

알루미늄 사각관의 굽힘붕괴특성에 관한 실험적 고찰

김창수* · 정태은** · 강신유***

(1997년 6월 19일 접수)

Experimental Study on The Bending Collapse Characteristics of Aluminum Rectangular Tubes

Chang-Soo Kim, Tae-Eun Chung and Shin-You Kang

Abstract

In this paper, the bending collapse characteristics of 6XXX series aluminum rectangular tubes were studied with a pure bending collapse test rig which could apply the pure bending moment without imposing additional shear and tensile forces. Under the pure bending moment, there occurred three kinds of bending collapse modes - local buckling, delayed buckling and tensile failure - depending on the a, b, t(depth, width, thickness) and material properties. Experimental results are compared with the results of finite element method and other methods.

Key Words : Bending Collapse, Pure Bending Test Rig, Local Buckling, Delayed Buckling, Tensile Failure

1. 서 론

최근 들어 환경문제와 화석에너지의 고갈로 인하여 자동차의 연비 향상이 더욱 부각되었으며, 전기자동차등의 개발을 위해서는 차체의 경량화가 절실히 요구되고 있다. 따라서 기존에 자동차의 부재를 만들었던 연강등의 재료보다 가벼운 재료로 자동차의 부재를 만들어야 하는 필요성이 생기게 되었다. 또한 알루미늄 합금기술의 발달로 인하여 알루미늄 합금은 연강보다 훨씬 가벼우면서도 상당한 강도를 가지게 되었고, 자동차의 경량화를 위한 차체부재의 재료로 많이 연구되어지면서 이러한 소재로 제작된 차체부재의 강도 및 안전성에 관하여 관심이 높아지고 있다.

자동차 충돌사고에 있어서 부재들의 변형은 축방향 압축붕괴와 굽힘붕괴가 혼합된 변형양상을 보여준다. 그러나 굽힘붕괴는 대부분의 자동차에 사용되는 박판부재의 주된 붕괴형태임에도 불구하고, 축방향붕괴보다 관심을 끌지 못하고 있다. 굽힘붕괴가 주가 되는 전복사고의 경우에 있어서 각각의 부재의 붕괴는 굽힘 모우멘트에 의하여 발생한 소성힌지에 의하여 진행된다. 그러므로 설계단계에서 부재가 흡수할 수 있는 변형에너지와 부재의 변형형상을 계산하기 위해서는 굽힘 모우멘트를 받는 부재의 붕괴이후 거동에 관한 연구가 필요하다.

사각관의 굽힘 붕괴에 대한 실험적 연구는 Kecman⁽¹⁾에 의하여 처음으로 이루어 졌다. 범의 한쪽단을 완전히 고정하고 모우멘트와 회전각의 특성을 계산하여 외팔보 형태

* 아주대학교 대학원
** 고등기술연구원
*** 강원대학교 정밀기계공학과

의 시험을 하였다. Kyriakides와 Shaw⁽²⁾는 4점 굽힘 방법을 이용하여 대변형 시험기로 발전시켰다. 이 시험기에서는 시편의 양 끝단에 있는 두 개의 풀리를 각각 회전시켜 굽힘 모우멘트를 발생시킨다. Corona와 Vaze⁽³⁾ 역시 Kyriakides와 Shaw의 시험기를 통하여 굽힘시험을 수행하고 결과를 이론적 계산결과와 비교하였다. Cimpoeru와 Murray⁽⁴⁾는 Kyriakides와 Shaw의 방법을 수정하여 시편의 양 끝단에서 지지바퀴(support wheel)를 사용하였으며, 여기에 짝힘으로 굽힘 모우멘트를 생성하기 위하여 두 개의 하중축(loading pin)을 장치하였다. 이 시험기에서는 굽힘 붕괴시험을 하는 동안에 발생하는 인장력을 최소화하기 위하여 하나의 지지바퀴를 가로방향으로 움직일 수 있게 하였다.

본 논문에서는 6XXX 계열 알루미늄합금으로 된 박판 사각관의 굽힘 붕괴의 특성을 기 제작된 순수 굽힘붕괴 시험기⁽⁵⁾를 이용하여 실험해보고자 한다. 이 시험기를 이용하여 여러 가지 사각단면 알루미늄부재에 대하여 시험을 수행하였으며 이 결과를 implicit 유한요소해석 프로그램(ABAQUS)⁽⁶⁾과 explicit 유한요소해석 프로그램(PAM-CRASH)⁽⁷⁾ 그리고 Kecman의 식을 이용하여 해석한 결과와 비교하였다. 시험의 결과로부터 단면의 형상과 변형 양상과의 관계를 결정하는 인자를 구하였으며, 이 인자와 소성경화(strain hardening)의 개념으로부터 새로운 굽힘거동 예측식을 제안하였다.

