

금형 베어링 효과를 고려한 평금형 열간 압출의 3차원 유한요소해석

강연식, 양동열
한국과학기술원 기계공학과

A Three-Dimensional Finite Element Analysis of Hot Square Die Extrusion Considering the Effect of Die Bearing

Yeon-Sick KANG, Dong-Yol YANG
Department of Mechanical Engineering, KAIST

ABSTRACT

The variation of die bearing is primary way to control the metal flow in hot square die extrusion process. Finite element computations are carried out to assess the influence of die bearing on metal flow and state variables. The finite element method is developed based on ALE description for a rigid-viscoplastic material. Since thermal state affects greatly the product quality, temperature distribution is also analyzed. As a computational example, hot square die extrusion with varied die bearing lengths has been analyzed for the profile of a L-section.

1. 서론

산업현장에서 사용되고 있는 압출공정중에서 평금형을 통한 압출은 알루미늄 단면제 생산에 가장 경제적이고 효과적인 공정으로 알려져있다. 근래에 들어서서는 알루미늄 단면제 시장에는 소량의 고품질 제품이 많이 요구되어지고 있다. 이를 만족하기 위해서 금형 설계자는 압출시 금속유동을 잘 이해하고 있어야 한다.

단면제를 압출을 통해 성공적으로 생산하려면 금형의 출구에서 유동이 균일한 속도분포를 갖도록 조정되어야 한다. 유동이 적절하게 조정되지 않으면 제품에 뒤틀림, 굽힘등이 발생할 수 있고 여러가지 결함이 생길 수 있다. 금속유동을 조정할 수 있는 방법으로는 플로우 가이드(flow guide), 초크(choke),

금형 베어링(die bearing)등을 이용하는 방법이 있다. 이 중에서 가장 널리 이용되어지는 것이 금형 베어링부의 길이를 변화시켜가며 유동을 조정하는 것이다. 평금형 압출은 대부분의 경우 복잡한 형상을 가지므로 베어링의 길이를 지정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서 금형 베어링부의 현장설계는 거의 모든 경우 설계자의 경험과 직관에 의존하고 있다.

근래에 들어 컴퓨터의 발전으로 압출공정에서 금속유동을 예측하고 설계에 도움이 되는 자료들을 얻기 위하여 수치해법인 유한요소법이 많이 이용되어지고 있다. 지금까지 평금형 압출을 유한요소법으로 해석한 대부분의 경우 준정상 상태로 가정하고 해석을 하였다. 정상상태의 해석은 냉간 압출의 경우, 어느 정도 성공적인 결과⁽¹⁾를 얻었다. 그러나 압출공정은 근본적으로 비정상상태이다. 특히 열간 압출에서 금형 베어링부의 효과를 살펴보기 위해서는 비정상상태의 해석이 요구되어진다. 평금형 압출의 문제를 비정상상태로 해석하다보면 오리피스(orifice) 부근의 급격한 유동변화로 인하여 격자가 심하게 왜곡되어 계산에 어려움을 겪게 된다. 따라서 오리피스 부근의 격자 왜곡에 대한 해결 방법이 여러가지 연구되어져 왔다. 본 논문에서는 이 중에서 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)묘사에 의한 유한요소법을 사용하였다.

ALE묘사에 의한 방법은 근래에 들어 사용되기 시작한 방법으로 격자와 물질간의 이동을 독립적으로 처리 할 수 있다. 지금까지 소성가공 공정해석에 있어서 탄-소성 ALE 유한요소해석이 주로 이루어졌다. 본 연구에서는 3차원 문제의 계산시간을 고려하여 강-점소성 수식화에 근거하여 문제를 해석하였다.

지금까지 대부분의 경우 평금형 압출의 해석시 다이 베어링부의 효과를 해석시 고려하지 않았다. 그러나 실제 공정설계에 있어서는 다이 베어링부가 유동의 조정에 중요한 역할을 하므로 이의 고려가 매우 중요하다. 본 논문에서는 이들을 해석하기에 적합한 ALE묘사를 이용한 3차원 프로그램을 개발하였다. 또한 열간압출에서는 열적상태가 제품특성과 공정자체에 중요한 역할을 하므로 온도해석을 포함하였다. 해석에제로는 오리피스를 따라 길이가 변하는 베어링 부를 갖는 L형 형제의 압출을 선택하였다.

