

## 알루미늄 각재의 프레스 굽힘 변형 특성

김기성<sup>1</sup> · 허관도<sup>#</sup>

### Characteristics of Bending Deformation in Aluminum Rectangular Bar by Press Die

K. S. Kim, K. D. Hur

(Received August 28, 2008)

#### Abstract

In the recent years, the production of light-weight products has become important because of increasing demands for the energy savings through weight reduction. Therefore the advanced manufacturing technology with Al alloy is continuously required in many industrial fields. Bending characteristics of Al rectangular tube with hollow and solid section has been analyzed by FE analysis in press bending with wing-die. Bending stress is affected by punch stroke and rotation of wing-die. There were different sectional sagging characteristics between the solid rectangle section and the hollow rectangle section.

**Key Words:** Aluminum Rectangle Bar, Press Bending, Sagging, Wing-die

#### 1. 서 론

여러 산업 분야에서 경량화를 목적으로 알루미늄 소재의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 특히 연비향상을 위한 차체 중량을 최소화 시키는 방법으로 대체 경량 재질의 선택, 새로운 가공 및 조립기술의 개발, 초기개발 과정에서 차체 최적화 설계기술의 도입 등을 고려할 수 있다[1]. 알루미늄 재질을 이용한 차체 제작 시 기존 냉연강판 차체에 비하여 동일한 강성 조건을 만족시킬 때 약 30%이상의 경량화를 시킬 수 있고, 단위 무게당 차체의 충돌에너지 흡수 능력을 기존에 비해 극대화 시킬 수 있다[2].

고강도 알루미늄 합금과 같은 낮은 비중을 가지는 소재는 자동차 산업에서 매년 사용량이 증가하는 추세이며 자원의 재활용 측면에서도 각광 받고 있다[3]. 알루미늄 소재의 경우 중량대비 강

성을 높이기 위해 중공으로 제작하는 경우가 많으며[4-5], 해석 및 실험을 통하여 국부 좌굴, 주름 및 단면 처짐(sagging)등의 결함 제거 및 방지를 위한 연구가 진행되고 있다[6].

일반적으로 사각튜브의 거동은 부재의 세장비에 따라 그 거동이 구분된다. 세장비가 클 때에는 전체좌굴(overall buckling)에 의하여 부재가 붕괴되며, 세장비가 작을 때에는 각각의 구성관들이 연속적으로 주름이 형성되는 국부좌굴(local buckling)이 발생된다. 사각튜브의 전체 좌굴은 굽힘붕괴와 유사한 거동을 보이므로 에너지흡수 측면에서 바람직하지 못하다. 따라서 많은 에너지를 흡수 할 수 있는 부재를 설계하기 위하여는 세장비의 선택이 중요한 것을 알 수 있다[7].

본 연구에서는 동일한 단면윤곽 유효반경을 가지는 중실 사각 각재와 중공 사각 각재를 두 굽힘 각으로 굽힘 성형 하였다. 각각의 굽힘 각과

1. 동의대학교 기계공학과 일반대학원  
# 교신저자: 동의대학교 기계공학과,  
E-mail: kdhur@deu.ac.kr

단면조건에 따른 단면 처짐 및 변형을 해석하여 굽힘 변형 특성을 비교 검토 하였다.

## 2. 실험장치 및 금형설계

### 2.1 알루미늄 각재

해석에 사용된 알루미늄 각재는 Al 6063을 선택 하였다. 해석에 사용된 유한요소는 증실 각재와 증공 각재로 작업평면을 대칭면으로 갖는 전체 1/4 크기의 단순화된 모델을 사용하였다. 제안된 금형구조에서 공구와 소재 사이의 마찰접촉 표면적이 동일한 조건을 설정하기 위해 증공 및 증실 각재의 단면 윤곽에 대한 유효반경인자  $\bar{r}_1, \bar{r}_2$  를 다음과 같이 도입했다.

$$2(a+b) = 2\pi\bar{r} \quad (1)$$

식 (1)에 의해 증공각재는  $a=b=38mm$  로 부터  $\bar{r}_1=24.2mm$ , 증실 각재는  $\bar{r}_2=8.07$  로 하였으며, 증실 각재의 정사각형 단면의 변은  $a=b$  로 12.7mm 이다. 해석 모델의 단면 치수와 형상은 증실 각재와 증공 각재의 정사각형을 기준으로 단면의 두께에 대하여  $\pm 60\%$  로 하였으며, 대칭면을 중심으로 대칭하여 길이 400mm의 사각단면을 가지는 알루미늄 각재를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 금형 구조

굽힘 실험에 사용되는 금형모델은 3차원 CAD 시스템에서 설계하고 파일 변환하여 DEFORM-3D 에 입력하였다.

