

플로우가이드를 고려한 평금형 열간 압출의 3차원 강-점소성 유한요소해석

강연식, 양동열
한국과학기술원 기계공학과

A Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Analysis of Hot Square Die Extrusion with Flow Guide

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

ABSTRACT

In square die extrusion, flow guide and die land play important roles for controlling the metal flow in die design. In the present work, the flow guide and the die land are considered for the die construction. Based on ALE description, rigid-viscoplastic finite element analysis is carried out to assess the effects of process and die design parameters. The thermal state affects greatly the product quality in hot extrusion. In the present work, the temperature distribution is also analyzed in the framework of rigid-viscoplastic finite element computation. As a computational example, hot square die extrusion with flow guide and die land has been analyzed for the profile of a H section.

1. 서론

압출공정은 일정한 단면형상을 갖는 제품의 생산에 가장 경제적인 공정이다. 이 중에서 가장 널리 사용되고 있는 것중의 하나가 평금형을 통한 열간압출이라 할 수 있다.

지금까지 평금형 압출을 유한요소법으로 해석한 대부분의 경우 준 정상 상태로 가정하고 해석을 하였다. 정상상태의 해석은 냉간 압출의 경우, 어느 정도 성공적인 결과⁽¹⁾를 얻었다. 그러나 압출공정은 근본적으로 비정상상태이지만 특히 열간에서는 소재의 물성치가 온도에 따라 다르고 온도는 시간에 따

라 변하기 때문에 비정상상태의 해석이 요구되어 진다. 평균형 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.

비정상상태의 열간 평균형 압출문제에 적용할 수 방법은 운동학적 묘사에 따라 UL(updated Lagrangian)묘사와 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)묘사를 들 수 있다. UL묘사에 의한 유한요소법은 어느정도 안정된 방법이고 가장 널리 사용되어지고 있는 방법이다. 그러나 평균형 압출과 같이 국부적으로 변형이 심한 경우 유한요소 해석에 어려움을 겪어왔다.

본 논문에서는 ALE묘사에 의한 유한요소법으로 3차원 평균형 압출을 해석하였다. 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 평균형 압출의 해석시 다이랜드(die land)부와 플로우가이드(flow guide)를 금형의 형상에 고려하지 않았다. 그러나 실제 공정설계에 있어서는 다이 랜드부나 플로우가이드가 유동의 조정에 중요한 역할을 하므로 이들의 고려가 중요하다. 본 논문에서는 이들을 해석하기에 적합한 ALE묘사를 이용한 3차원 프로그램을 개발하였다. 또한 열간압출에서는 열적상태가 제품특성과 공정자체에 중요한 역할을 하므로 온도해석을 하기 위한 ALE 해석방법을 제시하였다. 해석예제로는 다이 랜드부나 플로우가이드를 고려한 H형 형재의 압출을 선택하였다. 해석을 통하여 다이랜드부나 플로우가이드의 효과를 살펴보았다.

2. 이론 해석

2.1 변형해석을 위한 유한요소 수식화

기본방정식을 유도하는데에 있어서 관성효과를 무시하고 소재는 강-점소성체로 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 ρ 는 밀도이다. 물질 좌표에 대한 미분($\dot{\cdot}$)과 기준 좌표($*$)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 \mathbf{V} 는 물질속도이고 \mathbf{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.

$$\Pi = \int \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K^* \int \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV + \int \rho (v_j - w_j) v_{i,j} \delta v_i dV - \int T_i \delta v_i dS = 0 \quad (4)$$

이때 δv_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 간단함과 2차 수렴특성을 갖는 Newton-Raphson 반복 방법을 이용하여 속도장을 구한다⁽³⁾.

2.2 온도 해석 방법

온도해석은 다음과 같은 과정을 통해 격자계에 온도값을 재지정해 주게 된다.

