

저고상을 소재의 유동 및 응고현상을 고려한 레올로지 성형공정해석

정영진*, 조호상*, 강충길**

Process Analysis for Rheology Forming Considering Flow and Solidification Phenomena in Lower Solid Fraction

Young-Jin Jung*, Ho-Sang Cho* and Chung-Gil 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 types. To calculate the velocity and temperature fields during rheology forming process, the each governing equation correspondent to the liquid and solid region are adapted. Therefore, each numerical models considering the solid and liquid region existing within the semi-solid material have been developed to predict the defect of rheology forming parts. The Arbitrary Boundary Maker And Cell (ABMAC) method is employed to solve the two-phase flow model of the Navier-Stokes equation. 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. The liquid viscosity is pure liquid state value, however solid viscosity is considered as a function of the shear rate, solid fraction and power law curves.

Key Words : Semi-solid materials(반용융재료), Two-phase flow(이상유동), Liquid Segregation(액상분리), Semi-solid forging(반용융단조)

기호설명

B : rheological parameter
c_p : 비열
c_e : 등가비열
g : 중력가속도
h : 대류열전달 계수
K : 재료상수
k : 전단상수
k₀ : 분배계수

L : 용융 금속
m : 전단속도 민감지수
P : 압력
P₀ : 공기압
Re : 레이놀드수
t : 시간
P : 압력
T : 온도
T_{die} : 금형의 온도
T_f : 순수 금속의 용융온도

2001년 2월 15일 접수

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

- T_L : 합금의 액상선 온도
 T_m : 2원합금의 공정온도
 T_S : 합금의 고상선 온도
 T_∞ : 대류열전달 금형 온도
 f_s : 고상율
 $\dot{\gamma}$: 변형률 속도
 λ : 전도계수
 μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 σ : 계면의 응력
 δ : 변화량
 τ : 계면의 전단응력
 f : 액체
 n : 법선방향
 u_1', u_2', u_3', u_4' : 경계밖에서 가상절점들의 속도
 P, P' : 경계전후의 압력
 s : 고체
 t : 접선방향
 u : x방향 속도
 u_1, u_2, v_1, v_2 : 해석영역내에서 가상절점들의 속도
 v : y방향 속도
 V_p : 편지속도
 V_s : 액상의 속도
 V_f : 고상의 속도
 x, y : 각각 x, y방향을 의미

1. 서론

레올로지 재료의 성형공정은 소재를 금형내에 충전시킨 후 응고시키는 공정으로써 자유표면을 포함하는 충전과정과 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 반응용 재료에 적용하여 해석하고자 하는 연구가 시도되고 있다. 레올로지 해석은 기본적으로 액상과 고상을 분리하여 지배방정식을

만들기 때문에 반응용재료의 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).

Mullins⁽³⁾는 PHOENICS CFD 패키지(package)를 이용하여 레이놀즈 수에 따른 수치상정 조직 주변의 액상과 고상의 상호 간섭에 관하여 이론적으로 계산을 하였다. Barkhudarow⁽⁴⁾등은 고상율 60~70% 사이의 소재에 대하여 FLOW-3D상용 패키지를 이용한 수치해석을 시도하였다. Paradiese등⁽⁵⁾은 ProCast 패키지를 이용하여 속도 경계 조건의 계산에서 노슬립(No-Slip) 경계 조건의 결과는 실험결과와 일치하지 않음을 보였다.

반응용소재를 이용한 성형공정 해석의 경우, 상용프로그램을 사용하거나 고상영역과 액상영역을 연속체로 가정한 지배방정식을 사용하고 있다. 그러나 성형공정 해석중 반응용재료 내에 있는 고상영역의 크기와 고상영역과 액상영역의 거시적 분리현상등은 고려하지 못하고 있다.

Burgos등⁽⁶⁾은 Two Phase Model의 개념을 도입하여 레올로지 해석을 시도하고 있으나 응고현상까지 고려하지 못하고 있다.

