

임의 형상의 다이를 이용한 반용융 단조 공정의 유한요소해석

강충길*, 김남석**

A Finite Element Analysis of Thixoforging Process by using Arbitrarily Shaped Dies

Chung Gil Kang*, Nam Seok Kim**

ABSTRACT

A new forming technology has been developed to fabricate near-net shape components by using aluminum alloys with globular microstructure. The estimations of filling characteristic in the forging simulation with arbitrarily shaped dies of SSM are calculated by finite element method with proposed algorithm. The proposed model and various boundary conditions for arbitrarily shaped die are investigated with the coupling calculation between the liquid phase flow and the solid phase deformation. The simulation processes with arbitrarily shaped dies are performed on the isothermal conditions and axisymmetric problems. To analyze the forging process simulation with SSM, new stress-strain relationship for semi-solid behaviour is described, and forging analysis is performed by a compressible rigid viscoplastic model for the solid phase and the Darcy's law for the liquid flow. Furthermore, For the purpose of getting net shape of SSM, it is important to be obtain a solid fraction in forging process with arbitrarily shaped dies. To produce a automotive part which have good mechanical properties, the filling pattern in accordance with die velocity and solid fraction distribution has to be estimated for arbitrarily shaped die.

Key Words : Globular microstructure (구상화 조직), Solid fraction(고상율), Arbitrarily shaped die(임의형상금형), Filling phenomena(충전현상), Filling limitations(충전한계), Thixoforging(반용융단조)

1. 서론

반용융단조(thixoforging)는 구상화 조직을 가진 빌렛을 원하는 온도로 재가열한 후 금형에 주입하여 가압하는 공정이다.

반용융 재료의 단조공정중 고상과 액상의 분리 현상에 기인한 편석과 고상율제어등을 위하여는 금

형설계등에 필요한 수치해석 방법의 제안이 중요하다. 반용융재료를 이용한 수치해석적인 방법에 관한 연구로서 Toyoshima등^{(1),(2)}은 반용융재료에 대해서 여러 가지 성형속도를 적용하여 압축, 압연 및 전방압출 해석을 실행하였다. Bolmaro등⁽³⁾은 유한요소 기술을 이용하여 항복응력비, 변형률 분포 및 고상율의 체적율 사이의 관계를 연구하였다. 강 등⁽⁴⁾

* 회원, 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

은 반응용 소재는 압축성형시 변형률의 증가에 따라서 응력이 항상 일정하게 증가되지 않고 변형률의 증가에 따라서 응력이 증가 또는 감소되는 현상이 일어나기 때문에 분리계수를 도입하여 응력과 변형률의 관계를 제안하였으며, 또한 압축해석결과를 실험결과와 비교검토 하였다. Koç^등(⁵)은 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM을 사용하여 A356(ASM 규격으로 프랑스 페시니사의 67S) 재료의 반응용단조에 대한 유한요소 해석결과들을 나타내었다. Gebelin^등(⁶)은 반응용재료의 압축실험에 대한 유한요소 시뮬레이션을 하였고, 강 등^{(7),(8)}은 Toyoshima가 사용한 다공질 재료의 항복조건식을 사용하여 알루미늄 재료의 압축공정에 대하여 유한요소 해석과 실험을 행하였다. 강 등^{(9),(10)}은 고상율이 50% 이하인 반응용 알루미늄재료의 단조공정을 실험과 유한차분법으로 해석하여 게이트의 형상변화에 따른 단조품의 기계적 성질과 충전거동을 비교검토하였다.

지금까지 발표되어진 실험 및 수치해석에 관한 연구들은 반응용재료의 단순 압축해석에 관한 연구가 대부분이고, 임의형상의 금형을 이용한 충전거동을 파악한 연구결과는 아직까지 보고되지 않고 있다. 실제 자동차부품으로 이용할 수 있는 제품의 모양은 임의의 형상을 가진 복잡한 모양으로 되어 있기 때문에 실험을 통한 시행착오법에 의해 최적의 변수를 선정하기는 곤란하다. 따라서 단조공정에 있어서 반응용재료의 충전거동과 편석방지를 위해서는 임의형상의 부품성형에 응용이 가능하도록 해석방법을 제안하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 단순압축에서의 이론해석 결과를 실험치와 비교하여 이론해석의 타당성이 입증된 알고리즘⁽⁴⁾을 이용하여 임의의 형상 다이에 대한 반응용 성형 공정의 해석방법을 제안하고자 한다.

또한 반응용재료가 금형내부로 충전될 때 금형속도의 변화에 따른 고상율분포, 유효변형률속도, 유효변형률 및 단조하중 등을 파악하기 위하여 고상영역의 변형과 액상영역의 유동을 동시에 고려하였다. 임의의 형상에 대한 유한요소 해석은 성형시 격자재구성(remeshing)등이 필요하기 때문에 격자재구성의 유무에 따른 결과의 차이점을 비교검토 하였다. 해석을 위하여 다공질이론과 다공질체를 통과하는 유체유동법칙을 다루고 있는 Darcy's Law를 적용하여 고상영역의 변형과 액상영역의 유동을 동시에 고려한 압축성 점소성 유한요소 해석을 임의형상에 대하여 응용하였다.

2. 이론 해석

2.1 반응용재료의 고상영역에 관한 소성이론

상대밀도가 100%인 재료에 대해서는 Von Mises나 Tresca의 항복조건을 사용하여 재료의 구성방정식을 세우는데, 이러한 재료들은 소성변형중에 부피의 변화를 동반하지 않는 비압축성재료로써 재료의 항복함수는 정수압응력의 영향을 받지 않는다. 반응용상태의 재료는 고상입자들 사이의 공간을 충전하고 있는 2상(two phase) 매개물로써 소성변형시 액상 압력에 의한 정수압응력의 영향을 받으며 부피의 변화를 동반한다. 따라서 반응용재료의 항복조건에는 정수압응력의 영향이 포함되어야 한다.

반응용재료의 고상입자와 액상사이의 소성변형에 대한 정확한 항복함수는 지금까지 알려지지 않았기 때문에 고상에 대해서는 다공질개념을, 액상에 대해서는 Darcy이론을 적용하였다. 고상에 대해서는 다공질재료의 항복함수를 사용하였는데, Shima & Oyane^등(¹¹)이 제시한 항복조건식이 실험치와 근접하게 나타나기 때문에 본 논문에서는 다공질체의 조밀화에 대한 몇가지 항복조건중에서 Shima & Oyane이 제시한 항복조건식을 사용하여 반응용재료의 고상입자에 대하여 소성변형을 예측하였다.

$$F = (A J_1^2 + B J_2')^{1/2} = C \bar{\sigma} \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{9f^2}, B = 3, C = (f_s)^k, k = 2.5$$

$$f = \frac{1}{a(1-f_s)^b}, a = 2.49, b = 0.514$$

여기서, J_1, J_2', f_s 는 각각 응력 제 1 불변량, 편차 응력 제 2 불변량, 고상율이다.

