

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

유도가열을 고려한 반용융 재료의 성형공정에 관한 유한요소 해석

최원도*, 고대철**, 민규식***, 김병민****, 최재찬*****

Finite Element Analysis for Forming Process of Semi-Solid Material Considering Induction Heating

Won-Do Choi*, Dae-Cheol Ko**, Gyu-Sik Min***, Byung-Min Kim**** and Jae-Chan Choi*****

ABSTRACT

The major objective of this study is to establish analytical technique in order to analyze the behaviour of semi-solid material considering induction heating of the billet. Induction heating process is analyzed by using commercial finite element software, ANSYS. The finite element program, SFAC2D, for the simulation of deformation in semi-solid state is developed in the present study. The semi-solid behaviour is described by a viscoplastic model for the solid phase, and by the Darcy's law for the liquid flow. Simple compression and closed-die compression process considering induction heating are analyzed, and also it is found that the distribution of initial solid fraction of the billet has an important effect on deformation behaviour of semi-solid material. In order to verify the effectiveness of proposed analytical technique the simulation result is compared with experimental result.

Key Words: Semi-Solid Material(반용융 재료), Induction Heating(유도 가열), Viscoplastic Model(점소성 모델), Darcy's Law(Darcy의 유동법칙), Simple Compression Process(단순 압축공정), Closed-Die Compression Process(밀폐 압축공정)

1. 서론

반용융 가공이란 소재를 고상 성분과 액상 성분이 공존하는 상태까지 가열하여 반용융 상태(semi-solid state)에서 성형하는 방법으로 단조공정에 비해 기계적 성질은 떨어지나 변형 저항이 낮으므로 작은 하중으로 성형이 가

능하며 유동성이 양호하여 형상이 복잡한 난가공재의 부품 제작이 용이하고 단 공정으로 정형 가공이 가능하다. 또한 다이캐스팅이나 주조에 비해 구상화된 미세한 결정 조직을 균질하게 얻을 수 있으므로 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 이와 같은 장점을 지닌 반용융 가공은 다이캐비티의 예열 및 소재의 가열과 같은 열처리 과정, 성형

* (주) 현대자동차
 ** 부산대학교 기계기술 연구소
 *** 마산전문대학 자동차과
 **** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

과정과 가압 및 응고 과정으로 구성되어 있으며, 이러한 일련의 과정이 짧은 주기를 가지고 이루어지므로 각 과정 별로 밀접한 관계를 맺고 있다. 따라서 실험을 통해 각 과정의 영향을 정량적으로 파악하기 어려우므로 이에 대한 해석적인 연구의 확립이 필요한 실정이다.

Tim 등⁽¹⁾은 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 균일한 고상률 분포를 얻기 위해 일반적으로 널리 사용되는 비단열 개방상태의 유도로서 고상률의 분포는 16%미만의 편차가 발생하지만 단열 밀폐상태의 유도로서 가열하였을 때 5%미만으로 줄일 수 있음을 제시하였다. Toyoshima 등^(2,3)은 반응용 재료의 단순 압축, 필터링(filtering) 및 압연 공정을 압축성 점소성 모델 및 Darcy의 유동법칙으로 수식화하고 고상의 변형과 액상의 유동을 Sn-15%Pb에 대해 다이 속도 및 투과율(permeability)이 변형에 미치는 영향을 해석하였다. Sn-Pb에 대한 압축공정에서 마찰의 증가에 의하여 반경방향으로 액체의 거시적 분리(liquid segregation)가 증가하며, 동시에 변형률이 증가함에 따라 중심에서 고상률이 높고 반경방향으로는 낮아짐을 Pinsky 등⁽⁴⁾은 실험을 통해 발견하였다. 이상에서 언급된 지금까지의 연구결과들은 열처리 과정, 성형 과정과 가압 및 응고 과정으로 이루어지는 반응용 가공에서 각 공정이 갖는 상호간의 밀접한 관계를 고려하지 못함으로써 만족스러운 결과를 얻을 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 가열과정에서 발생하는 불균일한 고상률의 분포가 반응용 재료의 성형공정에 미치는 영향을 파악하고, 가열해석과 성형해석을 연계한 반응용 재료의 성형공정에 대한 해석절차를 정립하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 가열해석을 수행하였다. 가열해석은 유도가열방식에 대해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며, 이로부터 성형해석을 위한 초기 고상률의 분포를 구하였다. 또한 반응용 재료의 성형해석을 위하여 반응용 재료를 강-점소성 거동을 하는 고상영역과 Darcy의 다공질체에 대한 유동법칙을 따르는 액상영역이 공존하는 재료로서 모델링하여 반응용 재료의 변형거동 및 성형하중을 예측하기 위한 유한요소 프로그램(SFAC2D: Semi-solid Forming Analysis Code 2D)을 개발하였다. 본 연구에서 제시된 해석절차의 타당성을 검증하기 위하여 유도가열을 고려한 단순 압축공정을 해석하였다. 또한 저속으로 단순 압축할 경우 액상의 거시적 분리 및 자유표면의 크랙(free surface crack)이 일어나 대부분의 해석과 실험의 차이를 발생시키므로 자유표면의 크랙 발생에 대한 영향이 작고 실제 단조공정에

가까운 밀폐 다이를 이용하여 유도가열을 고려한 압축공정의 유한요소 해석을 수행하고 이를 실험과 비교해 보았다.

