

〈論 文〉

속도의존성 재료에 대한 축대칭 전방압출의 유한요소 해석

최재찬* · 김병민* · 최인근** · 이종수*** · 홍성석*** · 조남춘***

(1990년 8월 9일 접수)

Finite Element Analysis of Axisymmetric Extrusion with Strain Rate Sensitive Materials

J.C. Choi, B.M. Kim, I.K. Choi, J.S. Lee, S.S. Hong and N.C. Cho

Key Words : Strain Rate Sensitivity(속도의존성), Flow Stress(유동응력), Rigid-Viscoplastic Finite Element Analysis(강-점소성 유한요소 해석) Axisymmetric Forward Extrusion(축대칭 전방압출)

Abstract

In this study, the strain rate effects are considered in the formulation by introducing the constitutive equation of the strain rate sensitive materials and rigid-viscoplastic finite element program is developed for axisymmetric extrusion. The effect of strain rate sensitivity on the flow characteristics and forming pressure are investigated and the experiments are carried out for extrusion with pure lead specimens. The theoretically predicted forming pressure showed reasonably good agreement with the experimental values.

기 호 설 명

- B : 속도 벡터와 변형률의 관계를 위한 행렬
- C : 체적 변형률과 변형률의 관계를 위한 행렬
- E : 일함수(work function)
- f : 금형과 소재간의 마찰응력
- F : 외부 접촉력
- k : 전단 유동응력(shear flow stress)
- K : 재료 상수(material constant)
- m : 변형률 속도민감성 지수(strain rate sensitivity factor)
- m_f : 일정 전단 마찰상수(constant shear friction factor)
- n_j : 외향 단위 법선 n 의 방향 여현
- N : 형상 함수(shape function)

- R_i, R_0 : 다이 입구 및 출구 반경
- S_F : 힘이 미리 규정된 표면
- S_U : 속도가 미리 규정된 표면
- u_i : 속도 벡터
- V : 물체의 총체적
- V_R : 램의 속도
- $\bar{\epsilon}$: 유효변형률 속도(effective strain rate)
- $\dot{\epsilon}_{ij}$: 변형률 속도 텐서
- $\dot{\epsilon}_v$: 체적 변형률
- η : 감속 계수(deceleration coefficient)
- $\bar{\sigma}$: 유효응력(effective stress)
- σ_{ij} : 응력 텐서
- Φ : 범함수(functional)

1. 서 론

최근 자동차 및 항공우주 분야에서 소재의 경량

* 정회원, 부산대학교 공과대학 기계설계공학과
 ** 정회원, 부산대학교 대학원
 *** 정회원, 국방과학연구소

화, 고강도화가 요구됨에 따라 신소재의 연구가 급속히 진행되고 금속 복합 재료 및 고강도 알루미늄 합금 등이 많이 개발되고 있으나 이를 부품으로 실용화 하기위한 2차 가공기술이 상대적으로 미흡한 실정이다. 따라서 공정 조건을 최적화 함으로써 결함이 없는 제품을 효율적으로 생산하기 위해서는 재료의 특성, 가공하중, 성형과정에서의 변형 모드 등을 정확히 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다.

일반적으로 금속은 변형력, 온도, 변형률 속도 등의 요인으로 인하여 그 특성이 변하는 것으로 알려져 있다. 특히 몇몇 금속에서는 어느 한정된 변형률 속도 및 온도영역에서 변형을 가하면 가공 저항이 현저하게 감소되어 가공성 및 가공한계가 수백 퍼센트까지 향상되어지는 초소성(super plasticity)의 성질을 지니는 경우도 있다.

금속 성형에 있어서 재료의 이러한 특성을 이용하기 위하여는 여러 공정변수 중 재료의 유동응력(flow stress)이 가장 중요한 요소가 되며 이때 대부분의 금속은 고온에서, 납과 같은 재료는 상온에서 유동응력이 변형률 속도의 영향을 많이 받게됨으로써 변형률 속도의존성 재료(strain rate sensitive materials)가 되어진다.

최근 재료의 이러한 변형특성을 이용하기 위한 가공법의 연구가 실험적 혹은 이론적으로 많이 이루어졌다.

Shabaik은 변형 가시화법(visio plasticity method)^(1,2)을 도입하여 실험 및 해석적 방법으로써 초소성 재료의 변형특성^(3,4)을 연구하였고, Altan⁽⁵⁾은 열간압출을 행함으로써 이중 재료의 변형특성을 상호 비교하였으나 실험적 관찰단계에 그쳤다.

