

Two-Phase Flow 를 이용한 A356 합금의 충전거동 해석

설동언¹, 강충길²

Analysis of A356 alloys filling behavior considering Two-Phase flow

D. E. Seol, C. G. Kang

Abstract

A semi-solid forming technology has some advantages compared with conventional forming processes such as die casting, squeeze casting and hot/cold forging. In this study, the numerical analysis of semi-solid filling has been studied with solid fraction $f_s = 30\%$ of A356 aluminum alloys. The finite difference program of two-phase flow model of Navier Stokes' equation coupled with heat transfer and solidification has been developed to predict a filling pattern, liquid segregation and temperature distribution of semi-solid metals. It gives die filling patterns and final solidification area. It can predict mechanical properties of semi-solid forming processes.

Key Words : Rheology Material(반응용 재료), Two-Phase Flow(이상유동), Numerical Analysis(수치해석)

1. 서론

반응용 가공이란 응고시 고상과 액상이 함께 존재하는 반응용 상태에서 재료를 성형하는 방법이다.^[1] 반응용 성형은 용융상태에서 금속보다 높은 점성으로 인해 유동형태가 난류로 발달하지 않는다. 또한 일반 주조작업에서 일어나는 응고에 의한 수축률이 적고 낮은 온도에서의 작업으로 인한 금형의 열피로도를 줄일 수 있으며, 적은 하중으로도 복잡한 형상의 부품을 만들어 낼 수 있는 등의 장점 등을 지니고 있다. 그러나 아직 소재의 충전 및 응고 과정에 관한 연구에서는 고액 공존재료에 대한 모델이 확립되지 않은 상태여서 실제 물리적 현상을 구현하기 위한 수치 해석적인 접근들이 시도되고 있다. 이상유동을 고려한 레오로지 해석은 고상과 액상의 유동을 각각 해석하여 비교할 수 있는 장점이 있기 때문에 반응용 재료의 성형공정 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. Burgos^[2] 등은 이상유동(Two Phase) 모델의 개

념을 도입하여 레오로지 해석을 시도하고 있으나 응고현상까지 고려하지 못하고 있으며, 해의 정도도 실험을 통하여 확인하지 못하였다. Modigell^[3] 등도 이상유동모델을 이용하여 고상을 40~60%의 재료에 대하여 유한요소법을 사용하여 해석하고 있으나 성형 중 구상화의 크기 변화 및 응고 현상들을 고려하지 못하고 있다. 레오로지 가공에 있어서 가장 중요한 것은 소재의 특성의 고찰과 소재가 다이에 충전될 때 고상을 분포, 압력 및 속도 분포 등을 표현하는 것이 제품개발 측면에서 가장 중요하나 아직까지 연구가 수행되지 않고 있다.

본 연구에서는 소재와 다이 사이의 벽면 경계에서 마찰계수를 고려하지 않고 Slip 조건으로 가정하여 전산모사 기법을 사용하여 이상유동을 모델링하여 해석하였다. 그리하여 레오로지 소재의 충전거동과 금형 내의 온도분포, 액상영역과 고상영역에서의 속도장을 분석하여 알아보았다. 또한 이러한 유동특성을 향후 금형설계 및 결합예측에 이용토록 하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. 부산대학교 기계공학부

2. 지배방정식

레오로지 소재의 특성을 고려하기 위해서 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 액상영역과 고상영역으로 각각 분리하여 이론해석을 전개하였다. 또한 주형내의 유동 및 열적 특성을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하여 기본방정식과 이산화 방정식을 수립하였다.

- 1) 유동은 2 차원, 비압축성 층류모델이다.
- 2) 점성을 제외한 반응용 소재의 열물성치는 일정하다.

- 연속방정식(Continuity equation)

$$\text{고상} : \frac{\partial(f_s)}{\partial t} + \nabla \cdot [f_s V_i] = 0 \quad (1)$$

$$\text{액상} : \frac{\partial(1-f_s)}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-f_s)V_i] = 0 \quad (2)$$

- 운동량보존방정식(Conservation of Momentum)

$$\text{고상} : \frac{\partial(\rho f_s V_i)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho f_s V_i V_j] = \rho f_s g + \nabla \cdot \sigma_s \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{액상} : \frac{\partial(\rho(1-f_s)V_i)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(1-f_s)V_i V_j] \\ = \rho(1-f_s)g + \nabla \cdot \sigma_l \end{aligned} \quad (4)$$

