

## 보강 알루미늄 사각관 보의 굽힘 성능평가

이 성 혁<sup>1)</sup> · 최 낙 삼<sup>\*2)</sup>

건국대학교 인공근육연구센터<sup>1)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

### Bending Performance Evaluation of Reinforced Aluminum Square Tube Beams

Sung-Hyuk Lee<sup>1)</sup> · Nak-Sam Choi<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Artificial Muscle Research Center, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 6 May 2005 / Accepted 13 July 2005)

**Abstract** : Bending performances of aluminum square tube beams reinforced by aluminum plates under three point bending loads have been evaluated using experimental tests combined with theoretical and finite element analyses. A finite element simulation for the three-point bending test was performed. Basic properties of aluminum materials used for initial input data of the finite element simulation were obtained from the true stress-true strain curves of specimens which had been extracted from the Al tube beams. True stresses were determined from applied loads and cross-sectional area records of a tensile specimen with a rectangular cross-section by real-time photographing, and true strains were obtained from in-situ local elongation measurements of the specimen gage portion by the multi-point scanning laser extensometer. Six kinds of aluminum tube beam specimens adhered by aluminum plates were employed for the bending test. The bending deformation behaviors up to the maximum load described by the numerical simulation were in good agreement with experimental ones. After passing the maximum load, reinforcing plate was debonded from the aluminum tube beam. An aluminum tube beam strengthened by aluminum plate on the upper web showed an excellent bending capability.

**Key words** : Bending collapse(굽힘붕괴), Reinforced aluminum square tube beam(강화 알루미늄 사각관), Local buckling(국부적 좌굴), Numerical analysis(수치해석)

#### 1. 서 론

경량화 구조물을 위한 사각 단면관은 원형 단면관에 비해 에너지 흡수능력이 우수하고 여러 가지 형상비와 후폭비로서 제작할 수 있으며 자동차, 항공기 및 선박 등의 산업전반에 걸쳐 구조용 경량화 부재와 충돌에너지 흡수용 부재로서 사용되고 있다. 특히, 이러한 사각관이 자동차의 구조부재로 사

용될 경우 사각관의 축방향 압축, 굽힘 및 비틀림 하중에 따른 좌굴변형거동과 에너지 흡수특성의 변화는 안전성 측면에서 가장 기초적이고 중요한 연구 분야이다.

자동차 충돌이나 전복사고에 있어서 부재들의 변형은 축방향 압축붕괴와 함께 굽힘붕괴가 혼합된 변형양상을 보여주고 있으며, 자동차에 사용되는 대부분의 박벽관 부재는 굽힘붕괴가 주된 붕괴형태로 나타나고 있다. 박벽 사각관의 굽힘붕괴에 대한

\*To whom correspondence should be addressed.  
nschoi@hanyang.ac.kr

연구는 Kecman<sup>1)</sup>에 의하여 처음으로 이루어졌다. Kecman은 박판 사각관의 굽힘붕괴시 기하학적 기구를 제시하고 굽힘변형이 항복선에 집중된다는 가정하에서 부재의 굽힘변형에너지를로부터 굽힘붕괴시 모멘트-회전각의 관계식을 이론적으로 구하였다. Kyriakides와 Shaw<sup>2)</sup>는 4점 굽힘 시험법을 응용한 대변형 시험기를 개발하였으며, Wierzbicki<sup>3)</sup>등은 소성힌지를 수치적으로 모델링하고 모멘트-회전각 선도를 계산하기 위하여 굽힘 모멘트가 작용하는 박벽 사각부재의 압축면에 super-folding의 개념을 적용시켰다. 또한, 강신유<sup>4)</sup>등은 순수굽힘 시험기를 개발하고 이를 수치해석 결과 및 기존의 이론해석 결과와 비교하였으며 Kim<sup>5)</sup>등은 Kecman의 이론과 Wierzbicki의 이론을 수정하여 새로운 굽힘붕괴 기구를 제안하였다. 또한 김병진<sup>6)</sup>등은 차체 경량화 설계기술과 관련하여 알루미늄 사각관의 압피 및 굽힘붕괴 특성을 규명하려는 해석 및 시험연구를 수행하였다. 그러나 알루미늄 박벽 사각관에 대한 대부분의 연구에서는 굽힘 붕괴시의 에너지 흡수능력을 향상시킬 수 있는 설계방법이나 제작방법의 일반화된 검토가 미흡한 실정이다. 따라서 정확하고 효율적인 알루미늄 초경량 차체를 설계하기 위해서는 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴 특성에 대한 면밀한 고찰과 성능 향상을 위한 해석 및 설계방법의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 알루미늄판으로 보강한 알루미늄 사각관 보를 제작하고 이에 대한 굽힘붕괴 시험을 한다. 시험을 통하여 보강 사각관 보의 굽힘붕괴시 발생하는 국부적 좌굴거동을 검토하고 하중( $P$ )-변위( $\delta$ ) 곡선과 최대굽힘하중의 결과를 유한요소 수치해석 결과와 비교한다. 국부좌굴거동과 보강효과를 정확히 해석하기 위해 진응력-진변형률 거동을 실험을 통해 구한다. 또한 보강관의 위치 및 보강 범위에 따른 굽힘강성과 최대굽힘하중을 유한요소 수치해석과 이론해석을 통하여 평가한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

본 연구에서 사용한 알루미늄 사각관 보 시험편은 6063T5 압출재로 단면은 20mm×20mm이며 벽두

께는 1mm, 시험편 길이는 500mm 이었다. 보강재는 알루미늄 사각관 보와 동일한 재료를 사용하기 위하여 알루미늄 사각관 보를 다이아몬드 휠 절단기로 절단하여 만들었다. Struers사의 에폭시 주재와 경화제를 혼합하여 에폭시수지 접착제를 만들고 이를 진공상태에서 약 30분간 탈포한 후 보강재와 사각관보의 접착에 사용하였다. 또한 접착강도를 증가시키기 위하여 보강재와 알루미늄 사각관 보의 접착면을 사포(#1000)로 연마하여 접착표면을 다소 거칠게 만들었으며, 접착한 후 상온에서 24시간 경화시켰다. Fig. 1은 사각관의 굽힘시험 개략도를 나타내며, 압축하중을 받게 되는 보의 윗면에 길이 450mm인 보강재를 접착시킨 예를 보여주고 있다. Fig. 2는 시험에 사용된 6가지 종류의 보강 시험편에 대해 각각의 보강된 단면형상을 나타내고 있다.

