

중공형재의 평금형 압출에 관한 연구

이승훈*, 이춘만**, 조종래***

*창원대학교기계공학과,**창원대학교기계설계공학과,***한국해양대학교 기계시스템공학부

A Study on Square Die Extrusion of Hollow Shape

S. H. LEE*, C. M. LEE**, J. R. CHO***

*Dept. of Mechanical Eng., Changwon National Univ.

**Dept. of Mechanical Design and Manufacturing, Changwon National Univ.

*** School of Mechanical Eng., Korea Maritime Univ.

ABSTRACT

This study presents development of finite element simulation program and analysis of hot extrusion through square dies with mandrel. The design of extrusion dies is still an art rather than science. Die design for a new extrusion is developed from through in-plant trials. In the present paper, three-dimensional steady-state finite element simulation program is developed. The developed system is effectively used to simulate extrusion of clamp shaped hollow section. The objective of the present paper is to study the possibility of integrating this method into the design of dies for extrusion of complex section. To obtain sound product, the distributions and effects of temperature, effective strain rate, mean strain rate and mean stress are studied.

1. 서론

압출공정은 밀폐된 용기(container)에 구속된 소재(billet)를 밀어 성형하는 방법으로 일정한 단면형상을 갖는 제품생산에 가장 경제적인 공정이다. 그 중 평금형(flat or square die)을 통한 여러 가지 형상의 단면을 갖는 형재의 압출공정은 비교적 금형제작이 간편하고 생산성이 높아 그 수요가 높아지고 있다. 평금형을 통한 압출공정은 알루미늄이외의 경금속을 이용하여 붕재뿐만 아니라 튜브형재 또는 각종 임의형상의 단면형재를 큰 압출비로 저렴하게 가공할수 있는 장점이 있으나 꼬임이나 굽힘 등의 불규칙적인 소성유동이 발생할 경우 제품이 못쓰게 되므로 적절한 금형랜드부의 길이, 금형위에 압출구멍의 크기 및 위치 결정 등이 금형설계의 중요한 요소이다. 현재 산업현장에서의 금형설계는 경험적인 지식과 판단에 의존하며 여러번의 시행착오를 거친다. 최근에 들어 체계적인 연구가 이루어져 컴퓨터

계산능력향상으로 소성가공을 유한요소법으로 시뮬레이션함으로써 금형설계시 기존의 방법보다 시행착오를 줄여 후가공을 최소화할 수 있으리라 기대된다.

본 연구에서는 평균형을 통한 열간압출에 대해 3차원 형체를 해석할수 있는 강-점소성 유한요소 해석 프로그램을 개발하고, 유동해석과 온도해석을 행하여 복잡한 단면형상을 가진 금형설계에 도움이 되고자 하였다. 사용된 해석방법은 소성유동을 강소성 FEM으로 정상상태(steady-state) 해석하고, 그결과를 넘겨서 온도해석을 하는 비연계(decoupled)방법을 사용하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 Fig. 1과 같은 단면형상의 중공형체를 압출하는 만드렐(Mandrel)을 가진 평균형 압출공정을 시뮬레이션해 보았다.

2. 이론적 배경

대부분의 압출문제는 형상 및 경계조건이 3차원 특성을 지니고 있다. 3차원 압출해석은 최근에 들어 연구되어왔다. Yang[1]등과 Lee[2]등은 3차원 임의의 형상에 대해 해석하였고, Mori[3]등은 압출제품의 꼬임을 예측하였다. Zhang[4]등은 3차원 형체압출을 강-점소성 유한요소법으로 해석하였고, Zhang[5]등은 유동안내(flow guide)을 포함한 압출을 정상상태로 해석하였다.

본 연구에서의 해석 방법은 강-소성 재료 모델에 근거한 벌칙함수 유한요소법으로 초기 속도장은 선형 점성 재료(Linear viscous material)로 가정하는 방법을 사용하였다. 가공 경화 효과는 변형률속도의 함수로만으로 가정하여 해석하였다. 소재가 등방성이고, Von-Mises항복조건을 따르고, 변형중에 소재의 체적 변화가 없다고 가정하면 다음 식들이 성립한다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,i} &= 0 && \text{in } V \\ \sigma_{ij} n_j &= f_i && \text{on } S_f \\ \dot{\epsilon}_{ii} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, n_j 는 주어진 경계에서의 단위 법선 벡터이다.

구성방정식은,

$$\sigma_{ij}' = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (2)$$

여기서, $\bar{\epsilon}$, $\bar{\sigma}$, σ_{ij}' 은 유효변형률속도, 유동응력, 편차응력이다.

