

# 박슬라브 주형에 따른 용강내의 상변화현상에 대한 수치적 해석

최원록 · 유홍선<sup>†</sup> · 최영기

중앙대학교 기계공학과

(2000. 2. 24. 접수 / 2000. 8. 29. 채택)

## Numerical Prediction of Phase Change within the Molten Steel with Thin Slab Casting

Won-Rok Choi · Honh-Sun Ryou<sup>†</sup> · Young-Ki Choi

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received February 24, 2000 / Accepted August 29, 2000)

**Abstract :** A numerical analysis has been performed on the two-dimensional rectangular gallium melting problem using the enthalpy method. The major advantage of this method is that the physical domain is discretized with fixed grids without transforming variables and the interface conditions of phase change are accounted for the definition of suitable source terms in the governing equations. But in the fixed method, there is some ambiguity in defining the porosity constant which has no physical interpretation. If the velocity correction is included in the momentum equation, for the appropriate range of porosity constant, the realistic predictions are obtained. The object of the present work is to predict the phase change within the molten steel with thin riser slab using the modified enthalpy-porosity method. The computational procedures for predicting velocity and temperature are based on the finite volume method and the non-staggered grid system. The influence of natural convection on the melting process is considered. A comparison with the experimental results shows that the modified method is better than the previous one.

**Key Words :** continuous casting, enthalpy-porosity method, phase change, natural convection

### 1. 서 론

연속주조(continuous casting)는 제철기술에 있어서 현재 가장 널리 사용되고 있는 공정으로 쇳물이 응고가 일어나는 몰드(mold)로 부어져 연속 슬라브(slab) 등으로 형성된다. 이러한 연속주조 공정에서 가장 문제가 되는 것 중의 하나는 최종제품의 질을 좌우하는 불순물의 존재이다. 연속주조 공정에서 몰드는 쇳물의 응고에 의하여 최종적인 형상이 결정되는 곳이며, 또한 제품의 품질을 저하시키는 불순물을 제거할 수 있는 곳이다. 따라서 몰드에서 쇳물의 유동형태는 최종 제품의 품질과 생산성에 중요한 영향을 미치고, 또한 제품의 불량은 곧 구조물의 안전에 치

명적인 영향을 미친다.

일반적으로 이러한 제철과정은 공정을 거치는 동안에 액상과 고상이 서로 바뀌는 상변화 현상을 수반하게 되며, 시간에 따른 온도분포 및 유동형태는 제품내부의 결정계와 기계적 성질, 그리고 불순물의 제거에 중요한 영향을 미친다. 따라서 상변화 현상에 대한 정확한 예측과 규명이 이러한 제철공정 등에서 반드시 요구되므로 이에 완전한 이해가 요구된다.

상변화 문제는 물질이 잠열을 방출 또는 흡수 하면서 한 상에서 다른 상으로 변화할 때 나타나는 물리적 현상을 다루는 분야로서, 관련되는 상이 고체와 액체인 경우 응고와 용해로 분류된다.

일반적으로 상변화면의 처리방법에 따라 이동격자방법(transformed grid method)과 엔탈피 방법을 이용한 고정격자방법(fixed grid method)이 상변화 문제를 다루는 수치해석 방법으로 주로 사

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
cfdmec@cau.ac.kr

용되며, Lacroix 등<sup>1)</sup>이 각각의 방법에 대하여 종합적으로 고찰한 바 있다.

이동격자방법은 고상과 액상을 적당한 좌표변환에 의하여 계산영역으로 변환한 후 고정 영역 상에서 문제를 풀게 된다. 따라서 좌표변환으로 인하여 기본 방정식이 복잡해지고 수치해석 시간이 많이 소요되는 단점이 있지만 격자계가 경계를 따라 변화하도록 격자계를 구성함으로써 경계조건의 유도과 처리가 용이하다<sup>2)</sup>.

엔탈피 방법은 고정영역 방법으로 시간과 공간좌표에 대하여 고정된 격자를 적절히 구성하고 상변화 면의 경계조건을 전 계산영역에 걸쳐 적용되는 기본 방정식에 포함되도록 한다. 따라서 기본 방정식의 좌표변환이 불필요하며 수치해석 기법이 간단하지만 상변화 면의 위치와 속도를 정확히 계산할 수 없으며, 또한 상변화 면이 시간과 더불어 이동하므로 상변화면 부근에만 조밀한 격자를 구성할 수 없어 해를 정확히 구하기 위해서는 다른 수치해석방법보다 전영역을 조밀하게 격자계를 구성하여야 한다<sup>3~4)</sup>.