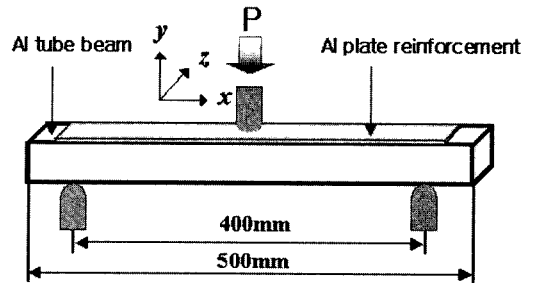


Fig. 1 An example of reinforced Al tube beam specimen

### 2.2 진응력-진변형률 측정

알루미늄 사각관 보의 굽힘붕괴 해석의 신뢰성을 증가시키기 위해서는 인장시험을 통해 재료의 변형 및 파괴거동을 연속적으로 계측하여 정확한 진응력-진변형률 관계를 구해야 할 것이다. 그러나 국부적으로 발생하는 네킹변형 이후의 실제 하중이 작용하는 단면의 크기를 측정하기가 어렵기 때문에 정확한 진응력-진변형률 관계를 아는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 보다 정확한 진응력-진변형률 관계를 얻기 위하여 본 실험에서 사용하는 알루미늄 사각관 보에서 인장시험편을 절취하여 인장시험을 수행하였다. Fig. 3과 같이 레이저 다점간 변위 측정기와 비디오 광학현미경을 이용한 실험장치를 구성하여 인장시험 시에 네킹이 발생하는 국소단면의 변형률과 응력을 측정하였다. Fig. 4는 인장시험이 끝

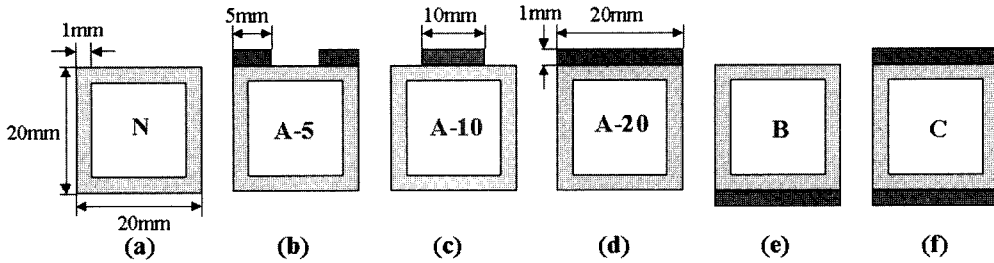


Fig. 2 Cross-sections of various aluminum tube beam specimens: (a) unreinforced tube beam, (b) sided upper half-flange reinforcement, (c) centered upper half-flange reinforcement, (d) upper full flange reinforcement, (e) lower full flange reinforcement and (f) upper and lower full flange reinforcement

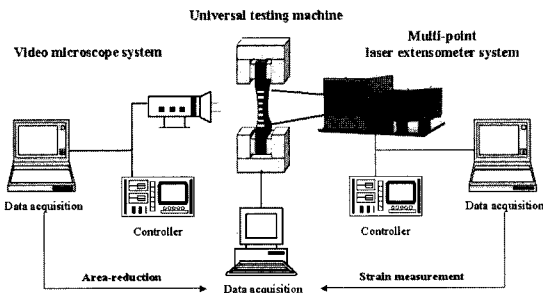


Fig. 3 Experimental set-up for tensile specimens

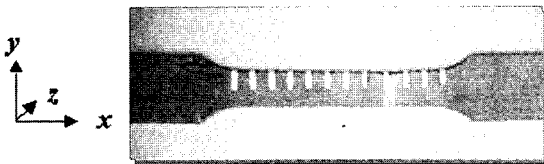
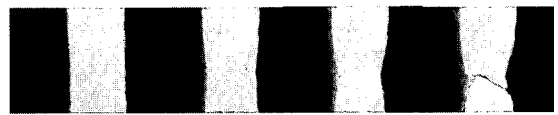


Fig. 4 Tensile specimen adhered with parallel line patches for local strain measurement by multi-point laser extensometer



$\left\{ \begin{array}{l} \delta = 0.00 \text{ mm} \\ t = 0.99 \text{ mm} \end{array} \right\}$   $\left\{ \begin{array}{l} \delta = 1.78 \\ t = 0.81 \end{array} \right\}$   $\left\{ \begin{array}{l} \delta = 3.46 \\ t = 0.66 \end{array} \right\}$   $\left\{ \begin{array}{l} \delta = 3.69 \\ t = 0.61 \end{array} \right\}$

Fig. 5 Necking deformation and thickness(t) change of a tensile specimen observed by an in-situ optical microscope system

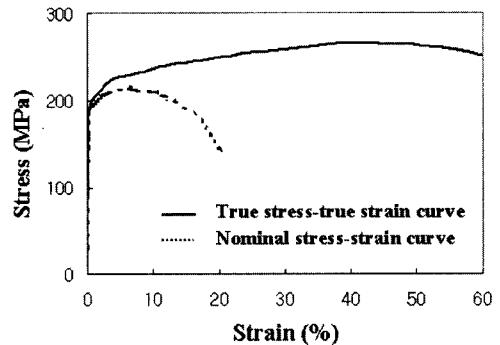


Fig. 6 Stress-strain curves of aluminum 6063T5

Table 1 Mechanical properties of Al 6063T5 obtained from true stress-strain relationship

E-modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
62.9	193.2	255.2	59.8

형률 관계는 알루미늄 사각관 보의 굽힘변형에 대한 수치해석 시 기초입력데이터로 사용하였다.