액상영역과 고상영역이 동시에 공존하는 상태에서 고상영역의 초기항복응력을 $\bar{\sigma}_0$ 라 할 때 $F < \bar{\sigma}_0$ 이면 유동응력이 없는 상태이고, $F \geq \bar{\sigma}_0$ 이면 반응용재료의 고상입자가 항복과 동시에 소성흐름이 발생한다. C는 고상율의 함수로써 고상율이 1인 재료에 대해서는 C = 1 이다. 식(1)에서의 A의 값에 포함되어 있는 f는 다공질체의 항복 개시 때 정수압 응력의 소성변형에 대한 영향을 나타내는 값이다. 반응용재료는 정수압응력에 영향을 받는 압축성재료로 고려되어지기 때문에 재료의 소성변형은 정수압응력을 포함한 체적변형률속도에도 큰 영향을 받는다

고 할 수 있다. 체적변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 는 다음과 같다

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z \quad (2)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{1}{f_s^{2k-1}} \frac{\bar{\epsilon}}{\sigma} \left[\frac{2}{3f_s^2} \sigma_m \right] = \frac{1}{f_s^{2k-1}} \frac{\bar{\epsilon}}{\sigma} \frac{\sigma_m}{f_s^2} \quad (3)$$

여기서, $\bar{\epsilon}$, σ , σ_m 은 각각 유효변형률 속도, 유효 응력, 정수압응력을 나타내며, k 는 상수로 식 (1)의 k 값과 일치한다.

식(3)을 정수압응력에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_m = [f^2 \cdot f_s^{2k-1} \bar{\sigma} \dot{\epsilon}_v] / \bar{\epsilon} \quad (4)$$

소성일을 응력-변형률속도 관계식과 연계하면 유효변형률속도 $\bar{\epsilon}$ 는 다음과 같이 표현되며

$$\bar{\epsilon} = \frac{f_s^k}{f_s} \left\{ \frac{2}{9} [(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2] + \frac{1}{3} (\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2) + (f \dot{\epsilon}_v)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_x$, $\dot{\epsilon}_y$, $\dot{\epsilon}_z$ 은 각 성분의 변형률속도이고, $\dot{\gamma}_{xy}$, $\dot{\gamma}_{yz}$, $\dot{\gamma}_{zx}$ 은 각 성분의 전단 변형률속도이다.

단조공정에서 고상율이 균일하게 분포되면 부품 전체에 구상화된 입자들이 균일하게 분포되어 기계적 성질이 우수한 제품을 얻을 수 있다. 따라서, 초기고상율과 체적변형률속도를 이용하여 고상율의 증분을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta f_s = f_s e^{(-\int_0^t \dot{\epsilon}_v dt)} \quad (6)$$

2.2 반응용재료의 액상유동

다공질체의 공간을 흐르는 액상의 유동에 적용 가능한 유동형태는 다공질체를 통하는 유동법칙인 Darcy's Law로 설명할 수 있는데, 유동저항이 액상의 속도에 비례한다고 가정하면 단순한 형태의 Darcy's Law를 적용할 수 있다. 고상에 관한 액상의 상대적인 운동은 다음 식으로 표시된다.

$$u_{Li} \cdot f_{Li} = \frac{\kappa}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (7)$$

여기서, u_{Li} , f_{Li} , κ , μ_L 은 각각 액상 속도, 액상률, 투과율 그리고 액상의 점성계수이다.

고상 다공질체의 체적변화량과 액상체의 유출량은 일치하므로 다음의 연속방정식이 성립한다.

$$\frac{\partial u_s}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_{Li} \cdot u_{Li})}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

액상에 작용하는 압력의 경계조건은 다음의 두 가지 방정식에 의해 설명되어질 수 있다.

$$p = p_0 : \text{자유 표면} \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 : \text{금형과 접촉하는 면} \quad (10)$$

2.3 고상과 액상을 동시에 고려한 지배방정식

반응용단조 공정에서 재료는 대부분 대변형을 하기 때문에 탄성변형을 무시한 응답해석만으로 성형공정을 해석해 왔다. 그래서 기존의 성형공정에서 사용된 재료들은 강소성재료로 가정하여 비압축성 조건과 강제영역 등을 고려하여 변분법의 원리를 사용하여 유한요소해석을 하였다. 반응용 단조해석을 위하여 점성을 포함한 압축성 점소성체로 가정하여 해석하였다. 점소성체는 속도민감성 재료로서 변형률속도, 종변형률, 온도 등의 함수인 유동응력에 의존하며 압축성 재료로 가정하였다.

반응용재료에 대한 지배방정식은 힘의 평형방정식과 연속방정식 두가지이다. 지배방정식을 단순화하기 위하여 고상은 액상과 동일한 밀도를 가지며, 기공이 존재하지 않는다고 가정하면 힘의 평형방정식과 연속방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_1 p) = 0 \quad (11)$$

여기서, σ_{ij} , δ_{ij} 은 각각 응력 텐서, 크로네커 델타 (Kronecker delta)이다.

$$\frac{\partial u_s}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_{Li} \cdot u_{Li})}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

식(11), (12)의 고상-액상 혼합물에 대한 지배방정식들은 변형과정동안 압력의 변화가 힘의 평형관계에 영향을 미치게 된다. 그 결과로서 고상의 응력과 변형률속도는 체적변화, 조밀화를 유발시키며, 액상의 유동은 구상화조직 사이의 공간에서 일어난다. 고상의 조밀화는 액상의 유동용에 영향을 미치는 침투성과 체적변형률속도에 관련되어 있다. 따라서 정수압응력이 높거나 유효변형률속도가 높을 경우 조밀화가 일어날 수 있다.