- i) 수렴된 속도장으로 Fig. 1과 같이 물질계 가상 격자(x_i)를 구성한다.
- ii) 가상격자를 이용하여 Lagrangian heat 수식⁽⁴⁾으로 열유량을 계산한다.
- iii) 가상 격자에서 온도장을 구한다.
- iv) 다음의 식을 이용하여 격자계에 온도를 재지정해 준다. 이때 공간 좌표에 대한 미분값은 주변 요소들을 이용하여 가중면적평균방법(area-

weighted average scheme)으로 구한다.

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

이때 윗첨자 g와 m은 각각 격자와 물질계에 대한 값임을 의미한다. (n)과 (n-1)은 현재와 이전 시간스텝을 의미한다.

- v) 다음 시간스텝의 계산을 위하여 열유량을 식 (iv)와 같은 과정으로 격자계에 재지정해 준다.

3. 수치 해석

전체적인 해석과정은 Fig.2에 나타냈다. 본 해석에서는 온도해석과 변형해석 모두를 비정상 상태 유한요소해석을 하였다. 3차원 해석의 경우 계산시간이 많이 소요되므로 계산시간을 줄이기 위해서 변형해석과 온도 해석을 완전히 비연계시켜 해석하였다. 계산에 사용된 소재와 금형의 재료는 각각 Al 6061-T6와 H13이다. 소재의 유동응력식⁽⁵⁾은 다음과 같다.

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

C와 m은 Table 1의 값들을 이용하여 계산하였다.

마찰 상수는 0.3이고 펀치의 속도는 110 mm/sec로 택하였다. 소재와 금형의 초기온도는 510 °C, 480 °C 이고 주변온도는 30 °C이다. Table 2에는 계산에 사용된 열적특성과 열전달계수를 나타냈다⁽⁶⁾.

4. 해석결과 및 고찰

본 해석에서는 플로우가이드와 다이랜드부를 고려한 H형재의 열간 압출을 해석하였다. 계산에 사용된 플로우가이드와 오리피스 치수를 Fig. 3에 나타냈다. 플로우가이드와 오리피스를 따라 변하는 다이랜드부를 포함하는 금형의 형상을 Fig. 4에 나타냈다. 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만 해석하였다. Fig. 5에는 소재와 금형의 격자를 나타내었다. Fig. 5(a),(b)는 소재가 플로우가이드를 빠져나오면서 금형에

차들어가는 격자형상을 보여주고 있다. Fig. 5(c)는 소재가 금형의 오리피스부분을 빠져나오면서 H형 형상으로 압출되는 형상을 보여주고 있다. Fig. 5의 격자형상은 완전한 비정상상태의 경향을 보여주고 있다. Fig. 6에는 소재의 유효변형을 속도 분포와 온도분포를 나타냈다. 플로우가이드가 설치됨으로써 변형영역이 두 부분으로 나뉘는것을 볼 수 있다. Fig. 7에는 플로우가이드와 금형오리피스부분에서 금형의 온도분포를 나타냈다. Fig. 6(a)와 Fig. 7를 비교하여 볼때 유효변형을 속도가 큰부분에 온도도 높은 것을 볼 수 있는데 이는 이부분에서 마찰열과 변형열의 발생이 크기때문이다. 변형하중은 플로우가이드를 채용한 것이 그렇지 않은 것보다 여분의 일의 증가로 10%로 정도가 큰것으로 계산되었다.

플로우가이드와 다이랜드부는 금형을 빠져나온 제품의 속도분포를 균일하게 하고자 사용한다. Fig. 8에는 이들을 고려한 것과 그렇지 않은 것과의 속도 분포를 비교하였다. 금형을 완전히 빠져 나온 부분의 단면을 선택하였고 각각의 단면에서 속도를 각 단면의 최대속도로 나뉘 표시하였다. Fig. 8에서 보면 플로우가이드와 다이랜드부를 사용한것이 보다 균일한 속도 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

3차원 강-접소성 ALE 유한요소법으로 평금형 압출에서 금속유동을 제어하는데 필수적인 플로우가이드와 다이랜드부를 고려한 H형 형재의 평금형 열간 압출을 해석하여 보았다. 해석예제를 통하여 플로우 가이드와 다이랜드의 영향을 살펴보았다. 이들을 고려함으로써 보다 균일한 속도 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 플로우 가이드와 다이랜드부를 고려한 금형의 적절한 설계가 이뤄지면 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 개발된 수치해석 방법은 플로우가이드와 다이랜드의 효과를 예측할 수 있으므로 이를 적절히 이용하면 금형설계에 도움이 될 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 '94~'95 한국과학재단의 특정기초 연구과제의 일부로 수행되었습니다. 동 재단의 관계자분들께 감사드립니다.