2. 순수 굽힘 붕괴 시험기

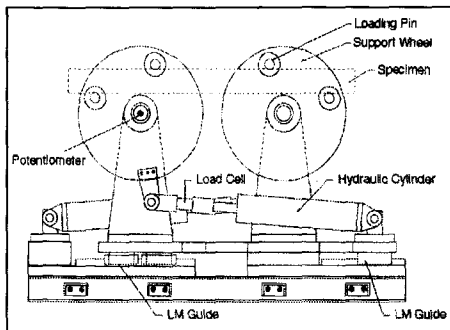
본 연구에 사용한 시험기는 순수한 굽힘 모우멘트만 가

하기 위해 4점 굽힘 이론을 이용하여 제작된 것이다. 4점 굽힘 방법은 부재의 가운데 부분에 균일한 모우멘트만 발생시키므로 기존의 시험방법보다 정확한 굽힘 붕괴특성을 측정할 수 있다.

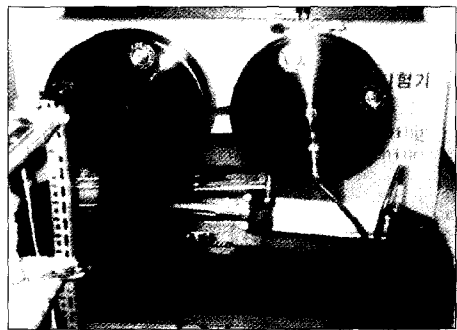
Fig.1은 시험기의 개략도와 실제의 모습을 보여주고 있다. 시험기에는 유압실린더에 의하여 회전하는 두 개의 지지바퀴가 있다. 지지바퀴에는 각각 2개의 하중축(loading pin)이 있으며 안쪽의 하중축은 시편을 아래쪽으로, 바깥쪽의 하중축은 시편을 위쪽으로 밀어 짝힘을 발생시켜 굽힘 모우멘트를 시편에 작용시킬 수 있다. 시편이 굽혀지는 동안 시편의 양끝단의 길이는 줄어들거나 하중축 사이의 접촉점도 변화될 수 있다. 따라서 시험기는 하나의 지지바퀴와 지지바퀴의 지지대가 가로 방향으로 움직일 수 있어야 하며, 모든 하중축은 볼베어링으로 지지되어 자유롭게 회전할 수 있도록 하였다.

실험에 사용한 유압펌프의 최대 유압은 20 MPa이며, 유압실린더의 최대 하중용량은 100 kN이다. 지지바퀴에서 하중축까지의 길이는 0.2 m이며 따라서 최대 굽힘 모우멘트는 20kN-m이다. 유압실린더의 행정 길이는 0.27 m이며 지지바퀴의 회전각도는 35°로 시편을 최대 70° 이상 굽힐 수 있다. 시험기는 가로 100 mm 세로 95 mm까지의 직사각형 단면을 가진 시편을 굽힐 수 있다. 이 시험기에는 굽힘 모우멘트를 측정하기 위해서 두 개의 유압실린더의 피스톤 로드앞에 각각 하나씩의 로드셀을 설치하였으며 회전각도를 측정하기 위해서 두 개의 지지바퀴 중심에 각각 가변저항기를 설치하였다.

두 지지바퀴의 굽힘 모우멘트와 회전각을 동시에 측정하기 위하여 Fig.2와 같이 데이터 입력장치를 구성하였



(a) Drawing of test rig



(b) Photograph of test rig

Fig. 1 Pure bending test rig

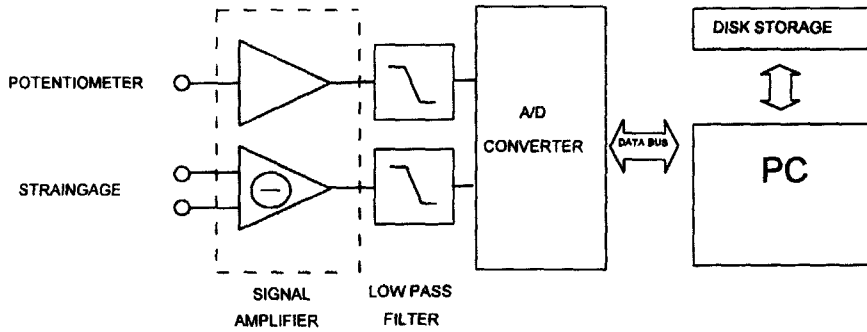


Fig. 2 Schematic diagram of the data acquisition system

다. 로드셀로부터 나오는 신호는 스트레인 증폭기를 통과 하며 가변저항기로부터 나오는 회전각 신호는 아날로그 신호 증폭기를 통과한다. 두 아날로그 신호는 A/D 변환 기에 의하여 디지털로 바뀌어 개인용 컴퓨터에 저장된다.

