한국소성가공학회지 제 5 권 제 3 호, pp. 239~255, 1996

〈논 문〉

응고현상을 고려한 반용융 알루미늄재료의 단조공정에 관한 충전해석

강충길* · 최진석** · 강동우**

(1996년 5월 11일 접수)

A Filling Analysis on Forging Process of Semi-Solid Aluminum Materials Considering Solidification Phenomena

C. G. Kang J. S. Choi and D. W. Kang

Abstract

A new forming technology has been developed to fabricate near-net shape products using light metal. A semi-solid forming technology has some advantages compared with the conventional forming processes such as die casting, squeeze casting and hot/cold forging. In this study, the numerical analysis of semi-solid filling for a straight die shape and orifice die shape in gate pattern is studied on semi-solid materials(SSM) of solid fraction f_S=30% in A356 aluminum alloy. The finite difference program of Navier-Stokes equation coupled with heat transfer and solidification has been developed to predict a filling pattern and the temperature distribution of SSM. The program developed in this study gives die filling patterns of SSM and final solidification region.

Key Words: Semi-Solid Materials(반용융재료), Filling Analysis(충전해석), Semi-Solid Forging Process(반용융단조공정), Die Shape (다이형상), Solid Fraction(고상율), Solidification(응고)

기 호 설 명

c	: 비열
c_E	: 등가비열
C	: 응고율
f_S	: 고상율
g	: 중력가속도
h	: 대류열전달 계수
k_0	: 분배계수
L	: 잠열
P	: 압력
P_0	: 공기의 압력
q	: 열유속
Q	: 생성항
t	: 시간
t_{re}	: 재가열 유지시간
t_{fill}	: 충전 완료시간
T	: 온도
T_{die}	: 금형온도
T_f	: 순수 금속의 용융온도
T_L	: 합금의 액상선 온도
T_m	: 2원합금의 공정온도
T_r	: 재가열 온도
$T_{surface}$	: 용융금속의 자유표면에서의 온도
T_S	: 합금의 고상선 온도

*부산대학교 정밀기계공학과
**부산대학교 정밀기계공학과 대학원

T_∞ : 대류열전달 금형의 온도
u : x방향의 속도
v : y방향의 속도
V_p : 펀치속도
x : x방향
X : 2원합금의 용질의 백분율
y : y방향
γ : 변형률 속도
η_a : 반용융재료의 겉보기점도
η_{La} : 용융금속의 겉보기점도
η_{max} : 최대 겉보기 점도
κ : 열전도 계수
μ : 점성계수
ν : 동점성계수
ρ : 밀도
ρ_m : 용융금속의 밀도
σ : 계면에서의 응력
τ : 계면에서의 전단응력
Φ : 유선함수
air : 공기
L : 용융 금속
t : 접선방향
n : 법선방향
x : x방향 편미분
y : y방향 편미분

1. 서 론

단조공정에 의하여 제조되어진 부품은 기계적 성질이 우수한 제품을 생산할 수 있으나 복잡한 부품의 성형에는 많은 공정이 필요하며 프레스 용량의 증대, 금형의 피로파괴 등으로 인하여 생산원가가 높은 단점이 있다.

알루미늄을 이용한 경량화 부품의 개발은 주로 액체상태로부터 원하는 형상의 부품을 직접 제조하는 다이캐스팅이나 용탕단조법에 의해 이루어지고 있다. 그러나 전자는 용탕이 캐비티(cavity) 내부로 유입될 때 난류로 인한 공기의 포집과 수축에 의한 결함이 있고 후자는 펀치의 가압 및 지연시간 때문에 금형의 온도상승으로 인해 금형의 수명이 단축되는 결점이 있다. 두 방법 모두 응고 시 수지상정 조직이 발생하여 기계적 성질이 균일하지 못한 단점이 있다.

이러한 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로 반용융가공(semi-solid processing)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 반용융가공이란 합금의 응고 시 고상과 액상이 함께 존재하는 반용융상태에서 재료를 성형하는 방법이다. 반용융상태에서의 성형은 기존의 단조공정에 비해 적은 하중으로도 복잡한 형상의 부품을 한 공정으로 만들 수 있고, 액체상태보다 높은 점성으로 인해 충전 시 유동형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 가스 결함이 적고 초기온도가 낮기 때문에 금형의 열피로를 줄일 수 있다. 또한 응고가 진행중인 상태이기 때문에 응고 완료 시에도 수축에 의한 결함이 적다. 이와 같이 반용융가공은 기존의 성형방법보다 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 1976년에 Flemings에 의해 처음 제안되어진 이후 많은 연구가 이루어졌다.[2,3]

반용융재료를 이용한 수치해석적인 방법에 관한 연구는 S. Toyoshima등[4]이 고상을 다공질 재료, 액상을 Darcy유동으로 가정하여 다공질 재료의 항복조건식을 반용융재료에 응용하여 압연, upsetting공정을 해석하여 실험결과와 비교하였으며, J. H. Yun[5]은 Toyoshima[4]와 같은 가정을 두고 항복조건식을 다르게 사용하고, upsetting에 대하여 수치해석과 실험을 하였다.

H. Peng등[6]은 반용융재료의 고상율이 낮고 유동시간이 짧을 경우 그 유동특성이 뉴튼유체와 유사하다는 것을 실험을 통하여 입증하고 Turng[3]이 제안한 점성식을 이용하고 S. P. Wang[7]이 개발한 자유표면의 해석이 가능한 유한요소법을 이용하여 반용융재료의 유동해석과 충전현상을 연구하였다.

반용융재료의 단조공정을 실용화하기 위해서는 금형의 형상 및 성형조건이 재료의 충전거동에 미치는 영향을 파악하여야 한다.

지금까지의 연구들은 단순히 반용융재료의 특성을 파악하거나 그 수학적 모델을 제안하기는 하였지만, 금형설계와 관련지어 해석한 예는 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 반용융재료를 뉴튼유체로 가정하여 금형 내부의 충전거동을 파악하였다. 충전거동은 Navier-Stokes방정식을 차분화하여 충전 시 자유표면의 추적이 가능하도록 SMAC법[8]을 이용하여 복잡한 부품의 충전에 대한 해석을 응고현상을 고려한 열전달과 함께 계산하였다. 온도와 변형률 속도에 따른 점성은 Okano[9]가 제안한 점성모델을 사용하였다.

금형온도와 펀치속도에 따른 충전거동을 파악하기 위하여 다양한 조건에서 수치해석을 하여 충전거동과 응고현상을 관찰하였다.

2. 이론해석

2.1 지배방정식

2.1.1 2차원 비정상 비압축성 유체의 Navier-Stokes방정식

반용융재료의 고상율이 $f_s<(40\%\sim30\%)$인 경우 반용융재료는 고상과 액상의 거시적인 분리현상이 일어나지 않아 연속체로 가정할 수 있으며, 또한 높은 변형률속도에서는 그 특성이 뉴튼유체와 유사함이 알려져 있다.[6] 따라서 반용융재료의 충전거동에 관한 해석 시 Navier-Stokes방정식을 사용하여 해석할 수 있다.

2차원 비정상 비압축성 뉴튼유체는 Bossinesq 근사에 의해 직교좌표계에서 다음과 같은 Navier-Stokes방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial(u)}{\partial x}+v\frac{\partial(u)}{\partial y}=\nu(T)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)+\nu(T)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+g_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial(v)}{\partial x}+v\frac{\partial(v)}{\partial y}=\nu(T)\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)+\nu(T)\left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+g_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad (3)$$

2.1.2 자유표면에서의 경계조건식

자유표면을 갖는 유체는 벽면에서의 구속조건 뿐만 아니라 자유표면에서의 구속으로 인하여 유동의 특성이 결정된다. 자유 표면에서의 구속조건은 접촉하는 두 유체의 성질을 고려하여 아래와 같은 식들로 나타낼 수 있다.[7]

$$\left(-P+2\mu\frac{\partial u_n}{\partial x_n}\right)_L=\left(-P+2\mu\frac{\partial u_n}{\partial x_n}\right)_{air} \quad (4)$$

$$\mu_L\left(\frac{\partial u_n}{\partial x_t}+\frac{\partial u_t}{\partial x_n}\right)_L=\mu_{air}\left(\frac{\partial u_n}{\partial x_t}+\frac{\partial u_t}{\partial x_n}\right)_{air} \quad (5)$$

$$(u_n)_L=(u_n)_{air} \quad (6)$$

$$(u_t)_L=(u_t)_{air} \quad (7)$$

일반적으로 공기와 용융금속의 경우처럼 접촉하는 공기의 밀도가 용융금속보다 매우 낮은 경우 용융금속의 자유표면에 널리 쓰이고 있는 식을 이용하였다

(1) 공기의 압력은 일정하다. (즉 공기의 유동은 고려하지 않는다.)

