

본 연구는 한국과학재단 핵심연구(KOSEF 961-1004-037-2)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

알루미늄형재 압출에 대한 굽힘 해석기법 개발

양순종*, 최한호*, 강범수**, 이상록***

Establishment of Bending Analysis Technique on the Extrusion of Aluminum Alloy

Soon-jong Yang*, Han-ho Choi*, Beom-soo Kang**, Sang-rock Lee***

ABSTRACT

Two angle-shaped extrusions have been studied in order to analyze the bending effect of the extruded product using the three-dimensional rigid-plastic finite element method. The velocity distribution at the outlet becomes the source for the construction of the bending configuration of the final product, in which an analytic scheme has been developed for the description of the bending. A systematic approach presented here appears to have sound agreement with the experimental result, and has been applied to a large extrusion of aluminum alloy.

Key Words : extrusion(압출), bending effect(굽힘효과), rigid-plastic finite element method(강소성 유한요소법), aluminum alloy(알루미늄 합금)

1. 서론

압출공정은 임의 복잡한 단면형상을 가진 제품을 한변의 공정으로 용이하게 얻을 수 있으므로 접합등에 요구되는 비용을 절감할 수 있고, 치수 정밀도가 우수하다. 특히 항공기 구조물로 스티프너(stiffener), 스트링거(stringer) 등과 고속전철의 프레임 구조가 이러한 공정으로 많이 만들어지고 있다. 그러나 아직 현장에는 복잡한 단면형상의 압출에 관한 공정설계 지식들이 충분하지 못한 실정이다.

압출 공정설계에 있어서 적절한 공정변수의 제어도 중요한 역할을 하지만, 금형설계 기술이 제품의 양, 불량률 좌우한다. 따라서 공정변수의 제어와 함께 금형의 적절한

설계, 제작이 압출재의 생산을 위해서는 필수적인 조건이다. 압출금형 설계를 위한 최적 설계변수를 구하는 것은 압출재의 형상이 복잡해지고, 치수정밀도에 대한 요구가 증가됨에 따라 더욱 어려워지므로, 현장의 경험만으로는 많은 어려움이 있다. 특히 압출시 소재유동의 불균형으로 인한 비틀림, 굽힘의 형재 결함을 초래한다. 따라서 만족할 만한 치수정밀도를 얻기 위해서는 스트레칭과 detwisting이 후 공정으로 필요하게 된다. 압출 후 공정은 압출제품의 총 생산단가의 약 30%를 차지한다. 이러한 후 공정을 줄일 수 있는 금형의 적절한 설계, 제작이 필요하며 그 해석적 연구가 요구되어진다.

3차원 평균형 압출에 대한 주요 연구동향은 다음과 같다. Kihara⁽¹⁾ 등은 전방 압출에 대한 하중함수가 램의 압

* 부산대학교 대학원 항공우주공학과
** 부산대학교, 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC for Net-Shape and Die Manufacturing)
*** 한국기계연구원

력에 의해 표현된다는 Johnson의 제안에 따라 정사각형, 직사각형 그리고 구멍이 두 개 인 원형다이에 대해 압출비 4에서 100범위까지 측정하였는데, 그 결과 제품의 형상은 주로 형상 프로파일(shape profile)의 원주 폭에 영향을 받는다는 것을 알았다.

Takeuchi^(2,3)는 압출공정에서 발생된 열이 기계적 에너지에서 열 에너지로 변환된다는 가정하에 온도 분포와 압출 압력을 빌렛, 금형, 컨테이너 그리고 압판(dummy block)등의 작은 요소로 분할하여 계산하였고, 또한 플라스티신을 이용하여 압출공정동안 반경방향으로 압력분포도 해석하였다. 그리고 Nakanishi⁽⁴⁾등은 알루미늄의 열간 압출로부터 압출된 제품의 치수, 형상 그리고 입자구조는 그 공정에 있어서 금속 유동특성과 밀접한 관계가 있음을 발견하고 알루미늄 합금의 열간 압출에 있어서 금속유동제어에 관한 실험적인 연구를 행하였다.

