

굽힘붕괴를 수반하는 알루미늄 사각관의 시험법에 관한 연구

이성혁*·최낙삼**

A Study on the Evaluation Method for Bending Collapse Behavior of an Aluminum Square Tube

Sung Hyuk Lee and Nak Sam Choi

Key Words: Bending collapse(굽힘붕괴), Al square tube(알루미늄 사각관), Local buckling(국부적 좌굴), Plastic hinge(소성힌지), Numerical analysis(수치해석)

Abstract

To evaluate the bending collapse behavior of an aluminum square tube, a finite element simulation for the four-point bending test was suggested. Local buckling deformation near the center of an aluminum tube specimen was induced which has been partly inserted by two steel bars. Simulation results showed good agreements with those of experiment.

1. 서론

항공·우주, 운송·에너지 등의 산업분야에서는 기기나 장치가 고성능화됨에 따라, 보다 경량이면서 강도와 내식성이 우수한 재료가 요구되고 있다. 특히 자동차산업에 있어서 차량성능향상과 연비개선이라는 과제를 동시에 만족시키기 위해서 경량화는 필수적인 요소이며 이에 대한 요구가 더욱 커지게 되었다. 경량화를 위해 사용되는 재료로서 복합재료와 알루미늄 등이 있으며 각각의 장점을 살려서 자동차 구조물의 부재로서 광범위하게 사용되고 있다.

자동차의 경량화를 위한 알루미늄 부재의 형상은 사각단면을 갖는 관 형상으로 단순화시킬 수 있으며 이러한 사각관의 압축, 굽힘 및 좌굴거동은 자동차의 안전성 측면에서 연구할 가치가 있

다. 현재까지 기계적 변형에너지의 흡수 측면에서 많은 연구^(1~3)가 진행되었으며 플라스틱 복합재료를 알루미늄 사각관에 피막시킴으로서 보다 안정적인 압축붕괴를 유도하는 방법⁽⁴⁾도 연구되어지고 있다. 즉, 보다 안정적인 변형거동과 큰 에너지 흡수능력을 갖도록 하는 사각관의 설계방법이 요구된다.

본 연구는 복합재료 피막 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴거동을 실험과 수치해석을 조합한 방법으로 평가할 수 있도록 하기 위한 선행 연구로서 알루미늄 사각관에 대해 굽힘붕괴시험과 수치해석을 수행하였다. 특히 수치해석을 통해 굽힘붕괴시 발생하는 소성힌지의 발달과정에 대하여 연구하였다.

2. 실험

2.1 시험편

본 연구에서 사용한 알루미늄 사각관 시험편은 6063T5 압출재로 단면은 20mm×20mm이며 벽두께는 .1mm, 시험편 길이는 500mm이었다. 시험 재료인

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계공학과

알루미늄의 물성치는 사각관에서 인장시편을 절취하여 구했으며 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of aluminum 6063T5

Density (kg/m ³)	E-modulus (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
2700	69	196.5	214.8

2.2 굽힘붕괴 시험

굽힘 시험방법은 보통 3점 하중형 단순보를 이용하는 방법과 외팔보를 이용하는 방법이 있다. 소성현지가 발생하는 지점과 하중점이 일치되는 단순보 형태는 하중을 가하는 부위가 소성현지의 자연스런 진행을 방해하기 때문에 붕괴이후의 거동을 알아보는 데 적합하지 않으며, 외팔보 형태는 전단응력이 고정단에서 발생하여 소성현지가 순수굽힘모멘트에 의해 발생하지 않으므로 정확한 결과를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 4점굽힘 시험법을 이용하여 최대한 순수굽힘 하중을 줄 수 있도록 하여 실험하였다. 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴 시험은 Zwick사의 만능시험기를 이용하였으며, 하중축 사이의 거리는 120mm, 하중속도는 5mm/min으로 하였다. 하중편이 시편과 접촉한 점에서 생기는 국부좌굴붕괴를 막기 위하여 Fig. 1과 같이 시편의 바깥쪽 내부공간에 강체로 된 사각보를 삽입하였다. 이 삽입보의 길이는 약 210mm로 하였으며 따라서 내부가 빈 부위의 길이는 80mm가 되어, 여기에서 굽힘붕괴가 발생하게 된다. 또한 삽입보를 넣지 않은 시편에 대해서도 실험을 수행하여 각각의 결과를 비교하였다.

