

혼합이론에 근거한 반용융 재료의 고상률 분포 예측

윤종훈* · 김낙수** · 임용택*

(1999년 4월 30일 접수)

Prediction of Distribution of Solid Volume Fraction in Semi-Solid Materials Based on Mixture Theory

Jong-Hoon Yoon, Naksoo Kim and Yong-Taek Im

Abstract

It is more appropriate to treat that the semi-solid mixture as a single phase material that obeys incompressibility in the global sense and to analyze the liquid flow only locally than the approach based on compressible yield criteria. In the present study, a numerical algorithm of updating the solid volume fraction based on mixture theory has been developed. Finite element analysis of simple upsetting was carried out using the proposed algorithm to investigate the degree of macro-segregation according to friction conditions and compressive strain rates under the isothermal condition. The simulation results were compared to experimental results available in reference to test the validity of the currently proposed algorithm. Since the comparison results show a good agreement it is construed that the proposed algorithm can contribute to the development of numerical analysis of determining the solid volume fraction in semi-solid processing.

Key Words : Solid Volume Fraction, Mixture Theory, Semi-Solid Mixture

1. 서론

반용융 가공 시 반용융 재료 내부의 고상률(solid volume fraction)이 어떻게 분포하는가를 올바르게 예측하는 것은 공정조건을 찾고 이들의 영향을 파악하는 것 못지않게 중요하다. 지금까지는 주로 고상의 변형은 다공성 소재의 변형이론에 근본을 두는 한편, 액상의 유동은 다공성 소재 틈 사이의 유동으로 가정하여 고상률 변화를 예측하는 기법이 주를 이루어 왔으며 경향적인 측면에서는 적절한 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 그러나, 반용융 재료

는 고상과 액상의 혼합체(mixture)로서 근본적으로 비압축성(incompressibility)을 유지하기 때문에 다공성 소재의 변형이론에 바탕을 두고 문제의 접근을 시도할 경우 다음과 같은 문제점을 나타내게 된다. 즉, 소재의 성형이 진행됨에 따른 고상 입자들의 압축정도와 압축된 만큼 유출된 액상의 양은 올바르게 예측할 수 있지만 유출된 액상이 구체적으로 어떻게 비구속 표면을 형성하면서 금형과의 접촉을 일으키고 충전 시키는가에 대한 정보를 얻을 수 없다는 단점을 내포하고 있다. 따라서 이와 같은 기법으로 반용융 가공공정을 수치해석 할 경우, 하중예측이나 금형

* 한국과학기술원 기계공학과

** 서강대학교 기계공학과

충전과정을 올바르게 묘사할 수 없으며, 틀린 결과들을 설계자에게 제시할 수도 있다.

반응용 재료의 변형에 대한 가장 초기의 이론적 접근 및 수치해석은 Charreyron과 Flemings⁽¹⁾가 다공질 소성이론에 D'Arcy 법칙을 접목한 반응용 Sn-Pb 합금의 업셋팅 공정을 상계해석 함으로써 이루어졌고, 이들의 연구에서 예측된 시편 중심부의 반경방향 고상률 분포는 경향적인 측면에서는 실험결과와 근사적으로 일치하고 있지만, 절대적인 값은 실험값과 상당히 큰 편차를 나타내었다. 이 후, 이들의 이론적 접근법을 이용한 유한요소해석 결과들^(2~4)이 발표되었는데 주로 Shima와 Oyane의 항복합수나 Kuhn과 Downey의 항복합수 형태를 이용한 해석 사례들이다. Zavaliangos와 Lawley⁽⁵⁾는 중간범위 이상의 고상률에 대해서는 Nguyen 등⁽⁶⁾이 반응용 재료의 물성치 평가를 통해서 구한 항복합수 관련 변수를 이용하는 한편, 낮은 고상률에 대해서는 Kumar 등⁽⁷⁾이 제시한 겔보기 점도를 이용하여 반응용 Sn-Pb합금의 업셋팅을 유한요소 해석한 바 있다. 그러나 이들의 연구도 근본적으로는 압축성 이론에 그 바탕을 두고 있다.

한편, Kim 등^(8~10)은 압축성 이론에 근거한 문제의 접근법이 부적합함을 인식하여 반응용 재료 자체를 하나의 단일상처럼 취급하여 von Mises의 항복조건을 적용하였다. 더불어 붕괴율(breakage ratio)을 고려한 반응용 재료의 유동응력식을 제안한 후, 고상률의 변화를 계산할 때 D'Arcy 법칙을 적용하여 반응용 Sn-Pb 합금의 업셋팅 해석 및 반응용 Al2024 합금의 볼 조인트 케이스(ball-joint case) 성형공정을 해석한 바 있다. 특히, 이들의 성형공정 해석은 실험결과와도 비교적 잘 일치 하였고 향후, 반응용 재료의 변형거동 예측에 관한 연구는 비압축성이 부여된 측면에서도 고려되어야 함을 의미하는 연구사례라고 할 수 있다. 하지만 D'Arcy 법칙의 적용에 있어서 압력을 체적 변형률 속도(volumetric strain rate)와 벌칙 상수의 곱으로 구하기 때문에 계산결과가 정성적으로는 타당하나 정량적으로는 오차가 있다는 문제점이 있다.