δv_i 를 경계조건과 일치하는 속도장에 대한 임의의 변분량이라 하면,

$$\int \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (3)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{(3/2) \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{(2/3) \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$, $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$

이고, K는 큰 양의 값을 갖는 벌칙상수(Penalty constant)이다.

식(3)를 육면체요소로 분할화하고, 실제 절점 좌표계를 국부좌표계로 변환시킨다. 변화한 식이 속도에 대해 비선형이므로 Newton-Raphson 반복 방법에 의해 해를 구한다. 반복과정은 다음 식을 따른다.

$$\underline{V}^{(n)} = \underline{V}^{(n-1)} + \beta \underline{\Delta V}^{(n)} \quad (4)$$

여기서, β 는 반복 계산의 발산을 방지하기 위한 감속 계수(Dceleration Coefficient)이고, 0 과 1 사이의 값을 취한다. 식 (4)의 반복 계산은 아래의 조건이 만족할때 까지 수행한다.

$$\| \underline{\Delta V}^{(n)} \| / \| \underline{V}^{(n-1)} \| \leq \epsilon \quad (5)$$

여기서, $\| \|$ 는 Euclidean vector norm이고 ϵ 은 10^{-5} 정도의 상수이다.

경계부분에서의 마찰은

$$\underline{f} = -\frac{2}{\pi} mk \tan^{-1} \frac{|V_s|}{u_0} \underline{t} \quad (6)$$

여기서, m 은 마찰 상수, k 는 항복 전단응력, \underline{V}_s 은 금형과 소재사이의 상대속도 벡터, \underline{t} 는 상대 속도벡터 방향의 단위벡터이며, u_0 는 $|V_s|$ 에 비해 아주 작은 양의 상수이다. 초기 속도장은 선형 점성 재료로 가정하여 자동 초기 추측 발생법(Automatic initial guess generation)으로 초기값을 설정되도록 하였다. 정상상태 온도문제를 해석하기 위한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$K_1 T_{,ii} + k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon} = 0 \quad (7)$$

여기서, K_1 은 열전도 계수, T 는 빌렛 온도, k^* 는 소성 변형 에너지가 열로 바뀌는 비율이며, $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력(Effective stress), $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률 속도(Effective strain rate)를 나타낸다. 이를 유한요소 분할화(Finite element discretization)하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{V^{(m)}} K_1 N_{\alpha,i} N_{\beta,i} T_{\alpha} dV = \int_{V^{(m)}} k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon} N_{\beta} dV + \int_{S_1} q_s N_i dS - \int_{S_2} h(T - T_{\infty}) N_i dS \quad (8)$$

여기서, N 은 보간 함수(Interpolation function)이고, h 는 대류 열전달계수, q_s 는 단위 면적당 주어진 열전달률(Specified heat flow rate per unit area), T_{∞} 는 상온(Room temperature)을 나타낸다.

3. 결과 및 토론

본 연구에서 개발한 해석프로그램을 이용하여 Fig. 1과 같은 단면 형상을 갖는 중공형재를 빌렛은 알루미늄5083으로 직경 115mm, 길이 380mm로 하고 램속도를 1.08 mm/sec로 하여 해석해 보았다. 팬티엄-90MHz를 사용하여 걸린 CPU시간은 1800초 소요되었다. 생성된 격자구조를 Fig. 2에 나타내었고, 대칭면을 고려하여 단면형상의 1/4을 해석 모델로 하였다. 절점의 수가 1305개, 요소의 수가 895개로 구성되었다. 해석 결과, 압출하중은 744ton이상이어야 압출이 가능함을 있었다. 온도분포를 Fig. 3에 나타내었고, 금형랜드부 근처에서 온