(2) 자유표면에서 공기의 동점성계수는 용융금속의 동점성계수와 같다.

$$\text{(i)}\ \ \tau=\mu_L\left(\frac{\partial u_n}{\partial x_t}+\frac{\partial u_t}{\partial x_n}\right)=0 \quad (8)$$

$$\text{(ii)}\ \ \sigma_n=-P+2\mu_L\frac{\partial u_n}{\partial x_n}=-P \quad (9)$$

2.1.3 응고현상을 고려한 열전달 방정식

액상에서 고상으로 응고가 일어나는 과정에서 응고잠열이 방출된다. 응고잠열의 방출은 비선형적으로 일어나기 때문에 해석적인 방법으로 해를 구하기가 어렵다. 따라서 등가비열법,[10] 온도회복법[10]과 엔탈피법[10,11]이 널리 쓰이고 있다. 이 중 등가비열법과 온도회복법은 프로그램이 용이하고 계산속도가 빠르지만 시간 간격이 작아야 정해에 가까운 해를 얻을 수 있다. 반면에 엔탈피법은 비교적 정확한 해를 구할 수 있지만 프로그램이 어렵고 계산속도가 많이 걸리는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 등가비열법을 이용하여 계산하였다.

고상율 f_S는 온도의 함수로써 본 연구에서는 2원합금의 고상과 액상의 농도비를 이용한 방법을 사용하여 고상율과 온도의 함수를 다음과 같이 정의하였다.[10]

$$f_S=1-\left(\frac{T_f-T}{T_f-T_m}\right)^{\frac{1}{k_0-1}} \quad (10)$$

응고잠열과 열전달의 생성항을 고려하여 등가비열법에 의한 응고현상을 고려한 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c_E\frac{\partial T}{\partial t}+\rho c\left(u\frac{\partial(T)}{\partial x}+v\frac{\partial(T)}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\kappa\frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (11)$$

$$C_E=\rho c-\rho L\frac{\partial f_S}{\partial T} \quad (12)$$

2.1.4 반용융재료의 점성

반용융재료는 고상율이 증가함에 따라 점성도 함께 증가하는 특성을 가지고 있다. 다시 말해 고상율이 증가함에 따라 점성이 증가하는 특성을 가지

고 있다. 반용융재료는 고상율뿐만 아니라 변형률속도에 의해서도 점성이 변한다. 즉, 변형률속도가 증가하면 점성계수가 작아지는 성질을 가지고 있다. 따라서 반용융재료의 점성식을 실험적으로 구할 때 이들 두 성질을 이용하며, Okano[9]는 반용융재료에 대한 점성식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\eta_a=\eta_{La}\left(1+\frac{\alpha\rho_m C^{1/3}\dot{\gamma}^{-4/3}}{2\left(\frac{1}{f_s}-\frac{1}{0.72-\beta C^{1/3}\dot{\gamma}^{-1/3}}\right)}\right)$$

$$(0.72-\beta C^{1/3}\dot{\gamma}^{-1/3}>f_s) \tag{13}$$

$$\alpha=2.03\times10^2\left(\frac{X}{100}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\beta=19.0\left(\frac{X}{100}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{14}$$

식 (13)에 의해 변형률속도와 냉각속도에 따른 겉보기점도를 고상율의 함수로 Fig. 1로 나타내었다. 본 연구에 사용된 A356재료에서는 Si의 백분율 $X=6.7\%$, $\eta_{La}=0.0045$Pa · sec이다.[12] Fig. 1에서 알 수 있듯이 응고속도가 일정한 경우 변형율속도가 증가함에 따라 겉보기 점도는 높은 고상율에서도 낮아짐을 알 수 있다.

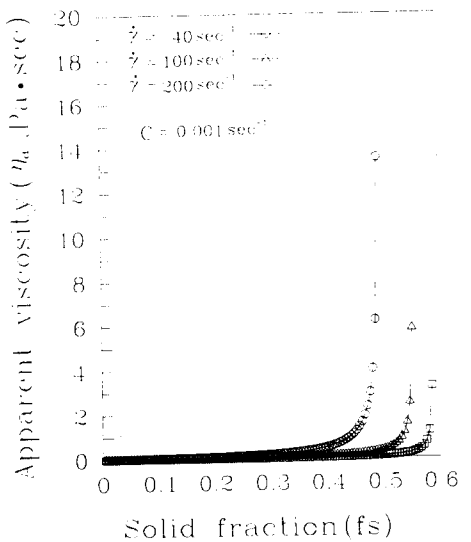


Fig. 1 Apparent viscosity with various shear rate

2.2 유한차분해석

2.2.1 Navier-Stokes방정식의 차분

식 (1)-(3)을 푸는 수치적인 방법들이 다양하게 개발되어 왔지만, 본 연구에서는 자유표면을 가지는 유동의 해석에 적합한 SMAC법(Simplified Marker and Cell Method)을 이용하여 해석하였다.

SMAC법은 식 (1)-(3)을 시간에 대하여 전진차분법을 사용하며 엇갈린 격자망(staggered grid)을 이용하여 속도장을 해석한다. 엇갈린 격자망에서는 Fig. 2와 같이 u, v, P를 한 격자의 y방향의 중심, x방향의 중심, 격자의 중심으로 각각 다른 점에서 계산한다. 이 방법은 프로그램을 개발할 때 약간 어려운 점이 있지만, 수치해석 시 발생할 수 있는 발산해를 예방할 수 있으며,[8,13] 자유표면의 해석 시 자유표면에서 경계조건식 식 (8)과 식 (9)를 적용시키기 쉬운 장점이 있다.[14] 대류항의 차분은 풍상차분법(upwind difference scheme)을 사용하며, 그 외의 차분은 중앙차분법을 사용하여 시간에 대해서는 1차, 공간에 대해서는 2차의 정도를 가진다. SMAC법은 식 (1)-(3)을 아래와 같이 차분화하여 속도장을 해석하였다.

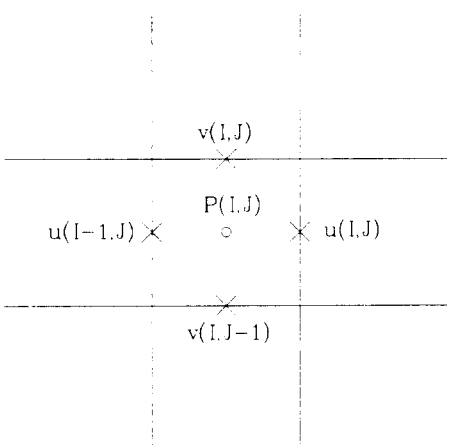


Fig. 2 Velocities and pressure evaluation point in staggered grid

$$u^{n+1}=u^n-\Delta t[(uu_x)^n+(uv_y)^n+\frac{1}{\rho}P_x^{n+1}$$
$$-\nu(u_{xx}^n+u_{yy}^n)] \tag{15}$$

$$v^{n+1}=v^n-\Delta t[(uv_x)^n+(vv_y)^n+\frac{1}{\rho}P_y^{n+1}$$
$$-\nu(v_{xx}^n+v_{yy}^n)] \tag{16}$$

$$u_x^{n+1}+v_y^{n+1}=0 \tag{17}$$

여기서 n, $n+1$은 현재 시간에서의 값과 일정시

	B	B	B	B	B	B	B	B	
B	F	F	F	F	F	F	S		B
B	F	F	F	F	F	F	S		B
B	F	F	F	F	F	S			B
B	F	F	F	F	S				B
B	F	F	F	F	S				B
B	F	F	O	O	O				B
B	F	F	O	O	O				B
B	F	F	O	O	O				B
	B	B	B	B	B	B	B	B	

B : Boundary cell　　F : Full cell

S : Surface cell　　O : Obstacle cell

Fig. 3 Classified cells by boundary condition and with or without markers

간 후의 새로운 값에 대한 상첨자(superscript)이며 하첨자(subscript) x, xx는 공간상의 x좌표계에 대한 1차, 2차 편미분을 나타내며 y, yy는 y좌표계에 대한 1차, 2차 편미분을 나타낸다.

위 차분식을 풀기 위한 처음 단계로써 임시 속도 $\hat{u}$, $\hat{v}$를 아래와 같이 가정한다.

$$\hat{u}=u^n-\Delta t[(uu_x)^n+(uv_y)^n+\frac{1}{\rho}P_x^n -\nu(u_{xx}^n+u_{yy}^n)] \tag{18}$$

$$\hat{v}=v^n-\Delta t[(uv_x)^n+(vv_y)^n+\frac{1}{\rho}P_x^n -\nu(v_{xx}^n+v_{yy}^n)] \tag{19}$$

다음 단계에서는 유선함수 Φ를 아래와 같이 임시속도의 함수로 가정하고,

$$\Phi_{xx}+\Phi_{yy}=-(\hat{u}_x+\hat{v}_y) \tag{20}$$

만족하는 유선함수 Φ를 반복해법을 통해 구한다. 만약 Φ가 수렴을 하면 새로운 속도장 u^{n+1}, v^{n+1}은 식 (21), (22)와 같이 주어지며, 압력은 식 (23)으로 계산한다.

$$u^{n+1}=\hat{u}+\Phi_x \tag{21}$$

$$x^{n+1}=\hat{v}+\Phi_y \tag{22}$$

$$P^{n+1}=P^n-\frac{\rho}{\Delta t}\Phi \tag{23}$$

2.2.2 자유표면의 해석을 위한 차분

N-S방정식은 오일러좌표계에서 유도된 식이므로 시간에 따라 검사체적이 변하는 자유표면을 추적할 수 없다. SMAC법에서는 자유표면을 해석하기 위하여 N-S방정식을 라그랑지좌표계의 형태로 수정하지 않고 라그랑지안(lagrangian) 입자를 도입함으로써 자유표면을 추적할 수 있다.