Brent 등<sup>5)</sup>이 제시한 새로운 Enthalpy-porosity 방법은 해석영역을 porous 영역으로 고려하여 고체 및 액체를 각각 porosity가 0 및 1이 되도록 정의하였다. 따라서 상이 변하는 동안 porosity에 의하여 잠열의 방출(또는 흡수)이 고려되도록 조절되며 속도에 대한 조건이 운동량 방정식에 포함되도록 하였다. 그러나 이러한 porosity 방법은 상이 변하고 있는 경계면에서의 속도를 규정하는데 필요한 porosity상수에 물리적인 속성이 존재하지 않으므로 이를 정의하는데 모호성이 있다.

즉 porosity상수가 너무 작으면 고상영역에서 물리적으로 타당하지 않는 유동이 발생할 수 있고 너무 크면 수렴에 문제가 발생하게 된다. 따라서 물리적으로 타당하고 수렴에 문제가 없는 적당한 porosity상수값이 필요하며 이는 수치해석을 통하여 얻어진다. 또한 상이 변하고 있는 영역에서 운동량 방정식에 포함된 porosity상수는 액상에 가까운 영역을 단순히 고상으로 인식시킬 수 있어 시간이 지남에 따라 상변화 면이 실험결과와 비교하여 지연되는 것을 볼 수 있다.

본 연구는 수치해법이 간단하면서도 유동장과 온도장을 비교적 정확히 나타낼 수 있는 Enthalpy-porosity방법을 통하여 상변화 현상을 해석하고자 하였고 이를 바탕으로 몰드의 단순한 형태에

적용하여 제철공정과 관련된 수모델의 기초를 확립하고자 한다. 또한 앞서 언급한 Enthalpy-porosity방법의 단점을 보완하고자 상이 변하고 있는 미소체적에 대한 운동량 방정식에 속도를 보정하여 시간에 따른 상변화 면의 위치를 보다 정확하게 예측하려 하였다. 이는 에너지 방정식을 통해 얻어진 액상의 체적분율이 상변화 면의 위치와 형상에 중요한 영향을 미치고 이를 운동량 방정식에서 액상의 체적분율의 함수로 속도를 보정함으로써 porosity상수에 의한 단점을 보완하였다. 수정된 방법의 타당성을 위하여 2차원 Gallium의 용해를 두 경우의 중형비에 대하여 실험한 결과<sup>6)</sup>와 각각 비교하였다. 또한 몰드에서 용해된 물질의 유동형태를 해석하기 위하여 몰드의 단순화된 형태인 Riser를 갖는 용기의 용해현상을 고찰하였다. 수치해석 기법은 계산영역을 유한개의 체적으로 분할하여 적분형태의 보존법칙을 계산영역에서 직접 이산화시켜 온도장과 유동장을 계산하는 유한체적법을 사용하였다.

## 2. 상변화 열전달해석

### 2.1. 해석모델

Fig. 1은 2차원 수평방향 용해과정을 해석하기 위하여 선택한 해석모델을 나타낸다. 해석영역은 Gau와 Viskanta가 실험한 결과<sup>6)</sup>와 비교하기 위하여 모델의 길이(X)는 8.89cm이고 중형비(Y/X)가 각각 0.5, 0.714인 밀폐된 사각 용기를 선택하였다. 모델의 상단과 하단은 단열이며 좌측면은  $T_{hot}$ 로 초기부터 상변화 온도보다 높은 온도로 유지되고 있으며 초기온도와 우측면은  $T_{init}=28.3^{\circ}C$ 로 실험에서 사용된 것과 동일

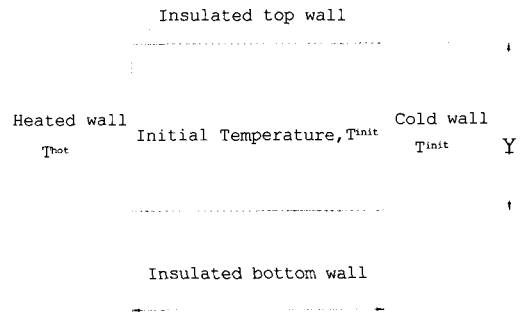


Fig. 1. Physical domain and boundary conditions

한 조건을 부여하였다. 따라서 용해는 좌측에서 부터 우측으로 일어나게 된다.

**2.2. 지배방정식**

합금 또는 혼합물질은 일정온도 범위에서 상 변화가 일어나지만, 본 연구에서 사용된 상변화 물질인 순수 Gallium은 고정된 용융온도인  $T_m$ 에서 상변화가 일어난다. 따라서 고상과 액상의 경계가 분명하게 구별되며 액상인 영역에서 연속 방정식과 운동량방정식이 요구된다. 이러한 용해과정을 해석하기 위하여 실제적인 물리현상을 기술하는 일반방정식은 다음과 같은 가정하에서 단순화시킨다.