2. 유한요소 해석 및 검증

2.1 유도가열의 유한요소 해석 절차

유도가열 해석을 위해 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며, 해석 절차는 모델링 과정, 전자기장 해석(electromagnetic field analysis)과 온도 해석(thermal analysis)을 수행하는 해석 과정과 구해진 온도분포로부터 소재의 고상률 분포를 계산하는 과정으로 구성되어진다. 이 때 온도의 함수로 정의되는 재료 물성치를 고려하기 위하여 ANSYS Parametric Design Language⁽⁵⁾를 사용하였으며, 이 때 재료는 등방성 재료로 가정하였다.

2.2 반응용 재료에 대한 유한요소 수식화

반응용 재료를 강-점소성 변형하는 고상영역과 다공질체를 유동하는 액상영역으로 나누면 반응용 재료 전체에 작용하는 응력은 고상영역에 작용하는 응력과 액상영역에 작용하는 압력의 합으로 표현할 수 있으며, 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. 그리고 고상영역의 변형에 대한 항복식으로 압축성 재료에 대해 Kuhn⁽⁶⁾이 제시한 항복식을 사용하였으며, 금형과 소재 접촉면의 마찰을 고려하기 위하여 Chen 등⁽⁷⁾이 제안한 식을 이용하였다. 또한 액상영역에 대한 지배방정식은 식(2)와 같이 다공질체를 통한 유체 유동법칙인 Darcy의 유동법칙으로 표현할 수 있으며, 이 때 연속방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{Li} \cdot f_L = \frac{k}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{U}_s + \bar{\nabla} \cdot (f_L \bar{U}_L) = 0 \quad (3)$$

$$\bar{\nabla} = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y}$$

따라서 위의 식(1)~식(3)을 유한요소 분할화하면 다음과 같은 유한요소 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} K_s & K_L \\ L_s & L_L \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta V_s \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ Q_L \end{Bmatrix} \quad (4)$$

2.3 유도가열 해석절차의 검증

상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용한 유도가열 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 1과 같이 Wang⁽⁶⁾의 유한요소 해석결과와 비교하였다. 해석에 사용된 소재는 AISI 1080이다. Wang이 직경(D)이 40mm이고 직경 대 높이비(L/D)가 무한대인 원통형 빌렛을 사용한 반면, 본 연구에서는 이를 고려하기 위하여 D=40mm, L/D=8인 실린더를 모델링하였다. 단면이 4×4mm²인 단선 코일을 사용하였으며 입력 주파수(frequency)와 전류밀도(current density)는 각각 60Hz, 7×10⁹Amp/mm²이다. 또한 대류에 의한 열손실은 무시하였다.

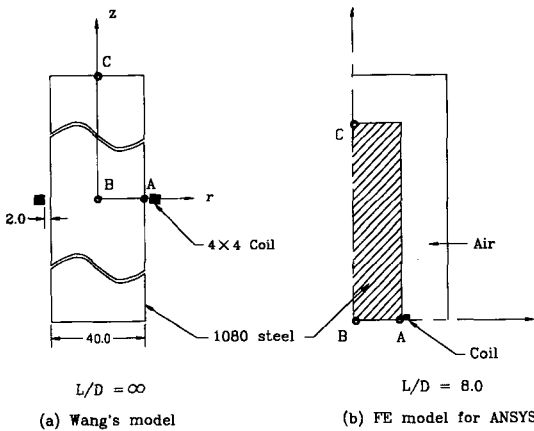


Fig. 1 Induction heating

Fig. 1에 나타난 점 A, B, C에 대한 온도 변화를 Fig. 2에 Wang의 결과와 본 연구의 해석결과를 비교하여 나타내었다. 점 A, B에 대한 온도의 변화로부터 Wang의 결과와 본 연구의 결과가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 AISI 1080의 Curie's temperature인 725°C이후부터 다소 차이가 발생함을 볼 수 있으며, 이러한 차이는 Wang이 실험으로 다상에 대한 물성치를 결정하여 사용한 반면 본 연구에서는 단상의 평균적인 값⁽⁹⁾을 사용하였기 때문이라고 생각된다. 점 C에 대한 온도변화의 차이는 Wang이 무한히 긴 실린더(L/D=∞)를 사용한 반면 본 연구에서는 L/D=8인 실린더를 모델링하였기 때문에 기인한 결과라 생각된다.

