

## 액상과 고상의 유동현상을 고려한 레오로지 성형공정의 표면결함예측을 위한 응고해석

서관기\* · 정영진\* · 강충길†  
(2001년 4월 16일 접수, 2002년 8월 3일 심사완료)

### Solidification Analysis for Surface Defect Prediction of Rheology Forming Process Considering Flow Phenomena of Liquid and Solid Region

Pan Ki Seo, Young Jin Jung and Chung Gil Kang

**Key Words:** Semi-Solid Materials(반용융재료), Two-Phase Flow(이상유동), Liquid Segregation(액상편석), Semi-Solid Forging(반용융단조)

#### Abstract

Two-dimensional solidification analysis during rheology forming process of semi-solid aluminum alloy has been studied. Two-phase 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 velocities and temperature fields during rheology forming process, the each governing equations correspondent to the liquid and solid region are adapted. Therefore, each numerical model considering the solid and liquid coexisting region within the semi-solid material have been developed to predict the defects 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 basis of the two-phase flow model is the mixture rule of solid and liquid phases. This approach is based on using 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.

#### 기호설명

$B$  : 레오로지 매개변수  
 $c$  : 비열  
 $c_p$  : 정압비열  
 $c_e$  : 등가비열  
 $f_s$  : 고상률  
 $g$  : 중력가속도  
 $h$  : 대류열전달 계수  
 $K$  : 재료상수  
 $k$  : 전단상수  
 $k_0$  : 분배계수

$m$  : 전단속도 민감지수  
 $P$  : 압력  
 $P_0$  : 공기압  
 $P'$  : 경계전후의 압력  
 $q$  : 열유속  
 $t$  : 시간  
 $t_{fill}$  : 충전시간  
 $T$  : 온도  
 $T_d$  : 금형의 온도  
 $T_f$  : 순수 금속의 용융온도  
 $T_L$  : 합금의 액상선 온도  
 $T_m$  : 2원합금의 공정온도  
 $T_S$  : 합금의 고상선 온도  
 $T_\infty$  : 경계 외부의 대기온도  
 $u$  : x 방향 속도

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
 † 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
 E-mail : cgkang@pusan.ac.kr  
 TEL : (051)510-2335 FAX : (051)512-1722

$v$	: $y$ 방향 속도
$V_p$	: 편치속도
$V_f$	: 액상의 속도
$V_s$	: 고상의 속도
$\dot{\gamma}$	: 변형률 속도
$\delta$	: 변화량
$\delta_{ij}$	: 크로네커 델타(Kronecker delta)
$\lambda$	: 열전도계수
$\mu$	: 점성계수
$\mu_f$	: 액상의 점성계수
$\mu_s$	: 고상의 점성계수
$\mu_L$	: 용융금속의 점성계수
$\rho$	: 밀도
$\sigma$	: 계면의 응력
$\sigma_f$	: 액상의 응력
$\sigma_s$	: 고상의 응력
$\tau$	: 계면의 전단응력

## 1. 서 론

레오로지(rheology) 재료의 성형공정은 소재를 금형 내에 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 레오로지 이론을 반응용 재료에 적용하여 해석하고자 하는 연구가 시도되고 있다. 레오로지 성형공정 해석시 액상과 고상을 분리하여 해석하면 재료의 유동특성을 보다 정확히 파악할 수 있는 장점이 있다.

고액 공존 재료에 있어서 소재의 충전 및 응고 과정에 관한 연구는 상변화 현상과 온도에 따른 점성의 변화 등을 고려하지 않은 상태에서의 수치해석적 접근들이 시도되고 있다.<sup>(1,2)</sup> Mullins<sup>(3)</sup>는 PHOENICS CFD 패키지(package)를 이용하여 레이놀즈 수에 따른 수지상정 조직 주위의 고상과 액상의 상호 간섭에 관하여 이론적으로 계산을 하였다. Barkhudarov 등<sup>(4)</sup>은 고상률이 60~70%인 소재에 대하여 FLOW-3D 패키지를 이용한 수치해석을 시도하였다. Paradies 등<sup>(5)</sup>은 ProCast 패키지를 이용하여 속도 경계 조건의 계산에서 노슬립(no-slip) 경계 조건의 결과는 실험결과와 일치

하지 않음을 보였다.

Burgos 등<sup>(6)</sup>은 이상유동모델(two-phase flow model)의 개념을 도입하여 레오로지 해석을 시도하였으나 응고현상까지는 고려하지 못하였다. Modigell 등<sup>(7)</sup>도 이상유동모델을 이용하여 고상률이 40~60%인 재료에 대하여 유한요소법에 의한 레오로지 해석을 하였지만, 성형 중 구상화의 크기 변화 및 응고 현상 등은 고려하지 않았다.