정확한 이론해석은 유한요소법과 같은 수치적 해법을 적용함으로써 가능하게 되었는데 Tomita와 Sowerby^(6,7)등은 에너지 범함수 개념을 도입하여 초소성 재료인 lead-tin의 평면 응력 및 평면 변형 문제에 대하여 점소성(visco plasticity) 해석을 시도하였고, Oh와 Rebelo⁽⁸⁾등은 $\sigma = Y[1 + (\dot{\epsilon}/\gamma)^n]$ 의 구성식을 이용하여 납의 압축문제에 대하여 해석하였다.

본 논문에서는 속도의존성을 나타내는 여러 구성식 중에서 가장 많이 쓰이고 또한 재료의 특성치가 비교적 잘 알려진 $\bar{\sigma} = K\dot{\epsilon}^m$ 의 구성식을 이용하여 벌칙함수(penalty function)를 도입한 범함수를 최소화 시킴으로써, 속도의존성 재료에 대한 축대칭 전방압출 해석을 위한 유한요소 프로그램을 개발하

였고 이를 이용하여 압출시 변형률 속도가 재료의 유동특성 및 가공하중에 미치는 영향을 관찰하였다.

또한 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 상온에서 속도의존성을 나타내는 순납(pure lead)으로 압출 실험을 행함으로써 실험 결과와 FEM 이론치를 비교 검토하였다.

2. 이론해석

2.1 구성식 및 범함수의 수식화

변형률 속도의존성 재료의 변형특성을 나타내는 일반적인 구성식으로써 본 논문에서는 다음과 같은 식을 적용한다.

$$\bar{\sigma} = K\dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

여기서 K 는 재료에 대한 상수이고 m 은 유효변형률 속도에 따라 규정되는 값으로써 실험적으로 정해진다.

식 (1)이 적용되기 위하여 전변형률 속도에 대하여 탄성변형률 속도는 무시하고 체적변형은 없다고 가정한다.

여기서 다음식으로 정의되는 일함수(work function) E 를 도입하면

$$\begin{aligned} E &= \int \sigma'_{ij} d\epsilon_{ij} \\ &= \int \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (2)$$

이 되어지고 식 (1)을 적용하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$E = \frac{K}{(1+m)} \dot{\epsilon}^{m+1} \quad (3)$$

변형률 속도의존성 재료의 변형공정에 대한 경계치 문제에서 비압축성 조건과 속도 경계조건을 만족하는 속도장 u_i 에 대하여 최소에너지 원리로 표현된 범함수 Φ 는

$$\Phi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_F} F_i u_i dS \quad (4)$$

가 되어지며 비압축성 구속조건을 소거하기 위하여 벌칙함수를 도입함으로써 식 (4)를 수정하면 다음과 같다.

$$\Phi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_F} F_i u_i dS + \frac{\xi}{2} \int_V \dot{\epsilon}^2 dV \quad (5)$$

여기서 ξ 는 벌칙함수 값으로써 양의 큰 정수값이 되어진다.

2.2 유한요소 방정식의 최소화

전 체적이 n 개의 절점으로 연결된 M 개의 요소로 분할되었다고 가정하면 전체 범함수 Φ 는 각 요소의 범함수 $\Phi^{(m)}$ 의 합으로 생각할 수 있다.

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \bar{\Phi}^{(m)} \quad (6)$$

또한 속도 벡터 u_i 에 대하여 형상함수로 표현하면

$$u_i = \sum_{a=1}^q N_{ia} u_a \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

가 되어진다.

따라서 식 (7)을 식 (6)에 대입하면 전체 범함수 Φ 는 절점에서의 속도 변수 u_i 의 함수가 되고 이를 최소화하면

$$\frac{\partial \Phi}{\partial u_i} = 0 \quad (8)$$

와 같이 되어진다. 이때 식 (8)은 비선형이므로 해를 구하기 위해 Newton-Raphson 반복 기법을 적용한다.