- (1) 액체는 비압축성, 뉴턴유체로 층류유동이다.
- (2) 부력항의 온도차에 의한 밀도변화를 제외한 액체의 모든 물성치는 일정하다.
- (3) 액체 자유표면에서의 표면장력의 영향을 무시한다.

위의 가정에 따라 2차원 비정상 상태에서의 에너지 방정식은 다음과 같이 정의되는 현열  $h$  와 전체엔탈피  $H$ 로 나타내어진다.

$$h = \int_{T_m}^T c dT \tag{1}$$

$$H = h + f(T)L \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho V h) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c} \nabla h \right) + S_h \tag{3}$$

여기서  $T_m$ 은 상변화 온도,  $L$ 은 잠열,  $f$ 는 미소체적에서의 액체의 체적분율,  $S_h$ 는 식(3)의 에너지 방정식에 대한 생성항을 나타낸다. 액상인 영역에서 연속 방정식과 운동량 방정식이 요구되며, 이를 직각 좌표계로 표시하면 다음과 같다.

▶ **연속 방정식**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

▶ **운동량 방정식**

*x-direction*

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \tag{5}$$

*y-direction*

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V v) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_m) + S_v \tag{6}$$

여기서  $u, v$ 는 각각  $x, y$  방향의 속도성분이며,  $P$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 체적 팽창계수이다.

▶ **생성항**

고정격자를 이용한 엔탈피방법에서 생성항의 결정은 중요한 문제이며  $S_h$ 와  $S_u, S_v$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$S_h = -\rho L \frac{\partial f}{\partial t}, S_u = -A u, S_v = -A v \tag{7}$$

여기서  $A$ 는 운동량 방정식의 생성항 매개변수로 다음과 같다.

$$A = B(1 - f) \tag{8}$$

액상인 영역에서  $A$ 가 0으로 운동량 방정식에 대한 영향을 전혀 미치지 못하며 상이 변하고 있는 영역에서는  $A$ 가 고상이 되는 미소체적에서의 속도를 점차적으로 감소시킬 수 있어야 한다. 따라서  $B$ 값은 고상인 영역에서 속도를 0으로 만들 수 있을 만큼 충분히 커야 한다.

**2.3. 경계조건**

액상내의 속도경계조건으로 벽에서의 점착조건이 적용되어 속도성분을 0으로 하였다. 순수

**Table 1.** Properties of pure Gallium

| Property                      | Symbol, [Unit]                | Gallium               |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Melting Temperature           | $T_m$ , [°C]                  | 29.78                 |
| Density                       | $\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ] | 6093                  |
| Specific Heat Capacity        | $c$ , [J/kg°C]                | 381.5                 |
| Thermal Conductivity          | $k$ , [W/m°C]                 | 32                    |
| Dynamic Viscosity             | $\mu$ , [kg/ms]               | $1.81 \times 10^{-5}$ |
| Latent Heat of Fusion         | $L$ , [J/kg]                  | 80160                 |
| Thermal Expansion Coefficient | $\beta$ , [1/°C]              | $1.2 \times 10^{-4}$  |

Gallium은 용융점이 29.78℃로 대기온도에 가깝기 때문에 실험시 제어하기가 쉽고, 용융점과 응고점에 대한 자료를 이용하기 쉬워 많은 논문에서 Gallium을 상변화 물질로 선택한다. 이 물질의 32℃에서의 물성치 값을 Table 1에 나타내었고, 이 온도에서 액상 Gallium의 Prandtl수는 0.021, Stefan수는 0.042이고 Rayleigh수는  $6 \times 10^5$ 이다.

### 3. 수치해석방법

#### 3.1. 지배방정식의 이산화

앞의 2.2절에서 언급한 지배방정식을 미소체적에 대하여 적분하는 유한체적법을 사용하여 대수방정식을 구하였다. 유한체적법을 사용하여 수치계산을 수행할 때 수치해의 안정성, 수렴조건 등은 Patanka<sup>7)</sup>가 상세히 제시하였다. 이산화과정 중에서 대류항의 처리는 계산시간이 길지 않으면서도 엄밀해에 가까운 지수 함수적인 거동을 잘 나타내는 멱승도식(Power-law scheme)을 사용하였다.