### 2.3 굽힘붕괴 시험

굽힘붕괴 시험법에는 여러 가지 종류가 있으나 본 연구에서는 3점 하중형 단순보를 이용한 시험방

난 후의 시험편의 모습으로 국부적 변형률을 측정하기 위해 일정한 간격(2.5mm)으로 집착시킨 반사마크와 네킹에 의한 시험편 파단부를 보여주고 있다. Fig. 5는 변위부하( $\delta$ )가 증가하면서 국부적으로 네킹이 발생하는 단면의 두께변화를 보여주고 있다. 네킹이 발생하면서 하중이 작용하는 실제 단면의 크기가 크게 감소함을 알 수 있다. 위와 같은 단면적 감소 효과를 고려한 진응력-변형률 곡선과 공칭 응력-변형률 곡선을 비교하여 Fig. 6에 도시하였으며 Table 1에 진응력-진변형률 관계를 통해 구한 Al 6063T5의 물성치를 나타내었다. 여기서 항복강도는 0.2% 프루프 응력(proof stress)로 구하였고 신장율은 파괴시의 신장율을 의미한다. 진응력-진변

법으로 굽힘붕괴 시험을 하였다. 3점 하중형 단순보의 시험 형태는 하중을 가하는 부위가 굽힘 모멘트에 의해 발생 한 소성힌지의 자연스런 진행을 방해한다. 그러나 하중이 최대 하중점에 도달하기 전까지는 결과가 크게 영향을 주지 않고 사각관보의 단면형상의 변화에 따른 굽힘붕괴 효과를 쉽게 알아볼 수 있기 때문에 최대하중에 도달하기까지 굽힘강성과 최대굽힘하중을 평가하기에는 적합하다고 볼 수 있다. 굽힘붕괴 시험은 Zwick사의 만능재료 시험기를 이용하였으며, 하중축과 지지대 사이의 거리는 200mm, 하중속도는 5mm/min으로 하였다.

### 3. 보강 사각관 보의 수치해석

#### 3.1 유한요소 수치해석

보강관을 부착시킨 알루미늄 사각관 보의 굽힘붕괴시험 모델에 대해 ABAQUS 6.4를 이용하여 유한요소 수치계산(FEM)을 수행하였다. 수치모델은 3점 굽힘실험장치와 동일하게 알루미늄 사각관 보 및 보강관과 하중핀을 모두 수치화하여 구성하였으며, 또한 보강관을 부착하지 않은 사각관 보에 대해서도 수치해석을 하였다. 알루미늄 재료(6063T5)의 물성치는 인장시험으로 구한 진응력-진변형률 곡선(Fig. 6 참조)을 입력하였다. 사각관 시험편 모델은 응력집중이 예상되는 중심부위는 요소크기 2mm, 여타 부위는 요소크기 4mm의 4절점 쉘요소를 사용하였고, 보강관은 8절점 solid 요소를 사용하였다. 하중핀과 지지대는 강요소(rigid element)로 가정하였고 실제 굽힘실험과 가능한 유사하도록 각 부위의 형상을 모사하였다. 하중핀과 시험편이 접촉하는 부위는 ABAQUS에서 제공되는 면접촉조건을 사용하였으며, 보강관과 사각관 보는 완전하게 접촉되어 있다고 가정하여 해석하였다.

#### 3.2 보강효과에의 단순이론해석

굽힘하중을 받는 보강 사각관 보의 항복하중 및 최대하중을 단순화된 식으로 표현하기 위하여 굽힘공식을 적용하였다. 탄성-완전소성 재료의 항복하중( $F_y$ )은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$F_y = \frac{4}{L} \cdot \frac{\sigma_y I}{y} \quad (1)$$

여기서  $L$ 은 시험편 지지대간의 거리,  $I$ 는 시험편 단면의 관성모멘트,  $\sigma_y$ 는 알루미늄의 항복강도 그리고  $y$ 는 시험편 단면의 탄성중립축에서 가장 먼 지점까지의 거리이다. 또한 최대하중( $F_u$ )은 시험편 단면이 모두 소성영역으로 되었다고 가정하면 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$F_u = \frac{4}{L} \cdot \frac{\sigma_y A}{2} (d_c + d_t) \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 시험편의 단면적이고  $d_c$ 와  $d_t$ 는 각각 단면의 소성중립축에서 압축영역과 인장영역의 중심까지의 거리이다. 그러나 위의 단순이론해석을 이용한 굽힘공식은 시험편 재료의 탄성-완전소성의 응력-변형률 관계를 전제로 하며, 최대하중  $F_u$ 는 시험편의 단면 전체가 완전소성에 도달할 때의 하중이라고 가정하기 때문에 실제의 결과를 정확하게 예측하기 힘들다.