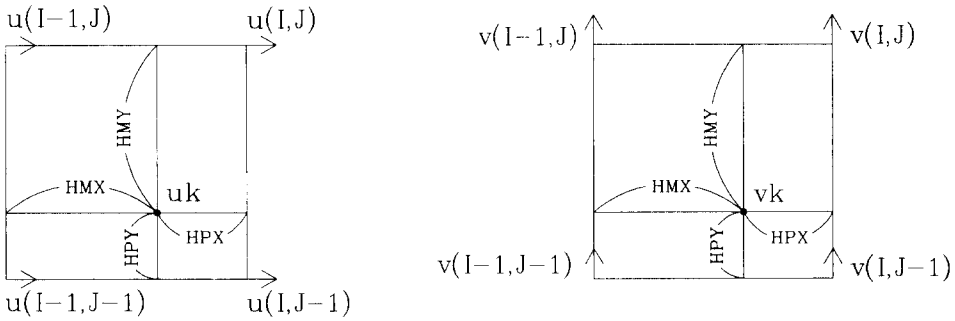
입자의 수가 많고 시간증분이 작다고 가정하면 라그랑지안 입자들을 검사체적 내에 균일하게 배치시킨 후 자유표면에서 구속조건을 만족하는 오일리안 속도장을 구하고 이 속도로 라그랑지안 입자들이 움직여 새로운 검사체적을 형성할 수 있다. 따라서 라그랑지안 입자의 유무를 확인하여 검사체적을 추적하며 라그랑지안 입자의 유무에 따라 새로운 검사체적을 정의하였다. SMAC법에서는 라그랑지안 입자들의 유무와 이동으로 자유표면을 추적하기 때문에 입자들의 유무와 경계조건에 따라 각각의 셀(cell)을 Fig. 3과 같이 다섯 가지로 분류하였다.

Fig. 3에 나타난 B는 경계 셀을 나타내며, F는 유체가 가득 차 있는 영역을, O는 장애물을 나타내며 빈 영역은 유체가 없는 부분을 나타낸다. S에 해당하는 셀인 경우 자유표면을 가진 셀이며 식 (8), (9)를 만족하는 속도 경계조건을 가지게 된다.

입자들의 이동속도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 네 절점에서의 x, y방향의 속도 u, v를 각각 선형으로 보간하여 구하였다. 입자의 x방향의 속도 uk_{marker}는 입자의 위치를 기준으로 가장 가까운 네 절점의 속도 $u(i-1,\ j)$, $u(i-1,\ j-1)$, $u(i,\ j)$, $u(i,\ j-1)$를 사용하고, y방향의 속도 vk_{marker}는 입자의 위치를 기준으로 가장 가까운 네 절점의 속도 $v(i-1,\ j)$, $v(i-1,\ j-1)$, $v(i,\ j)$, $v(i,\ j-1)$를 사용하였다. 입자의 속도는 Fig. 2의 네 절점의 속도와 거리에 반비례한다는 가정하에서 절점 k의 x, y방향의 속도를 Fig. 4의 uk_{marker}와 vk_{marker}와 같이 표현할 수 있다.

2.2.3 응고 현상을 고려한 열전달 방정식의 차분

오일러좌표계에서 유도된 식 (11)은 자유표면이 없는 경우에는 쉽게 적용이 가능하지만 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 자유표면을 가진 유동을 해석하고자 할 경우 문제점을 가지고 있다. 한 셀이 빈



$$uk_{marker} = HPX\times HMY\times u(i-1,j)+HMX\times HMY\times u(i,j) + HPX\times HPY\times u(i-1,j-1)+HMX\times HPY\times u(i,j-1)$$

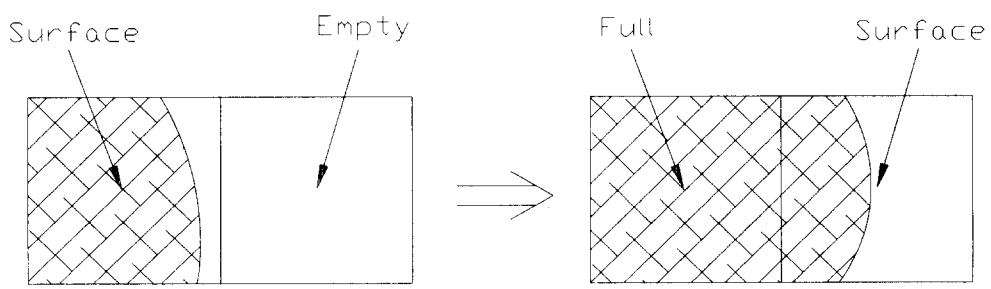
$$vk_{marker} = HPX\times HMY\times v(i-1,j)+HMX\times HMY\times v(i,j) + HPX\times HPY\times v(i-1,j-1)+HMX\times HPY\times v(i,j-1)$$

Fig. 4 Profile of moving velocity of marker

영역에서 유체가 유입되어 자유표면 셀이 될 경우 그 셀의 $n+1$스텝의 온도 $T^{n+1}{}_{surface}$를 계산하기 위해서는 n스텝 시간의 온도 $T^{n}{}_{surface}$가 필요하다. 그러나 빈 영역에서 자유표면이 된 경우 n스텝의 온도 $T^{n}{}_{surface}$는 공기의 온도 T_{air}(T_{empty})가 되기 때문에 한 스텝 이전 시간의 온도를 정확하게 구할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 에너지 입자(energy maker)들을 이용한 대류열전달의 계산을 자유표면에서 수행하였다.

에너지 입자들은 유체의 검사체적을 정의하기 위한 입자들과 같이 질량이 없는 가상의 에너지 입자들을 유체가 있는 영역에 고루 분포시킨 다음 이들 에너지 입자들이 이동하는 것을 대류 열전달로 가정하였다. 따라서 자유표면 셀에서 이전시간의 온도는 그 셀 안에 있는 에너지 입자들이 가지고 있는 온도를 평균하여 구하였으며, 자유표면을 제외한 영역에서는 차분법을 이용하여 해석하였다.

열전도계수 κ가 공간좌표 (x, y)의 함수가 아니라 가정하면 식 (11)을 차분화하면 식(24)과 같다.



$$T_{empty} \Rightarrow T_{surface}$$

$$T_{air} \Rightarrow T^{n}{}_{surface}$$

(a) Time = n (b) Time = n+1

Fig. 5 (a) ~ (b) Inadequate Temperature profile when fluid fills empty region

$$T^{n+1}=\frac{\Delta t}{\rho c_E}(-(uT_x)^n-(vT_y)+\varkappa(T_{xx}^n+T_{yy}^n)+\rho c_E T^n \quad (24)$$

2.3 수치해석 결과 및 고찰

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

Table 1 Material properties used for calculation[12]

Property	Symbol	Unit	Value
Density	ρ	kg/m³	2685
Specific heat	c	J/kgK	963
Conduction coefficient	$\varkappa$	W/mK	159
Solidus	T_L	℃	555
Liquidus	T_S	℃	615
Viscosity	μ	Pa・sec	0.00447
Partition ratio	$\varkappa_0$	-	0.1111

충전 시 반용융재료의 점성은 Okano(9)가 제안한 식을 사용하였다. Okano의 식 (13)은 coaxial double cylinder하에서의 실험을 통하여 제안된 모델이기 때문에 $0.72-\beta C^{1/3}\dot{\gamma}^{-1/3}>f_S$를 만족해야 하며 $\frac{C}{\dot{\gamma}}$가 어떤 특정한 값 이하일 때는 점성이 계산되지 않는다. 본 연구에서 사용되어진 A356합금과 고상율 f_S=30%인 경우 $\frac{C}{\dot{\gamma}}<0.00016$을 만족해야 한다. 그러나 본 실험의 제조 조건인 V_p=60mm/sec, 금형온도 T_{die}=350℃인 경우 $\frac{C}{\dot{\gamma}}=0.00025$로 식 (13)의 조건을 만족하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 식 (14)의 점성식으로 그 값을 구할 수 없는 경우는 본 프로그램이 계산 가능한 최대 겉보기 점도를 η_{max}=53.7Pa・sec로하여 계산에 사용하였다. η_{max}는 본 프로그램에서 겉보기 점도값을 변화시켜 그 해가 수렴하는 최대값을 시행착오를 통하여 알아내었다.

