

순수 굽힘 시험기를 이용한 연강 사각관의 굽힘 붕괴에 관한 실험적 연구

김창수*, 정태은*, 송영준**, 강신유***

An Experimental Study on Deep Collapse of Steel Tubes under Pure Bending

Chang-Soo Kim*, Tae-Eun Chung*, Young-Joon Song**, Shin-You Kang***

ABSTRACT

In this paper the bending collapse characteristics of square and rectangular steel tubes were studied with the pure bending test machine which apply pure bending moment without imposing shear and tensile forces. Under pure bending moment, delayed buckling modes occur and depend on test length and shape of section. For delayed mode, the energy of bending moment is absorbed by strain hardening energy. The predictions of maximum moment and moment-rotation angle curve from those concepts are in good agreement with experimental observations.

Key Words : Pure Bending(순수 굽힘), Buckling Mode(붕괴양상), Rotation-Angle(회전각), Delayed Mode(지연붕괴양상)

1. 서론

사각 단면을 갖는 튜브형 부재는 프레임으로 구성되는 차량이나 항공 구조물 및 해양 구조물에 많이 사용되고 있다. 특히 자동차의 구조물로 사용되는 사각단면부재는 차량의 충돌이나 전복시에 차체의 강성을 유지하고 승객의 안전을 확보하는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 축방향의 붕괴에 대해서는 많은 연구자⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾들이 연구하였으나 굽힘에 의한 붕괴는 축방향 붕괴에 비해 상대적으로 연구⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾가 부족한 상태이다. 실질적으로 사각튜브형태의 구조물이 굽힘에 의한 붕괴 시에 그 에너지는 소성 힌지와 같은 대변형에 의하여 흡수된다. 이러한 소성 힌

에 관한 연구는 많은 연구자들⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾에 의해 연구가 진행되어 왔다. 에너지 흡수에 관련된 소성힌지는 고정 소성 힌지와 이동 소성힌지로 분류 된다. 고정 소성힌지는 평면 상에 힌지선이 고정되어 있어 그 선을 중심으로 양측면이 접히면서 에너지를 흡수하는 것이며 이동 소성 힌지는 힌지면을 중심으로 한쪽 면이 다른 한쪽으로 말려가면서 에너지를 흡수하는 것으로 결국 힌지선이 이동하게 된다. Kecman⁽⁸⁾은 사각 튜브를 외팔보에 의한 굽힘 시험과 소성 힌지 개념을 이용하여 사각부재의 굽힘 붕괴 기구를 설명하였으나 Kecman의 이론은 이동 소성힌지의 양측면의 말려드는 반경에 대한 실험적 결과를 포함하고 있다. 이에 반하여 Wierzbicki⁽⁶⁾ 등은 실험에 의하지 않고

* 아주대 대학원 시스템공학과, 고등기술연구원
** 아주대 시스템공학과
*** 강원대 정밀기계공학과

최소에너지(Principle of minimum potential energy) 이론을 이용하여 굽힘 붕괴를 설명하였으며 이를 이론적 근거로 해서 임의의 단면을 갖는 튜브형 부재의 축방향 및 굽힘 붕괴를 예측할 수 있는 프로그램인 CRASH-CAD 를 개발하였다. 순수 굽힘 하중 조건을 구현하려는 시도⁽⁹⁾가 있었지만 대변형 시에 축방향의 인장력과 전단력을 제거할 수는 없었다. 이러한 상황에서 Cimpoeru⁽¹⁰⁾ 등은 Kyriakides⁽⁹⁾ 등의 시험장치를 보완하여 순수 굽힘 하중 조건을 구현하였다. 그러나 이 시험장치는 그 크기가 크고 큰 회전각을 부과 할 수 없는 단점이 있다

본 논문에서는 Cimpoeru⁽¹⁰⁾ 등의 시험장치를 보완하여 그 크기를 줄였으며 큰 회전각까지 측정 가능한 시험장치를 개발하고 이 시험장치를 통하여 다양한 단면 및 두께에 따른 시험을 수행하였다. 이러한 시험적 고찰과 이론적 해석으로 굽힘과 회전각과의 관계를 예측할 수 있는 관계식을 구하였으며 시험결과와 비교하여 그 결과가 일치함을 확인하였다.