Modigell등⁽⁷⁾도 Two Phase Model을 이용하여 고상율 40~60%의 재료에 대하여 유한요소법을 사용하여 레올로지 해석을 하고 있으나 성형 중 응고현상 등을 고려하지 못하고 있다. 따라서 저고상율인 경우, Kang⁽⁸⁾은 이상유동(two-phase)의 해석결과를 MAGMA s/w의 해석결과와 비교검토하여 해석방법의 타당성과 문제점을 제시하였다. 또한 레올로지 가공에 있어서 가장 중요한 것은 소재의 특성 고찰과 소재가 다이에 충전될 때 고상율 분포 및 속도 분포 등을 표현하는 것이 제품 개발 측면에서 가장 중요하나 아직까지 연구가 수행되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 저자가 제안한 레올로지 이론식을 이용하여 성형공정 중 고상율의 예측, 속도분포 및 응고해석을 수행하였다. 또한 이론해석에서 구한 레올로지 재료의 유동 특성을 이용하여 향후 금형설계에 이용하도록 하였다.

2. 이론해석

2.1 지배방정식

고상율 50~55 %인 반응용재료의 경우 고상영역에서는 압축성 재료에 대한 항복조건을 이용하였으며, 액상영역의 지배방정식은 다공질체를 통한 유체의 유동법칙인 닥시의 법칙(Darcy's Law)를 이용하여 해석을 하고 있다.⁽⁹⁾ 저고상율소재의 레올로지 성형공정에 있어서는 압축성 재료의 항복조건(다공질재료의 항복조건)을 이용할 수 없다. 레올로지 재료의 특성을 고려하기 위해서는 응력-변형률에 관한 새로운 관계식이 정립되어야 한다. 이와같은 관계식을 쉽게 정의할 수 없을 뿐만 아니라 저고상율에서는 Darcy's 법칙을 이용할 수 없기 때문에 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 액상영역과 고상영역으로 각각 분리하여 이론해석을 전개하였다. 또한 주형내의 유동 및 열적 특성을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하여 기본 방정식과 이산화방정식을 수립하였다.

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

- 연속방정식 (Conservation of Mass)

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

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

- 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(Composition equation)

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

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

$$s = 1 - f \quad (7)$$

또한 2차원 비정상 대류열전달 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다

$$\rho c_e \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] + \rho c_p [(V \cdot \nabla) T] = \lambda \nabla^2 T \quad (8)$$

고상율과 온도와의 관계를 파악하기 위하여, 액체는 완전혼합으로 보고 고체는 무확산으로 보는 Scheil의 식을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_f - T}{T_f - T_m} \right)^{\frac{1}{k_s - 1}} \quad (9)$$

2.2 반응용재료의 점성

레올로지 이론(Rheology theory)은 기본적으로 고상영역과 액상영역을 서로 분리하여 지배방정식을 세우기 때문에 고상영역과 액상영역의 점성식이 정의되어야 하므로, 일반적인 반응용재료의 점성식을 사용할 수 없다.

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

$$\mu_f = \mu_0 \quad (10)$$

고상의 경우에는 순수한 고체영역으로만 되어 있지 않고 구상화 조직과 덴드라이트조직이 응집되어 있고, 전단속도나 온도에 의해 점도가 영향을 받게되는 비뉴턴유동의 양상을 가지게 된다. 따라서, 일정한 점성식이 정의될 수 없다.

고상영역에서의 점성은 주로 전단 연화의 성질을 가진다고 가정하고 Power-law에 고상영역의 성질, 즉 조직변수(Structural Parameter)를 도입하여 변형된 Power-law를 사용하고 있다.

Modigell등⁽⁷⁾은 고상율 50%에서 Bulk Viscosity가 고상전체의 평균점성과 동일하다고 보고 아래식과 같은 점성식을 제안하였다.

$$\mu_s = K e^{Bf_s} k \dot{\gamma}^{m-1} \quad (11)$$

식(11)은 thixotropic 형태가 고상입자의 응집과 비응집에 의해 좌우된다는 가정에서 식(11)을 제안하였다.

위의 식은 고상율이 50%이상의 영역에서 사용되도록 제한하고 있다. 또한 식(11)은 반응용 Al합금 소재의 상수값이 아직 제안되지 않아 재료의 선

택이 제한적이다.