편치는 굽힘각도  $\alpha=20^\circ, 30^\circ$  의 두 가지 모델을 설정하였으며 각각의 모델은 모두 동일한 이동속도로 소재를 가압하게 된다. 금형은 굽힘부를 중심으로 일정한 반경을 유지한 채 설계되었다. 이것은 고정된 힌지를 활용함과 동시에 편치에 의한 회전점과의 간섭을 피하기 위함이다. 그리고 편치는 왕-다이의 회전과 함께 편치 경사면에서 접하는 시점까지 수직 이동하게 된다.

## 3. 굽힘 성형 공정

Fig. 2는 굽힘 성형 해석을 하기 위한 전체적인 금형 형상을 나타내고 있다. 그림과 같이 중앙부 편치와 홀더가 수직으로 이동하여 소재를 밀게 되면 소재는 다시 양쪽 힌지로 고정되어 있는 왕-

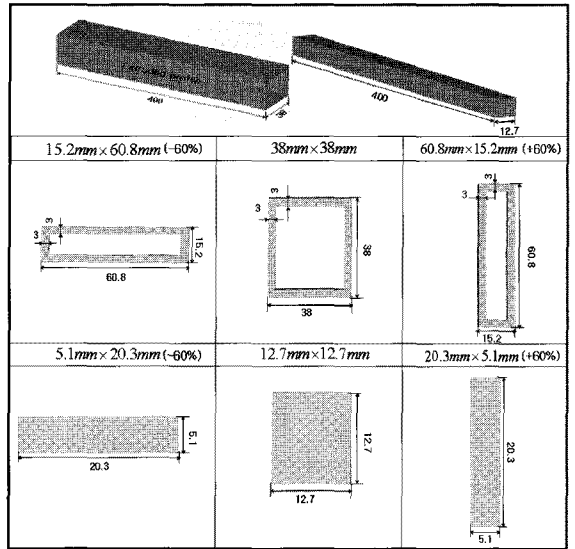


Fig. 1 Dimensions of the hollow and solid rectangular tube

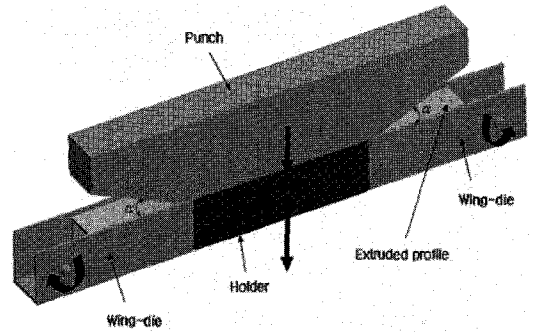


Fig. 2 Wing-die press bending

다이를 밀게되어 편치의 이동과 왕-다이의 회전에 의해 소재를 굽힘 성형한다. 이때 중앙부 편치의 수직 가압속도 및 이동거리를 구하고 이에 따른 왕-다이 회전 각속도를 구하는 것이 가장 중요하다. 비선형 해석상에서 이러한 접촉관계를 고려하기 위해 편치의 이동속도에 따른 왕-다이의 이동 각속도를 계산 후 왕-다이의 강제 회전조건으로 설정하였다. 굽힘공정시 편치의 스트로크의 속도는 4.16mm/sec이고, 왕-다이의 속도는 0.034907rad/sec로 하여 20°와 30°일 때 성형해석시 총 Step은 1000step과 1500step로 0.01mm/sec의 속도로 해석을 진행하였다.

Table 1은 성형해석에 사용된 알루미늄 재료의 기계적 성질이다.