2. 순수 굽힘 시험

2.1 시험장치

테스트영역, 즉 붕괴로 인한 변형 영역을 접촉하지 않고 순수 굽힘 하중 조건을 만족하는 방법으로서 통상적으

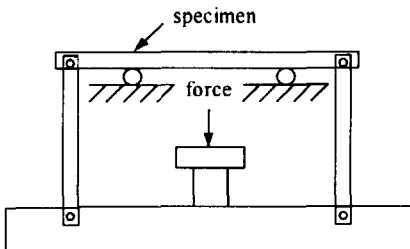


Fig. 1 Concept of 4-point bending machine

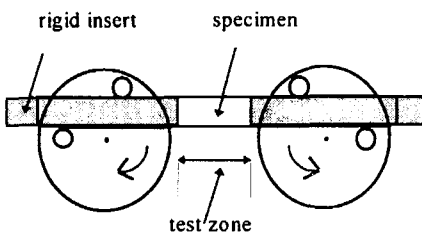


Fig. 2 Concept of pure bending machine

로 사용되는 시험법이 Fig. 1에서 나타나 있는 바와 같이 4 점 하중 조건이다. 이러한 시험방법은 변형이 작은 영역, 즉 탄성 영역에서는 유용한 방법이나 대변형 시험시에는 축방향의 하중과 전단력이 발생하여 순수 굽힘 하중 조건을 유지하기가 곤란하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 2 와 같이 회전판을 이용하여 대변형시에도 순수 굽힘 상태를 유지할 수 있는 장치⁽⁹⁾가 고안되었다. 그러나 이 장치는 회전판이 고정되어 있어 회전각이 클 경우 축방향의 하중이 발생하게 되어 순수 굽힘 하중 조건을 유지하기 어려워진다. 대변형시에 발생하는 축방향의 인장력을 발생하지 않기 위해 Fig. 2에서 한쪽의 회전판을 축방향으로 구속을 풀어 자유롭게 이동할 수 있게 하면 대변형시에도 순수 굽힘 하중 조건을 만족할 수 있게 된다⁽¹⁰⁾. 이상의 개념을 응용하여 실질적 시험수행을 위해 기존의 시험기⁽¹⁰⁾보다 더 큰변형까지 측정가능하며 더 소형의 순수 굽힘 개발하고 이를 통하여 다양한 재질과 단면에 대하여 시험을 수행하였다. Fig. 3과 Fig. 4에 시험기와 그 기구도가 나타나 있다.