이상의 연구 결과들에서 알 수 있듯이 반응용 재료의 변형거동 파악에 관한 연구는 전체적인 관점에서는 비압축성을 유지하는 단일상 처럼 취급한 후 이를 바탕으로 유동 법칙이나 유동응력식의 개발이 수행되어야 하는 반면, 국부적인 관점에서는 반응용 재료 내부의 고상률 분포를 올바르게 예측할 수 있는 알고리즘의 확립이 선행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 혼합이론에 근거한 쉽고 간편한 고상률 변화 계산 알고리즘 개발을 시도하였다.

2. 반응용 재료의 변형해석에 관한 지배방정식

본 연구에서 반응용 재료는 비압축성을 유지하는 하나의 단일상처럼 취급하고자 하기 때문에 변형해석에 사용된 지배방정식과 경계조건 등은 일반적인 금속재료에 많이 적용되는 유동법칙을 그대로 적용하였으며, 이들의 유한요소해석과 관련된 내용은 Kobayashi 등⁽¹¹⁾에 의해 잘 서술되어 있기 때문에 구체적인 언급은 생략하기로 한다.

3. 혼합이론과 고상률 변화

복합재료처럼 동일한 상(phase)을 갖는 여러 가지 종류의 물질이 혼합된 경우나, 동일한 물질이 몇 가지 상으로 혼합된 경우에 있어서 보편적으로 행해지는 거동에측 방법론은 미시적인 관점에서 각 구성 요소들을 직접 고려하는 방법과 거시적인 관점에서 혼합이론(mixture theory)을 적용하는 방법이 있을 수 있다. 보통, 특수한 문제가 아닌 경우 대체적으로 후자의 방법이 많이 이용되고 있으며, 수치해석의 입장에서만 보면 전자의 방법은 강성행렬의 크기가 과대하기 때문에 해석의 효율을 저하시키는 단점이 있다. 혼합이론에 관한 구체적인 서술은 문헌⁽¹²⁾에 잘 나타나 있으므로 여기서는 본 연구와 관련된 부분들에 대해서만 간략히 언급하기로 한다.

3.1 반응용 혼합체의 연속방정식

어떤 시간 $t=t^*$ 에서 임의의 물체 \mathfrak{R} 이 밀도 ρ_s 및 체적분율 f^s 의 고상과 밀도 ρ_l 및 체적분율 f^l 의 액상이 Fig. 1과 같이 혼합된 상태를 나타내고 있다면, 혼합체의 밀도 ρ 는

$$\rho = \rho^s + \rho^l = \rho_s f^s + \rho_l f^l \quad (1)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서, 첨자 s 와 l 은 각각 고상과 액상을 나타낸다.

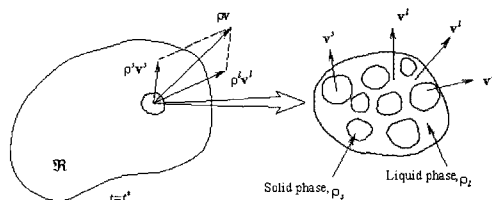


Fig. 1 Mixture of solid and liquid phases

이 혼합체가 갖는 속도벡터 \mathbf{v} 는 각 상의 속도벡터 \mathbf{v}^s 와 \mathbf{v}^l 및 식 (1)을 이용하여 질량으로 평균화 된 형태(mass-weighted average of phase velocities)로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v} = \frac{1}{\rho}(\rho^s \mathbf{v}^s + \rho^l \mathbf{v}^l) \quad (2)$$

한편, 상이 다른 두 물질이 유동을 할 경우에는 두 상간의 속도차, 즉 상대속도가 존재하게 되는 데 본 연구의 경우, 액상의 고상에 대한 상대속도벡터 \mathbf{v}^r 은 다음과 같이 정의 한다.

$$\mathbf{v}^r = \mathbf{v}^l - \mathbf{v}^s. \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로 부터 고상의 속도는 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{v}^s = \mathbf{v} - \frac{\rho^l \mathbf{v}^r}{\rho}. \quad (4)$$