#### 3.3 소성중립축 이동의 이론해석

알루미늄 사각관 단면의 소성중립축 위치는 단면에 작용하는 탄-소성 응력분포와 단면형상에 따라 결정된다. 따라서 보강재 부착에 따른 보강효과로 최대하중시의 소성중립축 및 사각관 단면의 소성영역이 변화할 것이다. 본 연구에서는 보강사각관에 최대하중이 작용할 때 단면의 소성중립축의 위치와 소성영역을 구하기 위하여 실험에서 구한 최대하중값( $F_{max}$ )을 다음과 같이 해석하였다. 이를 위해 Fig. 6의 알루미늄 재료의 진응력-진변형률 관계를 부분 선형화하여 Fig. 7과 같이 이용하였다. 즉, 부분 선형화된 진응력-진변형률 곡선은

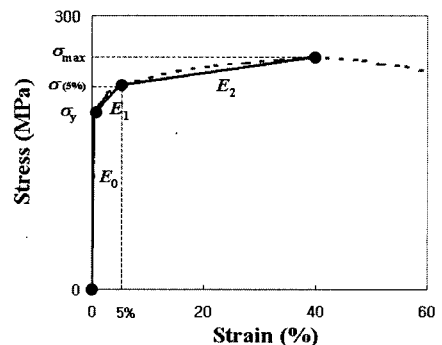


Fig. 7 Partial linearization of true stress-true strain curve of Fig. 6

$$\begin{aligned}
 0 < \varepsilon < \varepsilon_y & \quad \sigma = E_0 \varepsilon \\
 \varepsilon_y < \varepsilon < 0.05 & \quad \sigma = E_1 \varepsilon + a_1 \\
 0.05 < \varepsilon < \varepsilon(\sigma_{\max}) & \quad \sigma = E_2 \varepsilon + a_2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

이다. 여기서  $\varepsilon_y$ 는 항복응력에서의 변형률(0.31%),  $\varepsilon(\sigma_{\max})$ 는 최대응력에 대응하는 변형률,  $E_0(62.9\text{GPa})$ ,  $E_1(665.2\text{MPa})$ 과  $E_2(88.5\text{MPa})$ 는 각 구간에서의 탄성 계수이며,  $a_i$ 는 각 식의 응력축( $\sigma$ ) 절편이다. 이 선형화된 응력-변형률 관계를 적용하여 알루미늄 사각 관 보의 굽힘응력 분포를 중립축에서의 거리  $y$ 에 따라 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 0 < \varepsilon < \varepsilon_y & \quad \sigma(y) = E \frac{\varepsilon_y}{d} y \\
 \varepsilon_y < \varepsilon < 0.05 & \quad \sigma(y) = E_1 \frac{\varepsilon_y}{d} y + b_1 \\
 0.05 < \varepsilon < \varepsilon(\sigma_{\max}) & \quad \sigma(y) = E_2 \frac{\varepsilon_y}{d} y + b_2
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

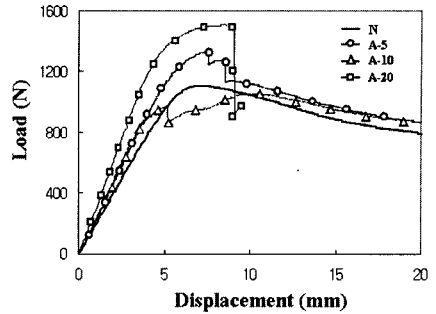
여기서  $d$ 는  $\varepsilon_y$ 에 대응하는 시험편 단면의 중립축에서 소성영역까지의 거리이고  $b_i$ 는 각 식의 응력축( $\sigma$ ) 절편이다. 또한 식 (4)의 관계를 다음 식에 적용하여 최대하중시의 사각관 단면의 소성중립축과 소성영역을 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 \int_A \sigma(y) dA &= 0 \\
 \int_A y \sigma(y) dA &= \frac{F_{\max} L}{4}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

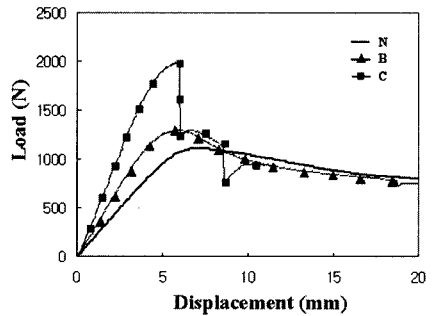
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 굽힘시험 결과

Fig. 8은 보강하지 않은 시험편과 보강판을 접착시킨 6가지 종류의 시험편에 대한 정적 굽힘시험 결과이다. 알루미늄판을 부착한 모든 보강 시험편의 경우, 알루미늄 보강판의 보강효과로 인해 보강하지 않은 N형 시험편과 비교하여 굽힘강성이 커졌다. 최대하중 또한 A-10형 시험편을 제외한 모든 시험편에서 크게 나왔다. A-10형 시험편에서 굽힘강성은 크게 나왔으나 최대하중값이 오히려 작게 나온 것은 알루미늄 사각관 보의 국부좌굴붕괴가 일어나는 시험편 폭의 중앙부에 보강판을 부착하였기 때문에 이 보강판 부위에 하중이 집중하게 되므로 오히려 국부 좌굴 거동을 보다 일찍 가속화하여 최대하중의 저



(a)



(b)

Fig. 8 Experimental load-displacement curves of unreinforced and reinforced Al tube beams: (a) type A and (b) type B and C

하를 초래한 것으로 생각된다.

Fig. 8의 하중-변위 결과에서 사각관 윗면을 보강한 A형 시험편 모두 최대하중이 발생하는 변위가 보강하지 않은 시험편보다 커졌음을 알 수 있으며 특히 윗면 전체를 보강한 A-20형 시험편에서 그 변위가 가장 커졌다. 반면에 사각관 아랫면을 보강한 B형과 위아래면을 보강한 C형 시험편에서는 오히려 보강하지 않은 시험편보다 최대하중이 발생하는 변위가 작아졌다. 따라서 사각관 윗면만을 보강할 경우(예, A-20형) 굽힘붕괴가 발생하는 처짐값을 보다 크게 하여 붕괴를 지연시키는 효과를 얻을 수 있는 것으로 사료된다. 최대하중점을 지난 직후부터 사각관보의 붕괴거동이 진행되는데, 보강판이 없는 N형과 사각관 아랫면에 보강판을 부착시킨 B형 시험편을 제외한 모든 시험편에서 알루미늄 사각관 보와 알루미늄 보강판의 접착부분이 최대하중점 근처에서 파괴(fracture) 및 박리(delamination)되어 하중이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 접합부의

강도가 상대적으로 약하고 취성적인 균열진전이 접착층에서 발생했기 때문으로 생각된다.

