

반용융 재료의 물성치 평가에 관한 연구(II) -모델재료의 후방압출 실험과 상계해석을 통한 반용융 재료의 유동응력식 결정-

이주영* · 김낙수**

(1999년 3월 29일 접수)

A Study on Material Characterization of Semi-Solid Materials (II) -Determination of Flow stress for Semi-Solid Materials Using Backward Extrusion Experiment with Model Material and Upper Bound Analysis-

Joo-Young Lee and Naksoo Kim

Abstract

To determine the flow stress of semi-solid materials, a new combined method has been studied by experimental and analytic technique in the current approach. Using backward extrusion experiment and its numerical analysis, the characterization scheme of semi-solid materials according to the change of initial solid volume fraction has been proposed. Because that solid volume fraction is sensitive to temperature change, it is required to precisely control the temperature setting. Model materials can guarantee the establishment of material characterization technique from the noise due to temperature change. Thus, clay mixed with bonded abrasives was used for experiment and the change of initial solid fraction was copied out through the variation of mixing ratio. Upper bound method was adapted to increase in efficiency of the calculation in numerical analysis and new kinematically admissible velocity field was employed to improve the accuracy of numerical solution. It is thought that the material characterization scheme proposed in this study can be applied to not only semi-solid materials, but also other materials that is difficult to obtain the simple stress state.

Key Words : Solid Fraction, Model Material, Upper Bound Method, Flow Stress, Backward Extrusion

1. 서 론

금속복합재료, 공구강 같은 소재는 부품성형이 용이하지 않은 난성형재료써 취성이 강하거나 상당한 수준의 가공력을 요하므로 여러 단계의 공정을 거쳐야만 하나의 완성된 제품을 얻을 수 있고, 경량합금 같은 경우에는 공업

적으로 상용되는 철강재에 비하여 원소재의 가격이 비싸기 때문에 최종성형품의 생산단가가 상승할 뿐만 아니라 강도면에서도 철강재에 비해서 떨어진다. 공업적으로 타 소재에 비하여 상당한 우위를 가지면서도 이상에서 기술한 바와 같은 단점들이 이들의 사용을 제한하는 요인으로 작용한다.

* 서강대학교 기계공학과 대학원
** 서강대학교 기계공학과

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법중의 하나가 반응용 가공법(semi-solid manufacturing)인데 이는 합금의 고상과 액상이 공존하는 온도영역에서 단조, 압연, 압출 및 다이 캐스팅 등과 같은 기존의 금속성형방법을 적용하는 정형가공기술로서 액상선 온도보다 낮은 온도에서 가공하기 때문에 주조공정에 비하여 금형수명의 연장, 에너지 절감을 기대할 수 있다. 또한 반응용 상태의 재료는 고상 입자들 주위를 액상이 둘러싸고 있는 형태이므로 열간이나 냉간가공에 비하여 재료의 유동성이 좋을 뿐만 아니라 낮은 하중과 최소 공정수로도 복잡한 형상의 부품을 최종형상에 가깝게 성형할 수 있고 아울러 공정수의 단축과 생산단가 절감을 도모할 수 있다.

1970년대 초반 미국 MIT의 Flemings 교수팀에 의해 Sn-Pb 반응용 합금의 특성에 관한 연구가 발표된 이후 반응용 가공에 관한 많은 연구결과들이 보고되고 있다. 1980년대 후반까지는 주로 Sn-Pb합금을 이용한 재료 특성면에 관한 연구들이 주를 이루었고, 1990년대 들어서면서 상용합금을 이용한 부품성형에 관한 실험적 연구결과들이 많이 보고되고 있는 실정이다.⁽¹⁾ Laxmanan과 Flemings⁽²⁾는 평판점도계를 이용하여 일정한 하중하에서 결정립이 수지상조직과 구상조직을 갖는 Sn-15%Pb 반응용 합금의 유동현상에 관하여 연구하였다. 구상조직의 경우 비뉴턴 유체유동 현상을 나타냄을 관찰하였으며 고상률이 0.3이상일 경우 멱법칙 모델에 의하여 점도를 전단변형률과 고상률의 함수로 나타내었다. Suery와 Flemings⁽³⁾는 변형률속도가 수지상조직의 결정립을 갖는 Sn-Pb 반응용 합금의 변형거동에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. $\dot{\epsilon} = 1.3 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^3$ 의 넓은 범위의 변형률속도에 대하여 단순압축 실험을 함으로써 약 $10^3 \sim 10^4$ 정도의 낮은 변형률속도에서는 변형률이 약 $\epsilon = 0.2 \sim 0.4$ 정도에서 상당한 정도의 액상유출과 수지상조직의 붕괴현상이 나타났으며, $\dot{\epsilon} = 10^1 \sim 10^3$ 범위의 높은 변형률속도에서는 이러한 현상이 현저히 감소하며 균일한 변형을 하게 됨을 파악하였다. Seconde와 Suery⁽⁴⁾는 수지상 조직과 기계적 교반을 통하여 제조된 구상조직을 갖는 두 가지 종류의 Sn-Pb 반응용 합금이 소재의 응고형태에 따라서 매우 다른 압축변형 거동을 나타내며, 압축이전의 제가열 유지시간 또한 기계적인 성질에 영향을 미치게 됨을 파악하였다. Gunasekera⁽⁵⁾는 반응용 재료에 대해서 유동응력식을 변형률속도, 기체상수, 활성화 에너지, 고상률 등의 함수로 나타내었다. 세가지 모델에 대하여 각각의 계수들을 결정 한 후 해석결과를 Kiuchi와 Wakil의 결과와 비교하였다.