Fig. 3 Pure bending machine

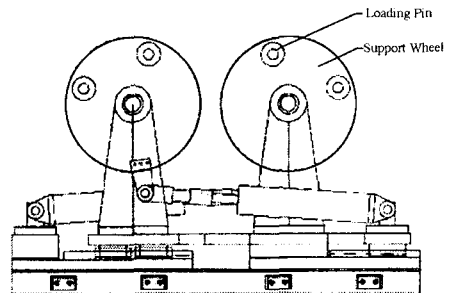


Fig. 4 Schematics of pure bending machine

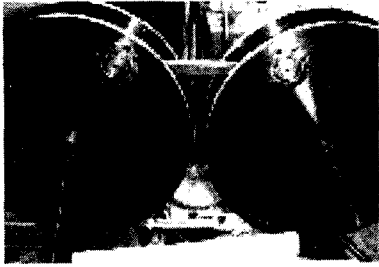


Fig. 5 Onset of pure bending load

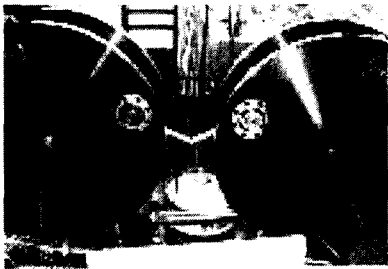


Fig. 6 After pure bending collapse

순수 굽힘 시험기는 회전판 하부에 부착된 두 개의 유압실린더에 의해 회전판이 회전하여 부재의 변형영역에 아무 접촉 없이 굽힐 수 있게 되어 있다. 부재가 굽혀지는 동안 변형영역 양단이 서로 가까워지는 거리보다 두 회전판의 중심축이 멀어지는 거리가 더 크게되어 두 회전판이 서로 멀어지는 현상이 발생한다. 따라서 멀어지는 회전판을 자유롭게 이동하도록 하지 못하면 축방향의 인장력과 전단력이 발생하게 된다. 이러한 부가되는 하중들을 발생하지 않게 하기 위해 한쪽 회전판을 고정하고 다른 쪽 회전판은 자유롭게 축방향으로 움직이게 하여 순수 굽힘 하중 조건을 유지할 수 있게 하였다. Fig.5와 Fig. 6은 시험 전후의 상태를 보여주고 있다. 유압 실린더의 최대 유압은 20MPa 이며, 시험기에서 시험할 수 있는 최대 굽힘 모우멘트는 20kN-m 이다. 유압실린더의 행정 길이는 270 mm 이며 최대 회전각은 90°이다. 시험 가능한 부재의 최대 단면은 가로 100 mm 세로 95 mm 까지 시험 가능하다.

2.2 시험

이상에서 기술된 순수 굽힘 시험기를 통하여 사각 단면을 갖는 튜브형 연강 부재를 시험하였다. 총 27 중 120

개의 부재가 시험되었다. 시험시 하중점 근처의 국부적 변형을 방지하기 위하여 강성이 높은 재료를 부재 양 끝단에 삽입하였으며 변형 영역은 부재 가로의 약 3배로 주었으며 최대 100 mm를 넘지 않게 하였다. 이 수치는 시험 결과 굽힘 붕괴 거동을 가장 적절히 표현 할 수 있는 수치이다.⁽¹⁰⁾

3. 결과 분석

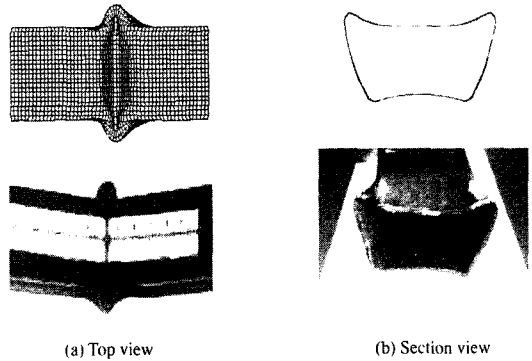
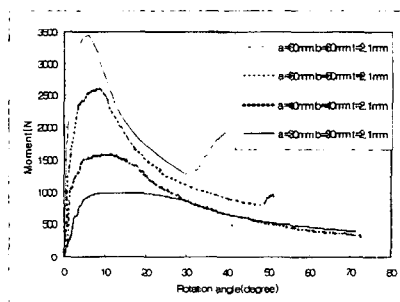
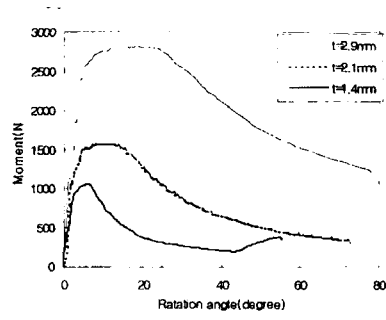


