

# 열린 단면 부재의 굽힘 붕괴 실험 및 해석에 관한 연구

이승철<sup>#</sup>, 강신유<sup>\*</sup>

## A Study on the Bending Collapse at the Open Cross-Section Members with Experiment and Analysis

Seung-Chul Lee<sup>#</sup>, Shin-You Kang<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

The open section members have been used as the members of vehicle such as automotives, airplanes and trains. When vehicles are crashed, these members have absorption of the energy and it is necessary for retainment of the survival space, and as the result, the prediction for the displacement of members in this case of the crash of vehicles is very important. The displacements of members in this case of the crash of automotives show combined aspect of both axial collapse and bending collapse. In the rollover accident when bending collapse happen, the collapse of each members is progressed by the plastic hinge which made from bending moment, and therefore the research for the behavior of members under bending moment after collapse is necessary to determine the internal energy which the members can absorb and the deformed shapes of the members on the step of design. In this paper, the characteristics of bending collapse at the members of the open cross-section were studied with experiment and numerical analysis. We made a comparative studied of the result of the experiment, and changed the axis according to the parallel-axis theorem.

**Key Words** : Open cross-section members(열린 단면 부재), Bending collapse(굽힘붕괴), Pure bending collapse test(순수굽힘붕괴시험), Shear center(전단중심), Bending collapse analysis(굽힘붕괴해석)

### 1. 서론

사각 단면을 갖는 튜브형 부재와 L자형, T자형, C자형과 같이 열린 단면 부재는 경량화를 요구하는 고속전철, 항공기, 자동차의 주요 부재로 사용되며 특히 자동차에서 차량의 충돌이나 전복 시에 차체의 강성을 유지하고 승객의 안전을 확보하는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 축방향 붕괴에 대해서는 많은 연구자<sup>1-5</sup>들이 연구하였으나 굽

힘에 의한 붕괴는 축방향 붕괴에 비해 상대적으로 연구<sup>6-7</sup>가 부족한 상태이다.

본 논문에서는 Cimpoeru 등의 시험장치를 보완하여 그 크기를 줄였으며 큰 회전각까지 측정 가능한 시험장치인 순수 굽힘 붕괴 시험기<sup>8-10</sup>를 이용하여 열린 단면 부재에 대한 시험을 수행하고, Implicit 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용<sup>11</sup>하여 해석한 결과를 비교 하였다. 그리고 굽힘축을 상·하로 변화시키면서 실험하여 탄성영역

접수일: 2003년 7월 3일; 게재승인일: 2004년 1월 9일  
 # 교신저자, 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부  
 Email: dr237@netian.com Tel. (033) 256-6373  
 \* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

내에서 단면 관성 모멘트 변화에 따른 결과를 비교하려 한다.

## 2. 시험

### 2.1 순수 굽힘 붕괴 시험기

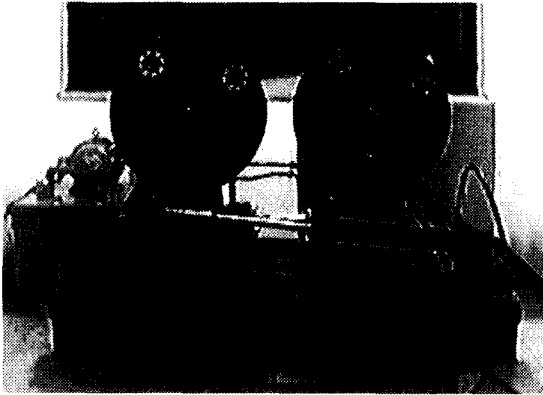


Fig. 1 Pure bending collapse machine

Fig.1 의 순수 굽힘 붕괴 시험기는 대변형이 일어날 때 발생하는 축방향 인장력이 발생하지 않도록 Fig. 2 에 보이는 것과 같이 한쪽 회전판의 축방향 구속을 풀어 자유롭게 이동할 수 있도록 하여 대변형이 일어나도 순수 굽힘 하중조건을 만족할 수 있게 한다.