Kumar 등⁽⁶⁾은 조직응집변수를 이용하여 낮은 고상률을 갖는 반응용 재료에 대한 유동응력식을 제안하였다. 이외에도 Motsu⁽⁷⁾ 등은 파라핀과 유리구슬을 이용하여 반응용 재료를 모사한 후 단순압축 실험을 수행함으로써 각 부위별 고상률을 측정하고, 액상의 압력이 전체 재료에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있다.

최근에는 컴퓨터의 성능향상과 수치해석 기법의 발달로 인하여 소성가공공정의 수치해석이 다양하게 수행되고 있으며, 반응용 가공공정의 수치해석에도 이를 적용하고자 하는 노력들이 많이 이루어 지고 있다. Charreyron과 Flemings⁽⁸⁾는 단순압축 실험을 통해서 Sn-Pb 반응용 합금의 변형률속도 민감지수와 강도계수를 구하고 액상의 유동은 D'Arcy 법칙을 따른다고 가정 한 후, 단순압축 과정을 상계해석 하였다. Toyoshima와 Takahashi⁽⁹⁾는 Charreyron의 실험결과 및 가정들을 이용하여 반응용 재료의 단순압축, 압연 및 압출 등을 유한요소 해석하였으며, Lalli⁽¹⁰⁾는 반응용 재료의 변형에 대한 새로운 모델을 제시하여 단순압축을 유한요소 해석하였다. 윤종훈 등⁽¹¹⁾은 반응용 재료의 기초 실험으로부터 확인된 변형특성을 바탕으로 고상률(solid fraction), 붕괴율(breakage ratio) 및 변형률속도 등의 함수로 유동응력식을 표현하여 Sn-Pb 반응용 합금의 단순압축을 유한요소 해석하였고, D'Arcy 법칙을 이용한 새로운 고상률 증분 알고리즘을 제안 하였다. Kim 등^(12, 14)은 문헌⁽¹¹⁾의 결과를 이용하여 볼 조인트 케이스의 반응용 단조공정에 관한 등온 및 비등온 유한요소 해석을 수행하였다.

이상과 같은 반응용 재료의 유한요소 해석을 수행함에 있어서 반드시 필요한 것이 재료의 물성치 즉, 유동응력(flow stress)인데, 고상과 액상이 혼재하는 반응용 재료의 경우, 보편적인 물성치 평가 방법들은 적용하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 반응용 재료의 물성치 평가를 위해 모델재료를 이용한 후방압출(backward extrusion) 실험에서 얻은 하중-변위선도와 이를 상계법(upper bound method)으로 피팅(fitting)시키는 방법에 관해서 연구하였다. 상계법과 후방압출을 이용한 반응용 재료의 물성치 평가는 김태준 등⁽¹⁵⁾에 의해서 시도된 바 있는데, 이들의 연구에서는 단지 정상상태에 대해서만 물성치 평가를 수행하였기 때문에 본 연구에서는 후방압출공정의 정상상태와 비정상상태 모두를 고려함으로써 보다 정확한 평가를 하고자 하였다.

한편, 상계법은 유한요소법과 비교하였을 때, 해의 정확성이 상대적으로 떨어지고, 구체적인 소재의 변형양상, 응

력분포 및 변형을 분포 등을 알 수 없다는 단점을 지니고 있으나, 유한요소해석은 위와 같은 정보를 얻을 수 있는 반면, 해석 시 요소망의 재구성 등으로 인해 해석시간이 길어지는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 유한요소 해와 크게 차이가 나지 않으면서, 해석시간을 단축시킬 수 있는 상계해^(16, 17)를 사용하여 후방압출 공정을 효율적으로 해석하였고, 실험결과, 상계해석 결과 및 유한요소 해석 결과를 비교해 봄으로써 평가된 물성치의 검증을 수행하였다.

2. 모델재료를 이용한 후방압출 실험

반응용 재료의 고상률이 높을 경우에는 고체와 유사한 거동을 나타내며 단축인장 실험이나 압축실험을 통해서 재료의 유동응력식과 관련된 재료상수들을 결정할 수 있고 고상률이 낮은 경우에는 슬러리(slurry)의 유동과 비슷하며 교반실험에서 얻을 수 있는 전단응력-전단변형을 속도간의 관계로부터 유동응력식을 유추할 수 있다. 하지만 고체변형과 액상유동의 특징을 모두 갖는 중간정도의 고상률 범위에서는 시편을 인장 시험기에 고정시키기가 어렵고 교반 실험 또한 겉보기 점도가 거의 무한대 값을 나타내기 때문에 기존의 방법으로는 물성치 평가를 수행하기가 어렵다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 중간정도의 고상률 (0.4~0.6)에 대해서 반응용 재료와 유사한 상태를 가지는 모델재료를 이용한 후방압출 실험을 통해 반응용 재료의 유동응력을 구하는 방법을 제시하는 한편, 수치적 접근으로는 상계법을 이용하여 후방압출 실험과 비교·분석함으로써 반응용 재료의 유동응력식을 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

2.1 모델재료의 선정 및 마찰인자의 측정

반응용 재료의 후방압출 수행 시 정확한 온도제어가 용이하지 않기 때문에 상온에서 실제 반응용 재료와 같은 고상률을 가지면서 온도편차에 따른 잡음(noise)제거를 위해 모델재료를 선정하여 후방압출 실험을 수행하였다.

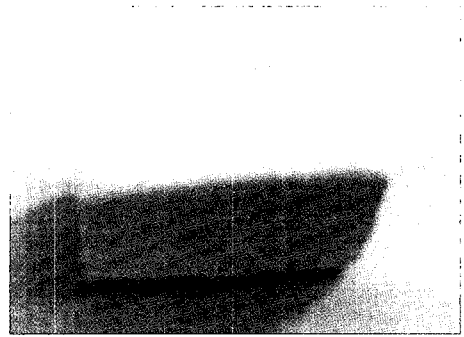
모델재료로는 Fig. 1(a)에 나타낸 점토와 (b)에 나타낸 연삭 스톱 입자를 적절한 부피분율로 혼합하여 사용하였으며 이때, 점토는 액상역할을, 연삭 스톱 입자는 고상역할을 하게 된다.

