

후방압출을 통한 반용융재료의 유동응력식 결정

김태준 · 김낙수

서강대학교 기계공학과

Determination of Flow Stress of Semi-Solid Al2024 Alloy by Backward Extrusion and Upper Bound Method

Taejoon Kim, Naksoo Kim

Abstract

Analytic and experimental methods have been used for the characterization of flow behavior of semi-solid Al2024 alloy. Backward extrusion experiment was chosen to avoid the crack on the unconstrained surface. The material constants for the flow stress by the upper bound technique that agreed with experimental results were determined. The various material constants obtained for a temperature range above the solidus temperature have been fitted and represented in the function of temperature and solid fraction. The obtained result has good agreement only in the high solid fraction.

Key Words : semi-solid material(반용융재료), solid fraction(고상율), flow stress(유동응력), backward extrusion(후방압출), upper bound method(상계해법)

1. 서 론

반용융가공법은 정형가공기술로서 합금의 고상과 액상이 공존하는 온도영역에서 단조, 압연, 압출 및 주조 등과 같은 기존의 금속성형방법을 적용하는 가공기술로서 액상선 온도보다 낮은 온도에서 가공하기 때문에 일반주조공정에 비하여 금형 수명의 연장, 에너지 절감을 유도할 수 있고, 반용융상태의 재료는 고상입자들 주변을 액상이 둘러싸고 있는 형태이므로 열간이나 냉간 가공에 비하여 재료의 유동성이 좋을 뿐만 아니라 낮은 수준의 하중을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 최소의 공정으로 성형할 수 있고 공정수의 단축을 도모할 수 있다.

그러나 반용융가공에 대한 시뮬레이션은 반용융상태에서 재료가 갖는 특징을 수학적으로 모델링하기가 어렵고 또한 소성가공 공정해석의 가장 기본이 되는 유동응력식을 실험적으로 결

정한다는 것이 용이하지 않다. 특히 고체변형과 액체유동의 특징을 모두 갖는 중간정도의 고상율범위에서는 시편을 인장 및 압축시험기에 고정시키기가 어렵고, 교반실험 또한 걸보기 정도가 거의 무한대 값을 나타내기 때문에 위와 같은 기존의 방법으로는 재료변형특성을 결정짓기가 어렵다.

본 연구에서는 중간정도의 고상율을 갖는 재료에 대하여 후방압출실험과 상계해법을 이용하여 유동응력식을 결정하는 방법에 관하여 연구를 하였다. 반용융재료의 유동응력식과 관련된 재료상수를 상계해법으로 구하였다. 유한요소법을 이용하였을 경우 후방압출공정해석을 위해서는 많은 횟수의 요소망 재구성공정이 요구되는 관계로 1회 해석에 상당한 시간이 필요하므로, 해의 정확도는 떨어지지만 시간적인 측면에서 효율을 도모하고자 상계해법을 이용하였다.

2. 상계해법 (Upper Bound Method)

반용용 Al2024합금의 유동응력식과 관련된 재료상수들, 즉, 강도계수 K 와 변형률속도 민감도 지수 m 은 Al2024합금을 반용용상태에서 후방압출하여 얻어진 하중-변위 곡선과 상계해법으로 구한 하중-변위관계가 일치하게 되는 m, K 값을 그 온도에서의 m, K 라 보고 이를 시행오차 방법으로 각 온도에 대해서 구한다. 각 온도에 대해서 구한 m, K 값을 각각 curve fitting함으로써 각각 온도의 함수로 나타내기로 한다. 상계해는 B. Avitzur[8]가 제안한 속도장을 이용하여 구하였다.

정상상태 후방압출의 경우 속도장은 Fig. 1과 같이 4개의 구분된 영역으로 나눌 수 있다 [8]. 즉, 변형된 후 강체속도 v_0 로 유동하게 되는 영역 I, 소성유동이 일어나게 되는 영역 II, 아직 변형되지 않은 영역 III 및 펀치와 동일한 속도로 움직이면서 재료의 변형은 일어나지 않은 사영역(dead zone) IV로 나뉘게 된다.