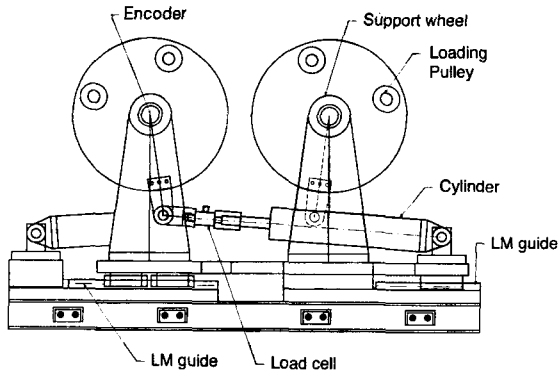


Fig. 2 Schematics of pure bending collapse machine

순수 굽힘 붕괴 시험기의 유압실린더의 최대 유압은 20MPa 이며, 시험기에서 시험할 수 있는 최

대 굽힘 모멘트는 20kN-m 이다. 유압실린더의 행정길이는 270mm 이며 최대 회전각은 90°이다. 시험 가능한 부재의 최대 단면은 가로 100mm, 세로 95mm 이다.

각도와 힘의 측정에는 각각 Encoder 와 Strain-Gage 를 사용하였으며, Encoder 는 Incremental Type 으로 사양은 Table 1 과 같고, Strain-Gage 는 120Ω 의 저항값을 갖는 것으로 2 개씩 2 조를 실린더 로드와 Support Wheel 의 연결부분에 설치하였으며 사양은 Table 2 와 같다.

Table 1 The capacity of the encoder used

Type	Incremental Type, TRD-S
Size	Φ38×30mm (Shaft Φ6 mm)
Resolution	2000 Pulse / Rotation

Table 2 The capacity of the strain gage used

Type	AE-11-S10S-120-EL
Temp. Compensation	Steel
Gage Factor	2.1±1.0%
Transverse sensitivity K	1.2±1.0%
Resistance	120Ω±1.0%

Strain-Gage 에서 얻는 값과 실제의 작용하는 힘과의 관계규명을 위하여 압축시험기를 이용하여 Calibration 한 그래프는 Fig. 3 과 같다.

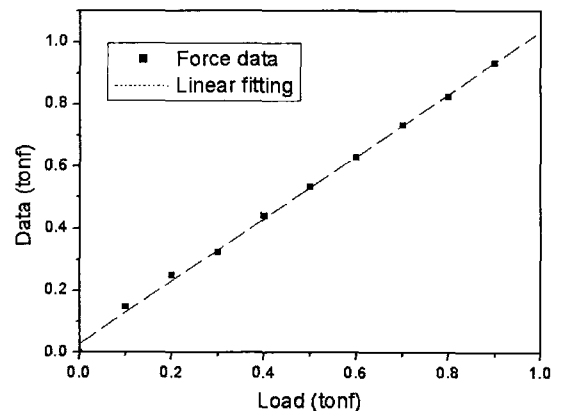


Fig. 3 Strain-Gage Calibration data

## 2.2 굽힘축을 전단중심으로 지정한 시험

### 2.2.1 지그의 제작 및 시험

순수 굽힘 붕괴를 유도하기 위하여 Fig. 4 에서 나타내는 것과 같이 채널의 단면적에 도심이 굽힘축으로 작용하면 채널에 뒤틀림 모멘트가 발생하여 채널의 형태가 뒤틀려 구부러지는 현상이 생긴다.