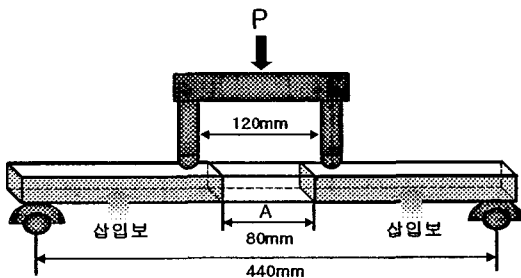


Fig. 1 Four-point bending test

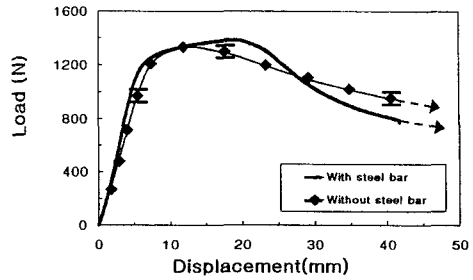


Fig. 2 Experimental load-displacement curves of Al tubes

2.3 실험 결과

Fig. 2는 삽입보를 넣은 알루미늄 사각관과 넣지 않은 사각관에 대한 정적 굽힘시험 결과이다. 삽입보를 넣은 경우, 삽입보를 넣지 않은 시편과 비교하여 탄성영역 내에서 굽힘강성이 약간 더 컸다. 최대 하중도 삽입보를 넣은 시편이 더 컸으며 최대하중이 발생하는 변위지점은 삽입보를 넣지 않은 시편 보다 지연되어 발생하였다. 이는 삽입보를 넣지 않을 경우, 하중편과 접촉하는 시편부위에서 응력집중으로 인한 국부좌굴변형이 쉽게 발생하였기 때문이다. 반면 삽입보를 넣은 시편은 시편의 중앙부에서 국부적인 붕괴가 발생하였다. 최대하중점을 지난 직후부터 붕괴거동이 진행되는 데, 삽입보를 넣지 않았을 경우가 하중의 감소가 보다 완만하게 진행되었음을 알 수 있었다. 이는 삽입보를 넣지 않은 시편의 국부적인 붕괴가 하중편과 접촉하는 두 개의 부위에서 일어나 에너지 흡수가 이들 양쪽 붕괴영역에서 함

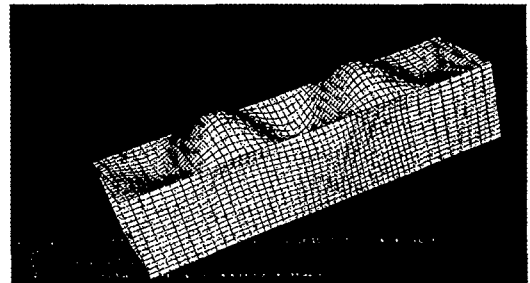


Fig. 3 1st buckling mode shape near the center of an Al tube specimen (part A in Fig. 1)