범함수를 유한요소 정식화 하기 위하여 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_i$, 유효변형률 속도 $\dot{\bar{\epsilon}}$, 체적변형률 $\dot{\epsilon}_v$ 를 식 (7)을 사용하여 나타내면 다음과 같은 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_i &= B_{ia} u_a \\ \dot{\bar{\epsilon}} &= \sqrt{\frac{2}{3} K_{as} u_a u_s} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_v = Q_a u_a$$

여기서

$$\begin{aligned} B_{ia} &= A_{ij} N_{ja} \\ Q_a &= C_i B_{ia} \\ K_{as} &= B_{ia} B_{is} \end{aligned} \quad (10)$$

로 정의된다.

식 (5)과 식 (6)을 간략하게 표현하면

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \tan[\Phi_1^{(m)} + \Phi_2^{(m)} - \Phi_F^{(m)}] \quad (11)$$

이 되며 이틀 식 (8)에 적용시키기 위하여 각 항에 대하여 유도하면 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1^{(m)}}{\partial u_a} &= \int_{V(m)} \frac{2}{3} \frac{\partial E}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \frac{K_{ar} u_r}{\dot{\bar{\epsilon}}} dV \\ \frac{\partial \Phi_2^{(m)}}{\partial u_a} &= \int_{V(m)} \xi Q_a Q_{rs} dV \\ \frac{\partial \Phi_F^{(m)}}{\partial u_a} &= \int_{S(m)} F_i N_{ia} dS \\ \frac{\partial^2 \Phi_1^{(m)}}{\partial u_a \partial u_s} &= \frac{4}{9} \int_{V(m)} \left[\frac{1}{\dot{\bar{\epsilon}}^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}^2} - \frac{1}{\dot{\bar{\epsilon}}^3} \frac{\partial E}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \right] K_{ar} K_{rs} u_r u_s dV \end{aligned} \quad (12)$$

$$+ \frac{2}{3} \int_{V(m)} \frac{\partial E}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \frac{1}{\dot{\bar{\epsilon}}} K_{as} dV$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_2^{(m)}}{\partial u_a \partial u_s} = \int_{V(m)} \xi Q_a Q_{rs} dV$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_F^{(m)}}{\partial u_a \partial u_s} = 0$$

또한 식 (2)와 (3)으로부터

$$\frac{\partial E}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} = K \dot{\bar{\epsilon}}^m$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}^2} = K m \dot{\bar{\epsilon}}^{(m-1)} \quad (13)$$

로 되므로 식 (12), (13)을 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 최종 행렬식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{4}{9} \sum_{m=1}^M \left\{ \int_V (m-1) K \dot{\bar{\epsilon}}^{(m-3)} K_{ar} K_{rs} u_r u_s dV + \frac{2}{3} \sum_{m=1}^M \int_V K \dot{\bar{\epsilon}}^{(m-1)} K_{as} dV + \sum_{m=1}^M \int_V \xi Q_a Q_{rs} dV \right\} \right]_{n-1} \Delta u_n \\ & = - \left[\sum_{m=1}^M \left\{ \int_V \frac{2}{3} K \dot{\bar{\epsilon}}^{(m-1)} K_{ar} u_r dV - \int_S F_i N_{ia} dS + \int_V \xi Q_a Q_{rs} u_r dV \right\} \right]_{n-1} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)는 비선형 방정식이므로 각 반복 과정으로부터 얻은 속도장은 다음식에 의해 수정되어 새로운 속도장을 얻는다.

$$u_n = u_{n-1} + \eta \Delta u_n \quad (15)$$

여기서 η 는 해의 발산을 피하기 위한 감속계수 (deceleration coefficient)로써 $0 \leq \eta \leq 1$ 의 값을 갖는다.

3. 실험

압출 실험을 하기 위하여 사용된 기계는 유압으로 작동되는 만능 인장시험기(U.T.M: TO YO BAL-DWIN)로써 최대 용량이 30톤이다. 금형과 다이는 SKD11 공구강을 가공, 열처리 하였으며 다이 반각은 15°, 30°, 60°에 대하여 단면감소를 40%, 75%가 되도록 제작하였다.

실험 소재로써 상온에서 비교적 가공경화성이 적고, 변형률 속도의 영향을 많이 받는 순납(pure lead)을 사용하였고, 빌렛은 정상상태의 압출이 가능하도록 충분히 긴 $\phi 35\text{mm} \times 120\text{mm}$ 로써 제작하였다.