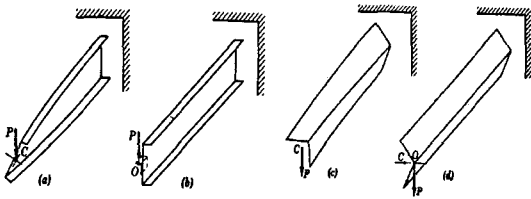


Fig. 4 Effect of applying load through shear center

하지만 굽힘축을 전단중심으로 지정하면 순수 굽힘 모멘트를 발생시킬 수 있다. 이를 시험에 적용하여 순수 굽힘 모멘트만을 발생시키기 위한 지그를 제작하였고, Fig. 5 에서 C 는 지그의 도심을 나타내며 채널의 전단중심과도 일치한다.

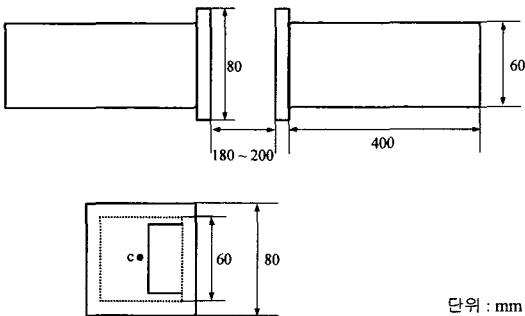


Fig. 5 Schematics of Jig, centroid and shear center

시험에 사용되는 시편은 채널, Lipped channel, L 형강, ㄱ자형 강 등 8 가지의 시편을 사용하여 비대칭 열린 단면 부재의 특성을 알아보려고 한다. 열린 단면부재의 각 치수 및 형상은 Table 3 및 Fig. 6 과 같다.

Table 3 Dimension of specimen

No. #	Flange	Web	Lip	Thick
1-2	50	25		2
3	50	30		2
4	50	35		2
5-6	60	30	10	1.5
7-8	30	30		3

[Unit : mm]

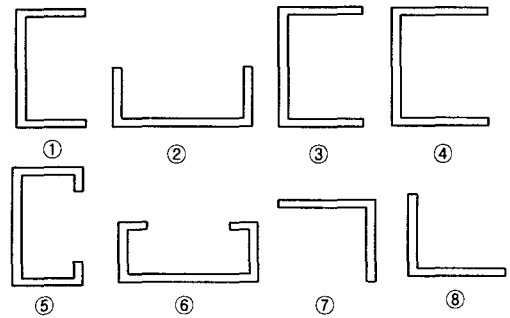


Fig. 6 Shape of specimen

시편 #1, #2 는 같은 크기의 채널을 옆으로 열린 단면 부재와 윗면으로 열린 단면부재의 굽힘 특성을 비교하며, 시편 #1, #3, #4 는 Flange 의 끝부분의 Web 의 길이 변화에 따른 특성을 비교하고자 한다. 또한 시편 #5, #6 은 시편 #1, #2 에서와 같이 Lipped channel 의 특성을 비교하며, 시편 #7, #8 은 ㄱ자형 강과 L 형강의 굽힘 특성을 비교해 보고자 한다.

### 2.2.2 결과분석

순수 굽힘 붕괴 시험기로 굽힘 모멘트를 가하여 시험한 결과 각 시편의 변형 형상은 Fig. 7 과 같고, 각 시편별 측정된 모멘트-변형각 선도를 비교하여 Table 4 와 같은 결과를 얻었다.