고상률이 55~70%인 반응용 재료의 경우, 고상 영역에서는 압축성 재료에 대한 항복조건을 이용하였으며, 액상영역에서는 다공질체를 통한 유체의 유동법칙인 닥시의 법칙(Darcy's law)를 이용하여 해석을 하고 있다.<sup>(8)</sup> 또한, 고상률이 70% 이상인 경우는 강점소성 이론에 의하여 공정해석을 수행하여 성형 중 결함예측이 가능하다고 보고하고 있다.<sup>(9)</sup> 고상률이 55% 이하로 낮은 경우, 고상영역과 액상영역을 연속체로 가정한 지배방정식을 사용하여 충전 중 응고해석을 수행하였다.<sup>(10,11)</sup> 레오로지 성형공정에 있어서 가장 중요한 것은 소재의 점성에 대한 고찰과 소재가 금형에 충전될 때 고상률 분포 및 속도 분포 등을 표현하는 것이 제품 개발 측면에서 가장 중요하지만 아직까지 연구가 수행되지 않고 있다.

따라서, 본 논문에서는 레오로지 이론을 도입하여 성형공정 중 고상률의 예측, 속도분포 및 응고해석을 위하여 고상과 액상이 동시에 공존할 때 이상유동현상을 고려한 성형공정해석에 필요한 알고리즘을 개발하고자 한다. 또한 레오로지 재료의 유동특성과 제품결합과의 관계를 규명하기 위하여 레오로지 성형실험을 수행하였다. 레오로지 성형에 필요한 재료의 재가열 실험은 저자가 연구한 결과를 이용하였다.<sup>(12)</sup>

유동해석 결과로부터 성형품의 결함을 예측하기 위하여 수직형의 레오로지 단조실험을 수행하여 기계적 성질을 비교 검토하였다.<sup>(13)</sup> 이론해석의 모델은 실험결과와 비교하기 위한 단순모델과 현재 자동차 에어컨의 스크롤(scroll)부품과 유사한 복잡한 형태의 모델을 선정하였다. 고상률이 30% 이하인 경우, 수직형 금형으로 실험한 결과와 이론해석의 결과를 정성적으로 비교하는 것이 어렵다. 위의 원인은 수직형 금형의 캐비티 내에 고상률이 45% 이하로 재가열된 소재를 주입하면 주입과 동시에 소재가 유동하기 때문에 계산에 필요한 소재의 초기 유동속도를 예측할 수 없기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 고상과 액상의 유동현상을 고려한 이론해석의 결과와 실험 결과를 정성적으로 비교할 수 있도록 고상률을 55%로 선정하였다. 또한, 이론해석에서 구한 레오로지 재료의 유동 특성과 레오로지 성형실험에 의하여 얻은 제품의 표면상태와의 관계를 정성적으로 비교분석함으로써 본 연구에서 개발한 해석방법을 향후 금형설계에 이용하도록 하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 지배방정식

저고상률 소재의 레오로지 성형공정에 있어서 압축성 재료의 항복조건(다공질 재료의 항복조건)을 이용할 수 없다. 레오로지 재료의 특성을 고려하기 위해서 응력-변형율에 관한 새로운 관계식이 정립되어야 한다. 이와 같은 관계식은 쉽게 정의될 수 없을 뿐만 아니라 저고상률에서는 당시의 법칙을 이용할 수 없기 때문에 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 액상영역과 고상영역으로 각각 분리하여 이론해석을 전개하였다. 또한 금형 내의 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(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)

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

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

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

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

고상률과 온도와의 관계를 파악하기 위하여, 액체는 완전혼합으로, 고체는 무확산으로 가정한 Scheil의 식을 사용하였다.<sup>(14)</sup>

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

유한차분법으로 식 (1)~(4)와 식 (7)을 해석하기 위하여 온도의 함수로 표현된 식 (8)로부터 하나의 계산영역(유한차분법에서 정의한 미소체적 =  $\Delta x \times \Delta y$ ) 내에서 고상률  $f_s$ 를 식 (2), (4)에 대입한 후  $t = \Delta t$  동안에 속도 벡터의 합을 계산하여 다음과 같은 식 (9)로 반응용재료의 속도벡터를 정의하였다.

$$\bar{u} = V_s f_s + (1 - f_s) V_f \quad (9)$$

### 2.2 반응용재료의 점성

레오로지 이론은 기본적으로 고상영역과 액상영역을 서로 분리하여 지배방정식을 세우기 때문에 고상영역과 액상영역의 점성식이 정의되어야 한다. 따라서, 일반적인 반응용재료의 점성식을 사용할 수 없다. 액상영역의 점성은 전단속도와 유동조건에 거의 무관하기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

고상영역에서의 점성은 주로 전단 연화의 성질을 가진다고 가정하는 멱법칙(power-law)에 고상영역의 성질, 즉 조직변수(structural parameter)를 도입하여 변형된 멱법칙을 사용하고 있다. Modigell 등<sup>(7)</sup>은 고상률 50%에서 Bulk Viscosity가 고상전체의 평균점성과 동일하다고 보고 식 (11)과 같은 점성식을 제안하였다.

$$\mu_s = Ke^{B/k} \dot{\gamma}^{m-1} \quad (11)$$

식 (11)은 디소트로픽(thixotropic) 형태가 고상입자의 합체(aggregation)와 파괴(breakdown)에 의해 좌우된다는 가정에서 제안된 식이며, 위의 식

은 고상률이 55% 이상의 영역에서 사용되도록 제한하고 있다. 또한 식 (11)은 반응용 AI합금 소재의 상수값이 아직 제안되지 않아 재료의 선택이 제한적이다. 따라서, 본 논문에서는 반응용 AI합금에 대하여 사용할 수 있는 고상영역의 점성식을 제안하기 위하여 기존의 AI합금의 반응용 점성식을 가지고 다음과 같이 고상영역의 점성식을 제안하였다.

