

반용용 재료의 압출공정에 관한 유한요소해석

황재호*, 고대철**, 민규식***, 김병민, 최재찬****

*부산대원, **부산대 기계기술 연구소, ***마산전문대학 자동차과, ****부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터

Finite Element Analysis of Extrusion Process in Semi-Solid State

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

*Graduate School, PNU, **RIMT, PNU, ***Dept. of Automobile Engr., Masan College, ****ERC/NSDM, PNU

Abstract

It is the objective of this study that by conducting the semi-solid extrusion using Al2024, the effect of various process variables on the quality of extruded product and extrusion force is understood. The results of experiment are compared with those of finite element simulation in order to verify the effectiveness of the developed FE-simulation code. In order to simulate densification in the deformation of semi-solid material, the semi-solid material is assumed to be composed of solid region as porous skeleton following compressible visco-plastic model and liquid region following Darcy's equation for the liquid flow saturated in the interstitial space. Then the flow and deformation of the semi-solid alloy are analyzed by coupling the deformation of the porous skeleton and the flow of the eutectic liquid. It is assumed that initial solid fraction is homogeneous. Yield and plastic potential function presented by Kuhn and constitutive model developed by Gunasekera are used for solid skeleton.

Keywords : Semi-Solid Extrusion(반용용 압출), Semi-Solid Material(반용용 재료), Solid Fraction(고상률), Densification(조밀화), Porous Skeleton(다공질체), Compressible Visco-Plastic Model(압축성 점소성 모델),

1. 서론

반용용 성형(semi-solid forming)이란 구상화(globularization)된 입자를 갖는 소재를 고상성분(solid state components)과 액상성분(liquid state components)이 공존하는 반용용 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 생산 비용의 절감을 도모할 수 있으므로 반용용 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Suery 등⁽¹⁾은 반용용 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°C, 가압유지 시간 10초일 때 가장 양호한 제품을 얻을 수 있다고 보고하였다. Charreyron 등⁽³⁾은 상계법으로 낮은 변형률 속도에 대한 반용용 재료의 압축 거동을 압축성 점소성 구성모델로 해석하였으며, 이를 발전시켜 Lalli⁽⁴⁾는 고체 응력과 액상 유압의 합으로 정의되는 평형 방정식과 다공질체를 흐르는 Darcy의 유동 법칙을 이용하여 저속의 변형률속도에 대하여 압축 공정을 슬래브법으로 해석하였다. Toyoshima⁽⁵⁾는 성

형 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 자유 표면에서 액상 유출현상과 크랙이 발생하게 되어 실험과 해석 결과의 차이를 발생시키기 때문에 실제 반응용 성형에서는 밀폐형 성형공정이 주로 수행된다. 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 뿐만아니라, 개방형 성형공정(단순 업셋팅)과 밀폐형 성형공정(밀폐 압축)의 중간 성형 특성을 갖기 때문에 반응용 압출공정을 수행하여 단순 업셋팅에서 얻어진 연구결과들과 비교함으로써 실제 단조공정에 대한 성형 특성도 파악될 수 있다. 특히 이젝터(ejector)를 하부다 이로 사용한다면 실제 단조공정에 가까운 형태의 밀폐형 압출공정을 수행할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 제품의 내부조직과 기계적 특성이 균일하여 금후 여러 분야에 적용될 가능성이 있을 뿐만아니라, 개방형 성형공정과 밀폐형 성형공정의 중간 특성을 가지는 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 파악하고 단순 업셋팅에서 얻어진 연구결과들과 비교함으로써 실제 반응용단조 공정해석에 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⁽⁸⁾이 제시한 항복식을 사용하였으며, 기지합금(base metal)의 물성치와 고상률에 의존하는 유효응력 $\bar{\sigma}$ 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 기하학적인 모델에 따른 상수로 본 연구에서는 반응용 재료에 대해 원통형 고상안에 구형의 액상이 들어있는 기하학적 형상을 사용하며, 이 때의 β 는 1.5의 값을 가진다.

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 고상 다공질체의 속도이다.

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

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

$$x = x_0 (f_L)^2 \quad (5)$$

여기서 x_0 는 초기 투과율의 값이다.