각 영역별 속도장은 다음과 같다.

(a) 영역 I

$$v_r = 0$$

$$v_\theta = 0$$

$$v_z = v_0$$

체적일정조건에 의해 강제운동영역의 속도 v_0 는 다음과 같이 구해진다.

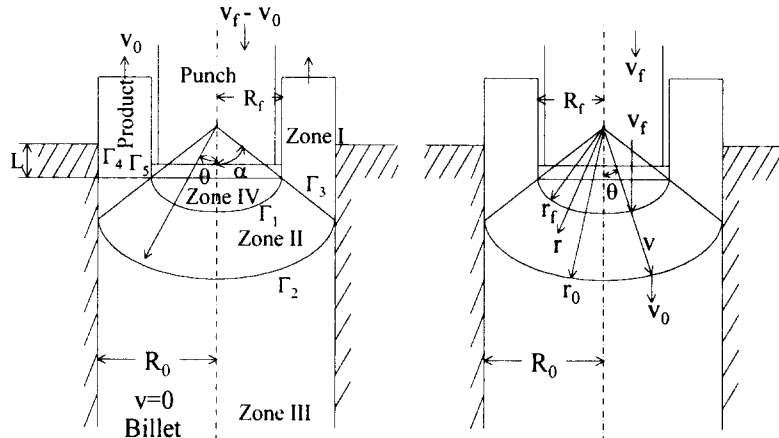


Fig. 1 Assumed velocity field.

$$\pi(v_f - v_0)R_f^2 = \pi(R_0^2 - R_f^2)v_0 \quad (1)$$

$$v_0 = v_f \left(\frac{R_f}{R_0} \right)^2 = v_f \left(\frac{r_f \sin \alpha}{r_0 \sin \alpha} \right)^2 = v_f \left(\frac{r_f}{r_0} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, r_f 와 r_0 는 각각 dead zone 영역의 반경과 변형영역의 반경을 나타내며 dead zone angle α 를 구함으로써 계산할 수 있다.

α 는 다음의 후방압력식을 최소화하는 값으로 결정된다.

$$\frac{\sigma_{zb}}{\sigma_0} = -2 \left\{ f(\alpha) \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left\langle \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \cot \alpha \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) + m \left[\left(1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \cot \alpha + \frac{L}{R_f} \right] \right\rangle \right\} \quad (3)$$

위의 식을 최소화하는 α 는 위의 식을 미분한 다음식을 만족하면 된다. 단, $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ 이다.

$$\begin{aligned} \therefore g(\alpha) \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \langle 2(1 - \alpha \cot \alpha) \\ - \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) - m \left(1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \rangle = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$g(\alpha) = 2 \sin \alpha \left[\sqrt{a - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} - \cos \alpha f(\alpha) \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left[1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

r_f 와 r_0 는 다음과 같다.

$$r_f = R_f / \sin \alpha \quad (7)$$

$$r_0 = R_0 / \sin \alpha \quad (8)$$

(b) 영역 II

소성변형영역에서의 속도장은 구좌표계를 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$v_r = v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^2} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$v_\theta = v_\varphi = 0 \quad (10)$$

변형률 속도의 성분을 위에서 가정한 속도장을 이용하여 정리하면

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial r} = -2v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^3} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = -\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{rr} = v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^3} \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon}_{\varphi\varphi} = -\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{rr} = v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^3} \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2r} \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial \theta} = \frac{1}{2} v_f r_f^2 \frac{\sin \theta}{r^2} \quad (14)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\varphi} = \dot{\epsilon}_{r\varphi} = 0 \quad (15)$$

(c) 영역 III

변형되지 않은 영역으로써 각 방향의 속도성분은 모두 0 이다.

$$v_r = 0$$

$$v_\theta = 0$$

$$v_z = 0$$

(d) 영역 IV

가공이 진행되어도 소재변형은 일어나지 않고 펀치의 일부인 것처럼 움직이는 영역이므로 펀치라고 생각하면 된다.