최근 컴퓨터의 발전과 수치기법의 발달로 수치해석적인 연구가 평금형 압출에 관해 많이 수행되어지고 있다. Yang⁽⁵⁾등은 등각사상을 이용하여 3차원 동적가속속도장을 구하여 임의의 형상단면의 압출가공해석을 행하였고 이진희⁽⁶⁾는 설계변수의 최적화를 통한 합리적인 금형 설계 절차를 제공하는 금형설계 자동화시스템을 개발하였다. Altan⁽⁷⁾은 2차원 유한요소 시뮬레이션을 통해 굽힘 해석을 수행하였고, Zhang⁽⁸⁾등은 3차원 형재압출을 강-접소성 유한요소법으로 해석하였으며 Mori⁽⁹⁾등은 3차원 비대칭 압출재의 해석을 수행하여 최적의 압출구 위치 설계에 관한 연구를 하였다. 또한 Zhang⁽¹⁰⁾은 유한요소해석이 실험과 유사한 결과를 나타내기 위한 마찰상수값을 연구하였다. 그리고 Kiuchi⁽¹¹⁾등도 강소성 유한요소법을 이용하여 3차원 압출 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 L형단면과 C형단면을 가지는 압출재의 압출속도분포를 구하고, 이 속도분포값을 바탕으로 압출재의 굽힘 해석을 수행하였다. 그리고 이 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 모델실험을 제시하고 C형 단면 압출구의 위치변화에 따른 굽힘각 분포에 대한 연구를 수행하였다.

Fig. 1은 평다이를 이용한 C형 압출재의 압출과정을 나타낸 그림이다. 여기에서는 알루미늄합금 6063의 열간 압출에 관하여 해석하였으며 모델실험도 여기에 준하였다.

2. 이론적 설명

본 연구에서는 먼저 3차원 강소성 유한요소법을 이용하

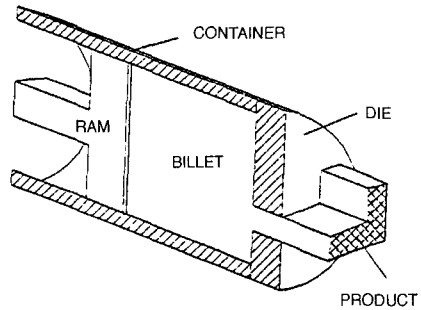


Fig. 1 Flat die extrusion of channel section

여 압출구의 속도를 구한다. 이때 이 속도 분포가 정상상태라는 가정하에 이 속도를 바탕으로 압출재의 굽힘 해석을 수행한다. 이때 압출구를 빠져나온 부분은 강제운동을 한다고 가정한다.

2.1 유한요소 수식화

금속성형공정의 해석에 효과적이며, 현재 널리 사용되고 있는 수치해법인 3차원 유한요소법에 대한 이론과 수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다⁽¹²⁾.

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_{S_f} f_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2} \quad \bar{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}, \quad \sigma'_{ij}$$

는 편차응력, f_i 는 표면외력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}'_v$ 는 체적 변형률속도이다.

표면외력으로 주로 작용하는 금형과 소재사이의 마찰의 처리를 위하여, 마찰면에서의 중립점발생으로 인한 특이성을 피하여 수치해의 안정성을 고려한 다음의 식을 사용한다.

$$\tilde{f} = -mk \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\tilde{v}_r|}{u_o} \right) \frac{\tilde{v}_r}{|\tilde{v}_r|} \quad (2)$$

여기서 m 은 마찰상수, k 는 소재의 전단항복응력, \tilde{v}_r 은 금형에 대한 소재의 상대속도, u_o 는 \tilde{v}_r 에 비하여 아주 작은 양수이다. 강제영역에서는 유효변형률속도가 0에 근접하거나 이전에 지정된 값보다 작게되어 유효응력값