2. 해석 방법

2.1 변형 해석 방법

기본방정식을 유도하는데에 있어서 관성효과를 무시하고 소제는 강-점소성

체로 가정한다. 일반적인 운동량 방정식을 쓰면 아래와 같다.

$$(\tau_{ij})_{,j} + b_i = \rho \dot{v}_i \quad (1)$$

b_i 는 체력(body force)이고 r 는 밀도이다. 물질 좌표에 대한 미분(·)과 기준좌표(*)에 대한 미분에 대한 관계는 다음과 같다.

$$\dot{v}_i = v_i^* + c_j(v_i)_{,j} \quad \text{where } c_j = V_j - W_j \quad (2)$$

이때 V 는 물질속도이고 W 는 격자속도이다. 재료가 강-점소성이고 등방성과 비압축성을 가진다고 가정하면 다음 식⁽²⁾을 만족한다.

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

식 (1)에 식(2)와 식(3)을 대입하여 변분 원리에 의해 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Pi = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} d\Omega + K^* \int_{\Omega} \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v d\Omega + \int_{\Omega} \rho (V_j - W_j) v_{i,j} \delta v_i d\Omega - \int_{\Gamma_t} T_i \delta v_i d\Gamma = 0 \quad (4)$$

이때 dv_i 는 경계조건에 합치하는 속도장에 대한 임의의 변분량이다. K^* 는 비압축성을 고려하기 위한 벌칙 상수(penalty constant)이다. 식 (4)는 속도에 대한 비선형 방정식이 되므로 식 (4)를 Taylor 전개한 후 고차원을 무시하여 선형화 시킨 후 Newton-Raphson 반복 방법을 이용하여 속도장을 구한다⁽³⁾.

2.2 온도 해석 방법

온도해석은 Lagrangian heat 수식으로 열유량과 온도장을 계산한 다음식을 이용해 격자계에 온도값을 재지정해 주게 된다⁽⁴⁾.

$$T_{(n)}^g = T_{(n-1)}^g + \Delta^g T \quad \text{where, } \Delta^g T = \Delta^m T + \Delta t c_k \frac{\partial T}{\partial x_k} \quad (5)$$

이때 공간 좌표에 대한 미분값은 주변 요소들을 이용하여 가중면적평균방법(area-weighted average scheme)으로 구한다. 윗첨자 g와 m은 각각 격자와 물질계에 대한 값을 의미한다. (n)과 (n-1)은 현재와 이전 시간스텝을 의미한다.

3. 수치 해석

Fig. 1에 전체적인 해석과정을 흐름도로 나타냈다. 변형해석과 온도해석은 완전히 비연계 시켜 해석하였다. 소재와 금형의 재료는 각각 AISI Al 2014-T6와 H13이다. 소재의 유동응력식⁽⁵⁾은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = C(T)(\dot{\epsilon})^{m(T)} \quad (6)$$

계산에 사용된 C와 m값들은 Table 1의 값들을 온도에 따라 보간하여 사용하였다. 소재와 금형의 초기온도는 각각 410 °C와 380 °C 이다. 주변온도는 30 °C로 설정하였다. 계산에 사용된 열적특성과 열전달계수는 Table 2에 나타냈다⁽⁶⁾. 램(ram)의 이동 속도는 1.50 mm/sec이다. 금형베어링의효과를 보기 위하여 실제공정조건인 무윤환상태를 계산에 적용하였다. Zhang등⁽⁷⁾의 연구결과에 의하면 유한요소해석이 금형출구에서 속도분포가 실험과 유사한 결과를 나타내려면 마찰상수가 0.8이상이어야 한다. 본 연구에서는 계산의 편의를 위해서 금형베어링부를 제외한 나머지 마찰면에서 고착(sticking)마찰조건을 적용하였다. 금형베어링부에서는 미끄러짐현상이 크므로 Coulomb 마찰을 적용하였다. Coulomb 마찰계수는 0.52로 설정하였다.

4. 해석결과 및 고찰

평금형 압출에서 유동조정에 주로 이용되는 것이 플로우가이드와 금형베어링부이다. 고강도재료를 압출할 경우는 플로우 가이드를 설치하지 않고 금형베어링부의 길이 변화만으로 유동을 조정하고 있다. 계산 예제는 고강도 재료를 사용하는 경우로 금형 베어링부만으로 유동을 조정한다. Fig. 2에 오리피스와 형상과 치수를 나타냈다. L형은 대칭성이 없으므로 전체영역을 해석하였다. Fig. 3에는 오리피스를 따라서 길이가 변하는 금형 베어링의 형상을 나타냈다. 금형 베어링의 단면별 길이는 현장에서 적용되고 있는 값을 사용하였