혼합체의 질량보존법칙은 혼합체 전체에 대한 연속방정식 또는 각 상에 대한 연속방정식에서 고려할 수 있다. 혼합체 전체에 대한 연속방정식과 각 상에 적용된 연속방정식은 비압축성을 전제로 할 때 다음과 같다.

$$\frac{\partial f^s}{\partial t} + \nabla \cdot (f^s \mathbf{v}^s) = 0: \text{고상}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial f^l}{\partial t} + \nabla \cdot (f^l \mathbf{v}^l) = 0: \text{액상}, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0: \text{반응용 혼합체}. \quad (7)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial f^s}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(f^s \mathbf{v} - \frac{f^s \rho_l f^l \mathbf{v}^r}{\rho} \right) \quad (8)$$

반응용 가공의 유한요소 해석 시 식 (5)와 식 (6) 또는 식 (7)을 항상 만족해야 하는데, 반응용 혼합체를 하나의 단일상으로 두고 변형해석을 할 경우 식 (7)은 별적상수를 이용하여 구속조건으로 부여되며, 고상과 액상의 상대속도 차이에 의한 고상률 분포의 변화는 식 (8)을 계산함으로써 구할 수 있다.

3.2 운동량 방정식의 풀이를 통한 상대속도항의 계산 변형해석으로부터 혼합체의 평균화된 속도장은 이미 구한 상태이기 때문에 식 (8)을 풀기 위해서는 상대속도만 구

하면 된다. 보통 공극률이 10%가 넘는 통기성 물질을 통과하는 유체유동은 널리 알려진 D'Arcy 법칙으로 설명할 수 있는데 반응용 혼합체의 변형에 있어서는 고상과 액상의 속도성분이 모두 존재하기 때문에 다음과 같이 액상의 고상에 대한 상대속도와 압력구배의 항으로 연관이 된다.

$$f^l \mathbf{v}^r = -\frac{k}{\mu} \nabla p. \quad (9)$$

여기서, k 는 투과율(permeability), μ 는 액상의 점도(viscosity), ∇ 는 구배 연산자(gradient operator)를 각각 나타낸다. 기존의 연구들에서는 식 (9)와 관련된 경계조건을 다음과 같이 고려하고 있다.

$$p = p_0: \text{압력이 규정된 면}, \quad (10a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0: \text{금형과 접촉 또는 대칭면}. \quad (10b)$$

여기서, n 은 금형 접촉면의 면벡터를 의미한다. 위의 경계조건은 다공질 매체가 정지한 경우에 한해서 적용될 수 있으며, 시간 증분이 작고 액상의 유동을 계산하는 그 순간에서 만큼은 고상 결정립이 정지해 있다는 가정 하에 위의 경계조건을 부여하는 것은 부적합 하다고 판단되어 본 연구에서는 다음과 같은 경계조건을 적용 하였다.

$$p = p_0: \text{압력이 규정된 면}, \quad (11a)$$

$$p = \bar{p}: \text{금형과 접촉면}, \quad (11b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0: \text{대칭면}. \quad (11c)$$

즉, 식 (10b)로 표현된 경계조건은 단지 대칭경계에 대해서만 적용하고, 금형과의 접촉경계에서는 마찰이 작용하기 때문에 압력은 이와 관련시켜 구했다.

한편, 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 다음과 같은 고상률 변화와 관련된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial f^s}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(f^s \mathbf{v} + \frac{f^s \rho_l k}{\rho \mu} \nabla p \right). \quad (12)$$

식 (12)는 여전히 압력이라는 미지수를 포함하는 형태를 갖게 되고, 반응용 혼합체의 변형해석에 사용된 가정이 강-점소성(rigid-viscoplastic) 또는 강-열점소성(rigid-thermoviscoplastic) 재료라면, 변형해석으로부터 구한 각 절점에서의 응력텐서는 편차응력텐서이므로 절점에서

의 압력 혹은 압력구배는 쉽게 구할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 변형해석에서 이미 구한 응력 성분들과 속도장 성분들을 아래의 식 (13) 즉, 운동량 방정식에 대입하고 이 식을 양적(explicit)인 방법으로 직접 풀이함으로써 압력구배를 계산하였다.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \sigma' + \rho \mathbf{g}. \quad (13)$$

여기서, σ' 은 편차응력텐서를, \mathbf{g} 는 중력가속도 벡터를 각각 나타낸다. 소성가공 공정은 대부분이 준 정적 상태에서 이루어 지므로 실제 계산에 있어서는 속도의 시간에 대한 미분 항을 무시하였으며, 중력의 영향 또한 없다고 가정하였다.

3.3 해석절차

이상에서 서술한 방정식들을 이용하여 유한요소 해석 시 각 절점에서의 고상률 변화를 계산하는 구체적인 절차는 다음과 같이 요약된다.