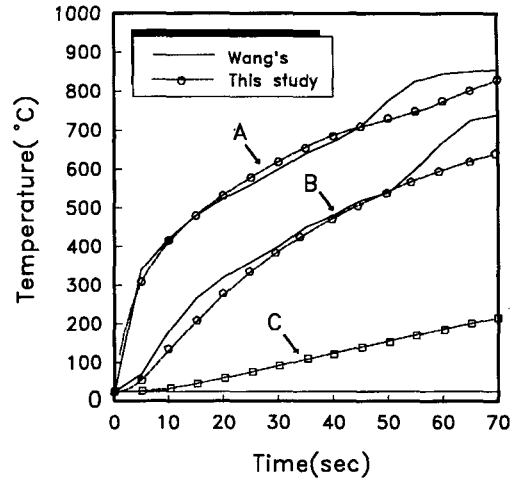


Fig. 2 Comparison between Wang's results and the results of this study about temperature histories at three points during induction heating

2.4 성형해석 절차의 검증

반용융 재료의 변형거동을 해석하기 위해 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 이를 검증하기 위하여 Toyoshima⁽⁷⁾ 등의 해석결과와 비교하였다. Toyoshima는 단순 압축공정에 대해 최대칭인 시편의 1/4단면을 모델링하고 초기 고상률이 0.63(T=184°C)인 Sn-15%Pb에 대해 다이 속도가 0.1, 0.3mm/sec이고 마찰상수가 0.3일 때 고상률의 분포 및 하중을 수치해석하였다. Fig. 3은 실린

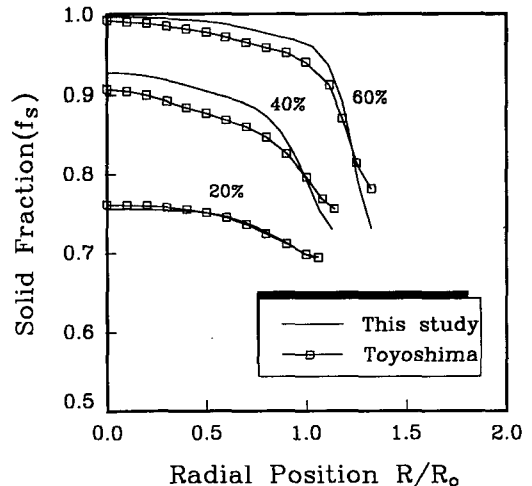


Fig. 3 Variation of solid fraction at radial position

더형 소재의 높이 감소율의 변화에 따라 중심에서 원주방향으로 고상률의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 4는 높이 감소율의 변화에 따른 다이면에 작용하는 압력의 변화를 나타낸 것으로 Toyoshima의 결과와 본 연구에서 개발한 프로그램에 의한 해석결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 약간의 차이는 상호간의 마찰모델의 차이에서 비롯된 것으로 생각된다.

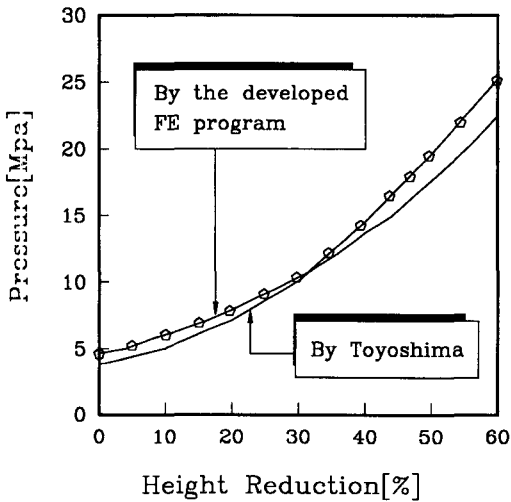


Fig. 4 Load-stroke diagram

3. 유도가열을 고려한 단순 압축공정의 해석

본 연구에서는 이상에서 검증된 해석 절차에 따라 A356 재료에 대해 ANSYS를 이용한 유도가열과정의 해석결과로부터 초기 고상률의 분포를 구한 후, 이를 개발된 프로그램에 의한 성형해석과 연계하여 단순 압축공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 이러한 해석 결과를 초기 고상률의 분포가 균일하다고 가정할 경우와 비교해 보았다.

유도가열 해석에서는 Fig. 5와 같이 D=30mm, L=30mm인 소재의 1/4 단면에 대해 축대칭 문제로 모델링하였으며, 평균 내경이 48mm이고 4×4mm인 단면의 코일을 사용하였다. A356 재료에 대한 물성치는 온도의 함수로 정의되며, PECHINEY-CRV로부터 제공받았다. 공기의 투자율은 $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/m이며, A356 재료의 상대 투자율은 전 온도범위에서 1로 정의하였다. 코일에 입력되는 주파수와 전류밀도는 각각 60Hz, 7×10^9 Amp/mm²이다. 대류 현상을 고려하기 위해 대류 열전달 계수를 30

W/mm²로 하였다. 그리고 Fig. 5에 나타난 점 A의 온도가 고상률 70%에 도달하는 온도까지 가열한 후, 온도 분포 및 고상률 분포를 구하였다. 유도가열 해석으로부터 구한 소재의 초기 고상률 분포를 이용하여 본 연구에서 개발한 프로그램으로 펀치 속도 0.3mm/sec, 마찰상수 0.3인 단순 압축공정에 대하여 성형해석을 수행하고 고상률이 일정하다고 가정한 경우($f_s=0.7$)에 대한 해석결과와 비교하였다. 변형동안의 온도변화에 의한 응고현상(solidification phenomenon)은 고려하지 않았다. 기타 해석에 이용된 재료 물성치는 Table 1과 같다.