고상영역과 액상영역에서의 Navier-Stocks 방정식 식 (3)과 식 (4)을 조합하면 식 (12)과 같은 단상유동(single-phase flow)에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

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

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

여기서,  $\mu = \mu f_s + (1-f_s)\mu_l$

본 연구에서는 반응용재료의 점성 ( $\mu$ )을 고상영역의 점성 ( $\mu_s$ )과 액상영역의 점성 ( $\mu_l$ )으로 각각 분리하여 계산하였다. 따라서 반응용재료의 점성 ( $\mu$ )에서 순수액상영역의 점성 ( $\mu_l$ )을 뺀 나머지 고상영역에서의 점성 ( $\mu_s$ )이 된다.

$$\mu_s = \{ \mu - (1-f_s)\mu_l \} / f_s \quad (14)$$

반응용재료의 점성은 일반적으로 사용되는 점성식인 Ostwald-de Waele Model로부터 구할 수 있으며,<sup>(15)</sup> 반응용 영역 내에 있는 고상 영역의 점성은 식 (14)의  $\mu$ 와  $\mu_l$ 로부터 구할 수 있다.

위의 방법은 고상률이 30% 정도의 저고상률 소재인 경우는 식 (11)을 사용하지 못하기 때문에 새로운 식을 유도하였다. 따라서 고상률 50% 이상인 경우에는 고상입자가 충분히 성장하여 있으므로 식 (11)보다는 식 (14)을 사용하는 것이 해의 정도를 좋게 할 것이다.

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 II로서 수치해석을 수행하였다.

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 MAC, SMAC법의 기본 격자계인 엇갈린 격자망을 채택하였다.<sup>(16)</sup> 또한 엇갈림 격자계를 도입할 수 있고, 곡면 형상과 자유표면 추적이 용이한 ABMAC (Arbitrary Boundary Marker And Cell)법을 사용하여 지배방정식을 차분화하여 속도장 해석과 자유표면을 추적하였다.

엇갈린 격자망은 Fig. 2와 같이 압력장 P(i, j) 및 온도장 T(i, j)은 주격자점에 대하여 계산하였고, 속도장 u, v는 각각 x, y방향에 대하여 엇갈린 검사체적에서 계산하도록 한다.

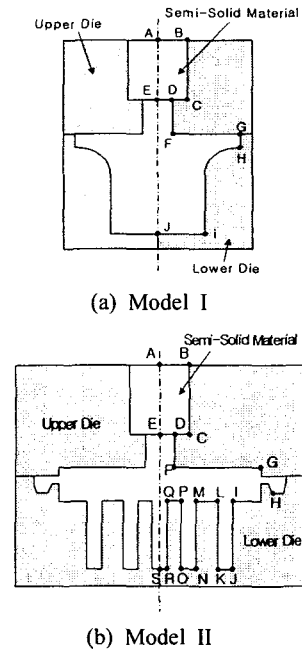


Fig. 1 Model for numerical analysis of rheological behavior considering solid and liquid region

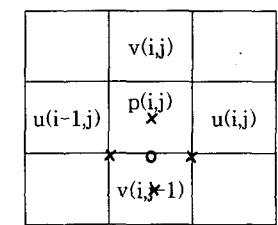


Fig. 2 Velocity and pressure evaluation point in staggered grid

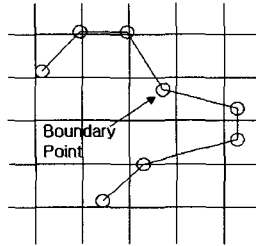


Fig. 3 Actual boundary and approximate boundary

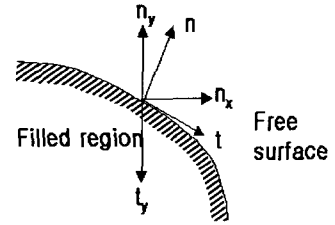


Fig. 5 Vector components in free surface

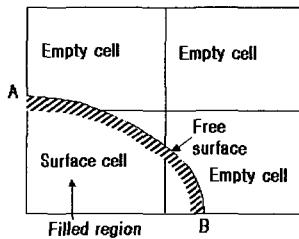


Fig. 4 Surface cell or boundary cell with two adjacent sides contiguous with empty cell

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

Fig. 4와 같이 곡면의 경계가 한 셀 내부에 있을 경우에는 경계부분이 차지하는 면적이 셀 면적의 1/4 이상이면 경계셀로 가정하여 자유표면을 추적하였다.

2.4 경계조건과 물성치

자유표면에서 공기의 밀도가 용융금속보다 매우 낮은 경우는 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 전단응력조건과수직응력조건을 나타낼 수 있다.

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

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 금형벽면을 통한 냉각 효과에 비해 무시할 정도로 적기 때문에 응고해석과정에서 고려하지 않았다.