보강판의 분리 없이 붕괴가 진행되는 B형 시험편과 보강하지 않은 N형 시험편의 붕괴된 모습을 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. 아래 면을 보강한 B형 시험편의 붕괴모습은 보강하지 않은 시험편과 비교하여 사각관 윗면의 붕괴가 보다 좁은 영역에서 집중적으로 깊게 이루어졌으며 압축응력을 받아 불룩하게 튀어나온 국부좌굴 거동을 보이는 사각관 측벽의 변형 영역은 아래면 근처까지 넓게 이루어졌음을 알 수 있다. 이는 사각관 아래면에 보강판을 보강함으로써 소성중립축이 N형 시험편과 비교하여 아래쪽으로 이동하여 발생한 결과로 생각된다.

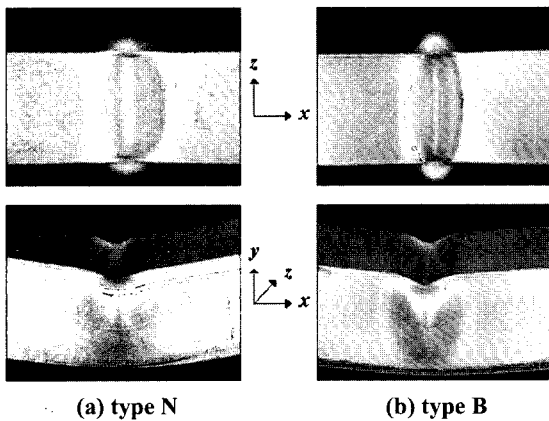


Fig. 9 Bending collapsed tube beams experimentally obtained at a displacement of 20 mm

Table 2는 보강효과로 인한 각 시험편들의 굽힘특성 향상의 정도를 보강하지 않은 N형 시험편을 기준으로 하여 백분율로 표시하였다. 시험편 위아래 모두 보강시킨 C형 시험편의 굽힘강성과 최대하중값이 각각 127%와 87% 증가하여 가장 커졌으며 시험편 윗면 전체를 보강한 A-20형 시험편에서도 굽힘강성과 최대하중값이 상당히 커졌음을 알 수 있다. 시험편 아래면을 보강시킨 B형 시험편의 경우, 같은 크기의 보강판을 접착시킨 A-20형 시험편에 비해 굽힘강성과 최대하중의 증가폭이 상대적으로 적어 약 2/3 수준이었다.

Fig. 10은 질량 증가에 따른 알루미늄 보강판의 보강효과를 알아보기 위하여 보강하지 않은 N형 시

Table 2 Experimental enhanced performance for reinforced tube beams

Tube beam type	Flexural stiffness (%)	Yield load (%)	Ultimate load (%)
A-5	16.5	13.7	27.0
A-10	23.6	-14.4	-5.7
A-20	47.4	31.1	42.0
B	34.3	22.2	25.2
C	127.5	87.6	92.4

험편의 무게를 기준으로 한 굽힘강성과 최대굽힘하중의 크기를 나타내고 있다. C형의 경우가 동일 무게 대비 굽힘강성과 최대하중의 증가효과가 가장 큼을 나타내고 있으며 A-20형 시험편도 굽힘강성과 최대하중에서 좋은 효과를 보여주고 있다. 그러나 A-10형과 B형의 경우 굽힘강성은 증가하였으나 최대하중은 오히려 낮아져 보강효과가 없는 것으로 나타났다. 따라서 알루미늄 사각관 보의 윗면 전체를 보강한 A-20형과 위아래면 모두를 보강한 C형 시험편이 알루미늄 사각관 보의 굽힘특성을 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

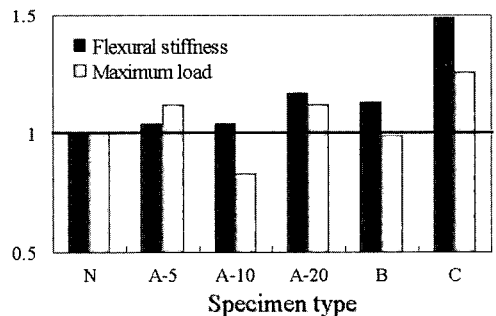


Fig. 10 Flexural stiffness and maximum load of various reinforced Al tube beam specimens normalized by unreinforced specimen (type N) weight

#### 4.2 국부좌굴거동의 수치해석 결과

Fig. 11은 수치해석 결과 굽힘 변형된 시험편형상의 예로 보강하지 않은 N형 시험편과 사각관 아래면을 보강한 B형 시험편의 경우이다. 두 종류 시험편 모두 Fig. 9의 실험 결과와 매우 유사한 변형 형상을 보여주고 있으며 아래 면을 보강한 B형 시험편의 붕괴모습은 보강하지 않은 시험편과 비교하여 붕괴가 좁은 영역에 집중적으로 깊게 이루어졌음을

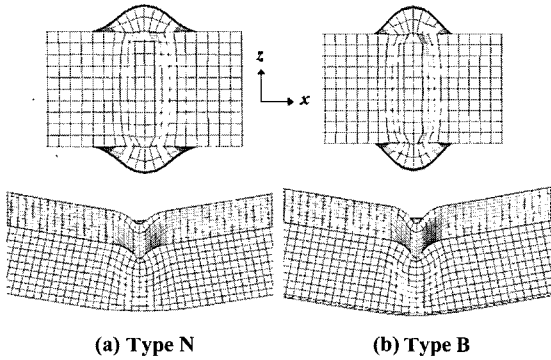


Fig. 11 Local buckling deformations of tube beams numerically obtained at a displacement of 20 mm