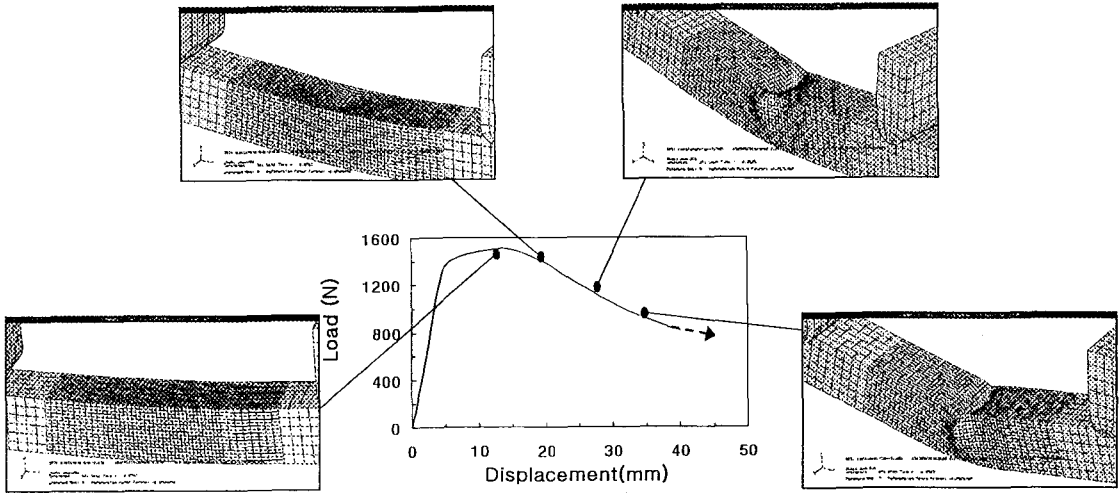


Fig. 4 Bending collapse behavior of a steel bar inserted Al tube at various stages of loading

게 이루어져 하중을 좀 더 지탱할 수 있었기 때문이다. 따라서 삽입보가 없을 경우에는 하중편에 의한 접촉붕괴효과가 커져, 순수굽힘에 의한 국부적인 붕괴를 유도하기 어렵고 순수굽힘붕괴에 의한 에너지 흡수거동을 구할 수 없는 것이다.

3. 수치해석

3.1 수치 모델

알루미늄 사각관의 굽힘붕괴시험 모델에 대하여 수치 계산을 수행하였다. 수치 모델은 ABAQUS 6.2를 이용하였으며, 인장실험으로 구한 알루미늄 물성치를 입력하였다. 4점 굽힘붕괴 시험을 모두 수치화하여 모델링 한 경우와 국부적인 변형이 일어나는 부분만을 모사하여 순수굽힘모멘트를 가한 경우에 대하여 해석하였다. 국부적인 굽힘붕괴를 시편 중앙부에서 일어나도록 유도하기 위하여 Fig. 3과 같은 좌굴 모드를 부여하였다. 초기 불균일은 해석 결과에 영향을 미치지 않을 정도의 양으로 사각관 두께의 1%를 설정하여 각 절점의 변위에 따라 비례적으로 설정하였다.

3.2 해석 결과

3.2.1 굽힘붕괴의 변형 형태

Fig. 4는 수치해석 결과 나타난 굽힘붕괴시 발생하는 변형의 형태이다. 하중-변위 곡선의 각 부분에 해당하는 변형은 그림과 같이 최대하중이 가해지기 전까지 발생하지 않다가 최대하중 직후 시편의 중앙부분에서 국부적인 좌굴이 발생하여 진전함을 알 수 있다. 이러한 국부적인 좌굴은 하중이 최대하중에 도달한 후에 발생하며 최대하중이후에 알루미늄 사각관은 좌굴에 의해 발생하는 소성힌지에 따라 붕괴됨을 알 수 있다. 또한 붕괴부분에 응력이 집중되어 에너지 흡수가 일어나고 붕괴가 진행됨에 따라 사각관이 흡수하는 에너지는 점점 더 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5는 삽입보의 유무에 따른 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴에 대한 수치해석 결과이다. 이들 결과는 Fig. 2의 실험 결과와 상당히 유사한 거동을 보여주었다. 수치해석 결과, 삽입보를 넣었

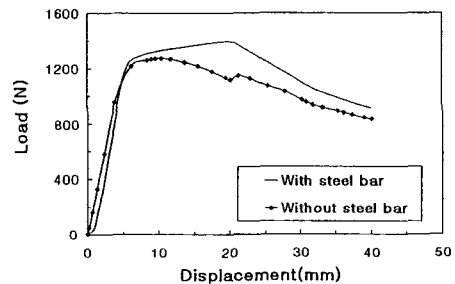


Fig. 5 Simulated load-displacement curves of Al tubes

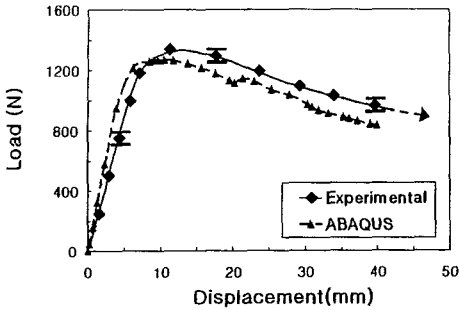


Fig. 6 Numerical and experimental curves of an Al tube without steel bar

을 경우 최대하중이 약 10%정도 높아졌다.