3. 굽힘 붕괴 시험

굽힘 붕괴시험은 알루미늄 6061과 6063으로 만들어진 박판 사각관에 대하여 수행하였다. 시편의 길이는 950 mm이며 지지바퀴의 중심사이의 길이는 시험전 550 mm

로 조정하였다. 하중축이 접촉하는 점에 생기는 붕괴를 막 기 위하여 시편의 안쪽 빈공간에 강체로 된 지지대를 넣었 다. 이 지지대의 길이는 425 mm으로 시편의 붕괴영역은 100mm이다.

Table.1은 본 논문에서 시험한 시편들의 종류, 크기, 재 료상수를 나타내고 있다. Fig.3(a)는 시험기에 장착된 시 편을 보여주며, Fig.3(b)는 굽힘 붕괴 시험이 끝난후의 시편을 보여주고 있다. 두 그림에서 지지바퀴의 중심 사의 길이를 비교해 보면 튜브의 미그럼은 발생하지 않은 상 태에서 움직이는 지지바퀴 부분의 시편이 굽혀지는 동안

Table 1 Test specimens

series	number	specimen size(mm)	f	yield stress(MPa)	ultimate stress(MPa)
6061	1	50×50×2	25.0	192	221
	2	50×50×3	16.7	180	216
	3	80×50×3	23.7	192	221
	4	50×80×3	18.7	192	221
	5	70×20×2	25.6	192	207
	6	20×70×2	13.7	192	207
	7	70×60×3	22.5	209	229
	8	60×70×3	20.8	209	229
6063	7	45×45×1.2	37.5	188	210
	8	45×45×1.8	25.0	200	221
	9	50×50×2	25.0	174	206
	10	60×30×2.5	20.2	200	221
	11	50×50×4	12.5	206	229
	12	30×60×2.5	14.3	200	221
	13	30×80×1.2	31.9	168	189
	14	80×30×1.2	52.2	168	189

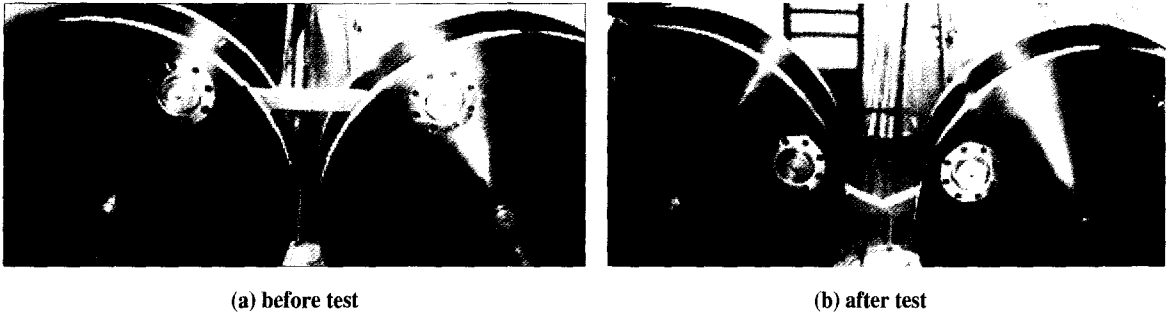


Fig. 3 Bending collapse test

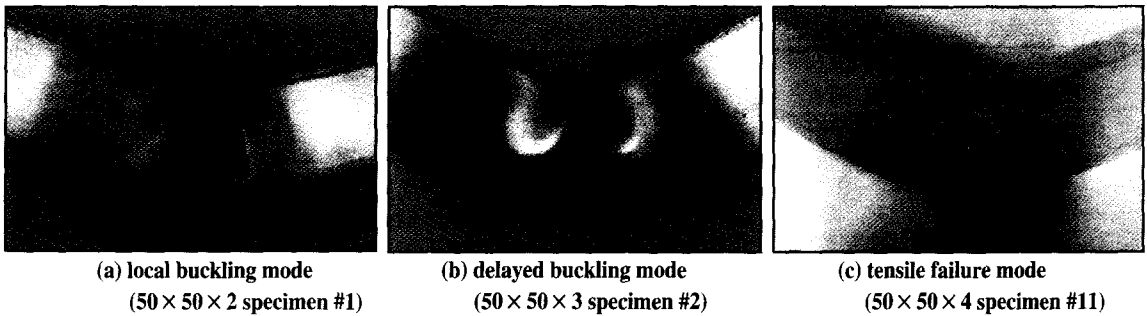


Fig. 4 Bending collapse shapes

바깥쪽으로 밀렸다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 시편의 양단사이의 거리가 줄어든 것보다 두 개의 지지바퀴의 하중축 사이의 거리가 더 많이 줄어들었기 때문이다.