유동해석을 위한 경계조건은 대칭단면에서는 식 (17)과 같이 미끌림 조건(free-slip condition)을 사용하였고, 나머지 금형의 표면에서는 식 (18)과 같이 고착조건(non-slip condition)을 사용하였다.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

(on the symmetric cross section)

$$u_t = 0 \quad (18)$$

(on the die surface)

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 (19)과 같이 단열조건으로 하였고, 금형과 접촉하는 부분의 열전달은 식 (20)과 같이 온도가 일정한 대류열전달로 가정하였다.

$$q_n = 0 \quad (19)$$

(on the symmetric cross-section  
free surface and gate)

$$q_n = h(T_\infty - T) \quad (20)$$

(on the die surface)

충진 완료시간이 가장 긴 경우,  $t_{fill} = 1.0\text{sec}$  정도이므로 충진 중 금형의 온도 상승으로 열유속(heat flux)의 변화는 크지 않다고 가정하여 금형 온도  $T_d$ 를 일정하게 하였다. 또한 충진 중에는 반응용재료에 대한 가압효과가 크지 않기 때문에 대류열전달 계수도 일정하다고 가정하였다. 계산에 사용되어진 대류열전달계수는 Ohnaka<sup>(17)</sup>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 논문에서 사용되어진 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

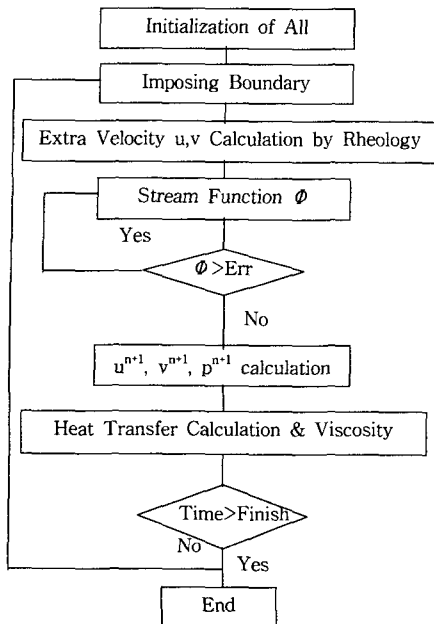


Fig. 6 Flow chart for numerical simulation of semi-solid filling

Table 1 Material properties used for calculation<sup>(18)</sup>

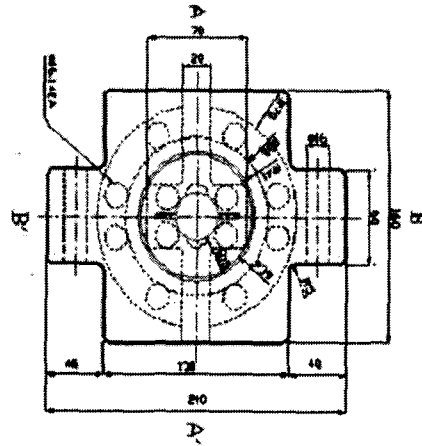
Property	Symbol	Unit	Value
Density	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2740
Specific heat	$c$	J/kgK	963
Conductivity	$\lambda$	W/mK	109
Solidus	$T_S$	°C	510
Liquidus	$T_L$	°C	656
Viscosity	$\mu$	Pa · sec	0.00447
Partition ratio	$k_0$	-	0.1111

### 3. 레오로지 성형

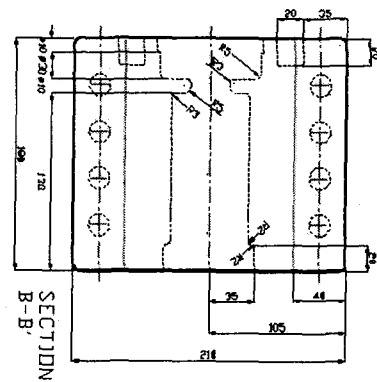
#### 3.1 재가열 실험

레오로지 성형에 필요한 가열 온도를 결정하기 위해 소재의 고상률은 식 (8)의 Scheil의 방정식을 이용하였다. 이 식은 고상률과 온도와의 관계식을 보여주는 것으로 본 연구에서 사용한 A390 재료의 경우는 시험편의 온도를 측정하여 고상률을 식 (8)에 의하여 산출하였다.

과공정합금(Hypereutectic alloy)인 A390의 경우에는 아공정합금(Hypoeutectic alloy)인 A356, A357 및 ALTHIX 86S 재료와는 달리 공정 조직의 완전 용해가 불가능하며, Si의 함량 증가에 따라 빌



(a) Upper part

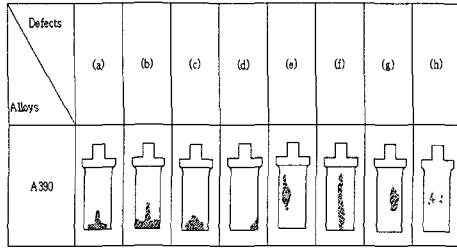


(b) Side part

Fig. 7 Drawing of die set used for surface sample fabrication by rheology forming process

렛 표면의 과열(overheating) 및 고상/액상의 편석 현상이 발생하기 쉽다.<sup>(19)</sup> 따라서 A390 재료의 경우, 허용 온도 영역인 566°C 부근에서 재가열 실험을 수행하였다.<sup>(20)</sup>

실험에 사용된 금형의 도면을 Fig. 7에 나타내었다. 고온 공구강인 STD61종(ASTM : H13, JIS : SKD 61)을 경도 HRC 55~60으로 열처리하여 금형과 펀치를 제작하였다. 금형의 가열을 위하여 고온(400°C)에서 견딜 수 있는 400W 용량의 열선을 상부에 8개, 하부에 6개를 장착하였다. 금형의 온도를 제어하기 위하여 상하부 각각 열전대를 측면에 삽입하여 좌우분할 금형의 온도를 균일하게 제어하였다.