소재와 금형 사이에 마찰상수를 측정하기 위해 동일 재료를 외경, 내경 및 높이의 비가 6:3:2(35mm : 17.5mm : 11.67mm)로 가공하여 링 압축 시

험을 행하였는데, 윤활재로써 MoS₂분말을 칼슘 그리스에 증량비로 10% 섞어서 사용한 결과 0.13으로 측정되었다. 램의 속도를 압출시와 동일하게 3 단계로 나누어 실험한 결과 램의 속도에 따른 내부 직경의 차이는 거의 없었고, 마찰이 큰 경우에 대하여 마찰상수가 변형률 속도 민감성 지수에 영향을 받는다고 알려져 있으나⁽⁹⁾ 본 실험에서는 마찰상수가 작고 또한 상온에서 m 의 변화가 크지 않기 때문에 기존의 보정곡선⁽¹⁰⁾을 이용하였다.

램의 속도에 따른 압출하중의 영향을 관찰하기 위하여 같은 다이반각 및 단면감소율에 대하여 램의 속도를 100, 200, 300mm/min로 변화시켜 가면서 압출하였고 이때 하중은 만능 시험기에 부착된 로드 셀을 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

변형률 속도의존성 재료에 대한 축대칭 압출 공정을 해석하기 위한 격자 계(mesh system) 및 경계조건은 Fig. 1과 같으며 변형이 심한 다이의 입출구 부분과 경계면 상의 요소를 비교적 조밀하게 구성함으로써 해의 정확성을 꾀하였다.

본 논문에서 사용된 순납(pure lead)은 상온에서 변형률보다 변형률 속도의 영향을 더 많이 받는 속도의존성 재료로써, 계산시 사용된 구성방정식의 재료 상수는 $K=2.81$ (kg/mm²), $m=0.055$ ⁽¹¹⁾이며 실험과 동일한 빌렛의 치수와 램의 속도를 입력하여 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 다이반각 30°, 60°에 대하여 단면감소율 75%로 하여 램의 속도를 100, 200, 300mm/min로 변화시켰을 때의 실험치와 이론치의 비교를 나타내

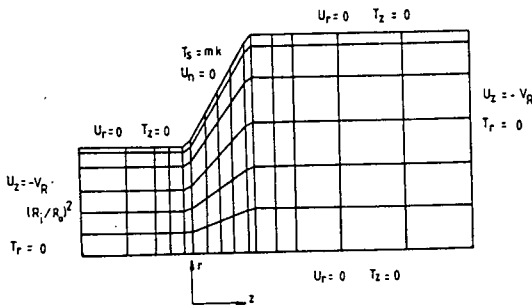


Fig. 1 Mesh system and boundary conditions for computation

는데 이론해석의 결과치는 실제 실험치보다 약간 큰 값을 가지면서 정량적으로 잘 일치함을 보이며 램의 속도가 증가함에 따라 평균 압출하중은 변형률 속도 민감성 지수 m 의 영향을 받아 미소하게 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 3은 동일조건에서 램의 속도가 100mm/min 일때 마찰조건에 따른 압출하중의 변화를 보여 주는데 마찰상수가 크질수록 압출하중은 증가하며, 같은 단면감소율에서는 다이반각이 작을때 마찰조건의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

Fig. 4에서는 변형률 속도의 효과를 관찰하기 위하여 각각 다른 가공조건에 대하여 변형률 속도 민감성지수 m 을 0.0에서 1.0까지 변화시켜 가면서

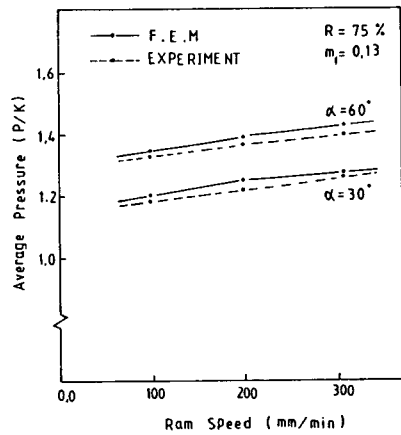


Fig. 2 Comparison of theoretical and experimental extrusion pressure at various ram speeds

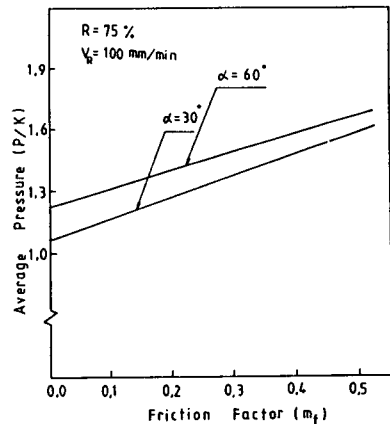


Fig. 3 Relation between extrusion pressure and friction factor at different semi die angles