다. Fig. 4(a)에는 계산에 사용된 소재의 중간상태 격자를 나타냈다. Fig. 4(b)에는 금형과 펀치를 포함한 금형셋트의 격자구조를 나타내었다. 금형과 컨테이너는 일체형으로 가정하고 온도계산을 하였다. Fig. 5에는 램의 이동이 3.9mm 일때 유효변형률 속도분포를 나타냈다. 이로써 L형의 오목한 안쪽 방향으로 비유동영역이 크게 형성될 것을 예측할 수 있다. Fig. 6에는 금형의 온도분포를 나타냈다. 오리피스 부분에서 온도상승량은 생산속도등에 크게 영향을 미치므로 Fig. 6(b)에 확대하여 나타냈다. Fig. 7에는 램의 이동에 따라 압출제 선단의 한단면에서 속도 분포를 화살표로 나타냈다. 램의 진행에 따라 금형 베어링부의 마찰 작용으로 균일한 속도 분포가 얻어짐을 볼 수 있다. Fig. 8에는 압출선단부에서 속도분포를 균일한 길이(5mm)의 베어링부를 갖는 경우의 속도분포와 비교하여 나타냈다. 단면별로 베어링 길이를 조정된 경우가 보다 균일한 속도 분포를 얻게 됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

평금형 압출에서 금속유동을 제어하는 필수적인 금형베어링부의 효과를 강-점소성 ALE유한요소방법을 이용하여 살펴보았다. 해석예제를 통하여 금형 베어링부의 길이를 단면에 따라 적절하게 변화시키면 균일한 속도분포를 얻을 수있음을 확인하였다. 즉, 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 개발된 방법은 금형베어링부의 효과를 예측할 수있으므로 이를 적절히이용하면 금형설계에 도움이 될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 '94~'95 한국과학재단의 특정기초 연구과제 (과제번호: 93-0200-06-01-3)의 일부로 수행되었습니다. 동 재단의 관계자분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Yang, D.Y., Lee, C.M. and Yoon, J.H., Int. J. Mech. Sci., Vol. 31, No.2, 1989, pp.145~146.
2. P.Perzyna, Adv. in App. Mech., Vol. 9, 1966, pp.243-315.
3. 강연식, 양동열, 소성가공학회 '95 추계 학술대회, 1995, pp. 150~156.
4. Y.S. Kang and D.Y. Yang, Proc. 5th NUMIFORM, Ithaca, New-York, USA, 1995,

pp. 841-846

5 T. Altan, S.I. Oh, and H.L. Gegel, Metal Forming: Fundamentals and Applications, Americal Soc. for Metals, 1983, chap.4.

6. Metals Handbook, 10th Edition, American Society for Metals, Metals Park, 1990.

7. X.Q. Zhang, Y.C.Lam and C. Devadas, Advanced Technology of Plastisity, Proc. 4th ICTP, Beijing, Seperated Volume, 1993, pp.16-21

Flow stress : $\bar{\sigma} = C(T)(\dot{\epsilon})^{m(T)}$

temp	C	m
300 °C	101.60	0.084169
400 °C	53.60	0.08258
500 °C	26.87	0.081507

Table 1 Stress-strain rate properties with respect to the temperature

Coeff.	k	ρc_p	h / h_{lub}
	N/(sec·°C)	N/(mm ² ·°C)	N/(sec·mm·°C)
H 13	28.4	3.7	0.0033 / 13.5
Al 2014-T6	168.57	2.65	

