

반용융 재료의 압출공정에 관한 유한요소 해석

황재호* · 고대철** · 민규식*** · 김병민**** · 최재찬****

(1998년 2월 27일 접수)

Finite Element Analysis of Extrusion Process in Semi-Solid State

J.H. Hwang, D.C. Ko, G.S. Min, B.M. Kim and J.C. Choi

Abstract

It is the objective of this study to analyze the effect of various process variables on the quality of extruded product and extrusion force for semi-solid extrusion of Al2024 with solid phase structure of globular type by the finite element method. Process variables are initial solid fraction, ram speed, semi-angle of die, and reduction in area. The results of experiment are compared with those of simulation in order to verify the usefulness of the developed finite element program. The flow and deformation of semi-solid alloy are analyzed by coupling the deformation of porous skeleton and the flow of liquid phase. It is also assumed that initial solid fraction is homogeneous.

Key Words : Semi-Solid Extrusion(반용융 압출), Globular Type(구상형), Solid Fraction(고상률), Semi-Solid Alloy(반용융 합금), Porous Skeleton(다공질체)

1. 서 론

반용융 성형(semi-solid forming)이란 구상화(globularization)된 입자를 갖는 소재를 고상성분(solid state components)과 액상성분(liquid state components)이 공존하는 반용융 상태까지 가열하여 성형하는 방법으로 기존의 단조공정에 비해 기계적 성질은 떨어지나 변형저항이 낮아 작은 하중으로도 성형이 가능하며, 유동성이 양호하여 형상이 복잡한 난가공 부품의 제작이 용이하므로 단 공정으로 정형가공(net shape)이 가능하다. 따라서 에너지 절약 및 생산비용의 절감을 도모할 수 있으므로 반용융 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Suery 등⁽¹⁾은 반용융 상태에서 수지상 구조의 Sn-15%Pb 합금의 압축 변형거동에 대한 변형률 속도의 영향을 실험하였다. Choi 등⁽²⁾은 기어 단조의 성형성 실험에서 스퍼어 기어의 성형 후, 가압유지 시간에 대한 제품 형상을 실험하였고, 다이온도 400℃, 가압유지 시간 10초일 때 가장 양호한 제품을 얻을 수 있다고 보고하였다. Charreyron 등⁽³⁾은 상계법으로 낮은 변형률 속도에 대한 반용융 재료의 압축 거동을 압축성 점소성 구성모델(compressible viscoplastic model)로 해석하였으며, 이를 발전시켜 Lalli⁽⁴⁾는 고상 응력과 액상 유압의 합으로 정의되는 평형 방정식과 다공질체를 흐르는 Darcy의 유동 법칙을 이용하여 저속의 변형률속도에 대하여 압축 공정

* (주)LG전자, 생산기술연구소, 소재용융가공팀
** 양산대학, 메카트로닉스과
*** 마산대학, 자동차과
**** 부산대학교, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

을 슬래브법으로 해석하였다. Toyoshima⁽⁵⁾는 성형 속도 및 투과율 등이 반응용 재료의 변형에 미치는 영향을 유한요소 해석하였다. 특히, Gunasekera⁽⁶⁾는 고상입자와 액상의 기하학적인 형상을 이용한 반응용 재료의 구성방정식을 제안하고 이를 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 보고하였다. 최근에 Kim⁽⁷⁾은 반응용 재료가 변형할 때 구상화의 변형을 고려하고 고상입자들의 배열을 모델화시켜 반응용 재료의 거동을 유한요소 해석하였고, Choi⁽⁸⁾는 소재 가열 단계와 성형 단계를 연계하여 해석을 수행함으로써 반응용 재료에 대한 해석절차를 정립하였다.

지금까지의 반응용 성형공정에 대한 연구는 반응용 재료의 기본 성형 특성을 연구하기 위하여 개방형 성형공정인 단순 업셋팅이 주로 실험 및 해석되어져 왔다. 그러나 반응용 성형공정시 자유표면에서 액상 유출현상과 크랙이 발생하게 되어 실험과 해석 결과의 차이를 발생시킬 뿐만 아니라 실제 반응용 성형에는 밀폐형 성형공정이 주로 이용된다. 따라서 지금까지 단순 업셋팅에서 얻어진 연구결과들을 바탕으로 하여 실제 반응용 단조공정시의 재료거동 및 성형하중을 파악할 필요가 있다.

반응용 압출공정은 제품의 내부조직과 기계적 특성이 균일하여 금후 여러 분야에 적용될 가능성이 있을 뿐만 아니라, 개방형 성형공정(단순 업셋팅)과 밀폐형 성형공정(밀폐 압축)의 중간 압축특성을 갖기 때문에 반응용 압출공정을 수행하여 단순 업셋팅에서 얻어진 연구결과들과 비교함으로써 실제 단조공정에 대한 성형 특성도 파악될 수 있다. 따라서 본 논문의 목적은 반응용 압출공정에 대해 다이반각(α), 단면적 감소율(R. A.), 성형속도(V_{die})와 초기 고상률(f_{s0}) 등의 공정변수가 반응용 재료의 변형거동 및 성형하중에 미치는 영향을 파악하기 위해 유한요소해석과 실험을 수행하여 그 결과를 단순 업셋팅에서 얻어진 연구결과들과 비교함으로써 실제 반응용단조 공정 해석에 대한 기초를 확립하는 데 있다.

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.

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

여기서, f_L 은 액상률이다. 또한 고상 다공질체의 변형에 대한 항복식은 압축성 재료에 대해 Kuhn 등⁽⁹⁾이 제시한 항복식을 사용하였으며 기지합금(base metal)의 물성치와 고상률에 의존하는 유효 응력 $\bar{\sigma}$ 는 다음과 같이 Gunasekera⁽⁶⁾가 고상입자와 액상의 기하학적인 형상을 이용하여 이론적 모델로서 제안한 식(2)를 이용하였다.

$$\bar{\sigma} = [1 - (\beta f_L)^{2/3}] \bar{\sigma}_b \quad (2)$$

여기서, $\bar{\sigma}_b$ 는 기지합금의 유효응력이고, β 는 Gunasekera⁽⁶⁾의 구성모델 중 상대적으로 고상률이 높은 구상화된 재료에 적합한 1.5의 값을 사용하였다.