위와 같은 방법을 지배방정식에 도입하여 얻어진 일반적인 이산화 형태는 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$a_P \psi_P = \sum a_{nb} \psi_{nb} + a_P^0 \psi_P^0 + C_P \quad (9)$$

여기서  $C_P$ 는 이산화 방정식의 생성항을 나타내고, 상첨자 0은 이전 시간단계에서의 이산화 계수를 나타낸다. 따라서 에너지 방정식인 식(3)은 이산화된 형태로 다음과 같다.

$$a_P h_P = \sum a_{nb} h_{nb} + a_P^0 h_P^0 + C_P' \quad (10)$$

고정격자 방법에 의한 상변화 해석시 가장 핵심적인 부분은 미소체적내의 액상의 체적분율  $f$ 의 계산으로, 이는 현열의 전달에 의하여 시간  $t$ 에서 액상의 체적분율이 변화하는 양을 계산하는 것이다. 각 반복계산 과정중에 미소체적내의 액상의 체적분율  $f$ 는 이산화된 에너지 방정식인 식(10)에서 얻어진다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$0 = \sum a_{nb} h_{nb} + a_P^0 h_P^0 + C_P' + update \quad (11)$$

상이 변하고 있는 절점에 대하여 액상의 체적분율은 식(10)과 식(11)의 차로 다음과 같이 얻어진다.

$$(f_P)_{k+1} = (f_P)_k + \lambda \frac{a_P C}{a_P^0 L} [(T_P)_k - T_m] \quad (12)$$

또한 앞서의 Enthalpy-porosity방법에서 porosity 상수에 물리적인 속성이 존재하지 않아 porosity 상수가 너무 크면 수렴에 문제가 발생하고 너무 작으면 물리적으로 타당하지 않는 유동이 발생한다. 따라서 이에 대한 보완이 요구되며 상이 변하고 있는 미소체적에  $P$ 에서 porosity 상수에 의해 구해진 운동량 방정식의 속도 분포를 보정하고자 이웃절점의 속도를 절점  $P$ 의 체적분율의 함수로 아래와 같이 고려하였다. 이는 에너지 방정식을 통해 얻어진 액상의 체적분율이 상변화 면의 위치와 형상에 중요한 영향을 미치고 이를 운동량 방정식에서 액상의 체적분율의 함수로 속도를 보정함으로써 porosity 상수의 단점을 보완하였다.

$$V_P = V_P^0 + \frac{1}{2} (V_W \times f + V_E \times (1-f) + V_N \times f + V_S \times (1-f)) \quad (13)$$

#### 3.2. 격자계와 수치계산 및 계산방법

본 연구에서 사용한 격자는 종횡비가 0.5인 경우  $42 \times 22$ , 0.714인 경우  $42 \times 32$ 개의 균일한 격자를 사용하였으며, 이는 상변화 현상을 연구했던 기존의 여러 논문<sup>1,3,5)</sup>들이 채택한 격자수와 동일하고 이미 격자수의 종속성을 언급하였으므로 앞서와 같은 격자계를 선택하였다. 수치해석은 질량, 운동량 및 스칼라량의 보존방정식을 일반화 좌표계에서 계산하였다. 식의 이산화는 유한체적법에 기초하여 수행하였으며, 운동량방정식에서 압력항의 처리는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 대수방정식의 해를 구하는 방법으로 SIP(Stone's Implicit Procedure)이 적용되었고 이 과정에서 해를 안정되게 수렴시키기 위해 하향이완계수를 사용하였다. 가열벽면 근처의 갑작스런 변화를 고려하기 위하여 초기 네 번의 시간단계에 대하여 5초 시간간격과 0.2의 하향이완계수가 액상 체적분율에 대한 식에 적용되었고,

그 이후의 시간간격에서는 10초와 0.4의 하향이 완계수가 사용되었다.

전산시간은 Intel Pentium PC (133MHz)로 중형비가 0.714인 경우 19분까지의 용해를 계산하는데 걸리는 시간은 13분, 0.5인 경우 12분까지 계산하는데 9분이 소요되었다.

## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1. 상변화면의 위치 및 형상

액상영역내의 자연대류유동을 고려한 경우 시간에 따른 상변화 면의 위치와 형상이 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

여기서 Fig. 2는 중형비가 0.714인 경우이고 Fig. 3은 0.5인 경우로 각각 Gau와 Viskanta<sup>6)</sup>가 실험한 결과와 기존의 방법<sup>5)</sup>을 통해 얻은 결과를 함께 나타내었다. 각 그림에서 볼 수 있듯이 기존의 방법은 시간이 증가함에 따라 상변화 면