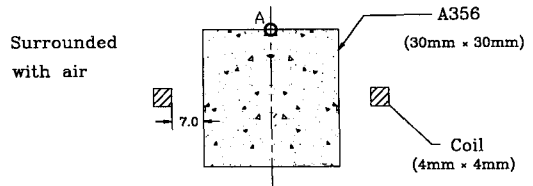


Fig. 5 Model for induction heating of A356

Table 1 Material properties of A356

응력-변형률속도 관계식	$\sigma_0 = 24.43 \epsilon^{-0.23}$
초기 투과율과 점성계수의 비	$k_0 / \mu_L = 6.95 \times 10^5$ [mm ² /MPa·sec]
액상의 점성계수	$\mu_L = 0.17$ [cP]
투과율과 고상율 관계식	$k = k_0 \cdot f_L^2$
초기 고상률	$f_s = 0.7$
마찰 상수	$m = 0.3$

Fig. 6(a)는 350초간 유도가열 후 기준점 A의 고상률이 70%에 도달하였을 때의 소재의 온도 분포와 고상률의 분포를 나타낸 것이다. 이 때 기준점 A의 온도는 약 573℃이며, 약 576℃의 최고온도는 벽면으로부터 약 5mm주위에 나타났다. 이는 전자기파의 침투깊이에 의하여 표면보다 아래에서 활발한 열생성이 일어나기 때문이다.

또한 대류 열손실이 고려되었으므로 시편의 모서리 부분에서는 온도가 낮음(edge effect)을 볼 수 있다. 이상과 같이 유도가열 후 온도분포는 불균일한 분포를 보였으

며, 이로부터 성형해석을 위한 초기 고상률의 분포를 구하였다. 본 연구에서 고려한 소재는 비교적 형상이 단순하며 크기가 작은 소재이므로 유도가열 후 온도의 편차가 작게 나타났으나 소재의 크기가 커지고 복잡한 형상을 가진다면, 유도가열 후의 온도 분포 및 고상률 분포는 이와 비례하여 불균일하게 나타날 것임을 예상할 수 있다.

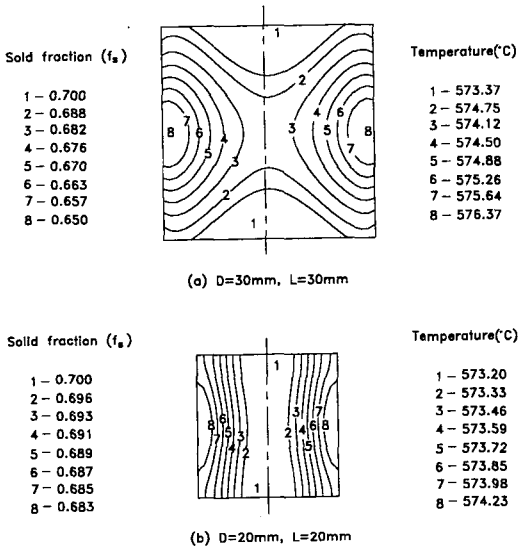


Fig. 6 Distribution of temperature and solid fraction

유도가열 해석으로부터 구한 초기 고상률의 분포를 이용하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 단순 압축공정의 해석을 수행하였다. 단순 압축공정의 해석에서 높이 감소율의 증가에 따라 변화된 형상과 고상영역의 속도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 높이 감소율이 증가함에 따라 고상영역의 속도가 증가함을 볼 수 있다. 다이 접촉면에서 반경방향으로의 속도성분은 거의 나타나지 않지만 높이 감소율이 증가하면서 두드러진 변화를 보였다. 이러한 현상은 Pinsky⁽⁴⁾의 실험에서와 같이 마찰로 인하여 반응용재료의 고상영역에 대한 반경방향으로의 미끄러짐이 억제되기 때문이다. Fig. 8은 높이 감소율의 증가에 따라 유효 변형률과 고상률 분포의 변화를 나타낸 것이다. 유효 변형률이 증가함에 따라 고상률이 증가함을 볼 수 있다. 따라서 변형률과 고상률의 분포는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 유도가열 해석의 결과로부터 얻은 기준점의 초기 고상률이 70%로 고상률이 불균일하게 분포하는 경

