

반응용 재료의 변형거동에 대한 변형률 속도의 영향

Effect of strain-rate on deformation behavior of semi-solid material

황재호*(부산대원),고대철(부산대 기계기술 연구소),김병민,최재찬(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터)

J.H. Hwang(Graduate School, Pusan National Univ), D.C. Ko(RIMT, Pusan National Univ),

B.M. Kim, J.C. Choi(ERC/NSDM, Pusan National Univ)

Abstract

In this study, the effect of strain-rate and initial solid fraction on the deformation behaviour of semi-solid material is investigated, when semi-solid forging is performed by the process of closed-die compression using A356 alloy of which the above results can be practically applied for industrial purpose. In order to simulate densification in the deformation of semi-solid material, the semi-solid material is assumed to be composed of solid region following rigid visco-plastic model and liquid region following Darcy's law for the liquid flow saturated in the interstitial space. Simulation results of closed-die compression and simple upsetting under different strain-rate and initial solid fractions are compared.

Key Words : Densification(조밀화), Semi-solid material(반응용 재료), Rigid visco-plastic model(강-점소성 모델), Darcy's law(Darcy의 법칙), Closed-die compression(밀폐압축), Solid fraction(고상률)

1. 서론

반응용(semi-solid) 가공이란 금속재료를 고상성분과 액상성분이 공존하는 상태까지 가열하여 반응용 상태에서 성형하는 방법이다. 이러한 가공방법은 기존의 단조공정에 비해 기계적 성질은 떨어지나 변형 저항이 낮아 작은 하중으로도 성형이 가능하며, 유동성이 양호하여 형상이 복잡한 난가공 부품의 제작이 용이하므로 단 공정으로 정형가공(net shape)이 가능하다. 따라서 에너지 절약 및 생산 비용의 절감을 도모할 수 있으므로 반응용 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

반응용 가공에 대한 지금까지의 연구는 많은 시간과 비용을 초래하는 실험적 연구가 대부분이며, 해석적인 접근 또한 실제 공정에 유용하게 적용되기에는 미흡한 점이 많다고 생각된다.

Suery 등⁽¹⁾은 반응용 상태에서 수지상 구조의 Sn-15%Pb 합금의 압축 변형거동에 대한 변형률 속도의 영향을 실험하였으며, Pinsky 등⁽²⁾은 마찰이 Sn-Pb 합금의 변형거동에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. Chareyron 등⁽³⁾은 상계법으로 낮은 변형률 속도에 대한 반응용 재료의 압축 거동을 해석하였으며, Lalli⁽⁴⁾는 반응용 재료에 대한 압축공정에서 낮은 변형률 속도에 대한 변형거동을 슬래브법으로

해석하였다. Toyoshima⁽⁵⁾는 다이 속도 및 투과율 등이 반응용 재료의 변형에 미치는 영향을 유한요소 해석하였다. Chen 등⁽⁶⁾은 비수지상 반응용 재료의 변형거동 메커니즘에 대한 현상학적 모델을 제시하고 이를 검증하기 위해 A356 재료를 이용한 압축 실험을 수행하였다.

이상의 연구에서 반응용 가공시 다양한 공정변수의 영향을 파악하기 위한 실험적, 수치 해석적 접근이 수행되어 왔으나 실제 공정에 가까운 밀폐가공 형태의 공정에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 실제 그 결과를 산업적으로 적용 및 응용이 가능한 A356 합금을 소재로 하여 밀폐가공형태의 공정으로 반응용 가공하였을 때, 변형률 속도와 초기 고상률(초기 변형온도)이 반응용 재료의 변형거동에 미치는 영향을 파악하고, 이를 개방가공형태의 공정과 비교하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 반응용 재료를 강-점소성 거동을 하는 고상영역과 Darcy의 다공질체에 대한 유동 법칙을 따르는 액상영역이 공존하는 재료로 모델링하여⁽⁷⁾ 반응용 재료의 밀폐압축공정과 단순압축공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 밀폐압축공정에서 반응용 재료의 변형거동에 대한 변형률 속도와 초기 고상률의 영향을 단순압축공정의 경우

와 비교해 보았다.

2. 유한요소 정식화

본 연구에서 반응용 재료는 다공질체인 고상영역과 이 다공질체의 기공을 대체하는 액상영역으로 구성된다고 가정하였다. 이때 반응용 재료 전체에 작용하는 응력은 고상영역에 작용하는 응력과 액상영역에 작용하는 압력의 합으로 표시할 수 있다. 따라서 고상 다공질체의 지배방정식은 식(1)과 같은 평형방정식으로 나타낼 수 있다.