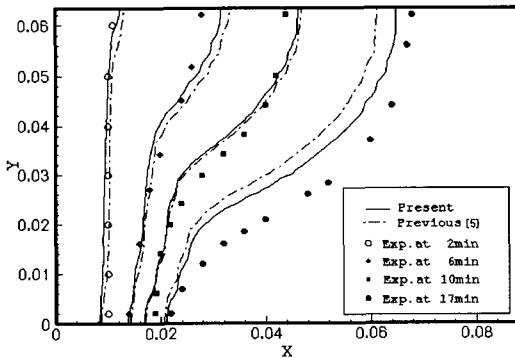


Fig. 2. Comparison of calculated and experimental melt fronts (Ar=0.714)

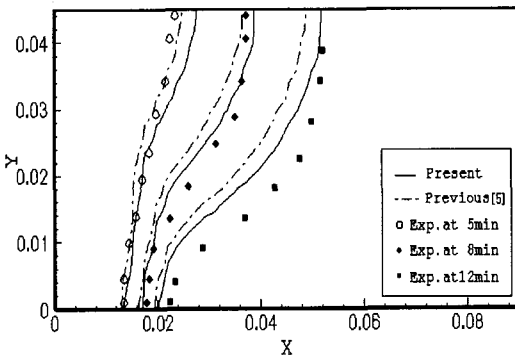


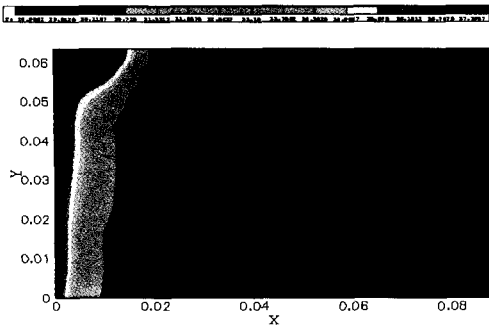
Fig. 3. Comparison of calculated and experimental melt fronts (Ar=0.5)

의 이동이 실험결과에 비해 상당히 지연되는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 운동량 방정식에서 상변화 면의 속도를 결정하는데 직접적인 영향을 미치는 Porosity상수의 모호성과 물리적 속성이 없으므로 액상에 가까운 영역을 고상으로 인식할 수 있어 이동이 지연된다. 그러나 이를 보완한 수정된 방법을 통해 실험결과에 보다 근접한 상변화 면의 이동을 볼 수 있다. 자연대류를 고려한 경우에는 용해계면 부근에서 온도 경계층이 발달하므로 자연대류에 의한 열전달이 용해 계면의 형상을 결정하게 된다. 가열 벽면과 고상영역과의 온도차가 10°C로  $Ra=6 \times 10^5$ 이며, 용해 초기에는 부력에 의해 발생하는 유동이 시작되기 전이거나 매우 약할 때므로 상변화 면의 형상은 해석모델의 가열 벽면에 평행하고 완만한 모양을 이룬다. 이때는 열전달이 주로 전도에 의해 주도된다. 시간이 진행되면서 용해된 곳에서의 부력으로 인한 자연대류 효과가 발전되고 계속해서 강도가 증대되며, 이것은 중형비가 0.714인 경우에 대하여 Fig. 2의 2분 경에 상단쪽의 상변화 면의 형상이 완만한 모양에서 이탈하는 것을 통해 확인될 수 있다. 계속된 용해로 상변화 면의 상단부는 오른쪽(고상영역)으로 하단부는 왼쪽(액상영역)으로 휘는 경향을 보인다. 이러한 원인은 액상영역의 고온부(왼쪽)에서 밀도차로 인한 부력으로 인하여 상단부로 상승되었던 유체가 상단부에서 상변화 면쪽, 즉 오른쪽으로 이동하여 상변화 면을 따라서 아래로 내려오므로 이로 인하여 하단부보다 상단부에서 온도구배가 크게 되어 상변화 면으로의 열전달이 더 커지게 된다. 따라서 하단부보다 상대적으로 온도가 높은 상단부의 용해속도가 더 빠르게 진행되고, 하단부에서는 대류의 효과가 작아 열전달이 전도에 의해 이루어진다.