액상영역에 대한 지배방정식은 연속방정식과 다공질체를 통과하는 유체의 유동법칙인 Darcy의 유동법칙으로 표현하였으며, 다음의 식(3), (4)와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U_{Si}}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_L U_{Ri})}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

여기서, U_{Si} 는 고상의 속도이다.

$$U_{Ri} \cdot f_L = \frac{\chi}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4)$$

여기서, U_{Ri} 는 액상의 고상에 대한 상대속도이고, μ_L 은 액상의 점성(viscosity)이며, χ 는 투과율 계수이다. 또한 χ 는 액상률의 함수로 표현되며, 본 연구에서는 다음과 같은 수식을 사용하였다.⁽⁹⁾

$$\chi = \chi_0 (f_L)^2 \quad (5)$$

여기서, χ_0 는 초기 투과율의 값이며, 본 연구에서는 구형의 다공질체에 대한 초기 투과율 값을 계산하는 다음과 같은 식(10)을 이용하여 고상입자들의 평균반경과 고상률로부터 초기 투과율을 구하였다.

$$\chi_0 = \frac{R^2}{6} \left(1 + \frac{4}{3(1-f_L)} - \sqrt{\frac{8}{1-f_L} - 3} \right) \quad (6)$$

여기서, R 은 고상입자들의 평균반경이다.

이상의 연속방정식과 Darcy의 유동법칙을 다시 쓰면, 액상의 유동을 지배하는 방정식이 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial U_{Si}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\chi}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (7)$$

마찰력 계산을 위하여 Chen 등⁽¹¹⁾이 제안한 다음 식을 이용하였다.

$$f = -mk \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{|V_r|}{a} \right) \frac{V_r}{|V_r|} \quad (8)$$

여기서, v_r 은 금형에 대한 소재의 상대속도이고 a 는 대단히 작은 양의 상수이다.

위의 식(1)과 (7)을 유한요소 분할화하면 반응용 재료에 대해 고상의 변형과 액상의 유동이 연계된 전역 유한요소 방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{SS}(\Delta U_s) & \mathbf{K}_{SL} \\ \mathbf{K}_{LS} & \mathbf{K}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_s \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{Q}_L \end{bmatrix} \quad (9)$$

본 논문에서 고상의 항복식으로 압축성 다공질체의 항복식을 사용함으로써 고상률이 1.0에 가까워질수록 벌칙 유한요소법과 같아지게 되어 계산에 큰 오차가 생기고 수렴성에도 문제를 일으키게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고상률이 어느 한계치에 도달한 요소를 완전 고상 상태의 요소로 고려하여 일반 금속의 강소성 수식을 적용하는 압축특성법(compressible material method)을 적용하였다.⁽¹²⁾ 반응용 재료에서는 액상 용융금속의 유출에 의한 조밀화(densification)가 발생하더라도 어느 정도의 일정한 액상 용융금속이 내부에 존재하게 된다. Charreyron 등⁽³⁾은 반응용 재료의 압출공정에서 소재 내부의 평균 고상률이 0.95~0.98일 때까지는 액상만 유출되고 그 이후에는 고상률이 0.95~0.98인 균일한 압출이 이루어짐을 보고하였다. 따라서 본 논문에서는 반응용 재료의 압출시 고상률 한계를 0.95로 하였다.

식(9)의 전역 유한요소 방정식의 강성행렬은 \mathbf{K}_{LS} 와 \mathbf{K}_{LL} 의 차이로 인해 비대칭행렬이 된다. 따라서 본 논문에서는 비대칭 행렬의 계산 속도를 향상시키기 위하여 열방향으로 색인하여 0이 아닌 요소의 값을 1차 행렬로 저장하여 계산하는 방법(row indexed sparse storage

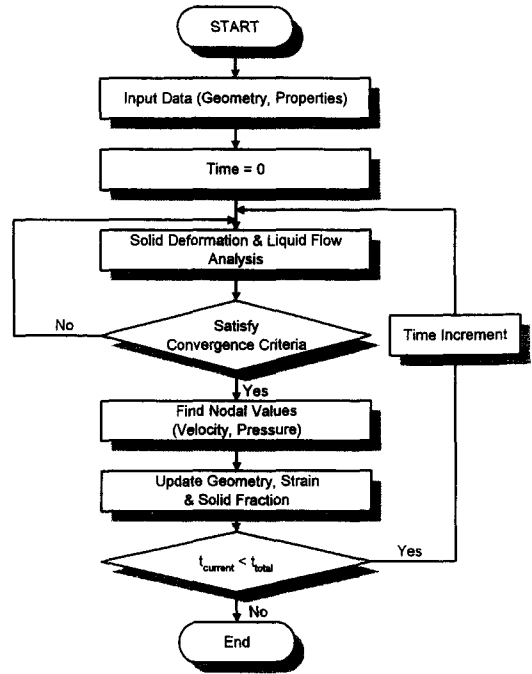


Fig. 1 Procedure of FE-simulation for semi-solid forming

mode)⁽¹³⁾을 사용하였다.

이상에서 유도된 전역 유한요소 방정식을 이용한 유한요소 해석절차를 Fig. 1에 제시하였다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델링

해석에 사용된 소재는 Al2024이며 그 화학적 조성을 Table 1에 제시하였다. 시편은 반지름 14 mm, 높이 40 mm의 원통형 빌렛으로 1/2 단면에 대해 축대칭 문제로 모델링하였다. 성형 초기의 소재 고상률 분포는 균일하다고 가정하여 소재 가열 및 이송 시에 발생하는 열전달을 무시하였으며 등은 조건으로 성형해석을 수행하였다. 유한요소해석 중에 격자 왜곡이 심화되면 격자 재구성을 수행하였다.⁽¹⁴⁾ Fig. 2에 밀폐형 반응용 압출공정의 유한요소해석을 수행하기 위한 초기 격자 시스템과 경계조건을 나타내었다. 실험으로 구한 구상화된 Al2024의 초기 고상 평균반경은 45 μm이었으며 이를 이용해 식(6)으로부터 초기 투과율값을 구하였다. Al2024의 액상점성은 Kattamis 등⁽¹⁵⁾이 Al-4.5%Cu-1.5%Mg 합금에 대해 제시한 액상점성값인 0.004Pa·s를 사용하였으며, 마찰상

