

원추형 금형을 이용한 비등온 축대칭 열간 압출의 해석

강 연식*, 박 치용, 조 종래, 양 동열
(한국과학기술원 생산공학과)

1. 서론

금형의 제작이 쉽고 작은 힘으로 소재 가공을 할 수 있는 공정중의 하나가 원추형금형을 이용한 압출이다. 원추형 금형 압출은 현장에서 많이 사용되고 있으며 이에 대한 해석도 많이 이뤄졌었다. 그러나 정상상태의 해석이 대부분이었고 비정상상태 열간해석은 거의 이뤄지지않았다. 열간 압출의 경우 무시 못 할 정도로 빌렛의 물성치가 온도변화로 인하여 시간에 따라 변하기 때문에 비정상상태 해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 비정상상태 열간해석을 하였다. 온도와 변형의 해석은 계산결과와 경제성이 만족[1]되는 비연계 (decouple)방식을 채택해서 유한요소법으로 해석하였다. 계산완료까지 격자재구성을 여러번 해야되고 특히 반추각이 커질 경우는 자주 해야한다. 따라서 모듈화된 격자구조를 사용한 자동격자재구성을 제안한다. 원추형금형 압출의 경우는 원추각과 압출비에 따라 제품의 성질과 공정효율이 달라진다. 본 연구에서는 이 두 인자의 변화에 대한 해석을 간단히 하여보고 고정된 두 인자에 대한 해석을 비 정상상태로 하여 보았다.

2. 이론 해석

2.1. 변형 해석

하중의 내력(loading history)과 시간에 대한 종속성을 모두 고려하기 위하여 점소성 이론을 도입한다. 소재는 강-점소성체(Rigid-Viscoplastic)로 탄성 변형을 무시하며, 등방성(Isotropic)이고 von Mises 항복조건을 따른다고 가정한다. 비압축성 조건을 만족하기 위하여 벌칙함수(Penalty constant) K^* 를 고려한 변형해석을 위한 변분식은 다음과 같이 나타난다.

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \dot{\epsilon}) \delta \bar{\epsilon} dV + K^* \int_V \epsilon_v \delta \epsilon_v dV - \int_{S_f} (f_i + \alpha \Delta t \dot{f}_i) \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

금형과 소재의 마찰을 고려할 때는 마찰면에서 상대운동이 없는 중립점에서 특이성을 피하기 위해 다음 식을 사용한다.

$$f = -\frac{2}{\pi} m k_y \tan^{-1} \frac{|V_{dw}|}{a} \quad (2)$$

식(1)을 유한 요소 분할화한후 얻어지는 비선형 방정식을 Newton-Rapson 방법으로 풀어 변형해석을 하였다.

2.2. 온도 해석

소성변형에 소비되는 일은 5~15%가 전위 밀도를 증가시키고 나머지는 열로 발생된다는 실험결과와 열역학 제 1법칙을 이용한 열 평형 방정식은 다음과 같다.

$$K_1 T_{,ii} - \rho c \dot{T} + k^* \dot{\bar{\epsilon}} = 0 \quad (3)$$

여기에서 k^* 값은 변형 에너지가 열로 변형되는 비율인데 본 논문에서는 0.9로 취했다.

식 (3)의 약적분을 이용하고 경계부근에서 열 유량을 고려하면 아래 식을 얻는다.

$$\int_V K_1 T_{,ii} \delta T_{,ii} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V k^* \dot{\bar{\epsilon}} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (4)$$

본 논문에서는 열 유량을 구할때, 소재의 변형으로 인해 금형과 소재의 질점이 어긋난 경우에도 금형의 격자 재구성없이 계산할 수있는 방식을 사용한다. 온도는 식 (4)을 유한 요소 분할화한 뒤 유한 차분근사에 의해 선형화시켜서 구한다.[2]

3. 압출을 위한 자동격자 재구성

원추형금형 압출의 해석은 여러차례 격자재구성이 요구되고 특히 반추각이 클때 는 자주 격자재구성을 하여야 한다. 따라서 전체 계산시간과 인력의 낭비를 줄이기 위해 자동격자 재구성방법을 도입한다. 원추형 금형압출은 압출비와 반추각이 주어지면 압출제품을 묘사 할 수 있다. 본 방식은 이 두 인자가 주어지면 프로그램내에서 격자생성을 하게 된다. 자동 격자재구성

에서는 어느때 격자재구성을 할 것인가를 판별하는 것이 중요한데 본 해석에서 사용한 격자재구성 판별조건은 아래와 같다.