을 결정할 수가 없게된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 한계변형률속도(limiting strain-rate) $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 를 가정한다. 이때 식 (1)의 첫 번째 적분항의 수정된 형태는 다음과 같다.

$$\int_V \left(\frac{\bar{\sigma}_o}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \dot{\bar{\epsilon}} \delta \bar{\epsilon} dV \quad (\dot{\bar{\epsilon}} < \dot{\bar{\epsilon}}_0) \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma}_o = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}_0)$ 이다. 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점속도벡터 $\dot{\bar{v}}$ 에 대한 비선형 방정식이 된다.

$$\Omega(\dot{\bar{v}}) = K(\bar{x}, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) \dot{\bar{v}} - F(\bar{x}, \dot{\bar{v}}) = 0 \quad (4)$$

여기서 K는 강성행렬(stiffness matrix), F는 힘 벡터(load vector), \bar{x} 는 절점좌표 벡터이다. 본 연구에서는 유한요소 분할화 과정에서 3차원 8절점 육면체요소(hexahedral element)를 사용하였다. 식(4)는 Newton-Raphson반복법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

2.2 굽힘 해석 방법

3차원 유한요소 시뮬레이션으로부터 구한속도 분포를 바탕으로 다음 방법으로 굽힘 해석을 수행한다.

1. 3차원 유한요소법으로 압출구의 속도분포를 구한다. 이때 정상상태변형으로 가정한다.
2. 여기서 구한 속도를 바탕으로 압출후 압출재의 굽힘 정도를 다음과 같은 방법으로 구한다. 이때 압출구를 빠져나온 부분은 강체운동을 한다고 가정하였고, 압출재의 단면은 평면을 유지한다고 가정하였다.
3. 구한 속도로서 각 압출구의 절점들이 주어진 Δt 동안 이동한다. Δt 후 각 절점들은 4절점을 가지는 사각형요소면을 형성하며, 이 각 요소면들은 각각의 법선벡터를 가진다. (엄격히 말하면 두 삼각형면의 평균 벡터값이다. 왜냐하면 4절점이 동시에 한 평면에 존재하지 않기 때문이다.)
4. 압출방향에 수직한 단면내 각 요소면의 법선벡터의 평균 벡터를 구한다.

$$\hat{n}_{eff} = k_1 \hat{n}_1 + k_2 \hat{n}_2 + k_3 \hat{n}_3 + \dots = \sum_{i=1}^n k_i n_i \quad (5)$$

where, $k_i = \frac{A_i}{A_T}$, $A_T = A_1 + A_2 + A_3 + \dots = \sum A_i$

여기서 k_i 는 normalized weighting factors 이고, n_i 은 각 요소면의 법선벡터, A_i 는 각 요소면의 면적이다 (Fig. 2(a)).

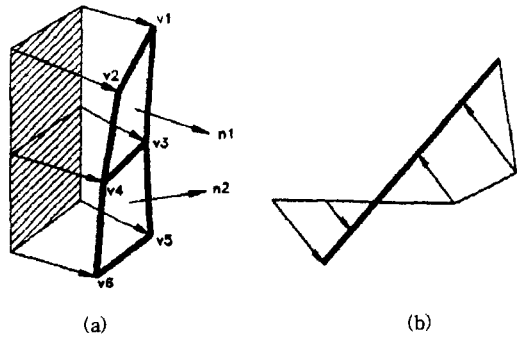


Fig. 2 Generation of a new element plane; (a)Mean normal vector of a new element plane, (b)Projection of nodal points

5. 다음 스텝의 절점들의 속도 방향은 위에서 구한 평균 법선 벡터의 방향 \hat{n}_{eff} 을 가지도록 한다.
6. 위에서 구한 평균법선벡터의 방향으로 각 절점들을 이동시키고, 이 이동된 새로운 절점좌표값들의 평균 좌표값을 포함하는 평면을 구한다. 이때 이 평면의 법선벡터는 위에서 구한 평균 법선벡터이다.
7. 각 좌표값들을 위에서 구한 평면에 정사영하여 평면을 유지시킨다(Fig. 2(b)).
8. 주어진 스텝수 만큼 반복한다. 위 과정의 그림이 Fig. 3에 나타나 있다.

