

알루미늄 사각관의 굽힘붕괴특성에 관한 실험적 고찰

강 신 유*, 김 창 수**, 정 태 은**

* 강원대학교 정밀기계공학과, ** 고등기술연구원

Experimental Study on The Bending Collapse Characteristics of Al Rectangular Tubes

S.Y.Kang*, C.S.Kim**, T.E.Chung**

* Dept. of Precision Mechanical Eng'g, Kangwon National University

** Institute of Advanced Engineering

Abstract

In this paper the bending collapse characteristics of 60 series Al 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, tensile failure - depending on the b/t (width/thickness) ratio and material properties. Experiment results are compared with the results of finite element method.

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

1. 서론

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 가지고 되었고, 자동차의 경량화를 위한 차체부재의 재료로 많이 연구되어지면서 이러한 소재로 제작된 차체부재의 강도 및 안전성에 관하여 관심이 높아지고 있다.

자동차 충돌사고 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 모우먼트에 의하여 발생한 소성힌지에 의하여 진행된다. 그러므로 설계단계에서 부재가 흡수할 수 있는 변형에너지와 부재의 변형형상을 계산하기 위해서는 굽힘 모우먼트를 받는 부재의 붕괴이후 거동에 관한 연구가 필요하다.

사각관의 굽힘 붕괴에 대한 실험적 연구는 Kecman[1]에 의하여 처음으로 이루어 졌다. 빔의 한쪽단을 완전히 고정하고 모우먼트와 회전각의 특성을 계산하여 외팔보 형태의 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(load pin)을 장치하였다. 이 시험기에서는 굽힘 붕괴시험을 하는 동안에 발생하는 인장력을 최소화하기 위하여 하나의 지지바퀴를 가로방향으로 움직일 수 있게 하였다.

본 논문에서는 60계열 알루미늄합금으로 된 박판 사각관의 굽힘 붕괴의 특성을 기계작된 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.

2. Kecman의 굽힘 붕괴 이론

Fig.1은 Kecman의 굽힘 붕괴 모형을 나타내고 있다. 부재가 굽힘 모우멘트에 의해 붕괴될 때 각 국부 힌지에서 흡수된 에너지들을 모두 합하면 전체 에너지 $W(\theta)$ 가 구할 수 있다. 각 국부 힌지에서 에너지 흡수량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 W_1 &= W_{EF+GH} = 2m_p a \left[\frac{\pi}{2} - \rho - \sin^{-1} \left(1 - \frac{b}{h} \sin \rho \right) \right] \\
 W_2 &= W_{BC} = m_p a \left[\pi - 2 \sin^{-1} \left(1 - \frac{b}{h} \sin \rho \right) \right] \\
 W_3 &= W_{AB+CJ} = 2m_p z_A (\pi - 2\beta) \\
 &= 2m_p (b \sin^2 \rho - h \sin \rho + \sqrt{b \sin \rho (2h - b \sin \rho)} \cdot \cos \rho) \times (\pi - 2 \sin^{-1} (1 - \frac{b}{h} \sin \rho)) \\
 W_4 &= W_{BG+BE+CH+CF} = 4m_p h \frac{\pi}{2} \\
 W_5 &= W_{GK+EL+MN+FM} = 4m_p b \tan^{-1} \left(\frac{z_A}{\sqrt{(h-x_{A2})^2 + (y_{A2}-y_B)^2}} \right) \\
 W_6 &= W_{GA+AE+CH+CF} = 4m_p \frac{h}{r} z_A \\
 W_7 &= W_{KA+LA+NJ+MJ} = \frac{8}{3} m_p \frac{z_A}{r} \sqrt{h^2 + y_B^2 + z_A^2} \\
 W_8 &= W_{KN+LM+KL+MN} = 2m_p \left[a\rho + 2h \tan^{-1} \left(\frac{z_A}{y_A} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

위의 얻은 각 국부힌지의 총합인 총 에너지 흡수량은 다음과 같다.

$$W(\theta) = \sum_i^8 W_i(\theta) \tag{2}$$

이를 이용하여 다음과 같이 모멘트가 구해지며

$$M(\theta) = \frac{W(\theta + \Delta\theta) - W(\theta)}{\Delta\theta} \tag{3}$$

따라서 각 변형각에 대한 모멘트를 계산할 수 있다.