금형과 소재간의 마찰조건은 일정 전단마찰(constant shear friction)이라고 가정한 후 실제 반응용 단조시 금형과 제품의 탈형을 용이하게 하기 위해 사용되는 보론-니트라이드(Boron-Nitride) 이형체의 마찰인자(m_f)를 링

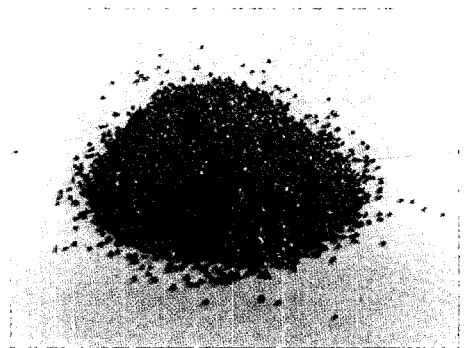
Table 1 Results of ring compression test

| No. of spec. | D_o (mm) | D_i (mm) | H(mm) | decreasing rate of height(%) | decreasing rate of inner radius(%) |
|--------------|------------|------------|-------|------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 56.6 | 19.0 | 12.0 | 29.4 | 19.6 |
| 2 | 61.4 | 17.0 | 9.65 | 43.24 | 32.0 |
| 3 | 68.5 | 9.52 | 7.3 | 57.06 | 61.92 |

D_o : Outer radius, D_i : Inner radius, H : Height



(a) Clay which plays a role of phase of liquid semi-solid materials



(b) Bonded abrasives which play a role of solid phase of semi-solid materials

Fig. 1 Model material used in backward extrusion experiment

압출 실험을 통해서 측정하였다. 실험에 사용한 시편은 플라스틱인(plasticine)으로써 외경(D_o): 내경(D_i): 높이(H)의 비가 각각 6:3:2인 시편을 3개 제작하였다. 가압 장치로는 10톤 프레스를 이용하였으며, 상,하부 평다이에 이형체를 끌고루 도포하여 약 5분간 건조시킨 후 링압출 실험을 행하였다. Fig. 2는 압축실험 후의 시편형상을 나타내는 사진이다. 시편의 초기 치수는 $D_o = 51\text{mm}$,

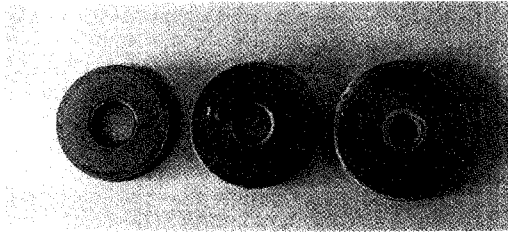


Fig. 2 Ring compression specimens after compression test, which was used to evaluate the friction factor m_f

$D_i=25.5$ mm, $H=17$ mm 이며, 3개의 시편에 대하여 각각 서로 다른 3가지의 높이감소율로 실험하였다. 실험 결과는 Table 1과 같으며 높이 감소율과 내경감소율을 각각 마찰인자를 구하는 그래프와 비교하여 값을 구해본 결과 마찰인자 $m_f=0.9$, 마찰계수 $\mu=0.31$ 로 각각 나타났다. 단 여기서 내경 변화율을 알기 위해서는 압축된 링의 내경을 측정해야 하나, 링 안쪽의 베럴링(barreling) 현상이 심한 관계로 상대적으로 베럴링(barreling)이 적은 외경과 높이 변화량을 측정한 후 체적일정조건을 적용하여 내경의 치수를 구하였다.

2. 2 후방압출 실험

(1) 실험조건 및 방법

위에서 언급한 모델재료와 Fig. 3에 나타낸 후방압출용 금형 및 MTS(Material Testing System)를 이용하여 후방압출 실험을 행하였다. 모델재료는 고상률이 $f_s=0.4, 0.5, 0.6$ 의 3가지 경우에 대해서, 펀치(punch) 속도 또한 $v_p=1, 5, 10$ mm/s의 3가지의 경우에 대해서 실험을 수행하였고 각 조건에 대한 실험반복 횟수는 3회 이다.

금형의 치수는 펀치 직경 $d_i=24$ mm, 길이 $h=150$ mm 이고, 컨테이너(container)는 깊이 $H=65$ mm, 내경 $D_i=37$ mm이다. 한편, 소재의 크기는 직경 $D=36$ mm, 높이 $H=43$ mm의 원기둥형으로 제조하여 실험하였다.

(2) 실험결과

Fig. 4~6은 $f_s=0.4, 0.5, 0.6$ 일 경우에 대한 각각의 하중-변위 관계를 나타내는 그림이다. $f_s=0.4$ 일 경우 곡선의 개형은 1차 함수와 유사하고 고상률이 전체 부피의 50%를 넘어서면, 전형적인 후방압출이 갖는 하중 형태를 나타내게 된다. 따라서 이때부터는 재료의 변형거동이 액상보다는 고상에 의해서 좌우됨을 알 수 있고 모델재료를 이용한 후방압출 실험의 경우, 액상유동과 고상변형의 우열을 구분 짓는 임계 고상률은 $f_s=0.5$ 라고 판단된다.