3. 유한요소해석 및 실험적 검증

3.1 유한요소 해석

본 연구에서는 L형단면과 C형단면을 가지는 압출재의 굽힘해석을 수행하였다. Fig. 4는 압출구의 치수이다. 압출구에서의 속도 분포를 구하기 위해 3차원 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 사용된 초기 격자시스템이 Fig. 5에 나타나 있다. 사용된 소재는 400°C에서의 6063 알루미늄합금이고, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

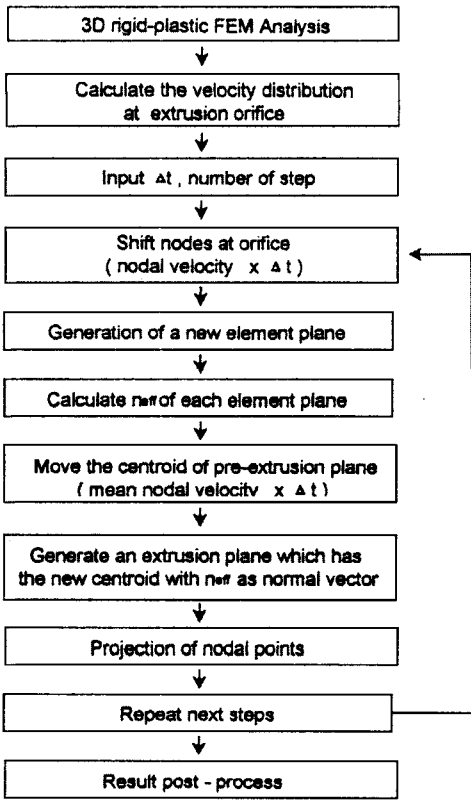


Fig. 3 Flow chart of the bending analysis scheme

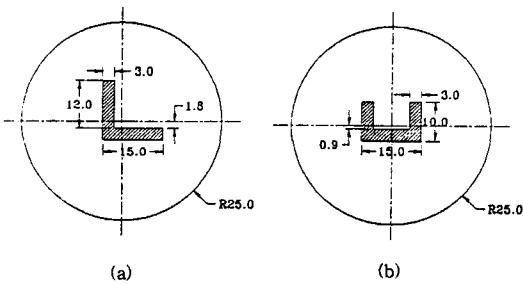


Fig. 4 Orifice configuration of extrusions; (a) Angle section, (b) Channel section

$$\bar{\sigma} = 56.5 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}^{1.7}}{11.78} \right) MPa \quad (6)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률이다.

Fig. 6은 유한요소 시뮬레이션으로 얻어진 압출구에서의 압출방향의 속도분포이다. 그림에서의 값은 최저속도에 대한 비를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 위

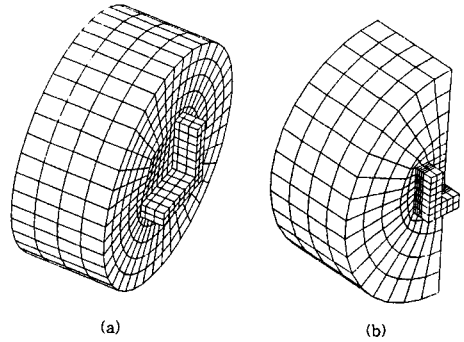


Fig. 5 Initial mesh preparation for the FE analysis of; (a) Angle section, (b) Channel section