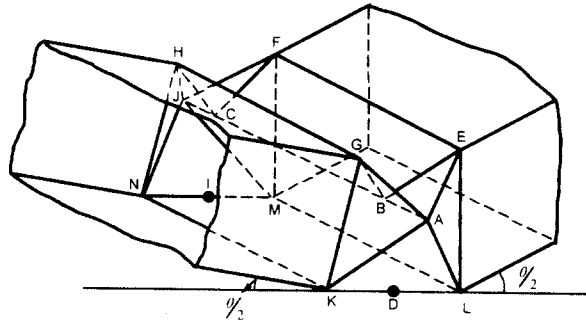
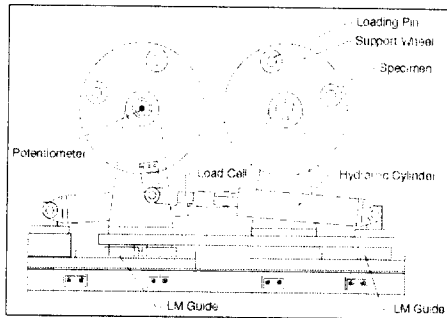


Fig. 1 Kecman 의 굽힘붕괴 모형

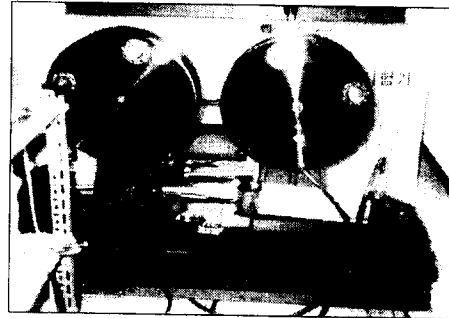
3. 순수 굽힘 붕괴 시험기

본 연구에 사용한 시험기는 순수한 굽힘 모우멘트만 가하기 위해 4점 굽힘 이론을 이용하여 제작된 것이다. 4점 굽힘 방법은 부재의 가운데 부분에 균일한 모우멘트만 발생 시키므로 기존의 시험방법보다 정확한 굽힘 붕괴특성을 측정할 수 있다.

Fig.2는 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.



(a) Drawing of test rig



(b) Photograph of test rig

Fig. 2 Pure bending test rig

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

정하기 위해서 두 개의 지지바퀴 중심에 각각 가변저항기를 설치하였다.

두 지지바퀴의 굽힘 모우먼트와 회전각을 동시에 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 데이터 입력장치를 구성하였다. 로드셀로부터 나오는 신호는 스트레인 증폭기를 통과하며 가변저항기로부터 나오는 회전각 신호는 아날로그 신호 증폭기를 통과한다. 두 아날로그 신호는 A/D 변환기에 의하여 디지털로 바뀌어 개인용 컴퓨터에 저장된다.