위와 같이 가정한 속도장과 변형률속도성분을 이용하여 유효변형률속도와 유효응력을 계산하면 영역 II를 제외한 나머지 영역에서는 변형률속도 성분이 모두 0이 된다.

유효응력 σ_0 는 다음과 같은 형태의 함수로 가정한다.

$$\sigma_0 = \sigma_{eq} = K \exp(G(f_s)) \dot{\epsilon}^m \quad (16)$$

위 식에서 K 는 강도계수, m 는 변형률속도민감지수이며 고상용의 함수 $G(f_s)$ 는 내부변수와 변형률 또는 변형률속도의 조합으로 이루어지게 되는데[7] 구체적인 형태는 문헌[7]에서 정의한 것과 동일하다. 본 연구에서는 구상조직을 가지므로 $G(f_s)=1$ 이 되어 고려하지 않아도 된다.

전단변형에너지를 계산하기 위해서 속도불연속면(Γ_i)에서의 속도불연속량과 미소면적을 구한다. 재료의 소성변형일률은

$$\dot{W}_i = \int_V \dot{w} dV = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{ZONE II} \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV$$

\dot{w} : 단위체적당 소성변형일률 (17)

이며 전단변형과 마찰에 의한 손실일률의 합

\dot{W}_j 는

$$\begin{aligned} \dot{W}_j &= \int_{S_r} \tau | \Delta v | dS \\ &= \sum_{i=1}^5 (\dot{W}_j)_{\Gamma_i} \\ &= (\dot{W}_j)_{\Gamma_1} + (\dot{W}_j)_{\Gamma_2} + (\dot{W}_j)_{\Gamma_3} + (\dot{W}_j)_{\Gamma_4} + (\dot{W}_j)_{\Gamma_5} \end{aligned} \quad (18)$$

이들을 이용하여 하중, P_{ram} 을 구하면,

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \int \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV + \int_S \tau | \Delta v | dS \quad (19)$$

$$P_{ram} \cdot V_{ram} = \dot{W}_i + \dot{W}_j \quad (20)$$

$$\therefore P_{ram} = \frac{\dot{W}_i + \dot{W}_j}{v_f - v_0} \quad (21)$$

3. 후방압출실험

3.1 반응용상태의 달성

본 실험에서 사용된 재료는 Al2024로, 이는 강도가 높아 구조재료 많이 이용되며 단조성이 우수하다. 또한 용고범위가 넓기 때문에 고상용제어가 용이하며 열처리를 통하여 높은 강도를 가질 수 있기 때문에 반응용가공에 적합하다. 성분분석기를 이용하여 얻어진 Al2024의 화

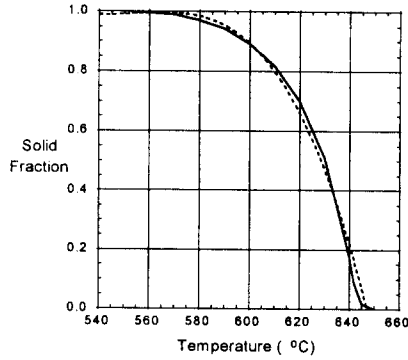


Fig. 2 Relationship between temperature and solid fraction of Al2024 alloy and fitted to 3rd order polynomial.

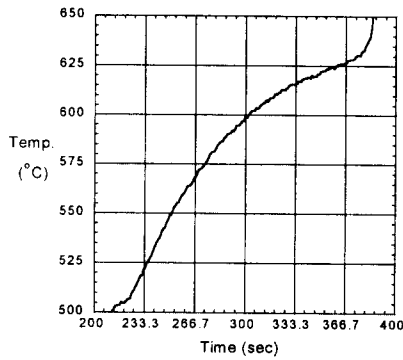


Fig. 3 Temperature elevating at the center of specimen as time running ($T_f=1000^\circ\text{C}$).