**Table 1 Mechanical properties of Al 6063**

Properties	Value	Unit
Modulus of Elasticity	68.9	GPa
Poisson's ratio	0.33	-
Ultimate Tensile Strength	89.6	MPa
Tensile Yield Strength	48.3	MPa

**4. 해석 결과 및 고찰**

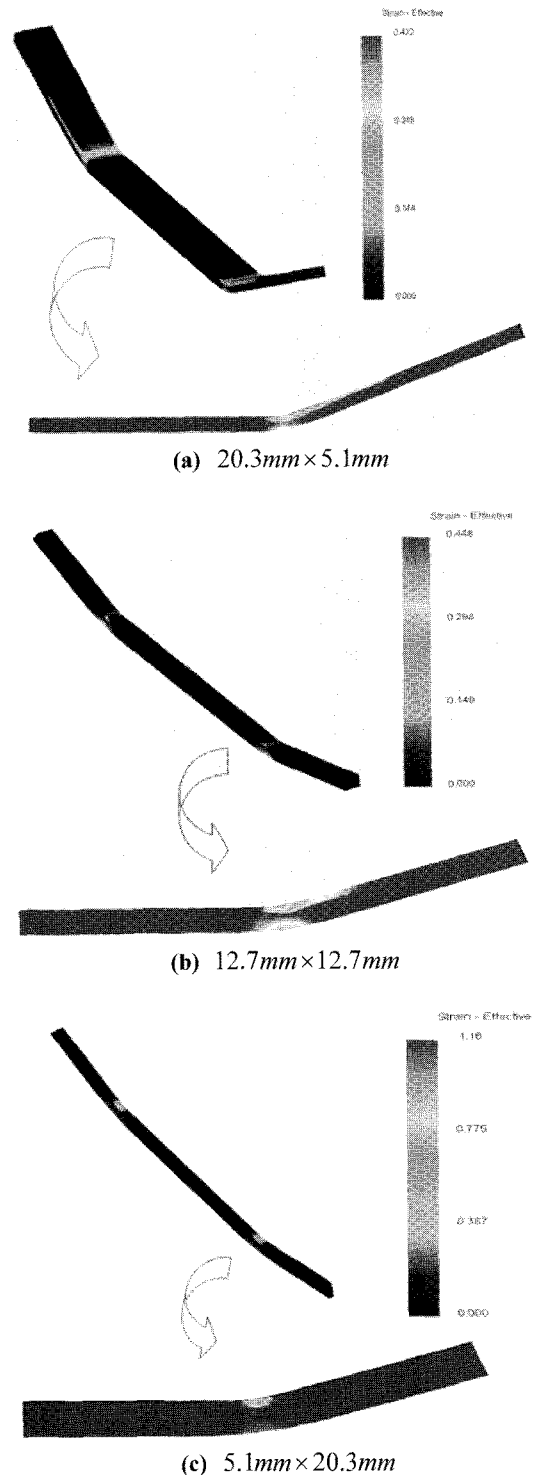
**4.1 중실 각재에 대한 변형 해석**

Fig. 3 은 굽힘 각도 20°일 때, 전체 1/4 크기의 단순화된 모델을 이용하여 해석 후 1/2 크기 중실 각재의 단면 형상에 따른 유효 변형률을 나타낸다. (a)와(b)경우, 유효변형률의 최대값은 (a)0.432, (b)0.448 이고 편치의 굽힘부를 중심으로 홀더와 편치에 의해 완전히 구속된 부분은 소성변형 전과특성이 없으며, 링-다이에 의해 변형되는 부분은 소재의 가장자리를 따라서 전파되는 특성을 보인다. (c)의 경우 유효변형률의 최대값은 1.16 이며, 폭에 비해 두께가 큰 단면으로 굽힘 부의 압축 표면에 국부적 변형이 집중된 것을 볼 수 있다.

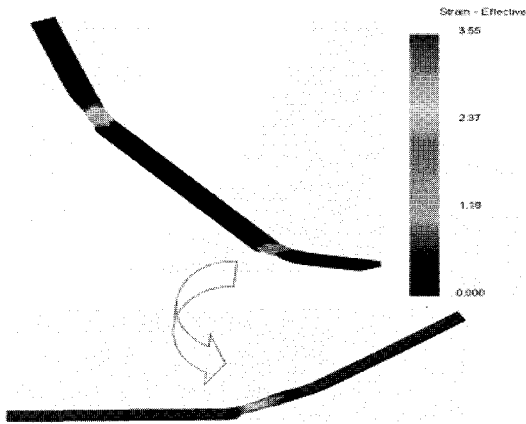
Fig. 4 는 굽힘 각도 30°일 때 중실 각재의 단면 형상에 따른 유효 변형률을 나타낸다. (a)와 (b)경우, 유효변형률의 최대값은 (a)3.55, (b)20.3 이고 굽힘 부를 중심으로 인장력이 발생하는 부분에 국부적 변형이 심하게 생기는 것을 볼 수 있다.

