수행되었으며 이에 감사합니다.

참고문헌

- 1) P. H. Thornton and P. J. Edwards, "Energy Absorption in Composite Tubes," *J. Composite Materials*, Vol. 16, 1982, pp. 521-545.
- 2) A. G. Mamalis and D. E. Manolacos, "Analytical Modeling of the Static and Dynamic Axial Collapse of Thin-walled Fiberglass Composite Conical Shells," *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 19, 1997, pp. 477-492.
- 3) A. G. Mamalis and D. E. Manolacos, "The Deformation Mechanism of Thin-walled Non-circular Composite Tubes Subjected to Bending," *Composite Structures*, Vol. 30, 1995, pp. 131-146.
- 4) 강수춘, 전완주, "섬유강화 복합재료 Box Tube의 동적 충격 에너지 흡수 거동," 한국자동차공학회 논문집, 제1권, 제3호, 1993, pp. 118-126.
- 5) 김범진, 허승진, 구정서, 송달호, "알루미늄 압출재의 압괴 및 굽힘붕괴특성규명을 위한 시험 및 해석," 한국철도학회 논문집 제4권 제3호, 2001, pp. 110-115.
- 6) J. E. Miller, S. Kyriakides and A. H. Bastard, "On Bend-stretch Forming of Aluminum Extruded Tubes - I: Experiments," *Int. J. Mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 1283-1317.
- 7) J. E. Miller, S. Kyriakides and A. H. Bastard, "On Bend-stretch Forming of Aluminum Extruded Tubes - II: Analysis," *Int. J. Mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 1319-1338.
- 8) 김범진, 허승진, "철도차량 충돌 해석을 위한 축소모델링 기법 연구," 한국철도학회 논문집, 제5권, 제3호, 2002, pp. 231-236.

- 9) T. C. Triantafillou, P. Kim and U. Meier, "Optimization of Hybrid Aluminum/CFRP Box Beams," *Int. J. Mechanical Science*, Vol. 33, 1991, pp. 729-739.
- 10) J. C. Brouhgton, A. Beevers and A. R. Hutchinson, "Carbon-fibre-reinforced Plastic(CFRP) Strengthening of Aluminum Extrusions," *Int. J. Adhesion and Adhesive*, Vol. 17, No. 3, 1997, pp. 269-278.
- 11) 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, 2002, pp. 279-287.
- 12) 송민철, 이정주, "알루미늄/GFRP 혼성튜브의 굽힘붕괴 특성," 한국복합재료학회 추계 학술발표대회 논문집, 2000, pp. 84-87.
- 13) 이성혁, 최낙삼, "보강 알루미늄 사각관 보의 굽힘 성능평가," 한국자동차공학회 논문집, 제13권, 제5호, 2005, pp. 171-180.
- 14) 김영석, "알루미늄 판재의 성형기술의 현황과 과제", 대한 기계학회논문집, 제32권, 제7호, 1992, pp. 621-625
- 15) D. C. Drucker and R. I. Providence, "The Effect of Shear on the Plastic Bending of Beams," *J. Applied Mechanics*, Vol. 23, 1956, pp. 509-514.
- 16) Meadows, D. J., "Aluminum Crash Members in Axial and Bending Collapse", *SAE paper* 922113.
- 17) 전기자동차 차량 및 시스템 기술개발에 관한 연구, 고등 기술연구원, 2000.