Table 1 Chemical compositions of Al2024

Element	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Ni	Others
Rate(wt%)	rem	0.30	4.40	0.72	1.51	0.02	0.14	0.02	0.09Cr

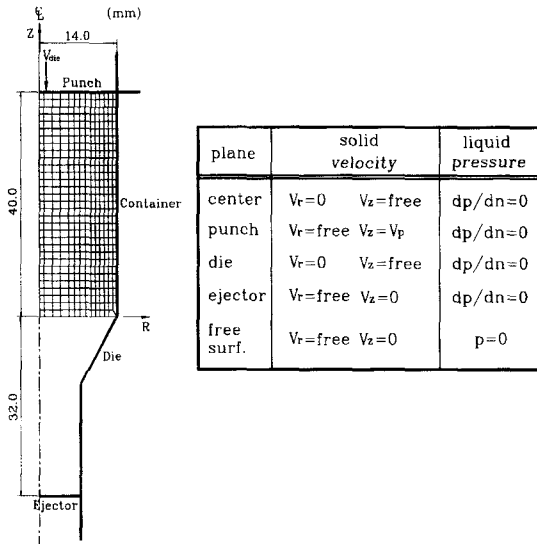


Fig. 2 Model for FE-simulation and boundary conditions

수는 0.3⁽³⁾을 사용하였다. 기지재인 구상화된 Al2024의 유동응력은 Al2024를 고상선 근처인 500℃까지 가열한 후 0.3, 3, 30 mm/s의 초기 변형률속도에 대한 열간 압축시험을 수행하여 구하였다. 유한요소해석을 위하여 실험으로 구한 유동응력은 여러 가지 변형률에 대해 선형보간하여 변형률속도 민감도 지수의 구성방정식으로 정량화하여 사용하였으며, 변형률이 0.04일 때의 유동응력식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma}_b = 18.47 \bar{\epsilon}_b^{0.179} [MPa] \text{ at } \bar{\epsilon}_b = 0.04 \quad (10)$$

Table 2 Classification of extrusion process conditions for computation

No. of CASE	Semi-angle of die (°)	Reduction in area(%)	Ram speed (mm/s)	Initial solid fraction
CASE 1	30	71.6	40	0.7
CASE 2	45	71.6	40	0.7
CASE 3	30	88.9	40	0.7
CASE 4	30	71.6	120	0.7
CASE 5	30	71.6	40	0.8

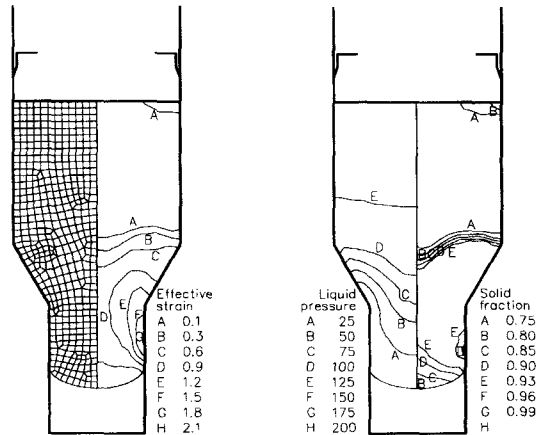


Fig. 3 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 1 at 16 mm stroke (R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{die}=40$ mm/s $f_{s0}=0.7$)

3.2 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 다이반각(30, 45°), 단면적 감소율(71.6, 88.9%), 성형속도(40, 120 mm/s) 그리고 초기 고상률(0.7, 0.8) 등을 압출공정의 공정변수로 설정하였다. 각 공정변수가 반응용 재료의 변형률등과 성형하중에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공정변수조합을 Table 2와 같이 5가지의 CASE로 분류하였으며 각각의 CASE에 대해서 유한요소해석을 수행하였다.

Figs. 3~7은 각 공정변수조합에 대해 반응용 압출공정을 유한요소 해석한 결과로 격자의 변형 상태, 유효 변형

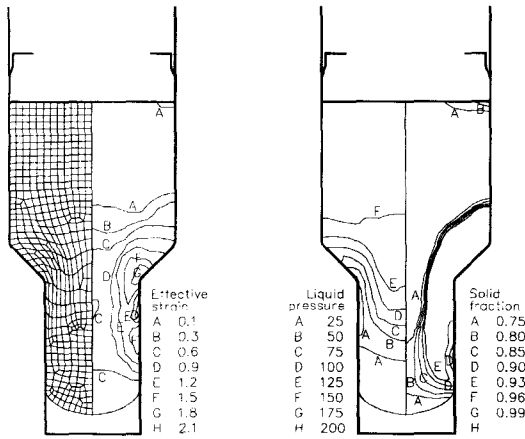


Fig. 4 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 2 at 16 mm stroke (R.A.=71.6%, $\alpha=45^\circ$, $V_{die}=40$ mm/s, $f_{S0}=0.7$)

를, 액상압력 및 고상률 분포를 펀치 스트로크 16 mm에 대해 나타내었다. Fig. 3은 CASE 1의 공정변수조합, 즉 다이반각이 30° , 단면적 감소율이 71.6%, 성형속도가 40 mm/s 및 초기 고상률이 0.7일 경우에 대한 유한요소 해석 결과를 나타낸 것으로 유효 변형률과 고상률이 유사한 분포를 보이고 있는 데 이로부터 재료의 변형 정도와 고상률이 밀접한 관계를 가짐을 확인할 수 있다. 압출다이 의 단면적 감소 부위에서 액상 압력의 구배가 큼을 알 수