(c)경우는 유효변형률 최대값은 48.5 로 모서리부나 파단부에서의 변형이 최대로 일어나며, 굽힘 부에서는 변형이 작은 것을 볼 수 있었다. 이때 유효 변형률이 매우 크므로 연성파괴가 발생할 수 있다.

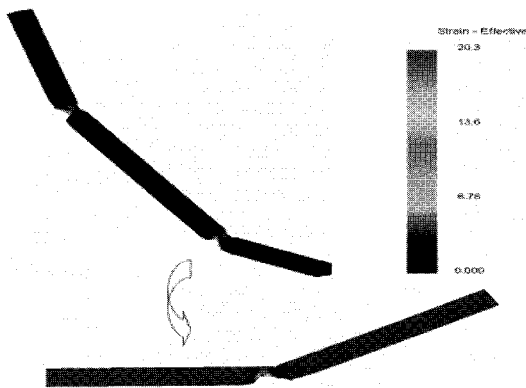
Fig. 5 는 굽힘 각 (a)20° 와 (b)30° 에서 각 소재의 굽힘 부에서의 단면을 초기단면과 비교한 것으로, (1)20.3mm×5.1mm, (2)12.7mm×12.7mm, (3) 5.1mm×20.3mm 소재의 단면을 나타낸다. Fig. 5(a)는 전체적으로 a1-a2 의 길이가 b1-b2 길이보다 크므로 중심부 쪽으로 함몰되는 현상을 나타내며, a1 위치에서 변형분포가 가장 크며 두께가 두꺼울수록 이 변형분포는 작아진다. 여기서, a1-a2 는 굽힘축에 수직이면서 다이 홀더에 접촉하는 부분이며, b1-b2 는 각재 단면 폭 중심선이다. 초기단면에 비해 경우 (1)은 4.314%, 경우(2)는 4.472%, 경우(3)은 7.192%로 나타난다. Fig. 5(b)의 변형분포 역시 (a)와 유사하게 나타나지만 (1)의 경우 소재의 두께가 매우 얇아 단면 변형이 매우 극심하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, (2)4.472%, (3)19.320%로 단면 형상변화가 나타난다.



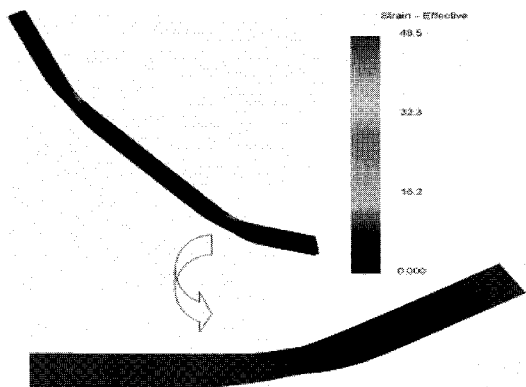
**Fig. 3 Distribution of the effective strain of solid rectangular tube by 20° bending**



(a) 20.3mm×5.1mm

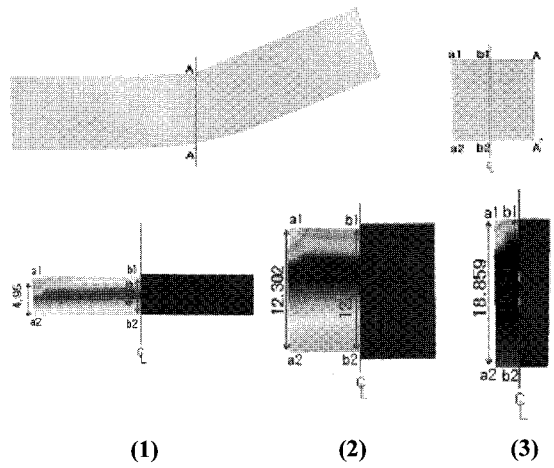


(b) 12.7mm×12.7mm

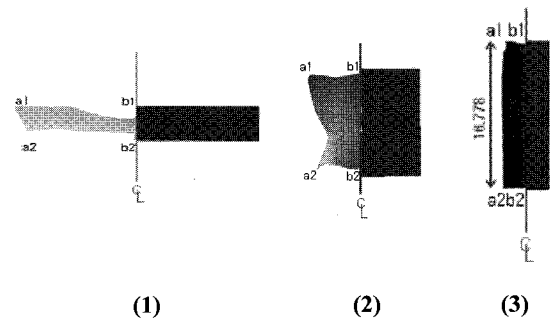


(c) 5.1mm×20.3mm

Fig. 4 Distribution of the effective strain of solid rectangular tube by 30° bending