2.4 유한요소방정식

반용융재료의 성형공정을 유한요소법으로 해석할 때 유한요소 형태의 지배방정식에서 우선적으로 구하는 것은 재료의 각 질점에서의 고상의 가용속도 (admissible velocity)와 액상의 압력인데, 각 요소에 걸쳐 연속적인 속도와 압력을 정의하기 위해 형상함수를 도입하여 구체화시킨다. 반용융재료와 같은 압축성 점소성문제에서 미지수는 속도와 압력인데, 일차 미지수(primary unknown)는 속도이다. 성형공정을 해석할 때는 속도장을 먼저 구한 다음 만족할 만한 속도장에 대한 압력장을 구하여 전 영역에 대해 속도와 압력이 연계된 강성행렬과 힘벡터를 조합하여 전체적인 유한요소방정식을 구한다. 고상영역과 액상영역을 동시에 고려한 반용융재료에 대한 유한요소 방정식의 행렬 형태는 다음과 같이 연립일차 방정식으로 간단하게 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [K_s(U_s)] & [H_p] \\ [H_v] & [K_L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U_s\} \\ \{p\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_s\} \\ \{Q\} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, $K_s(U_s)$ 는 압축성 다공질체의 요소 강성행렬이며, K_L 은 액상체의 유출량에 의한 압력의 영향을 나타낸 행렬이다. H_p 는 액상의 압력을 나타내는 행렬이고 H_v 는 다공질체의 체적변화량을 고상의 속도에 대한 함수로 나타낸 행렬이다. 그리고, U_s , p , F_s , Q 는 각각 고상의 질점 속도, 압력, 절점력 및 액상의 유출력 체적 속도이고, $K_s(U_s)$, H_p , H_v , K_L , F_s 및 Q 는 다음과 같다.

$$K_s(U_s) = \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} \hat{v}^T B^T D B dV \quad (14)$$

$$H_p = \int_V f_L q^T N dV \quad (15)$$

$$H_v = \int_V q^T N dV \quad (16)$$

$$K_L = \int \frac{\kappa}{\mu_L} \left[\frac{\partial q_i}{\partial x} \frac{\partial q_j}{\partial x} + \frac{\partial q_i}{\partial y} \frac{\partial q_j}{\partial y} \right] dV \quad (17)$$

$$F_s = \int_{S_f} t^T N dS_F \quad (18)$$

$$Q = \int_V q_i Q_i dV \quad (19)$$

식 (13)의 비선형방정식을 풀기 위한 방법으로 직접반복법과 뉴우튼-랩슨법의 두 가지 방법이 있다. 직접반복법은 수렴성이 좋으나 해의 수렴속도가 느리고, 뉴우튼-랩슨법은 수렴속도는 빠르나 발산의 우려가 있다. 그러므로 두 가지 장점을 이용하기 위해 초기속도장의 발생은 직접반복법을 이용하였고, 그 이후의 계산은 뉴우튼-랩슨법을 이용하였다.

해석에 사용된 마찰관계식은 Chen과 Kobayashi⁽¹²⁾가 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f_{fric} = -m_f k \left[\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_t|}{a} \right) \right] \frac{v_r}{|v_r|} \quad (20)$$

여기서 v_r 는 금형재료의 상대 속도, m_f 는 마찰계수, a 는 속도의 차원을 가지는 상수로써 본 연구에서는 유한요소해석에서 일반적으로 이용되어지는 5×10^{-3} 으로 하여 계산하였다. 전단항복응력 k 는 반용융 재료의 실험결과로부터 다이와 소재사이의 열전달에 의하여 소재의 온도가 변화하므로 실험에 의하여 구한 2.25 MPa을 사용하였다.

Fig.1에서 시간 $t + \Delta t$ 에서 변형하는 재료인 $y1$ 이 $F(x)$ 의 함수로 표시된 금형과 접촉할 때 두 물체 사이의 y 축거리를 YD 라고 하고 접촉에 의하여 발생하는 수직접촉력을 F_n 이라 하면 $t + \Delta t$ 일 때 접촉표면에서 수직방향으로의 접촉조건은 다음과 같다.

$$F_n \cdot YD = 0, \quad YD > 0, \quad F_n < 0 \quad (21)$$

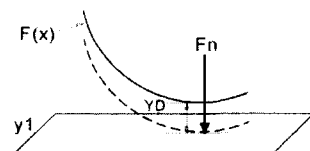


Fig. 1 The Schematic diagram for contact condition between die and workpiece.

위의 식은 접촉하는 두 물체 사이에 작용하는 수직력과 두 물체 사이의 거리 중에서 하나는 영이 되어야 한다는 것을 의미하며 두 물체 사이의 거리가 영보다 커야 하는 것은 금형이 변형하는 재료를 뚫는 것을 방지하기 위해서이다. 또한 접촉면에서의 수직 힘은 압축력이어야 한다.

입의의 금형형상의 경계면상에서 금형과 요소간의 접촉을 판정하는 방법에 오류가 있을 경우에는 재료의 전체적인 요소 뒤틀림에 큰 영향을 주고 해의 신뢰성도 떨어지게 된다. 본 논문에서는 경계면상에서 금형과 재료의 접촉판단을 식(21)을 만족하도록 프로그램화시켰다.

일단 이전의 유한요소체계에서 절점값이 구해지면 새로운 유한요소체계의 절점값으로 변환하는데 Fig.2은 이전 절점값을 새로운 절점값으로 변환하는 과정을 나타낸 그림이다. Fig.2에서 보여주는 바와 같이 새로운 유한요소체계의 절점이 이전의 유한요소 체계에서 어느 요소에 포함되는가를 결정한 후에, 그 요소의 절점값을 이용한 보간식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_n^N = \sum_{\beta=1}^4 N_{\beta}^O(x_n, y_n) \cdot q_{\beta}^O \quad (22)$$

여기서, q_n^N , N_{β}^O , q_{β}^O 는 각각 격자 재구성후의 새로운 요소에서의 n 절점값, 격자 재구성전의 β 절점에서의 형상함수, 격자 재구성전의 요소에서의 n 절점값이다.

이 결정은 Isoparametric mapping을 이용하여 구하였다. 공간상의 한 점이 요소에 포함되었는가의 결정이 실제좌표계에서는 어려우나, 국부좌표계에서 쉽게 결정할 수 있다. 다만 이전의 유한요소 체계에서의 절점은 간혹 컴퓨터의 계산상의 오차(round-off error)로 인해 어느 요소에도 포함되지 않는 결



Fig. 2 Locating a node in an element for remeshing.

과를 가져오기도 하는데, 절점과 요소의 변화의 거리를 구해 이 거리가 아주 작으면(10^{-6} 정도) 변위에 위치한 점으로 가정하여 절점값을 계산하였다.

반용융재료의 기계적 성질 및 메커니즘에 대한 연구가 압축실험을 통하여 입증되고 있지만 실제 산업 현장에서 성형되고 있는 재료로써 그 특성을 인정받기 위해서는 단조공정에 있어서 충전거동이 파악되어야 한다. 반용융재료는 금형속도, 금형온도 및 고상율 등과 같은 변수에 의해 그 성질이 변하기 때문에 기계적 성질이 우수한 단조부품을 제조하기 위해서는 최적의 변수를 선택하여 실험을 행하여야 하는데, 여러 가지 변수의 고려없이 시행착오법에 의한 실험을 통해서는 양질의 부품을 얻기란 힘이 들고 시간도 많이 소요된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 반용융재료에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 최적의 조건을 찾을 수 있도록 프로그램의 개발이 절실히 필요하다. 이에 부응하기 위하여 입의의 금형형상에 대하여 알고리즘을 개발하였다.