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

$$\frac{\partial U_{Si}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\kappa}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (6)$$

위의 식(1)과 (6)을 유한요소 분할화하면 반응용 재료에 대해 고상의 변형과 액상의 유동이 연계된 전역 유한요소 방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} K_S & K_L \\ L_S & L_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta V_S \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_S \\ Q_L \end{Bmatrix} \quad (7)$$

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

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델링

해석에 사용된 소재는 A12024이며 시편은 반지름 15mm, 높이 40mm의 원통형 빌렛으로 1/2 단면에 대해 축대칭 문제로 모델링하였다. 성형 초기의 소재 고상률 분포는 균일하다고 가정하여 소재 가열시의 불균일한 온도분포와 반응용·소재의 이송 및 성형 중에 발생하는 열전달에 의한 불균일 효과를 무시하였다. 유한요소해석 중에 격자 왜곡이 심화되면 격자 재구성을 수행하였다⁽¹⁰⁾. Fig. 2에 밀폐형 반응용 압출공정의 유한요소해석을 수행하기 위한 초기 격자 시스템과 경계 조건을 나타내었다. A12024의 액상점성이 알려져 있지 않아 본 연구에서는 초기 투과율과 액상점성의 비를 100 [$\text{mm}^2/(\text{MPa} \cdot \text{sec})$]으로 가정하였다. A12024의 유동 응력식은 제시되어 있는 열간 데이터⁽¹¹⁾를 활용하였으며 고상률이 거의 1인 온도 ($T = 500^\circ\text{C}$)에서의 계산되어진 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_b = 66.9 \bar{\epsilon}_b^{0.149} \quad (8)$$

3.2 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 다이반각($30^\circ, 45^\circ$), 단면적 감소율(71.6, 88.9%), 성형속도(40, 120mm/s) 그리고 초기 고상률(0.7, 0.8)등을 압출공정의 공정변수로 설정하였다. 각 공정변수가 반응용 재료의 변형 거동과 성형하중에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공정변수조합을 Table 1과 같이 5가지의 CASE로 분류하였으며 각각의 CASE에 대해서 유한요소해석을 수행하였다.

Figs. 3 ~ 7은 각 공정변수조합에 대해 반응용 압출공정을 유한요소 해석한 결과로 격자의 변형 상태, 유효 변형률, 액상압력 및 고상률 분포를 펀치 스트로크 16mm에 대해 나타내었다. Fig. 3은 CASE 1의 공정변수조합, 즉 다이반각이 30° , 단면적 감소율이 71.6%, 성형속도가 40mm/s 및 초기 고상률이 0.7일 경우에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸 것으로 유효 변형률과 고상률이 유사한 분포를 보이고 있는 데 이로부터 재료의 변형 정도와 고상률이 밀접한 관계를 가짐을 확인할 수 있다. 압출다이 부위에서 액상 압력의 구배가 큼을 알 수 있고 이로인해 다이 부위에서 액상의 유동이 저압 방향으로 심하게 일어남을 예측할 수 있다. 이러한 사실은 이 부위에서 조밀화가 발

생하여 큰 고상률값을 가지는 것으로부터 확인할 수 있다. 반면에 컨테이너의 내부에서는 상대적으로 압력구배가 작아 액상 유동이 작게 일어나므로 이 부위에서 조밀화의 정도가 낮음을 확인할 수 있다. 특히 컨테이너와 압출다이의 경계에서 고상률의 변화가 심하게 일어나는 밴드(band)가 존재함을 알 수 있는데, 이는 이 부위에서 전단 변형이 크게 일어나기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 4는 다이반각이 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 CASE 2의 공정변수조합으로 CASE 1의 공정변수조합 중에서 다이반각을 30°에서 45°로 변화시켰을 때의 유한요소해석 결과이다. 다이반각이 클수록 컨테이너와 압출다이 부분의 유효 변형률, 액상압력 그리고 고상률이 상대적으로 더 큰 값으로 분포하고 반면에 자유표면부에서는 상대적으로 더 작은 값으로 분포함을 확인할 수 있다. 이는 다이반각이 클수록 압출다이라부터 재료에 가해지는 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. 6은 성형속도가 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 CASE 4의 공정변수조합으로 CASE 1의 공정변수조합에서 성형속도를 40mm/s에서 120mm/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. 이와같이 고속일수록 고상의 조밀화가 억제되는 현상은 단순 압축공정을 통해 많이 알려졌다⁽¹⁾. 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 커지게되어 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 16mm 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 투과율값이 작게되어 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. 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 제품 체적은 초기 소재의 체적과 동일하다. 따라서 밀폐형 성형공정에서, 고상영역을 압축성 다공질체로 가정함으로써 발생한 소재의 체적감소로 인해 실제에 비해 최종 충전이 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 A1-20계열의 A12024이다. 압출다이는 다이반각이 30° 및 45° 일 때 각각에 대하여 단면적 감소율을 71.6% 및 88.9%로 제작하였으며 그 재질은 SKD61이다. 시판되고 있는 알루미늄 합금으로부터 구상화된 조직을 얻기 위하여 교반 또는 냉간 변형을 가하지 않고 구상화 조직을 얻을 수 있는 방법⁽⁸⁾을 이용하여 직경과 높이가 각각 D=28 mm, L=40 mm인 구상화된 A12024 소재를 준비하였다. 즉, 실험을 통해 A12024 소재를 450초간 유도가열하여 급냉함으로써 Fig. 9(b)와 같이 평균 입자의 크기가 40~50 μm 로 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 유도가열하였다. 유도가열의 실험조건을 Table 2에 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 및 고찰

