

알루미늄재료의 Rheo-forming을 위한 성형공정해석

서판기* · 정영진* · 정경원** · 강충길***

Process Analysis for Rheo-Forming of Aluminum Materials

P. K. Seo, K. Y. Jung, Y. J. Jung and C. G. Kang

Abstract

Two-dimensional solidification analysis during rheology forming process of semi-solid aluminum alloy has been studied. Two-phase fluid flow model to investigate the velocity field and temperature distribution is proposed. The proposed mathematical model is applied to the die shape of the two type. To calculate the velocities and temperature fields during rheology forming process, the each governing equation correspondent to the liquid and solid region are adapted. Theoretical model on the basis of the two-phase flow model is the mixture rule of solid and liquid phases. This approach is based on the liquid and solid viscosity.

Key Words : Semi-Solid Materials, Two-Phase Flow, Liquid Segregation, Semi-Solid Forging

1. 서 론

레올로지 재료의 성형공정은 소재를 금형 내에 충전시킨 후 응고시키는 공정으로써 자유표면을 포함하는 충전 과정과 상변화를 거치는 응고과정 등 복잡한 경로를 거치므로 엄밀하게 수치해석을 하기가 어렵다. 그러나, 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 용탕의 유동 및 응고해석을 통하여 성형공정의 정량적인 해석이 가능하며, 고상과 액상의 거시적인 분리현상을 예측할 수 있는 레올로지(rheology) 이론을 반용융 재료에 적용하여 해석하고자 하는 연구가 시도되고 있으며, 반용융재료의 성형공정해석시 재료의 유동특성을 보다 정확히 파악할 수 있는 장점이 있다. 소재의 충전 및 응고 과정에 관한 연구에서는 고액 공존 재료에 대한 모델이 확립되지 않은

상태에서 실제 물리현상을 구현하기 위한 수치 해석적 접근들이 시도되고 있다^(1,2).

Burgos등⁽³⁾은 Two Phase Model의 개념을 도입하여 레올로지 해석을 시도하고 있으나 응고현상까지 고려하지 못하고 있다. Modigell등⁽⁴⁾도 Two Phase Model을 이용하여 고상율 40~60%의 재료에 대하여 유한요소법을 사용하여 레올로지 해석을 하였으나 성형 중 응고 현상 등을 고려하지 못하고 있다. 저고상율인 경우, Kang⁽⁵⁾은 이상 유동(two-phase)의 해석결과를 MAGMA s/w의 해석결과와 비교검토하여 해석방법의 타당성과 문제점을 제시하였다. 본 논문에서는 레올로지 이론식을 이용하여 성형공정 중 고상율의 예측, 속도분포 및 응고해석을 수행하였다. 또한 이론해석에서 구한 레올로지 재료의 유동 특성을 이용하여 향후 금형설계에 이용하도록 하였다.

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 연합철강(주) 설비합리화팀

*** 부산대학교 기계공학부

2. 이론해석

2.1 지배방정식과 점성식

레올로지 재료의 특성을 고려하기 위해서 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 액상영역과 고상영역으로 각각 분리하여 이론해석을 전개하였다. 또한 주형 내의 유동 및 열적 특성을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하여 기본 방정식과 이산화방정식을 수립하였다.

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

- 연속방정식(Continuity equation)

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

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

- 운동량보존방정식(Conservation of Momentum)

$$\begin{aligned} \text{고상 : } \frac{\partial \rho f_s V_s}{\partial t} + \nabla \cdot \rho f_s V_s V_s \\ = \rho f_s g + \nabla \cdot \sigma_s \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{액상 : } \frac{\partial \rho(1-f_s) V_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho(1-f_s) V_f V_f \\ = \rho(1-f_s) g + \nabla \cdot \sigma_f \end{aligned} \quad (4)$$

- 구성방정식(Constitutive equation)

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

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

또한 2차원 비정상 대류열전달 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

고상과 온도와의 관계를 파악하기 위하여, 액체는 완전혼합으로 보고 고체는 무확산으로 보는 Scheil의 식을 사용하였다⁽⁶⁾.

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

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

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

반응용 AI합금계열에 대하여 사용할 수 있는 고상영역의 점성식을 제안하기 위하여 기존의 AI합금 계열의 반응용 점성식을 가지고 다음과 같이 고상영역의 점성식을 제안하였다.

고상과 액상영역에서의 Navier-Stokes 방정식 식(3)과 식(4)을 서로 합치면 식(10)와 같은 단상유동(Single Phase)에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

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

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

$$\text{여기서, } \mu = (1-f_s)\mu_f + f_s\mu_s$$

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

$$\mu_s = (\mu - (1-f_s)\mu_f)/f_s \quad (12)$$

반응용재료의 점성값 μ 는 일반적으로 사용되는 점성식인 Ostwald Model식으로부터 구할 수 있으며⁽⁷⁾, 반응용영역 내에 있는 고상 영역의 점성 μ_s 는 식(12)의 μ 와 μ_f 로부터 구할 수 있다.

2.2 경계조건

자유 표면에서 공기의 밀도가 용융금속보다 매우 낮은 경우 전단응력조건과 수직응력조건으로 나타낼 수 있다.