따라서 본 논문에서는 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(12)와 같은 단상유동(Single Phase)에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\rho \partial \bar{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{v} = \rho \bar{g} + \nabla \tau \quad (12)$$

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (13)$$

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

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

$$\mu_s = (\mu - (1 - f_s)\mu_f) / f_s \quad (14)$$

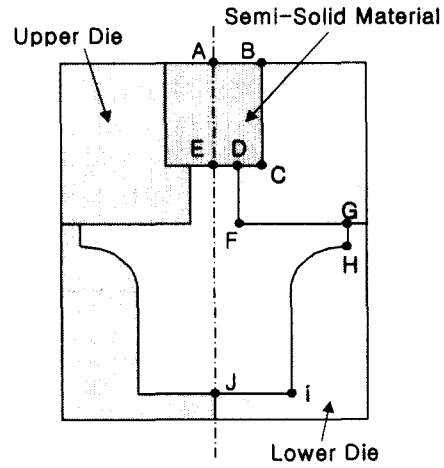
반응용재료의 점성값 μ 는 일반적으로 사용되는 점성식인 Ostwald Model 식으로부터 구할 수 있으며⁽¹¹⁾, 반응용 영역 내에 있는 고상 영역의 점성 μ_s 는 식(14)의 μ 와 μ_f 로부터 구할 수 있다.

위의 방법은 고상율이 50% 이하의 저고상율 소재인 경우는 식(11)을 사용하지 못하기 때문에 새로운 식이 필요하다. 따라서 고상율 50% 이상인 경우에는 고상입자가 충분히 성장하여 있으므로 식(14)보다는 식(11)을 사용하는 것이 해의 정도를 좋게 할 것이다.

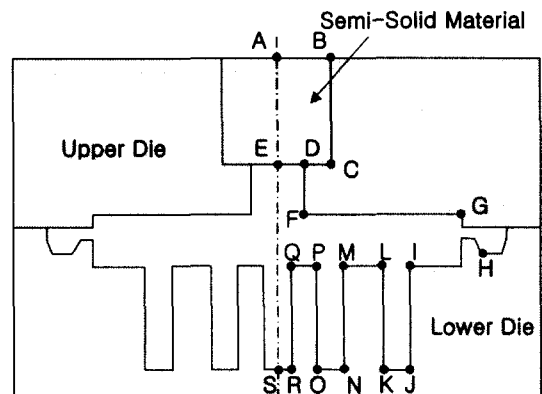
유한차분법으로 식(1)~(4)와 식(8)을 해석하기 위하여 온도의 함수로 표현된 식(9)로부터 하나의 계산영역(유한차분법에서 정의한 미소체적= $\Delta X \times \Delta Y$)내에서 고상율 S를 식(2), (4)에 대입한 후 $t = \Delta t$ 동안에 고상영역과 액상영역의 속도 벡터를 구한다. 고상영역과 액상영역에서 구한 속도 벡터의 합을 계산하여 반응용재료의 속도벡터로 정의하였다.

2.3 해석모델

본 연구에서는 임의의 형상에 대한 모델을 계산하기 위하여 제품의 형상과 비슷한 Fig. 1 (a)와 같은 Model I 과 Fig. 1 (b)와 같은 Model II 로서 수치해석을 수행하였다.



(a) Model I



(b) Model II

Fig. 1 Model for numerical analysis of rheological behavior considering solid and liquid region

일반적으로 자유표면의 해석 시 자유표면에서 경계조건식을 쉽게 적용할 수 있는 SIMPLE, MAC, SMAC법의 기본 격자계인 엇갈린 격자망을 채택하였다. 또한 엇갈림 격자계를 도입할 수 있고, 곡면형상과 자유표면 추적이 용이한 ABMAC(Arbitrary

Boundary Marker And Cell)법을 사용하여 지배방정식을 차분화하여 속도장 해석과 자유표면을 추적하였다.

일반적으로 해석하고자 하는 변수들을 격자 중앙에 놓는 바둑판식 격자를 사용하지만, 바둑판식 격자 배열은 연속방정식이나 압력장에서 일어날 수 있는 진동현상이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석시 진동해를 예방할 수 있고, 자유표면에서 경계조건식을 쉽게 적용할 수 있는 SIMPLE, MAC, SMAC법의 기본 격자체인 엇갈린 격자망을 채택하였다. 엇갈린 격자망은 Fig. 2와 같이 압력장 $P(i, j)$ 및 온도장 $T(i, j)$ 는 주격자점에 대하여 계산하였고, 속도장 u, v 는 각각 x, y 방향에 대하여 엇갈린 검사체적에서 계산하도록 한다.