Fig. 10은 밀폐형 압출실험에서의 충전 스트로크인 19mm의 스트로크 일 때 성형속도가 변형기동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 램 속도 40mm/s, 120mm/s에 대한 해석결과로, 격자의 변형상태, 유효 변형률, 액상압력 그리고 고상률 분포를 나타낸 것이다. 본 연구의 해석상에서는 고상영역을 압축성의 다공질체로 가정하였기 때문에 유출된 액상의 해석적 처리를 고려하지 않아 체적 감소가 발생하여 해석상에서는 충진이 완료되지 않는었다. 그러나 해석결과에서 미충진된 다이 캐비티(cavity)가 그림의 점선과 같이 응고된 액상으로 충전된다고 생각할 수 있다. Figs. 11과 12는 하부다이가 없는 개방형 압출 공정을 40mm/s 및 120mm/s의 성형속도로 19mm 펀치 스트로크까지 성형했을 때 얻어진 성형품의 단면형상과 위치별 미세조직을 관찰한 것이며, Figs. 13와 14는 하부다이가 있는 밀폐형 압출 공정에서의 단면형상 및 위치별 미세조직을 관찰한 것이다. 성형속도가 40mm/s인 개방형 압출 공정에 대한 조직사진인 Fig. 11에서 제품의 표면에 액상유출로 인한 편석이 발생하였으나, 실제 압출된 길이는 Fig. 10(a)의 유한요소 해석결과보다 길다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 압출재 최하단부의 조직을 나타내는 ④에서 처럼 유출된 액상이 제품 표면에 응고되어 남아 있기 때문인 것으로 생각된다. 컨테이너 내부의 ①조직에서는 Fig. 10(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 120mm/s인 개방형 압출공정에 대한 조직 사진인 Fig. 12에서는 고속의 성형속도로 인해 40mm/s의 Fig. 11에 비해 내부의 ①에서는 고상의 조밀화가 억제되고 표면의 ②~④에서는 액상 유출이 억제된다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 해석결과인 Fig. 10과 정성적으로 일치함을 알 수 있다. 또한 밀폐형 압출공정의 부위별 조직사진인 Figs. 13과 14에서는 하부다이와의 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. 하부다이와 접촉한 ④의 부위는 유출된 액상이 응고되어 남아 있는 편석으로 성형속도가 높을수록 최종 제품의 결함으로 작용될 편석의 양은 적어 짐을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 밀폐형 반응용 압출공정을 $\alpha = 30^\circ$, R.A. = 71.6% 및 $f_{50} = 0.7$ 의 동일 조건으로 120mm/s와 80mm/s의 성형속도에 대해 유한요소 해석 및 실험을 수행하였을 때 펀치 스트로크에 따른 하중 곡선을 비교한 것이다. 이 그림에서 성형속도가 높은 경우 해석과 실험에서 공히 하중이 높게 됨을 알 수 있다. 그리고 해석결과로부터 그려진 하중선도는 120mm/s와 80mm/s의 성형속도에 대해 각각 a, b점(●)으로 표시되어진 실험에서의 최종 충전 펀치 스트로크 19mm 이후에도 스트로크가 계속 진행된다. 이는 실험의 경우에는 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 뿐만아니라 어느 정도 정량적으로도 밀폐형 압출공정의 하중을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 16는 밀폐형 반응용 압출공정을 $V_{die}=40\text{mm/s}$ 및 $f_{s0}=0.7$ 의 동일 조건하에서 다이반각 및 단면적 감소율에 따른 유한요소 해석 및 실험을 수행하였을 때의 성형하중과 편치 스트로크의 곡선을 비교한 것이다. 