전단응력 조건 : 자유표면에서의 전단응력은 항상 0 이어야 한다.

$$\tau = \mu_L \left(\frac{\partial u_n}{\partial x_t} + \frac{\partial u_t}{\partial x_n} \right) = 0 \quad (13)$$

수직응력조건 : 자유표면에서의 수직응력은 항상 주어진 응력과 평행을 이루어야 한다.

$$\sigma_n = -P + 2\mu_L \frac{\partial u_n}{\partial x_n} = -P_0 \quad (14)$$

자유표면을 통한 냉각효과는 주형벽면을 통한 냉각 효과에 비해 무시할 정도로 적기 때문에 응고해석과정에서 고려하지 않았다. 유동해석을 위한 경계조건은 대칭단면에서는 식(15)과 같이 미끄럼 조건(free-slip condition)을 사용하였고, 나머지 금형의 표면에서는 식(16)과 같이 고착조건(non-slip condition)을 사용하였다.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (\text{on the symmetric cross section}) \quad (15)$$

$$u_t = 0 \quad (\text{on the die surface}) \quad (16)$$

열전달 해석을 위한 경계조건은 대칭면(Fig. 1(a)의 \overline{AJ} , Fig. 3(a)의 \overline{AS}), 주입구 쪽(Fig. 1(a), Fig. 3(a)의 \overline{AB}), 그리고 자유표면(Fig. 4의 \overline{AB})에서는 식(17)과 같이 단열조건으로 하였고, 금형과 접촉하는 부분의 열전달은 식(18)과 같이 온도가 일정한 대류열전달로 가정하였다.

$$q_n = 0 \quad (\text{on the symmetric cross-section free surface and gate}) \quad (17)$$

$$q_n = h(T_\infty - T) \quad (\text{on the die surface}) \quad (18)$$

충전 완료시간이 가장 긴 경우, $t_{fill} = 1.0\text{sec}$ 정도이므로 충전중 금형의 온도 상승으로 열유속(heat flux)의 변화는 크지 않다고 가정하여 금형 온도 T_d 를 일정하게 하였다. 또한 충전 중에는 반응용재료에 대한 가압효과가 크지 않기 때문에 대류열전달 계수도 일정하다고 가정하였다. 계산에 사용되어진 대류열전달계수는 Ohnaka⁽⁶⁾가 알루미늄 용탕이 금형표면을 흐를 때 $h = 1260 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 제안한 값을 본 연구에서 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 이론 해석의 모델은 단순 모델(Model I)과 자동차·가전제품에 이용되는 scroll 형상의 단면을 가진 모델 II에 대하여 계산을 수행하였다.

3.1 Model I의 해석 결과 및 고찰

Fig. 1(a)~(d)는 Model I의 경우 초기조건이 고상율 30%, 금형온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$, 편치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일 때의 충전 양상을 나타낸 것이다. 주입구에서 유동하는 소재와 하부 다이쪽에서 유동하는 소재가 서로 합쳐져 캐비티 중심부위에 공간이 생긴 후 충전이 완료가 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2(a)~(d)는 Model I의 경우 초기 조건이 금형온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$, 편치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일 때의 충전 거동에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 충전 결과로부터 금형과 처음 접촉하는 주입구 바닥 부분(Fig. 1의 IJ)의 온도와 하부다이의 중간 부위가 $T=588^\circ\text{C}$ 로 가장 낮게 나타났다.

3.2 Model II의 해석 결과 및 고찰

Fig. 3(a)~(d)는 Model II의 경우 초기 조건이 고상율 30%, 금형온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$, 편치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일 때, 충전 양상을 보여주고 있다.

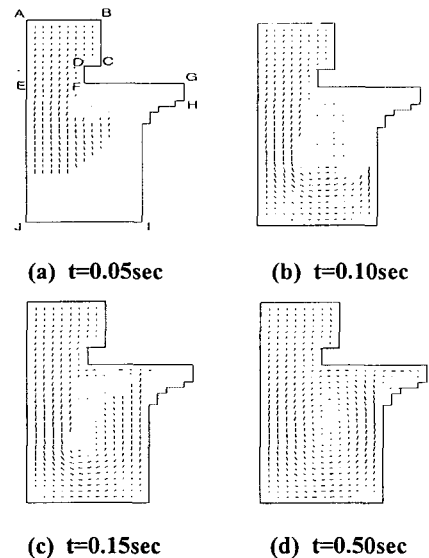


Fig. 1 The calculated filling pattern and velocity profile on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{die}=250^\circ\text{C}$ in model I

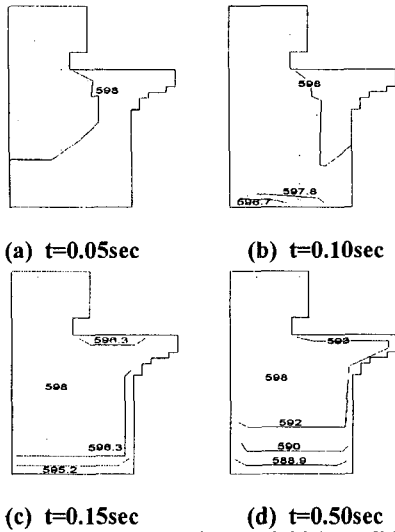


Fig. 2 Temperature distribution on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{die}=250^\circ\text{C}$ in model I