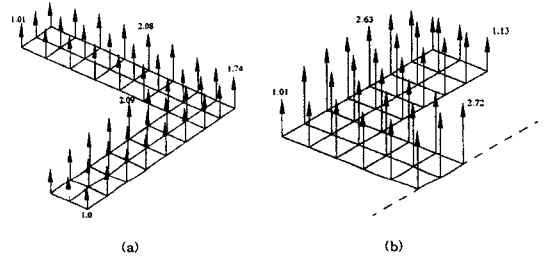


Fig. 6 Velocity distribution at orifice (a) Angle section, (b) Channel section

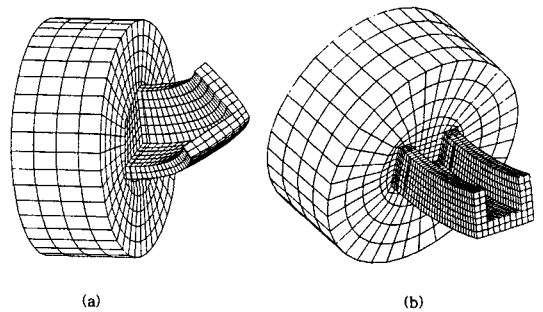


Fig. 7 Deformed configuration of bending; (a) Angle section, (b) Channel section

치에 따라 서로 다른 속도값을 가짐을 알 수 있다. 중심에서 가까운 부분에서 큰 속도값을 가지며 마찰력이 큰 벽면쪽에서는 작은 속도값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 속도차로 인해 압출구를 빠져나온 압출형체는 굽힘이 발생하게 된다. Fig. 7은 이러한 속도 분포를 가지고 위의 해석방법으로 굽힘 해석을 수행한 후의 압출결과를 보여주고 있다.

3.2 유한요소해석과 실험과의 비교

3차원 평금형 압출의 실험소재는 모델재료로 많이 사용되는 플라스틱을 이용하였다. 본 연구에서는 모델실험을 통해 실제 재료에 관한 정량적인 정보를 얻기 위하여 모델재료인 플라스틱에 라놀린(lanolin), 레진(resin) 등을 첨가하여 새로운 유동특성을 갖는 혼합 플라스틱을 개발 하였다. 개발된 모델재료는 400°C 알루미늄의 유동특성과 일치하였다.⁽¹³⁾ 개발된 플라스틱의 특성은 Table 1과 같다. 컨테이너 내부와 소재의 유동형태를 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류의 플라스틱을 각각 반죽하여 재료내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 일정량의 두께로 밀어 적층을 하여 사용하였다. 압출금형의 치수와 시편은 시뮬레이션과 해석에 사용된 것과 동일하게 사용하였다.

Fig. 8은 압출실험 후 압출재의 굽힘형상 결과를 나타

Table 1 Property of plasticine

Components	CaCO ₃ (50-60%), MgCO ₃ Mineral, Fe-Si
specific Gravity	1.8-1.92
Specific Heat	0.24 Kcal/Kg °C
Heat Conductivity	0.6 Kcal/mh °C
Hardness	H _B 15(24 °C)
Bulk Modulus	675,000 psi (475 Kg/mm ²)

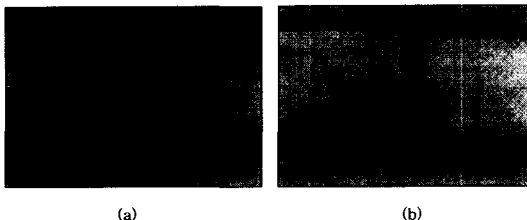


Fig. 8 Bended configuration in extrusion experiment (The bending-deformed shapes are shown at the initial stage of extrusion process);
(a)Angle section, (b)Channel section

낸 그림이다. L형단면 압출재는 중심부분과 끝부분과의 속도차가 크게 나타났으며, 이러한 큰 속도차로 인해 굽힘의 양이 크게 나타나고 있다. C형단면 압출재도 해석결과와 유사한 형상을 보여주고 있다.

4. 대형압출해석에 적용

4.1 압출금형 형상의 설계

Fig. 9는 최종 압출재의 단면형상과 치수를 나타낸 것이다. 고속전철등의 프레임에 사용되는 대형압출재이다. 다음은 압출금형의 설계를 위한 압출재의 주변 매개변수를 나타낸 것이다. 압출재의 단면적=12056.5 mm², 주변길이=1554mm, 외접원의 직경(D_{cd})=478.2mm, 압출재의 면적중심=(0, -56.08)등이다.