있고 이로 인해 이 부위에서 액상의 유동이 저압 방향으로 심하게 일어남을 예측할 수 있다. 이러한 사실은 압출다이 의 단면적 감소 부위에서 조밀화가 발생하여 큰 고상률 값을 가지는 것으로부터 확인할 수 있다. 반면에 컨테이너의 내부에서는 상대적으로 압력구배가 작아 액상 유동이 작 게 일어나므로 이 부위에서 조밀화의 정도가 낮음을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 다이반각이 변형거동에 미치는 영향을 파악하 기 위한 CASE 2의 공정변수조합으로 CASE 1의 공정변 수조합 중에서 다이반각을 30° 에서 45° 로 변화시켰을 때 의 유한요소해석 결과이다. 다이반각이 클수록 컨테이너 와 압출다이 부분의 유효 변형률, 액상압력 그리고 고상률 이 상대적으로 더 큰 값으로 분포하고 반면에 자유표면부 에서는 상대적으로 더 작은 값으로 분포함을 확인할 수 있 다. 이는 다이반각이 클수록 압출다이로부터 재료에 가해 지는 가압력이 크게되고 이로 인해 액상 유동이 심화되어 자유면에서의 액상 유출량과 중심부에서의 조밀화가 크게 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 단면적 감소율이 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 CASE 3의 공정변수조합으로 CASE 1의 공정변수조합 중에서 단면적 감소율을 71.6%에서 88.9%로 변화시켰을 때의 해석 결과이다. CASE 1의 Fig. 3과 비교해보면 단면적 감소율이 클수록 가압력이 작용하는 영역이 넓어져 액상 유출량이 많아짐을 알 수 있다.

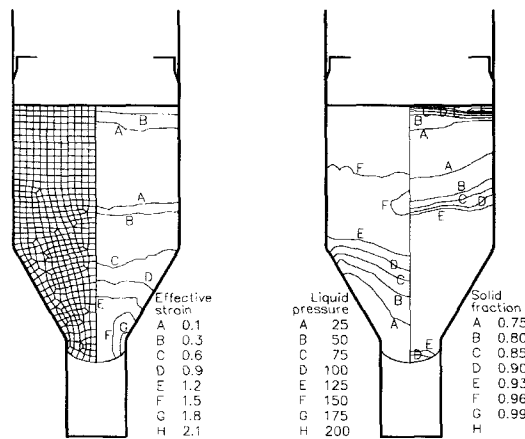


Fig. 5 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 3 at 16 mm stroke (R.A.=88.9%, $\alpha=30^\circ$, $V_{die}=40$ mm/s, $f_{S0}=0.7$)

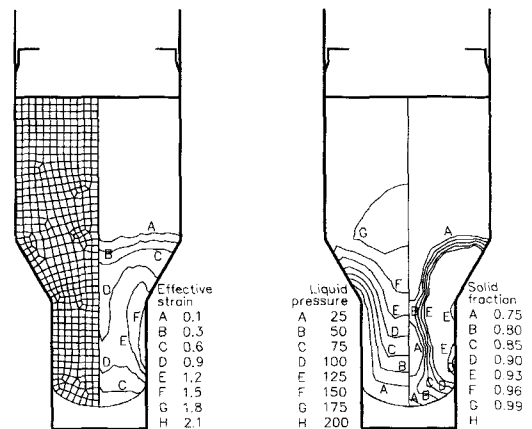


Fig. 6 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 4 at 16 mm stroke (R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{die}=120$ mm/s, $f_{S0}=0.7$)

Fig. 6은 성형속도가 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 CASE 4의 공정변수조합으로 CASE 1의 공정변수조합에서 성형속도를 40 mm/s에서 120 mm/s로 변화시켰을 때의 변형 상태 및 유효 변형률, 액상압력 그리고 고상률 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3과 Fig. 6을 비교해보면 성형속도가 클수록 컨테이너 내부의 유효 변형률과 고상률이 낮고 압출길이가 더 길게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 고속일수록 고상의 조밀화가 억제되는 현상은 단순 압축공정을 통해 많이 알려졌다.^(1,4,5,7) 이러한 현상의 원인은 낮은 성형 속도에서는 고상에 대한 액상의 상대속도가 커서 액상이 고상 다공질체를 통과하여 유동하게 되고 이로 인해 소재 중심부에서 고상률이 증가하여 고상의 조밀화가 크게 발생하지만 높은 성형 속도에서는 고상에

대한 액상의 상대속도가 낮아 액상이 고상과 함께 유동하게 되어 균일한 고상률이 유지된다. 이러한 현상이 압출공정에서도 발생됨을 본 연구에서 확인할 수 있었다. 즉, 성형속도가 클수록 컨테이너 내부에서 액상압력구배가 균일하게 되어 액상유동이 억제되고 이로부터 액상유출량이 상대적으로 적게 되어 압출길이가 길게 됨을 확인할 수 있다. 그러나 압출다이와 접촉하는 부분에서는 성형속도가 높을수록 가압력이 커지게 되어 조밀화가 심화됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 초기 고상률이 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 CASE 5의 공정변수조합으로 CASE 1의 공정변수조합에서 초기 고상률을 0.7에서 0.8로 변화시켰을 때의 변형 상태 및 유효 변형률, 액상압력 그리고 고상률 분포를 16 mm 펀치 스트로크에 대해 나타낸 것이다. 높은 초기 고상률일수록 즉, 소재의 초기 변형 온도가 낮을수록 액상 유출에 의한 체적 감소가 작아 압출길이가 더 길게 됨을 알 수 있다. 이러한 원인은 고상률이 높을수록 초기에 존재하는 액상의 양이 작을 뿐만 아니라 식(5)에서처럼 액상 유동공간을 의미하는 투과율 값이 작게 되어 액상의 유동과 유출이 억제되기 때문인 것으로 사료되며 이로 인해 높은 초기 고상률($f_{s0} = 0.8$)에서 압출길이가 더 길게 됨을 알 수 있다.