1) 격자찌그러짐기준

a) 내각 기준

Fig. 1의 b)에서 \vec{u}_1 과 \vec{u}_2 를 절점1에서 절점2와 4방향으로 단위 벡터할때 기준은 다음과 같다.

$$\vec{u}_1 \times \vec{u}_2 < c_d \quad (6)$$

여기서, c_d 는 각 기준 격자 찌그러짐 상수이다.

b) 절점 사이의 거리 기준

Fig. 1의 c)와 같이 격자 각변의 길이가 초기 격자변의 길이보다 어느 정도 이하가 되는 것을 기준으로 한다.

$$l/l_{om} < c_l \quad (7)$$

여기서, l 은 변형후의 격자변 길이이고, l_{om} 은 초기 격자변의 길이이며, c_l 은 길이 기준 격자 찌그러짐 상수이다.

2) 간섭조건

Fig. 1의 d)와 같이 소재 격자가 금형을 파고 들었을때 간섭량이 어느정도 이하가 되는 것을 기준으로 한다.

$$\frac{h_i}{h_o} \geq c_i \quad (8)$$

이고 여기서 c_i 는 사용자에 의해서 결정되는 간섭기준 상수이다.

위의 판별 기준에 걸렸을 경우 새로운 격자생성과 구 격자에서 신 격자로 정보를 전달하는 과정이 진행된다. 이때 신 격자는 금형과의 간섭량과 경제적인 배치를 고려한 단위체 개념(Modular Concept)를 이용한 격자 구조를 사용한다. 새로운 격자 생성은 우선 주어진 반추각과 압출비에 따라 경제적 격자(economic mesh)를 사용하지 않은 주요격자틀을 생성한다. 다음 프로그램내에 데이터화된 경제적 격자 모듈을 주요격자틀에 지정하고 이에 따라 최종적인 신격자가 생성된다. 본 연구에서 사용한 자동격자 재구성에 대한 흐름도는 Fig.2와 같다.

4.결과 및 검토

원추형금형을 통한 축대칭 열간압출을 유한요소법으로 해석하였다. 본 해석에서는 전체 계산과정에서 격자재구성이 여러차례 요구된다. 따라서 압출전용 격자재구성법을 사용하였다. 격자재구성을 자주하면, 격자재구성이 오차가 문제가 될 수 있다.

그러나 열간해석시는 유효변형율의 영향이 유효변형율속도 보다 매우 적기 때문에 크게문제가 되지 않는다. 계산에 사용한 소재는 Al-1100이고 이에 대한 유동함수와 온도에 따른 상수들은 Table.1에 나타냈다. 그리고 열적성질과 열전달 계수들은 Table.2에 나타냈다.[3] 본 해석에서는 대기중의 온도는 13 °C이며 마찰계수는 0.2이다. 펀치의 하강속도는 10mm/sec이다. 초기 소재의 크기는 $\phi 29 \times 29$ mm이다. 해석에 사용한 격자 형태는 Fig.3과 같다.

--- 비 등온 해석

Fig.4에는 비 등온해석과 등온해석시 하중을 비교하였다. 금형과 소재의 초기온도가 다를 경우는 커다란 차이를 보이고 있다. 그리고 초기온도가 같을 경우에도 7~8%정도의 차이를 보임을 볼 수 있다. 이는 온도에 따라 물성치가 변하기 때문이고 비 등온해석의 경우만이 정확한 응력분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 정확한 해석과 금형설계를 위해서는 비 등온 해석을 하여야 한다.

--- 원추각에 따른 하중비교

원추형 금형압출을 규정하는 중요한 두 인자가 반 추각과 단면감소율이다. 적절한 금형설계를 위해서 가장 중요한 인자가 하중이므로 Fig.5에 반추각의 변화에 따른 하중을 나타내 보았다. Fig.6은 단면감소율이 75%, 88%일때 최대 하중을 반추각에 따라 나타냈다. 단면감소율이 88%일때 반추각의 증가에 따라 최대하중이 감소함을 볼 수있다. 이는 마찰면의 감소가 크게 작용한 것으로 본다. 또한 단면감소율에 따라 최대하중의 변화가 다음을 볼 수 있다. 또한 이는 종전에 냉간에서 정상상태의 하중을 구한 것과는 다른 경향을 보이고 있다.[4] 따라서 일정 단면감소율에서 요구되는 하중이 최소일 경우를 구하려면 반추각을 변화시켜 가며 여러 요소들을 고려한 해석을 해야 함을 알 수 있다.