Fig.4는 시험후 시편의 붕괴된 모습이다. (a)는 전형적인 국부좌굴의 모습이며 (b)는 지연좌굴의 모습이다. 알루미늄의 경우 굽힘시험과정에 인장파단(tensile failure)에 의한 붕괴가 발생하게 되는데, (c)는 시험과정에 발생한 인장파단이다. (c)시편의 단면은 50×50×4 mm이며 f 의 값이 12.5로 시험한 시편중에서 작은 f 값에 속한다.

단면의 형상의 함수인 f 는 이번 시험의 결과로 새롭게 정의된 매개변수로서 굽힘 붕괴 모드가 국부좌굴인지 지연좌굴인지를 판단하는 중요한 변수가 된다. f 는 다음과 같이 정의 된다.

$$f = \frac{4\sqrt{a^3 \cdot b}}{t}$$

- a : 단면의 가로
- b : 단면의 세로
- t : 단면의 두께

이상과 같이 정의된 f 가 $f < 20$ 인 경우 국부좌굴로 볼

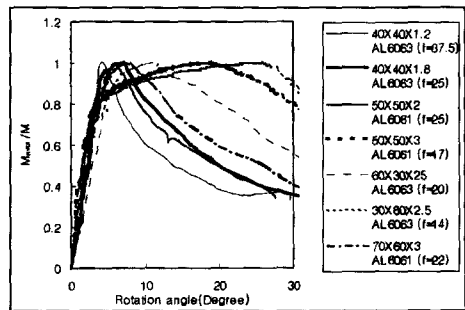


Fig. 5 Normalized moment-rotation angle curves for varying f

수 있고, $f < 20$ 인 경우 지연좌굴로 볼 수 있다(Fig.5). 따라서 구하고자 하는 좌굴의 형태에 따라 단면의 형상을 결정할 수 있다. 또한 단면의 형상에 관계없이 같은 값의 f 는 그 좌굴형태가 동일함을 알 수 있다(Fig. 6).

기존의 굽힘 붕괴 이론⁽¹⁾은 굽힘초기 단계에서 부터 국부 좌굴이 발생한다고 가정하였기 때문에 지연 좌굴은 설명할 수가 없었다. 따라서 급격한 좌굴이 발생하는 회전각은 기존의 이론으로는 설명할 수가 없고, 본 시험의 결과

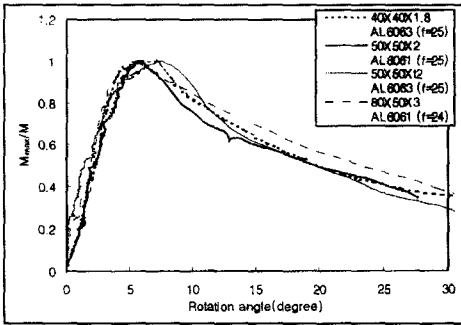


Fig. 6 Normalized moment-rotation angle curves for $f=25$

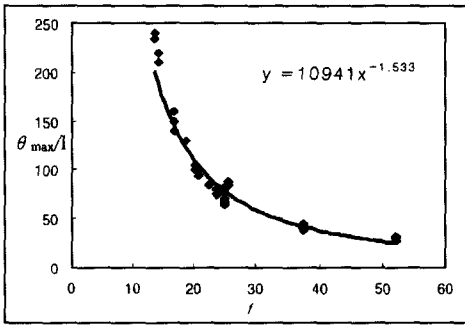


Fig. 7 Experimental equation curve for angle at maximum moment

로 부터 최대 굽힘하중이 작용할때의 회전각을 매개변수 f 의 함수로 나타 낼수가 있다(Fig. 7). 즉 회전각은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\theta_{max} / l = 10941 \cdot f^{-1.533}$$

θ_{max} : 최대굽힘 하중이 작용할때의 회전각
 l : 순수굽힘하중이 작용되는 부재의 길이

Fig.8은 단면의 크기와 두께가 같은 연강재료와 알루미늄

늄 6061 사각관의 굽힘 모우먼트-회전 선도를 비교한 것이다. $50 \times 50 \times 3$ mm의 단면의 크기를 가진 부재의 중량은 알루미늄으로 이루어진 경우 연강재료의 34%에 불과하지만 최대 모우먼트는 그래프로 표현된 바와 같이 연강재료의 57%이다. 더구나 같은 두께의 경우 알루미늄으로 이루어진 시편이 지연좌굴의 형태에 가깝기 때문에 에너지 흡수량은 더욱 늘어나게 된다.