(1) 하나의 단일상처럼 취급된 반응용 혼합체에 대한 변형해석을 수행하므로써 각 절점에서의 속도벡터와 응력텐서를 구한다.

(2) (1)에서 미리 구한 값들을 식 (13)에 대입한 후 풀어서 절점의 압력구배 ∇p 를 계산한다.

(3) (2)의 결과와 식 (12)의 시간에 대해 차분화 된 형태를 이용하여 시간 $t + \Delta t$ 에서의 고상률을 계산한다. 식 (12)의 시간에 대한 차분 형태는 다음과 같다.

$$f_{i+\Delta t}^s = f_i^s - \left[\nabla \cdot \left(f_i^s \mathbf{v}_i + \frac{f_i^s \rho_i}{\rho} \frac{k}{\mu} (\nabla p)_i \right) \right] \Delta t. \quad (14)$$

4. 해석결과 및 고찰

4.1 해석조건

본 연구에서 제안한 고상률 증분 알고리즘을 축대칭 및 2차원 유한요소 해석 코드인 DEFTSEM2.0에 적용하여 반응용 Sn-Pb 합금의 등온 업셋팅 공정을 해석 해 보았다. 이 때, 마찰상수와 시편 압축속도를 변화 시키면서 해석을 수행하였으며, 해석에 관련된 물성치 중 투과율은 다양한 합금의 반응용 상태에 대해서는 잘 알려져 있지 않기 때문에 문헌⁽¹³⁾에 나와 있는 관계식을 사용하였으며 이는 다음과 같다.

Table 1 Material properties and process analysis conditions

Viscosity, μ		0.0025 Pa · s
Flow stress $\bar{\sigma} - \dot{\epsilon}$		$\bar{\sigma} = 1.7\dot{\epsilon}^{0.23}$ MPa
Initial solid volume fraction, $(f^s)_0$		0.63
Friction factor m_f		0.1, 0.3, 0.6, 1.0
Compressive strain rate $\dot{\epsilon}$		$1.33 \times 10^{-2}, 1.33 \times 10^{-1}, 1.33 \times 10^0$ (s ⁻¹)

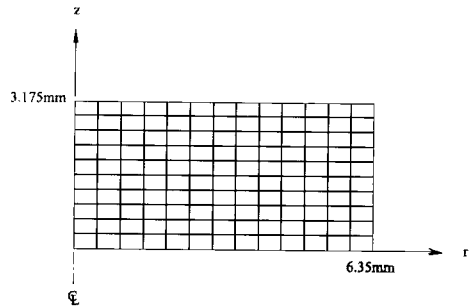


Fig. 2 Specimen geometry and initial mesh

$$k = k_0 (f^l)^\lambda = \frac{1}{4.2(6/D_p)} (f^l)^\lambda. \quad (15)$$

여기서, D_p 는 고상 결정립의 크기 또는 일차 수지상 가지의 팔 간격(primary dendrite arm spacing)이며, k_0 는 초기 투과율이다. λ 는 통상적으로 2~3의 값을 갖게 되는 데 초기 조직상태가 수지상 조직(dendritic structure)일 경우 $\lambda = 2$, 구상조직(globular structure)일 경우에는 $\lambda = 3$ 을 갖는다고 볼 수 있다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 해석결과를 Pinsky 등⁽¹⁴⁾의 실험결과와 비교해 보기 위해서 $\lambda = 2$ 를 택하였고, $D_p = 200 \mu\text{m}$ 로 가정하였다. 초기 투과율 값은 Toyoshima 등^(2, 3)이 사용한 값과는 상당히 큰 차이를 나타내었다. 이 외의 나머지 물성치 및 해석에 사용된 유동응력식⁽¹⁵⁾은 Table 1에 정리하여 나타냈으며, 시편의 치수와 초기 요소망은 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 이 때, 시편은 원기둥 형상이므로 1/4 부분에 대해서만 대칭해석을 하였다.

4.2 결과 및 고찰

Fig. 3은 압축 변형률 속도가 $\dot{\epsilon} = 1.33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 인 경우 공칭 변형률(engineering strain) $e = 0.18$ 에 대해 마찰인자 변화에 따른 고상률 분포를 각각 나타내는 그림