No. #	Before test	After test
#1		

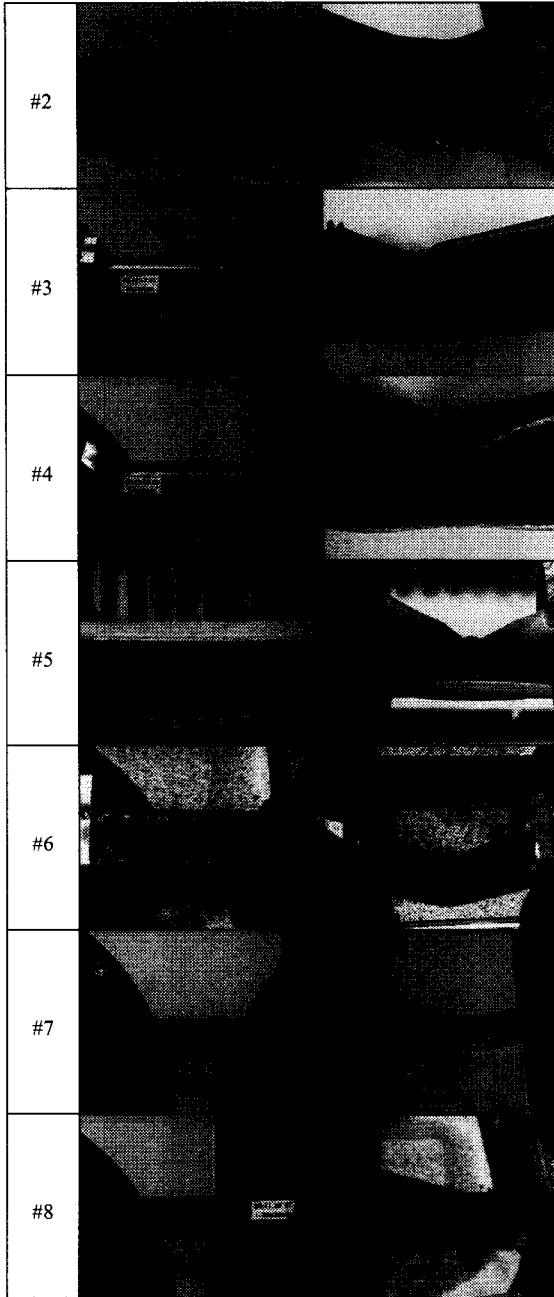


Fig. 7 Comparison of before test with after test

Table 4 Result of test for each specimen

No. #	Degree for increasing of Moment	Degree for occurrence of Max. Moment
#1	2-3°	3°
#2	5°	23°
#3	6°	6-7°
#4	4°	4-7°
#5	4°	4-7°
#6	4°	4-7°
#7	3°	30°
#8	8°	30°

### 2.3 굽힘축을 전단중심에서 상·하로 이동한 시험

#### 2.3.1 시험

시험에 사용되는 시편은 30×29×3t 의 열린 단면 형태로 제작하였고, 시편을 지그의 굽힘 중심축에서 Fig. 8 과 같이 임의의 값만큼 이동을 시켰을 때의 특성과 이에 따른 모멘트-변형각 선도의 변화를 비교하고자 한다.

[Unit : mm]

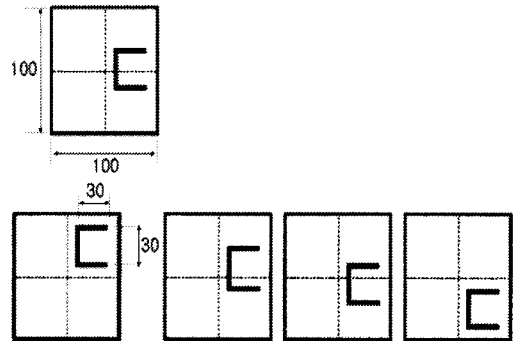


Fig. 8 Offset scale of specimen

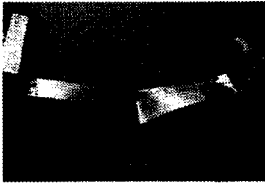
굽힘축을 전단중심에서 상·하로 변화를 주었을 때의 특성을 비교하기 위하여 다음과 같이 3 가지의 경우에 대하여 시험하도록 한다.