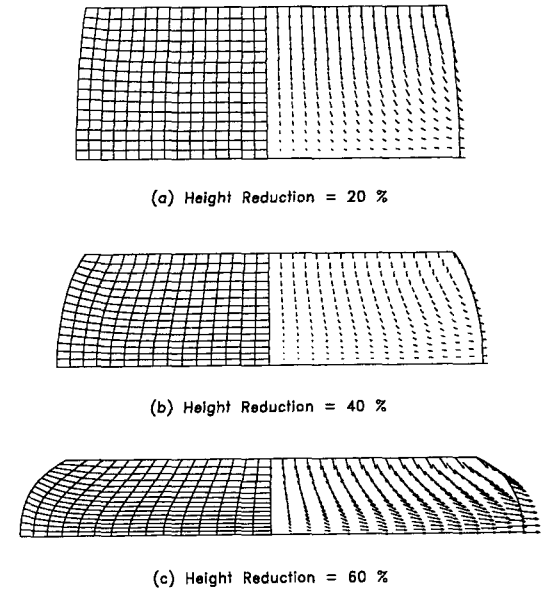


Fig. 7 Deformed mesh and distribution of solid velocity in simple compression

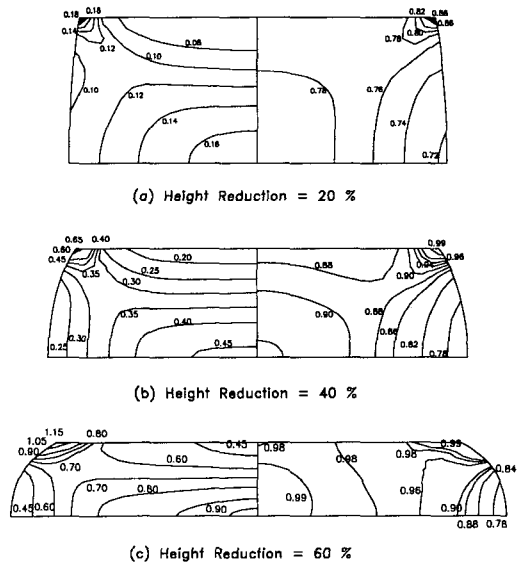


Fig. 8 Distribution of effective strain and solid fraction in simple compression

우와 초기 고상률이 70%로 균일한 경우에 대한 해석결과로서 높이감소율이 20, 40, 60%일 때 소재 단면에 대해 중심부를 a-a, 금형 접촉부를 c-c, 중심부와 접촉부의 중간 위치를 b-b라 정하여 높이 감소율의 변화에 따른 반

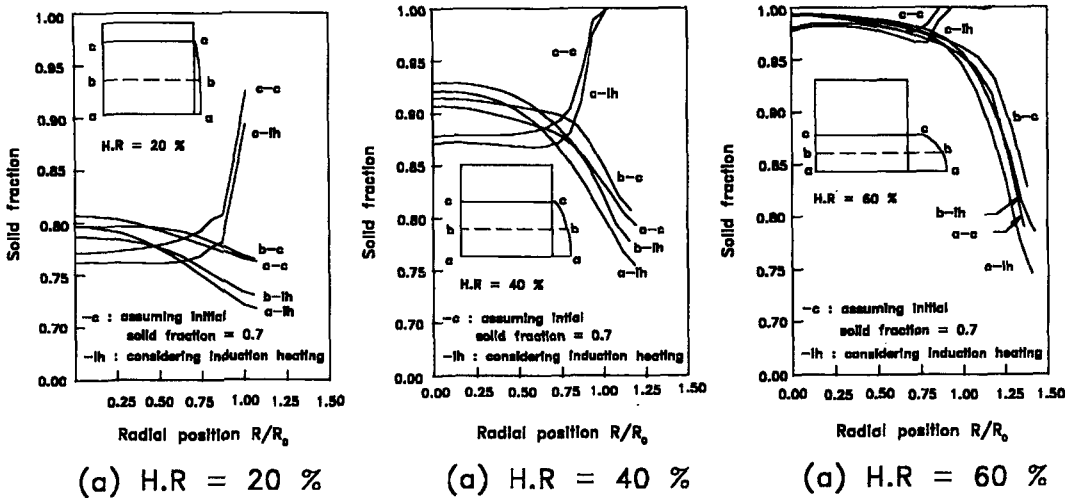


Fig. 9 Variation of solid fraction at radial position in simple compression

경 방향으로 고상률의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 고상률이 불균일한 경우와 균일한 경우 모두 높이가 감소율이 증가함에 따라 전체적으로 고상률이 증가함을 볼 수 있으며, 소재 내부에서는 중심부 a-a의 고상률이 금형 접촉부 c-c보다 높으나, 자유표면 부근에서는 금형 접촉부인 c-c에서 가장 높게 나타남을 볼 수 있다.

다라서 단순 압축공정에서 변형이 심한 중심부와 금형 접촉부 및 풀딩이 일어나는 부위에서 고상률의 높은 값이 분포하며 자유표면의 중심에서 고상률이 가장 낮음을 알 수 있다. 또한 초기 고상률이 불균일한 경우와 균일한 경우의 각 위치에 대한 고상률 분포의 차이는 변형의 초기 단계에서 뚜렷이 나타나며, 변형이 진행됨에 따라 이러한 차이는 감소한다. 그러나 두 경우의 각 위치에 대한 고상률의 편차는 풀딩이 일어나는 부위를 제외한 대부분의 영역에서 어느 정도 유지됨을 볼 수 있다.

Fig. 10은 고상률이 불균일한 경우와 균일한 경우에 대해 높이가 감소율이 60%일 때 소재의 변형 형상을 비교하여 나타낸 것으로 자유면 중심부에서 반경방향으로의 퍼짐량이 약 0.8mm정도 차이가 남을 볼 수 있다. 또한 변형의 진행에 따른 응력-변형률 관계를 고상률이 불균일한 경우와 균일한 경우를 비교하여 Fig. 11에 나타내었으며, 동일한 변형률에 대한 응력의 차이가 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이상과 같은 해석 결과로부터 가열 과정에서 발생한 불균일한 고상률의 분포는 소재의 변형 거동 및 성형하중과 밀접한 연관성이 있음을 알 수 있다.