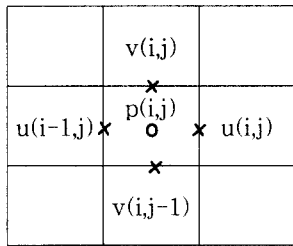


Fig. 2 Velocities and pressure evaluation point in staggered grid

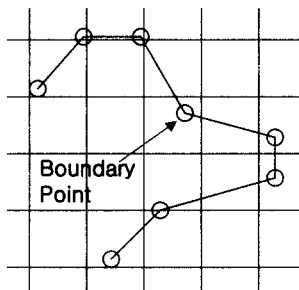


Fig. 3 Actual boundary and approximate boundary

Fig. 3과 같이 실제 경계가 한 셀 내에서 불규칙하여 자유표면을 추적하기가 어려울 수도 있으나, 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 경우를 해결하기 위하여 셀의 크기를 충분히 작게하여 위와 같은 문제를 해결하였다.

곡면 경계의 경우는 Fig. 4와 같이 곡면의 경계

가 한 셀 내부에 있을 경우에는 경계부분이 차지하는 면적이 셀 면적의 1/4이상일 경우에는 경계셀로 가정하여 자유표면을 추적하였다.

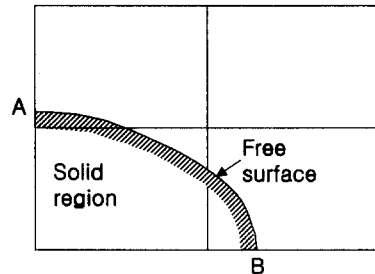


Fig. 4 Surface cell or boundary cell with two adjacent sides contiguous with E-cell

2.4 경계조건과 물성치

자유 표면에서 공기의 밀도가 용융금속보다 매우 낮은 경우는 Fig 5에서 보여주는 바와 같이 전단응력조건과 수직응력조건을 나타낼 수 있다.

- 1). 공기의 압력 (P_0)은 일정하다. (즉 공기의 유동은 고려하지 않는다.)
- 2). 공기의 동점성계수는 용융금속의 동점성계수와 같다.

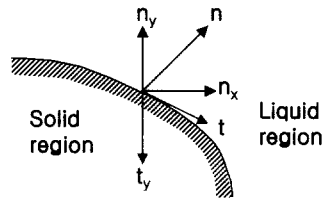


Fig. 5 Vector components in free surface

전단응력 조건 : 자유표면에서의 전단응력은 항상 0 이어야 한다.

$$\tau = \mu_L \left(\frac{\partial u_n}{\partial x_t} + \frac{\partial u_t}{\partial x_n} \right) = 0 \quad (15)$$

수직응력조건 : 자유표면에서의 수직응력은 항상 주어진 응력과 평행을 이루어야 한다.

$$\sigma_n = -P + 2\mu_L \frac{\partial u_n}{\partial x_n} = -P_0 \quad (16)$$

자유표면을 통한 냉각효과는 주형벽면을 통한 냉각 효과에 비해 무시할 정도로 적기 때문에 응고

해석과정에서 고려하지 않았다.

임의의 형상에 있어서 주형의 조건을 고려하기 위한 경계조건은 비압축성조건이 만족되도록 하였으며, 소재가 금형이 접촉하는 부분의 경계조건은 점착 및 비점착 조건을 각각 적용하였다.

임의의 형상에 대한 경계조건이 비점착 혹은 점착조건인가의 판단은 식 (17)이 만족되는 경우에는 점착조건을 적용하였다. 그렇지 않을 경우 비점착 조건 또는 경계층의 형성을 용이하게 하기 위하여 비점착과 점착조건을 절충한 경계조건을 적용하게 된다.

$$\left(\frac{F}{\delta x}\right)^2 > Re_L \quad (17)$$

비점착 조건(non Slip Condition) :

$$u_2 = u_2, \quad u_1 = u_1, \\ v_1 = -v_1, \quad p = p \pm g_y \cdot \Delta y \quad (18)$$

점착조건 (Slip Condition) :

$$u_2 = -u_2, \quad u_1 = -u_1, \\ v_1 = v_1, \quad p = p \pm g_y \cdot \Delta y \pm 2\mu \frac{v}{\Delta y} \quad (19)$$

열전달 해석을 위한 경계조건은 대칭면(Fig. 1(a)의 \overline{AJ} , Fig. 1(b)의 \overline{AS}), 주입구 쪽(Fig. 1(a)(b)의 \overline{AB}), 그리고 자유표면(Fig. 4의 \overline{AB})에서는 식 (20)과 같이 단열조건으로 하였고, 금형과 접촉하는 부분의 열전달은 식 (21)과 같이 온도가 일정한 대류열전달로 가정하였다.