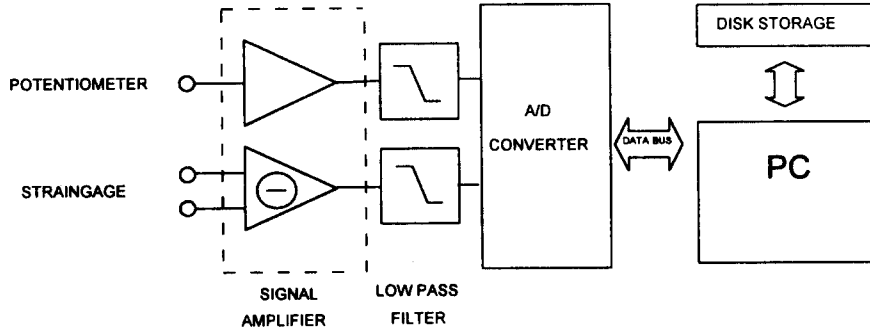


Fig. 3 Schematic diagram of the data acquisition system

3. 굽힘 붕괴 시험

굽힘 붕괴시험은 6061과 6063의 알루미늄으로 만들어진 박판 사각관에 대하여 수행하였다. 시편의 길이는 950mm이며 지지바퀴의 중심사이의 길이는 시험전 550mm로 조정하였다. 하중축이 접촉하는 점에 생기는 붕괴를 막기 위하여 시편의 안쪽 빈공간에 강체로 된 지지대를 넣었다. 이 지지대의 길이는 425mm이며 따라서 시편의 붕괴영역은 100mm이다.

Table.1은 본 논문에서 시험한 시편들의 종류, 크기, 재료상수를 나타내고 있다. Fig.4(a)는 시험기에 장착된 시편을 보여주며, Fig.4(b)는 굽힘 붕괴 시험이 끝난후의 시편을 보여주고 있다. 두 그림에서 지지바퀴의 중심 사이의 길이를 비교해 보면 움직이는 지지바퀴 부분이 시편이 굽혀지는 동안 바깥쪽으로 밀렸다는 것을 알수 있다. 그 이유는 시편의 양단사이의 거리가 줄어든 것보다 두 개의 지지바퀴의 하중축 사이의 거리가 더 많이 줄어들었기 때문이다.

Table 1 Test specimens

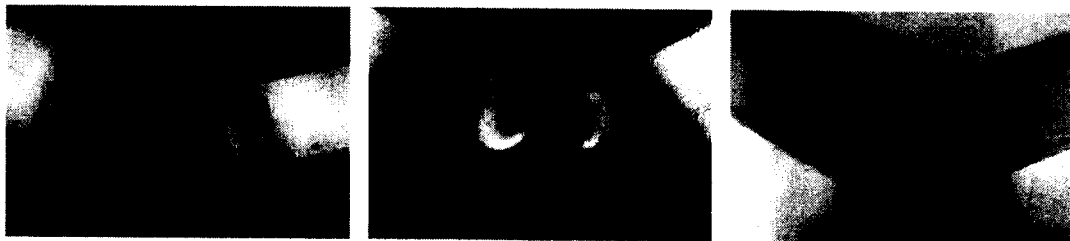
series	number	specimen size	b/t	material constnt
6061	1	20×30×2	10	E = 66GPa ν = 0.33 σ _y = 185MPa σ _u = 218MPa
	2	50×50×3	16.7	
	3	60×70×3	20	
	4	50×50×2	25	
	5	80×50×3	26.7	
	6	70×20×2	35	
6063	7	25×25×3	8.3	E = 62GPa ν = 0.33 σ _y = 180MPa σ _u = 210MPa
	8	50×50×4	12.5	
	9	45×45×1.8	25	
	10	50×50×2	25	
	11	30×80×1.2	25	
	12	45×45×1.2	37.5	
	13	80×30×1.2	66.7	



Fig. 4 Bending collapse test

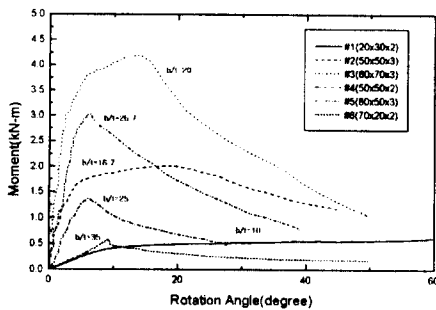
Fig.5은 시험후 시편의 붕괴된 모습이다. (a)는 전형적인 국부좌굴의 모습이며 (b)는 지연좌굴의 모습이다. 알루미늄의 경우 굽힘시험과정에 인장파단(tensile failure)에 의한 붕괴가 발생하게 되는데, (c)는 시험과정에 발생한 인장파단이다. (c)시편의 단면은 $50 \times 50 \times 4\text{mm}$ 이며 b/t 의 값이 12.5으로 시험한 시편중에서 작은 b/t 비율에 속한다.