알 수 있다. 즉, 수치해석 모델은 실제 시험편의 좌굴변형의 형상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 보강하지 않은 N형 시험편과 윗면 전체를 보강한 A-20형 시험편, 아랫면 전체를 보강한 B형 시험편의 사각관 측벽에 작용하는 축방향 응력분포를 보여주고 있다. 실험에서는 윗면 전체를 보강한 시험편의 경우 최대하중 시점에서 보강판과 사각관의 박리(delamination)가 발생하였지만, 수치해석상에서는 보강판과 사각관이 완전 접합되어 있다고 가정하여 굽힘붕괴 현상을 유도하였다. 수치해석 결과는 시험편의 대칭성을 고려하여 1/4 모델을 해석한 것으로 어두운 부분은 압축응력이, 밝은 부분은 인장응력이 작용하고 있는 영역을 나타내고 있다. Fig. 12(a)의 보강하지 않은 N형 시험편과 비교하여 윗면을 보강한 Fig. 12(b)의 경우, 압축영역이 줄어들고 인장영역이 늘어나 소성 중립축이 위쪽으로 이동한 것을 알 수 있다. 따라서 윗면의 보강효과로 보강하지 않은 경우와 비교하여 상대적으로 압축영역이 작아져 굽힘변형의 발생이 어려우며 아래면에서는 큰 인장응력이 작용하여 사각관은 아래면의 인장력에 의한 변형 및 파괴가 일어날 것으로 예상된다. 아랫면을 보강한 Fig. 12(c)의 경우, 압축영역이 증가하여 윗면의 붕괴가 보다 쉽게 발생하며 소성 중립축은 아래쪽으로 크게 이동했음을 알 수 있다. 또한 보강하지 않은 사각관과 비교하여 사각관 윗면에 작용하는 압축응력이 상대적으로 커져 보강판과 사각관이 분리되지 않고 굽힘붕괴가 계속 진행된다면 아래면의 인장파괴보다는 압축력에 의

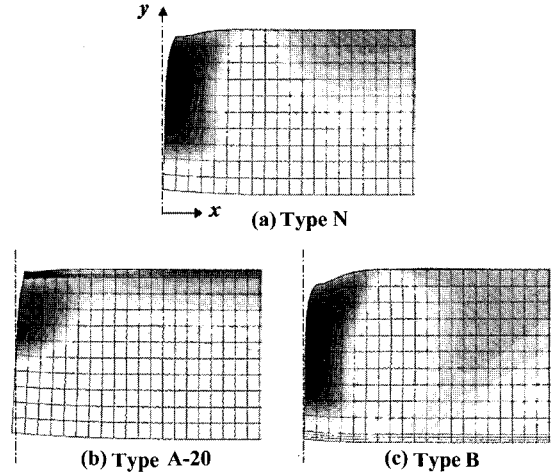


Fig. 12 Longitudinal stress ( $\sigma_x$ ) distribution in the webs of tube beams

한 윗면의 파괴가 쉽게 일어날 것으로 생각된다.

### 4.3 굽힘성능에 대한 보강형상의 효과

Fig. 13은 6종류의 알루미늄 사각관 시험편의 하중-변위 곡선을 실험과 수치해석 결과를 통하여 비교한 것이다. 이들 수치해석 결과에 따르는 하중-변위 선도의 변화거동은 초기 부하부터 최대 하중점까지의 영역에서 실험 결과와 상당히 유사한 거동을 보여주고 있다. 보강형 시험편 중에서 B형 시험편을 제외하고 실험으로 구한 하중-변위 곡선에는 최대하중점 근처 혹은 직후에 급격한 하중감소가 순간적으로 나타났는데 이는 보강판과 사각관의 접착층에 급격한 균열진전이 발생하여 보강효과가 부분적으로 상실되었기 때문이다. 만일 접착층의 균열발생 없이 보강효과가 계속 유지된다면 하중-변위 곡선은 Fig. 13의 FEM의 결과 곡선을 따를 것으로 예상된다.

Table 3은 실험과 수치해석 및 식 (1)과 (2)를 이용한 단순이론해석 결과를 굽힘강성과 하중 측면에서 정량적으로 비교한 것이다. 수치해석상의 오차뿐만 아니라 실제 사각관과 보강판의 형태, 실험 및 접착 조건 등이 수치해석 모델링 과정의 조건과 다소 다를 수 있기 때문에 실험과 수치해석에서 약간의 차이가 발생할 수 있으나, 사각관 윗면의 중앙 부분을 보강한 A-10형 시험편을 제외한 모든 보강시험편에

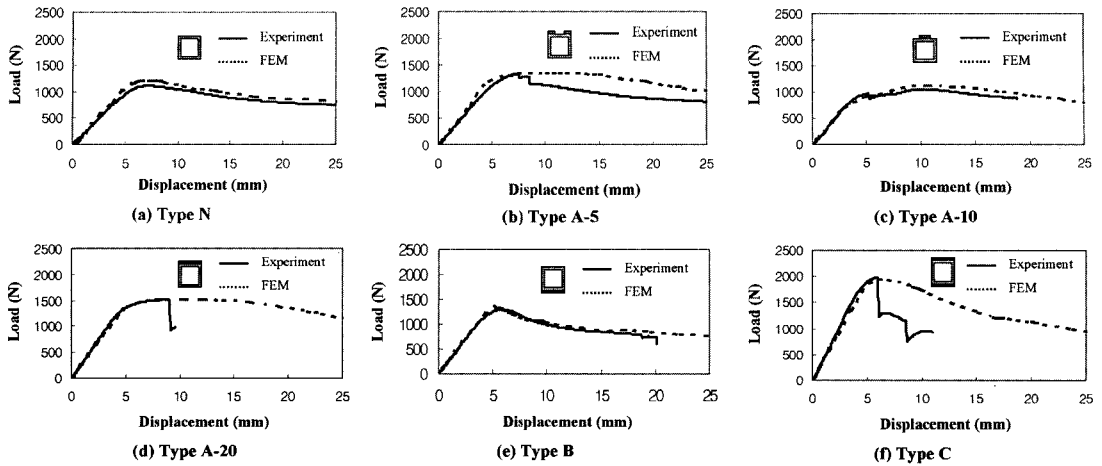


Fig. 13 Numerical and experimental load-displacement curves of various reinforced tube beams