$$q_n = 0 \quad (\text{on the symmetric cross-section, free surface and gate}) \quad (20)$$

$$q_n = h(T_\infty - T) \quad (\text{on the die surface}) \quad (21)$$

충전 완료시간이 가장 긴 경우, $t_{fill}=1.0\text{sec}$ 정도 이므로 충전중 금형의 온도 상승으로 열유속(heat flux)의 변화는 크지 않다고 가정하여 금형 온도 T_{die} 를 일정하게 하였다. 또한 충전 중에는 반응용 재료에 대한 가압효과가 크지 않기 때문에 대류열 전달 계수도 일정하다고 가정하였다. 계산에 사용된 대류열전달 계수는 Ohnaka⁽¹⁰⁾가 알루미늄 용탕이 금형표면을 흐를 때 $h=1260\text{W/m}^2\text{K}$ 로 제안한 값을 본 연구에서 사용하였다. 전체적인 계산

순서도를 Fig. 6에 나타내었다.

본 논문에 사용되어진 A356 재료의 물성치를 아래 Table. 1 에 나타내었다.

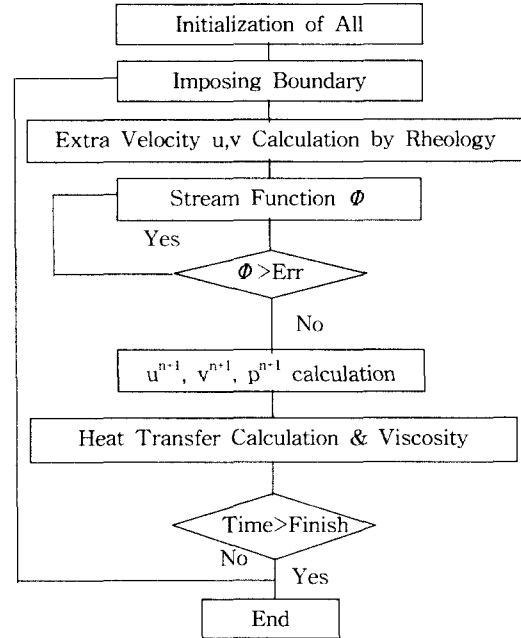


Fig. 6 Flow chart for numerical simulation of semi-solid filling

Table 1 Material properties used for calculation⁽¹²⁾

Property	Symbol	Unit	Value
Density	ρ	kg/m ³	2685
Specific heat	c	J/kgK	963
Conduction coefficient	λ	W/mK	159
Solidus	T_L	°C	555
Liquidus	T_S	°C	615
Viscosity	μ	Pa · sec	0.00447
Partition ratio	k_0	-	0.1111

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. 7(a)~(d)는 Model I의 경우 초기조건이 고상율 30%, 금형온도 $T_{die}=250^{\circ}\text{C}$, 펀치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일 때의 충전 양상을 나타낸 것이다. 초기상태로부터 $t=0.05\text{sec}$, 0.10sec , 0.15sec , 0.50sec 일 때의 충전거동을 각각 나타낸 것이다. 충전 거동은 하부다이부분(Fig.7의 IJ)을 채운다음 수평 끝부분(Fig.7의 I부분)을 채우고, 최종적으로 상부다이를 채운다는 것을 알 수 있다. 그러나 $t=0.10\text{sec}$, 0.15sec 에서는 Fig.7(b)(c)에서 보여주는 바와 같이 주입구에서 유동하는 소재와 하부다이쪽에서 유동하는 소재가 서로 합쳐져 캐비티 중심부위에 공간이 생긴후 충전이 완료가 되는 것을 볼 수 있다.