충전 중 응고의 진전에 따른 점성의 변화를 고려하려 하였으나, 고상율에 따른 점성이 0.01~53.7 Pa・sec로 약 500배 이상 차이를 보여 수치적으로 불안정한 결과를 초래하였다. 따라서 본 연구에서는 점성계수가 일정하다는 가정을 두고, 그 일정한 점성계수를 다양한 공정변수(펀치속도, 금형의 온도, 고상율)에 부합되게 구하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

우선 임시로 적당한 겉보기 점도와 평균 응고율, 평균 고상율, 평균 변형률속도를 가정한 후 충전이 끝날 때까지 계산을 수행하여, 계산 중에 평균 응고율과 평균 고상율, 평균 변형률속도를 구하여 식 (13)의 점성식에 대입하여 새로운 겉보기 점도를 구하였다. 이 방법을 반복하여 점성이 5%안에 들면 더 이상의 반복계산을 수행하지 않고 그 값을 사용하였다. 반복계산시 수렴오차를 5%로 한 것은 5%까지는 오차의 감소가 뚜렷하지만 5% 이후로는 오차의 감소 추세가 둔화되기 때문에 5%로 하였다. 실제 약 3~4회의 시행착오를 하면 5%의 오차범위에 수렴하였다. 실제 식 (13)의 점성식은 V_p=1200mm/sec에서만 사용되었으며 나머지 조건에서는 최대 겉보기 점도를 사용하였다. 실제 현상에 있어서는 점성이 온도에 따라 다르기 때문에 점성을 일정하게 하여 계산을 할 경우 충전에 관해 다소 부정확한 정보를 줄 수 있다. 그러나 위에서 언급했듯이 전체적인 평균 개념의 값들을 사용했기 때문에 전체적인 충전 거동은 유사하리라고 생각된다. 또한 펀치속도에 따른 충전거동에 관해서는 정확한 정보를 제공하기 때문에 점성을 일정하게 하고 계산을 수행하였다. 반용융재료의 초기 고상율 f_S=30%로 하였다.

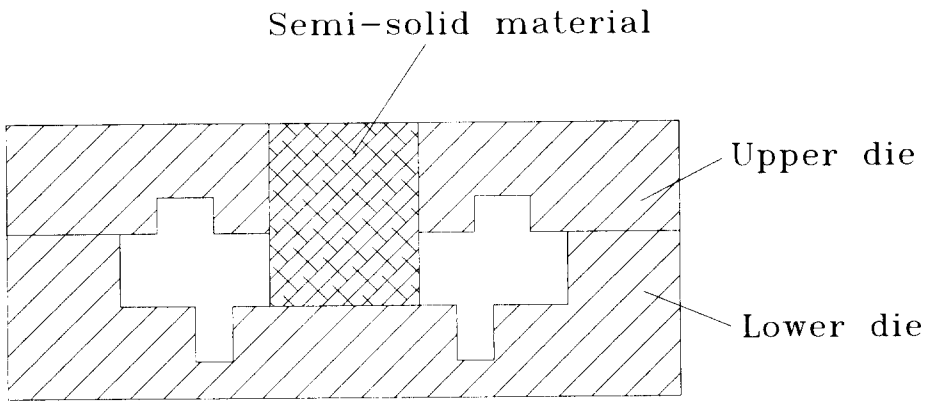
해석모델은 용탕주입구의 모양에 따른 충전거동을 파악하기 위하여 Fig. 6(a)(b)에서 보여주는 바와 같이 직선형(straight type)과 오리피스형(orifice type) 2가지로 하였다. 오리피스형 금형의 경우 면적축소비는 1 : 1.8로 하였다.

계산을 위한 모델은 주입구를 중심으로 좌우대칭이므로 1/2 대칭단면에 대하여 해석하였다. 대칭단면에 대한 유동해석의 경계조건은 식 (25)와 같이 미끌림 조건(free-slip condition)을 사용하였고, 소재와 금형과의 접촉면에서는 식(26)과 같이 고착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

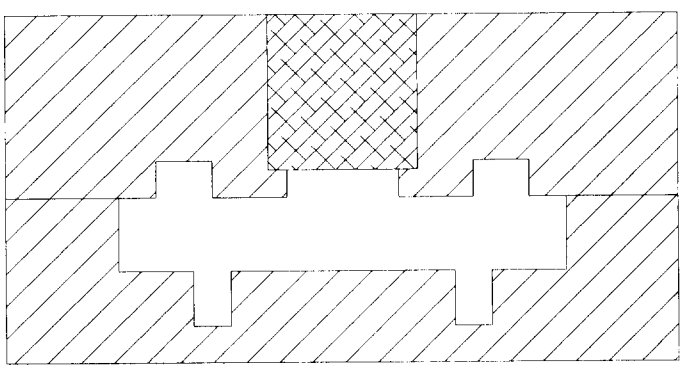
$$\tau=\mu\frac{\partial u}{\partial x}=0 \quad \text{(on the symmetric cross-section)} \quad (25)$$

$$u_t=0 \quad \text{(on the die surface)} \quad (26)$$

열전달해석을 위한 경계조건은 대칭면과 주입구쪽, 그리고 자유표면에서는 식 (27)과 같이 단열조건으로 하였고, 금형과 접촉하는 부분의 열전달은 식 (28)과 같이 온도가 일정한 대류열전달로 가정



(a) straight gate type



(b) orifice gate type

Fig. 6 (a) ~ (b) Gate type of forging die and initial position of semi-solid specimen

하였다.

$$q_n = 0 \quad \text{(on the symmetric cross-section, free surface and gate)} \tag{27}$$

$$q_n = h(T_\infty - T) \quad \text{(on the die surface)} \tag{28}$$

충전 완료시간이 가장 긴 경우에도 약 $t_{fill}=1.0$ sec 정도이므로 충전 중 금형의 온도상승으로 인한 금형방향으로의 열유속(heat flux)의 변화는 크지 않다고 가정하여 금형과의 열전달은 금형온도 T_{die}를 일정하게 하였다. 또한 충전 중에는 반용융재료에 대한 가압효과가 크지 않기 때문에 대류열전달계수 h도 일정하다고 가정하였다. 계산에 사용되어진 대류열전달계수는 大中[10]이 금형표면을 알루미늄 용탕이 흐를 때 $h=1260$ W/m²K로 제안한 값을 사용하였다.

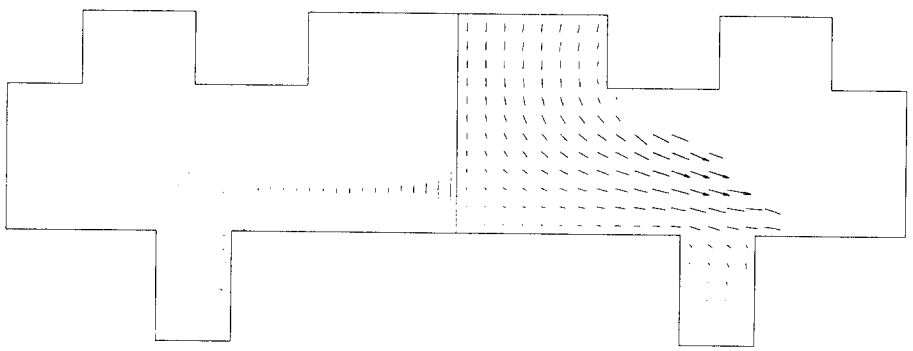
3. 해석결과 및 고찰

Fig. 7(a) ~ (c)는 직선형 금형의 금형온도 $T_{die}=250$℃, 펀치속도 $V_p=60$mm/sec 및 고상율이 $f_s=30$%일 때일 때 초기상태로부터 충전이 각각 30%, 60%, 100%되었을 때의 충전 모습이다. 충전거동은 하부다이 함몰부를 채운 다음 수평 끝부분을 채우고, 최종적으로 상부다이 함몰부를 채운다는 것을 알 수 있다.

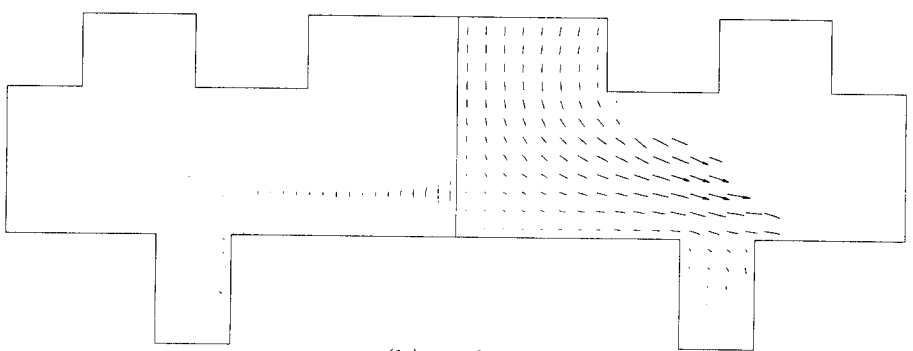
Fig. 8(a) ~ (c)는 직선형 금형의 $T_{die}=250$℃, $V_p=60$mm/sec, $f_s=30$%일 때 충전거동에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 충전 결과로부터 알 수 있듯이 금형과의 접촉시간 t=0.927sec인 경우 주

입구 바닥의 온도는 581℃로 가장 낮으며, 하부다이 합몰부에서는 585℃이다. 온도분포로부터 충전완료후의 최종 응고부위는 상·하부다이 합몰부의 중간정도에 위치한다는 것을 알 수 있다.