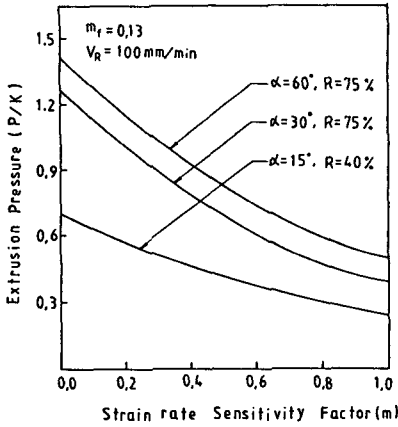


Fig. 4 Theoretically determined variation in extrusion pressure as a function of the m value for various process conditions

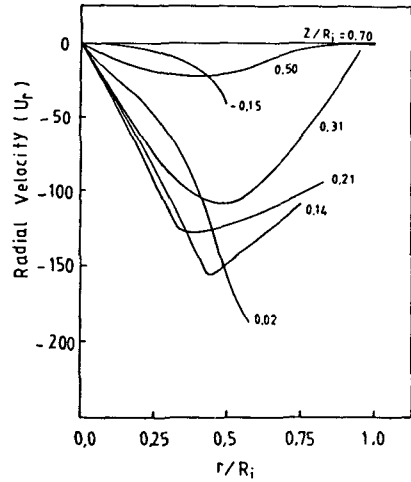


Fig. 6 Radial velocity distribution in axisymmetric extrusion with $\alpha=60^\circ$, $R=75\%$, $m_f=0.13$

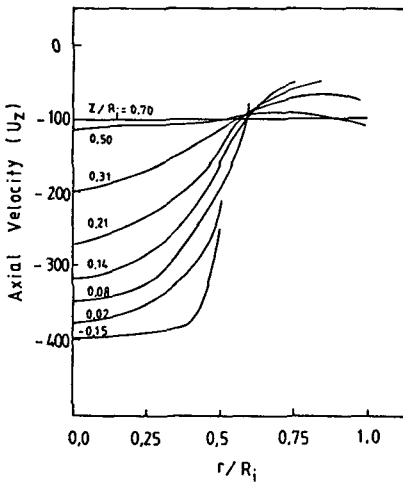
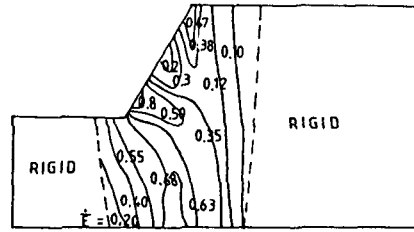


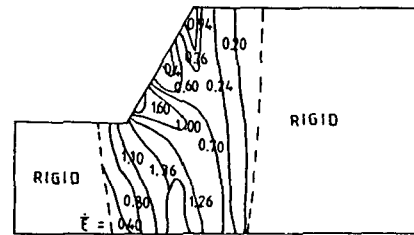
Fig. 5 Axial velocity distribution in axisymmetric extrusion with $\alpha=60^\circ$, $R=75\%$, $m_f=0.13$

이론적인 압출하중을 계산하였는데, m 이 0일때 완전 강소성⁽¹²⁻¹³⁾을 나타내며 m 값이 증가할수록 전반적으로 평균 압출압력은 감소하고 다이반각 및 단면감소율이 커질수록 m 값에 큰 영향을 받는것을 알 수 있다.

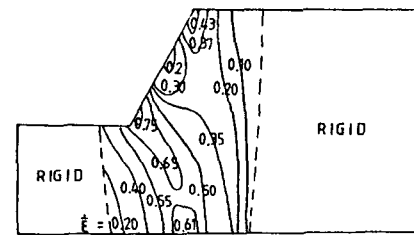
Fig. 5는 다이반각 60° , 단면감소율 75%일 때 z 방향의 속도 U_z 를 r 축에 따라 나타낸 것으로 입구 부근에서 z 방향의 속도는 큰 변화가 없으나 출구 쪽으로 갈수록 급격히 변화함을 알 수 있다. 또한 Fig. 6은 r 방향의 속도 U_r 를 r 축에 따라 나타낸 것으로 큰 다이반각 및 높은 감소율로 인하여 다이