**Fig. 8** Schematic diagram of various defects occurring in rheology forming process with Al-Si materials( $V_p = 200\text{mm/sec}$ )

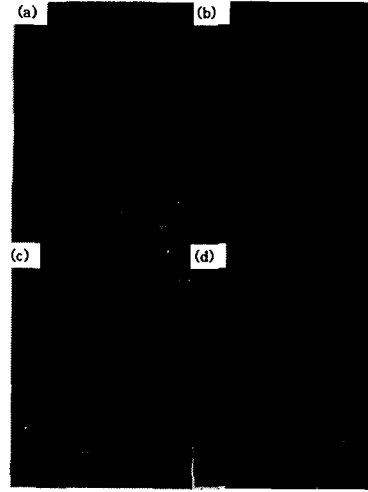
온도 측정을 위하여  $\phi 1.6\text{mm}$ 의 K-Type 비접촉식 열전대를 사용하였으며, 좌·우 금형의 용량이 각각 2.8kW가 되도록 균일하게 금형을 예열하였다. 또한 금형 예열시 그라파이트 이형재를 사용하여 금형 캐비티와 소재의 소착 현상을 방지하고 성형 후 취출이 용이하도록 하였으며, 가압시 금형의 온도 변화에 따른 충전현상을 파악하기 위하여 금형온도를  $T_d=300^\circ\text{C}$ 로 하여 실험을 하였다. 실험은 200ton 복동식 고속 유압 프레스를 이용하였으며, 가압속도는 성형 중 고상 내에 액상의 입자가 유출되지 않기 위하여 실험장치가 허용되는 최대속도인 200mm/sec에서 실험을 하였으며 충진이 완료된 후 가압력은 110MPa(52ton)로 하였다.

3.2 실험결과

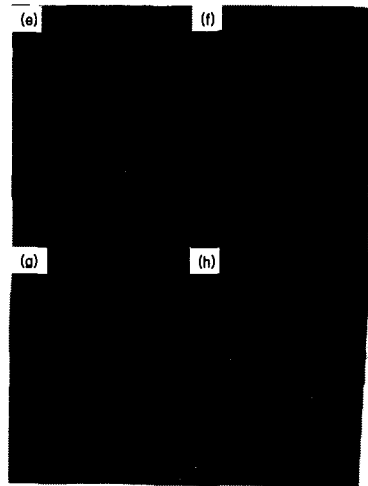
Fig. 8은 A390 재료를 고주파유도가열에 의하여 재가열한 후 고상률( $f_s$ )이 각각 30%와 55%가 되었을 때 성형한 샘플의 결함부위(Fig. 9~Fig. 10)에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)~(d)는 초기 고상률( $f_s$ )이 30%일 때 제품의 하단부에서 관찰되어진 결함을 나타낸 것이다. 결함의 원인은 성형시 반응용 재료가 금형 내부에 충전될 때 완전히 충진이 이루어지기 전에 금형의 하부에 액상영역이 먼저 충전되는 액상편석을 유발하기 때문이다.<sup>(21)</sup>

Fig. 8(a)~(d)에서 보여주는 바와 같이 반응용 빌렛으로부터 유출된 액상편석은 소재 밀면에 모이므로 최종제품으로 이용되어질 때에는 편석영역을 제거하거나 제품의 기계가공에 의해 소실되는 부위에 위치하도록 하는 러너(runner) 및 오버플로우(overflow)의 설계가 필요하다.<sup>(22)</sup>



**Fig. 9** Various defects occurring in rheology forming process of A390 alloy ( $V_p = 200\text{mm/sec}$ ,  $f_s = 30\%$ ,  $T_d = 300^\circ\text{C}$ )



**Fig. 10** Various defects occurring in rheology forming process of A390 alloy ( $V_p = 200\text{mm/sec}$ ,  $f_s = 55\%$ ,  $T_d = 300^\circ\text{C}$ )

Fig. 8(e)~(h)의 경우는 고상률( $f_s$ )이 55%인 경우 제품 표면에서의 결함형태와 위치를 나타낸 것이다. Fig. 8 (e)~(h)에서 보여주는 바와 같이 제품표면의 중앙부분에서 관찰되고 있는 결함은 성형과정 중 재료의 유동현상으로 인하여 성형시 최종적으로 금형 캐비티 내에 충전됨과 동시에 와류가 형성되어 응고속도가 지연되기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 고상률이 55%일 경우 이

론해석의 결과와 실험결과를 비교하였다.

Fig. 9는 펀치의 속도  $V_p = 200\text{mm/sec}$ 일 때 Fig. 8(a)~(d)에 대응하는 성형품의 외관사진을 나타낸 것이다. 고상률이 30%인 경우, 액상편석현상이 최종 충전부위에서 관찰되었다. 따라서, 저고상률인 경우는 충전시 소재의 중력으로 인하여 고상과 액상의 분리현상이 더욱 심화된 것으로 생각된다.