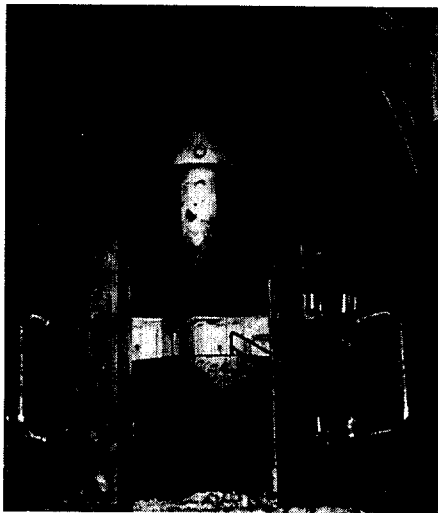


Fig. 4 Set up of experimental apparatus for backward extrusion.

학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

압출환봉을 크기 $\varnothing 35 \times l 43$ mm로 시편 가공하여 실험에 이용하였고, 김낙수[1]등이 제안한 급속가열법(Rapid Heating Technique)을 이용하여 구상조직을 갖는 반응용재료를 얻었다. 이 방법은 시편을 매우 높은 분위기온도를 갖는 소재가열용 전기로에서 원하는 고상율에 이를 때까지 가열한 후 금형에 장입/가공을 시행하는 방법이다. 본 연구에서는 소재가열용 전기로의 분위기온도를 1000°C 로 하였다.

소재의 온도에 따른 고상율관계식은 온도변화에 따른 재료의 잠열방출을 측정하여 고상율을 계산하는 방식인 DSC (Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 구하였고, 측정된 결과들을 식(22)의 3차 다항식형태로 curve fitting한 후 사용하였다. 고상율-온도관계 및 curve fitting된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

$$f_s = 227.9436 - 1.2276148T + 0.0022125947T^2 - 1.3287713 \times 10^{-6}T^3 \quad (22)$$

$$550^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$$

이를 급속가열법에 이용하기 위해서는 주어진 분위기 온도에서 시편이 어느 정도의 시간이 지난 후에 원하는 온도에 도달하는지를 정량적으로 알아야 한다. 따라서 실험장치를 이용하여 시편의 중심부의 온도를 시간에 따라 구하였으며 Fig. 3에 그 결과를 나타내었다.

3.2 실험조건

후방압출 실험장치를 Fig. 4에 나타내었다. chamber는 SKD61로 제작되었으며, 컨테이너와 펀치에는 이형재를 충분히 도포하여 실험완료 후 금형으로부터 소재의 탈형을 용이하게 하였다. 그리고 실험완료전에 시편의 응고를 방지하기 위해서 금형예열용 전기로를 이용하였다. 즉, 금형을 실험온도(시편의 온도)와 동일하게 유지시켜 줌으로써 동온상태의 실험이 가능하도록 하였다.

본 실험에서는 중간정도의 고상율을 대상으로 하므로 Fig. 3으로부터 Table 2와 같은 조건을 택하였다. 즉, 각각의 고상율에서 Table 2의 시간만큼 전기로에서 재료를 가열한 후, 같은

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Rate(wt%)	0.13	0.04	4.20	0.56	1.46	0.01	0.04	0.01	rem

Table 1 Chemical Composition of Al2024.

Solid Fraction, F _s	Temperature (°C)	Heating Time (sec)
0.6	625	324
0.55	628	327
0.5	630	330
0.4	633	338

Table 2 Experimental condition.