1. 굽힘축을 전단중심과 일치
2. 굽힘축을 전단중심에서 상·하 5mm 이동

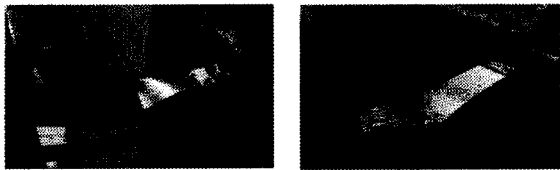
3. 굽힘축을 전단중심에서 상·하 25mm 이동

2.3.2 결과분석

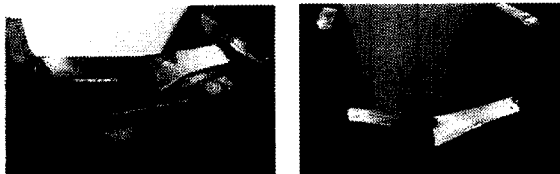
제시된 3 가지 경우에 대해 시험한 결과 각 경우의 실험에 대한 변형 형상과 모멘트-변형각 선도는 Fig. 9 와 같다.



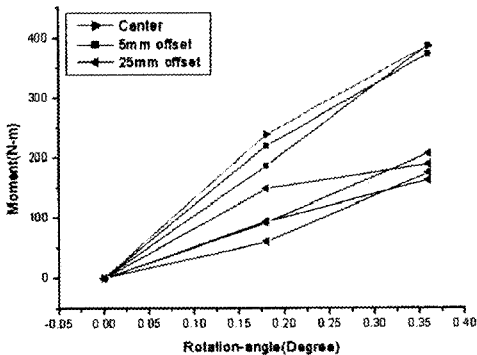
(a) Shape of test for case 1



(b) Shape of test for case 2



(c) Shape of test for case 3



(d) Moment-rotation curve for each case

Fig. 9 Result of offset test

굽힘축을 전단중심에서 상·하로 이동하여 탄성 구간에서의 굽힘 붕괴 곡선을 실험적으로 살펴본 결과 이동된 거리에 비례하여 시편에 모멘트가 더 작용하게 됨으로 실제로 가해지는 모멘트 값은 중심에 있을 경우에 비해 거리에 비례적으로 줄어들 수 있다.

3. 수치해석

3.1 굽힘축을 전단중심으로 지정한 해석

3.1.1 모델링 및 하중조건

해석을 위한 모델<sup>12</sup>에서는 모델 단면의 전단중심을 구한 후 그 단면의 절점들을 단면 도심의 지정한 절점에 구속시키고 도심의 절점에 회전 변위를 주었다. 따라서 도심에 지정한 절점을 회전시키면 이 절점과 구속되어 있는 단면의 절점들은 변형하게 되며, 모델은 Fig. 10 과 같다.

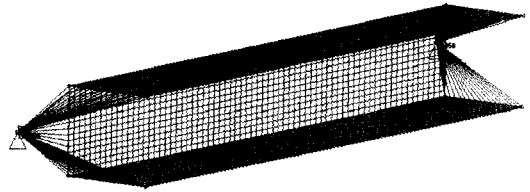


Fig. 10 Model and geometry

도심의 절점의 강제변위는 0.05rad/step 으로 적용하였다. 즉 하나의 Step 동안 절점은 0.05rad 회전한다. 이러한 Step 을 8 개를 수행시켜 결과적으로 절점은 0.4rad 회전하게 되며 이를 Degree 로 환산하게 되면 20.05°이며 양쪽의 회전으로 계산하면 40.1°의 굽힘 각이 발생하게 된다.

해석은 해석모델에 탄성 좌굴해석을 통하여 얻은 초기 불균일을 모델에 적용시켜 해석<sup>13</sup> 한다. 초기 불균일은 셀두께의 1%로 하였으며, 좌굴모드는 시험을 통하여 나타난 형태와 유사한 형태를 선택하여 적용시켰다.

3.1.2 결과분석

각각의 해석 결과는 Fig.11 과 같다. 변형 형상을 보면 Fig. 7 에서 제시된 시험결과와 유사하게 나타났다.