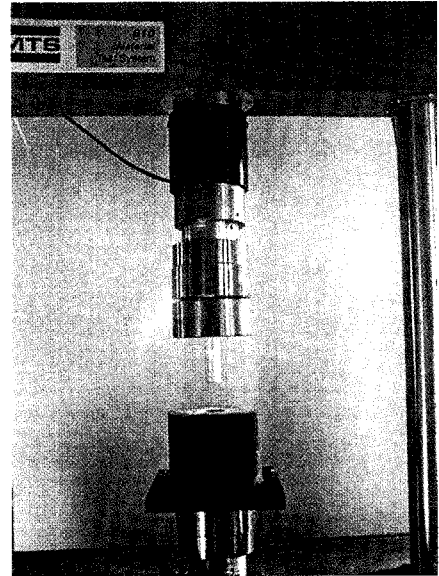


Fig. 3 Experimental setup

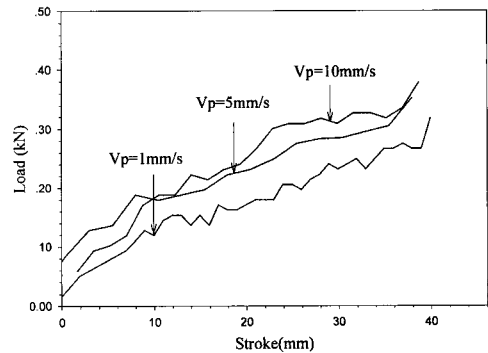


Fig. 4 Load-stroke curves according to punch velocities ($f_s=0.4$)

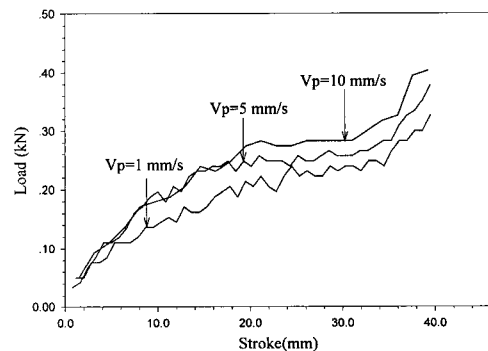


Fig. 5 Load-stroke curves according to punch velocities ($f_s=0.5$)

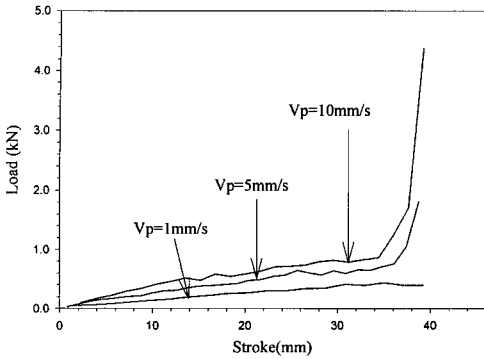


Fig. 6 Load-stroke curves according to punch velocities ($f_s=0.6$)

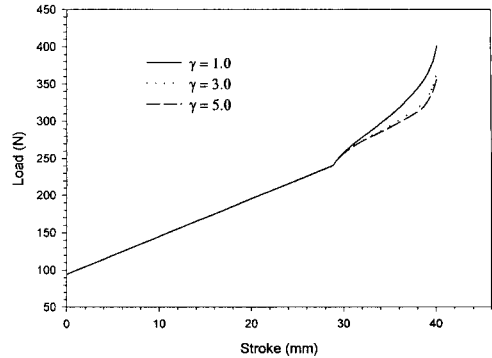


Fig. 7 Load-stroke curves according to solid fraction exponent γ ($K=0.066\text{Mpa}$, $m=0.0341$, $\dot{\epsilon}_0=6.16 \times 10^{-4}$, $f_s=0.4$, $v_p=1.0\text{mm/s}$)

3. 유동응력 관련 상수의 결정

3. 1 후방압출의 상계해석 및 최적화 기법을 이용한 유동응력 결정

본 절에서는 반응용 모델재료의 후방압출 실험으로부터 얻은 하중-변위 곡선과 문헌^(16, 17)에서 제안한 상계해를 이용하여 반응용 재료의 거동을 특징 지을 수 있는 유동응력을 결정하고자 한다.

모델링하고자 하는 반응용 재료의 유동응력식은

$$\bar{\sigma} = K(\dot{\epsilon}_0 + \dot{\epsilon})^m \quad (1)$$

형태로 가정하였다. 여기서, K 는 강도계수(strength coefficient), m 은 변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity), $\dot{\epsilon}_0$ 는 초기 변형률속도(initial strain rate)이다.

문헌⁽¹⁶⁾에서 제안하고 있는 비정상상태에 대한 속도장을 적용함에 있어서 하중곡선의 기울기 정도를 결정하기 위한 매개변수로써 고상률 지수(solid fraction exponent) γ 를 아래와 같이 도입하였다.

$$\dot{\epsilon}_r = (1 - f_s^\gamma)\dot{\epsilon}_1 + f_s^\gamma\dot{\epsilon}_n \quad (2)$$

식(2)는 상계해석 시 어떤 두 개의 구분된 속도장 영역 I, II가 존재할 때, 이 두 영역 사이의 경계면 즉, 속도 불연속면 Γ 에서 유효 변형률속도 $\dot{\epsilon}_r$ 는 두 영역에서 계산된 유효 변형률속도 $\dot{\epsilon}_1$ 와 $\dot{\epsilon}_n$ 를 고상률 f_s 의 다차항으로 보간 함을 의미하며, 고상률 지수의 변화에 따른 하중곡선의 개형을 Fig. 7에 나타내었다.