- 구성방정식(Constitutive equation)

$$\text{고상} : \sigma_{sij} = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{sj}}{\partial x_i} \right) - P \delta_{sij} \quad (5)$$

$$\text{액상} : \sigma_{lij} = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\partial u_{li}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{lj}}{\partial x_i} \right) - P \delta_{lij} \quad (6)$$

- 2 차원 비정상 대류열전달 방정식

$$\rho c_e \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] + \rho c_p [(V \cdot \nabla)T] = \lambda \nabla^2 T \quad (7)$$

고상율과 온도와의 관계를 파악하기 위하여, 액체는 완전혼합으로 보고 고체는 무확산으로 보는 Scheil 의 식을 사용하였다.⁽⁴⁾

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_f - T}{T_f - T_m} \right)^{\frac{1}{k_0 - 1}} \quad (8)$$

액상의 경우에는 전단속도와 유동조건에 거의 무관하기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_f = \mu \quad (9)$$

고상과 액상영역에서의 Navier-Stokes 방정식 식(3)과 식(4)를 합치면 식(10)과 같은 단상유동에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho} \bar{u} = \bar{\rho} g + \nabla \tau \quad (10)$$

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (11)$$

여기서, $\mu = \mu_s f_s + (1-f_s)\mu_l$

점성값 μ 를 고상영역의 점성값(μ_s)와 액상영역의 점성값(μ_l)으로 각각 분리하여 계산하였다. 따라서 반응용 재료의 점성 μ 에서 순수액상영역의 점성 μ_l 값을 뺀 나머지가 고상영역에서의 점성값이 된다.

$$\mu_s = \{ \mu - (1-f_s)\mu_l \} / f_s \quad (12)$$

반응용 재료의 점성값은 일반적으로 사용되는 점성식인 Ostwald Model 식으로부터 구할 수 있으며⁽⁵⁾, 반응용 영역 내에 있는 고상영역의 점성은 식(12)로부터 구할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

Table 1 Thermal properties used to simulate semi-solid die casting of sample by using A356 alloy

Parameters	Symbol	Unit	Values
Solidus temperature	T_s	°C	547
Liquidus temperature	T_l	°C	617
Latent heat	Q	kJ/kg	430
Initial billet temperature	T_b	°C	583
Initial die temperature	T_d	°C	250
Heat transfer coefficient between material and die	h_m	W/m ² K	1000

Fig. 1(a)는 실제 실험에서 사용된 다단형상의 모델이다. 실제 실험에서는 소재의 고상률과 게이트 형상의 변화에 따른 충전거동을 파악하기 위해 사용되었다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 형상이다. 실제 실험과 이상유동해석과의 비교분석을 위해 실험에서와 동일한 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