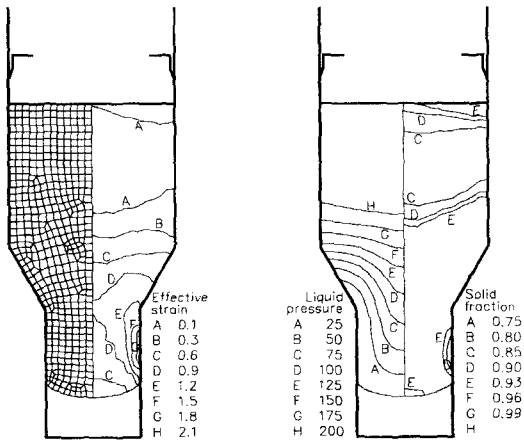


Fig. 7 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 5 at 16 mm stroke (R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{die}=40$ mm/s, $f_{s0}=0.8$)

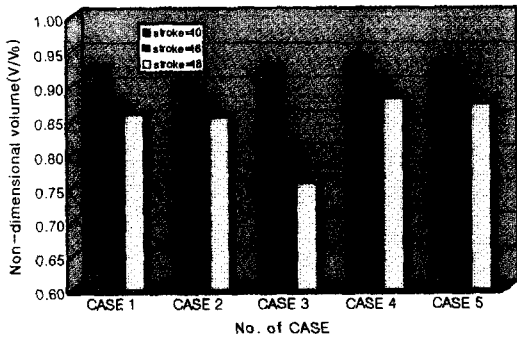


Fig. 8 Comparison of non-dimensional volume(V/V_0) at each stroke(mm) for various process conditions (CASE1-CASE5)

Fig. 8은 초기 소재의 체적에 대한 성형품의 체적 비인 무차원 체적을 펀치 스트로크에 따라 각 공정변수조합에 대해 나타낸 도표이다. 성형속도와 초기 고상률이 클수록 그리고 다이반각과 단면적 감소율이 작을수록 액상 유출량이 적어 체적감소가 억제되므로 압출길이가 길게 됨을 알 수 있다.

본 연구의 압출공정 해석상에서는 고상영역을 압축성 다공질체로 가정하였기 때문에 유출된 액상의 해석적 처리가 고려되지 않아 체적 감소가 발생하였다. 그러나 실제 밀폐형 반응용 성형에서는 유출된 액상 공정물도 제품의 표면 및 하부다이에 응고되어 남아있게 되어 충전완료시의 제품체적은 초기 소재의 체적과 동일하다. 따라서 밀폐형 성형공정에서, 고상영역을 압축성 다공질체로 가정함으로써 발생된 소재의 체적감소로 인해 실제에 비해 최종 충진이 지연되었다. 이러한 최종 충전 스트로크의 차이는 열전달에 의한 응고 현상과 유출된 액상의 해석적 처리를 고려한다면 해결될 것으로 사료된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 절차

반응용 재료의 압출공정에 대한 유한요소 해석 결과를 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 소재는 시판되고 있는 난가공성 알루미늄 합금계로 성형성이 가장 불리한 Al-20계열의 Al2024이다. 실험장치는 Fig. 9와 같으며, 압출다이에는 다이반각이 30° 및 45°일 때 각각에 대하여 단면적 감소율을 71.6% 및 88.9%로 제작하였고 그 재질은 SKD61이다. 시판되고 있는 알루미늄 합금으로부터 구상화된 조직을 얻기 위하여 교반 또는 냉간 변형을 가하지 않고 구상화 조직을 얻을 수 있는 방법⁽²⁾

Table 3 Experimental conditions for induction heating

Power	3.7 kW	
Frequency	23.5 kHz	
Coil	Diameter	133.3 mm
	N(turns)	19 turns

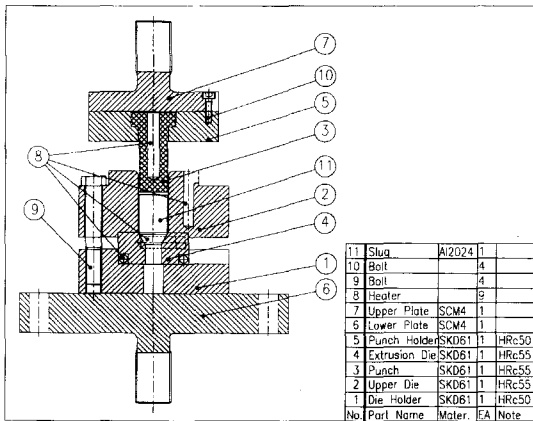
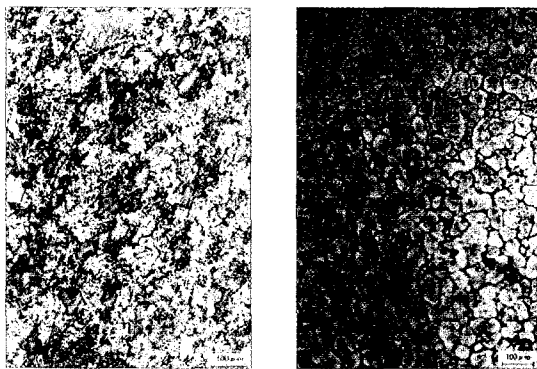


Fig. 9 Die-set for semi-solid extrusion



(a) with original state

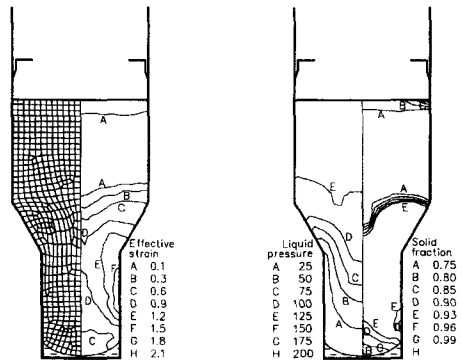
(b) after heating to 622° C

Fig. 10 Microstructures of Al2024 alloy (a) with original state (b) after heating to 622° C

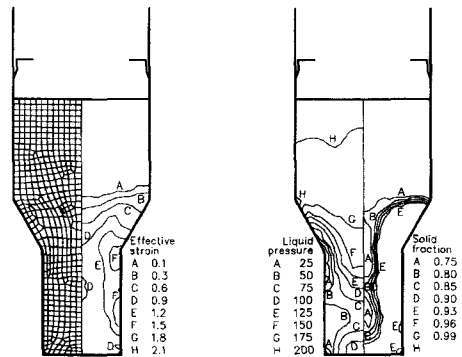
을 이용하여 직경과 높이가 각각 $D=28$ mm, $L=40$ mm인 구상화된 Al2024 소재를 준비하였다. 즉, 실험을 통해 Al2024 소재를 450초간 유도 가열하여 급랭함으로써 Fig. 10(b)와 같이 평균 입자의 크기가 40~50 μ m로 양호한 구상화 조직을 가진 소재를 얻을 수 있었다. 다이 세트는 막대형 히터(cartridge heater)를 사용하여 400°C로 예열하였다. 구상화된 소재를 고상률 70%(622°C)의 온도로 재가열하기 위하여 450초간 유도 가열하였다. 유도가열의 실험조건을 Table 3에 제시하였다. 재가열된 시편을 밀폐 다이 속에 삽입하고 다이반각, 단면적 감소율, 성형속도 등의 공정변수로 구성된 각 공정변수조합에 대하여 실험을 수행하였다.