(a) $K=2.81$, $m=0.055$, $V_R=100$ (mm/min)

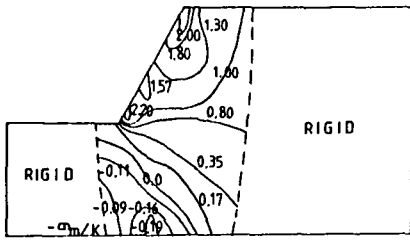


(b) $K=2.81$, $m=0.055$, $V_R=200$ (mm/min)

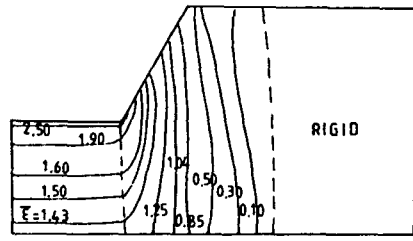


(c) $K=2.81$, $m=0.11$, $V_R=100$ (mm/min)

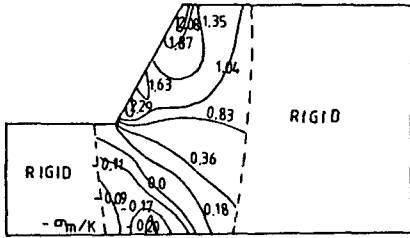
Fig. 7 Comparison of effective strain rate distribution for various conditions



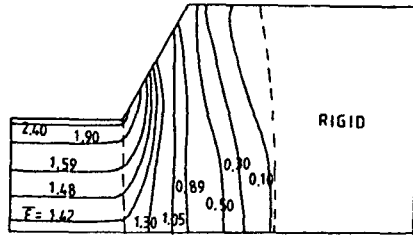
(a) $K=2.81, m=0.055, V_r=100$ (mm/min)



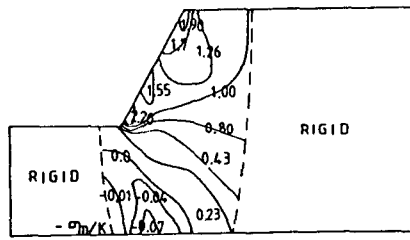
(a) $K=2.81, m=0.055, V_r=100$ (mm/min)



(b) $K=2.81, m=0.055, V_r=200$ (mm/min)



(b) $K=2.81, m=0.11, V_r=100$ (mm/min)



(c) $K=2.81, m=0.11, V_r=100$ (mm/min)

Fig. 8 Comparison of mean stress distribution for various conditions

Fig. 9 Comparison of total effective strain distribution for different conditions

입구 휨선 전부터 영향을 받아 점차 증가하다가 다이 출구 부위에서 최대값을 가지며 출구를 상당히 지난 후에서야 r방향의 속도는 없어지는 것으로 나타났다.

Fig. 7과 8에서는 같은 다이반각 및 단면감소율에 대한 램의 속도 및 변형률 속도민감성 지수 m 이 변화함에 따른 변형영역 내의 유효변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 및 평균 정수압응력 σ_m 의 분포를 비교 도시하였다.

여기서 유효변형률 속도는 램의 속도를 달리 했을 때 다이의 입구 및 출구의 모서리 부분에서 큰 값을 가지고 중간부분에서는 상대적으로 작은 값을 가지다가 중심축 부위로 갈수록 다시 증가함으로써 두 경우 모두 거의 같은 분포를 보이며, 크기에 있

어서는 $V_r=200$ 인 경우가 100인 경우에서의 유효 변형률 속도의 2배가 됨을 알 수 있다. 또한 변형률 속도민감성 지수가 변형특성에 미치는 영향을 보기 위하여 같은 램의 속도에서 속도민감성 지수를 2배로 가상하여 비교해 본 결과, $m=0.055$ 일 때의 유효변형률 속도는 $m=0.11$ 일때에 비하여 약간 다른 분포를 보이고, 크기에 있어서는 다소 작은 값을 나타내고 있다.

정수압응력의 비교에 있어서 램의 속도가 2배로 커짐에 따라 다이의 입, 출구 모서리 부위에서 가장 큰 값을 가지고 중심축선 상으로 갈수록 작아짐으로써 정수압 응력의 분포와 크기에 있어 서로 거의 변화가 없으나, 속도민감성 지수가 증가함에 따라 정수압응력의 크기는 다소 감소하며 분포에 있어서도 중심축 부위에 약간의 변화가 있음을 보이고 있다.