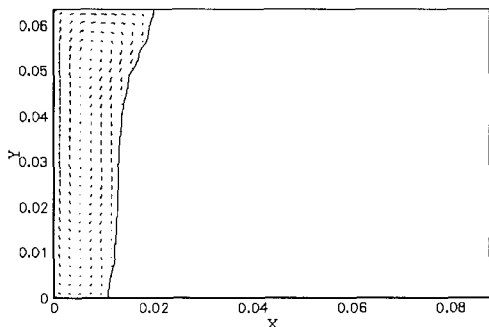
### 4.2. 온도장 및 유동장

Fig. 4-9는 각각의 중형비에 대하여 시간에 따른 온도장과 유동장을 나타낸다. 그림에서 중형비가 0.714인 경우 Fig. 4(a)에서와 같이 3분이 지났을 때는 자연대류의 강도가 미소하여 등온선의 변화가 크지 않지만 10분이 지난 Fig. 5(a)에서는 자연대류의 강도가 증가하여 온도구배가 상변화면 하단부에 비하여 상단부에서 크게 증가함을 알 수 있다. Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)는 이때

박슬라브 주형에 따른 용강내의 상변화현상에 대한 수치적 해석

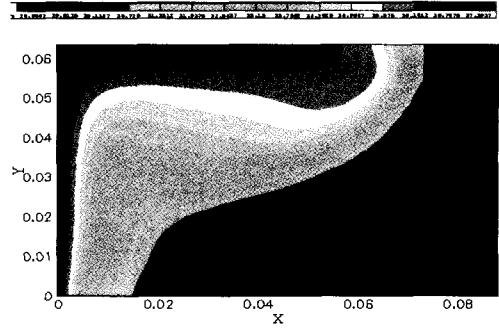


(a) Temperature

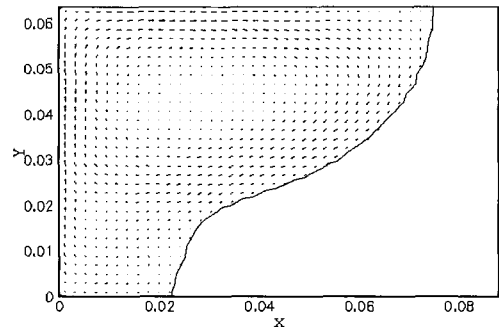


(b) Velocity

Fig. 4. Temperature and velocity fields at 3min ( $Ar=0.714$ )

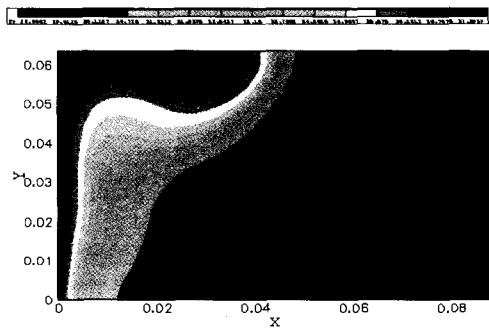


(a) Temperature

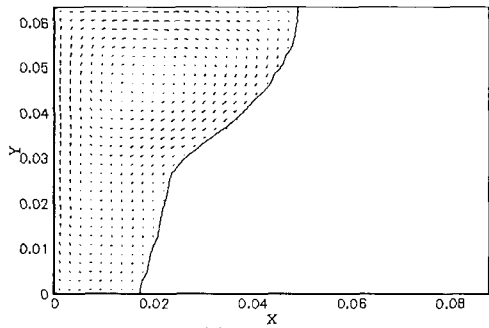


(b) Velocity

Fig. 6. Temperature and velocity fields at 19min ( $Ar=0.714$ )

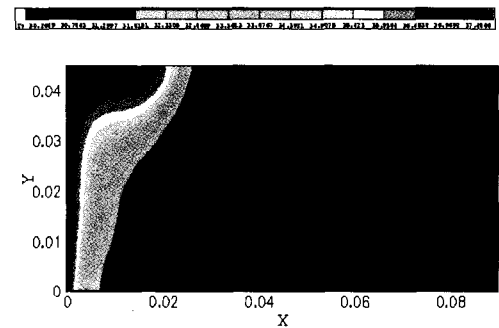


(a) Temperature

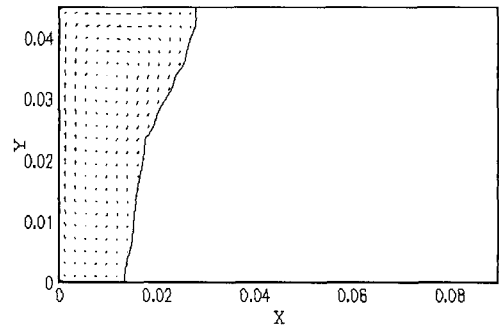


(b) Velocity

Fig. 5. Temperature and velocity fields at 10min ( $Ar=0.714$ )



(a) Temperature



(b) Velocity

Fig. 7. Temperature and velocity fields at 5min ( $Ar=0.5$ )