- Area of the extruded shape = 12056.6 mm²
- Perimeter of the extruded shape = 1554.0 mm
- Circumscribing circle diameter = 478.2 mm
- Center of an area for the shape(Q) = (0, -56.08)
- Center of the circumscribing circle(P) = (0,0)
- Perimeter of a round bar of the same cross-sectional area = 389.2 mm
- Radius of the round bam = 61.95 mm

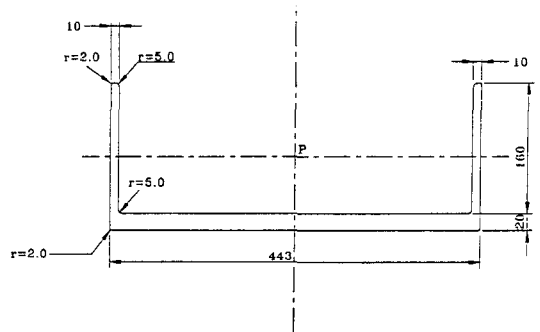


Fig. 9 Sectional dimensions of the large aluminum alloy extrusion

대형압출재이어서 압출구는 일반적으로 한 개 이상은 배치하기 어렵다. 압출구를 1개로 가정하였으므로 압출구의 위치는 소재의 유동을 균일하게 할 수 있도록 가능한한 중심점(소재의 중심)을 기준으로 대칭성이 좋게 배치하는 것이 중요하다. 압출구가 1개일 경우 압출구의 위치 및 방향선정은 경험적 규칙을 이용한다. 압출재의 굽힘, 비틀림 등을 피하기 위해서는 압출재료가 축방향으로

균일한 속도를 가지면 가능하므로, 금형 압출구를 위치시킬 때 가능한 대칭이 되게 한다. 대칭의 순위는 압출형상간에 점대칭, 선대칭순으로 한다. 이러한 규칙을 토대로 압출구를 배치시킨 것이 Fig. 10이다.

다음으로 압출금형치수를 결정한다. 금형의 직경(Dd)은 압출재의 최대 외접원의 직경과 관련되며 압출형재의 형상, 압출 난이도 및 알루미늄 합금의 종류에 의존하며 경험적으로 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

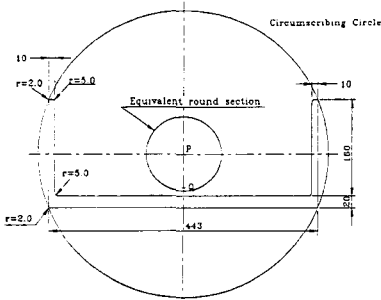


Fig. 10 The location of extrusion orifice in comparison with container

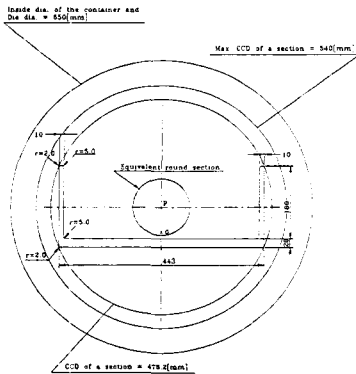


Fig. 11 Dimensions of extrusion orifice of channel section and die

- (1) 단순한 형상, rod, tube, flat section일 때
 $Dd = (1.25 - 1.45) Dccd$ (mm)
- (2) 복잡한 형상(얇은 두께 또는 압출하기 어려운 합금)일 때
 $Dd = (1.45 - 1.6) Dccd$ (mm)

여기서는 압출형재가 Fig. 9에서 보는 바와 같이 최소 두께가 10 mm로 이는 상대적으로 얇은 두께는 아니며 복잡한 형상도 아니다. 따라서 (1)규칙을 적용하여 $Dccd = 478.2$ mm를 이용하면 금형직경은 $597.75 -$

693.39 mm의 값을 가진다. 평균을 하면 645.57mm이므로 650mm로 하기로 한다. Fig. 11은 경험에 의해 설계된 최종 금형설계치수이다.