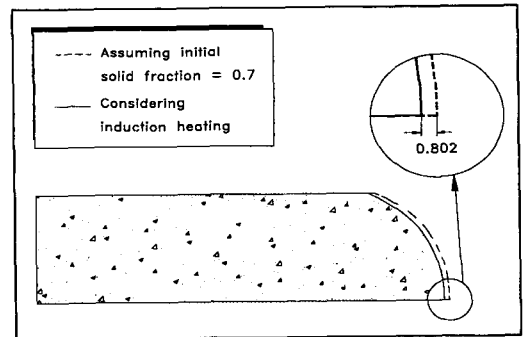


Fig. 10 Comparison between the case assuming initial solid fraction=0.7 and the case considering induction heating

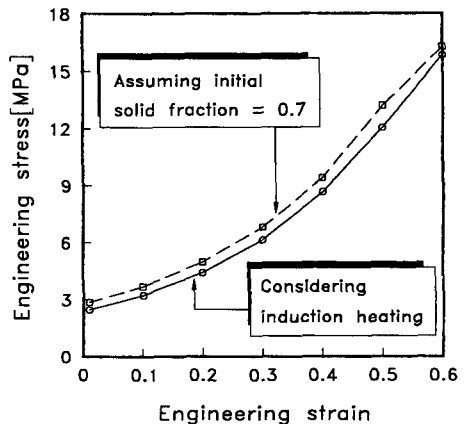


Fig. 11 Stress-strain curve

4. 유도가열을 고려한 밀폐 압축공정의 해석 및 실험

반응용 상태에서 저속의 단순 압축공정을 수행할 경우 거시적 액상분리현상과 자유표면의 크랙이 발생한다는 것은 알려진 사실이다. 또한 이러한 현상은 실험과 해석 결과의 차이를 발생시킨다. 따라서 자유표면의 크랙 발생에 대한 영향이 작고 실제 단조공정에 가까운 밀폐 다이를 이용한 압축공정에 대한 유한요소 해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교하였다.

4.1 유한요소 해석 및 실험

단순 압축공정의 해석과 같이 먼저 A356 재료에 대한 유도가열 해석을 선행하였다. 유도가열 해석은 Fig. 5와 같이 평균 내경이 48mm이고, 단면이 4×4mm²인 코일을 이용하였다. 또한 직경과 높이가 D=20mm, L=20mm인 소재와 소재를 둘러싸고 있는 주위는 공기로서 모델링하였다. 코일과 코일 입력값 및 경계조건은 3절의 유도가열 해석과 동일하게 하였다. 유도가열 해석으로부터 기준점 A의 고상률이 70%에 도달할 때의 온도 분포 및 초기 고상률 분포를 구하고 이를 이용하여 밀폐 다이에 의한 압축성형공정을 해석하였다. 다이 속도 및 마찰상수는 40 mm/sec와 0.3으로 정하였으며, 축대칭이므로 1/2 단면에 대해 해석을 수행하였다. 또한 변형 중 밀폐 다이와의 접촉을 고려하였으며, 응고현상 및 열전달 현상은 고려하지 않았다.

유한요소 해석결과와 타당성을 비교하기 위하여 밀폐 다이를 이용한 압축성형공정에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 다이 세트의 치수와 형상을 Fig. 12에 나타내었다. 다이의 재질은 SK D 11이며, 압축 실험은 최대용량이 25 ton인 만능시험기(MTS)를 이용하였다. 실험에서 다이 세트를 350℃로 예열하였고 소재는 230초간 유도가열한 후, 밀폐 다이를 이용하여 성형하였다. 이때 펀치의 속도는 10, 20, 40mm/sec로 두었다. 또한 성형된 시편은 급랭한 후, 광학 현미경을 사용하여 조직을 관찰하였다.

4.2 결과 및 고찰

Fig. 6(b)는 A356 재료에 대해 기준점 A의 고상률이 70%에 도달하였을 때 온도 분포 및 고상률 분포를 나타낸 것이다. 230초간 유도가열 후 소재는 약 1℃의 편차를 보였다. 이러한 온도 분포는 앞서 언급된 바와 같이 시편의 형상이 단순하고 크기가 매우 작기 때문에 그 편차

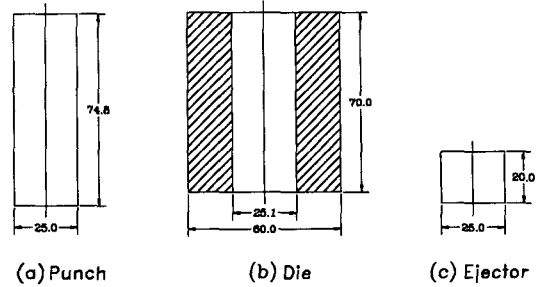


Fig. 12 Dimensions of the experimental tooling for closed-die compression

도 작은 것으로 생각된다.

펀치 스트로크가 6, 8, 9mm일 때, 유한요소 해석으로 구한 변형된 형상 및 고상영역의 속도분포는 Fig. 13과 같다. 변형 초기에는 단순 압축공정에서와 마찬가지로 마찰로 인하여 다이 접촉면에서 반경방향으로의 속도성분은 거의 나타나지 않았으며, 펀치의 이동방향과 일치하는 수직 속도성분이 지배적임을 볼 수 있다. 또한 다이 캐비티의 완전한 충전은 펀치 스트로크가 약 9mm에서 이루어졌다.