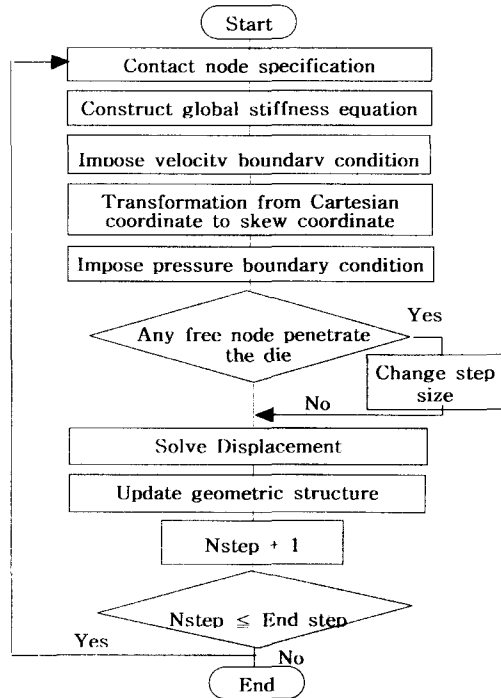


Fig. 3 Computational flow chart on arbitrarily shaped dies

기존의 성형 프로그램들은 재료를 강소성으로 취급하여 강소성 유한요소법으로 성형공정을 해석했는데, 본 연구에서는 반응용재료가 점성을 가진 압축성재료로 가정하여 해석하였다. 임의의 금형형상에 대해 성형공정을 해석하기 위해서는 여러 가지 해결해야 하는 점들이 많은데, 우선 금형과 재료가 접하는 부분에서 재료의 속도 및 압력을 구하기 위하여 경사좌표계가 도입되어야 한다. 또한 초기에 금형에 접해 있지 않은 표면에 있는 결점이 재료의 변형에 의하여 금형에 닿는 순간을 찾을 수 있는 알고리즘이 필요하다. Fig.3은 위의형상의 단조금형에 있어서 성형공정을 해석하기 위한 Flow Chart를 나타낸 것이다.

3. 해석결과

실험치와 이론해석 결과를 비교하기 위하여 본 연구에서 사용한 재료는 A356재료로써 이 재료는 Pechiney사(프랑스)에서 구매한 구상화조직을 가진 재료이다. 반응용 재료의 압축에 대한 유한요소 해석을 위하여 필요한 물성치는 Table 1과 같다.

반응용재료의 유동응력식은 고상율, 변형률, 변형률속도, 온도 등의 영향을 받기 때문에 반응용재료의 단조성형을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 액상유출을 고려한 응력과 변형률사이의 관계를 정립해야 하며, 반응용재료의 유동응력식을 이들 인자들의 함수로 나타내어야 한다고 사료된다. Kang⁽¹⁵⁾은 고상입자와 액상의 기하학적 형상을 이용한 분리계수(S)를 도입하여 다음과 같이 제안하였다.

$$S = S_0 + (1 - S_0) \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_{cr}}, \quad S_0 = \frac{S^{squ}}{S_i} \quad (23)$$

여기서, S_0 는 고상입자들간의 초기거리를, S^{squ} 는 사각형 모델의 입자와측간의 거리를 나타낸다.

초기 구상화의 상태를 $S_0=1$ 로 가정하고 고상과 액상영역의 완전응집상태를 $S_0=0$ 으로 가정한다. 식(23)의 무차원계수 S_0 가 변하므로 식(23)의 분리계수 S를 변형률과 임계변형률의 함수로 표시하였다.

반응용재료의 압축실험을 통하여 응력-변형률곡선에서 변형률이 거의 $\bar{\epsilon}$ 에 무관하면서 일정하게 나타나지는 2군데의 변곡점을 찾아낼 수가 있었다. 본 연구에서는 Kang⁽¹⁵⁾의 압축실험에서 응력이 갑자기 증가하다가 감소하는 $\bar{\epsilon}_{cr} \approx 0.1$ 과 응력이 감소하다가 다시 증가하는 $\bar{\epsilon}_{cr1} \approx 0.35$ 를 각각 임계변형률로 정의하였다.

유동응력식은 분리계수 S를 도입하여 임계변형률의 구간에 따라서 응력과 변형률의 관계식을 다음과 같이 수정하여 제안하였다.⁽¹⁵⁾

$$0 < \epsilon < \bar{\epsilon}_{cr} ; \bar{\sigma} = K \exp(S) \bar{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [1 - \beta f_L]^{2/3} \quad (24)$$

$$\bar{\epsilon}_{cr} < \epsilon < \bar{\epsilon}_{cr1} ; \bar{\sigma} = K \exp(1 - S) \bar{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [1 - \beta f_L]^{2/3} \quad (25)$$

$$\epsilon > \bar{\epsilon}_{cr1} ; \bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^m \quad (26)$$

여기서, K, m, β 는 각각 재료 상수, 변형률속도 민감지수, 기하학적인 모델에 따른 형상 상수이다. Q, R, T는 각각 활성화에너지, 기체 상수, 온도 이다.

구간 $\epsilon > \bar{\epsilon}_{cr1}$ 에서는 거의 고상입자들이 응집이 되었다고 가정하였기 때문에 $S=0$ 으로 두었다. 여기서 $\bar{\epsilon}_{cr}$ 와 $\bar{\epsilon}_{cr1}$ 은 변형률속도의 증분에 관계없이 각각 0.1, 0.35임을 알 수 있었으며, 식(26)의 K와 m은 고온압축실험에서 구한 다음의 값을 이용하였다⁽⁴⁾.

Table 1 Material properties of A356 at Semi-Solid state.

Parameters	Symbol	Unit	Value	Ref.
Initial solid fraction	f_s	%	50	
Friction coefficient	m_f		0.3	
Viscosity coefficient of liquid	μ_L	Poise	0.175	(13)
The initial permeability	κ_0		36.7×10^9	(14)
The ratio of initial permeability and viscosity coefficient	κ_0 / μ_L	mm ² /(MPa · sec)	2.09×10^5	(12)
The relation of permeability and liquid fraction	$\kappa = \kappa_0(1-f_s)^3 / f_s^2$	mm ²		(16)

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m : \dot{\epsilon} < 5 \text{ sec}^{-1}, K=1.002, m=0.32$$

$$\dot{\epsilon} > 5 \text{ sec}^{-1}, K=0.298, m=0.7$$

식 (24),(25)에서 나타낸 여러 계수들의 값(Q, R, β)들은 Table 2에 나타내었다.