한편, 식(1)과 식(2)로부터, 결정되어야 할 변수들은 $K, m, \dot{\epsilon}_0$ 와 고상률 지수 γ 로서 2가지 종류로 이들을 결정하였다. 첫번째는 유동응력 상수 $K, m, \dot{\epsilon}_0$ 및 γ 를 3가지 고상률 각각에 대해서 1조씩을 구해 보았으며, 두번째는 각 유동응력 상수를 고상률에 대한 1차 함수 형태로 표현하여 고상률 변화에 따른 재료의 유동응력을 나타낼 수 있도록 구해 보았다. 또한, 유동응력식 안에 초기 변형률속도항이 존재하고, 고상률 지수 γ 를 결정해야 하므로 최소자승법(least square method)을 이용한 비선형 회귀분석법(nonlinear regression)을 사용하여 유동응력 관련 상수 4가지를 결정하였다.

비선형 회귀분석은 반복을 통하여 피팅하고자 하는 상수값들을 갱신 시키므로 최적화 기법이 필요하다. 최적화 기법 중 방향결정 방법으로는 준뉴턴(quasi-Newton) 방법을, 선 탐색(line search) 방법으로는 해석적 근사법(analytical approximation)을 사용하였다. 준뉴턴 방법은 목적함수의 2차 도함수 행렬인 헤시안(Hessian)을 이용해 변수의 증감 방향을 결정하는 방법이고, 해석적 근사법은 목적함수를 2차 함수로 근사하였을 때, 그 값이 최소가 되는 증분량을 정하여 변수를 갱신하는 방법이다. 실험으로 얻은 하중-변위와 상계해석으로 얻은 하중-변위 곡선사이의 거리 합의 평균을 목적함수로 생각하여 이 값이 최소가 될 때의 상수를 구하고자 하는 유동응력 상수라고 보았다.

최적화 시 구하고자 하는 상수들의 수렴조건으로는 매 반복 시, 그 때의 목적함수의 구배성분을 구하여 이 중에서 가장 큰 값이 임계 값보다 작아지면 계산을 종료하도록 하였다. 본 연구에서 사용된 임계값은 1.0×10^{-9} 이다.

(1) 고상률 변화에 따른 유동응력상수의 결정

Fig. 8~11은 각각의 고상률에 대해서 유동응력 상수 및 고상률 지수를 결정하는 과정에 있어서 각 상수가 반복 횟수에 따라 수렴하는 경향을 나타낸 것이다. 고상률이 0.4일 경우는 20회에서, 고상률이 0.5일 경우는 11회에서, 고상률이 0.6일 경우는 15회에서 수렴하였다. 각 상수의 수렴된 값을 보면, 값의 차이가 많음을 알 수 있다. 이렇게 상수별로 값의 차이가 클 경우에는 수렴성에 문제가 있기 때문에 구하고자 하는 모든 상수의 범위를 0~1 사이의 값을 갖도록 하는 구속조건을 주어 표준화 시킨 후, 구해진 결과를 다시 환산하여 상수 값들을 결정하였다. 여기서 사용한 각 상수별 구속조건은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 0 < K < 1 \\
 0 < 1000m < 1 \\
 0 < 10\dot{\epsilon}_0 < 1 \\
 0 < 0.1\gamma < 1
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

계산된 구체적인 값들은 Table 2에 정리하였으며, 수렴 시간은 약 3~5분 정도 소요되었다. $f_s=0.4, 0.5$ 일 경우의 K 는 두 경우에 대해 큰 차이를 보이지 않으나, 고상률

Table 2 Determined coefficients by curve fitting for each solid fraction

| Solid fraction | K [MPa] | m | $\dot{\epsilon}_0$ | γ |
|----------------|-----------|--------|-----------------------|----------|
| 0.4 | 0.0660 | 0.0341 | 6.16×10^{-4} | 4.20 |
| 0.5 | 0.0733 | 0.0598 | 4.83×10^{-4} | 2.70 |
| 0.6 | 0.1720 | 0.0812 | 4.88×10^{-4} | 2.11 |

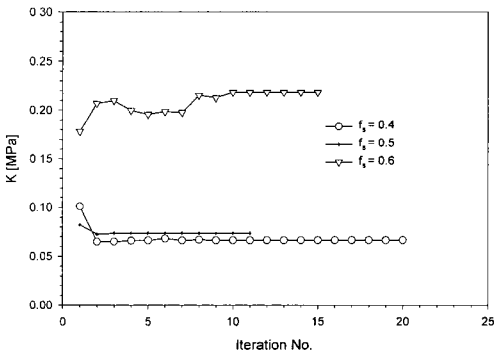


Fig. 8 Convergence of strength coefficient K for 3 kinds of solid fraction

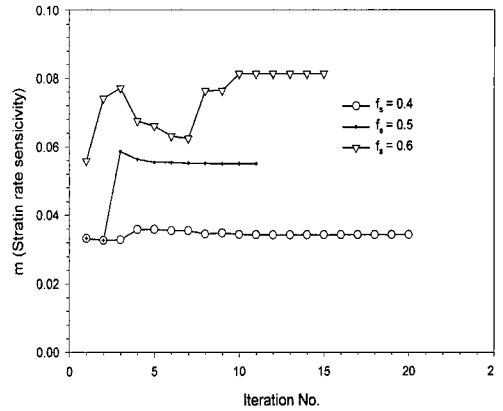


Fig. 9 Convergence of strain rate sensitivity m for 3 kinds of solid fraction

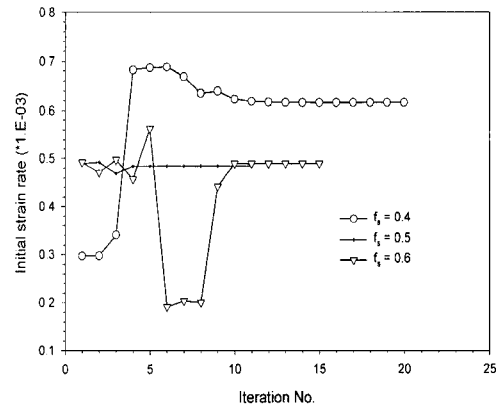


Fig. 10 Convergence of initial strain rate $\dot{\epsilon}_0$ for 3 kinds of solid fraction