(a) 20° bending



(b) 30° bending

Fig. 5 Sagging of the rectangle-section in solid rectangle bending

#### 4.2 중공 각재에 대한 변형 해석

Fig. 6은 굽힘 각도 20°일 때 중공 각재의 단면 형상에 따른 유효변형률을 나타낸다. 유효변형률의 최대값은 (a)0.160, (b)0.181, (c)0.444이며, (a), (b)와 (c)소재 모두 변형은 펀치의 굽힘부를 중심으로 주변에 고르게 발생하며 소재의 전체적인 변형보다 굽힘부에서만 변형을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 굽힘 각도 30°일 때 중공 각재의 단면 형상에 따른 유효변형률을 나타낸다. 유효변형률의 최대값은 (a)1.52, (b)5.51, (c)9.99이며, 20°일 때와 같이 모든 단면형상의 소재에 굽힘부 중심에만 변형이 생기며, 이 부분에 소재의 단면형상 변형이 심한 것을 볼 수 있다.

Fig. 8는 굽힘 각 (a) 20°와 (b) 30°에서 각 소재의 굽힘 부에서의 단면을 초기단면과 비교한 것으로,

알루미늄 각재의 프레스 굽힘 변형 특성

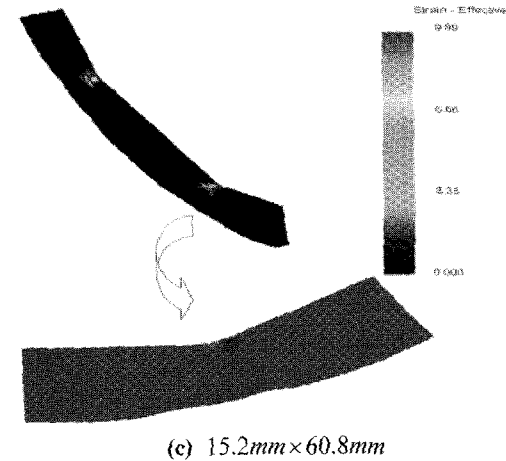
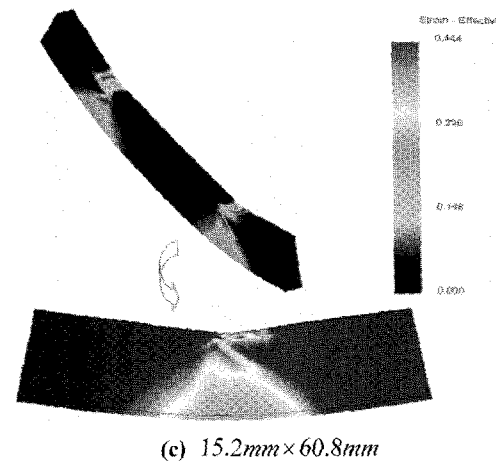
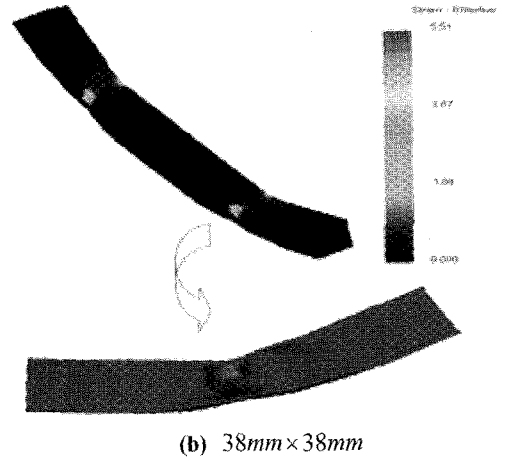
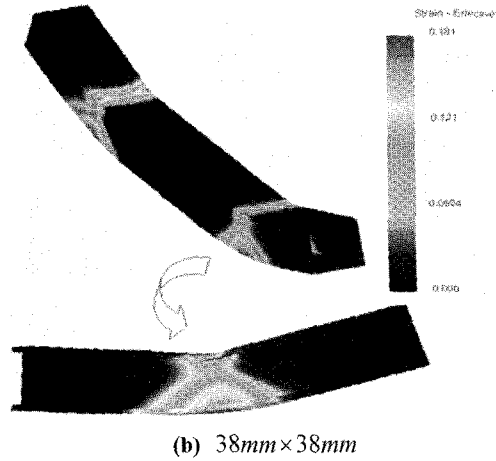
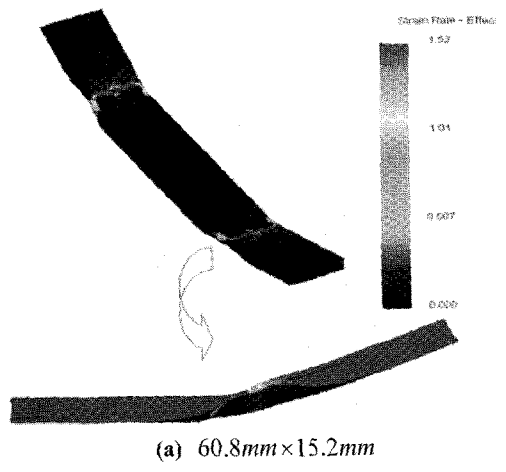
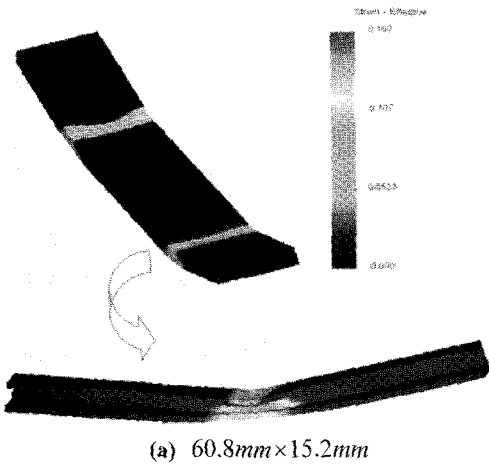