Fig. 10은 펀치속도  $V_p = 200\text{mm/sec}$ 인 경우 Fig. 8(e)~(h)에 대응하는 외관사진을 나타낸 것이다. 고상률이 55%인 경우는 충전시 금형 내부에서 와류가 생성됨과 동시에 응고수축 및 응고지연이 발생하여 제품표면에 결함이 발생한 것으로 사료되며, 유동해석결과와 비교하면 표면결함의 원인을 증명할 수 있다.

#### 4. 해석결과

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

##### 4.1 Model I의 해석 결과 및 고찰

수직형 금형을 이용한 레오로지 성형실험결과를 정성적으로 비교검토하기 위하여 본 연구의 이론해석이 적용될 수 있는 임계고상률에 대응하는 고상률 55%에 대하여 수치해석을 수행하여 실험에서 얻어진 제품의 표면상태와 유동해석결과를 정성적으로 비교검토하였다.

Fig. 11(a)~(d)는 고상률( $f_s$ )과 성형속도( $V_p$ )가 각각 55%와  $200\text{mm/sec}$ 일 때 수치해석을 통하여 얻은 속도벡터의 결과를 나타낸 것이다. 초기상태로부터 각각  $t=0.10\text{sec}$ ,  $0.15\text{sec}$ ,  $0.20\text{sec}$ ,  $0.30\text{sec}$ 를 나타내었다. 충진이 완료되는 시간은 약  $0.32\text{sec}$ 이었다 그러나  $t=0.15\text{sec}$ ,  $0.20\text{sec}$ 에서 나타나는 바와 같이 주입구에서 들어오는 소재와 금형 하부에서 유동하는 소재가 겹치는 부분이 발생하므로 표면의 상태가 양호하지 않을 것으로 예상된다. Fig. 10(e)~(h)에서 나타나는 바와 같이 충진이 완료된 후 표면결함이나 기공이 발생하는 원인은 반응용소재가 금형의 캐비티 내에 충전될 때 와류현상에 기인한다고 사료된다.

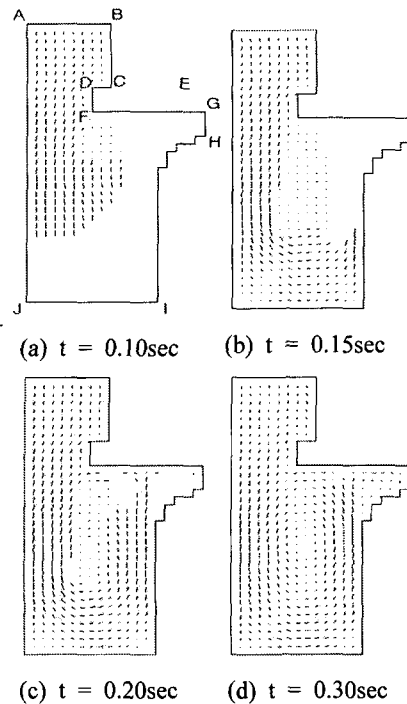


Fig. 11 Filling pattern and velocity profile of  $f_s = 55\%$  with  $V_p = 200\text{mm/sec}$  and  $T_d = 300^\circ\text{C}$  in model I

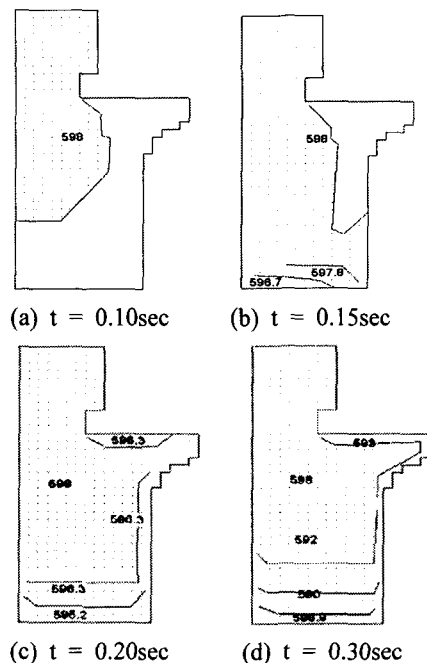


Fig. 12 Temperature distribution for initial solid fraction of 55%, initial punch velocity  $200\text{mm/sec}$  and die temperature  $T_d=300^\circ\text{C}$



Fig. 12(a)~(d)는 Model I의 경우 금형온도  $T_d = 250^\circ\text{C}$ , 펀치속도  $V_p = 200\text{mm/sec}$ 일 때의 충전 거동에 따른 온도분포를 낸 것이다. 충전 결과로부터 금형과 처음 접촉하는 주입구 바닥 부분(Fig. 11의 J)의 온도와 하부금형의 중간 부위가  $T = 588^\circ\text{C}$ 로 가장 낮게 나타났다.