--- 비 정상상태 해석

Fig.7과 Fig.8에 펀치의 이동이 8.25, 16.5, 24.75mm일때 유효변형율속도와 온도의 분포를 나타냈다. 이 경우 단면감소율은 75%이고 반추각은 30(deg)이다. 유효 변형율속도는 원추 시작과 끝의 금형부에서 속도가 급변하기 때문에 이 부분에서는 어느때나 크게 나타났다. Fig.6과 Fig.7을 보면 유효 변형율 속도의 분포가 비슷하더라도 온도분포는 다름을 볼 수있다. 그리고 온도의 변화에 따라 소재의 물성치가 변하는 것을 고려하면 열간해석의 경우 비정상상태해석을 하여야 함을 알 수 있다. Fig.9는 비슷한 조건의 평금형 압출의 경우를 해석한 것이다. 이를 Fig.7의 c)와 비교해 보면 원추형 압출이 유효변형율 속도가 작음을 알 수있다. 따라

서 하중이 훨씬 조금 걸림을 알 수 있다. 펀치와의 접면 중앙부의 유효변형을 속도의 분포를 비교해보면 소재의 회수율과 관련된 파이핑(Piping)현상이 원추형금형의 경우가 잘 일어나지 않음을 볼 수 있다.

5. 결론

원추형금형을 통한 열간압출을 유한요소법으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열간압출에서 하중등의 정확한 예측을 위해서는 비 등온해석을 하여야 한다.
2. 시간에 따라 온도가 변하고 이에 따라 재료의 물성치가 다르기 때문에 유효변형을 속도 분포가 비슷하더라도 비 정상상태해석을 하여야 한다.
3. 본 해석에서 제안한 원추형 압출을 위한 자동 격자재구성법은 실제공정의 작업완료까지 계산을 가능하게 하고 입력과 시간이 절약을 가져옴을 확인되었다.
4. 비 정상상태해석은 정상상태해석보다 파이핑 등 실제현상을 쉽게 예측할 수 있다.

참고 문헌

1. J.R.Cho, C.Y.Park, M.S.Cheon, J.H.Yoon and D.Y.Yang, " Comparative Study of the Coupled and Decoupled Analysis of Deformation and Heat Transfer for Two-Dimensional Hot Forging", 대한 기계학회 논문집, 제14권, 제4호, pp. 839-849 (1990)
2. 박치용, 조종래, 양동열, " 열간반경단조의 2차원 유한 요소해석", 대한기계학회 논문집, 제 14권, 제5호, pp.1166-1180 (1990)
3. 천명식, " 축대칭 및 평면 변형단조의 열-점소성 유한 요소해석", 석사 학위논문, KAIST (1988)
4. Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill(1985)
5. 강연식, 박치용, 조종래, 양동열, "Finite Element Analysis of Axisymmetric Extrusion through Square Dies", 대한기계학회 논문집(출간예정)

$$\bar{\sigma} = c(\dot{\epsilon})^n$$

temp	c (N/mm ²)	n
200 °C	84.18	0.075
400 °C	31.05	0.141
500 °C	14.49	0.224

Table 1, Stress-strain rate properties of Al-1100 given with respect to the temperature

Coeff	k	ρc	h	h_{ub}	ϵ
	N/(sec·°C)	N/(mm ² ·°C)	N/(sec·mm·°C)	N/(sec·mm·°C)	
DIE	19.012	3.77	0.015	35.02	0.1
W.P. (Al 1100)	242.148	2.427	0.003		0.15

($h_{ub} = 4.5$)

Table 2. thermal properties and heat transfer coefficient for Al-1100

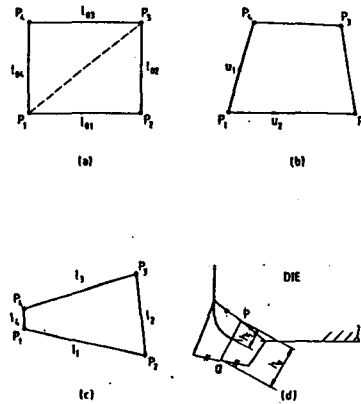


Fig.1 Criterion for remeshing
a) Initial mesh
b) mesh degeneration criterion (angle check)
c) mesh degeneration criterion (length check)
d) interference criterion