4.2 압출구의 상대위치 정의

Fig. 11에서의 압출금형설계에서 제시된 압출구의 위치를 기준으로 하여 이때의 압출구형상의 면적중심(Q)을 상대위치 '0'이라고 가정한다. 그리고나서 이 위치를 대칭축을 따라 아래위 50mm를 10mm단위로 이동시켜서 상대 위치를 정의한다. Fig. 12에 상대위치 50, 0, -50인 압출구의 그림을 나타내었다. 그림에서 위쪽 방향이 상대 위치가 증가하는 방향이며 아래방향이 감소하는 방향이다.

해석에 사용된 소재는 6063 알루미늄합금이고 응력-변형을 관계식은 (6)식과 같다. 마찰상수는 0.4를 적용하였다. Fig. 13은 유한요소해석을 수행하기 위한 초기격자계(상대위치 0지점)이다.

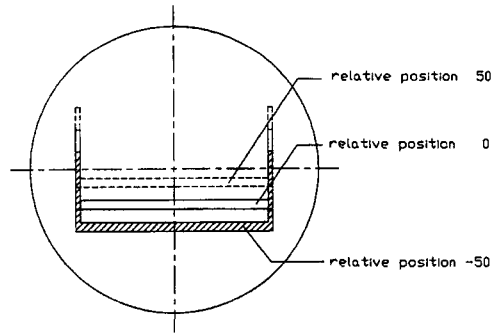


Fig. 12 The three relative positions of extrusion orifice 50, 0, -50

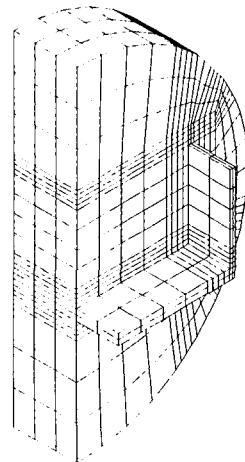


Fig. 13 Initial mesh preparation for Finite Element analysis

4.3 굽힘각 분포에 대한 해석결과

굽힘각 분포가 나타나 있는 Fig. 14에서는 상대위치가 증가함에 따라 굽힘각이 증가함을 알 수 있다. 비대칭 Γ 형 단면압출에서 금형압출구의 위치에 따른 굽힘각이 선형적으로 변하고 있고 금형압출구의 위치를 조절하는 방법으로는 굽힘을 해소하지는 못함을 알 수 있다. 따라서 적절한 금형베어링이나 플로우가이드를 사용하여 굽힘현상을 해소해야 할 것이다. Fig. 15는 상대위치 0에서의 압출재의 굽힘 형상을 보여주고 있다.

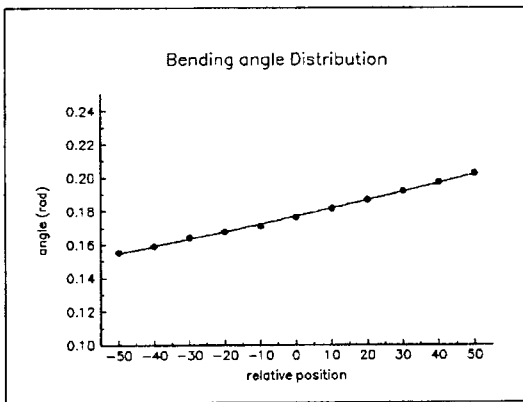


Fig. 14 Bending angle distribution along relative position

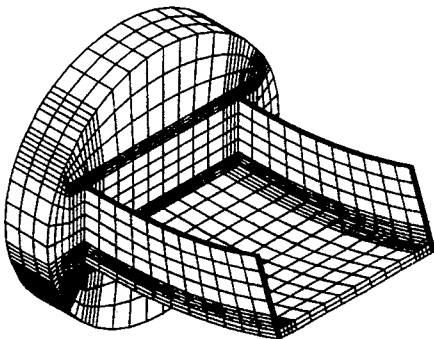


Fig. 15 Predicted bending shape of the large aluminum alloy extrusion

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 압출재의 굽힘해석 방법을 제시하였고, 모델 실험과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하고 압출구의 위치변화에 따른 굽힘각의 분포를 조사하였다.