도가 485℃로 가장 높음을 알 수 있다. 램속도를 1.5 mm/sec, 2.0 mm/sec로 계산한 결과 최고온도가 503℃, 520℃로 금형랜드부 근처에서 발생됨을 알 수 있었다. 알루미늄 5083의 용융점이 580℃ 정도이므로 램속도를 2.0 mm/sec 정도로 높여 생산성을 향상시킬 수 있다. 그리고 O-X 방향으로의 장축(Major axis) 단면의 최고온도 분포가 O-Y 방향으로의 단축(Minor axis) 단면의 최고온도 분포보다 큰 원인은 변형에 의해 만드렐 주변에서 발생된 열이 밖으로 확산되는 속도가 느리기 때문이라 생각된다. Fig. 4는 FEM 해석 결과 금형출구면에서의 속도와 소성흐름을 알 수 있도록 속도의 크기와 방향을 화살표로 나타내었다. 컨테이너와 금형의 코너부로 갈수록 속도가 작아지면서 Dead Metal Zone이 형성되고 있음을 명확히 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 장축 단면과 단축 단면에서의 속도 분포를 나타내었고 화살표의 크기로 속도의 분포를 구별할 수 있다. 일반적으로 형재 압출에서 압출 속도 분포는 압출 중심축과 가까로울수록 형재 단면의 면적이 넓을수록 마찰의 영향이 적어지므로 본 해석 결과에서도 단면적이 넓은 장축 쪽이 압출 속도가 빠름을 잘 예측하고 있다. Fig. 7은 금형랜드부 부근에서의 압출 방향 속도 분포를 나타내었다. 금형랜드부에서의 속도 분포에 의해 금형랜드부 길이를 설계하여 시험 압출을 줄일 수 있다. Fig. 8는 평균 응력(Mean stress)의 분포도를 나타내었다. 단축 단면에서의 컨테이너의 코너부에서 가장 큰 응력을 받고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 단축 방향으로의 압출 구멍의 단면적이 좁아서 압출이 어려워지고 평균 응력은 상승하게 되기 때문이다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 장축 단면과 단축 단면의 유효 변형률 분포도를 나타내었고, 금형출구의 코너부에서 변형률이 커짐을 알 수 있다. 압출 구멍이 작은 단축 단면에서 급격한 변형으로 장축 단면보다 유효 변형률이 커짐을 확인할 수 있었다.

4. 결론

만드렐을 이용한 3차원 중공형재의 FEM 시뮬레이션 프로그램을 제시하였고, 예제를 통한 FEM 시뮬레이션 결과 속도 분포, 온도 분포, 압력 분포, 압출 하중을 예측하여 다음과 같은 공정 및 금형 설계에 필요한 기본적인 자료를 제공하였다.

- 1) 온도 계산 결과를 참고로 하여 최적의 압출 속도는 1~2.0 mm/sec 정도임을 알 수 있었다.
- 2) 압출 하중을 계산하여 압출기의 용량으로 압출이 가능한지 여부를 알 수 있었다.
- 3) 단축 단면의 컨테이너의 코너부위에서 평균 응력이 가장 크게 나타났다.
- 4) 압출 면적이 넓은 장축 단면축의 압출 속도가 단축 단면축보다 크게 나타났다.

앞으로 금형랜드부에서의 속도 분포에 의해 금형랜드부 길이를 설계할 수 있도록 하는 연구를 할 예정이다.

인용문헌

1. D.Y. Yang, C.M. Lee and J.H. Yoon, 1989, "Finite Element Analysis of Steady-State Three-Dimensional Extrusion of Sections Through Curved Die", Int. J. Mech. Sci., Vol. 31, No. 2, pp. 145-146
2. C.M. Lee, D.Y. Yang and M.U. Kim, 1990, "Numerical Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Arbitrarily Shaped Sections by the Method of Weighted Residuals", Int. J.

Mech. Sci., Vol.32, No.1, pp.65-82

3. K.Mori, K.Osakada and H.Yamaguchi,1993, "Prediction of Curvature of an Extruded Bar with Noncircular Cross-Section by a 3-D Rigid-Plastic Finite Element Method", Int. J. Mech. Sci., Vol.35, No.10, pp879-887

4. X.Q. Zhang, Y.C. Lam, S.S. Xie and P.F. Thompson,1991,"A Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Analysis of Shape Extrusion",The Sixth Int. Conf. in Australia on Finite Element Methods, pp. 100 -103

5. X.Q.Zhang,Y.C. Lam and C. Devadas,1993, "Progress in Numerical Simulation of Extrusion of Aluminum Sections", Advanced Technology of Plasticity, Proc. 4th, ICTP, Beijing, Separated Volume, pp16-21