4. 굽힘 붕괴 이론

사각 단면이 굽힘 하중을 받으면 단면의 위, 아래면은 압축과 인장력을 받게 되는데 이 응력 들이 항복응력에도 달하게 되면 소성 변형이 시작된다. 이 때의 굽힘 하중과 회전각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_y = \sigma_y t b \left(a + \frac{b}{3} \right) \quad (1)$$

$$\theta_y = \frac{M_p l}{EI} \quad (2)$$

σ_y : 항복응력

l : 순수 굽힘 하중이 적용되는 부재의 길이

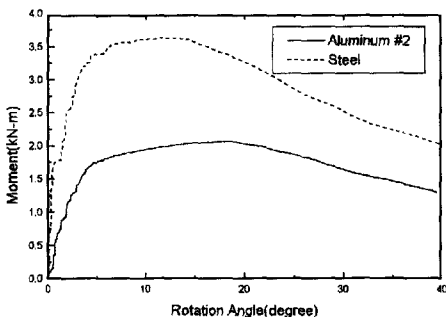
E : 탄성계수

I : moment of inertia

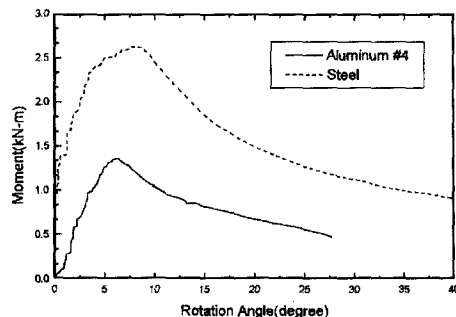
순수 굽힘 하중이 적용되는 구간은 Fig.9에서와 같이 나타낼수 있다.

여기서 축방향의 변형률 속도는

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\theta} z}{l} \quad (3)$$



(a) $50 \times 50 \times 3$



(b) $50 \times 50 \times 2$

Fig. 8 Comparison with steel

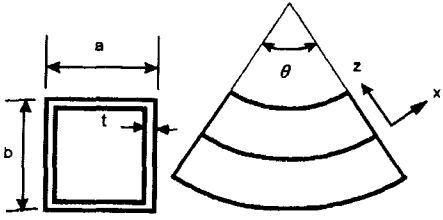


Fig. 9 Pure bending region

로 표현이 가능하다. 비례하중조건(proportional loading condition)이라 가정하면 주어진 부피안에서 흡수되는 전체 에너지 흡수율은 미소 부피에서 흡수된 에너지의 적분값과 같다. 따라서 전체 흡수되는 에너지는 다음과 같이 표현 할수 있다.

$$\Delta \dot{U} = \int_V \sigma \dot{\epsilon} dV = \sigma \dot{\epsilon} \Delta z t$$

$$\Delta U = \int_0^t \sigma \dot{\theta} \cdot z \Delta z d\tau \quad (4)$$

여기서 σ 는 Fig.10에서와 같이 소성 영역을 θ 의 이차 함수로 표현이 가능하므로 (3)을 대입하면 다음과 같이 나타낼수 있다.

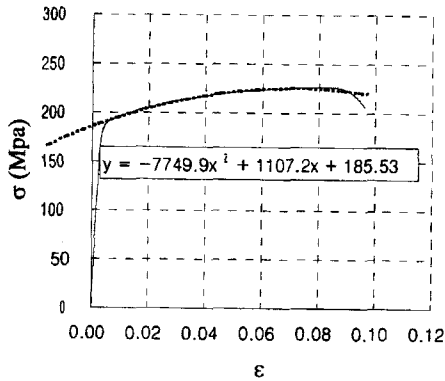


Fig. 10 Test & Approximate Curve for Material

$$\sigma(\theta) = A \cdot \epsilon^2 + B \cdot \epsilon + C$$

$$= A \cdot \left(\frac{\theta z}{l}\right)^2 + B \cdot \left(\frac{\theta z}{l}\right) + C \quad (5)$$

따라서 전체 에너지 U는

$$\Delta U = t \Delta z \left\{ \frac{A\theta^3}{3l^2} z^3 + \frac{B\theta^2}{2l} z^2 + C\theta z \right\}$$

$$U_I = \frac{A\theta^3}{3l^2} z^3 + \frac{B\theta^2}{2l} z^2 + C\theta z$$

$$U = t \int U_I dz \quad (6)$$

사각단면의 플랜지와 웹 부분에서의 에너지는

$$U_{flange} = t \int_0^{\frac{b}{2}-t} U_I dz$$

$$U_{web} = a \int_{\frac{b}{2}-t}^{\frac{b}{2}} U_I dz \quad (7)$$

전체 에너지는 다음과 같다.

$$U_{total} = 2 \times U_{flange} + 4 \times U_{web} \quad (8)$$

굽힘모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$M(\theta) = \frac{dU_{total}}{d\theta} \quad (9)$$