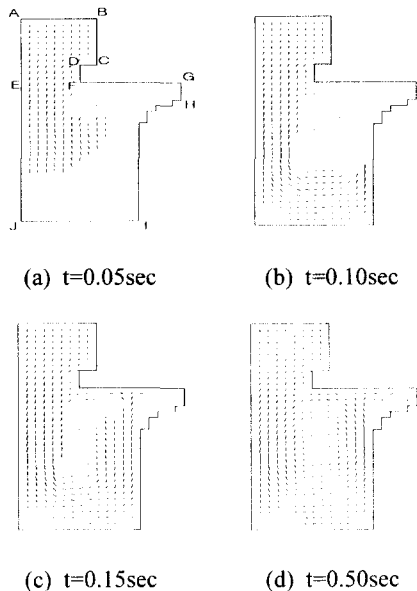


Fig. 7 The calculated filling pattern and velocity profile on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{die}=250^{\circ}\text{C}$ in model I

Fig. 8(a)~(d)는 Model I의 경우 초기 조건이 금형온도 $T_{die}=250^{\circ}\text{C}$, 펀치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일 때의 충전 거동에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 충전 결과로부터 금형과 처음 접촉하는 주입구 바닥 부분(Fig.7의 IJ)의 온도와 하부다이의 중간 부위가 $T=588^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮게 나타났다.

Model I의 경우는 제품의 수직방향의 길이가 수평방향의 길이보다 긴 경우의 충전양상은 하부다

이를 채운 다음 수평 끝부분을 채우고, 최종적으로 상부다이를 채운다는 것을 알 수 있다. 그러나 주입구에서 나오는 소재와 하부다이에서 상승하는 소재가 서로 합쳐져 중심부위에 빈 공간이 생긴 후, 충전이 완료가 된다. 따라서 중심부위에서의 속도 분포가 회전하는 양상을 보이며, 주입구에서 나오는 소재와 하부다이에서 올라오는 소재가 서로 합쳐지기 때문에 공기의 유입이나 기공 같은 결함이 발생할 수 있다.⁽⁸⁾

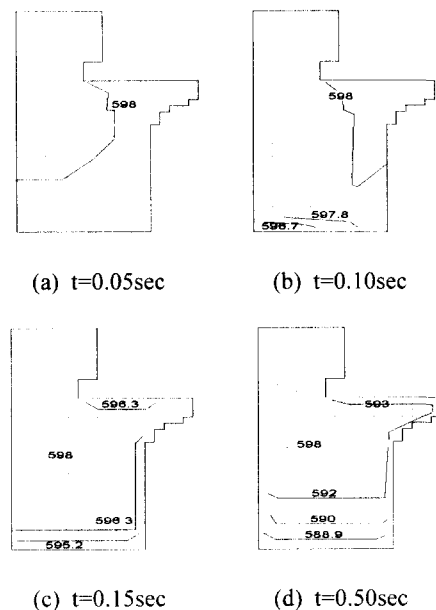


Fig. 8 Temperature distribution on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{die}=250^{\circ}\text{C}$ in model I

3.2 Model II의 해석 결과 및 고찰

Fig. 9(a)~(d)는 Model II의 경우 초기 조건이 고상율 30%, 금형온도 $T_{die}=250^{\circ}\text{C}$, 펀치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일 때, 충전 양상을 보여주고 있다. 초기상태로부터 충전시간이 각각 $t=0.05\text{sec}$, 0.10sec , 0.15sec , 0.50sec 일 때의 충전 거동을 나타낸 것이다. 충전 거동은 하부다이의 첫 번째(Fig. 9의 \overline{SR})와 두 번째(Fig. 9의 \overline{ON}) 게이트부분을 먼저 채운 다음, 세 번째(Fig. 9의 \overline{KJ}) 게이트부분을 채우면서 수평부분의 끝을 채우는 것을 알 수 있다.

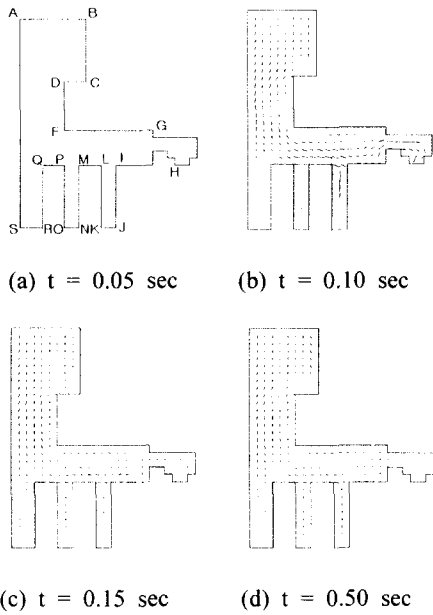


Fig. 9 The calculated filling pattern and velocity profile on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{\text{die}}=250^\circ\text{C}$ model II