단조시 금형온도를 변수로 하여 하중과 펀치행 정 사이의 관계를 측정하였다. 재가열시간은 10분동안 원하는 고상율에 도달하게 하고 2분동안 일정하게 유지하였다. 반응용단조를 한 결과 금형의 온도에 관계없이 완전히 충전된 제품을 얻을 수 있었다.

Fig.4은 일단계 및 이단계 곡선금형인 경우 유한 요소해석을 위한 요소분할을 나타낸 것이다.

해석에 사용된 상부금형의 속도는 여러 가지로 변화를 주었으며 하부금형은 고정되어 있다. 본 프로그램에서는 곡선단조의 비정상상태의 변형을 각 증분변형 동안 선형적으로 처리함으로 Step-by-Step방법에 의해 해석하였다.

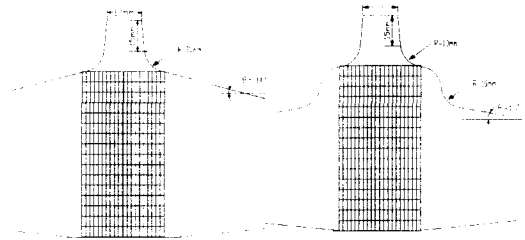
Fig.5(a)~(d)는 금형속도(V_d)가 100mm/sec 일 때 이단계 곡선금형의 높이감소율에 따른 격자변형 상태를 나타낸 그림이다. 높이감소율이 93%일 때 금형 끝부분에서 변형상태가 심하게 뒤틀려 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같이 격자변형이 심한 부분은 격자재구성이 필요하며 이단계 곡선금형에 관한 이론해석의 경우는 높이감소율이 93%이후부터 격자재구성이 필요함을 알 수 있다.

Fig.6(a)~(c)는 금형속도가 100mm/sec일 때 이 단계 곡선금형의 높이감소율에 따른 고상율의 분포를 나타낸 그림이다. 고상율의 분포가 재료 반경 방향으로 약간 균일하게 되어 있다. 완전히 균일한 고상율의 분포를 위해서는 금형속도를 200mm/sec 정도로 증가시켜야 한다고 사료된다.

Fig.7(a)~(c)와 Fig.8(a)~(c)는 금형속도가 100mm/sec일 때 이단계 곡선금형의 높이감소율에 따른 유효변형률속도와 유효변형률의 분포상태를 나타낸 것이다. Fig.7에서 알 수 있듯이 재료내부의 경우에는 유효변형률속도가 대부분 균일하게 되어 있음을 알 수 있다. 그러나 금형의 곡률부분에서 유효변형률속도와 유효변형률이 불균일하게 분포되며 대체로 큰 유효변형률속도와 유효변형률을 가짐을 Fig.7과 Fig.8에서 알 수 있다. 따라서 금형을 설계할 때 곡률반지름을 크게 하여 재료의 유동속도의 흐름을 좋게 만드는 것이 기계적 성질을 균일하게 할 수 있을 것으로 생각된다. 이것은 유동속도가 균

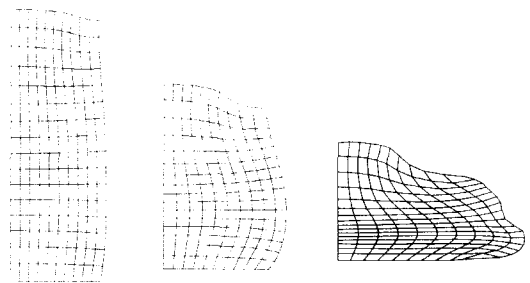
Table 2 Various parameters for flow stress at semi-solid material.⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

Parameter	Symbol	Unit	Value
Activation energy	Q	kJ/mol	256
Gas constant	R	kJ/mol · K	8.314
Geometric coefficient	β		1.5

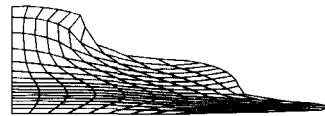


(a) One spike (b) Two spike

Fig. 4 Arbitrarily shaped dies with one and two step spike shape.



(a) γ = 25% (b) γ = 50% (c) γ = 80%

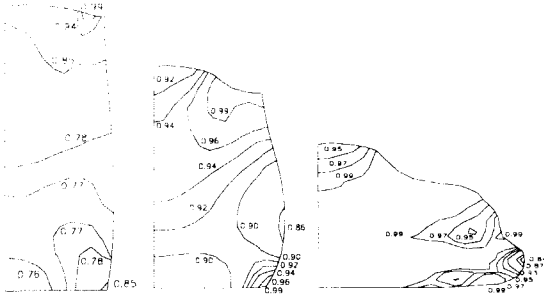


(d) γ = 93%

Fig. 5 Grid distortions according to height reduction rate of two step spike die ($V_d = 100 \text{ mm/sec}$, $f_s = 50\%$, $m_f = 0.3$).

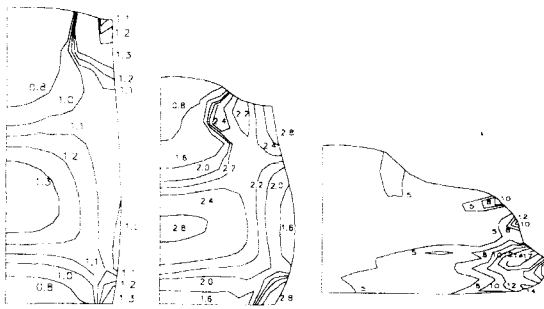
일하게 금형내부로 충전되면 다이캐스팅에서와 같이 속도구배로 인해 공기포집에 의한 기공 등의 결함을 줄일 수 있기 때문이다.

Fig.9 (a)~(c)는 일단계 곡선금형에서 해석을 계속적으로 하기 위하여 금형속도 $V_d=150\text{mm/sec}$ 일 때



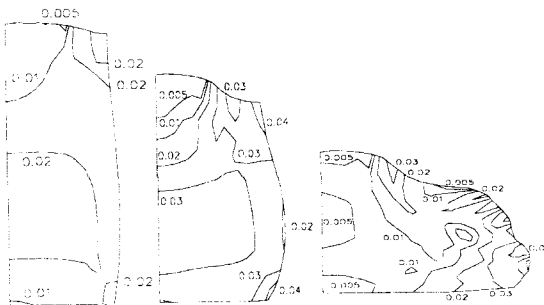
(a) $\gamma = 25\%$ (b) $\gamma = 50\%$ (c) $\gamma = 80\%$

Fig. 6 Distributions of solid fraction according to height reduction rate of two step spike die ($V_d=100\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).



(a) $\gamma = 25\%$ (b) $\gamma = 50\%$ (c) $\gamma = 80\%$

Fig. 7 Distributions of effective strain rate according to height reduction rate of two step spike die ($V_d=100\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).