여기에서도 해석결과로부터 그려진 하중선도에서 공정변수조합에 따른 CASE에 대해 각각 a, b, c점(●)으로 표시되어진 실험에서의 충전 스트로크 이후에도 스트로크가 계속 진행되고 있으며, 이것은 Fig. 15의 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 뿐만아니라 개방형 성형공정(단순 업셋팅)과 밀폐형 성형공정(밀폐 압축)의 중간 특성을 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 고상률이 밀접한 관계를 가짐을 확인하였다.
- (2) 성형속도와 초기 고상률이 클수록 그리고 다이반각과 단면적 감소율이 작을수록 액상 유출량이 감소함을 확인하였다.
- (3) 반응용 재료의 고상영역을 압축성 다공질체로 가정하여 액상의 거시적 편석을 해석적으로 고려하였으나, 성형 중 체적 손실의 발생으로 인해 밀폐형 성형공정에서 다이 캐비티의 충전이 지연됨으로써 성형 마지막 단계의 하중에서 실험과 다소 차이를 나타내었다.
- (4) 열전달에 의한 응고현상과 유출된 액상의 해석적 처리를 고려한다면 실제에 더 가까운 밀폐형 성형공정의 해석 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) M.Suery and M.C.Flemings, "Effect of Strain Rate on Deformation Behaviour of Semi-Solid Dendritic Alloys", *Met. Trans.*, Vol. 13A, pp. 1809-1819, 1982
- (2) 최재찬, 조해용, 민규식, 박형진, 최종용. "알루미늄 합금의 반응용 단조를 위한 기초 연구", *한국정밀공학회지*, 제13권, 제7호, pp. 29-35, 1996.
- (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.Lalii, "A Model for Deformation and Segregation of Solid-liquid Mixture", *Met. Trans.*, Vol. 16A, pp. 1393-1403, 1985
- (5) S.Toyoshima and Y.Takahashi, "A Computational Simulation of Forming Processes for noneutectic Materials", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, pp. 969-974, 1990
- (6) J.S.Gunasekera, "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, 1992
- (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, "유도가열을 고려한 반응용재료의 성형공정에 관한 유한요소해석", 한국정밀공학회, Vol. 14, No. 8, pp. 82-91, 1997
- (9) M.Flemings, *Solidification Processing*, McGraw-Hill(eds), p. 234, 1974
- (10) 오세욱, 김태형, 김병민, 최재찬, "평금형을 이용한 축대칭 전방압출공정의 파이핑 결함에 관한 유한요소해석", 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 12, pp. 3121-3129, 1995
- (11) J.P.Tang and W.T.Wu, *DEFORM 2D User's Manual Ver. 4.0*, SFTC, USA,1994