Fig. 6은 두가지의 재료에 대하여 폭/두께(b/t)의 비의 변화에 따른 굽힘 모우멘트-회전각선도를 보여준다. Fig. 6(a)는 6061계열의 알루미늄에 대한 굽힘 모우멘트-회전각 선도를 그리고 Fig. 6(b)는 6063계열의 알루미늄에 대한 굽힘 모우멘트-회전각 선도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 폭/두께의 비가 늘어날수록 좌굴 형태는 지연좌굴형태에서 국부좌굴의 형태로 변화함을 알 수 있다.

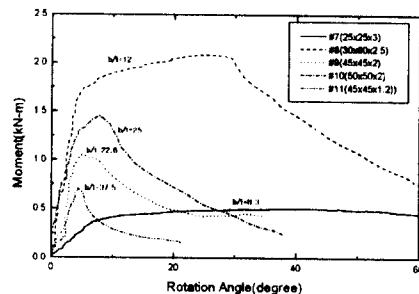


(a) local buckling mode (specimen #4) (b) delayed buckling mode (specimen #2) (c) tensile failure mode (specimen #8)

Fig. 5 Bending collapse shapes



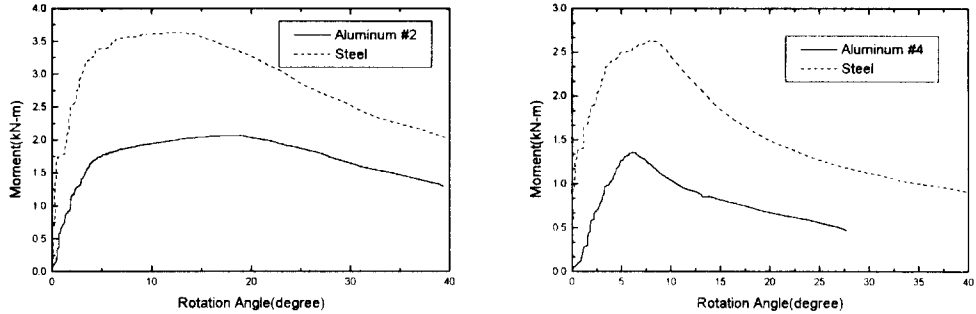
(a) 6061 series



(b) 6063 series

Fig. 6 Moment - rotation angle diagrams

Fig. 7는 단면의 크기와 두께가 같은 연강재료와 6061계열의 알루미늄 사각관의 굽힘 모우멘트-회전 선도를 비교한 것이다. $50 \times 50 \times 3\text{mm}$ 의 단면의 크기를 가진 부재의 중량은 알루미늄으로 이루어진 경우 연강재료의 34%에 불과하지만 최대 모우멘트는 그래프로 표현된 바와 같이 연강재료의 57%이다. 더구나 같은 두께의 경우 알루미늄으로 이루어진 시편이 지연좌굴의 형태에 가깝기 때문에 에너지 흡수량은 더욱 늘어나게 된다.



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

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

Fig. 7 Comparison with steel

4 수치해석 및 검증

수치해석 모델은 국부좌굴, 지연좌굴, 그리고 인장파단이 작용하는 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 국부좌굴의 경우 단면의 크기는 $45 \times 45 \times 1.8\text{mm}$ 로 b/t 의 값이 25이며, 지연좌굴은 단면의 크기가 $50 \times 50 \times 3\text{mm}$ 로 b/t 의 값이 16.7이다.