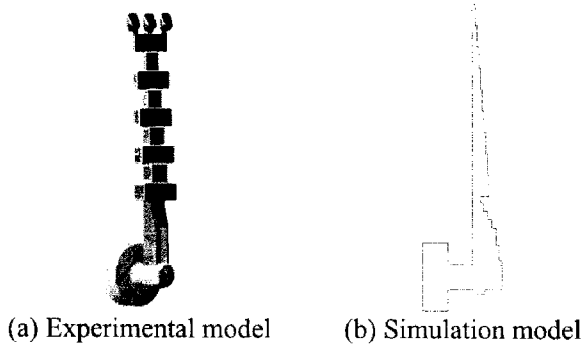


Fig. 1 The shape of each model

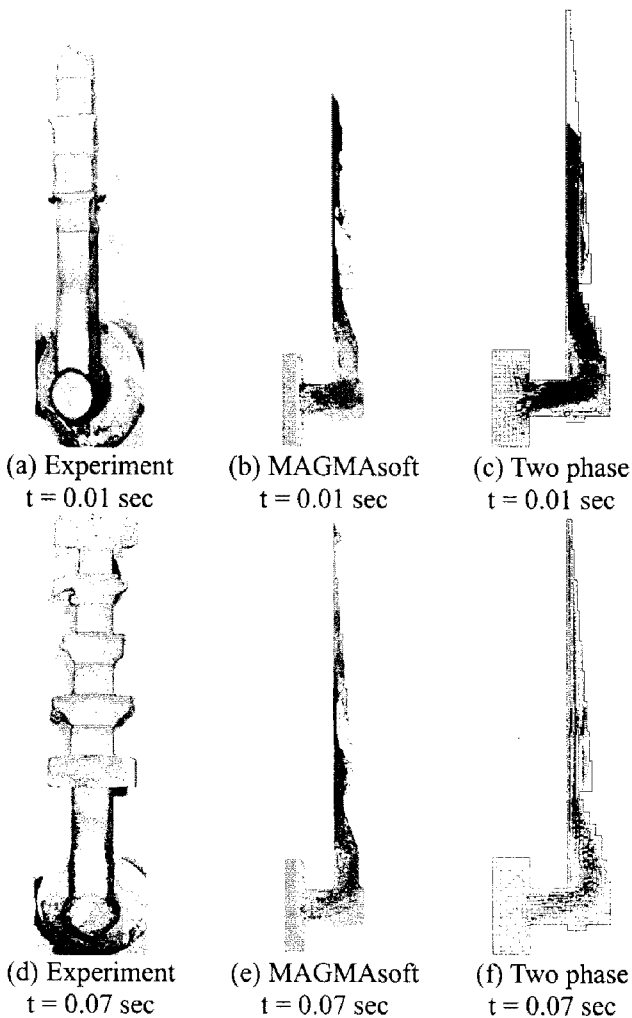


Fig. 2 Comparisons of filling pattern.

Fig. 2(a) ~ (f)는 초기조건이 고상율 30%, 금형 온도 250 °C, 펀치속도 $V_p = 300$ mm/sec 일 때의 충전양상을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)~(c)는 $t = 0.01$ sec 일 때의 충전양상이다. 이 경우 소재의 주입속도가 빠르기 때문에 중앙부의 충전이 먼저 일어남을 알 수 있다. Fig. 2(d)~(f)는 충전이 완료되기 직전인 $t = 0.07$ sec 일 때의 충전양상이다. 이 경우도 중앙부의 충전이 먼저 일어난 후 좌우 측면쪽에서의 소재 충전이 일어남을 확인할 수 있다.

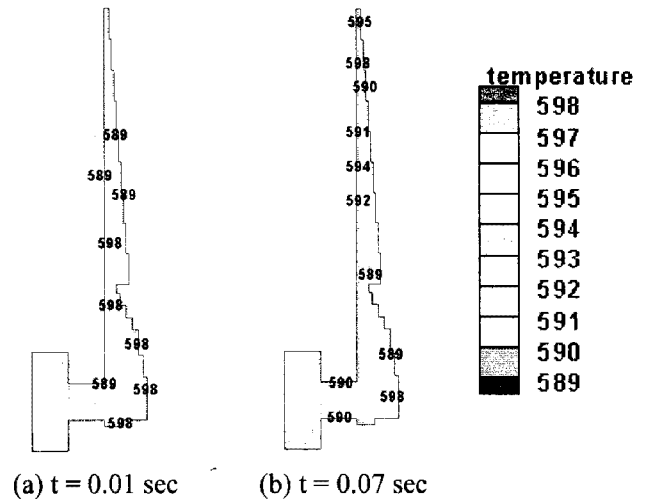


Fig. 3 Temperature profile of two phase flow.(°C)

Fig. 3(a), (b)는 소재의 충전거동에 따른 온도분포를 Two Phase flow 를 이용하여 나타낸 것이다. 소재의 유입이 계속되는 중앙부위가 상대적으로 높게 나타났다. 그리고 금형과 접촉하는 부분의 온도가 접촉하지 않는 부분보다 높은 온도를 나타냄을 알 수 있다. 각 다단부 끝부분에서 소재가 금형의 상부 벽면을 따라 충전이 일어나는 것을 알 수 있는데 이로 인해 각 다단부의 중앙과 끝단부의 중간 사이에서 열점에 의한 구조결합이 예상된다.

Fig. 4(a), (b)는 Two phase flow 에서 고상영역의 속도분포와 액상영역의 속도분포를 나타낸 것이다. 레오로지 소재가 같은 부위에 유입되었지만 액상의 속도가 고상의 속도보다 빠른 것을 알 수 있다. 이러한 속도편차를 통해 구조부에서의 액상 편석 조직의 발생을 예상할 수 있다.

4. 결론

다단형상의 모델에 대하여 금형 내부에서 소재의 충전거동 및 속도장 분포를 Two Phase flow 를 이용하여 해석하고 실제 실험과 MAGMAsoft 를 이용한 해석결과와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Two Phase flow 를 이용하여 다단형상에서의 충전거동을 해석한 결과 실제실험과 MAGMAsoft 를 이용한 해석과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

(2) 다단형상의 충전양상에서 온도구배에 따른 열섬을 통한 주조결함을 예측할 수 있다. 이를 통해 특정부위에서의 주조결함발생 위치를 예상할 수 있다.