Table 1 Classification of extrusion process conditions for computation

No. of CASE	Semi-die angle(°)	Reduction of 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

Table 2 Experimental conditions for induction heating

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

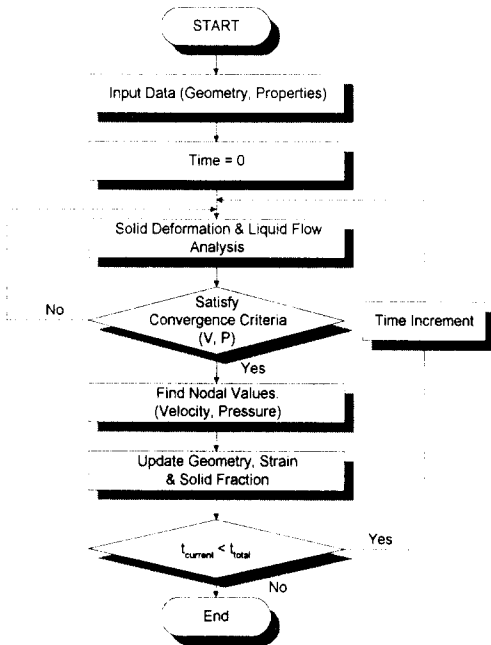


Fig. 1 Procedure of finite element analysis

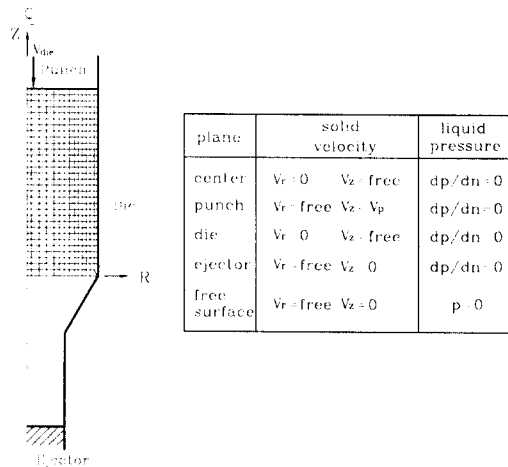


Fig. 2 Model for FE-analysis and boundary conditions

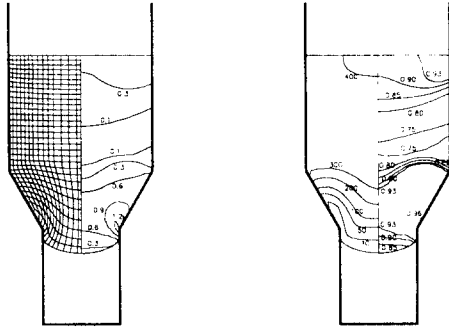


Fig. 3 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 1 at 16mm stroke.
(R.A.=71.6%, $\alpha = 30^\circ$, $V_{die}=40\text{mm/s}$, $f_{s0}=0.7$)

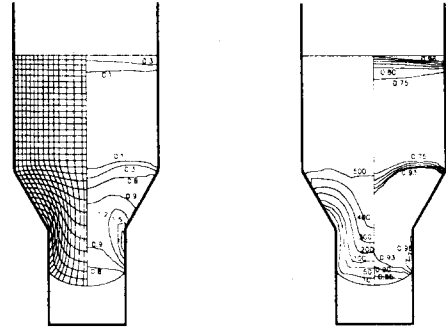


Fig. 6 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 4 at 16mm stroke.
(R.A.=71.6%, $\alpha = 30^\circ$, $V_{die}=120\text{mm/s}$, $f_{s0}=0.7$)

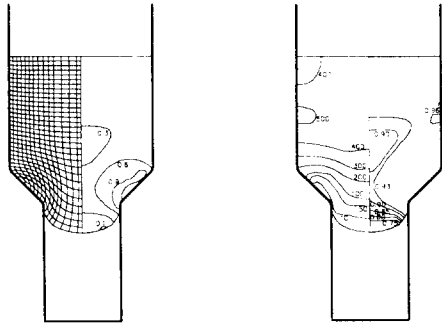


Fig. 4 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 2 at 16mm stroke.
(R.A.=71.6%, $\alpha = 45^\circ$, $V_{die}=40\text{mm/s}$, $f_{s0}=0.7$)

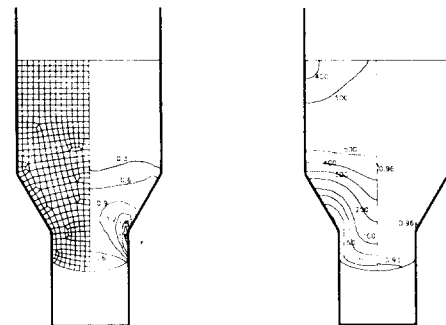


Fig. 7 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 5 at 16mm stroke.
(R.A.=71.6%, $\alpha = 30^\circ$, $V_{die}=40\text{mm/s}$, $f_{s0}=0.8$)

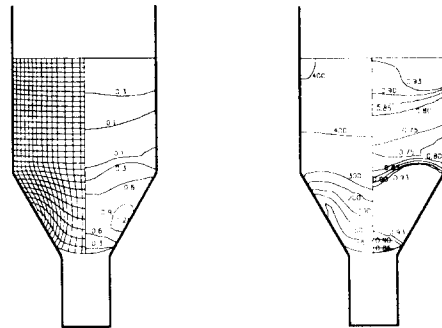


Fig. 5 Deformed mesh and distributions of effective strain, liquid pressure(MPa) and solid fraction of CASE 3 at 16mm stroke.
(R.A.=88.9%, $\alpha = 30^\circ$, $V_{die}=40\text{mm/s}$, $f_{s0}=0.7$)