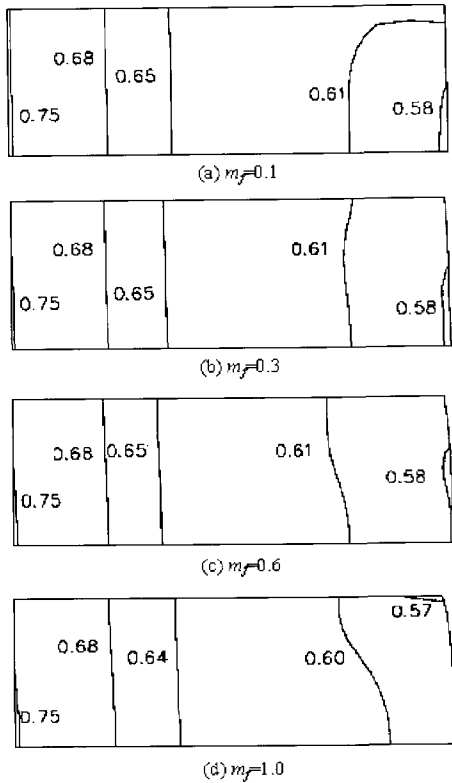


Fig. 3 Solid fraction distributions of the compressed specimen with various friction factors ($\dot{\epsilon} = 1.33 \times 10^{-2} s^{-1}$, $e = 0.18$)

이다. 여기서 시편은 대칭성을 갖기 때문에 오른쪽 절반 및 윗쪽 1/4 부분에 대해서만 분포도를 작성하였다. 시편 내부쪽에서의 고상률 분포 경향은 마찰인자가 작을수록 균일한 경향을 보이고 있으며, 비구속 표면쪽에서의 고상률 분포는 마찰인자가 증가할수록 초기 고상률 보다 낮은 값을 나타내는 영역이 확산되어 있음을 관찰 할 수 있다. 특히, 마찰인자가 클수록 시편 중앙부의 최고 고상률 값의 영역이 줄어들는 대신, 비구속 표면쪽의 저고상률 영역이 확산되는 현상은 본 연구에서 제시하고 있는 알고리즘이 비압축성을 전제로 하여 혼합이론으로부터 유도된 연속방정식에 그 근본을 두었기 때문이다. 한편, Pinsky 등⁽¹⁴⁾이 압축 다이의 거칠기를 변화 시키면서 실험한 결과에서도 이와 같은 경향을 나타내었으며, 이는 마찰인자가 클수록 고상의 반경방향 유동은 억제되는 반면, 상대적으로 액상의 유동은 쉬워지기 때문에 일어나는 현상으로서 본 해석에서도 마찰의 영향을 적절히 묘사하고 있음을 알 수 있다.

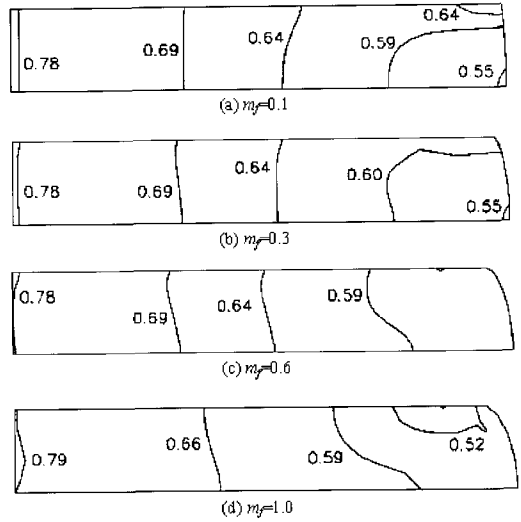


Fig. 4 Solid fraction distributions of the compressed specimen with various friction factors ($\dot{\epsilon} = 1.33 \times 10^{-2} s^{-1}$, $e = 0.52$)

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 해석조건으로써, $e = 0.52$ 인 경우에 대해 마찰인자 변화에 따른 고상률 분포를 나타내는 그림이다. 각 경우 모두 $e = 0.18$ 일 때 보다 액상의 유출현상이 증가하는 경향을 보였고 특히, 마찰인자 $m_f = 1.0$ 인 경우 최저 고상률 영역이 다이와 접촉하는 부분에서, 이 보다 낮은 마찰인자 값의 경우에는 대칭면 쪽에서 최저 고상률 분포를 보이고 있다. 이는 다이와 접하는 부분의 고상률은 마찰인자가 클수록 변형저항을 많이 받게 되고 상대적으로 유동이 쉬운 액상이 증가하게 되는 현상 때문이다. 압축성 이론을 이용한 해석결과들⁽²⁻⁴⁾은 본 해석과는 반대의 경향을 보이고 있는 데 이 또한 고상의 치밀화 현상만을 묘사한 데서 기인하는 결과이며 실제 Suery와 Flemings⁽¹⁵⁾의 실험결과를 통해서도 다이와 접촉하는 부분에 액상이 많이 몰려 있음을 확인할 수 있었다. 이상의 결과들로부터 본 연구에서 제안한 고상률 증분 알고리즘이 기존의 해석결과들 보다 물리적으로 타당한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 5는 Kiuch 등⁽¹⁶⁾의 압축성 소성이론에 바탕을 둔 해석사례를 나타내는 그림이다. 이 그림에서 점선으로 표시된 부분은 반응용 상태가 아닌 완전한 고체상태 즉, 비압축성이 부여된 상태로 해석하였을 경우 예측되는 비구속 표면인 데 실선과의 차이만큼이 액상이 유출된 양이라고 보고있다. 따라서, 이와 같은 접근법은 고상입자들의