최대 굽힘 하중을 지나 좌굴이 급격히 진행되는 현상은 Fig.11에서와 같이 Kecman(1)의 굽힘 붕괴 모형으로 설명할수 있다. 부재가 굽힘 모멘트에 의해 붕괴될 때에 각 국부 힌지에서 흡수된 에너지들을 모두 합하면 전체 에너지 W(θ)가 구할 수 있다. 각 국부 힌지에서의 에너지 흡수량은 다음과 같다.

$$W_1 = W_{EF+GH} = 2m_p a \left[\frac{\pi}{2} - \rho - \sin^{-1} \left(1 - \frac{b}{h} \sin \rho \right) \right]$$

$$W_2 = W_{BC} = m_p a \left[\pi - 2 \sin^{-1} \left(1 - \frac{b}{h} \sin \rho \right) \right]$$

$$W_3 = W_{AB+CD} = 2m_p z_A (\pi - 2\beta)$$

$$= 2m_p (b \sin^2 \rho - h \sin \rho + \sqrt{b \sin \rho (2h - b \sin \rho)} \cdot \cos \rho)$$

$$\times (\pi - 2 \sin^{-1} \left(1 - \frac{b}{h} \sin \rho \right))$$

$$W_4 = W_{BG+BE+CH+CF} = 4m_p h \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

$$W_5 = W_{GK+EL+MN+FM} = 4m_p b \tan^{-1} \left(\frac{z_A}{\sqrt{(h-x_{A2})^2 + (y_{A2}-y_B)^2}} \right)$$

$$W_6 = W_{GA+AE+CH+CF} = 4m_p \frac{h}{r} z_A$$

$$W_7 = W_{KN+LA+MJ+MI} = \frac{8}{3} m_p \frac{z_A}{r} \sqrt{h^2 + y_B^2 + z_A^2}$$

$$W_8 = W_{KN+LM+KL+MN} = 2m_p \left[a\rho + 2h \tan^{-1} \left(\frac{z_A}{y_A} \right) \right]$$

위의 일은 각 국부힌지의 총합인 총 에너지 흡수량은 다음과 같다.

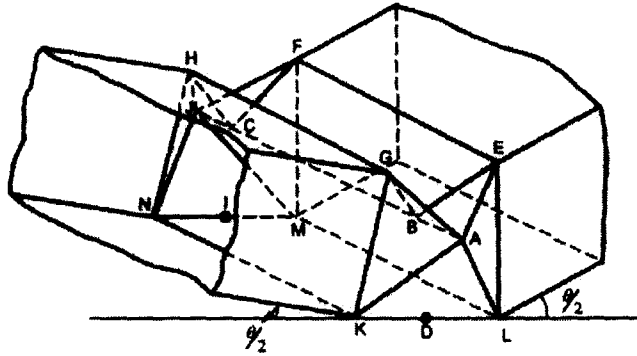


Fig. 11 Kecman의 굽힘붕괴 모형

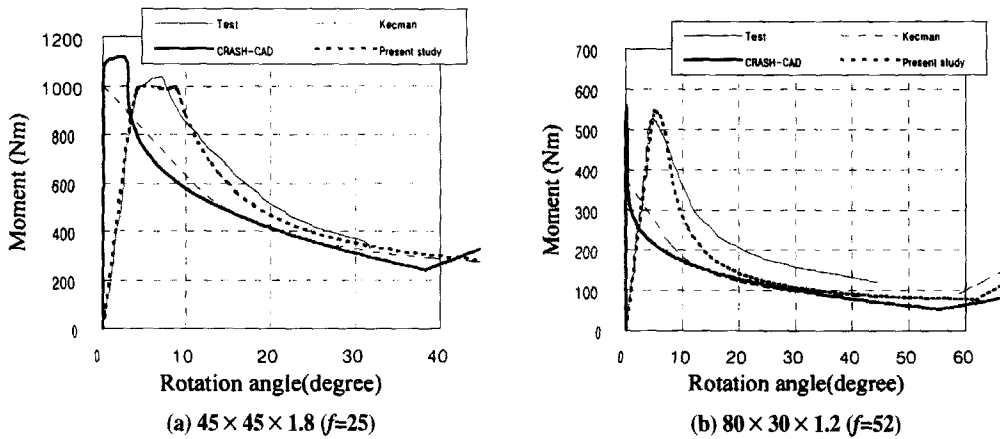


Fig. 12 Results of test and other method

$$W(\theta) = \sum_i^8 W_i(\theta) \quad (11)$$

이를 이용하여 다음과 같이 모멘트가 구해지며

$$M(\theta) = \frac{W(\theta + \Delta\theta) - W(\theta)}{\Delta\theta} \quad (12)$$

따라서 각 변형각에 대한 모멘트를 계산할 수 있다.