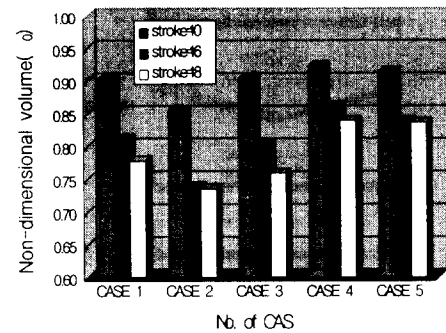
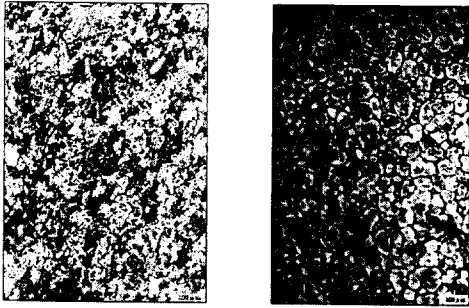
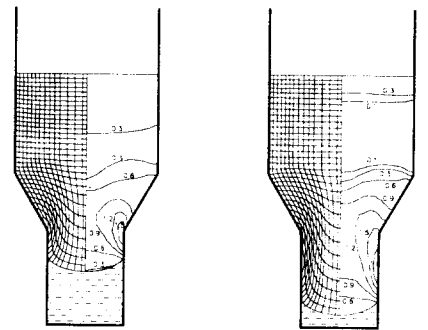


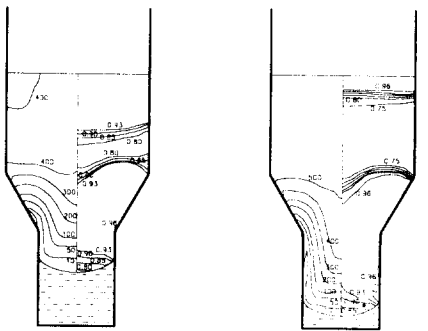
Fig. 8 Comparison of non-dimensional volume (V/V_0) at each stroke for various process conditions(CASE 1 ~ CASE 5)



(a) (b)
 Fig. 9 Microstructures of Al2024 alloy (a) in original state; (b) after heating to 622°C



($V_{die} = 40\text{mm/s}$) ($V_{die} = 120\text{mm/s}$)
 (a) deformed mesh and effective strain



($V_{die} = 40\text{mm/s}$) ($V_{die} = 120\text{mm/s}$)
 (b) liquid pressure(MPa) and solid fraction

Fig. 10 Analytical results of various ram speed at filling stroke (stroke=19mm, R.A.=71.6%, $\alpha = 30^\circ$, $m_f=0.3$, $f_{s0}=0.8$)

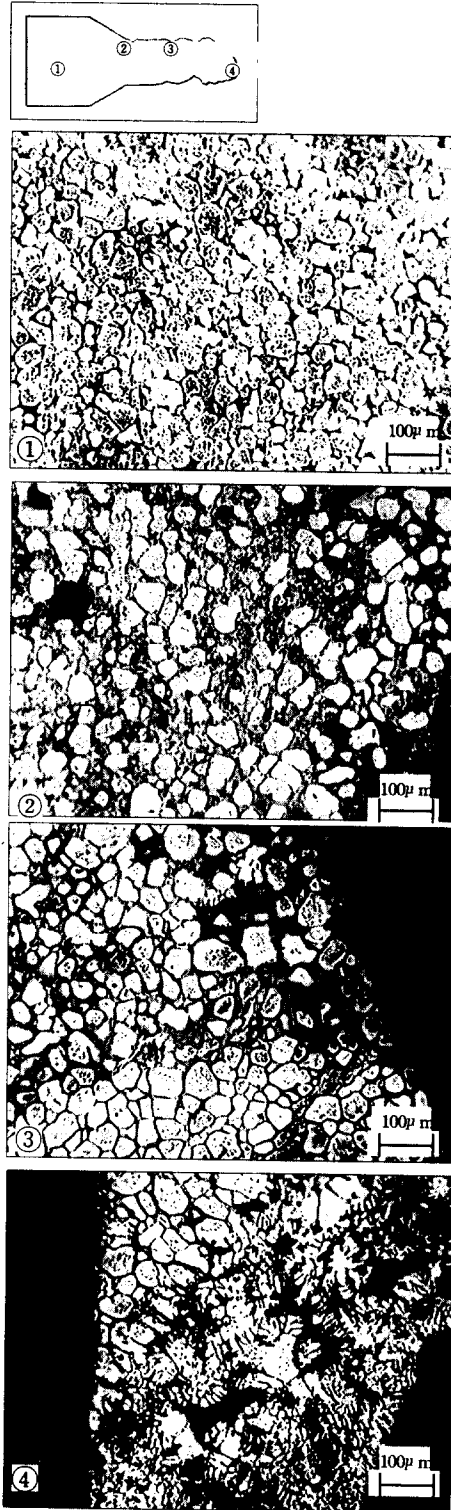


Fig. 11 Microstructures of extruded part ($V_{die}=40\text{mm/sec}$)