서 보강효과로 굽힘강성과 항복하중 및 최대하중이 증가함을 알 수 있다. A-10형 시험편의 경우에는 보강판이 사각관의 폭보다 훨씬 작고 플랜지(flange)의 중앙부위에 위치하여 그 부위에 하중이 집중하게 되므로 오히려 국부좌굴 거동을 보다 일찍 가속화하여 최대하중의 저하를 초래한 것으로 생각된다. 단순이론해석의 결과에서는 이와 같은 사유의 하중저하 효과가 고려되어 있지 않기 때문에 A-10형의 최대하중은 실험값보다 상당히 크게 구해진 것이다.

사각관 위아래 전체를 보강한 C형 시험편에서 굽힘강성과 최대하중이 각각 약 120%, 90% 이상 증가되어 보강효과가 큰 것으로 나타났으나 최대하중이 발생하는 변위시점은 오히려 작아져 보강하지 않은 시험편과 비교하여 좌굴변형이 보다 일찍 발생하였다. 사각관 윗면을 보강한 A-5형과 A-20형 시험편은 C형 시험편과 비교하여 굽힘강성과 최대하중의 증가 폭은 상대적으로 적었으나 특히 A-20형 시험편의 최대하중이 발생하는 변위시점은 약 13% 이상 커져 좌굴변형을 상당히 지연시키는 효과를 얻을 수 있었다. 사각관 아래 전체를 보강한 B형 시험편은 A-20형 시험편과 비교하여 동일한 크기의 보강재를 부착하였음에도 불구하고 굽힘강성과 최대하중의 증가 폭이 상대적으로 적었다. 따라서 굽힘특성 향상 및 좌굴변형의 지연효과를 동시에 얻기 위해서는 사각관 윗면 전체를 보강한 시험편을 제작하여

사용해야 할 것이다.

#### 4.4 소성중립축 이동의 이론해석결과

최대하중에서의 사각관 단면에 작용하는 응력분포 및 소성중립축의 위치를 실험결과와 최대하중값과 알루미늄 재료의 실제 물성치를 고려한 이론해석을 통해 구했다. Table 4는 최대하중에서의 사각관 단면에 작용하는 압축응력 분포 및 소성중립축의 단순이론해석 결과이다. 여기서 H는 단면의 높이, NA는 소성중립축의 위치, W는 압축응력을 받는 측벽의 길이 그리고 E와 P는 각각 탄성압축응력과 소성압축응력을 받는 측벽의 길이이다(Fig. 14 참조). 사각관 윗면을 보강한 A-5형과 A-20형의 경우, 보강하지 않은 시험편과 비교하여 소성중립축(NA)이 위쪽으로 많이 이동하여 압축을 받는 측벽 영역(W)이 줄었다. 그러나 사각관 아래면을 보강한 B형의 경우에는 소성중립축이 아래쪽으로 많이 이동하여 상대적으로 압축을 받는 영역이 증가하였다. 보강재의 부착으로 압축하중을 받는 윗면의 두께가 두꺼워진 A형과 C형의 경우 압축을 받는 측벽 영역이 약 85% 정도 소성영역으로 압축 받고 있는 반면, 윗면과 측벽의 두께가 동일한 N형과 B형의 경우 압축 측벽 영역이 약 50~60% 수준의 소성변형영역으로 되었다. 따라서 단순이론해석을 이용하여 최대하중이 작용하는 단면의 소성중립축의 위치와 탄성 및 소성 응력분포를 유추할 수 있었다. 소성중



Table 3 Comparison between numerical and experimental results for bending performance of reinforced Al tube beams

Specimen type		Flexural stiffness, $EI$ ( $Nmm^2$ )	Yield load, $F_y$ (N)	Ultimate load, $F_u$ (N)	Mid span deflection at $F_u$ , $\epsilon_{Fu}$ (mm)
N	Experiment	271.6	871.6	1105.9	7.1
	FEM	309.7	850.0	1213.5	7.4
	Error	14.0 %	-2.5 %	9.7 %	3.8 %
	Theory	288.8	885.9	1047.1	-
	Error	6.3 %	1.6 %	-5.3 %	-
A-5	Experiment	316.5	991.6	1333.1	7.5
	FEM	347.9	934.0	1351.0	7.4
	Error	9.9 %	-5.8 %	1.3 %	-1.9 %
	Theory	350.3	957.4	1225.9	-
	Error	10.6 %	-3.4 %	-8.0 %	-
A-10	Experiment	335.8	770.0	1053.9	9.8
	FEM	323.2	670.0	1109.4	10.7
	Error	-3.7 %	-13.0 %	5.3 %	9.9 %
	Theory	350.3	957.4	1225.9	-
	Error	4.3 %	24.3 %	16.3 %	-
A-20	Experiment	402.3	1185.0	1540.4	8.3
	FEM	389.1	997.6	1512.7	8.7
	Error	-3.3 %	-15.8 %	-1.8 %	4.9 %
	Theory	398.9	1003.9	1356.2	-
	Error	-0.8 %	-15.3 %	-11.9 %	-
B	Experiment	384.6	1065.3	1313.4	6.0
	FEM	390.4	980.0	1323.3	5.7
	Error	1.5 %	-8.0 %	0.8 %	-5.7 %
	Theory	398.9	1003.9	1356.2	-
	Error	3.7 %	-5.8 %	3.3 %	-
C	Experiment	584.2	1615.0	1979.6	5.9
	FEM	527.1	1320.0	1943.7	7.0
	Error	-9.8 %	-18.3 %	-1.8 %	19.1 %
	Theory	566.9	1580.5	1858.6	-
	Error	-3 %	-2.1 %	-6.1 %	-