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

implicit 프로그램에서는 붕괴를 일으키기 위하여 모든 절점에 Fig. 8에서 보여주는 1차 좌굴모드를 이용하여 초기 불균일을 설정하였다. 초기 불균일의 양은 좌굴모드에서 최대의 변위를 갖는 부분에서는 두께의 1%를 설정하였으며, 변위의 크기에 따라 비례적으로 설정하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 관은 2개의 대칭면을 포함하고 있다. 따라서 붕괴거동은 길이가 90mm인 1/4모델을 이용하여 예측할 수 있다. 해석 모델은 변형집중이 예상되는 중심부는 1.4mm 요소, 그외는 2.1mm 크기의 요소가 사용되었다. 경계조건은 1/4 모델의 대칭조건을 설정하여 실제의 전체 관의 대칭거동을 표현하도록 하였다. 또한, 사각관의 끝 절점을 기준점과 강체로 연결하고, 기준점은 축방향으로 구속하지 않았다. 모우멘트는 대칭면상의 기준점(reference node)을 회전시켜 발생시켰다.

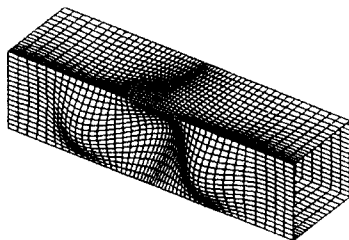


Fig. 8 1st buckling mode shape

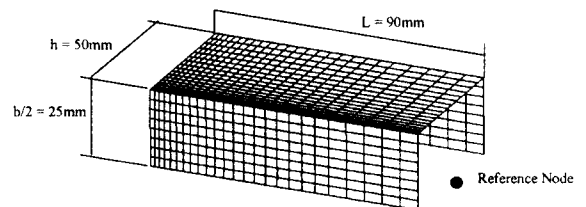


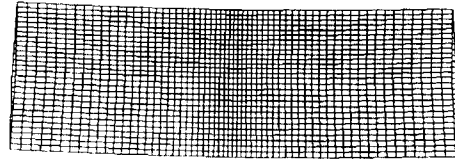
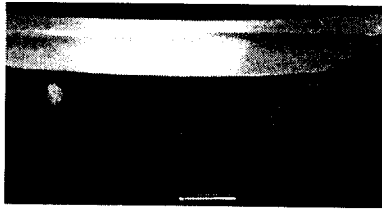
Fig. 9 F.E. model and geometry

explicit 프로그램에서는 기준점의 각속도를 0.0065rad/msec로 하여 준정적 해석을 수행하였다. 계산은 실험에서 30° 변위각도까지인 15° 까지 수행하였다.

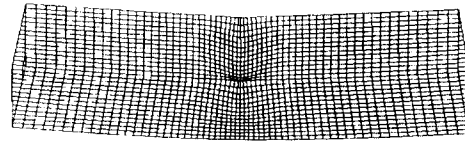
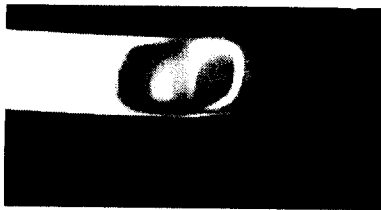
재료는 등방성 탄소성 재료로 표현하였으며, 이 모델에서는 변형속도 효과는 무시하였다. 응력-변형률선도는 부분적인 선형함수의 형태로 입력하였다.

Fig. 10은 해석한 모델중 50×50×3mm의 변형된 형태를 굽힘 각도에 따라서 실제의 실험의 사진과 해석을 통해 얻은 변형형태를 비교하였다.