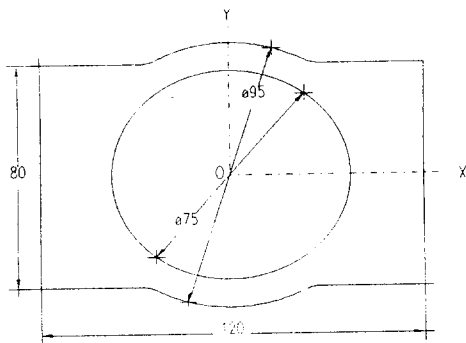


Fig. 1 Dimensions of Sections

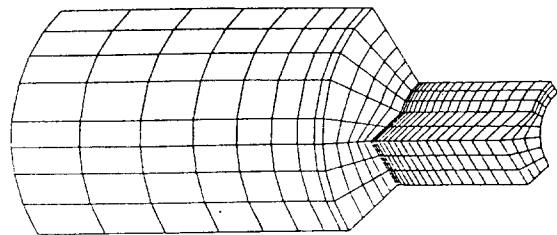


Fig. 2 Mesh system for extrusion of clamp shape

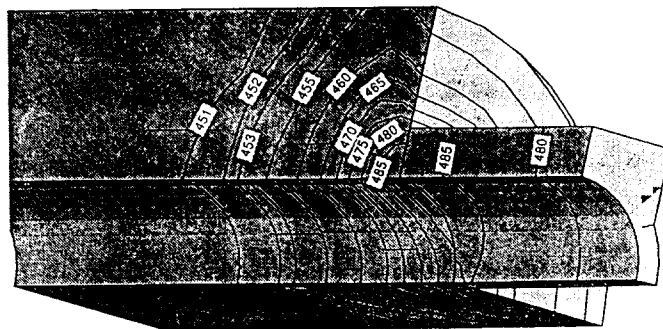


Fig. 3 Temperature distribution



Fig. 4 Velocity distribution

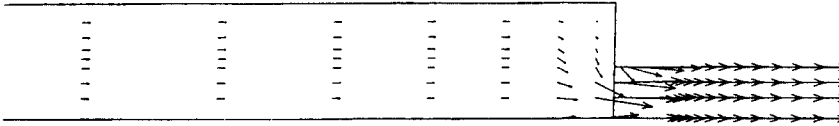


Fig. 5 Distribution of velocity for major section

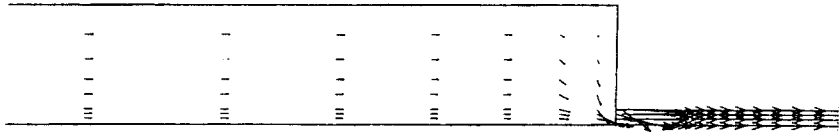


Fig. 6 Distribution of velocity for minor section

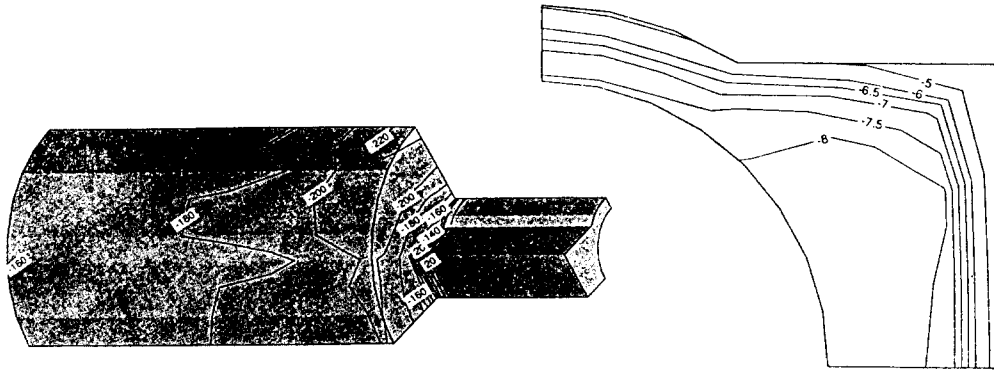


Fig. 8 Mean stress distribution

Fig. 7 Velocity distribution near the die orifice

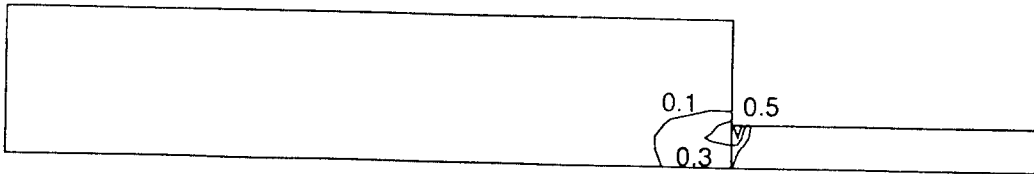


Fig. 9 Distribution of effective strain rate for major section

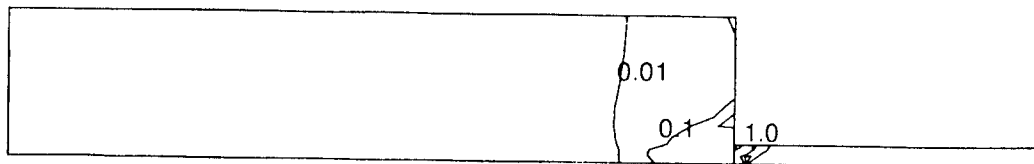


Fig. 10 Distribution of effective strain rate for minor section