이상과 이론적으로 예측된 굽힘하중과 회전 각사이의 관계를 타 이론식들과 비교해서 Fig.12에 나타내었다. 여기서 CRASH-CAD[®]는 상용화 되어 있는 전용 소프트웨어이며 본연구에서 제안한 방법이 시험값과 가장 잘 일치하는 것을 볼수 있다.

5. 수치해석 및 검증

수치해석 모델은 국부좌굴, 지연좌굴, 그리고 인장파단

이 작용하는 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 국부 좌굴의 경우 단면의 크기는 45×45×1.8 mm로 f 값이 25이며, 지연좌굴은 단면의 크기가 50×50×3 mm로 f 값이 16.7이다.

붕괴 거동은 시편의 국부적 구간에서만 일어나므로 모델링을 길이 90 mm의 1/4모델을 사용하였다. 재료의 물성치는 인장시험에서 구하여 Table. 1에 나타낸 것을 이용하였다.

Implicit 프로그램에서는 붕괴를 일으키기 위하여 모든 절점에 Fig.13에서 보여주는 1차 좌굴모드를 이용하여 초기 불균일을 설정하였다. 초기 불균일의 양은 좌굴모드에서 최대 변위를 갖는 부분에서는 두께의 1%를 설정하였으며, 변위의 크기에 따라 비례적으로 설정하였다. Fig.14에서 보는 바와 같이 관은 2개의 대칭면을 포함하고 있다. 따라서 붕괴거동은 길이가 90 mm인 1/2모델을 이용하여 예측할 수 있다. 해석 모델은 변형집중이 예상되

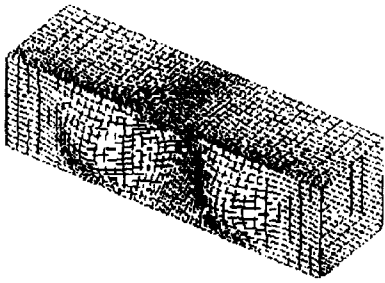


Fig. 13 1st buckling mode shape

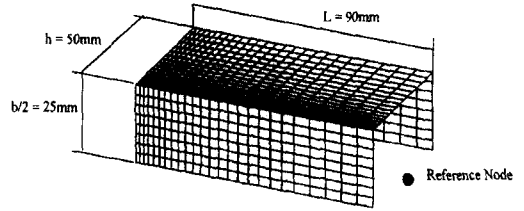
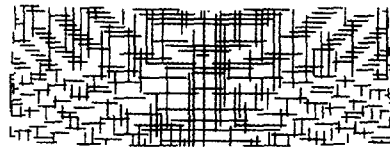


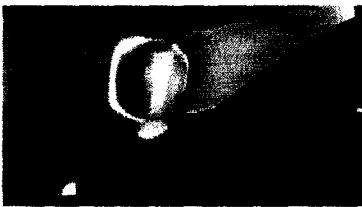
Fig. 14 F.E. model and geometry



(a) Deformed shape at 5 degree



(b) Deformed shape at 13 degree



(c) Deformed shape at 34 degree



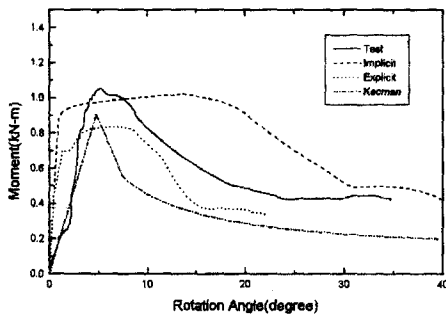
Fig. 15 Deformed shapes of Al-tube (specimen #2)

는 중심부는 1.4 mm 요소, 그외는 2.1 mm 크기의 요소가 사용되었다. 경계조건은 1/2 모델의 대칭조건을 설정하여 실제의 전체 관의 대칭거동을 표현하도록 하였다. 또한, 사각관의 끝 절점을 기준점과 강체로 연결하고, 기준점은 축방향으로 구속하지 않았다. 모우멘트는 대칭면상

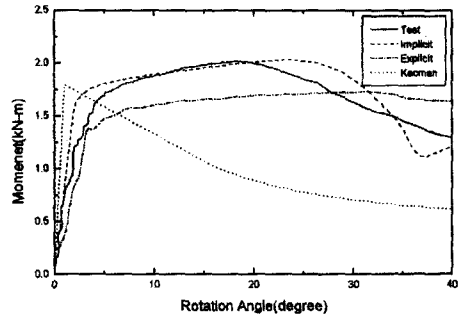
의 기준점(reference node)을 회전시켜 발생시켰다.

Explicit 프로그램에서는 기준점의 각속도를 6.5rad/sec로 하여 준정적 해석을 수행하였다. 계산은 실험에서 30° 변위각도까지인 15° 까지 수행하였다.