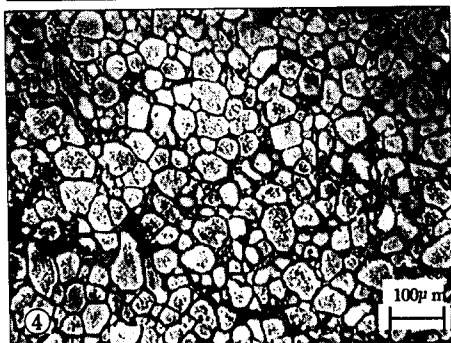
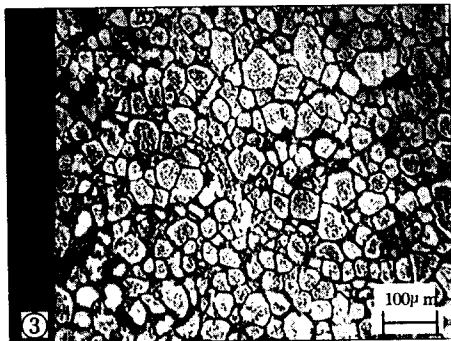
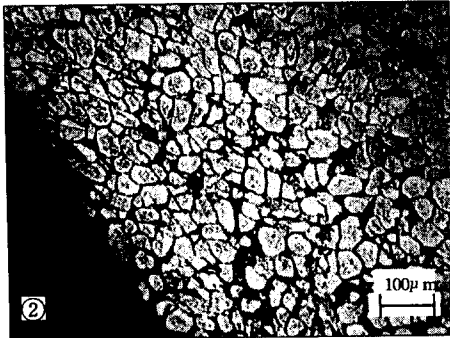
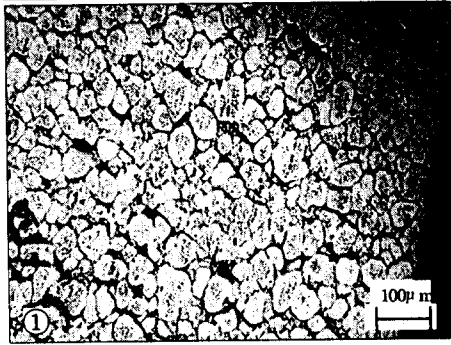
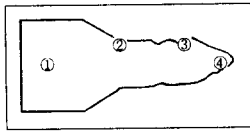


Fig. 12 Microstructures of extruded part
($V_{die}=120\text{mm/sec}$)

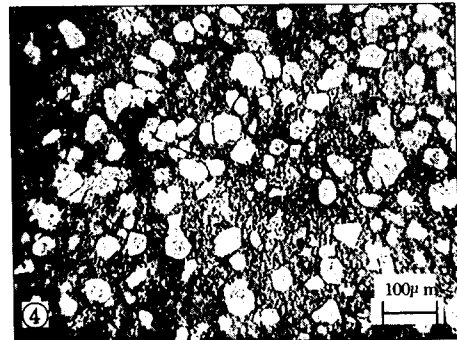
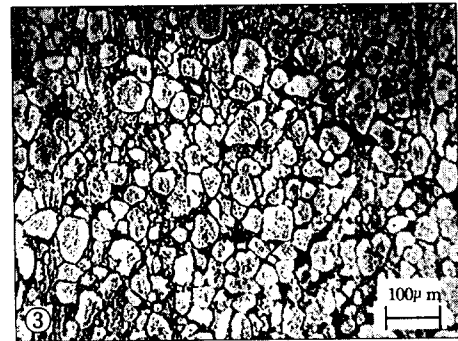
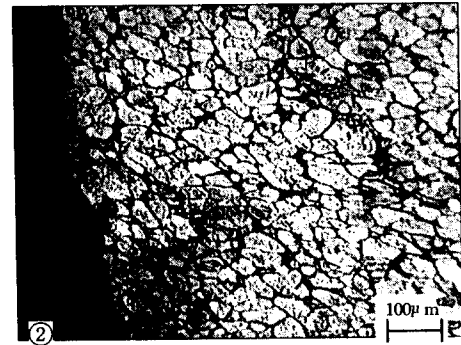
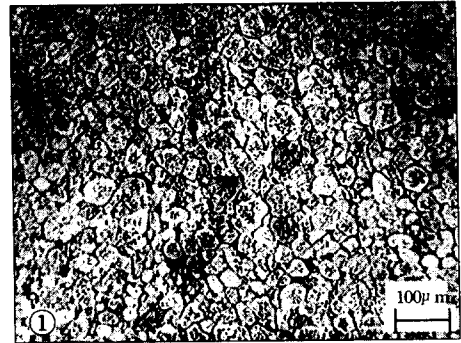
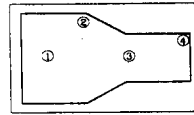