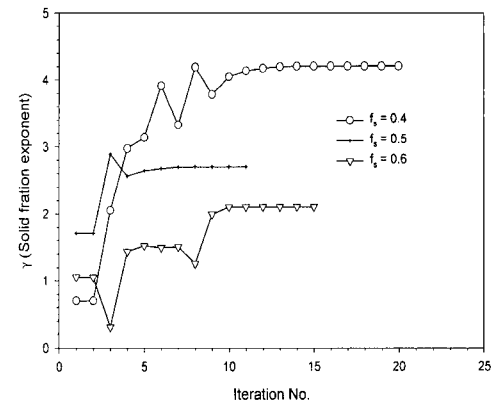


Fig. 11 Convergence of solid fraction exponent γ for 3 kinds of solid fraction

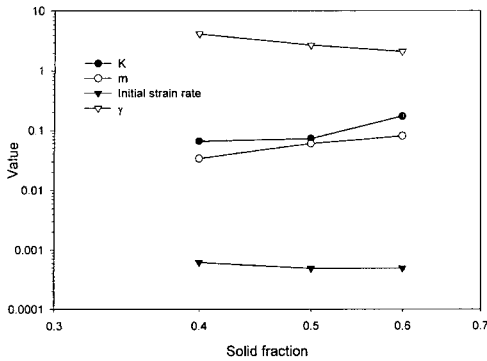


Fig. 12 Variation of flow stress coefficients for log scale

이 0.6일 경우 K 는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 재료 내 고상의 부피비가 커지면서, 재료의 거동이 고상에 더 많은 영향을 받게 되므로 전체적인 하중이 증가하여 K 의 값이 낮은 고상률인 경우에 비해 크게 증가하였음을 알 수 있다. m 과 $\dot{\epsilon}_0$ 역시 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 행정 끝 부분의 하중 상승을 조절하는 고상률 지수는 고상률의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 고상률 지수가 작을 수록 행정 끝 부분에서 하중곡선의 기울기가 증가하고, 클 수록 행정의 끝 부분에서의 하중기울기는 감소한다. Fig. 12는 구한 상수값들의 변화 경향을 고상률 변화에 대하여 로그 눈금으로 나타낸 것이다.

(2) 고상률의 1차 함수로 표현된 유동응력상수 결정

Fig. 13은 구하고자 하는 상수를 식(4)과 같이 고상률의 1차 함수 형태로 나타내었을 때 각 계수의 수렴 경향을 나타낸 것이다. Fig. 13에 나타난 값들 ($a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1, d_0, d_1$) 또한 차이가 많으므로 식(3)에서 각 계수에 곱하였던 가중치의 역수를 곱하여 수렴경향을 알아보기 쉽게 표현하였다. 수렴양상을 살펴보면 4회 반복이후 각 계수들이 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 계산시간은 약 5분정도 소요되었다.

$$\begin{aligned}
 K &= a_0 + a_1 f_s \\
 m &= b_0 + b_1 f_s \\
 \dot{\epsilon}_0 &= c_0 + c_1 f_s \\
 \gamma &= d_0 + d_1 f_s
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

계산된 구체적인 값들은 Table 3에 정리하였다. 이 경우 역시 $K, m, \dot{\epsilon}_0$ 는 고상률 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었고, 고상률 지수 γ 는 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 3 Determined coefficients by curve fitting with function of 1st order of solid fraction

| Coefficient | Function |
|-------------------------|---|
| $K(f_s)$ | $0.008 + 0.129 f_s$ |
| $m(f_s)$ | $0.0195 + 0.0222 f_s$ |
| $\dot{\epsilon} m(f_s)$ | $0.150 \times 10^{-3} + 0.202 \times 10^{-3} f_s$ |
| $\gamma(f_s)$ | $5.0 - 1.25 f_s$ |

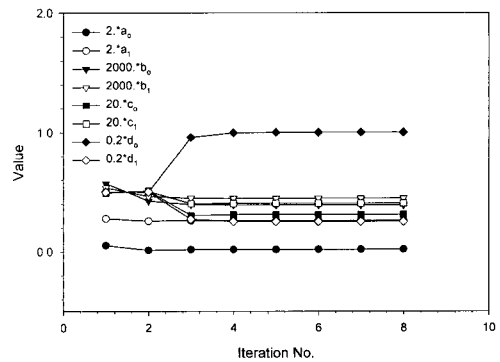


Fig. 13 Convergence of flow stress coefficients described by 1st order solid fraction

3.2 결과의 검증

Fig. 14~16은 이상에서 구한 유동응력 관련 상수들을 이용하여 상계해석 한 결과와 상용 유한요소 해석 패키지인 DEFORM을 이용한 해석결과 및 실험결과를 하중-변위 곡선을 이용하여 비교한 것으로 각 고상률과 펀치 속도에 대해서 나타내었다. 고상률별로 유동응력 관련 상수를 결정한 하중곡선이 고상률의 1차 함수로 각 상수를 나타낸 하중곡선보다 약간 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 고상률의 1차 함수로 표현된 유동응력 상수를 결정하는 과정에서 전체 실험데이터를 이용하게 되는데, 고상률이 0.6인 경우의 급격한 하중증가를 고상률의 1차 함수로 표현된 강도계수가 이를 충분히 반영하지 못했기 때문에 고상률별로 피팅한 결과보다 약간 낮은 수준을 나타낸 것이다. 이 그림들에서 유한요소해석 결과는 하중이 일정하게 나타나는 구간이 존재하는 반면 실험 결과는 이 구간에서 완만하게 증가하는 결과를 나타내고 있다. 이는 유한요소 해석에서는 펀치와 컨테이너 사이를 빠져 나가는 소재의 유동이 거의 강체처럼 취급되지만 반응용 상태에서는 이 부분에서의 마찰변형이 상당부분 기여하고 있기 때문이