Fig. 7 Test and simulation for a=40mm, b=40mm, t=1.4mm



(a) Different section with same thickness



(b) Different thickness for a=40 mm b=40mm

Fig. 8 Moment-rotation angle curves for various sectional dimension

순수 굽힘 시험과 해석 결과가 Fig. 7 에 나타나 있다. Fig. 7 은 가로 $a=40$ mm, 세로 $b=40$ mm, 두께 $t=1.4$ mm 연강 부재의 해석과 시험의 결과를 굽힘 변형 부분을 중심으로 나타나 있다. 단면의 두께가 일정할 경우 단면의 크기에 따른 시험 결과가 Fig. 8(a) 에 나타나 있다. 단면의 크기에 비해 두께가 두꺼울수록 굽힘 붕괴 양상은 국부적 붕괴(local buckling)에서 지연적 붕괴 양상(delayed buckling mode)으로 변화하고 있다. 국부적 붕괴와 지연적 붕괴를 구분하는 명확한 기준은 아직 정립되어 있지 않지만, 10° 이내의 회전각에서 최대 굽힘 하중에 도달한후 급격한 저항력의 감소로 붕괴되는 경우 국부적 붕괴라 볼 수 있다. Fig. 8(b) 에서 보는 바와 같이 같은 단면을 갖는 부재에서 두께가 두꺼울수록 최대 모우멘트는 증가하고 붕괴 양상은 지연적 붕괴 양상을 보이고 있다. 이와 같은 붕괴양상을 예측하기 위해서 새로운 붕괴양상지수 f 를 이용한다. 붕괴 양상은 단면의 형상에 밀접한 연관이 있는데 시험 결과 가로의 3/4 제곱근과 세로의 1/4 제곱근에 근사하게 비례하며 두께에는 반비례함을 보였다. 따라서 f 는 본 시험의 결과로 도출된 시험적 지수로서 아래와 같이 정의한다.

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

이상으로 정의되는 f 는 붕괴 모드를 결정하는 변수로서 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 $f > 20$ 이면 국부적 붕괴 양상을 나타내고, $f < 20$ 이면 지연적 붕괴 양상을 나타낸다고 볼 수 있다. 또 Fig. 11에 나타나 있는바와 같이 단면의 형상, 즉 가로, 세로, 두께에 상관없이 같은 f 값을 갖는 부재는 같은 붕괴 양상을 나타낸다. Fig. 11에서는 각각

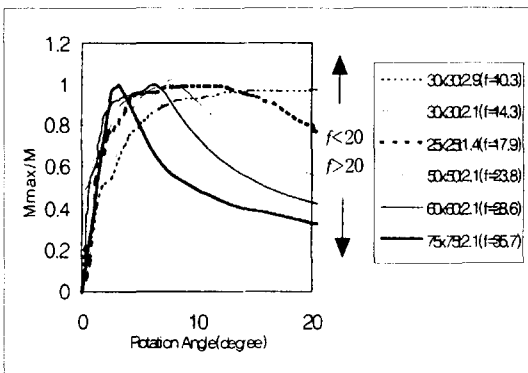


Fig. 9 Normalized moment-rotation curves for varying f

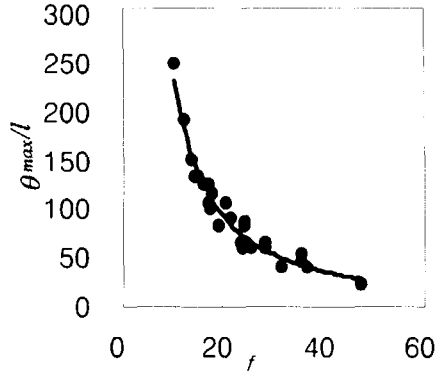


Fig. 10 Experimental equation curve for maximum angle

지연모드와 국부적 붕괴모드를 나타내는 $f = 17, f = 24$ 일때의 여러 단면에 따른 붕괴 양상을 나타내고 있다. 다양한 가로, 세로, 두께 비를 갖지만 f 값은 같은 경우에는