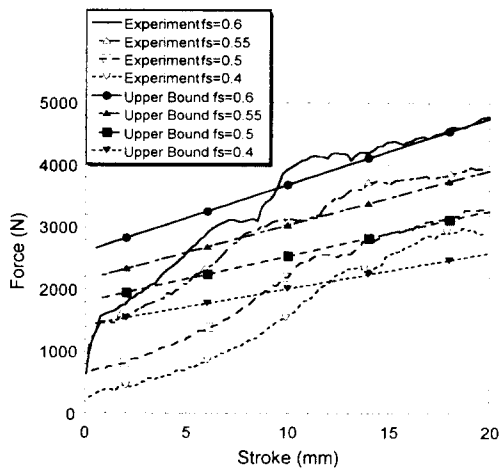


Fig. 5 Experimental results and upper bound solutions.

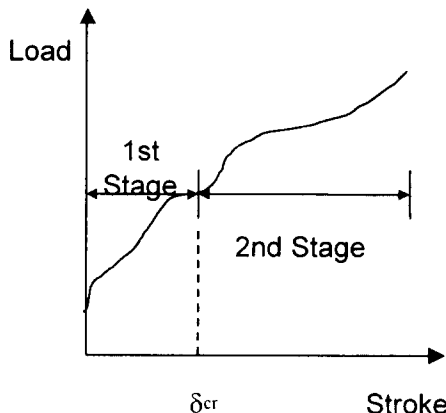


Fig. 6 The deforming stages of backward extrusion process.

온도로 예열한 금형에 재료를 장입하여 압출하였다. 각각의 고상율에 대해 재료상수를 온도의 함수로 구성하게 되므로 펀치의 속도는 일정하게 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 실험결과 및 상계해법결과를 보여주고 있다. 상계법으로 하중을 구할 때 소재와 금형 사이에는 이형재만 도포되어 있고 윤활제는 사용하지 않았으므로 마찰계수 $m_f=0.9$ 정도로 가정하였다. 이는 상계해법으로 시행오차방향을 시행하면서도 확인할 수 있었던 것으로, 마찰계수를 매우 크게 하여 거의 고착상태가 되어야만 실험결과와 비슷한 경향을 보일 수 있었다. 실험곡선은 비선형인 반면 상계해법으로 구한 하중곡선은 변위에 대해서 선형적인 관계를 나타내었다. 이는 정상상태에서의 상계법의 경우 단지 공구-소재간의 접촉길이변화에 따라 하중이 변하게 되며 접촉길이는 시간에 대해서 선형적으로 증가하기 때문에 하중 또한 선형적으로 증가하는 결과를 나타낸 것이다. 또한 고상율이 낮을 수록 실험 결과와 상계해법 결과가 잘 일치되지 않았다는 점을 고려해볼때, 고상율이 낮은 재료가 점도를 가진 유체로 작용하여 마찰이 더욱 커지게 되어 오차의 정도가 커졌다는 점도 생각해 볼 수 있다.

Fig. 6은 본 실험을 통해서 얻은 후방압출공정에 대한 변형양상을 설명하는 그림이다. 반응용재료의 후방압출공정은 펀치의 변위가 증가함에 따라 액상이 소재의 비구속부분쪽으로 이동하는 첫 번째 단계와 액상이동완료 후 치밀화된 고상입자들이 압출되는 두 번째 단계로 나눌 수 있다. 고상율이 낮을수록 액상이동이 완료되는 변위, 혹은 고상이 압출되기 시작하는 변위 δ_{cr} 은 증가함을 알 수 있고 이는 비구속부분으로 이동되어야 할 액상의 양이 증가하였다는 의미이다.

각 실험온도에 대해서 이상과 같은 방법으로 구한 변형률속도민감지수 m (Fig. 7)과 강도계수 K (Fig. 8)를 온도에 대한 함수로 curve fitting한 결과는 다음과 같다. 이때 K 와 m 는 모두 2차 다항식의 형태로 보간하였다.