평형방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) = 0 \quad (1)$$

경계조건 :

$$\begin{aligned} v_{si} &= \bar{v}_{si} && \text{on } S_v \\ (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) n_j &= \bar{t}_i && \text{on } S_F \end{aligned}$$

여기서, f_L 은 액상률이다. 또한 고상 다공질체의 변형에 대한 항복식은 압축성 재료에 대해 Kuhn 등⁽⁸⁾이 제시한 항복식을 사용하였으며, 금형과 소재 접촉면에서의 마찰을 고려하기 위하여 Chen 등⁽⁹⁾이 제안한 식을 이용하였다.

액상영역에 대한 지배방정식은 연속방정식과 다공질체를 통과하는 유체의 유동법칙인 Darcy의 유동법칙으로 표현하였으며, 다음의 식(2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

연속방정식 :

$$\nabla \cdot \vec{U}_S + \nabla \cdot (f_L \vec{U}_L) = 0 \quad (2)$$

Darcy의 유동방정식 :

$$\vec{U}_L = \frac{\kappa}{\mu_L f_L} \nabla p \quad (3)$$

경계조건 :

$$p = p_0 \quad : \text{자유 표면}$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad : \text{다이와 접촉하는 면}$$

위의 식(1)~(3)을 유한요소 분할화하면 반응용 재료에 대한 전역 유한요소 방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} K_S & K_L \\ L_S & L_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta V_S \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_S \\ Q_L \end{Bmatrix} \quad (4)$$

3. 유한요소 해석

반응용 재료의 밀폐압축공정에 대해 변형률 속도와 초기 고상률(초기 변형온도)이 변형 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 이용된 재료는 실제 그 결과를 산업적으로 적용 및 응용이 가능한 A356 합금이다. 밀폐압축공정에 대해 초기 고상률이 0.5일 때 변형률속도 ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2}, 2 \times 10^0, 2 \times 10^1, 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)에 따른 변형거동을 해석하였고, $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 일 때 초기 고상률 ($f_{s0} = 0.5, 0.7$)에 따른 밀폐압축공정의 변형거동을 해석하였다. 또한 이러한 결과를 단순압축공정과 비교해 보았다.

해석에 사용된 시편은 지름 20mm, 높이 20mm의 원통형 빌렛으로 1/2 단면에 대해 축대칭 문제로 모델링하였고, 초기 고상률은 일정하다고 가정하였다.

Fig.1에 밀폐압축공정의 해석을 위한 초기 격자 시스템과 경계조건을 나타내었다. 금형과 소재 접촉면에서의 마찰을 고려하기 위하여 마찰상수 m_f 를 0.3으로 두었으며, A-A'는 각 압축 스트로크에서 소재 높이의 1/2 지점이다.

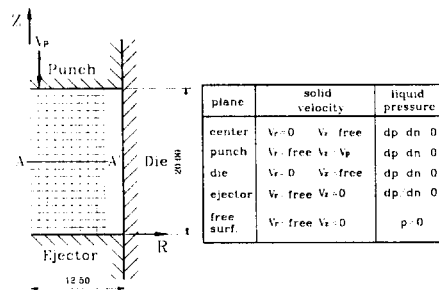


Fig.1 Finite element model and boundary condition for the closed-die compression.

A356에 대한 유동응력식은 액상이 존재하지 않는 온도 ($T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$)로 일정하게 유지하여 압축 실험한 결과⁽¹⁰⁾로부터 구하였으며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma} = 24.43 \frac{\dot{\epsilon}^{-0.23}}{\epsilon} \quad (5)$$

초기 투과율의 값은 고상입자를 완전한 구형이라고 가정하고 고상입자들의 평균반경과 고상률로부터 구한 Scheidegger⁽¹¹⁾가 제시한 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$x_0 = \frac{R^2}{6} \left(1 + \frac{4}{3(1-f_L)} - \sqrt{\frac{8}{1-f_L} - 3} \right) \quad (6)$$

여기서, R은 고상입자들의 평균반경이다. 본 연구에

서 A356의 고상입자 평균반경은 $100\mu\text{m}^{(12)}$ 로 하였다. 기타 해석에 이용된 재료 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of A356