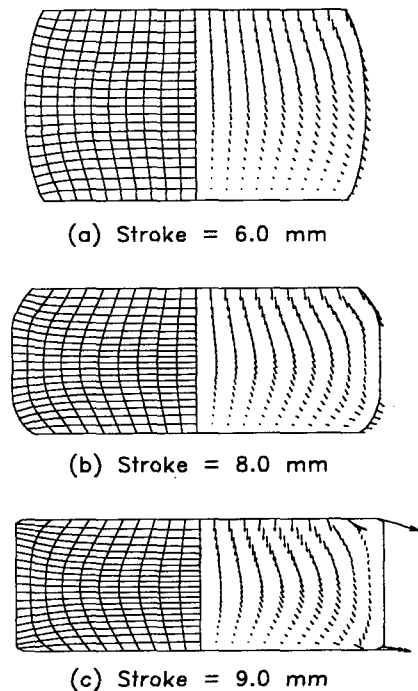


Fig. 13 Deformed mesh and distribution of solid velocity in simple compression

Fig. 14는 펀치 스트로크가 6, 8, 9mm일 때의 유효 변형률분포와 고상률 분포를 나타낸 것이다. 단순 압축공정과 같이 높은 유효 변형률이 분포하는 영역에서 높은 고상률 분포를 보이는 비례적인 관계가 있음을 확인할 수 있다. 또한 밀폐 다이를 이용한 압축성형공정의 최종단계에서는 소재 내부의 고상률의 분포가 거의 균일함을 알 수 있다.

다이 속도가 40mm/sec인 밀폐 다이를 이용한 압축성형공정의 실험으로 얻은 시편의 조직을 Fig. 15에 나타내었다. 펀치 및 이젝트의 중간 위치에서 소재 중심으로부터 반경방향으로 관찰한 소재의 조직을 나타낸 Fig. 15의 (a)~(c)에서 볼 수 있듯이, 고상률의 분포가 거의 균일함을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 Fig. 14(c)의 해석결과와 비교적 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 측면 다이와 접촉되는 부위에서 관찰한 소재의 조직을 나타낸 Fig. 15(d)는 높은 액상률이 분포함을

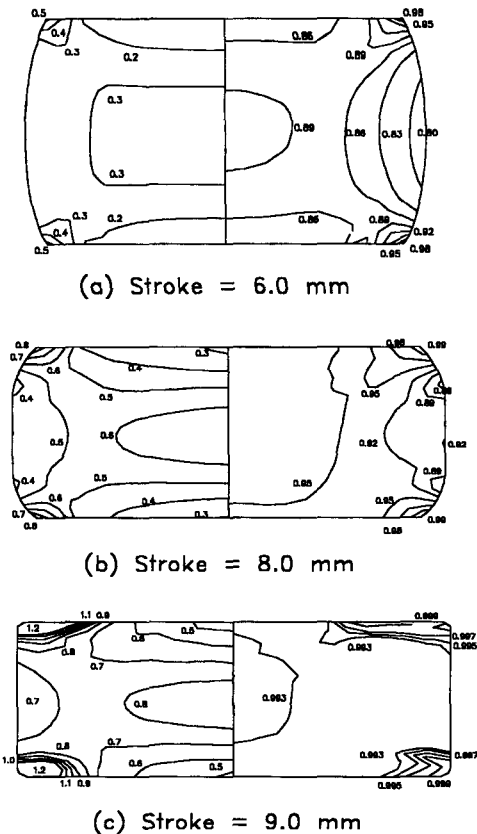


Fig. 14 Distribution of effective strain and solid fraction in closed-die compression

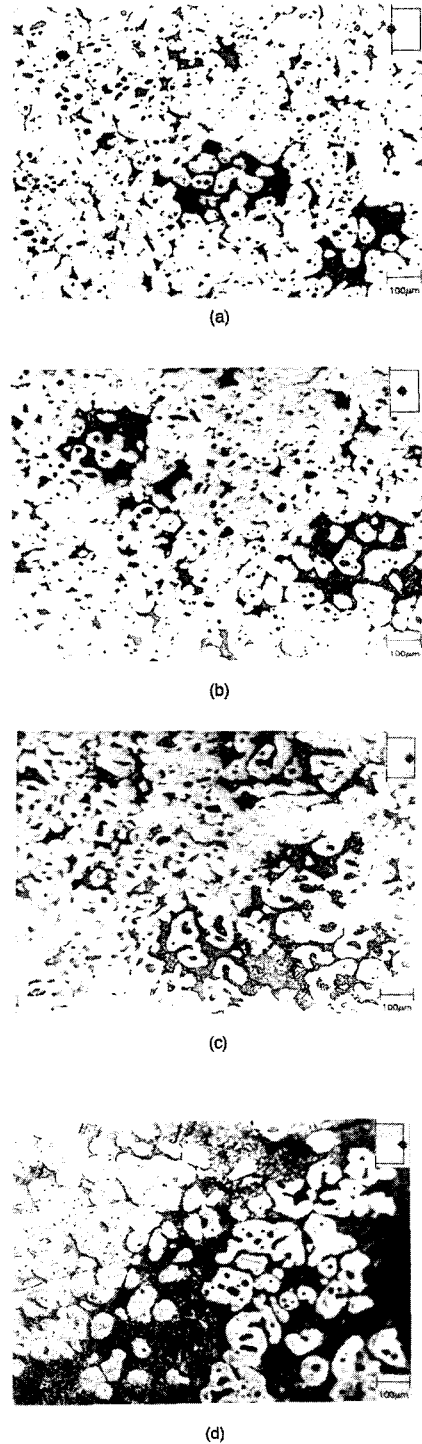


Fig. 15 Optical microstructures of semi-solid material in closed-die compression

볼 수 있으며, 이러한 결과는 Fig. 14(c)의 해석결과와 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 해석에서 액상의 거시적 분리현상을 고려하지 않았기 때문에 나타난 결과라고 생각된다.