(a) $\gamma = 25\%$ (b) $\gamma = 50\%$ (c) $\gamma = 80\%$

Fig. 8 Distributions of effective strain according to height reduction rate of two step spike die ($V_d=100\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).

높이감소율 $\gamma=75\%$ 에서 격자재구성을 수행하였고 높이감소율이 $\gamma=75\%$, $\gamma=80\%$, $\gamma=95\%$ 에 대한 새로운 격자생성에 의한 격자변형상태를 나타내고 있다. 자유면이 균일한 상태로 충전이 됨을 알 수 있다.

Fig.10 (a)~(b)는 다이속도 $V_d=150\text{mm/sec}$ 일 때 일단계 곡선금형에 대하여 격자재구성 전후의 격자 형태와 유효변형률의 값을 나타낸 것이다.

Fig.10 (b)에서 높이감소율 $\gamma=80\%$ 일때의 유효 변형률을 비교하였는데, 각 단계에서 변형률 분포가 거의 일치함을 알 수 있다.

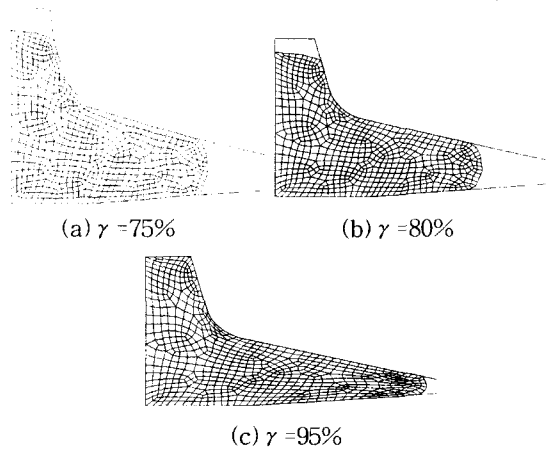
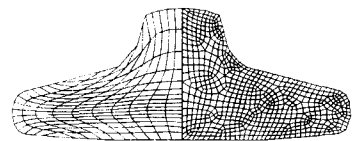
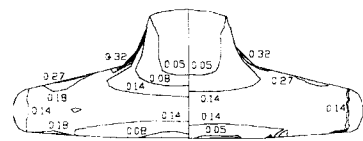


Fig. 9 Grid distortions according to remeshing in one step spike die.



(a) Old and new mesh distortions



(b) Effective strain distributions

Fig. 10 Mesh distortions and effective strain contours before (left side) and after (right side) remeshing in the one step spike die

($V_d=100\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).

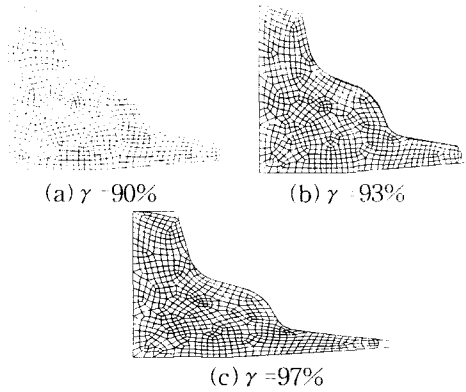
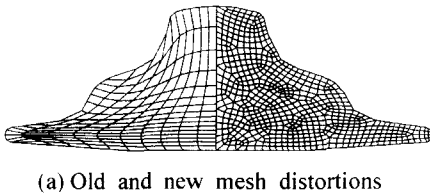
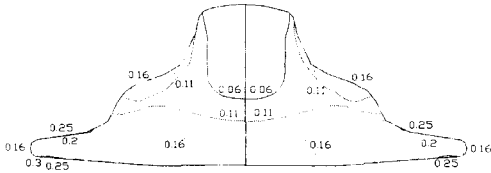


Fig. 11 Grid distortions according to remeshing in two step spike die.



(a) Old and new mesh distortions



(b) Effective strain distributions

Fig. 12 Mesh distortions and effective strain contours before (left side) and after (right side) remeshing in the two step spike die ($V_d=150\text{mm/sec}$, $f_s = 93\%$ and $m_f = 0.3$).

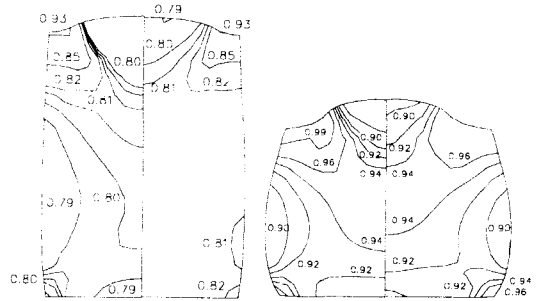
Fig.11 (a)~(c)는 이단계 곡선금형에서 해석을 계속적으로 하기 위하여 금형속도 $V_d=150\text{mm/sec}$ 일 때 높이감소율 $\gamma=90\%$ 에서 격자재구성을 수행하였고 높이감소율이 $\gamma=90\%$, $\gamma=93\%$, $\gamma=97\%$ 에 대한 새로운 격자생성에 의한 격자변형상태를 나타내고 있다. Fig.9(a)~(c)에서처럼 충전기동 동안 재료는 결함없이 충전이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 본 단조해석에서는 금형온도의 영향을 무시한 등온(isothermal)조건에서 해석을 하였기 때문에 반응용 재료의 단조공정에서 유동결함으로 나타나는 표면 결함을 예측할 수 없을 뿐만 아니라 편석현상이 발

생하는 위치를 정확히 파악할 수가 없었다. 반응용 재료의 충전동인 유동결함을 알기 위해서는 금형온도를 고려한 열전달해석이 병행되어야 한다.

Fig.12 (a)~(b)는 금형속도 $V_d=150\text{mm/sec}$ 일 때 이단계 곡선금형에 대하여 격자재구성 전후의 격자 형태와 유효변형률의 값을 나타낸 것이다. Fig.12 (b)에서 높이감소율 $\gamma=93\%$ 일때의 유효변형률을 비교하였는데, 유효변형률 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

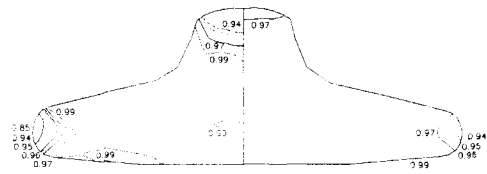
4. 유동응력식의 차이에 따른 해석결과의 비교 및 고찰

반응용단조공정의 해석에서 유동응력식은 해의 정도에 아주 중요하다. 따라서 본 연구에서는 변형률 민감지수(m)만을 고려한 방정식(26)과 분리계수를 고려한 유동방정식(24)(25)를 각각 이용하여 해의 정도를 비교 검토하였다.