3.2.2 실험결과와 비교

Fig. 6과 Fig. 7은 알루미늄 사각관에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것이다. 수치해석결과는 삽입보의 유무에 관계없이 모두 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 삽입보가 없는 Fig. 6의 경우, 수치해석의 결과가 실험결과보다 탄성구간에서 굽힘강성이 다소 크게 나왔으며 실험 결과보다 붕괴가 보다 일찍 발생하여 진전했음을 알 수 있다. Fig. 7과 같이 삽입보를 넣은 경우, 전체적인 하중-변위 곡선과 탄성영역에서의 굽힘강성 및 최대 하중의 값이 실험과 수치해석 모두 잘 일치하였으나, 국부적 좌굴 변형이 발생하여 진전함에 따라 하중이 감소하는 정도는 수치해석 결과에서 다소 완만함을 보여주었다. 실험과 수치해석에서 약간의 차이가 발생한 것은 수치해석상의 오차뿐만 아니라 실제 사각관과 삽입보의 형태, 실험조건 등이 수치해석 모델링 과정에서 나타낸 완전한 형태와 조건을 만족시키지 않고 있는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴거동 및 에너지 흡수특성을 실험과 수치해석을 조합한 방법으로 평가할 수 있도록 하기 위하여 알루미늄 사각관에 대해 굽힘붕괴시험과 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 볼 때 최대 하중 및 전체적인 거동이 잘 일치하였다.

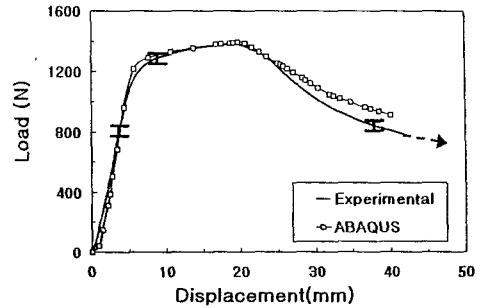


Fig. 7 Numerical and experimental curves of an Al tube with steel bar

2) 4점 굽힘 실험에서 하중편과 시편이 접촉하는 부분의 국부좌굴붕괴를 막고자 알루미늄 사각관에 강철 삽입보를 넣음으로서 알루미늄 사각관 중앙부에서의 국부적인 붕괴현상을 유도할 수 있었다.

3) 4점 굽힘 붕괴시험의 수치해석 모델을 이용하여 알루미늄 사각관의 굽힘붕괴 시 발생하는 거동을 잘 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) M. Langseth, O. S. Hopperstad, A. G. Hanssen, "Crash Behaviour of thin-walled aluminium members", *Thin-Walled Structures*, Vol. 32, pp.127-150, 1998.
- (2) Heung-Soo Kim, "New Extruded Multi-Cell Aluminum Profile for Maximum Crash energy Absorption and Weight Efficiency", *Thin-Walled Structures*, Vol. 40, pp.311-327, 2002.
- (3) S. H. Lee, C. S. Hahn, M. H. Rhee and J. E. Oh, "Effect of Triggering on the Energy Absorption Capacity of Axially Compressed Aluminum tubes", *Materials and Design*, Vol. 20, pp.31-40, 1999
- (4) 김구현, 이정주, 신금철, "알루미늄/GFRP 혼성 사각튜브의 정적 압축 붕괴 및 에너지 흡수 특성", *한국자동차공학회 논문집 제 8권 제 6호*, pp.208-219, 2000
- (5) D. Kecman, "Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 25, No. 9-10, pp.623-636, 1983.