참고 문헌

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 추계학술대회, 1995, pp. 150~156.
4. 강연식, 박치용, 조종래, 양동열, 대한기계학회논문집, 1권, 2호, 1992, pp.201~225.
- 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.

temp	C (N/mm ²)	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 of Al 6061-T6

Coeff.	k	ρc_p	h / h_{hub}
	N/(sec·°C)	N/(mm ² ·°C)	N/(sec·mm·°C)
H 13	28.4	3.7	0.0033 / —
Al 6061-T6	176.36	2.61	0.0033 / 30.32

Table 2 Thermal properties and heat transfer coefficients

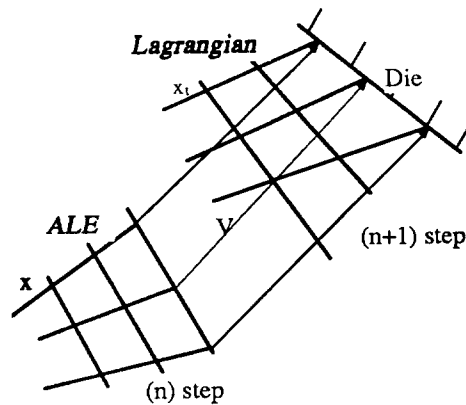


Fig. 1 Construction of pseudo material domain for temperature analysis

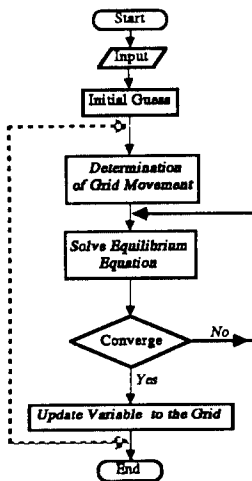


Fig. 2 Flow chart for solving procedure

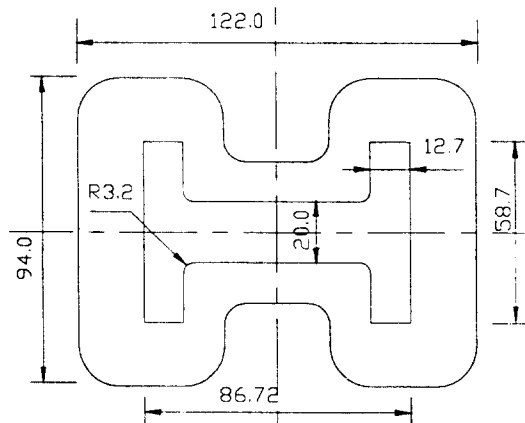


Fig. 3 Dimensions of the flow guide and the orifice profile

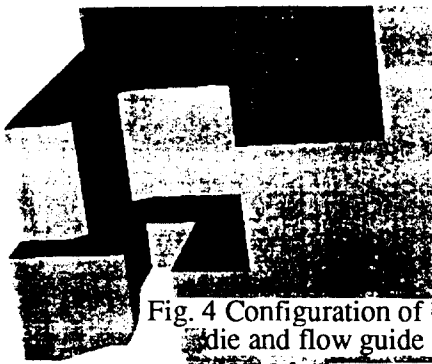
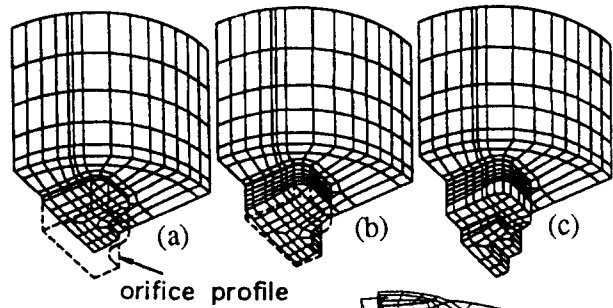