Table 2 Thermal properties and heat transfer coefficients

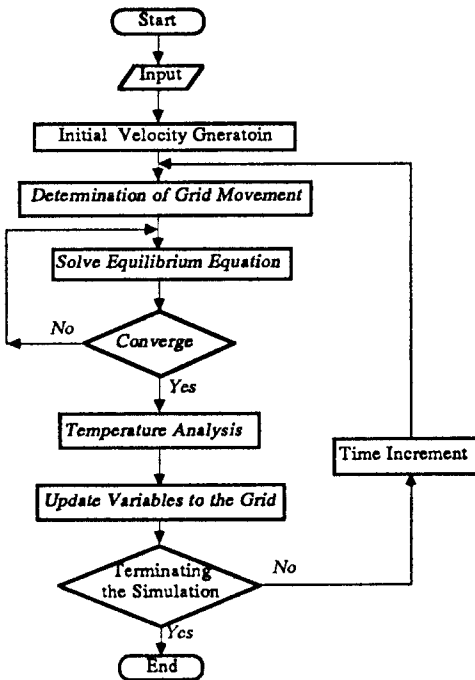


Fig. 1 Flow chart for solving procedure

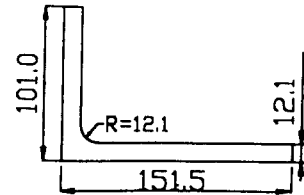


Fig. 2 Dimensions of the orifice profile

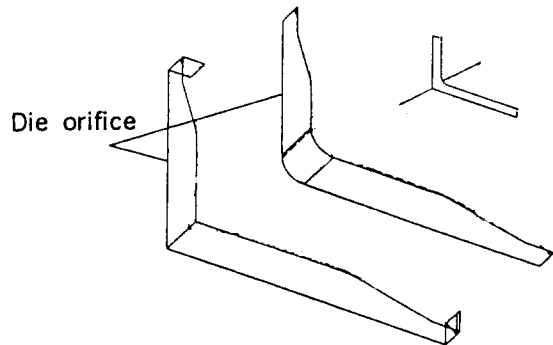


Fig. 3 Configuration of the die bearing

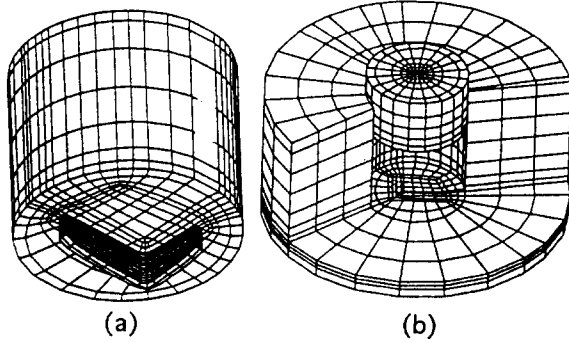


Fig. 4 Mesh configuration of (a)workpiece and (b)tool

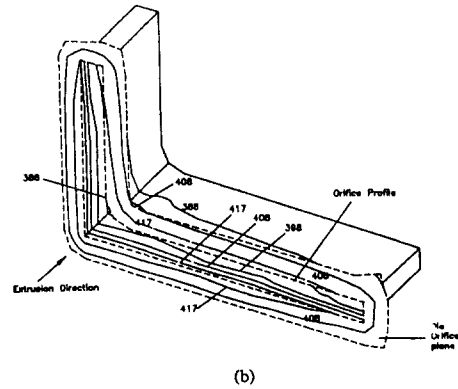
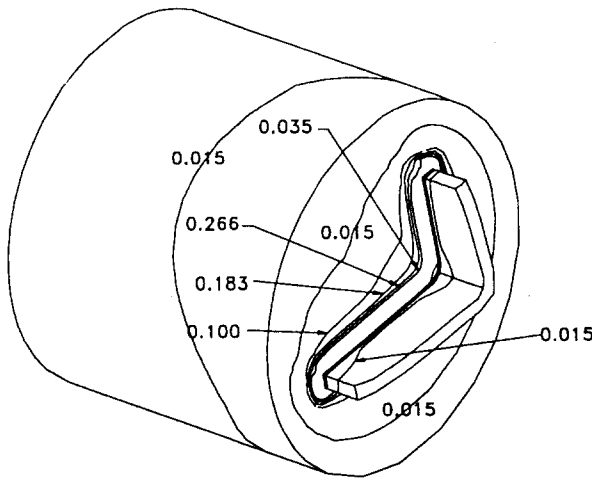
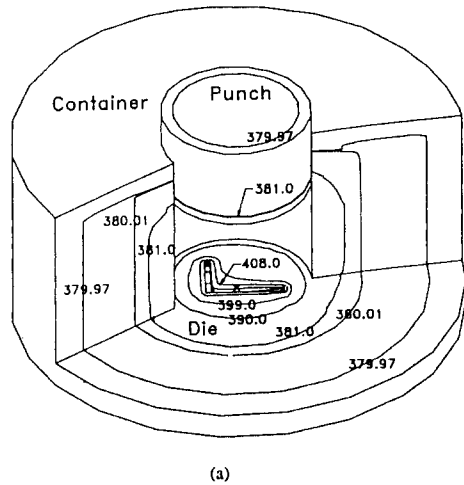


Fig. 6 Temperature distribution of the tools

Fig. 5 Distribution of effective strain rate

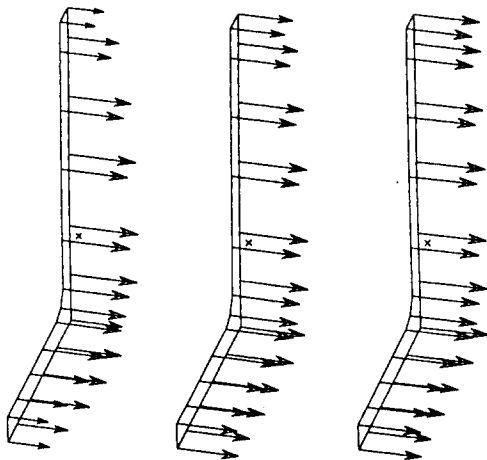


Fig. 8 Comparison of velocity distribution between (a) extrusion with constant die land length and (b) extrusion with variable die land length

Fig. 7 Velocity distribution on the die exit plane with respect to ram displacement