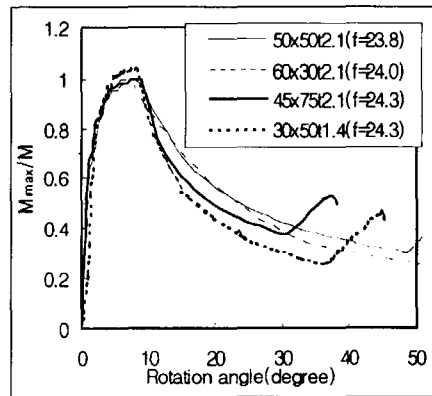
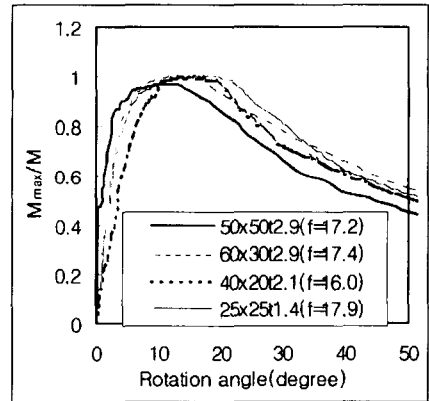


Fig. 11 Normalized moment-rotation angle curves for delayed mode($f=17$) and local buckling mode($f=24$)

그 붕괴 모드들은 서로 같음을 알수 있다.

따라서 구조적으로 필요한 부재의 선택에 있어서 최적의 f 값을 얻고 이를 통해 주어진 구속 조건하에서 가로, 세로, 두께를 결정할 수가 있다. Fig. 10에서와 같이 최대의 굽힘 모우멘트와 그때의 회전각과의 관계를 도식하면 다음과 같이 f 의 함수로 표현이 가능해진다.

$$\theta_{max} / l = 5846 \cdot f^{-1.38}$$

여기서 l 은 변형 영역의 길이를 나타내며 본 시험에서는 단면의 가로의 3배이며 최대 100 mm 이다.

4. 이론적 고찰

기존의 굽힘 붕괴를 설명한 방법은 부재가 최대 굽힘 모우멘트를 갖는 회전각을 구할 수 없었기 때문에 항복응력 이상의 응력상태에서 지연되는 현상을 설명하지 못하여 항복응력을 붕괴후의 거동은 설명할 수 있었으나 이는 부적 붕괴 시에는 어느 정도 신뢰성이 있지만 지연모드에서는 적용하기에는 어려움이 많았다. 본 논문에서는 매기변수 f 를 이용하여 각부재의 최대 굽힘응력시의 회전각을 구할 수 있으므로 지연모드 까지 굽힘 붕괴 양상을 예측할 수 있다.

4.1 굽힘 붕괴 양상 예측 이론

Fig. 12 에서와 같이 변형 영역이 순수 굽힘을 받을 때 변형률은

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\theta} \cdot z}{l} \tag{1}$$

로 표현이 가능하고 여기서 변형 영역에서의 에너지 흡수

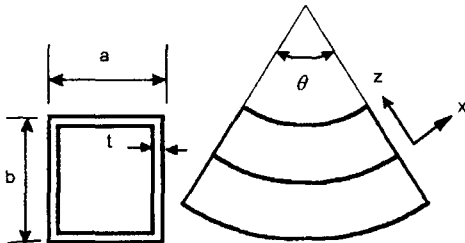


Fig. 12 Bent test zone

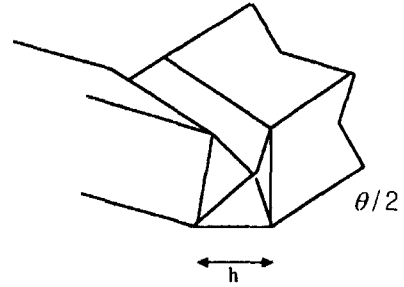


Fig. 13 local bending collapse mechanism

율은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \dot{U} = \int_V \sigma \dot{\epsilon} dV = \sigma \dot{\epsilon} l \Delta z \tag{2}$$

$$\Delta U = \int_0^l \sigma \dot{\theta} \cdot z \Delta z dt \tag{3}$$

여기서 소성영역의 σ 를 ϵ 의 2차 함수로 근사하여 나타낼 수 있으므로 (3) 식을 정리하면

$$\begin{aligned} \sigma(\theta) &= A \cdot \epsilon^2 + B \cdot \epsilon + C \\ &= A \cdot \left(\frac{\theta z}{l}\right)^2 + B \cdot \left(\frac{\theta z}{l}\right) + C \end{aligned}$$