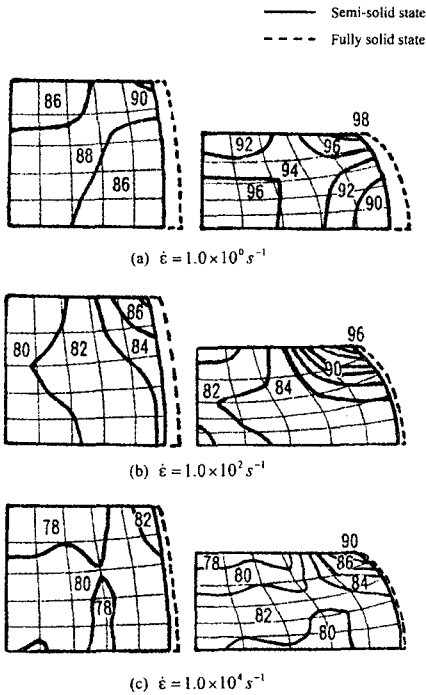


Fig. 5 Solid fraction distributions of the compressed specimen at reductions of height 25% and 50% predicted by Kiuch, et al. (16)

치밀화 현상만 모사할 따름이지 유출되는 액상이 어떤 부분에서 얼마만큼 분포할 것인지는 구체적으로 예측하기 어려운 문제점을 지니고 있으며, Fig. 3 및 Fig. 4를 고려해 보았을 때, 본 연구에서 시도한 접근법은 이를 극복한 것이라고 할 수 있다. 여기서, 문헌(16)에 나타난 해석과 관련하여 구체적인 해석조건은 언급을 하지 않은 관계로 동일한 조건에서의 해석결과를 비교할 수 없었다.

Pinsky 등(14)은 반응용 Sn-15%Pb 합금의 압축실험 후 시편 중심부에서 반경방향으로 액상률을 측정하였는데 본 연구에서는 절점의 z방향 좌표가 0인 모든 절점들에서 계산된 액상률을 $e = 0.18$ 과 $e = 0.52$ 의 두 변형률 단계에 대해서 이들의 결과와 비교해 보았다. 이 때, 압축 변형률 속도는 $\dot{\epsilon} = 1.33 \times 10^{-2} s^{-1}$ 이다. 여기서, Pinsky 등은 압축 실험 시 약 $e = 0.3$ 이 될 때, 시편에서 균열현상이 일어났다고 보고하였으며 본 연구에서는 균열이 일어난 이후의 실험에 대해서는 결과의 신뢰성에 문제가 있다고 판단하여 $e = 0.52$ 이상의 변형률에 대해서는 결과를 비교 하지 않았다. Fig. 6은 본 연구에서 계산된 결

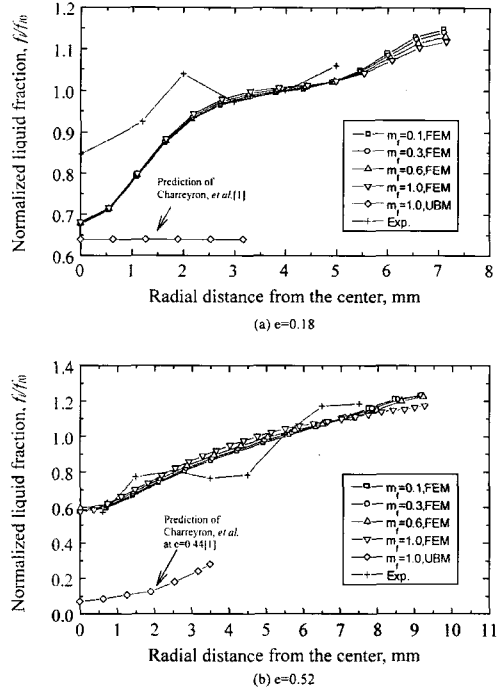


Fig. 6 Normalized liquid fraction vs. radial distance from the center of the dendritic Sn-15 pct Pb specimen compressed at various reductions of height and friction conditions: (a) $e=0.18$ and (b) $e=0.52$

과와 Pinsky 등(14)의 결과 및 Cherreyron과 Flemings(11)의 상계해석 결과들을 비교하는 그래프로서 실험값과 본 연구의 해석값이 비교적 양호하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 Cherreyron과 Flemings(11)의 결과들은 많은 오차를 나타내었다. 여기서, Fig. 6(b)는 $e = 0.52$ 에 대한 해석 및 실험결과들을 비교한 것이지만 이 변형률에 대한 Cherreyron과 Flemings(11)의 상계해석 결과는 얻을 수 없었으므로, $e = 0.52$ 에 가장 가까운 $e = 0.42$ 에서의 값과 비교해 본 것이다. 이상의 비교로부터 본 연구에서 제안한 고상률 증분 알고리즘은 정성적인 면과 더불어 정량적으로도 개선된 결과를 주고 있음을 확인할 수 있었다.