실험과 해석으로 구한 하중-변위 선도를 Fig. 16에 비교하여 나타내었다. 실험에서 성형속도가 증가함에 따라 전체적으로 하중의 수준이 높고 하중의 급격한 증가가 가장 짧은 스트로크에서 나타남을 볼 수 있다. 이는 성형속도가 증가함에 따라 유동저항이 크고 반경방향으로의 퍼짐이 빨리 이루어지기 때문이다. 또한 동일한 조건에 대한 실험결과(Fig. 16의 A)와 해석결과(Fig. 16의 D)를 비교해 보면 유사한 경향을 보이나, 해석결과에서는 다이 캐비티의 충전 지연으로 인해 실험결과와 다소의 차이가 나타남을 볼 수 있다. 이러한 차이는 본 연구에서 액상의 유출과 응고현상이 고려되지 않기 때문에 나타난 결과라고 생각된다. 따라서 액상의 유출, 응고현상과 열전달 현상을 고려한다면 보다 향상된 해를 얻을 수 있을 것이다.

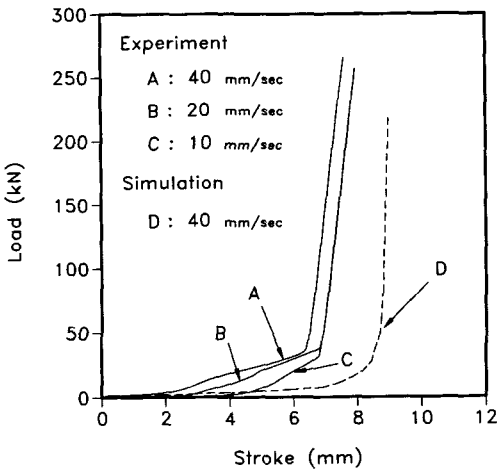


Fig. 16 Load-stroke diagram in closed-die compression

5. 결론

본 연구에서는 유도가열을 고려한 반응용 재료의 성형 공정에 관한 해석 절차를 확립하였으며, 초기 고상률 분포가 반응용 재료의 성형공정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 단순 압축공정을 해석하고 이를 이전의 연구에서와 같이 초기 고상률이 일정하다고 가정한 경우와 비교해

보았다. 또한 실제 단조공정에 가까운 밀폐 다이를 이용한 압축공정을 해석하고 이를 실험과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유도가열 해석 후 고상률은 전자기파의 침투깊이, 대류열전달 등에 의하여 약 5%의 편차가 발생하였으며, 불균일한 고상률 분포를 나타내었다.

(2) 유도가열과정에서 발생한 불균일한 고상률의 분포는 소재의 변형거동 및 성형하중과 밀접한 연관성이 있음을 볼 수 있었다.

(3) 유효 변형률과 고상률 분포는 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 다이 접촉면에서는 마찰에 의해 고상영역의 미끄러짐이 억제됨을 볼 수 있었다.

(5) 밀폐 다이를 이용한 압축공정의 해석결과는 다이 캐비티의 충전이 지연됨으로써 실험과 다소의 차이를 나타내었다. 따라서 액상의 유출, 응고 현상과 열전달 현상을 고려한다면 보다 향상된 해를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. ML Tims, J Xu, G Nickodemus and FR Dax, "Computer Based Numerical Analysis of Semi-Solid Metal Working", Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composite, Sheffield, pp. 120~125, 1996.
2. S. Toyoshima and Y. Takahashi, "A Computational Simulation of Forming Processes for Noneutectic Materials", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 969~974, 1990.
3. S. Toyoshima, "A FEM Simulation of Densification in Forming Processes for Semi-Solid Materials", Proceedings of the 3rd International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 47~62, 1994.
4. D. A. Pinsky, P. O. Charreyron, and M. C. Flemings, "Compression of Semi-solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates", Metallurgical Transactions B, Vol.15B, pp. 173~181, 1984.
5. ANSYS Users's Manual, Revision 5.1

6. H. A. Kuhn and C. L. Downey, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials", *International Journal of Power Metallurgy* Vol. 7, pp. 15~25, 1971.
7. C. C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", *Applications of Numerical Methods to Forming Process*, ASME, A M D , Vol. 28, pp. 163~174, 1978.
8. K. F. Wang, S. Chandrasekar, H. T. Y. Yang, "Finite Element Simulation of Induction Heat Treatment and Quenching of Steels", *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 20, pp. 83~90, 1992.
9. Ph. Masse, B. Morel, Th. Breville, "A Finite Element Prediction Correction Scheme for Magneto-thermal Problem during Curie Transition", *IEE Transactions on Magnetics*, Vol. Mag-21, No. 5, pp. 1871~1876, 1985.