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

$$U_1 = \frac{A \theta^3}{3l^2} z^3 + \frac{B \theta^2}{2l} z^2 + C \theta z$$

$$U = t \int U_1 dz$$

$$U(\theta) = t \int U_1(\theta, z) dz \tag{4}$$

$$U_{flange} = t \int_0^{b/2} U_1 dz$$

$$U_{web} = a \int_{b/2}^b U_1 dz$$

로 포함 수 있다. 사각 단면은 위, 아래의 2개의 프랜지(flange) 부분과 중립축을 중심으로 압축과 인장을 받는 양 측면의 4 부분의 웹(web)으로 구성되어 있으므로 변형영역 전체에서 흡수되는 소성 에너지는 U_{total} 는

$$U_{total} = 2 \cdot U_{flange} + 4 \cdot U_{web} \tag{5}$$

로 표현할 수 있다. 여기서 에너지는 모우멘트와 회전각의 적분 값이므로 모우멘트는

$$M(\theta) = \frac{U_{total}(\theta + \Delta\theta) - U_{total}(\theta)}{\Delta\theta} \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수가 있다.

4.2 시험과의 비교

최대 굽힘 모우멘트에 해당하는 회전각을 지나면 Fig. 13 과 같은 붕괴 메카니즘에 의해 급격히 붕괴된다. 본 이론으로 계산된 최대 굽힘 모우멘트의 기존의 이론에 의해 계산된 최대 굽힘 모우멘트와의 비교를 Table 1 에 나타내었다. 여기서 각 부재별 물성치는 그 제조 과정에 따른 편차가 심하여 각 각에 대하여 물성치 시험을 통하여 그 값을 이용하였다. Kecman⁽⁸⁾ 에 의해 계산된 최대 모우멘트는 실제보다 적게 평가되는 경향을 보이고 있다. 이것은 Kecman 은 항복 응력 까지만 을 고려해서 그 이후에는 급격한 붕괴가 일어난다고 보았기 때문이다. 상용 소프트웨어인 CRASH-CAD에 의해 계산된 모우멘트는 실제보다 크게 나타나고 있다. 본 시험과 이

론을 바탕으로 계산된 최대 굽힘 모우멘트는 실제 시험 값과 약 7% 이내의 오차로 잘 일치함을 볼 수 있으며 이를 바탕으로 굽힘 붕괴 거동을 예측하여 Fig. 14 에 나타나 있다.

5. 결 론

굽힘에 의한 붕괴현상에 대한 연구는 프레임 형태의 구조물의 붕괴 현상을 설명하는데 매우 중요하다. 약 20년 전부터 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔지만 이들 대부분은 주로 외팔보 형태의 시험조건에서 시험을 수행하여 연구해 왔다. 그러나 이는 순수한 굽힘에 의한 붕괴조건을 만족 할 수가 없으므로 새로운 개념에 의해 대변형시에도 순수 굽힘 하중조건을 유지할 수 있는 시험기를 개발하였다. 이 시험기를 통해 다양한 단면을 갖는 부재의 순수 굽힘 붕괴의 특성을 살펴보았다. 다양한 부재의 시험을 통해 붕괴 모드가 매개변수 f 에 따라 유사성을 갖는 것을 알 수 있었다. 즉 가로, 세로, 두께의 함수로 표현되는 f 가 단면이 달라도 서로 같을 경우 그 붕괴 모드는 서로 유사함을 볼 수 있었다. 또 $f > 20$ 이면 국부적 붕괴 모드가 되고, $f < 20$ 이면 지연적 붕괴 모드가 된다. 따라

Table 1. Comparison the result eq.(6) with experimental and other results.