4.2 실험과 해석 결과의 비교

Fig. 11은 밀폐형 압출실험에서의 충전 스트로크인 19 mm의 스트로크일 때 성형속도가 변형거동에 미치는 영



(a) $V_{die} = 40\text{mm/s}$



(b) $V_{die} = 120\text{mm/s}$

Fig. 11 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction according to ram speed at filling stroke (stroke=19 mm, R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $f_{s0}=0.7$)

향을 파악하기 위하여 램 속도 40 mm/s, 120 mm/s에 대한 해석결과로서 격자의 변형 상태, 유효 변형률, 액상 압력 그리고 고상률 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이, 본 연구의 해석상에서는 고상 영역을 압축성의 다공질체로 가정하였기 때문에 유출된 액상의 해석적 처리를 고려하지 않아 체적 감소가 발생하여 해석상에서는 충전이 완료되지 않는 것이다. 그러나 해석결과에서 미충진된 다이 캐비티(cavity)가 그림의 점선과 같이 응고된 액상으로 충전 된다고 생각할 수 있다. 또한 Fig. 11(b)와 같이 램 속도가 빠른 경우에는 램속도가 느린 Fig. 11(a)의 경우에 비해 유출되는 액상이 상대적으로 작기 때문에 동일한 압출 스트로크에 대해 체적손실이 작아 미충진 영역이 아주 작게 나타남을 볼 수 있다.

Figs. 12와 13은 하부다이가 없는 개방형 압출 공정을 40 mm/s 및 120 mm/s의 성형속도로 19 mm 펀치 스트로크까지 성형했을 때 얻어진 성형품의 단면형상과 위치별 미세조직을 관찰한 것이며, Figs. 14와 15는 하부다이가 있는 밀폐형 압출 공정에서의 단면형상 및 위치별 미세조직을 관찰한 것이다. 성형속도가 40 mm/s인 개방형 압출 공정에 대한 조직사진인 Fig. 12에서 제품의 표면에 액상유출로 인한 편석이 발생하였으나, 실제 압출된 길이

는 Fig. 11(a)의 유한요소 해석결과보다 길다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 압출제 최하단부의 조직을 나타내는 ④에서 처럼 유출된 액상이 제품 표면에 응고되어 남아 있기 때문인 것으로 생각된다. 컨테이너 내부의 ①조직에서는 Fig. 11(b)의 해석결과에서처럼 고상의 조밀화 현상이 발생함을 확인할 수 있었으나 제품의 표면부인 ②와 ③에서는 균열 및 액상 유출에 의해 액상이 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 성형속도가 120 mm/s인 개방형 압출 공정에 대한 조직 사진인 Fig. 13에서는 고속의 성형속도로 인해 40 mm/s의 Fig. 12에 비해 내부의 ①에서는 고상의 조밀화가 억제되고 표면의 ②~④에서는 액상 유출이 억제된다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 해석결과인 Fig. 11과 정성적으로 일치함을 알 수 있다.

밀폐형 압출공정의 부위별 조직사진인 Figs. 14와 15에서는 하부다이하의 접촉에 의한 가압효과로 ①~③의 부위에서 균일한 조밀화가 발생하였음을 알 수 있다. 이로부터 균일한 내부조직을 얻기 위해서는 개방형보다는 밀폐형의 반응용 가공법을 사용해야 할 것으로 생각된다. 하부다이하와 접촉한 ④의 부위는 유출된 액상이 응고되어 남아 있는 편석으로 성형속도가 높을수록 최종 제품의 결함으로 작용될 편석의 양은 적어짐을 확인할 수 있다.

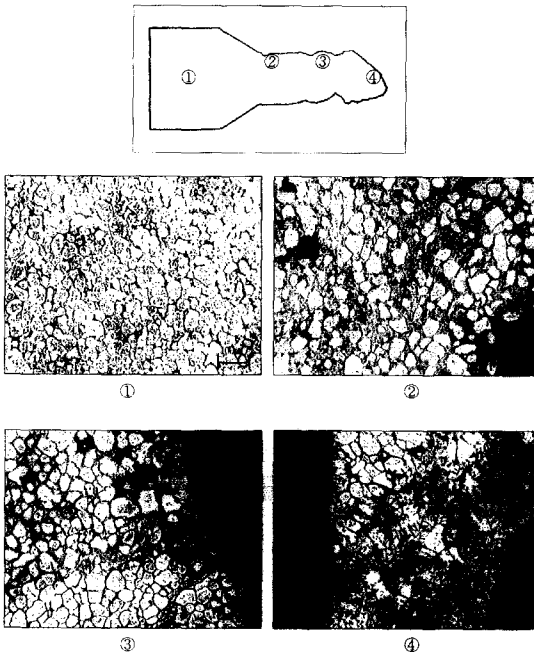


Fig. 12 Microstructures of forward extruded part at indicated positions(R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{dic}=40\text{ mm/s}$, $f_{s0}=0.7$)