재료	A356
액상의 점성계수	$\mu_L = 0.17 [cP]$
마찰 계수	$m_f = 0.3$

4. 결과 및 고찰

4.1 변형 거동에 대한 변형률 속도의 영향

반응용 재료의 변형거동에 대한 변형률 속도의 영향을 조사하기 위하여 초기 고상률이 0.5 ($T = 583^\circ\text{C}$)일 때 높이감소율에 따른 소재 중심에서 반경 방향(Fig.1의 A-A')으로의 고상률 변화를 Figs.2~5에 나타내었다. 변형률 속도는 각각 2×10^{-2} , 2×10^0 , 2×10^1 , $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 이며, 각 변형률 속도에 대한 높이 감소율은 20, 35, 50, 55, 65%이다.

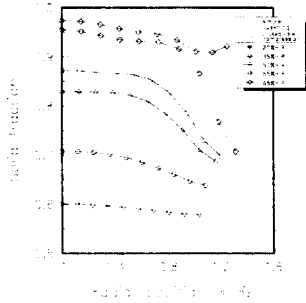


Fig.2 Variation of solid fraction at various height reduction ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $f_{s0} = 0.5$)

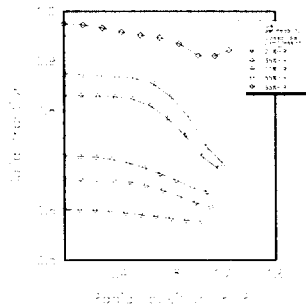


Fig.3 Variation of solid fraction at various height reduction ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$, $f_{s0} = 0.5$)

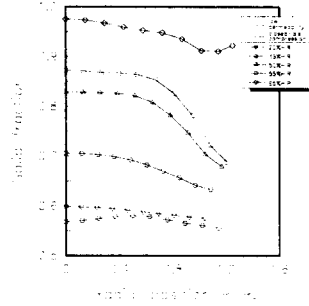


Fig.4 Variation of solid fraction at various height reduction ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$, $f_{s0} = 0.5$)

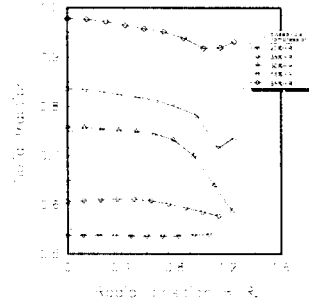


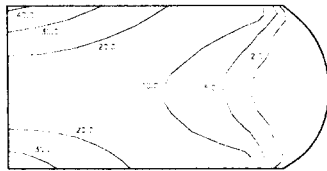
Fig.5 Variation of solid fraction at various height reduction ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $f_{s0} = 0.5$)

소재의 측면부가 다이와 아직 접촉하지 않은 50% 높이 감소율에서 각 변형률 속도에 따른 소재 중심의 고상률을 비교하면, 낮은 변형률 속도에서는 액상이 고상 다공질체를 통과하여 유동하기 때문에 고상의 조밀화로 그 값이 커짐을 알 수 있다. 반면 높은 변형률 속도에서는 액상이 고상과 함께 유동하게 되어 반경 방향으로 균일한 고상률이 유지되며 그 값도 상대적으로 낮아진다. 그러나 본 연구에서 사용된 조건에서는 투과율이 크기 때문에 높은 변형률 속도일수록 고상률 분포가 균일하게 되는 효과가 크게 나타나지는 않았다⁽⁵⁾.

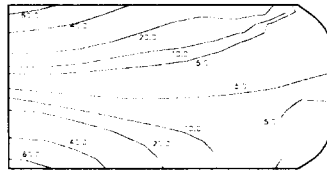
높이 감소율에 따른 고상률 분포를 비교하면 높이 감소율이 증가할수록 조밀화 현상이 심화되어 중심에서의 고상률이 높아짐을 알 수 있다. 이러한 결과들은 Suery 등⁽¹⁾이 반응용 Sn-15%Pb 합금에 대해 실험적으로 제시한 결과와 정성적으로 잘 일치한다.