Model I와 같이 제품의 수직방향의 길이가 수평방향의 길이보다 긴 경우의 충전양상은 하부금형을 채운 다음 수평 끝부분을 채우고, 최종적으로 상부금형을 채운다는 것을 알 수 있다. 그러나 주입구에서 나오는 소재와 하부금형에서 상승하는 소재가 서로 합쳐져 중심부위에 빈 공간이 생긴 후, 충진이 완료가 된다. 따라서 중심부위에서의 속도 분포가 회전하는 양상을 보이며, 주입구에서 나오는 소재와 하부금형에서 올라오는 소재가 서로 합쳐지기 때문에 공기의 유입이나 기공 같은 결함이 발생할 수 있다.

4.2 Model II의 해석 결과 및 고찰

Fig. 13(a)~(d)는 Model II의 경우 금형온도  $T_d = 300^\circ\text{C}$ , 펀치속도  $V_p = 200\text{mm/sec}$ 일 때 충전 양상을 보여주고 있다 초기상태로부터 충전시간이 각각  $t = 0.05\text{sec}$ ,  $0.10\text{sec}$ ,  $0.15\text{sec}$ ,  $0.50\text{sec}$ 일 때의

충진 거동을 나타낸 것이다. 충전 거동은 하부금형의 첫 번째 (Fig. 13의  $\overline{SR}$ )와 두 번째(Fig. 13의  $\overline{OM}$ ) 게이트부분을 먼저 채운 다음, 세 번째 (Fig. 13의  $\overline{KJ}$ )게이트부분을 채우면서 수평부분의 끝을 채우는 것을 알 수 있다.

Fig. 14(a)~(d)는 Model II의 경우 금형온도  $T_d = 250^\circ\text{C}$ , 펀치속도  $V_p = 200\text{mm/sec}$ 일 때 충전 거동에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 게이트부분의 입구(Fig. 13의  $\overline{SR}$ )와 게이트부분의 끝단 (Fig. 13의  $\overline{OM}$ )의 온도가  $T = 593^\circ\text{C}$ 정도인 것을 알 수 있다.

Model II의 경우는 하부금형에 세 부분의 게이트와 수평부분 끝에 오버플로우가 있는 형상이다. 특히 게이트 입구에서는 수평방향의 속도가 존재하나, 게이트부분에서는 수직방향의 속도만이 있는 양상을 나타낸다. 또한 온도분포의 경우에도 먼저 충전된 부분부터 온도가 감소하는 지향성 응고양상을 나타내고 있다. 또한 충전시 단면적이 급격히 감소하는 부분(Fig. 13의  $\overline{SR}$ ,  $\overline{ON}$ ,  $\overline{KJ}$ )에서는 소재와 금형과의 접촉시간이 길고 금형으로부터 열을 많이 빼앗기기 때문에 냉각속도가 증대되어 기계적 성질이 개선될 것으로

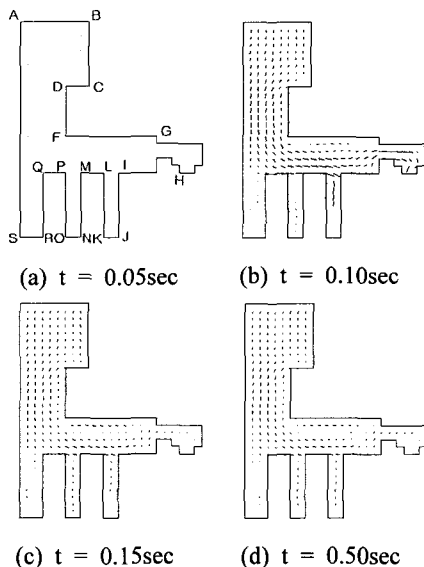


Fig. 13 Filling pattern and velocity profile of solid fraction  $f_s = 30\%$  with  $V_p = 200\text{mm/sec}$  and  $T_d = 300^\circ\text{C}$  in model II

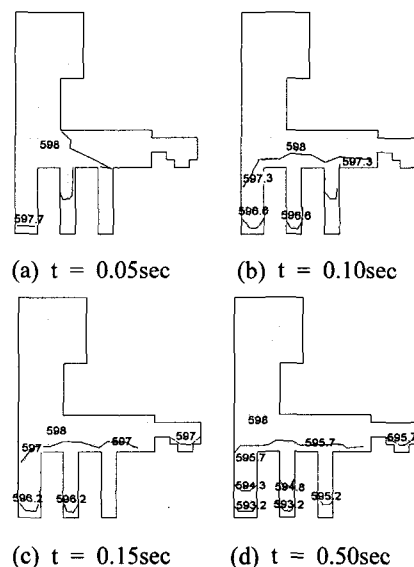


Fig. 14 Temperature distribution for initial solid fraction of 55% with  $V_p = 200\text{mm/sec}$  and  $T_d = 300^\circ\text{C}$  in model II

사료된다.

고상률이 30%인 경우는 실험결과(Fig. 9)로부터 알 수 있는 바와 같이 금형하부에서 액상편석이 관찰되었다. 따라서 액상편석을 고려한 해석방법이 향후 연구되어야 하며, 저고상률의 경우는 게이트의 방향이 수직형보다 수평형이 액상편석을 방지하는데 유효함을 알 수 있다. 저고상률인 경우 실험결과와 이론결과를 비교하기 위해서는 게이트의 방향이 수평형으로 되어있는 금형을 이용하여 실험한 데이터와 비교함이 타당하다고 사료된다.