1) 압출재의 굽힘을 해석할 수 있는 강소성 유한요소프로그래를 개발하였으며, 굽힘형상을 도식화 하였다.

2) Γ 형단면과 Γ 형단면을 가지는 압출재를 3차원 강소성 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 압출구의 속도분포를 구하였고 구한 속도분포를 바탕으로 압출시 굽힘 방향과 굽힘각을 예측하였다.

3) 모델실험과의 비교를 통하여 해석 기법의 타당성을 보여 주었다.

4) 알루미늄 대형압출재의 압출금형의 압출구 설계와 압출구의 위치에 따른 굽힘정도를 예측하는 해석을 수행하였다.

참고 문헌

1. J. Kihara and Y. Fujishiro, "The Dependence of Load for Extrusion of Plasticine on the Extrusion Ratio and Shape", Journal of the JSTP Vol.25, pp646-651, 1984.
2. K. Takeuchi, "Temperature of Extrusion and Extrusion Pressure of Aliminum alloy in Consideration of changing Yield Strength in each Elements", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.37, pp345-352, 1986.
3. K. Takeuchi, "Analysis of Pressure Distribution in the Radial Direction during Extrusion by Plasticine", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.40, pp435-438, 1989.
4. K. Nakanishi, H. Kinoshita, S. Kamitani and K. Kirayama, "Experimental Investigation on Metal Flow Control in Hot Extrusion of Al-alloy", Journal of the JSTP, Vol.36, pp997-1002, 1994.
5. D. Y. Yang, C. H. Han, and M. U. Kim, "A Generalized Method for Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Arbitrarily Shape Section", Int. J. Mech. Sci., Vol.28, N.8, pp517-534, 1986.
6. 이진희, "퍼스널 컴퓨터에 의한 알루미늄 합금 재료의 열간압출 금형설계 자동화에 관한 연구", 석사학위논문, 부산대학교, 부산, 1991.
7. T. Altan, "Computer-Aided Design of Dies

- to Control Dimensional Quality of Extruded Shapes", *Annals of CIRP.*, Vol.41, pp.275-279, 1992.
8. X. Q. Zhang, Y. C. Lan, S. S. Xie and P. F. Thompson, "A Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Analysis of Shape Extrusion", *The Sixth Int. Conf. in Australia on Finite Element Methods*, pp100-103, 1991.
 9. K. Mori, K. Oskada and H. Yamaguchi, "Prediction of Curvature of Extruded Bar With Noncircular Cross-Section by a 3-D Rigid Plastic Finite Element Method", *Int. J. Mech. Sci.* Vol.35, No.10, pp.879-887, 1993.
 10. X. Q. Zhang, Y. C. Lan and C. Devadas, "Progress in Numerical Simulation of Extrusion of Aluminium Sections", *Advanced Technology of Plasticity Proceeding of the 4th Internatoinal Conference on Technology of Plasticity*, pp.16- 21, 1993.
 11. M. Kiuchi, J. Yanagimoto and V. Mendoza, "Flow of Solid Metal during Extrusion: Three-Dimensional Simulations by Finite Element Method, *Simulation of Materials Processing*, pp847-852, 1995.
 12. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, 1989.
 13. Y. H. Kim, W. B. Bae, B. S. Kang and J. W. Park, "Experimental Investigation on the Flow Control in Non-Axisymmetric Flat Die Extrusion-II", *J. of Korean Society of Precision Engineering*, Vol.14, No. 3, pp130-136, 1997.
 14. K. Laue and H. Stenger, "EXTRUSION - Process, Machinery, Tooling", American Society for Metals.