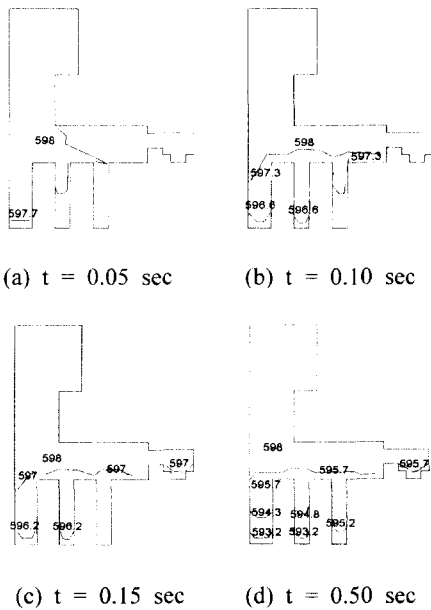


Fig. 10 The calculated temperature distribution on initial conditions that $f_s=30\%$ with $V_p=400\text{mm/sec}$ and $T_{\text{die}}=250^\circ\text{C}$ in model II

Fig. 10(a)~(d)는 Model II의 경우 초기조건이 금형온도 $T_{\text{die}}=250^\circ\text{C}$, 펀치속도 $V_p=400\text{mm/sec}$ 일때 충전 거동에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 게이트부분의 끝단(Fig. 9의 \overline{ON})의 온도가 $T=593^\circ\text{C}$ 정도인 것을 알 수 있다.

Model II의 경우는 하부다이에 세 부분의 게이트와 수평부분 끝에 Over Flow가 있는 형상이다. 특히 게이트 입구에서는 수평방향의 속도가 존재하나, 게이트부분에서는 수직방향의 속도만이 있는 양상을 나타낸다. 또한 온도 분포의 경우에도 먼저 충전된 부분부터 온도가 감소하는 지양성 응고양상을 나타내고 있다. 또한 충전시 단면적이 급격히 감소하는 부분(Fig. 9의 \overline{SR} , \overline{ON} , \overline{KJ})에서는 소재와 금형과의 접촉시간이 길고 금형으로부터 열을 많이 빼앗기기 때문에 냉각속도가 증대되어 기계적 성질이 개선될 것으로 사료된다.

4. 결론

임의 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 성형 공정시 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 하부다이에 요철이 존재하는 금형의 경우에는 계속 충전이 일어나기 때문에 접촉시간에 상관없이 초기 온도와 차이가 없다. 금형의 예열 온도에 따른 최저 온도는 초기에는 차이가 0.6°C 정도로 낮았으나, 충전 완료 후에는 최저온도의 차이가 최고 7°C 정도 차이가 난다.

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 하부다이에서 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.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의한 연구의 일부분입니다.

참고문헌

1. Flemings, M. C., "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State," Metallurgical Transaction, Vol. 22A, pp. 957-981, 1991.
2. Pitts, H. E., Atkinson, H. V., "Thixoforming of 6061 Al Alloy for Automotive Components," The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 97-104, 1998.
3. Mullins, A. M., Walker, D. J., "Modelling Solid/Fluid Interactions in a Dendritic Semi-Solid," The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 104-109, 1996.
4. Barkhudarov, M. R., Bronisz, C. L., Hirt, C. W., "Three-Dimensional Thixotropic Flow Model," The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 110-114, 1996.
5. Paradies, C. J., Rappaz, M., Imwinkelried, T., Gabathuler, J. P., "Simulation of the Pressure Die Casting of A Thixotropic Aluminum Alloy," The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 115-119, 1996.
6. Burgos, G. R., Alexandrou, A. N., "Two-Phase Model of Flow of Semi-Solid Materials," The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloy and Composites, pp. 217-224, 1998.
7. Modigell, M., Koke, J., "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, 1998.
8. Kang, C. G., Jung, Y. J., "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 2001.
9. Kang, C. G., Kim, Y. D. "A Finite Element Analysis on the Upsetting Process of Semi-Solid Aluminum Material," J. of Materials Processing Technology, Vol. 66/1-3, pp. 76-84, 1997.
10. Ohnaka, I., Introduction of Compute Heat and Solidification Analysis," MARUZEN, pp. 167-208, 1985.
11. Kang, C. G., Lee, Y. C., "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, 1999.
12. Metal Handbook 10th Edition, ASM, Vol. 2, pp. 2-19, 1990.