이러한 결과를 단순압축공정과 비교하기 위하여 $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $f_{s0} = 0.5$ 의 조건에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 높이감소율이 65%일 때 소재 중심에서 반경방향으로의 고상률 분포를 Fig.2

에 점선으로 나타내었다. Fig.2의 단순압축공정에서는 중심부에서의 고상 조밀화와 반경방향으로의 액상 유동으로 인해 고상률의 분포가 불균일함을 알 수 있다. 그러나 동일한 높이 감소율에 대해 실선으로 표시된 밀폐압축공정에서는 소재 측면이 다이와 접촉함으로써 액상 유동이 억제되어 고상률 분포가 균일해짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 단순압축공정과 밀폐압축공정에서의 액상 압력 분포를 나타낸 Fig.6에서 볼 수 있듯이, 측면부가 자유면인 단순압축공정에 비해 측면부가 다이 접촉하는 밀폐압축공정에서 A-A'선상의 액상 압력 분포가 더 균일하기 때문이다. 즉, 단순압축공정에서는 반응용 합금의 소재가 변형할 때 고압인 중심부와 대기압인 자유표면의 큰 압력차로 인해 고상 다공질체를 통한 액상 공정물의 유동이 크게 발생하고 이로 인해 소재 내부에서 고상 다공질체의 조밀화가 크게 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 반면에 중심부와 측면부의 압력차가 작은 밀폐가공공정에서는 액상의 유동이 억제되어 내부 고상률이 상대적으로 더 균일하게 분포하게 됨을 알 수 있다.



(a) Simple upsetting



(b) Closed-die compression

Fig.6 Distribution of liquid pressure(kPa) at

$$f_{s0} = 0.5, \dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ and H.R} = 65\%$$

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 변형률 속도의 증가에 따른 고상률 분포의 균일화 현상이 크게 나타나지 않았다. 변형률 속도가 $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ 일 때는 거의 비슷한 정도의 고상 조밀화가 이루어졌고, $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 정도에서는 높은 변형률 속도에 의해 고상의 조밀화가 억제되고 있으나 여전히 조밀화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 이는 Toyoshima⁽⁵⁾가 제시한 투과율이 조밀화에 미치는

영향 때문인 것으로 사료된다. 즉, 투과율이 클수록 고상의 조밀화에 미치는 변형률 속도 영향이 작게 되어 균일한 고상률의 분포를 얻기가 어렵기 때문이다.

본 연구의 조건에서는 식(6)에 의해 $x_0/\mu_L = 9.52 \times 10^3 [\text{mm}^2/\text{MPa} \cdot \text{sec}]^{(12)}$ 의 값이 얻어졌다. Figs.3, 4에서 점선으로 표시된 35% 높이감소율에서의 고상률 분포는 $x_0/\mu_L = 1.0 \times 10^2 [\text{mm}^2/\text{MPa} \cdot \text{sec}]$ 로 수행된 유한요소해석의 결과이다. 보다 작은 투과율 값을 사용함으로써 조밀화에 미치는 변형률 속도의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 점선으로 표시된 낮은 투과율에서의 고상률 분포가 $2 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도에서 보다 $2 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ 일 때 더 균일함을 알 수 있다. 이러한 현상은 고상과 고상 사이의 액상 유동 공간을 의미하는 투과율이 크기 때문에 높은 변형률 속도에서 액상이 고상을 포함해서 함께 반경방향으로 유동하여 내부 조직이 균일하게 되는 효과가 줄어들기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 따라서 본 연구에서 얻은 결과로부터 초기 고상율이 0.5이고 $x_0/\mu_L = 9.52 \times 10^3 [\text{mm}^2/\text{MPa} \cdot \text{sec}]$ 인 조건의 A356 소재에서는 조밀화에 미치는 변형률 속도의 영향이 적음을 알 수 있다.

4.2 변형 거동에 대한 초기 고상률의 영향

반응용 재료의 변형거동에 대한 초기 고상률의 영향을 조사하기 위하여 초기 고상률이 0.7 ($T = 565 \text{ }^\circ\text{C}$)이고 변형률 속도가 $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 인 조건에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 높이 감소율에 따른 소재 중심에서 반경방향(Fig.1의 A-A')으로의 고상률의 변화를 Fig.7에 나타내었다. Fig.7에서 50%의 높이 감소율에서는 소재의 자유면이 다이의 측면에 접촉하였지만, 동일한 조건에 대해 초기 고상률이 0.5인 경우에는 Fig.2에 나타낸 바와 같이 소재의 자유표면이 다이의 측면부에 접촉하지 않았음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 액상 공정물의 유출이 해석상에 고려되지 않아 액상 공정물의 유출량만큼 체적 손실이 발생하였다. 따라서 위와 같은 결과는 높은 초기 고상률보다는 낮은 초기 고상률에서 액상 공정물의 유출로 인하여 해석상의 체적 손실이 더욱 심하다는 것을 의미한다. 이러한 원인은 Eq.(6)에 의한 초기 투과율이 0.7보다 0.5의 초기 고상률에서 더 크게 되어 액상의 유동이 더 쉽기 때문이다. 이는 Chen 등⁽⁶⁾이 제안한 구상화된 반응용 재료의 현상학적 모델(phenomenological model)과 일치한다. 본 연구에서는 액상 공정물의 유출이