section (mm) a x b x t	f	yield stress (Mpa)	ultimate stress (Mpa)	a/b	Maximum Moment (Nm) (error %)			
					experiment	Kecman[8]	CRASH-CAD	equation [6]
25 x 25 x 1.4	17.9	350	395	1.0	472	410 (-13%)	489 (+4%)	442 (-7%)
40 x 40 x 1.4	28.6	323	366	1.0	1043	1011 (-3%)	1114 (+7%)	996 (-5%)
50 x 50 x 1.4	35.7	380	418	1.0	1748	1824 (+4%)	2013 (+15%)	1796 (+3%)
30 x 50 x 1.4	24.3	340	382	0.6	1234	1224 (-1%)	1347 (+9%)	1185 (-4%)
40 x 20 x 1.4	24.0	345	395	2.0	436	431 (-1%)	502 (+15%)	449 (+3%)
45 x 75 x 1.4	36.5	344	372	0.6	2820	2781 (-1%)	2998 (+6%)	2619 (-7%)
30 x 30 x 2.1	14.3	327	360	1.0	983	803 (-18%)	984 (+0%)	990 (+1%)
40 x 40 x 2.1	19	342	367	1.0	1585	1549 (+6%)	1790 (+13%)	1683 (+6%)
50 x 50 x 2.1	23.8	335	365	1.0	2627	2422 (-8%)	2699 (+3%)	2493 (-5%)
60 x 60 x 2.1	28.6	374	483	1.0	3638	3951 (+9%)	4467 (+23%)	3909 (+7%)
75 x 75 x 2.1	35.7	340	367	1.0	5732	5546 (-3%)	6066 (+6%)	5509 (-4%)
20 x 40 x 2.1	11.3	350	390	0.5	1317	1028 (-22%)	1309 (-1%)	1329 (+1%)
30 x 60 x 2.1	17.0	325	360	0.5	2545	2248 (-12%)	2553 (+0%)	2402 (-6%)
40 x 20 x 2.1	16	350	390	2.0	733	618 (-16%)	768 (+5%)	744 (+2%)
60 x 30 x 2.1	24.0	325	360	2.0	1450	1370 (-6%)	1582 (+9%)	1484 (+2%)
60 x 40 x 2.1	25.8	343	370	1.5	2250	2100 (-7%)	2363 (+5%)	2212 (-2%)
75 x 45 x 2.1	31.4	343	367	1.7	3011	2917(-3%)	3185(+6%)	2976(-1%)
30 x 30 x 2.9	10.3	352	396	1.0	1800	1128(-37%)	1492(-17%)	1761(-2%)
40 x 40 x 2.9	13.8	402	436	1.0	2817	2411 (-14%)	2939 (+4%)	2955 (+5%)
50 x 50 x 2.9	17.2	343	390	1.0	3740	3314(-11%)	4001(+7%)	3765(+1%)
60 x 60 x 2.9	20.7	410	494	1.0	6279	5819(-7%)	6808(+8%)	6116(-3%)
30 x 60 x 2.9	12.3	345	390	0.5	3667	3183(-13%)	3821(+4%)	3906(+7%)
50 x 30 x 2.9	15.2	425	493	1.7	2450	2030(-17%)	2569(+5%)	2469(+1%)
60 x 30 x 2.9	17.4	341	392	2.0	2194	1818(-14%)	2360(+8%)	2303(+5%)