Fig. 6 Distribution of the effective strain of hollow rectangular tube by 20° bending

Fig. 7 Distribution of the effective strain of hollow rectangular tube by 30° bending

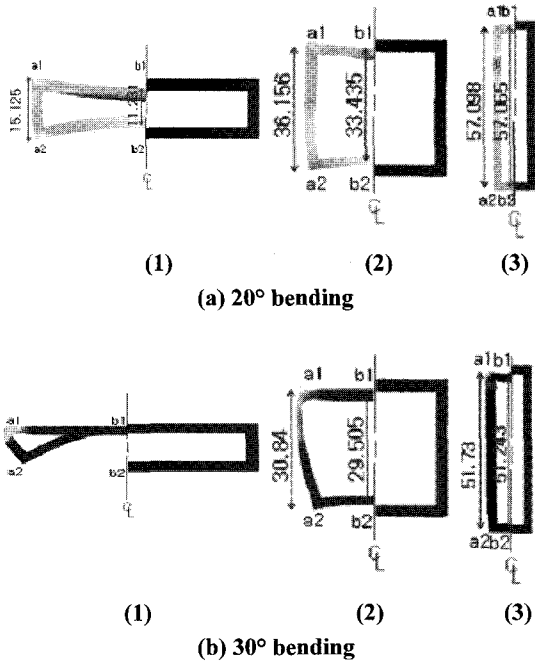
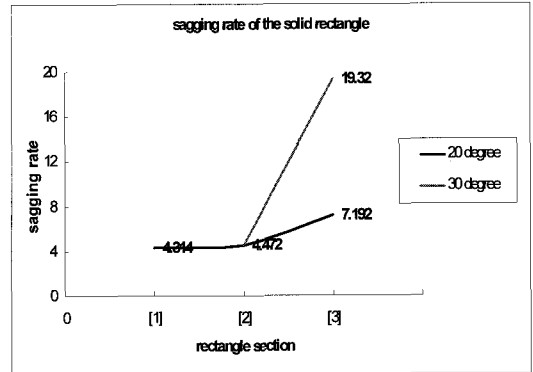