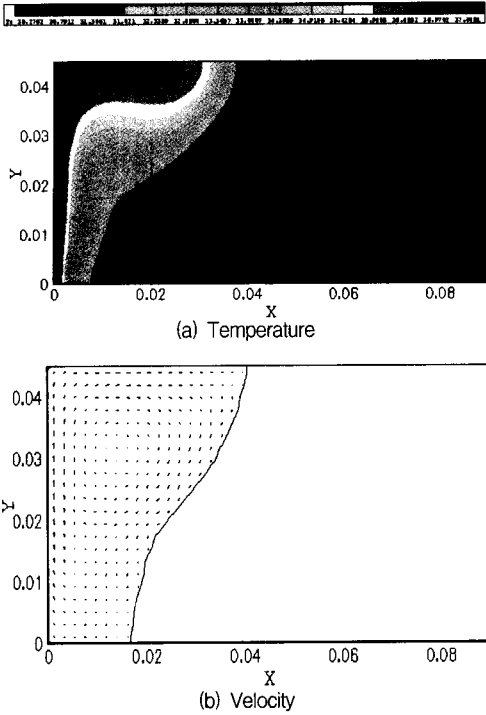


Fig. 8. Temperature and velocity fields at 8min (Ar=0.5)

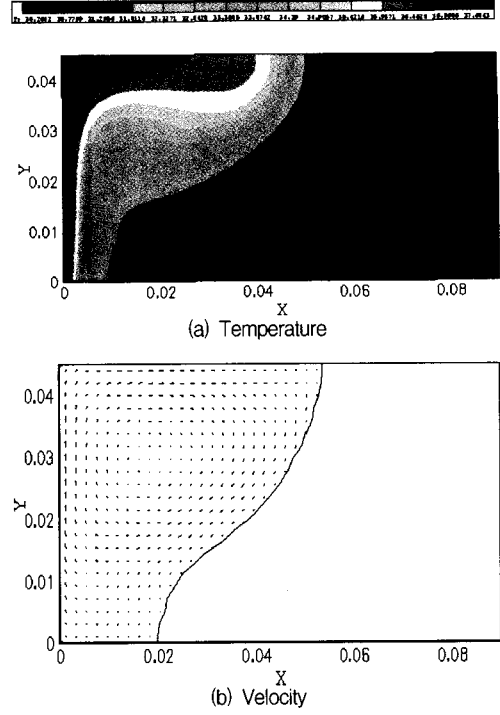


Fig. 9. Temperature and velocity fields at 12min (Ar=0.5)

의 유동장을 각각 나타낸다. 융해초기인 Fig. 4(b)는 시계방향으로의 유동이 생성되기 시작하고, 시간이 지남에 따라 Fig. 5(b)에서는 유동강도가 보다 커짐을 볼 수 있다. Fig. 6은 자연대류의 영향이 전체유동장을 지배하였을 때의 온도장과 유동장을 나타낸다. 이때의 온도장은 등온선이 심하게 변하고 유동강도가 더욱 증가하여 커다란 원 형태의 유동현상이 보인다. Fig. 7-9는 종횡비가 0.5인 경우의 온도장과 유동장이며 종횡비가 0.7인 경우와 비슷한 거동을 나타낸다.

Fig. 9(b)는 자연대류의 영향이 전체유동장을 지배하였을 때의 유동장을 나타내고 Fig. 6(b)인 경우와 비교하여 종횡비가 작은 경우 상변화 면의 형태는 자연대류 유동이 전체 유동장을 더 빠른 시간내에 지배하게 된다.

Fig. 10은 중앙에서의 수평방향으로의 온도분포를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 융해 초기 단계에서 중앙에서의 수평방향 온도분포는 선형적이고 거의 같은 값을 보이며 이때는 전도가 열전달의 지배적인 양상을 주도한다. 융해가 더욱 진행됨에 따라 부력에 의해 융해된 곳에서 시계방향의 유체 유동으로 해석모델의 양쪽 경

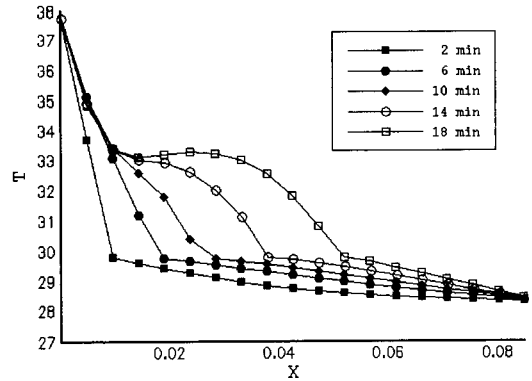


Fig. 10. Temperature distribution along centerline (Ar=0.714)

계에서 수평방향으로 경사가 급한 온도 구배가 관찰된다.