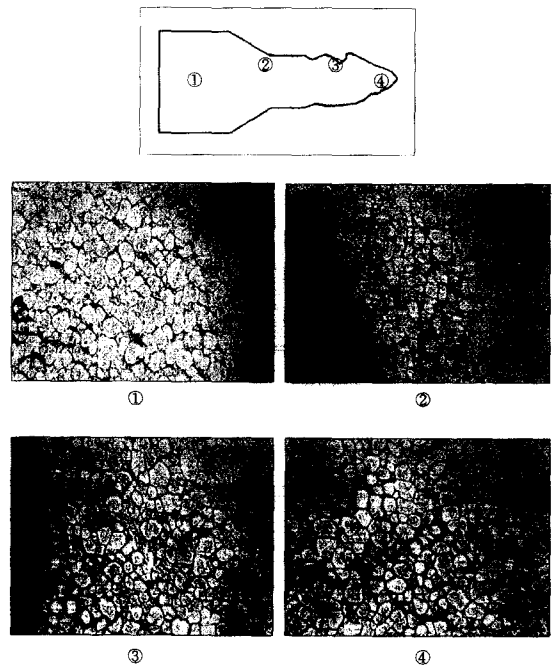


Fig. 13 Microstructures of forward extruded part at indicated positions(R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{dic}=120\text{ mm/s}$, $f_{s0}=0.7$)

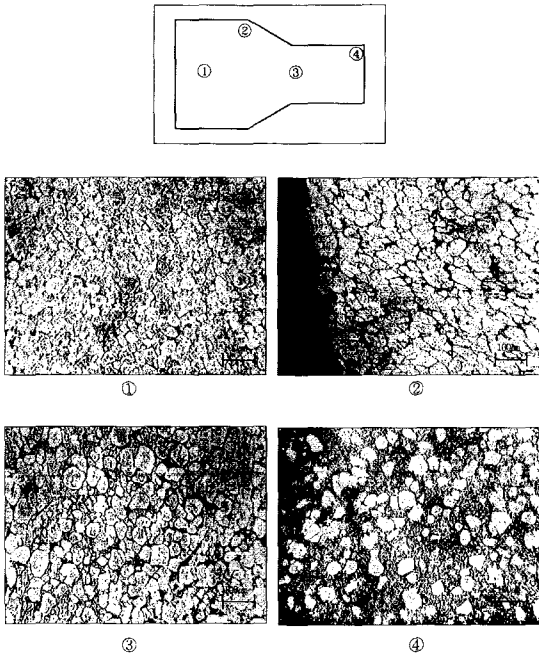


Fig. 14 Microstructures of forged part at indicated positions(R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{die}=40$ mm/s, $f_{s0}=0.7$)

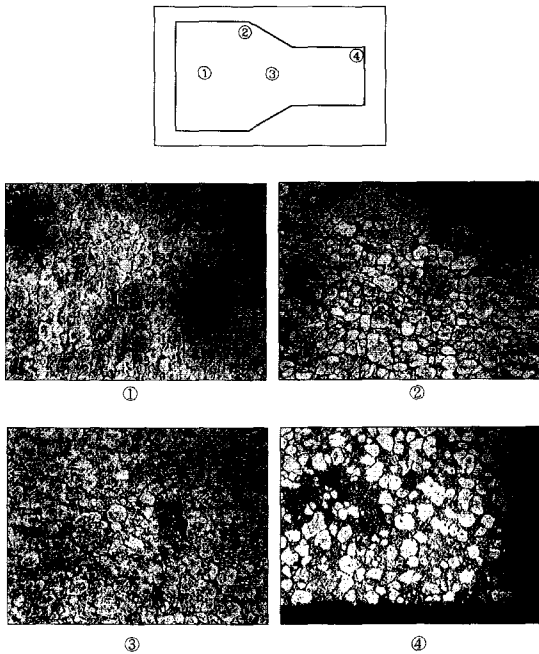


Fig. 15 Microstructures of forged part at indicated positions(R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $V_{die}=120$ mm/s, $f_{s0}=0.7$)

Fig. 16은 밀폐형 반응용 압출공정을 $\alpha=30^\circ$, R.A.=71.6% 및 $f_{s0}=0.7$ 의 동일 조건으로 120 mm/s와 80 mm/s의 성형속도에 대해 유한요소 해석 및 실험을 수행하였을 때 펀치 스트로크에 따른 하중 곡선을 비교한 것이다. 이 그림에서 성형속도가 높은 경우 해석과 실험에서 모두 하중이 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고 해석결과로부터 얻은 하중선도는 120 mm/s와 80 mm/s의 성형속도에 대해 초기 펀치 스트로크에서는 실험결과와 유사하지만 실험에서의 최종 충전 펀치 스트로크 19 mm 이후에도 스트로크가 계속 진행된다. 이는 실험의 경우에

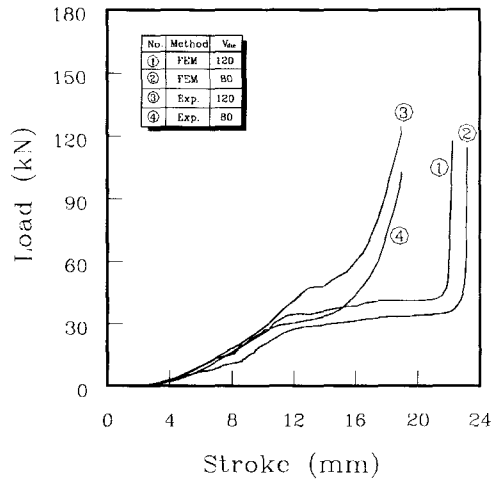


Fig. 16 Load-stroke diagram according to the ram speed (R.A.=71.6%, $\alpha=30^\circ$, $f_{s0}=0.7$)

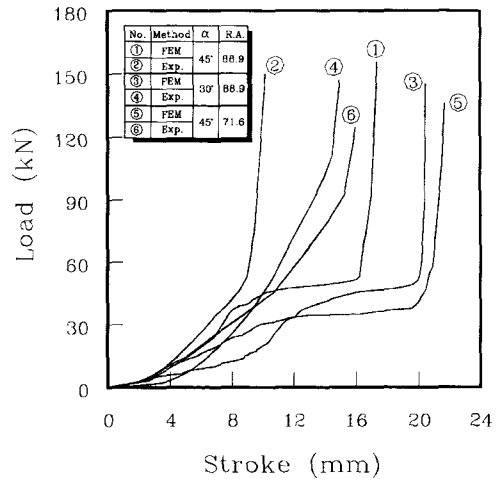


Fig. 17 Load-stroke diagram according to the semi-angle of die and area of reduction($V_{die}=40$ mm/s, $f_{s0}=0.7$)