한편 성형속도에 따른 고상률의 분포경향을 살펴보기 위해서 마찰인자는 $m_r = 0.3$ 으로 고정시킨 후 변형률 속도를 $\dot{\epsilon} = 1.33 \times 10^{-2} s^{-1}$, $1.33 \times 10^{-1} s^{-1}$ 및 $1.33 \times 10^0 s^{-1}$ 의 세가지 경우로 변화 시키면서 해석해 보았다. Fig. 7은 $e = 0.18$ 단계에서 각 조건에 따른 고

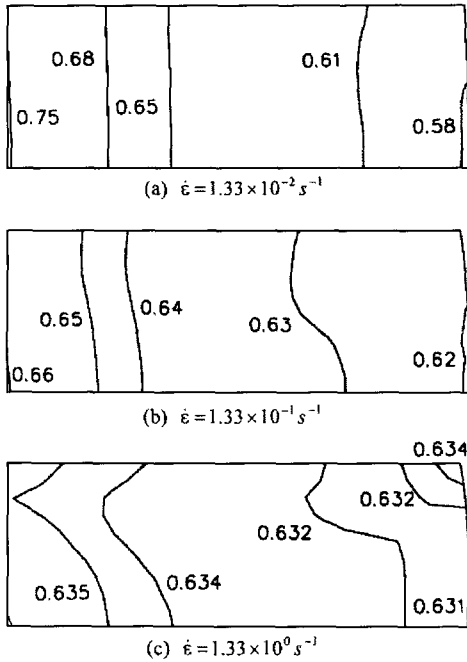


Fig. 7 Solid fraction distributions of the compressed specimen with various strain rates ($m_j=0.3, e=0.18$)

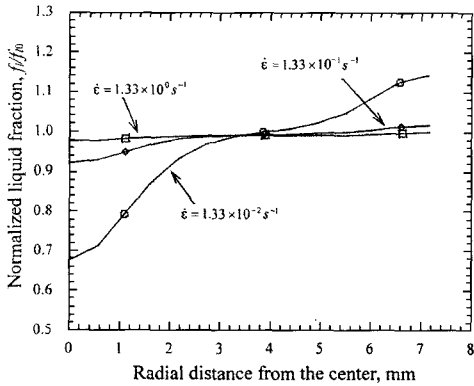


Fig. 8 Normalized liquid fraction vs. radial distance from the center of the dendritic Sn-15 pct Pb specimen compressed with various strain rates ($m_j=0.3, e=0.18$)

상률 분포를 나타내는 그림으로서 변형률 속도가 증가할수록 시편 내부의 고상률 분포는 균일해 짐을 알 수 있다. Fig. 8은 Fig. 6의 방법과 마찬가지로 반경방향 액상률 변화를 변형률 속도에 따라 비교한 그래프로서 변형률 속

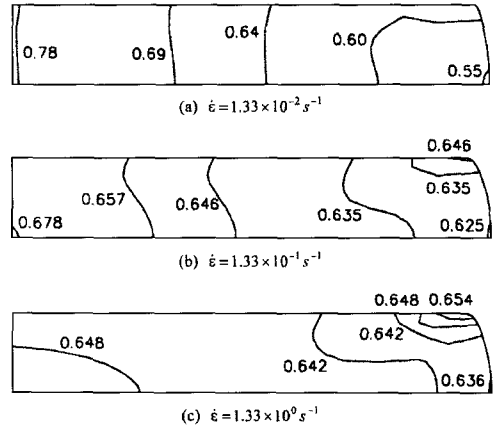


Fig. 9 Solid fraction distributions of the compressed specimen with various strain rates ($m_j=0.3, e=0.52$)