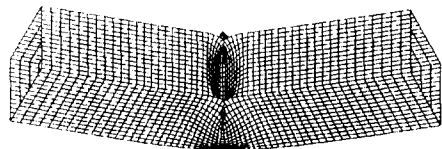
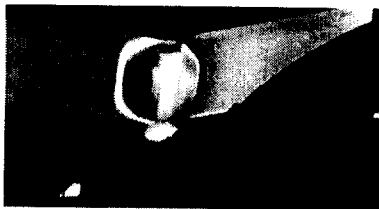
Fig. 10은 해석한 모델중 50×50×3mm의 변형된 형태를 굽힘 각도에 따라서 실제의 실험의 사진과 해석을 통해 얻은 변형형태를 비교하였다.



(a) Deformed shape at 5 degree



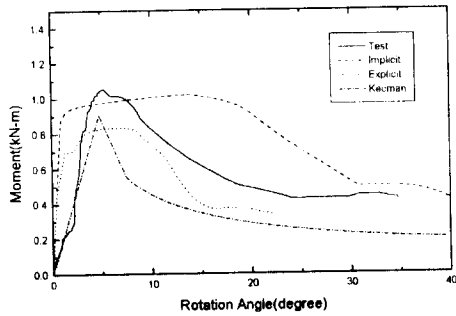
(b) Deformed shape at 13 degree



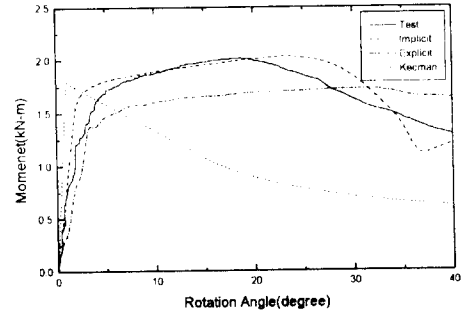
(c) Deformed shape at 34 degree

Fig. 10 Deformed shapes of Al-tube (specimen #5)

Fig. 11은 implicit 프로그램의 결과와 explicit 프로그램의 결과, Kecman의 이론식을 실험결과와 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 11(a)는 국부좌굴의 형태를, Fig. 11(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. 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.



(a) Specimen #9 (45×45×1.8)



(b) Specimen #2 (50×50×3)

Fig. 11 Comparison with experiment

5. 결론

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

- 알루미늄 사각관은 폭/두께비가 25인 것을 전후하여 국부좌굴과 지연좌굴의 형태로 붕괴되었으며, 폭/두께 비가 상당히 작은 경우($b/t < 12.5$)에는 인장파단의 형태가 발생하였다. 따라서 굽힘 붕괴 하중을 받는 알루미늄부재의 단면 설계는 $13 < b/t < 25$ 로 하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- Kecman의 모우멘트-변형각 식은 국부좌굴의 경우 비슷한 경향을 보였으나 지연좌굴의 경우 상당한 차이를 나타내었다.
- 알루미늄 부재와 연강 부재의 굽힘 붕괴 특성을 비교해 볼 때 단위중량당 에너지 흡수율은 알루미늄이 높음을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

1. D.Kecman, *Bending collapse of rectangular section tubes is relation to the bus roll-over problems*, Ph.D.Thesis, Cranfield Institute of Technology, U.K., 1979.
2. S.Kiriakides and P.K. Shaw, "Inelastic Buckling of Tubes under Cyclic Bending", *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol.109, pp.169-178, 1987.
3. E.Corona and S.P.Vaze, "Buckling of Elastic-Plastic Square Tubes under Bending", *Int.J.Mech.Sci.*, Vol.38, No.7, pp.753-775, 1996.
4. S.J.Cimpoeru and N.W.Murray, "The large deflection pure bending properties of a square thin-walled tube", *Int.J.Mech.Sci.*, Vol.35, No.3/4, 1993.
5. 강신유, 장인배, 김현영, "순수굽힘 시험기개발을 통한 박판 사각관부재의 굽힘붕괴특성 연구", 대한기계학회, '97년도 춘계학술대회논문집A, pp.739-744, 1997.
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.