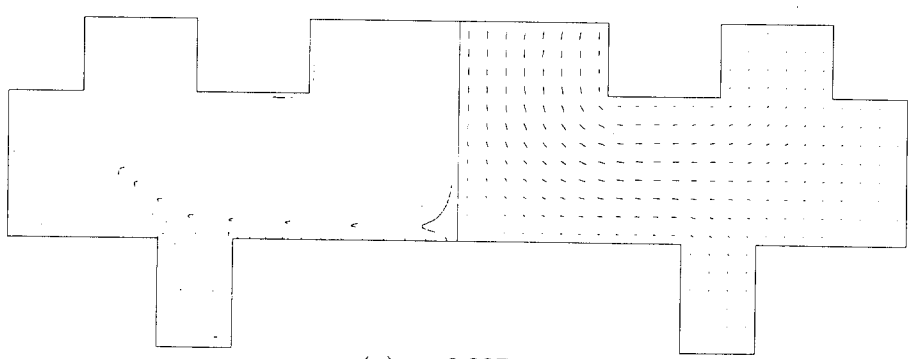
직선형 금형의 T_{die}=300℃, V_p=60mm/sec, 및 f_s=30%일 때 충전거동에 따른 온도분포는 T_{die}=250℃와 유사한 양상을 나타내었다. Fig. 9(a)~(c)는 직선형 금형의 금형온도 T_{die}=350℃, 펀치속도 V_p=60mm/sec 일 때 충전거동에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 가장 낮은 온도 T=



(a) t=0.275sec



(b) t=0.5sec



(c) t=0.927sec

Fig. 7 (a)~(c) Filling pattern and velocity profile of f_s=30% with V_p=60mm/sec and T_{die}=250℃ in straight gate

587℃로 T_{die}=250℃, T_{die}=300℃에 대해 각각 6℃, 3℃정도 높음을 알 수 있다. 직선형 금형의 T_{die}=300℃; V_p=400mm/sec, 및 f_s=30%일 때 초기상태로부터 충전이 각각 30%, 60%, 100%되었을 때의 충전거동은 하부다이 함몰부를 채우면서 동시에 수평 끝부분을 채우고, 최종적으로 상부다이 함몰부를 채운다는 것을 알 수 있었다. Fig. 10(a)~(c)는 오리피스형 금형의 금형온도 T_{die}=

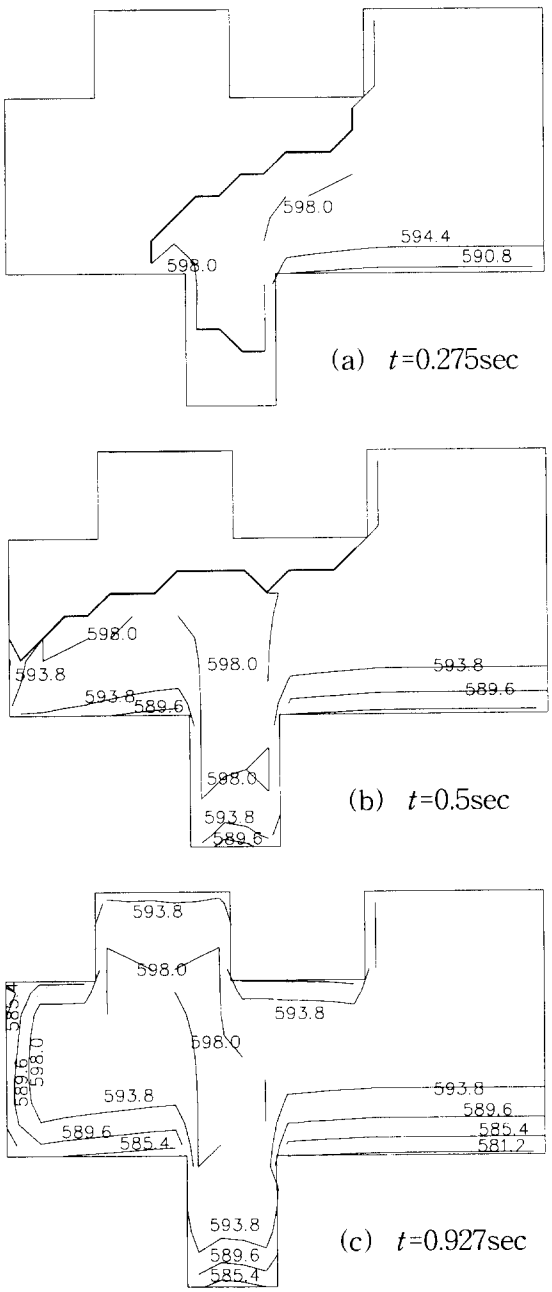


Fig. 8 (a)~(c) Temperature distribution of f_s =30% with V_p=60mm/sec T_{die}=250℃ in straight gate

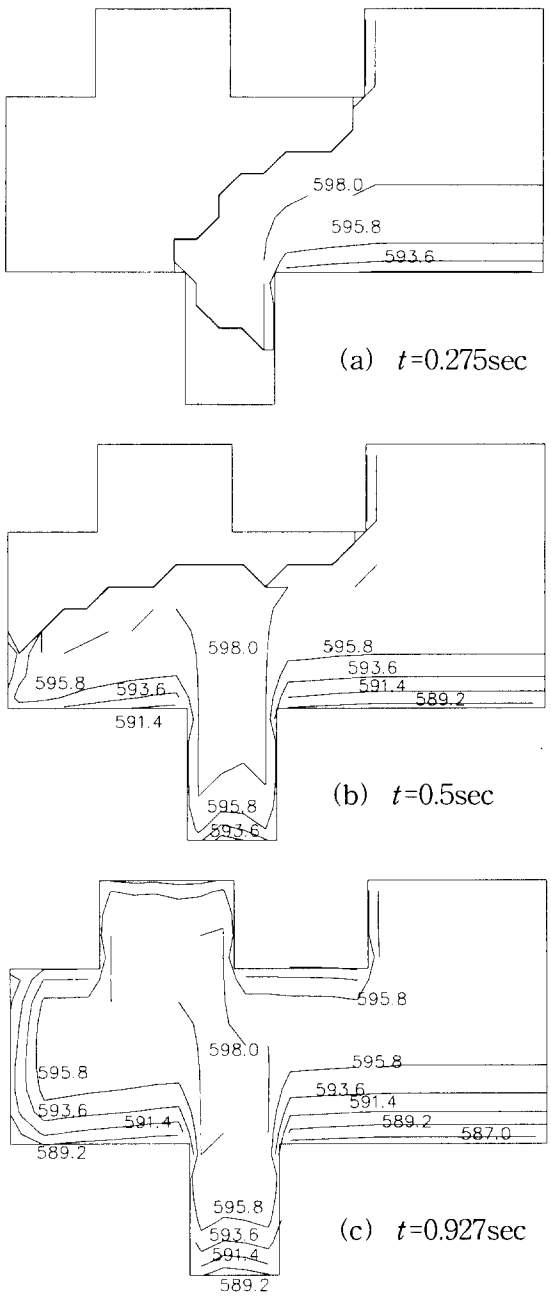
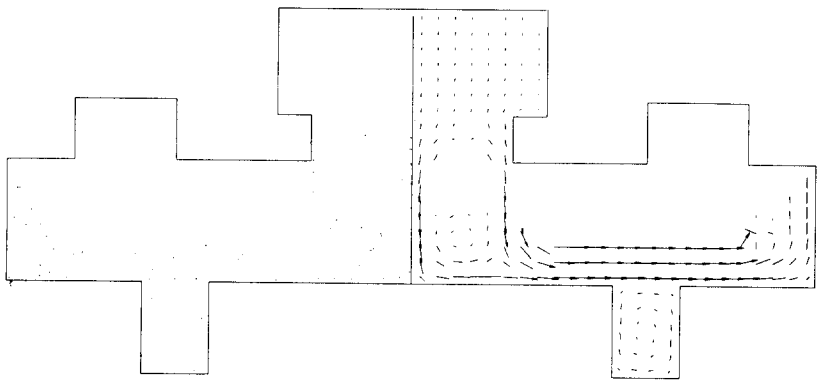
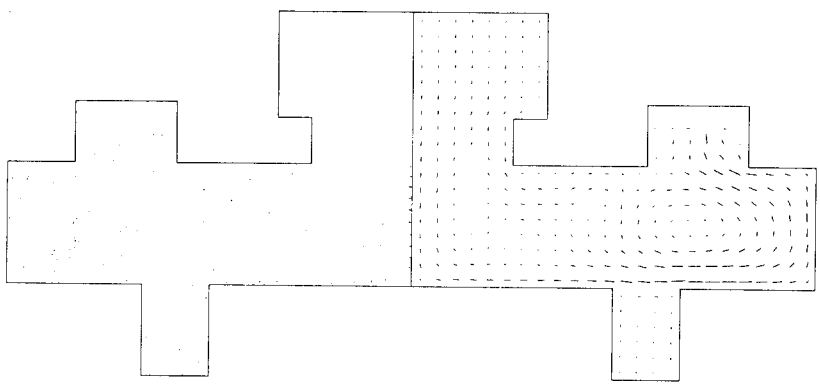