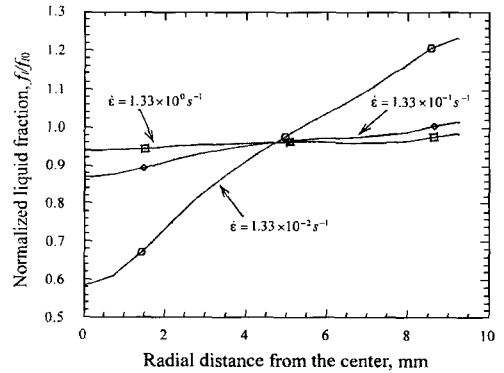


Fig. 10 Normalized liquid fraction vs. radial distance from the center of the dendritic Sn-15 pct Pb specimen compressed with various strain rates ($m_j=0.3, e=0.52$)

도가 증가할수록 반경방향 액상률 구배는 거의 나타나지 않았다. 이러한 경향들은 Pinsky 등⁽¹⁴⁾과 Suery 등⁽¹⁵⁾의 실험을 통한 고찰에서도 검증된 바 있으며 해석결과가 실제 반응용 재료의 고상률 혹은 액상률 분포 거동을 적절히 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 $e = 0.52$ 단계에서 시편내부의 고상률 분포 및 반경방향의 액상률 변화를 나타내는 그림들로서 속도가 낮은 경우에는 액상의 유출현상이 보다 증가된 경향을 나타내었으며, 이와는 반대로 속도가 빠를 경우에는 변형의 진행에 관계없이 균일한 고상률 혹은 액상률 분포를 계속 유지하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통해서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제안한 고상률 증분 알고리즘은 정성적인 면 뿐만 아니라 정량적인 면에서도 기존의 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 제안한 고상률 증분 알고리즘은 기존의 여러 방법에 비해서 보다 타당한 물리적 의미를 가짐을 알 수 있었다.

(3) 과거 압축성 이론을 바탕으로 전개되었던 반응용 재료의 변형거동 예측은 비압축성 조건을 유지하는 하나의 단일상과 같은 관점에서 다른 접근이 시도되어야 할 것으로 사료된다.

향후, 본 연구에서 제안한 알고리즘과 함께 반응용 재료의 변형을 적절히 표현할 수 있는 구성방정식의 개발 및 물성치 평가가 이루어 진다면 반응용 가공 공정설계에 대해 많은 정보들을 알 수 있을 것이며, 아울러 반응용 가공 기술의 실용성을 높여줄 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 G7 차세대자동차기술 개발사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) S. Toyoshima, 1994, "A FEM Simulation of Densification in Forming Processes for Semi-Solid Materials", *The 3rd Int'l Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp.47~62.

(4) 강충길, 윤종훈, 1996, "반용용재료의 압축거동 및 액상의 유동을 고려한 유한요소해석", *대한기계학회 논문집*, 제20권, 12호, pp.3715~3725.

(5) A. Zavaliangos and A. Lawley, 1995, "Numerical Simulation of Thixoforming", *J. Mater. Engineering And Performance*, Vol. 4(1), pp.40~47.

(6) T. C. Nguyen, D. Favier and M. Suery, 1994, "Theoretical and Experimental Study of the Isothermal Mechanical Behaviour of Alloys in the Semi-Solid State", *Int'l J. Plasticity*, Vol. 10, No. 6, pp.663~693.

(7) P. Kumar, C. L. Martin and S. Brown, 1993, "Shear Rate Thickening Flow Behavior of Semisolid Slurries", *Metall. Trans. A*, Vol. 24A, pp.1107~1116.

(8) N. Kim, J. H. Yoon, D. Li, and S. I. Oh, 1997, "Flow Simulation of Semisolid Forging by FEM", *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, pp.183~186.

(9) 윤종훈, 김낙수, 김현영, 김중재, 임용택, 1997, "반용용상태에서 재료의 변형거동에 관한 유한요소해석", *한국소성가공학회 논문집*, 제6권, 4호, pp.319~328.

(10) 윤종훈, 김낙수, 임용택, 이준두, 1998, "강열점소성 유한요소법을 이용한 반응용 단조시 성형인자들의 영향에 관한 연구", *한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집*, pp.159~164.

(11) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, *Metal forming and The Finite Element Method*, Oxford University Press.

(12) R. M. Bowen, 1976, *Theory of Mixtures*, in Eringen, A. C., III(Ed.), *Continuum Physics*, Academic Press, New York.

(13) D. R. Poirier and G. H. Geiger, 1994, *Transport Phenomena in Materials Processing*, TMS Publication.

(14) D. A. Pinsky, P. O. Charreyron and M. C. Flemings, 1984, "Compression of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates", *Metall. Trans. B*, Vol. 15B, pp.173~181.

(15) M. Suery and M. C. Flemings, 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys", *Metall. Trans. A*, Vol. 13A, pp.1809~1819.

(16) M. Kiuch, M. Yanagi and K. Hukushima, 1994, "Numerical Simulation of Deformation Behavior of Semi-Solid Metals", *The 1994 JSTP Conf.*, pp.437~450.