충전 거동은 하부 다이의 첫 번째(Fig. 3의 \overline{SR})와 두 번째(Fig. 3의 \overline{ON}) 게이트부분을 먼저 채운 다음, 세 번째(Fig. 3의 \overline{KJ}) 게이트부분을 채우면서 수평부분의 끝을 채우는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)~(d)는 Model II의 경우 초기조건이 금형온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$, 펀치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일때 충전 거동에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 게이트부분의 끝단(Fig. 3의 \overline{OM})의 온도가 $T=593^\circ\text{C}$ 정도인 것을 알 수 있다.

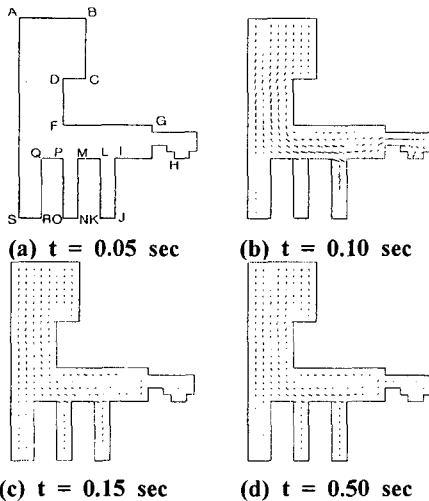


Fig. 3 The calculated filling pattern and velocity profile on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{die}=250^\circ\text{C}$ model II

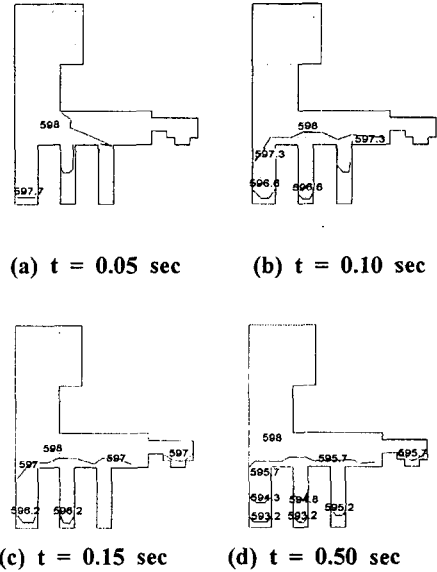


Fig. 4 The calculated temperature distribution on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{die}=250^\circ\text{C}$ in model II

4. 결론

입의 형상의 모델에 대하여 금형 내부에서의 소재의 충전 거동 및 열전달 현상을 레올로지 이론을 도입하여 수치해석을 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형의 형상을 입력하면 반응용재료의 성형공정시 소재의 충전거동, 고상율 예측, 유동해석이 가능한 프로그램을 개발하였다.

(2) 수치해석을 통하여 성형시 충전거동에 따른 온도분포는 금형에 제일 먼저 접촉하는 부분의 온도가 가장 낮음을 알 수 있었다. 그러나 하부 다이에 요철이 존재하는 금형의 경우에는 계속 충전이 일어나기 때문에 접촉시간에 상관없이 초기 온도와 차이가 없다.

(3) Model I, II 에 대하여 충전 및 온도해석을 결과로부터 응고의 시작부분은 금형과 제일 먼저 접촉하여 충전이 완료된 부분에서 전파되어 나가는 것을 알 수 있다. 금형의 온도에 크게 영향을 받지 않고, 충전시간이 아주 짧기 때문에 금형과의 접촉으로 인한 열전달은 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 Model I와 같은 경우에는 하부다이에 충전이 되어 상승하는 소재와 금형의 주입구에서 나오는 소재가 서로 합쳐져 결합으로 작용할 것으로 판단된다. 따라서 Model I 과 같은 형상을 가진 제품을 설계할 경우에는 주입구의 형상을 변경시켜야 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Flemings, M. C., 1991, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State", Metallurgical Transaction, Vol. 22A, pp. 957~981.
- (2) Pitts, H. E., Atkinson, H. V., 1998, "Thixoforming of 6061 Al Alloy for Automotive Components", The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 97~104.
- (3) Burgos, G. R., Alexandrou, A. N., 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.
- (4) Modigell, M., Koke, J., 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.
- (5) Kang, C. G., Jung, Y. J., 2001, "Comparison of Single Flow and Two-phase Flow for Numerical Analysis of Semi-Solid Forming Process", The 7th Int. Conf. on Numerical Methods in Industrial Forming Processes in press, June.
- (6) Ohnaka, I., 1985, Introduction of Compute Heat and Solidification Analysis", MARUZEN, pp. 167~208.
- (7) Kang, C. G., Lee, Y. C., 1999, "Effect of Viscosity Variation on Flow Characteristic in Thixoforming Process of Semi-Solid Aluminum Alloys", J. of the Korea Society for Technology of Plasticity, Vol. 8, No. 2, pp. 188~199.