(a) $\gamma = 25\%$

(b) $\gamma = 50\%$



(c) $\gamma = 80\%$

Fig. 13 Comparison of solid fraction among flow stress is (a) (Eq.26), (b) (Eq.24), and (c) (Eq.25) in one step spike die ($V_d=10\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).

Fig.13 (a)~(c)는 일단계 곡선균형에 대하여 균형속도 $V_d=10\text{mm/sec}$ 일 때 높이감소율에 따른 고상율의 분포를 변형률비 민감성으로 가정한 유동응력식과 분리계수를 도입한 유동응력식을 사용했을 때를 비교한 것이다. 분리계수를 도입한 유동응력식을 사용하였을 때의 고상율의 분포가 더 균일함을 알 수 있다. 위의 원인은 변형률 민감성재료로 가정했을 때의 재료는 재직변형률속도에 영향을 많이 받기 때문에 작은 변형에서도 재료내부까지 고상율의 분포가 영향을 받아 재료의 각 부분마다 고상율의 구배가 심하고 값들이 차이가 나는 반면 분리계수를 도입하여 유동응력식을 표현했을 때에는 고상입자의 변형을 기하학적 형상으로 가정하여 액상의 유출 등을 고려하기 때문에 고상율이 균일하게 분포한다고 생각된다.

Fig.14(a)~(c)는 일단계 곡선균형에 대하여 균형속도 $V_d=10\text{mm/sec}$ 일 때 높이감소율에 따른 유효 변형률속도를 변형률 민감성으로 가정한 유동응력식과 분리계수를 도입한 유동응력식을 사용했을 때를 비교한 것이다. 두가지 경우에 있어서 유효변형률속도 분포는 거의 일치함을 알 수 있다. 위의 원인은 두가지 경우의 유동응력식이 모두 변형률속도의 함수이기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.15(a)~(c)는 일단계 곡선균형에 대하여 균형속도 $V_d=10\text{mm/sec}$ 일 때 높이감소율에 따른 유효 변형률을 변형률비 민감성으로 가정한 유동응력식과 분리계수를 도입한 유동응력식을 사용했을 때를 비교한 것이다. 분리계수를 도입한 유동응력식을 사용하였을 때의 유효변형률이 변형률 민감성재료로 가정한 경우의 유효변형률보다 전체적으로 균일함을 알 수 있다. Fig.16은 균형속도 $V_d=10\text{mm/sec}$ 일 때 응력-변형률 곡선을 $\sigma = K \epsilon^m$ 로 가정한 유동응력식(26)과 분리계수를 도입한 유동응력식(24), (25)을 사용했을 때의 비교 결과이다. 식(26)을 이용한 경우는 변형률의 증가와 더불어 응력이 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 고상과 액상의 분리계수S, 액상율 f_L 및 입자의 형상계수 β 의 함수로 표시되어진 식(24)(25)을 이용한 경우는 변형률이 증가하면 응력도 증가하다가 $\epsilon = 0.1$ 부터는 응력이 다시 감소하고 있음을 보여주고 있다. 또한 $\epsilon = 0.3$ 이후부터는 변형률의 증가와 더불어 응력이 다시 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 반응용재료의 압축성형시 압축이 됨과 동시에 액상이 소재의

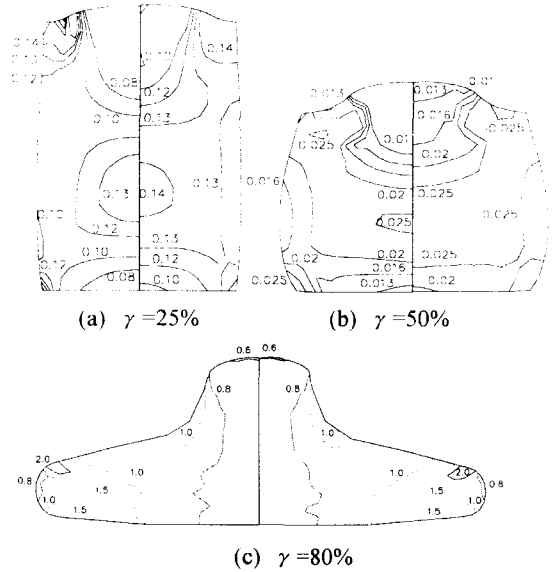


Fig. 14 Comparison of effective strain rate among flow stress is (a) (Eq.26), (b) (Eq.24), and (c) (Eq.25) in one step spike die ($V_d=10\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).

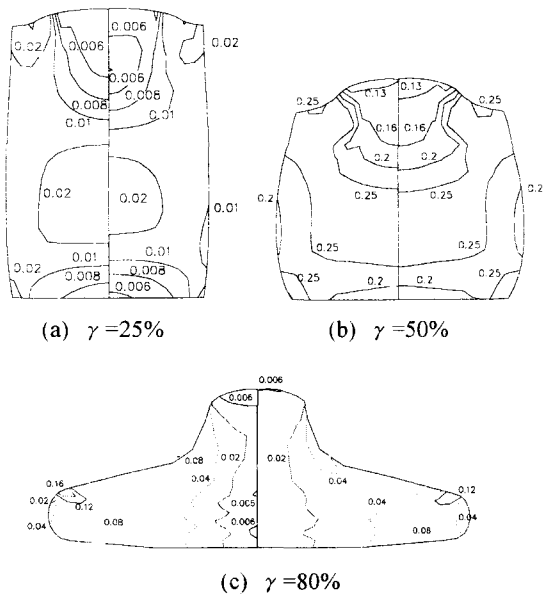


Fig. 15 Comparison of effective strain among flow stress is (a) (Eq.26), (b) (Eq.24), and (c) (Eq.25) in one step spike die ($V_d=10\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$).

표면 쪽으로 유출된 후 다시 강집소성 재료의 심질을 가지고 압속되어지기 때문에 변형률의 증가와 더불어 응력의 증감이 나타나는 것으로 생각된다.

이러한 결과는 반응용 재료의 압축성형에서 나타나는 특이한 현상이며 이론해석의 타당성을 검증하는데 중요한 요소로 작용한다.⁽⁴⁾

반용용 재료의 유동응력식(식(26))은 변형률 민감성 재료로 가정한 유동응력식($\sigma = K \dot{\epsilon}^m$)보다 분리계수를 도입한 유동응력식을 사용하는 것이 반응용 재료의 거동을 정확하게 예측하는 것이라 생각된다.