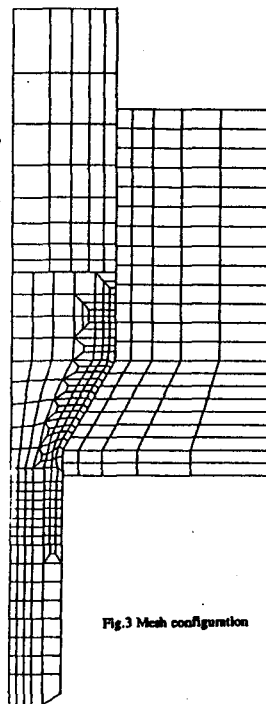


Fig.3 Mesh configuration

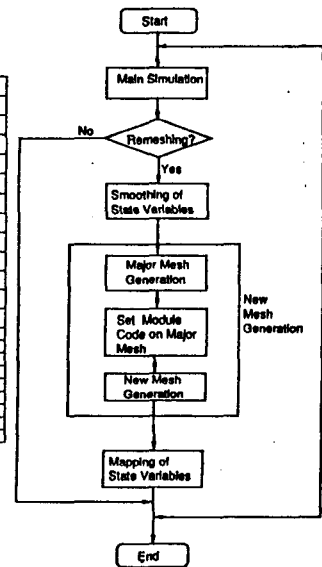


Fig.2 Flow chart for automatic remeshing

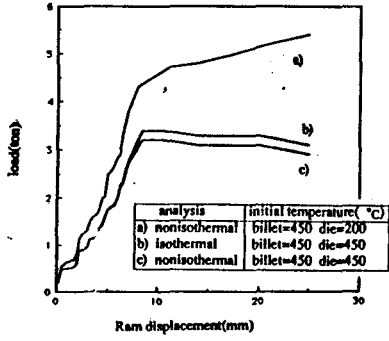


Fig. 4 Comparison of the load between isothermal and nonisothermal analysis

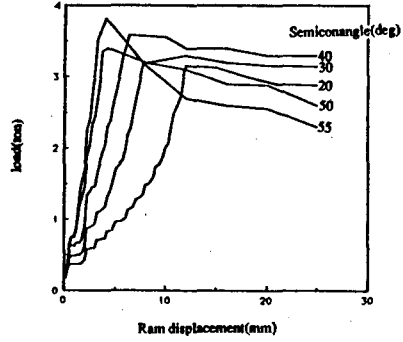


Fig. 5 Variation of extrusion load with respect to semiconangle (R.A.=75%)

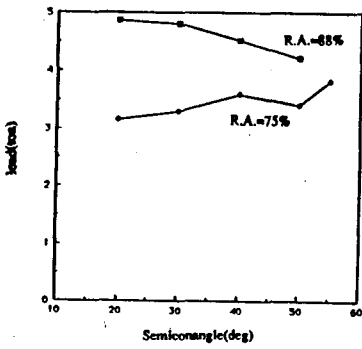


Fig. 6 Variation of extrusion load with respect to semiconangle and R.A.

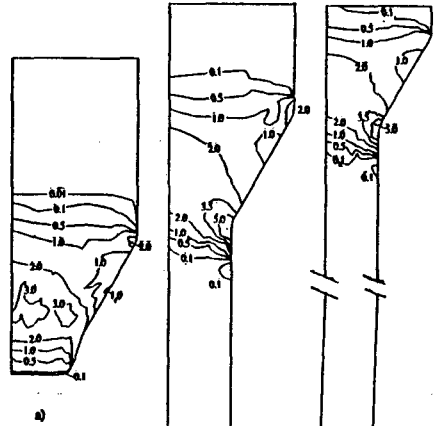


Fig. 7 Distribution of effective strain rate at the ram displacement of a) 8.25 mm b) 16.5 c) 24.75 mm

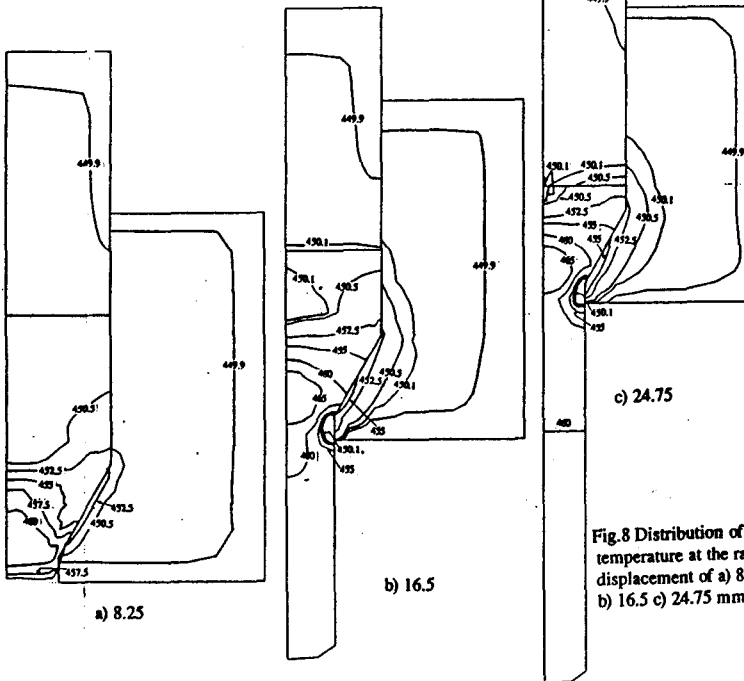


Fig. 8 Distribution of temperature at the ram displacement of a) 8.25 mm b) 16.5 c) 24.75 mm

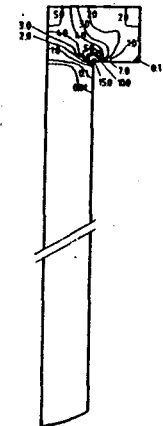


Fig. 9 Distribution of effective strain rate for square die extrusion