Fig. 13 Microstructures of forged part
($V_{die}=40\text{mm/sec}$)

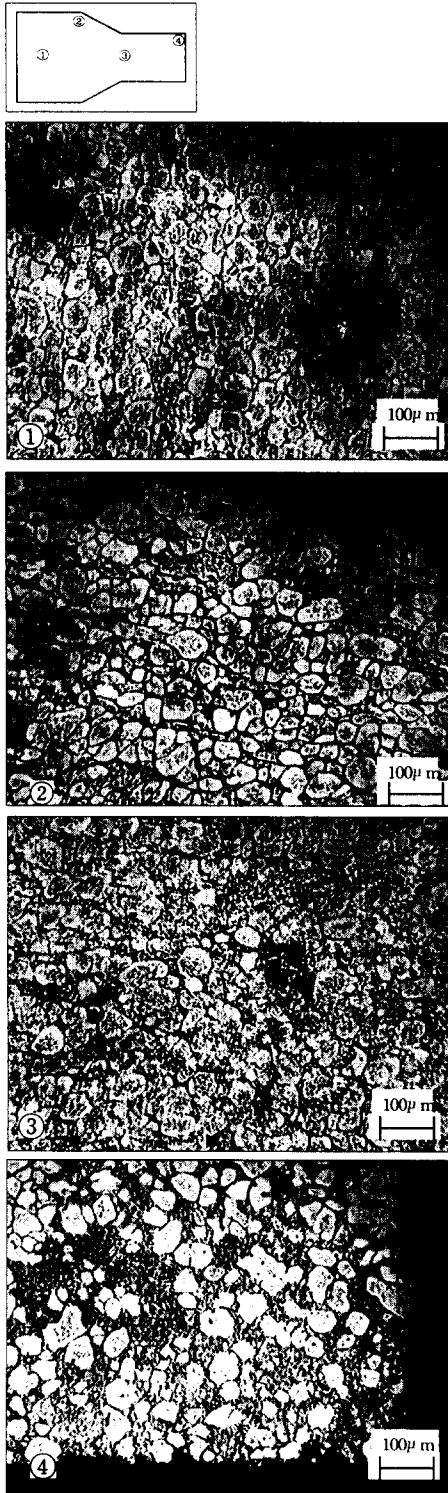


Fig. 14 Microstructures of forged part ($V_{die}=120\text{mm/sec}$)

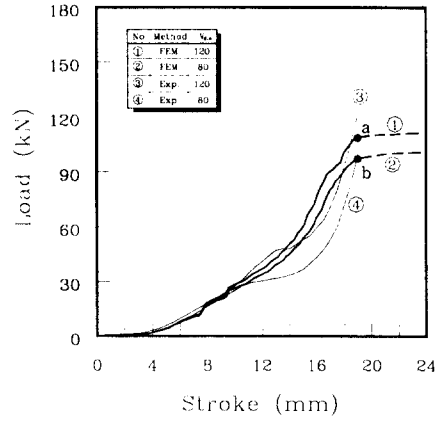


Fig. 15 Load-stroke diagram according to the ram speed (semi-angle of die : 30° , reduction area : 71.6%)

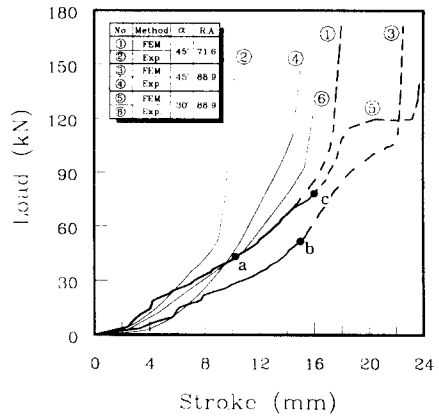


Fig. 16 Load-stroke diagram according to semi-angle of die and reduction of area ($V_{die} = 40\text{mm/sec}$)