분리계수의 함수로 표시한 유동응력식을 사용하면 반응용 재료의 단조 및 반응용 성형 공정에 있어서 가공하중예측 및 고상율의 분포 등을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

금형의 속도가 빠를 경우($V_d > 300\text{mm/sec}$)에는 성형해석시 속도장이 수렴하지 않아 디 이상의 성형해석이 곤란한데, 이는 금형 속도가 빠름으로 인해 금형 경사면에서 상대속도의 증가로 인해 마찰력이 성형해석에 적용되지 않았기 때문이라고 생각된다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 금형 온도를 무시한 것은 조건이기 때문에 반응용 재료의 고상입자의 변형과 더불어 충전결합을 예측하기 위해 금형 온도를 고려한 프로그램이 계속 연구되어야 하며 격자재구성 기술을 결합한 형태의 프로그램 연구가 앞으로

계속적으로 수행되어져야 할 것으로 사료된다.

분리계수의 함수로 표시한 유동응력식을 사용하면 반응용 재료의 단조 및 반응용 성형 공정에 있어서 가공하중예측 및 고상율의 분포 등을 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

고상율이 50%인 반응용 알루미늄 재료의 단조해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반응용 재료의 단조해석시 상부 금형의 속도 $V_d=10\text{mm/sec} \sim 150\text{mm/sec}$ 사이일 때 고상율 분포, 유효변형률속도 및 유효변형률 등이 균일하다.
2. 일반적인 재료는 변형률이 증가할수록 응력이 완만하게 증가하는 경향을 나타내지만, 반응용 재료는 변형률이 증가할수록 응력이 낮은 값을 유지하다가 갑자기 응력이 급격하게 증가하였다.
3. 반응용 재료의 단조해석에서 격자재구성 전과 격자재구성 후의 유효변형률을 비교한 결과 비교적 일치함을 알 수 있었다.
4. 반응용 재료의 단조공정에서 재료의 변위에 따른 단조하중을 예측할수 있는 응력-변형률의 관계식을 구하여 비교한 결과 분리계수를 이용한 유동용

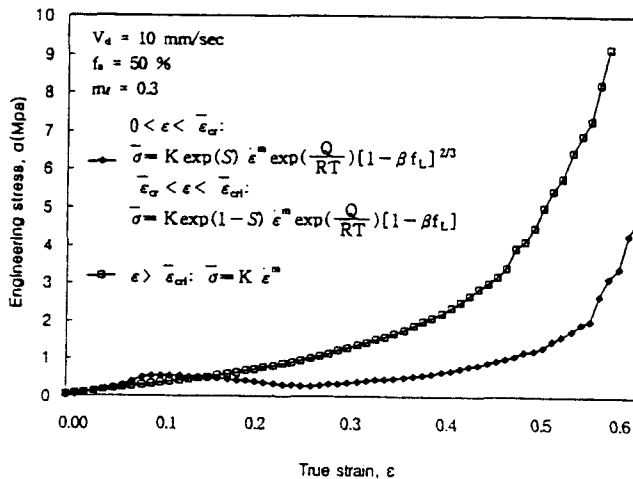


Fig. 16 Engineering stress-strain curve which is considered as strain rate sensitivity exponent and is expressed by separation coefficient ($V_d=10\text{mm/sec}$, $f_s = 50\%$ and $m_f = 0.3$)

력식이 반용융재료의 변형거동을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.

5. 임의형상의 규형에 대하여 반용융재료의 단조 성형공정을 해석할 수 있는 해석방법을 제안하였다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 규형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원에 의한 연구의 일부입니다.

참고문헌

1. Toyoshima, S. and Takahashi, Y., "A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-Solid Materials," *ISIJ Int'l*, Vol. 31., No. 6, pp. 577-582., 1991.
2. Toyoshima, S., "A FEM Simulation of Densification in Forming Processes for Semi-Solid Materials," *The 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 47-62., 1994.
3. Bolmaro, R. E., Browning, R. V., Guerra, F.M. and Rollett, A.D., "Finite Element Method Simulations for Two-Phase Material Plastic Strains." *Materials Science and Engineering A196*, pp. 53-63., 1995.
4. 강충길, 최진석, 김기훈, "반용융재료의 압축공정에서 고상입자의 변형을 고려한 유동응력식의 제안 및 유한요소해석," *대한기계학회논문집(A) 제22권 제6호*, pp. 955-967., 1998.
5. Koç, M., Vazquez, V., Witulski, T. and Altan, T., "Application of the Finite Element Method to Predict Material Flow and Defects in the Semi-Solid Forging of A356 Aluminum Alloys," *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol.59, pp. 106-112., 1996.
6. Gebelin, J-C., Favier, D., Suéry, M. and Guarneri, C., "A FEM Simulation of Semi-Solid Materials Behaviour," *The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Sheffield, pp. 126-131., 1996.
7. 강충길, 윤중훈, "반용융재료의 압축거동 및 액상의 유동을 고려한 유한요소해석," *대한기계학회논문집(A) 제20권 제12호*, pp. 3715-3725., 1996.
8. Kang, C. G. and Yoon, J. H., "A Finite Element Analysis on the Upsetting Process of Semi-Solid Aluminum Material," *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol.66, pp.76-84., 1997.
9. Kang, C. G. and Choi, J. S., "Effect of Gate Shape and Forging Temperature on the Mechanical Properties in the Injection Forging Process of Semi-Solid Aluminum Material," *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol.73, pp. 251-263., 1998.
10. Kang, C. G., Choi, J. S. and Kang, D. W., "A Filling Analysis of the Forging Process of Semi-Solid Aluminum Materials considering Solidification Phenomena," *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol.73, pp. 289-302., 1998.
11. Shima, S. and Oyane, M., "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mechanical Science*, Vol.18, pp. 285-291, 1976.
12. Chen, C. C. and Kobayashi, S., "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression," *Applications of Numerical Methods to Forming Process*, ASME, AMD, 28, pp. 163-174., 1978.
13. Moon, H. K., "Rheological Behaviour and Microstructure of Ceramic Particulate / Aluminum Alloy Composites," *Dissertation*, MIT., pp. 133, 1990.
14. Scheidegger, A. E., "The Physics of Flow through Porous Media," *University of Toronto Press*, The 3rd Edition, pp. 248-55, 1974.
15. Kang, C. G., Kang, B. S. and Kim, J. I., "An Investigation of the Mushy State Forging Process by the Finite Element Method," *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol.80-81, pp. 444-449., 1998.
16. Kang, C. G., Kim, Y. D. and Lee, S. W., "A Couple Solidification Analysis of Materials and Cooling Roller in Direct Rolling Process," *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol. 66, pp. 277-286., 1997.
17. Nguyen, T. G., Favier, D. and Suéry, M., "Theoretical and Experimental Study of the Isothermal Mechanical Behavior of Alloys in the Semi-Solid State," *Int. J. Plasticity*, Vol.10, No.6, pp. 663-693., 1994.
18. Gunasekera, J. S., "Development of a constitutive model for mushy(semi-solid) materials," *The 2nd Int. Conf. on semi-solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 211-222., 1992.