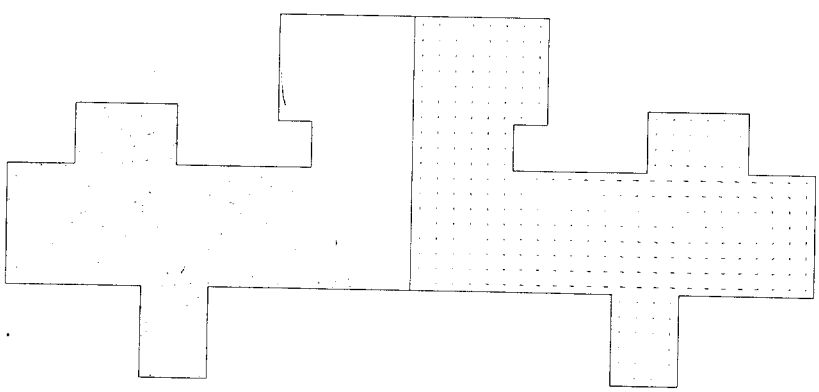
Fig. 9 (a)~(c) Temperature distribution of f_s =30% with V_p=60mm/sec and T_{die}= 350℃ in straight gate



(a) t=0.4sec



(b) t=0.81sec



(c) t=1.34sec

Fig. 10 (a) ~ (c) Filling pattern and velocity profile of f_s=30% with V_p=60mm/sec and T_{die}=250℃ in orifice gate

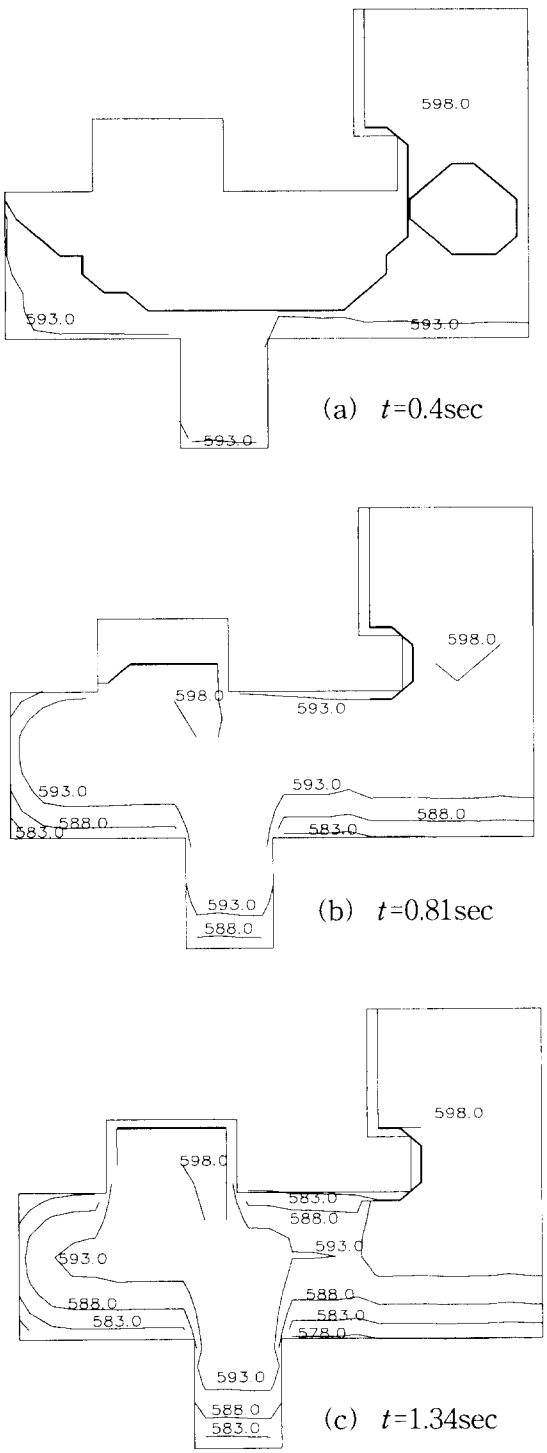


Fig. 11 (a)~(c) Temperature distribution of f_S=30% with V_p=60mm/sec and T_{die}=250℃ in orifice gate

250℃, 펀치속도 V_p=60mm/sec, 및 고상율 f_s=30%일 때 초기상태로부터 충전이 각각 30%, 60%, 100%되었을 때의 충전모습이다. 충전거동은 하부다이 함몰부를 채운다음 수평 끝부분을 채우고, 최종적으로 상부다이 함몰부를 채운다는 것을 알 수 있다. 그러나 충전속도가 너무 낮아 용탕이 중력에 의해 흘러내리는 결과를 초래하여 주입구를 빠져나온 용탕의 유동형태가 불안정함을 알 수 있다.

Fig. 11(a)~(c)는 T_{die}=250℃, V_p=60mm/sec, 및 f_s=30%일 때 Fig. 10의 충전거동에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 충전 결과로부터 금형과 처음 접촉하는 주입구 바닥의 온도가 578℃로 가장 낮으며, 하부다이 함몰부는 583℃이다. 충전 완료 후의 온도분포로부터 최종 응고부위가 직선형 금형의 경우와는 달리 상·하부 다이 함몰부의 중간정도보다 위쪽에 위치한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 초기에 용탕이 하부다이 함몰부를 완전히 채워 하부가 상대적으로 응고속도가 빠르기 때문인 것으로 생각된다. T_{die}=300℃, V_p=60mm/sec일 때 충전거동에 따른 온도분포는 Fig. 11의 T_{die}=250℃와 유사한 양상을 보여주고 있다. 그러나 가장 낮은 온도 T=581℃ 정도로 3℃정도 높다는 것을 알 수 있다. Fig. 12(a)~(c)는 T_{die}=350℃, V_p=60mm/sec 일 때 충전거동에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 가장 낮은 온도 T_{die}=587℃로 T_{die}=250℃, T_{die}=300℃에 대해 각각 9℃, 6℃더 높음을 알 수 있다. V_p=60mm/sec와 충전거동은 다르지만 온도분포는 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 즉 금형과의 접촉이 가장 긴 주입구 하부의 온도가 T=595℃로 가장 낮고 최종 응고 부분 역시 상·하다이 함몰부 가운데에 위치하고 있음을 알 수 있다. 충전거동 시 주입구의 속도가 충전형태에 직접적인 영향을 미치고 있음을 Fig. 9~Fig. 12로부터 알 수 있다. 이는 용융금속의 충전 시 높은 밀도로 인해 중력의 효과가 크게 나타나기 때문이다. 따라서 펀치속도가 작을 경우 중력에 의한 영향이 크게 나타나 하부다이 함몰부를 채우지만 주입구의 속도가 커지면 관성력이 커지기 때문에 수평방향으로 더 많이 유동하여 수평 끝부분을 채우게 된다. 충전거동 사 온도에 따른 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 직선형 금형(Fig 6(a))의 경우 펀치속도가 각각 60mm/sec, 400mm/sec, 1200mm/sec인 경우 충전 완료시간은 각각 t_{fill}=0.927sec, 0.1375sec, 및 0.046sec로 아