Table 4 Theoretical results for the neutral axis and compressive area on the cross section of various tube beams at the maximum load

	N	A-5	A-20	B	C
H (mm)	20.0	21.0	21.0	21.0	22.0
NA (mm)	10.0	12.3	14.3	6.5	11.0
W (mm)	9.0	6.8	4.7	13.5	9.0
E (mm)	4.5	1.0	0.7	5.5	1.3
P (mm)	4.5	5.8	4.0	4.9	7.7
P/W (%)	50.3	85.6	85.0	58.9	85.7

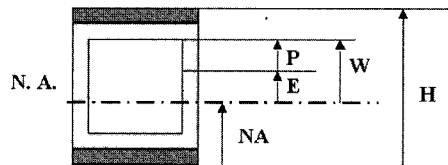


Fig. 14 Example of various lengths on the cross section of reinforced tube beams at the maximum load (H: height of the cross section, NA: position of neutral axis, W: length of compressive web, E: length of elastic compressive web, P: length of plastic compressive web)

웹축의 위치와 소성영역의 크기는 사각관의 굽힘 변형시 보강재 부착에 따라 크게 차이를 보였다. 좌

대하중이 크게 나타난 A-20형과 C형의 경우 다른 시험편과 비교하여 압축부위의 소성영역이 매우 컸

으며 좌굴변형이 상당히 지연되는 A-20형 시험편의 경우 소성중립축이 위쪽으로 이동하여 압축영역 또한, 상대적으로 줄어들었다. 특히 C형의 경우에는 중립축 이동이 없었음에도 측벽의 소성영역이 A-20형과 유사할 정도로 커졌는데, 이는 C형 사각관 보의 최대하중이 보강관이 없는 N형 시험편과 비교하여 90% 정도 더 커졌는데 부분 선형화된 진응력 곡선(Fig. 7)에서  $E_1/E_0=0.01$ ,  $E_2/E_0=0.0014$ 이므로 최대하중에 근접함에 따라  $E_1$ ,  $E_2$ 의 값이  $E_0$ 에 비해 훨씬 작아 소성영역이 크게 확대되었기 때문이다. 따라서 사각관의 굽힘변형시 최대하중과 지연좌굴의 효과를 극대화하기 위해서는 보강재를 사용하여 압축영역을 최소화하고 압축부위의 소성영역을 크게 해야 할 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 관으로 보강한 알루미늄 사각관 보를 제작하고 이에 대한 3점 굽힘붕괴 시험을 하여 보강 알루미늄 사각관 보의 굽힘특성을 검토하고 보강효과를 평가하였다.

- 1) 보강 알루미늄 사각관 보에 대한 실험 결과와 유한요소 수치해석 결과를 비교하여 볼 때 굽힘강성 및 최대하중이 전반적으로 잘 일치하였다.
- 2) 사각관 윗면 중앙을 보강한 A-10형 시험편을 제외한 모든 보강 시험편에서 굽힘특성이 향상되었으며 특히, 사각관의 위아래 전체를 보강한 C형 시험편의 실험 및 수치해석 결과 다른 보강 시험편과 비교하여 굽힘강성과 최대굽힘하중이 크게 향상되었다.
- 3) 사각관 윗면을 보강한 A형 시험편 모두 최대하중이 발생하는 변위가 보강하지 않은 시험편보다 커졌으며 특히 윗면 전체를 보강한 A-20형 시험편에서 그 변위가 가장 컸다. 따라서 사각관 윗면 전체를 보강할 경우 좌굴변형을 상당히 지연시키는 효과를 얻을 수 있다.
- 4) 접착력이 우수한 보강시험편을 제작한다면 보강

관의 위치 및 두께를 적절히 조정하여 소성 중립축의 변화에 따른 사각관의 주된 파괴 모드(인장 또는 압축)를 결정할 수 있을 것으로 생각된다.

### 후 기

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2004-041-D00018).

### References

- 1) D. Kecman, "Bending Collapse of Rectangular Section Tubes in Relation to the Bus Roll-Over Problems," PH.D. Thesis. Cranfield Institute of Technology, U.K., 1979.
- 2) S. Kyriakides and P. K. Shaw, "Inelastic Buckling of Tubes under Cyclic Bending," J. Pressure Vessel Technology, Vol.109, pp.169-178, 1987.
- 3) T. Wierzbicki, W. Abramowicz, T. Gholami and J. Huang, "Stress Profiles in Thin-Walled Prismatic Columns Subjected to Crush Loading- II Bending," Computer & Structure, Vol.51, No.6, pp.625-641, 1994.
- 4) S. Y. Kang, I. B. Jang and H. Y. Kim, "Development of a Pure Bending Test Machine and Bending Collapse Characteristics of Rectangular Tubes," Transactions of KSAE, Vol.6, No.1, pp.222-233, 1998.
- 5) T. H. Kim and S. R. Reid, "Bending Collapse of Thin-Walled Rectangular Section Columns," Computers and Structures, Vol.79, pp.1897-1911, 2001.
- 6) B. J. Kim and S. J. Heo, "Crashworthiness Design Concepts for the Improved Energy Absorbing Performance of an Aluminum Lightweight Vehicle Body," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.155-160, 2003.