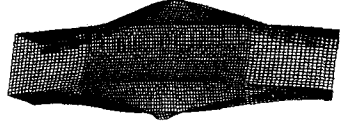
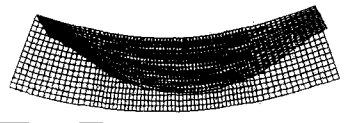
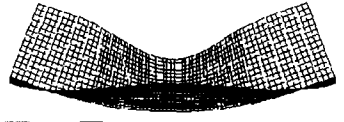
No.#	Deform Shape of Specimen	Degree
#1		40.11°
#2		40.11°
#3		40.11°
#4		40.11°
#5		34.38°
#6		40.11°
#7		40.11°
#8		40.11°

Fig. 11 Deform shape of each analysis

### 3.2 굽힘축을 전단중심에서 상·하로 이동한 해석

Fig.12 는 순수 굽힘 붕괴 시험기의 한쪽 휠을 간략하게 나타낸 것이다.

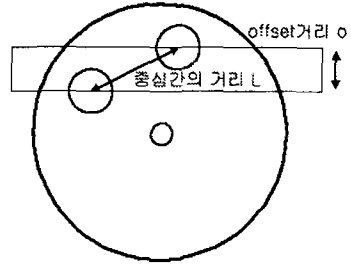


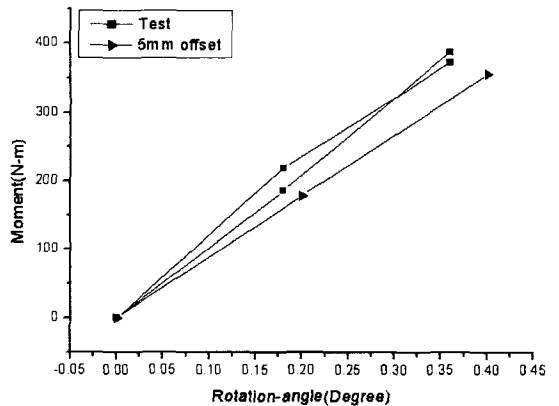
Fig. 12 Pure bending collapse machine

휠이 회전하면서 힘이 가해지는 두 부분의 길이를  $L$  이라고 하고 굽힘축에서 상·하 이동한 거리를  $O$  라고 하면 시편에는 굽힘축에서 상·하 이동한 거리만큼의 힘이 더 가해지게 되며 그 힘을 처음의 모멘트 값에서 빼주면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

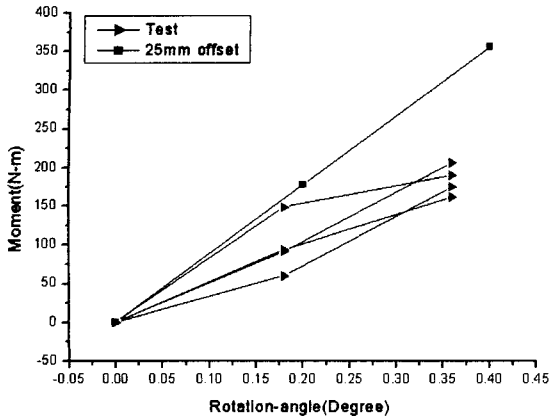
$$M_{offset} = M - (M \times \frac{O}{L}) \quad (1)$$

여기서  $M_{offset}$  은 굽힘축에서 상·하 이동한 시편에 가해지는 모멘트 값이고,  $M$  은 굽힘축과 전단중심이 일치하는 경우의 모멘트 값이다.

굽힘축이 전단중심에서 상·하 이동한 경우의 모멘트-변형각 선도를 그려보면 Fig. 13 과 같다.