Fig. 4 Configuration of die and flow guide



orifice profile

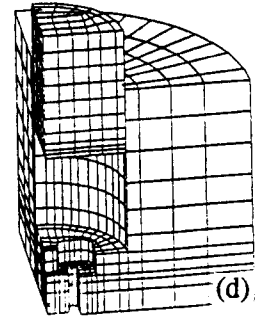


Fig. 5 Mesh configuration of (a-c)workpiece and (b)tool

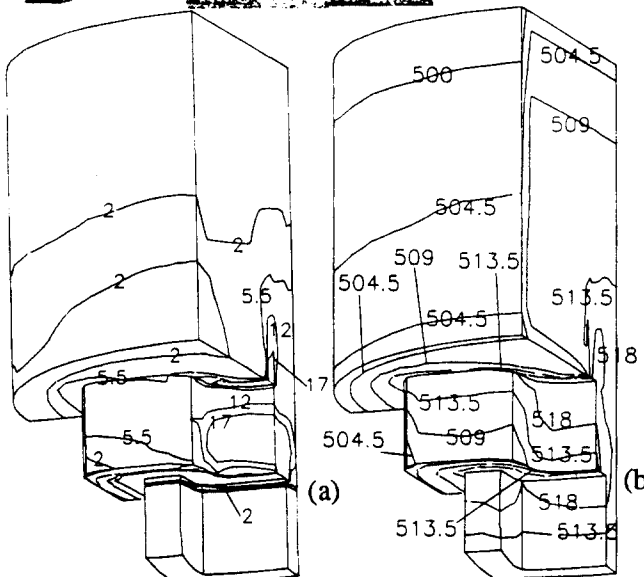


Fig. 6 Distribution of (a) effective strain rate and (b) workpiece temperature

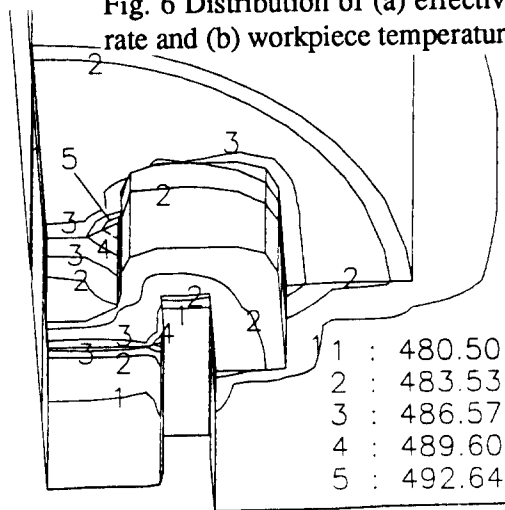


Fig. 7 Temperature distribution around the flow guide

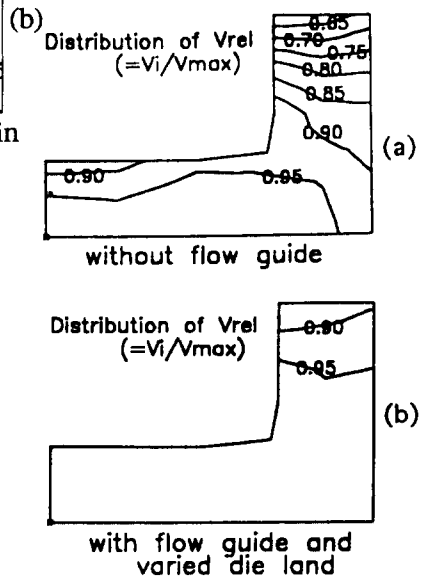


Fig. 8 Comparison of velocity distribution (a) with flow guide (b) without flow guide