는 유출된 액상이 소재의 표면 및 하부다이에 응고되어 남아 있게 되기 때문에 체적감소 없이 충전이 이루어지는 반면, 해석에서는 유출된 액상의 해석적인 처리를 고려하지 않아 체적 감소가 발생한 때문이다. 따라서 만약 열전달에 의한 응고 현상과 유출된 액상의 해석적 처리를 고려한다면 해석적 방법에 의해 정성적으로 뿐만 아니라 어느 정도 정량적으로도 밀폐형 압출공정의 하중을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 17은 밀폐형 반응용 압출공정을 $V_{dic}=40$ mm/s 및 $f_{so}=0.7$ 의 동일 조건하에서 다이반각 및 단면적 감소율에 따른 유한요소 해석 및 실험을 수행하였을 때의 성형 하중과 펀치 스트로크의 곡선을 비교한 것이다. 여기에서도 해석결과로부터 그려진 하중선도에서 공정변수조합에 따른 CASE에 대해 실험에서의 충전 스트로크 이후에도 스트로크가 계속 진행되고 있으며, 이것은 Fig. 16의 경우에서와 동일한 이유이다. 또한 이 그림에서 실험과 해석 공히 다이반각과 단면적 감소율이 클수록 동일 스트로크에 대한 하중이 크게 나타났으며 이러한 결과는 실험결과와 해석결과가 정성적으로 일치함을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 제품의 내부조직과 기계적 특성이 균일하여 금후 여러 분야에 적용될 가능성이 있을 뿐만 아니라 개방형 성형공정(단순 업셋팅)과 밀폐형 성형공정(밀폐 압축)의 중간 압축특성을 가지는 반응용 압출공정에 대해 다이반각, 단면감소율, 성형속도 그리고 초기 고상률 등의 공정변수가 반응용 재료의 변형거동 및 성형하중에 미치는 영향을 파악하기 위한 유한요소해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해석으로부터 유효 변형률과 고상률의 분포는 유사한 경향을 가지므로 재료의 변형 정도와 고상률은 밀접한 관계를 가지며 액상압력의 구배가 클수록 고상에 대한 액상의 상대속도가 크게 되어 액상유동과 유출이 심화되고 이로 인해 고상의 조밀화가 촉진되어짐을 확인하였다.

(2) 압출다이의 단면적 감소 부위에서는 전단변형에 의해 유효변형률 및 액상압력구배가 크게되어 조밀화가 크게 발생하며 컨테이너의 내부에서는 밀폐압축에서처럼 상대적으로 유효변형률과 압력구배가 작아 액상유동이 작게 일어나고 이로 인해 이 부위에서 고상률이 낮으며 펀치 접촉부에서는 마찰에 의해 고상의 조밀화가 심화됨을 해석

적으로 확인할 수 있었다.

(3) 다이반각과 단면적 감소율이 클수록 다이로부터 소재에 가해지는 가압력이 커지기 때문에 자유표면으로의 액상유동 및 유출과 소재 내부의 고상 조밀화가 심화되었다.

(4) 성형속도와 초기 고상률이 클수록 액상의 유동이 어려워져 고상에 대한 액상의 상대속도가 작아지게 되고 이로 인해 액상의 유출이 감소함을 확인하였다.

(5) 열전달에 의한 응고현상과 유출된 액상의 해석적 처리를 고려한다면 실제에 더 가까운 밀폐형 성형공정의 해석 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M.Suery and M.C.Flemings, 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behaviour of Semi-Solid Dendritic Alloys", Metallurgical Transactions A, Vol. 13A, pp. 1809~1819.
- (2) 최재찬, 조해용, 민규식, 박형진, 최종용, 1996, "알루미늄 합금의 반응용 단조를 위한 기초 연구", 한국정밀공학회지, 제13권, 제7호, pp. 29~35.
- (3) P.O.Charreyron and M.C.Flemings, 1985, "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.
- (4) L.A.Lalii, 1985, "A Model for Deformation and Segregation of Solid-liquid Mixture", Metallurgical Transactions A, Vol. 16A, pp. 1393~1403.
- (5) S.Toyoshima and Y.Takahashi, 1990, "A Computational Simulation of Forming Processes for noneutectic Materials", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 969~974.
- (6) J.S.Gunasekera, 1992, "Development of A Constitutive Model for Mushy(semi-solid) Materials", Proc. 2nd. Int. Conf. on Processing of

- Semi-Solid Alloys and Composites, pp. 211~222.
- (7) 김기훈, 강충길, 김영도, "응고현상을 고려한 Semi-Solid 재료의 압축공정에 관한 유한요소해석", 대한기계학회 1996년 춘계학술대회논문집(A) pp. 631~646
- (8) 최원도, 고대철, 민규식, 김병민, 최재찬, 1997, "유도가열을 고려한 반응용재료의 성형공정에 관한 유한요소해석", 한국정밀공학회, Vol. 14, No. 8, pp. 82~91.
- (9) M.Flemings, 1974, Solidification Processing, McGraw-Hill(eds), p. 234.
- (10) A.E.Scheidegger, 1974, The Physics of Flow Through Porous Media, 3rd Edition University Toronto Press, p. 150.
- (11) C.C.Chen and S.Kobayashi, 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Applications of Numerical Methods to Forming Process, ASME, A M D , 28, pp. 163~174.
- (12) K.Mori, S.Shima, and K.Osakada, 1980, "Finite Element Method for the Analysis of Plastic Deformation of Porous Metals", Bull. JSME, Vol. 23, No. 178, pp. 516~522.
- (13) W.H.Press et al, 1992, Numerical Recipes in FORTRAN, Cambridge University press(2nd eds), p. 71.
- (14) 오세욱, 김태형, 김병민, 최재찬, 1995, "평금형을 이용한 축대칭 전방압출공정의 파이핑 결함에 관한 유한요소해석", 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 12, pp. 3121~3129.
- (15) T.Z.Kattamis and T.J.Piccone, 1991, "Rheology of Semisolid Al-4.5%Cu-1.5%Mg Alloy", Material Science and Engineering, Vol. 131A, pp. 265~272.