(a) Moment-rotation angle curve for 5mm offset



(b) Moment-rotation angle curve for 25mm offset

Fig. 13 Moment-rotation angle curve of analysis

#### 4. 결론

여러 가지 열린 단면 부재의 굽힘 붕괴시험 및 굽힘 붕괴 해석을 이용하여 각각의 부재에 대하여 굽힘 붕괴 특성을 비교하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 같은 형상의 단면일 경우 옆면이 열린 단면 부재는 윗면이 열린 단면 부재보다 약 4 배 정도의 최대 굽힘 모멘트를 나타내었다.
2. 플랜지의 길이가 늘어나는 것은 최대 굽힘 모멘트에 영향을 주지만 플랜지가 길어질수록 증가하는 최대 모멘트의 증가비율은 감소한다는 것을 알 수 있었다.
3. Lipped channel 의 경우 Lipped channel 의 얇은 두께에도 불구하고 플랜지 끝의 lip 부분의 영향으로 좀 더 높은 굽힘 모멘트 값을 나타낸다.
4. 같은 크기와 두께의  $\gamma$ 자형 강은 L형 강 보다 2 배 이상 큰 굽힘 모멘트 값을 나타내었다.
5. 굽힘축이 전단중심에서 상·하로 이동된 경우 탄성구간의 굽힘 붕괴 곡선에서 그 이동된 거리에 비례하여 시편에 모멘트가 더 작용하게 됨으로 실제로 가해지는 모멘트 값은 중심에 있을 경우에 비해 거리에 비례적으로 줄어듦을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구(과제 번호 981-1008-052-2)의 연구비지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. McIvor, I. K., Anderson, W. J., Buak-Zochowski, M., "An Experimental Study of the Large Deformation of Plastic Hinges," *Int. J. Solids Structures* 13, pp. 53 - 61, 1977.
2. Meng, Q., Al-Hassani, S. T. S., Soden, P. D., "Axial Crushing of Square Tubes," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 25, No. 9-10, pp. 747 - 773, 1983.
3. Wierzbicki, T., Abramowicz, W., "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures," *J. Appl. Mech.* 50, pp. 727 - 739, 1983.
4. Hayduk, R. Y., Wierzbicki, T., "Extensional Collapse Modes of Structural Members," *Computer and Structures*, Vol. 39, No. 3, pp. 447-458, 1984.
5. Wierzbicki, T., Recke, L., Abramowicz, W., Gholam, T., Huang, J., "Stress Profile in Thin-Walled Prismatic Column Subjected to Crush Loading - I Compression, *Computer and Structures*," Vol. 51, No. 6, pp. 611 - 623, 1994.
6. Mahmood, H. F., Paluszny, A., Lin, Y. S., "Bending Deep Collapse of Automotive Type Components," SAE technical paper 885044, 1988.
7. Kecman, D., "Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 25, No. 9, 10, pp. 623 - 636, 1983.
8. Kang, S. Y., Jang, I. B., Kim, H. Y., "A Study on the Development of Pure Bending Collapse Machine and Bending Collapse Characteristics of The Thin Walled Tubes," *KSME*, pp.739 - 744, 1997.
9. Kang, S. Y., Jang, I. B., Kim, H. Y., "The Bending Collapse Characteristics of The Thin Walled Tubes Using Pure Bending Test Machine," *ISATA 30th Conference at ITALY, Florence*, 97N.068, 1997.
10. Kim, C. S., Kim, T. E., Song, Y. J., Kang, S. Y., "An Experimental Study on Deep Collapse of Steel Tubes under Pure Bending," *KSPE*, Vol. 14, No. 9, pp. 37 -

- 44, 1997.
11. ABAQUS User's Manual, Ver6.2, 2001.
  12. Anisimov, D. N., Goldshtein, Yu, B., "The Thin-Walled Rod of an Open Cross-Section as an Element of a 3D-structure," ZAMM. Z. angew. Math. Mech. 77(1997) 12. 925-934.
  13. Goodier, J. N., "Torsional and Flexural Buckling of Bars of Thin-Walled Open Section Under Compressive and Bending Loads," ASME J.Appl. Mech, 9, A103-A107.