## 5. 결 론

입의 형상의 모델에 대하여 금형 내부에서의 소재의 충전 거동 및 열전달 현상을 레오로지 이론을 도입하여 수치해석한 결과와 실험결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고상률이 높은 55%인 경우, 제품표면에 나타나는 결함은 최종응고부위에서 발생함을 알 수 있었다.

(2) 금형의 형상을 입력하면 반응용재료의 성형 공정시 소재의 충전거동, 고상률 예측, 유동해석이 가능한 프로그램을 개발하였다.

(3) 수치해석을 통하여 성형시 충전거동에 따른 온도분포는 금형에 제일 먼저 접촉하는 부분의 온도가 가장 낮음을 알 수 있었다. 그러나 하부 금형에 요철이 존재하는 금형의 경우에는 충진이 계속 일어나기 때문에 접촉시간에 상관없이 초기 온도와 차이가 없음을 알 수 있었다. 충전 완료 후에는 최저온도의 차이가 최고 7°C정도 차이가 난다.

(4) Model I, II에 대하여 충전 및 온도해석 결과로부터 응고의 시작부분은 금형과 제일 먼저 접촉하여 충진이 완료된 부분에서 진파되어 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.

(5) Model I과 같은 경우에는 하부금형에서 충진이 되어 상승하는 소재와 금형의 주입구에서 나오는 소재가 서로 합쳐져 결함으로 작용할 것으로 판단된다. 따라서 Model I과 같은 형상을 가진 제품을 설계할 경우에는 주입구의 형상을

변경해야 될 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- (1) Flemings, M. C., 1991, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State," *Metallurgical Transaction A*, Vol. 22, pp. 957~981.
- (2) Pitts, H. E., and Atkinson, H. V., 1998, "Thixforming of 6061 Al Alloy for Automotive Components," *The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 97~104.
- (3) Mullins, A. M. and Walker, D. J., 1996, "Modelling Solid/Fluid Interactions in A Dendritic Semi Solid," *The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 104~109.
- (4) Barkhudarov, M. R., Bronisz, C. L. and Hirt, C. W., 1996, "Three-Dimensional Thixotropic Flow Model," *The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 110~114.
- (5) Paradies, C. J., Rappaz, M., Imwinkelried, T. and Gabathuler, J. P., 1996, "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.
- (6) Burgos, G. R. and 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.
- (7) Modigell, M. and 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.
- (8) Kang, C. G. and Kim, Y. D., 1997, "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.
- (9) Koc, M., Vazquez, V., Witulski, T. and Altan, T., 1996, "Application of the Finite Element Method to Predict Material Flow and Defects in the Semi-Solid Forging of A356 Aluminum

- Alloys," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 106~112.
- (10) Kang, C. G., Choi, J. S. and Kang, D. W., 1998, "A Filling Analysis of the Forging Process of Semi-Solid Aluminum Materials Considering Solidification Phenomena," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 30, No. 438, pp. 289~302.
- (11) Kang, C. G. and Yoon, J. H., 1996, "A Compression Behavior of Semi-Solid Material and Finite Element Analysis Considering Flow of Liquid Phase," *Transaction of The Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 20, No. 12, pp. 3715~3727.
- (12) Jung, H. K., Kang, C. G. and Moon, Y. H., 2000, "Induction Heating of Semi-Solid Billet and Control of Globular Microstructure to Prevent Coarsening Phenomena," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 12~23.
- (13) Kang, C. G. and Kang, D. W., 1997, "The Effect of Forging Process of Semi-Solid Aluminum Material on Mechanical Properties," *Transaction of The Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 21, No. 9, pp. 1400~1413.
- (14) Kurz, W. and Fisher, D. J., 1984, *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Publication.
- (15) Kim, N. S. and Kang, C. G., 2000, "An Investigation of Flow Characteristics Considering Effect of Viscosity Variation in Thixoforming Process," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 103, pp. 237~246.
- (16) Harlow, F. H. and Welch, E. J., 1965, "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface," *The Physics of Fluid*, Vol. 8, No. 12, pp. 2182~2189.
- (17) Ohnaka, I., 1985, "Introduction of Compute Heat and Solidification Analysis," *MARUZEN*, pp. 167~208.
- (18) 1990, *Metal Handbook*, ASM International, 10th Edition, Vol. 2, pp. 2~164.
- (19) Jung, H. K. and Kang, C. G., 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6 Pct Si-3 Pct Cu-0.3 Pct Mg Alloy for Thixoforming," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, No. 11, pp. 2967~2977.
- (20) Garat, M., Blais, S., Pluchon, C. and Loué, W. R., 1998, "Aluminum Semi-Solid Processing : from the Billet to the Finished Part," *The 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. xvii~xxxii.
- (21) Kang, C. G., Kang, B. S. and Kim, K. H., 1999, "The Effect of Strain Rate on Macroscopic Behavior in Compression Forming of Semi-Solid Aluminum Alloy," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 159~168.
- (22) Kang, C. G., 1998, "Effect of Gate Shape and Forging Temperature on the Mechanical Properties in the Injection Forging Process Semi-Solid Aluminum Material," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 73/1-3, pp. 251~263.