해석상에 고려되지 않았기에 이 모델을 완전하게 표현하지는 못한다. 그러나 해석상으로 액상 공정물의 유출과 이의 응고 현상을 고려할 수 있다면 이 모델에 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

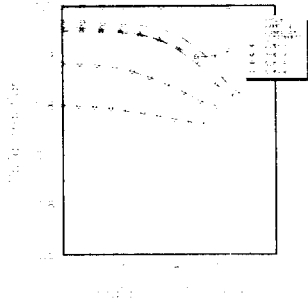


Fig.7 Variation of solid fraction at various height reduction ($\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $f_{s0} = 0.7$)

5. 결론

본 연구에서는 실제 그 결과를 산업적으로 적용 및 응용이 가능한 A356을 재료로 하였다. 실제 실험에서 구해진 값들(유동응력식, 초기 투과율)을 이용하여 밀폐압축공정에서 변형률 속도와 초기 고상률이 변형 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 이러한 결과를 단순압축공정의 경우와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 밀폐압축공정에서는 자유면이 측면다이에 접촉함에 따라 액상압력이 균일해지므로 단순압축공정에서 발생하는 액상 유동을 억제할 수 있어 균일한 고상률 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 본 연구에 이용된 A356 재료(초기 고상율이 0.5 이고 고상 반경이 $100 \mu\text{m}$ 인 상태)는 큰 초기 투과율의 영향으로 고상의 조밀화에 대한 변형률 속도의 영향이 적음을 알 수 있었다.
- (3) 동일 초기 고상률에서 낮은 투과율을 갖는 미세한 구상화 조직의 반응용 재료를 사용하면 높은 변형률 속도로 반응용 가공시 고상률 분포가 균일한 제품을 얻을 수 있음을 알았다.
- (4) 낮은 초기 고상률에 비해 상대적으로 액상 유출량이 적은 높은 초기 고상률로 밀폐압축가공을 수행하면 더 균일한 고상률 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (5) 유출된 액상 공정물의 해석적 처리 방법 및 잠열을 고려한 열전달이 해석상에 포함된다면 반응용 재료의 변형 거동을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) M. Suery and M.C. Flemings, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys", Metall. Trans. A, vol.13A, pp. 1809-1819, 1982
- (2) D.A. Pinsky, P.O. Charreyron and M.C. Flemings, "Compression of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates", Metall. Trans. B, vol.15B, pp. 173-181, 1984
- (3) P.O. Charreyron and M.C. Flemings, "Rheology of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates: Application to Forming Process", Int. J. Mech. Sci., vol. 27, No. 11/12, pp.781-791, 1985
- (4) L.A. Lalli, "A Model for Deformation and Segregation of Solid-Liquid Mixture", Metall. Trans. A, vol.16A, pp.1393-1403, 1985
- (5) S. Toyoshima, "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
- (6) C.P. Chen and C-YA Tsao, "Semi-Solid Deformation of A356 Al Alloys", The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. pp.16-20, 1996
- (7) 최원도, 고대철, 김병민, 최재찬, "유도가열을 고려한 반응용 재료의 성형공정에 관한 유한요소 시뮬레이션", 한국정밀공학회 '96 추계학술대회 논문집, pp. 110-114
- (8) H.A. Kuhn and C.L. Downey, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials", Int. J. Powder Metallurgy, vol.7, pp. 15-25, 1971
- (9) C.C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Applications of Numerical Methods to Forming Process, ASME, AMD, vol.28, pp. 163-174, 1978
- (10) W. Lapkowski, M.Pietrzyk and J. Sinczak, "Behaviour of Metal Alloys during Plastic Deformation in Partly Liquid State". Journal of Material Processing Technology, vol.34, pp. 481-488, 1992
- (11) A.E. Scheidegger, "The Physics of Flow Through Porous Media", 3rd Edition University Toronto Press, p.150
- (12) J.H. Yoon, Finite Element Analysis and Experimental Study on Compression Behavior of Semi-Solid Aluminum, Master Dissertation, Pusan National University, 1994