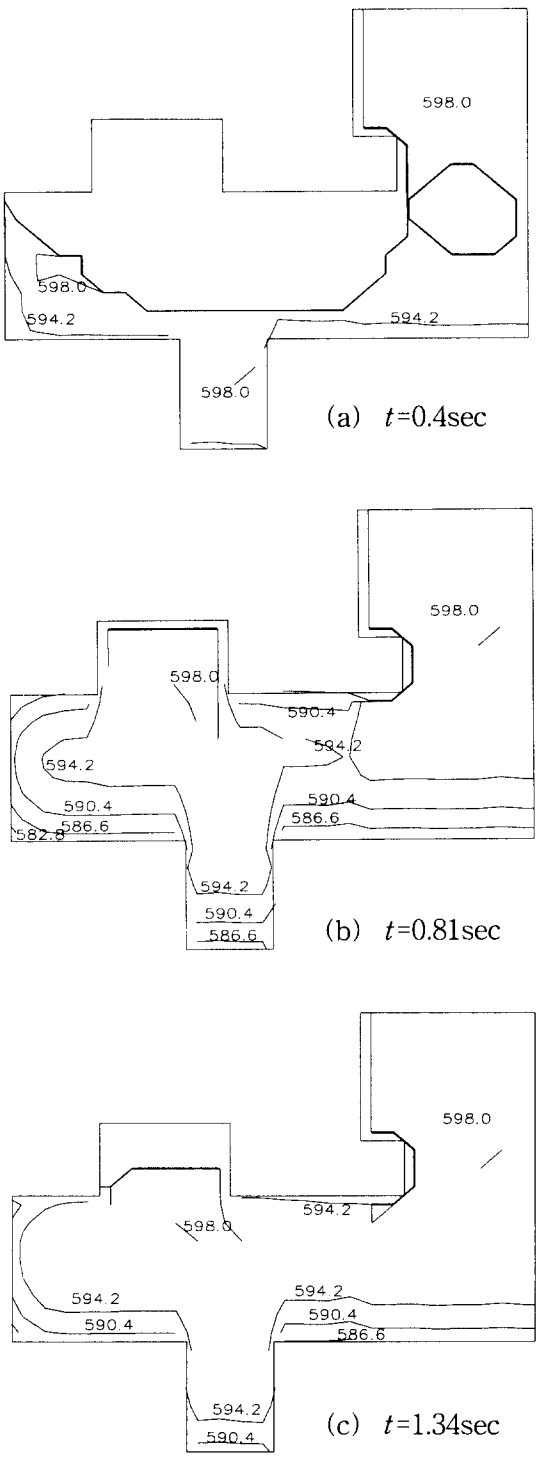
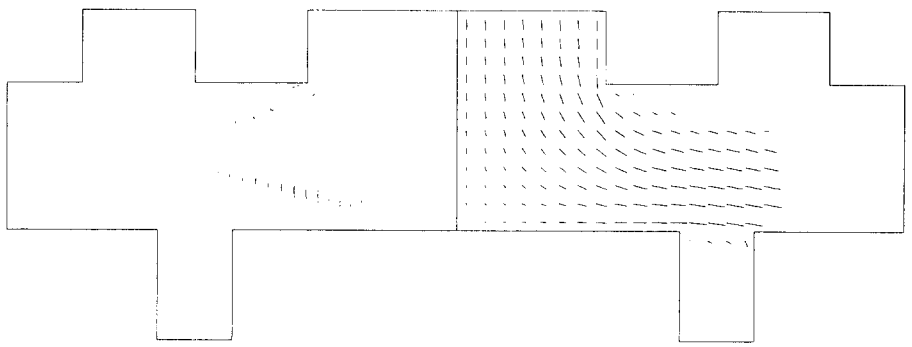


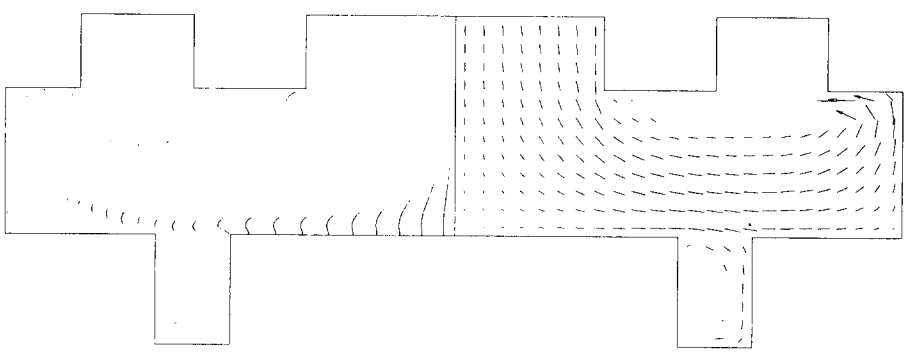
Fig. 12 (a)~(c) Temperature distribution of f_S=30% with V_p=60mm/sec and T_{die}=350℃ in orifice gate

주 짧기 때문에 금형과의 접촉으로 인한 열량의 손실이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 충전 중에는 반용융재료에 대한 가압효과가 크지 않으므로 충전시간이 짧은 경우 등온과정을 통한 해석도 충전거동을 예측할 수 있으리라 생각된다. Fig. 13(a)~(c)는 직선형 금형의 금형온도 T_{die}=300℃, 펀치속도 V_p=1200mm/sec일 때 초기상태로부터 충전이 각각 30%, 60%, 100%되었을 때의 충전 모습이다. Fig. 13에서 보여주듯이 충전거동은 수평 끝부분을 채우고, 상·하부다이 함몰부를 채운다는 것을 알 수 있다. Fig. 14(a)~(c)는 오리피스형 금형의 금형온도 T_{die}=300℃, 펀치속도 V_p=1200mm/sec일 때 초기상태로부터 충전이 각각 30%, 60%, 100%되었을 때의 충전 모습이다. 펀치속도가 매우 빠르기 때문에 용탕은 하부다이 함몰부를 채우지 않고 수평 끝부분을 먼저 채우고 난 뒤 하부다이와 상부다이 함몰부를 채우는 모습을 보여주고 있다. 충전거동에 따른 온도분포 역시 하부다이 함몰부의 폭이 상부다이 함몰부에 비해 상대적으로 작기 때문에 응고가 빨리 진행됨을 알 수 있었다. Fig. 15(a)~(c)는 오리피스형 금형의 금형온도 T_{diel}=300℃, 펀치속도 V_p=400mm/sec일 때 초기상태로부터 충전이 각각 30%, 60%, 100%되었을 때의 충전 모습이다. Fig. 15(b)에서 보여지듯이 60%충전 모습이 특이함을 알 수 있다. 이는 주입구 쪽에서는 속도가 빠르고 바닥에서는 속도가 상대적으로 적기 때문에 주입구를 빠져 나온 반용융재료가 상부 금형의 표면을 따라 흐르면서 발생한 현상으로 생각된다. 이상의 오리피스형 주입구에 대한 충전거동 해석 및 온도해석을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 충전거동 시 주입구의 속도가 충전형태에 직접적인 영향을 미친다는 사실이다. 이는 용융금속의 충전 시 높은 밀도로 인해 중력의 효과가 크게 나타나기 때문이다. 따라서 펀치속도가 작을 경우 중력에 의한 영향이 크게 나타나 하부다이 함몰부를 채우지만 주입구의 펀치속도가 커지면 관성력이 커지기 때문에 수평방향으로 더 많이 유동하여 수평 끝부분을 채우게 된다. 충전 거동 시 온도에 따른 영향은 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 오리피스형 캐비티의 경우 충전속도가 각각 60, 400, 1200mm/sec일 때 충전 완료시간은 각각 t_{fill}=1.34sec, 0.2sec, 0.067sec로 짧기 때문에 금형과의 접촉으로 인한 열량의 손실이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 주입

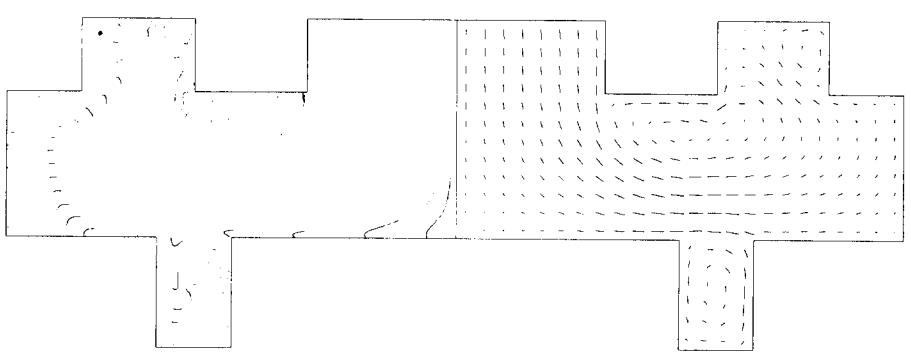
구의 형상이 오리피스형인 금형이 더 양호한 기계적 성질을 가질 것으로 예측된다. Fig. 6(a)의 직선형 금형의 경우는 Fig. 6(b)의 오리피스형 금형의 경우보다 충전속도가 느리기 때문에 금형과의 접촉시간의 증대로 인하여 금형으로부터 열을 많이 빼앗기기 때문에 응고부위가 하부다이 함몰부 근처에서 진행되어 기계적 성질이 감소되어질 것으로 생각된다.