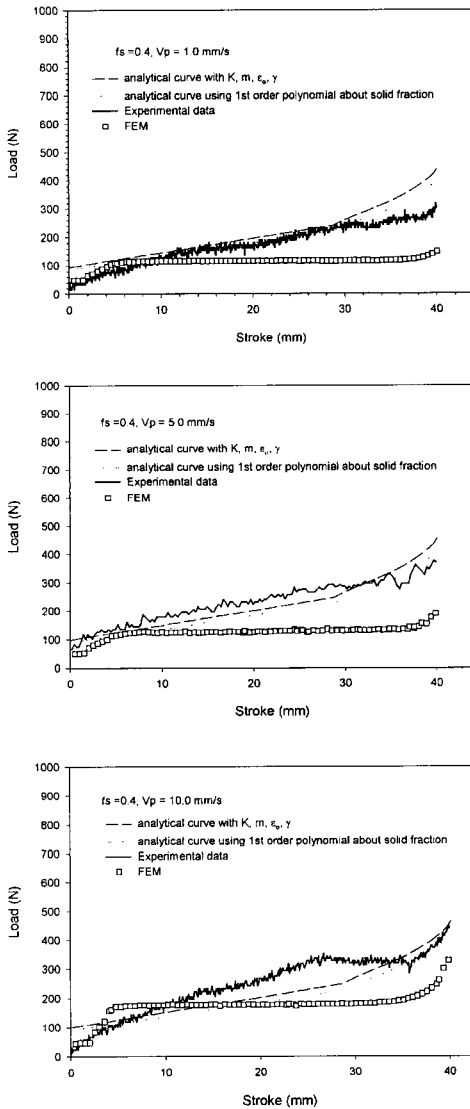


Fig. 14 Comparison of load-stroke curves among experimental data, fitted curves and FEM analysis for $f_s=0.4$

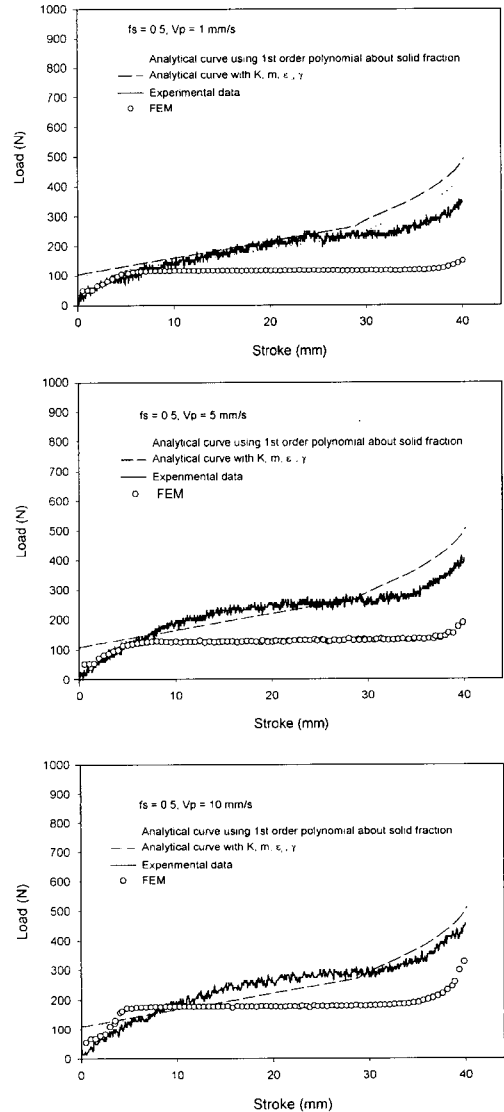


Fig. 15 Comparison of load-stroke curves among experimental data, fitted curves and FEM analysis for $f_s=0.5$

다. 따라서, 본 연구에서의 상계해석 결과는 마찰의 영향을 적절히 고려하고 있음을 알 수 있다.

각 고상률에 대한 결과와 고상률의 1차 함수로 나타낸 유동응력 상수를 이용하여 상계해석 한 곡선 모두 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 고상률 각각에 대해서 구한 유동응력 관련 상수들은 반응용 재료의 등온해석에 사용할 경우 고상률의 1차 함수로 나타낸 상수들 보다 비교적 정확한 결과를 줄 것으로 예상되며, 비등온 해

석의 경우에는 이산화 된 데이터 형식보다 연속적인 데이터 형식을 갖는 고상률의 1차 함수로 나타낸 값들을 사용하는 것이 보다 적절할 것이다.

한편, 유한요소 해석 결과는 고상률이 낮을수록 실험결과와 큰 차이를 나타내는 반면 고상의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 $f_s=0.6$ 에서는 실험결과에 근사함을 고려해 볼 때, DEFORM이 고체변형에만 근거한 유동응력을 다루기 때문인 것으로 생각된다.