Fig. 9는 총 유효변형률의 분포를 나타낸 것으로 입구에서부터 출구로 가면서 유효변형률 값은 누적되어 커지고 있으며 출구 부분에서는 중심축에서부터 증가하여 재료 표면에서 가장 큰 값을 가지는데, 속도민감성 지수의 변화에 유효변형률의 분포 및 크기에 있어서 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

속도의존성 재료에 대하여 축대칭 전방압출 해석을 위한 강 점소성 유한요소 프로그램을 개발하여 변형률 속도가 재료의 변형특성과 가공하중에 미치는 영향을 관찰하고 이를 실험을 통하여 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 평균 압출하중의 이론치는 상온에서 속도의존성 재료인 순납을 이용한 압출 실험과 비교한 결과 정량적으로 잘 일치함으로써 프로그램의 타당성을 확인 하였다.

(2) 램의 속도 및 속도민감성 지수를 변화시킴으로써 여러 가공 조건에 대하여 하중과 변형특성을 관찰한 결과, 속도민감성 지수 m 이 커짐에 따라 가공하중은 점차 감소하며 응력, 유효변형률 속도 등은 크기와 분포에 있어 미소하게 변하고 유효변형률은 큰 변화를 보이지 않았다.

(3) 개발된 프로그램은 실험과의 비교 결과로부터 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 형태의 구성방정식을 따르는 속도의존성 재료의 축대칭 문제에 대한 변형특성을 연구하는데 적절한 해석도구로 사용될 수 있으며 특히 $m=0$ 인 경우에는 완전 강소성문제의 해석도 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Shabaik, A. H. and Kobayashi, S., 1967, "Computer Application to Visioplasticity Method", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B. Vol.89, No.2, pp. 339~346.
- (2) Shabaik, A.H. and Thomsen, E.G., 1967, "Investigation of the Application of Visioplasticity Method of Analysis to Metal Deformation Processing", Final Report Prepared MPEP Program Sponsored by the Bureau of Naval Weapons.
- (3) Jovane, F., Shabaik, A.H. and Thomsen, E.G., 1969, "Some Extrusion Studies of Eutectic Alloy of Pb and Sn", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B. Vol.90, No.3, pp. 680~686.
- (4) Shabaik, A.H. and Virani, A.M., 1972, "the Use of Super Plastic Alloy of The Eutectic of Lead-Tin for the Analysis of Hot Extrusion Process", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, pp. 1060~1066.
- (5) Altan, T. and Kobayashi, S., 1968, "Plastic Deformation of Copper and Steel in Hot Extrusion Through Conical Dies", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B, Vol. 90, No.2, pp. 371~380.
- (6) Tomita, Y. and Sowerby, R., 1978, "An Approximate Analysis for Studying the Deformation Mechanics of Rate Sensitive Materials", Int. J. of Mech. Sci., Vol.20, pp. 361~371.
- (7) Tomita, Y. and Sowerby, R., 1979, "An Approximate Analysis for Studying the Plane Strain Deformation of Strain Rate Sensitive Materials", Int. J. of Mech. Sci., Vol.21, pp. 505~516.
- (8) Oh, S.I., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1978, "Finite Element Formulation for the Analysis of Plastic Deformation of Rate Sensitive Materials for Metal Forming", Metal Forming Plasticity, IUTAM Symposium, Tutzing, Germany, pp. 273~291.
- (9) 양동열, 박치용, 1990, "가공 경화지수 및 변형률 속도 경화지수의 변화가 마찰상수에 미치는 영향", 1990년도 정밀학회 추계학술대회 초록집, pp. 107~116.
- (10) Lee, C.H., and Altan, T. 1972, "Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinder", Trans. ASME, J. Engr. Industry, Vol.94, No.3, p. 775.
- (11) Altan, T. and Boulger, F.W., 1973, "Flow Stress of Metals and It's Application in Metal Forming Analyses", Trans. ASME, J. Engr. Ind., p. 1009.
- (12) Chen, C.C., 1978, "Finite Element Analysis of Plastic Deformation in Metal Forming Processes", Ph. D Dissertation, University of California, Berkeley.
- (13) 양동열, 이중홍, 1985, "강소성 유한요소법을 이용한 축대칭 전방압출 해석", 대한기계학회논문집, 제9권 제4호, pp. 452~462.