Fig. 8 Sagging of the rectangle-section in 30° bending

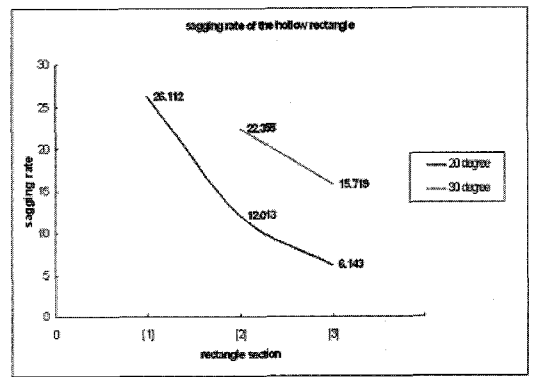
(1) 60.8mm×15.2mm, (2) 38mm×38mm, (3) 15.2mm×60.8mm소재의 단면을 나타낸다. 전체적으로 a1-a2의 길이가 b1-b2길이보다 크므로 중심부 쪽으로 단면 처짐이 나타나며, a1위치에서 변형분포가 가장 심하고 두께가 두꺼울수록 변형분포는 줄어든다. Fig. 8 (a)는 초기단면에 비해 최대 단면 처짐이 (1)은 26.112%, (2)는12.013%, (3)은 6.143%로 단면 형상 변형이 나타난다. (b) 변형분포 역시 (a)와 경향은 유사하지만, (1)의 단면 두께가 매우 얇은 경우 단면변형이 매우 심하게 나타나며, (2)는 22.355%, (3)은 15.719%이다. 굽힘 각 20°, 30°모두 단면 두께가 두꺼울수록 단면 처짐 현상이 작아서 단면 형상 변형이 줄어든다.

### 4.3 중실 및 중공 각재의 단면 처짐

Fig. 9 는 중실 각재와 중공 각재의 단면 처짐 정도를 나타낸 것이다. Fig. 9 (a)는 중실 각재의 경우로 단면 폭에 비해 단면 두께가 두꺼워 질수록 단면 처짐이 많이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 굽힘 각 20°에 비해 30°일 때 단면 처짐이 급격히 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9 (b)는 중공 각재의 경우로, 단면 폭에 비해 단면 두께가 두꺼워 질수록 단면 처짐이 줄어지는 현상을 나타낸다.



(a)



(b)

Fig. 9 Sagging of solid and hollow rectangle

## 5. 결론

본 연구는 동일한 단면윤곽 유효반경을 가지는 알루미늄 중공 및 중실 각재를 이용하여 굽힘 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굽힘 각 20°와 30°에서 중실 각재와 중공 각재 모두 단면 폭에 비해 단면 두께가 얇을 때 유효변형률의 최대값이 낮다.

(2) 중실 각재의 경우 단면 두께가 두꺼울수록 단면 처짐 비율이 커지지만, 중공 각재의 경우는 단면 두께가 두꺼울수록 단면 처짐 비율이 작아진다.

(3) 중실 각재는 굽힘 각도 20°에서 동일한 단면윤곽 유효반경에서 단면 폭이 넓고 단면높이가 낮은 것의 굽힘 특성이 우수하다. 반면에 중공 각재의 경우는 굽힘 각도 20°와 30°에서 모두 단면 폭이 좁고 단면 높이가 높은 것의 굽힘 특성이 좋다.

## 후 기

이 논문은 2007 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2007AA164) / 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- [1] F. Vollertsen, A. Sprenger, J. Kraus, H. Arnet, 1990, Extrusion, Channel, and Profile Bending: a Review, J. Mater. Process. Technol., Vol. 87, pp. 1~27.
- [2] H. Y. Kim, S. B. kim, J. K. Kim, S. J, Heo, S. K. Yang, 1999, A Crush Analysis and Design for the Member of Aluminum Intensive Vehicle, '99 KSAE, pp. 357~358.
- [3] T. Welo, F. Paulsen, 1996, Application of numerical simulation in the bending of aluminum-ally profiles, J. Mater. Process. Technol., Vol. 58, pp. 149~154.
- [4] F. Paulsen, T. Welo, 2001, Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part II - analytical models, Int. J. of Mech. Sci., Vol. 43, pp. 131~152.
- [5] F. Paulsen, T. Welo, O. P. Søvik, 2001, A Design Method for Rectangular Hollow Section in Bending, J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp. 699~704.
- [6] F. Paulsen, T. Welo, 2001, Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part I - experiments, Int. J. of Mech. Sci., Vol. 43, pp. 109~129.
- [7] D. S. Ahn, B. K. Han, B. H. Park, 1996, A Study on The Relationship between Local and Overall Buckling of Square Tubes, Hong-ik University.