(a) t=0.014sec



(b) t=0.028sec

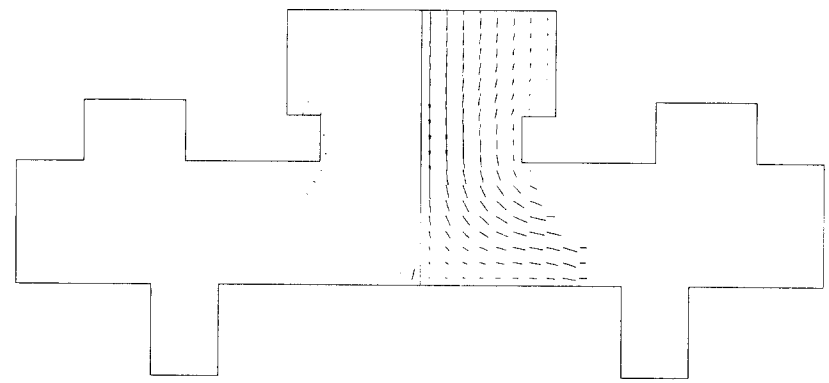


(c) t=0.046sec

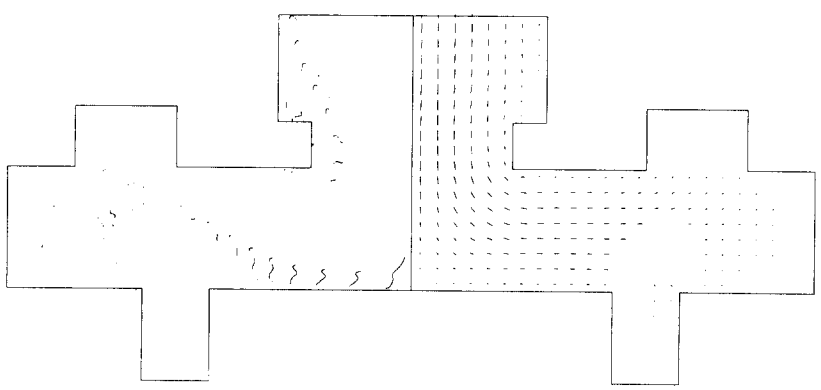
Fig. 13 (a)~(c) Filling pattern and velocity profile of f_s=30% with V_p=1200mm/sec and T_{die}=300℃ in straight gate

4. 결 론

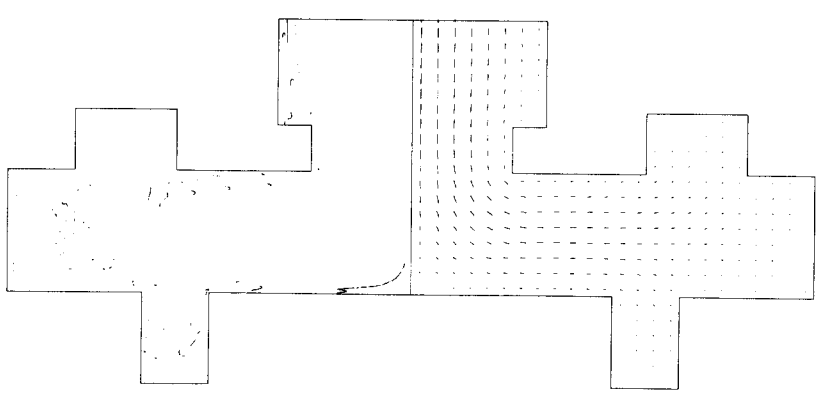
반용융재료의 단조공정을 실용화시키기 위해서는 금형설계가 극히 중요하다. 따라서, 본 연구에서 개발한 프로그램은 고상율이 40%이하인 반용융재료를 이용한 단조공정에서 금형형상이 재료의 충전거동에 미치는 영향을 예측할 수 있다.



(a) t=0.02sec



(b) t=0.04sec

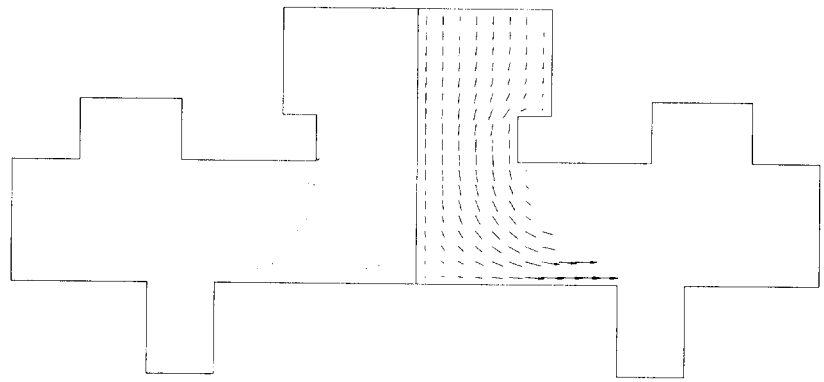


(c) t=0.067sec

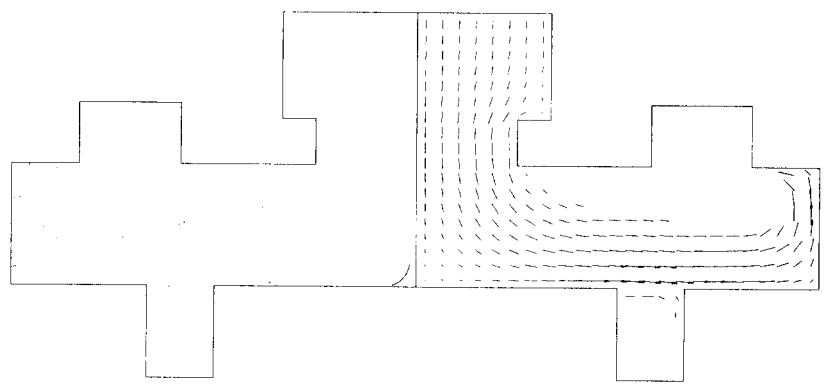
Fig. 14 (a) ~ (c) Filling pattern and velocity profile of f_S=30% with V_p=1200mm/sec and T_{die}=300℃ in orifice gate

게이트의 형상에 따른 유동 및 응고해석 결과로부터 직선형태의 주입구는 최종 응고부위가 상·하 함몰부 가운데 위치하기 때문에 응고 시 수축결함이 발생할 가능성이 크다. 반면에 최종 응고부위가 상부다이 함몰부쪽에 위치하는 오리피스형 주입구가 응고수축에 의한 결함이 작을 것으로 판단할 수 있다.

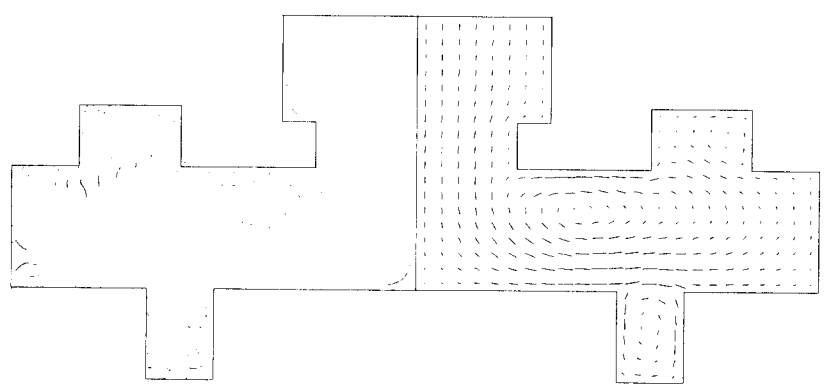
본 연구는 '95년도 부산대학교 정밀정형 및 금형



(a) t=0.06sec



(b) t=0.12sec



(c) t=0.2sec

Fig. 15 (a)~(c) Filling pattern and velocity profile of f_S=30% with V_p=400mm/sec and T_{die}=300℃ in orifice gate

가공 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 한국과학재단(KOSEF)의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 安達充, 1994, "最近のスクイズキャスティング法", 鑄物, 第66卷, 第12号, pp. 904～909.

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

(3) L. S. Turng and K. K. Wang, 1991, "Rheological Behaviour and Modelling of Semi-solid Sn-15% Pb Alloy", Journal of Materials Science, Vol. 26, pp. 2173～2183.

(4) S. Toyoshima and Y. Takahashi, 1991, "A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-solid Materials", ISIJ, Vol. 31, pp. 557～582.

(5) J. H. Yun, 1994, Finite Element Analysis and Experimental Study on Compression Behavior of Semi-solid Aluminum, Master paper, Pusan National University.

(5) M. Hirai, K. Takabayashi, Y. Yoshikawa and R. Yamaguchi, 1993, "Apparent Viscosity of Al-10mass%Cu Semi-solid Alloys", ISIJ, Vol. 33, No. 3, pp. 405～412.

(6) H. Peng, S. P. Wang, N. Wang and K. K. Wang, 1994, "Rheomolding-Injection Molding of Semi-solid Metals", The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 191～200.

(7) S. P. Wang, 1993, Numerical Simulation and Experiment of Incompressible Viscous Flow with Moving Free Surfaces, Ph. D. Thesis, Cornell University.

(8) F. H. Harlow and J. E. Welch, 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.

(9) 大中逸雄, 1985, コンピュタ傳熱・凝固解析入門, 丸善株式會社, pp. 167-208.

(10) V. R. Voller, 1987, "An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, pp. 271～284.

(11) Metal Handbook 10th Edition, 1990, ASM, Vol. 2, pp. 2・19, p. 164.

(12) S. V. Patankar, 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 118～126.

(13) S. Okano, 1994, "Research Activities in Rheo-Technology Ltd.", The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 7-18.

(14) 日本機械學會, 1988, 流れの數値シミュレション, コロナ社, pp. 80～82.