재료는 등방성 탄소성 재료로 표현하였으며, 이 모델에



(a) Specimen #8 (45 × 45 × 1.8)



(b) Specimen #2 (50 × 50 × 3)

Fig. 16 Comparison with experiment

서는 변형속도 효과는 무시하였다. 응력-변형률선도는 시험 데이터의 선도에 8개의 점으로서 연결하여 입력하였다.

Fig.15는 해석한 모델중 50×50×3mm의 변형된 형태를 굽힘 각도에 따라서 실제의 실험의 사진과 해석을 통해 얻은 변형형태를 비교하였다.

Fig.16은 implicit 프로그램의 결과와 explicit 프로그램의 결과, 탄성영역이 고려된 Kecman의 이론식을 실험 결과와 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig.16(a)는 국부좌굴의 형태를, Fig.16(b)는 지연좌굴의 형태를 나타내고 있다. 지연좌굴의 경우 explicit 프로그램의 결과와는 차이를 보이지만 implicit 프로그램과는 거의 일치하고 있다. 그러나 국부좌굴의 경우 최대 모우멘트는 잘 일치하고 있으나 좌굴이후의 거동은 모두 많은 차이점을 나타내고 있다. 탄성영역을 보정한 Kecman의 식의 결과는 국부좌굴의 경우 비슷한 경향을 나타내고 있으나 연강부재의 경우와 마찬가지로 지연좌굴의 경우 상당한 차이를 보이고 있어 이에 대한 보정이 필요하다고 판단되며 설계에 적용시 주의가 요망된다.

6. 결 론

알루미늄 6061, 6063 사각관에 대하여 굽힘 붕괴실험 및 해석을 수행하고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 알루미늄 사각관의 굽힘 붕괴 양상을 판단함에 있어서, 단면 형상의 함수인 새로운 매개변수 f 가 도입 되었으며 f 가 같은 값이면 단면의 형상에 관계없이 같은 변형 양상을 나타낼을 알수 있었다.
- 매개변수 f 가 20인 것을 전후하여 국부좌굴과 지연좌굴의 2가지 형태의 붕괴양상을 나타냈으며, f 가 상당히

작은 경우 ($f < 12.5$)에는 인장파단의 형태가 발생하였다. 따라서 굽힘 붕괴 하중을 받는 알루미늄부재의 단면 설계는 $13 < f < 20$ 로 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

- 기존의 이론식인 Kecman의 모우멘트-변형각 예측식은 최대 굽힘 하중이 실제보다 낮게 평가됨을 확인하였으며, 그 변형 양상도 국부좌굴의 경우에는 비슷한 경향을 보였으나 지연좌굴의 경우 상당한 차이를 나타내었다.
- 굽힘 붕괴 거동 예측용 소프트웨어인 CRAS-CAD를 이용해 얻어진 결과에 따르면 최대 굽힘 하중이 실제보다 높게 평가됨을 확인하였으며, 그 변형 양상도 Kecman에 의한 식의 결과 보다는 실제와 유사하지만 실제와는 상당한 차이가 있음을 알수 있었다.
- 소성경화(strain hardening)의 개념으로 예측된 본 연구에서의 예측은 타 이론에 비해 상당히 실험과 일치됨을 볼수 있었으며, 임의의 단면에 대한 굽힘 붕괴 양상을 어느정도 정확히 예측할수 있게 되었다.
- 알루미늄 부재와 연강 부재의 굽힘 붕괴 특성을 비교해 볼 때 단위중량당 에너지 흡수율은 알루미늄이 높음을 알수 있었다.

참고문헌

- (1) D.Kecman, 1979, Bending collapse of rectangular section tubes is relation to the bus roll-over problems, Ph.D.Thesis, Cranfield Institute of Technology, U.K.
- (2) S.Kiriakides and P.K. Shaw, 1987, "Inelastic Buckling of Tubes under Cyclic Bending", J. of

- Pressure Vessel Technology, Vol.109, pp.169~178.
- (3) E. Corona and S.P. Vaze, 1996, "Buckling of Elastic-Plastic Square Tubes under Bending", Int.J.Mech.Sci., Vol.38, No.7, pp.753~775.
- (4) S.J. Cimpoeru and N.W. Murray, 1993, "The large deflection pure bending properties of a square thin-walled tube", Int.J.Mech.Sci., Vol.35, No.3/4.
- (5) 강신유, 장인배, 김현영, 1997, "순수굽힘 시험기 개발을 통한 박판 사각관부재의 굽힘붕괴 특성 연구", 대한기계학회, '97년도 춘계 학술대회 논문집 A, pp. 739~744.
- (6) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.6, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 1997.
- (7) PAM-CRASH User's Manual, PAM Systems International, France, 1996.
- (8) CRASH-CAD User's Manual, Impact Design, Inc., 1997