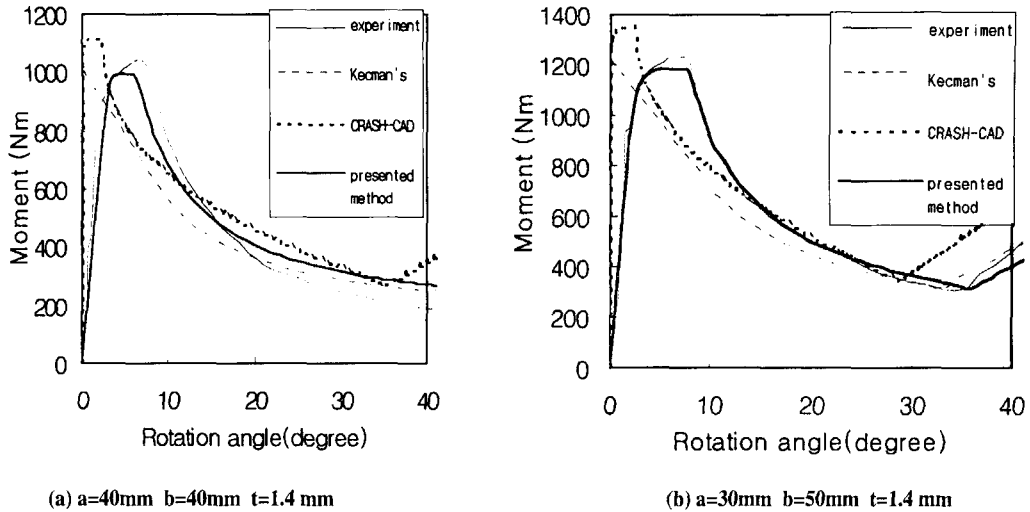


Fig. 14 The results of test and other methods

서 임의의 단면을 갖는 부재의 붕괴 모드는 그 단면의 기하학적 형상으로 붕괴 모드를 예측할 수가 있다. 따라서, 주어진 구속조건과 경계조건하에서 최적의 단면을 설계할 수 있게 된다. 최대 굽힘 모우멘트가 작용할 때의 회전 각도 f 의 함수로 나타낼 수가 있어 임의 부재의 굽힘 모우멘트와 회전각사이의 관계를 예측할 수가 있다. 현재 널리 사용되고 있는 Kecman⁽⁸⁾에 의해 예측된 최대 굽힘 모우멘트는 실제보다 적게 나타나며 또한 지연 모드를 전혀 설명할 수가 없다. 상용 소프트웨어인 CRASH-CAD에 의해 예측된 최대 굽힘 모우멘트는 실제보다 크게 나타남을 알 수 있었다. 본 논문에 의해 예측된 최대 굽힘 모우멘트는 실제에 비해 7% 정도의 오차로 잘 일치함을 확인하였다. 이상의 시험과 이론을 바탕으로 붕괴모드를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 뿐 아니라 예측된 붕괴 모드를 이용하여 붕괴 해석시 단순 모델에 적용함으로써 신속하고 정확한 해석이 가능하게 되어 초기설계단계에서 최적설계가 가능하다.

참고문헌

1. I.K.McIvor, W.J.Anderson and M.Buak-Zochowski, An Experimental Study of the Large Deformation of Plastic Hinges, Int. J. Solids Structures 13, pp. 53-61, 1977.
2. Q.Meng, S.T.S. Al-Hassani and P.D.

- Soden, Axial Crushing of Square Tubes, Int. J. Mech. Sci. Vol. 25, No 9-10, pp. 747-773, 1983.
3. T.Wierzbicki and W.Abramowicz, On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures, J. Appl. Mech. 50, pp. 727-739, 1983.
4. R.Y.Hayduk and T.Wierzbicki, Extensional Collapse Modes of Structural Members, Computer and Structures, Vol. 39, No. 3, pp 447-458, 1984.
5. T.Wierzbicki, L.Recke, W.Abramowicz, T. Gholami and J.Huang, Stress Profile in Thin-walled Prismatic Columns Subjected to Crush Loading - I Compression, Computer and Structures, Vol. 51, No. 6, pp 611-623, 1994.
6. T.Wierzbicki, L.Recke, W.Abramowicz, T. Gholami and J.Huang, Stress Profile in Thin-walled Prismatic Columns Subjected to Crush Loading - II Bending, Computer and Structures, Vol. 51, No. 6, pp 625-641, 1994.
7. H.F.Mahmood, A.Paluszny, Y.S.Lin, Bending Deep Collapse of Automotive Type Com-

- ponents, SAE technical paper 885044, 1988.
8. D.Kecman, Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes, Int. J. Mech. Sci., Vol 25, No. 9,10, pp 623-636, 1983.
 9. S.Kyriakides and P.K.Shaw, Inelastic Buckling of Tubes Under Cyclic Bending, J. Pressure Vessel Technology , Vol. 109, pp. 169-178, 1987.
 10. 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, pp. 247-256, 1993.