(3) Two Phase flow 를 이용하여 고상영역과 액상 영역에서의 속도편차를 확인할 수 있다. 속도편차는 액상 편석의 발생을 야기하며, 금형형상 수정을 통해 액상편석의 발생을 예방할 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부 지원하의 국가지정연구실 - Thixo · Rheo 성형연구실(NRL) - 사업 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] M. C. Flemings, 1991, Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State, Metal. Trans., 22A, pp. 957~981.
- [2] G. R. Burgos and A. N. Alexandrou, 1998, Two-Phase Model of Flow of Semi-Solid Materials, The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloy and Composites, pp. 217 ~ 224.
- [3] M. Modigell and J. Koke, 1998, Two-Phase Model for Metal Alloys in the Semi-Solid State, The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloy and Composites, pp. 317 ~ 326.
- [4] Ohnaka, I., 1985, Introduction of Compute Heat and Solidification Analysis, MARUZEN. pp. 167~208
- [5] Kang. C. G., Lee. Y. C., 1999, Effect of Viscosity Variation on Flow Characteristic in Thixofforming Process of Semi-Solid Aluminum Alloys, J. of the Korea Society for Technology of Plasticity, Vol. 8, No. 2, pp. 188~199.

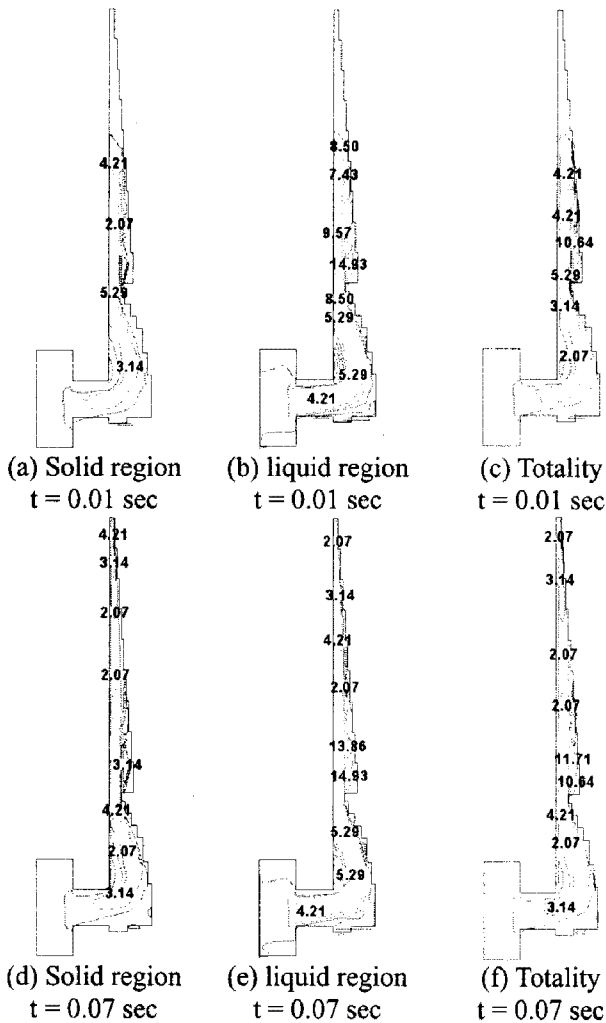


Fig. 4 Comparisons of the velocity profile between solid region and liquid region.(x10⁴ mm/sec)

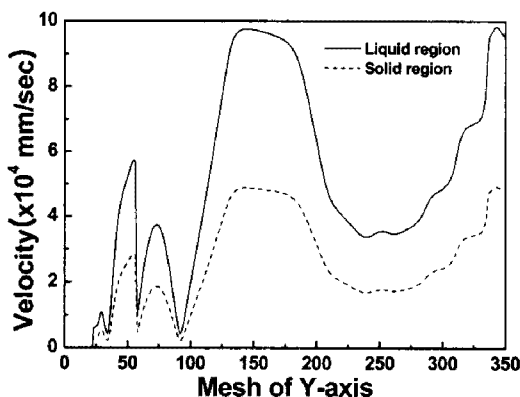


Fig. 5 The graph of velocity profile at mesh of X-axis is 64 and t = 0.07 sec.

Fig. 5 는 금형 중앙부에서의 고상영역과 액상 영역의 속도 분포를 나타낸 것이다. 액상영역의 속도가 고상영역의 속도보다 빠른 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다.