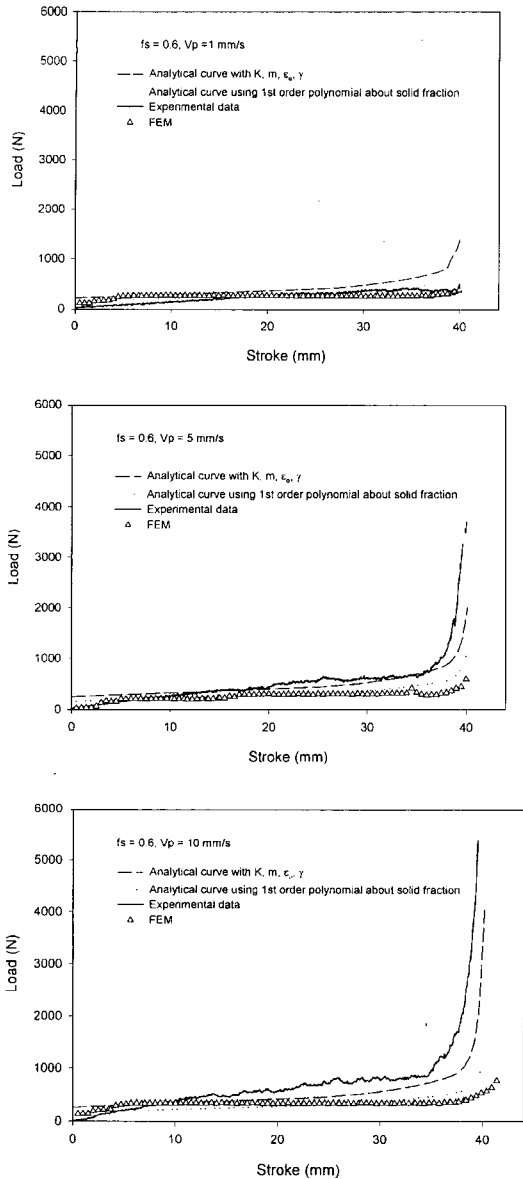


Fig. 16 Comparison of load-stroke curves among experimental data, fitted curves and FEM analysis for $f_s=0.6$

4. 결론 및 향후 과제

반응용 재료의 고상과 액상을 각각 나타낼 수 있는 모델 재료를 제시한 후 후방압출 및 상계해법을 이용하여 유동 응력을 결정하는 방법에 관해서 연구를 수행하였고 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 상온에서 반응용 재료의 변형을 모사할 수 있는 모델 재료를 제안하였다.

(2) 후방압출과 같이 실제 성형공정을 이용한 재료의 물성치 평가법을 제안하였으며, 상용 합금의 반응용 상태에 대한 물성치 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

(3) 본 연구에서 적용한 상계해법은 유한요소해석보다 우수한 결과를 얻을 수 있었으며, 물성치 평가의 효율성을 높였다.

본 연구에서 제안한 물성치 평가법을 이용하여 향후, 실제 상용 합금의 반응용 물성치 평가를 수행하는 연구가 이루어져야 할 것이며, 그 결과를 수치해석에 적절히 활용한다면 반응용 재료의 변형거동 예측 및 공정설계에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) 김낙수, 김현영, 김중재, 1996, "경량차체설계기술", 제4회 G7차세대자동차기술, 통상 산업부, pp. 446~451.
- (2) V. Laxmanan and M. C. Flemings, 1980, "Deformation of Semi-Solid Sn-15 pct Pb Alloy", Metal. Trans. A, Vol.11A, pp.1927~1937.
- (3) M. Suery and M. C. Flemings, 1982, "Effect of Strain Rate On Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys", Metal. Trans. A, Vol. 13A, pp.1809~1819.
- (4) J. F. Seconde and M. Suery, 1984, "Effect of Solidification Condition on Deformation Behavior of Semi-Solid Sn-Pb Alloys", J. of Mater. Sci., Vol. 19, pp. 3995~4006.
- (5) J. S. Gunasekera, 1992, "Development of A Constitutive Model for Mushy (Semi-Solid) Materials", Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, pp.95~102.
- (6) P. Kumar, C. L. Martin and S. Brown, 1994, "Predicting the Constitutive Flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries", Proc. of the 3rd Int'l. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, pp. 37~46.
- (7) M.Otsu, K.Mori and K.Osakada, 1998, "Inclusion of pressure of liquid phase in three-dimen-

- sional distinct element simulation of mushy-state forming ; Mater. Proc. Tech. 80-81, pp.438~443.
- (8) 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. of Mech. Sci., Vol. 27, No. 11-12, pp. 781~791.
- (9) S. Toyoshima and Y. Takahashi, 1991, ; A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-Solid Materials ; ISIJ Int'l., Vol. 31, No. 6, pp.577~582.
- (10) L. A. Lalli, 1984, ; A Model for Deformation and Segregation of Solid-Liquid Mixtures ; Metal. Trans., Vol. 16A, pp. 1393~1403.
- (11) 윤종훈, 김낙수, 김현영, 김중재, 임용택, 1997, ; 반응용상태에서 재료의 변형거동에 관한 유한요소해석 ; 한국소성가공학회 논문집, 제6권 4호, pp. 319~328.
- (12) N. Kim, J. H. Yoon, D. Li, S. I. Oh, 1997, ; Flow Simulation of Semisolid Forging by FEM ; Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp.183~186.
- (13) 윤종훈, 김낙수, 임용택, 이준두, 1998, ; 강열점소성 유한요소법을 이용한 반응용단조시 성형인자들의 영향에 관한 연구 ; 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.159~164.
- (14) 이주영, 김낙수, 김중재, ; 반응용단조 공정의 유한요소 해석에 관한 연구 ; 1997, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.179~184.
- (15) 김태준, 김낙수, 1998, ; 후방압출을 통한 반응용재료의 유동응력식 결정 ; 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.214~219.
- (16) 이주영, 김낙수, ; 반응용 재료의 물성치 평가에 관한 연구(I) -후방압출의 상계해석을 위한 동적 가용 속도장의 제안- ; 투고중.
- (17) 이주영, 1999, ; 후방압출 공정과 상계해법을 이용한 반응용 재료의 유동응력 결정에 관한 연구 ; 서강대학교 석사학위 논문.