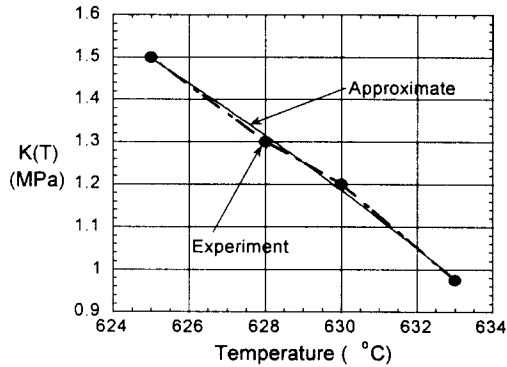


Fig. 7 Curve fitting of strength coefficient, K , for temperature.

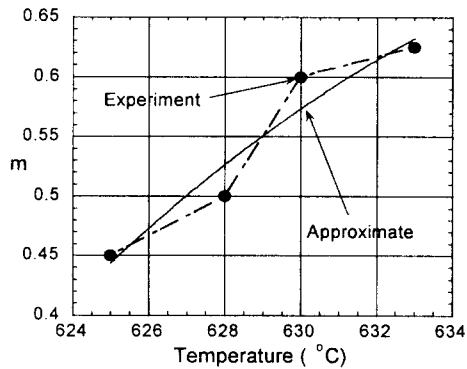


Fig. 8 Curve fitting of strain rate sensitivity, m , for temperature.

$$K = -287.75 + 0.98363T - 0.00083333T^2 \quad \text{[MPa]} \quad (23)$$

$$m = -343.95 + 1.0719T - 0.00083333T^2 \quad (24)$$

5. 결론 및 향후과제

이상의 연구로부터 상계해법을 이용한 유동 응력식과 관련된 재료의 물성치는 완전히 신뢰할만한 결과는 보여주지 않음을 알 수 있었으나 경향성은 비교적 예측한대로 얻을 수 있었다. 그리고 Fig. 5에서 알 수 있듯이 해석 결과와 실험값은 높은 고상율에서 stroke가 끝나갈 때 일수록 잘 일치한다는 점으로 미루어보아 초반부의 속도장과 후반부의 속도장에 대한 각각의 가정이 필요할 것으로 보인다. 그러므로 속도장

의 개선이나 유한요소법을 이용한 재해석을 통하여 좀 더 정확한 계수를 구할 수 있을 것이며, 실험에서 펀치 속도나 다른 치수의 시편 등의 보다 다양한 공정변수를 적용하여 넓은 범위에서의 적용성을 검증하는 것도 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) 김낙수, 김현영, 김중재, 경량차체설계기술, 제4회 G7차세대자동차기술, 통산산업부, pp. 446-451, 1996.
- (2) V. Laxmanan and M. C. Flemings, "Deformation of Semi-Solid Sn-15 pct Pb Alloy", Metallurgical Transactions A, Vol.11A, pp.1927-1937, December 1980.
- (3) M. Suery and M. C. Flemings, "Effect of Strain Rate On Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys", Metallurgical Transactions A, Vol. 13A, pp.1809-1819, October 1982.
- (4) J. F. Seconde and M. Suery, "Effect of Solidification Condition on Deformation Behavior of Semi-Solid Sn-Pb Alloys", Journal of Materials Science, Vol. 19, pp. 3995-4006, 1984.
- (5) J. S. Gunasekera, "Development of A Constitutive Model for mushy (Semi-Solid) Materials", Proceedings of the 2nd International Conference on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, pp.95-102, June 10-12 1992.
- (6) P. Kumar, C. L. Martin and S. Brown, "Predicting the Constitutive Flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries", Proceedings of the Third International Conference on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, pp.37-46, June 13-15 1994.
- (7) 윤종훈, 김낙수, 김현영, 김중재, 임용택, "반용융상태에서 재료의 변형거동에 관한 유한요소해석", 한국소성가공학회지 제6권 제4호, pp.319-328, 1997.
- (8) B. Avitzur, Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill, pp.274-291, 1968.