### 4.3. 용강 유동해석

앞서 언급한 수정된 Enthalpy-porosity 방법을 사용하여 몰드에서 융해된 물질의 유동형태를 해석하기 위하여 몰드의 단순화 된 형태인 Riser를 갖는 사각 용기의 융해현상을 고찰하였다. 이를 계산하기 위하여 16×40개의 격자를 사용하

였고 좌측과 하단은 단열이며 상단은 고온의 온도로 유지된다. 우측면은 대칭조건을 사용하였다. 따라서 몰드내의 용해는 상단에서 시작하여 아래로 진행하게 된다. Fig. 11-12는 이를 바탕으로 하여 계산된 시간이 15분과 25분에서의 속도장과 온도장을 나타낸다. 15분에서는 유동형태가 Riser의 하단에서의 확대에 의해 유동이 자연대류의 영향을 크게 받으므로 반시계 방향으로의 재순환 영역이 발생하게 된다. 용해가 더욱 진행된 25분에서는 더욱 강도가 큰 재순환 영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. Riser를 지나면서 생기는 유동형태는 고온의 물질이 벽면을 부식시키는 등의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있고 유동과 관련된 casting defects의 연구에 중요한 기초를 제시한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 직사각형 밀폐용기내의 Gallium 용해를 해석하였으며 기존의 Enthalpy-Porosity 방법에서 사용된 Porosity상수의 단점을 보완하고자 상이 변하고 있는 영역에 대한 속도를 보정하는 방법을 적용하였다. 이러한 방법의 결과로 시간의 증가에 따른 상변화 면의 위치가 보다 정확하게 나타남을 확인하였고 안정된 해를 얻을 수 있었다. 또한 이러한 수정된 방법을 통하여 해석한 상변화 현상을 몰드의 단순한 형태에 적용하여 제철공정과 관련된 수모델의 기초를 확립할 수 있었고 이와 관련된 유동현상을 관찰할 수 있었다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 속도를 이웃절점의 속도와 체적분률의 함수로 고려한 수치해석적 방법이 기존 방법보다 실험치와 더 근접한 결과를 얻었다.

2. 시간이 지남에 따라 상변화 면의 이동속도는 수정된 방법을 통한 예측이 실험결과와 비교하여 기존 방법에 비해 보다 근접한 결과를 보였다.

3. 액상영역에서의 자연대류로 인하여 상변화 면의 상단부는 고상쪽으로, 하단부는 액상쪽으로 휘는 형상을 나타내며, 중횡비가 작은 경우 자연대류유동이 전체 유동장을 더 빠른 시간내에 지배하게 된다.

4. 연속주조 공정중 몰드내부의 유동장에 미치는 영향을 관찰하기 위한 수치해석을 하였다. Riser를 지나면서 유동의 강도가 증가하여 고온의 물질이 벽면을 부식시키는 등의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있다는 결론을 얻었다.

**감사의 글 :** 본 연구는 교육부 학술연구비 (ME97-B-12)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 기호설명

$a$  : coefficient in the discretized equation

$A$  : momentum source parameter

$Ar$  : aspect ratio of cavity,  $\frac{Y}{X}$

$B$  : porosity constant

$c$  : specific heat [J/kg °C]

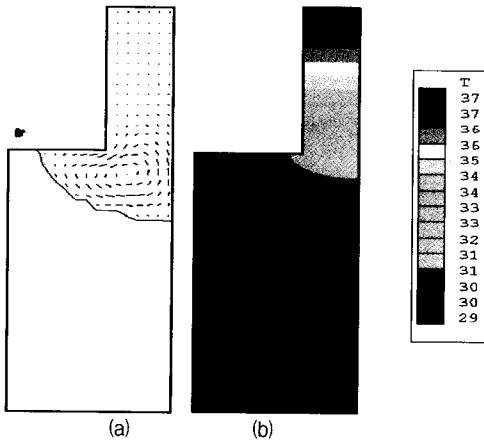


Fig. 11. Predicted velocity (a) and temperature (b) at 15min

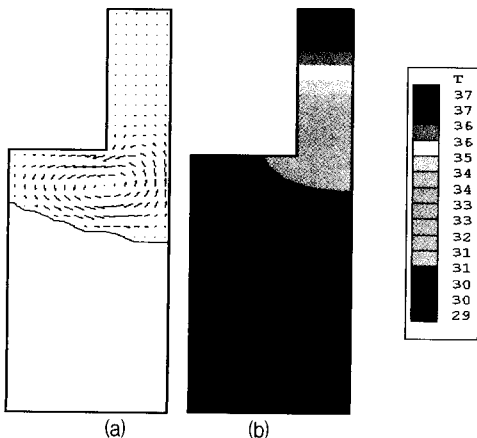


Fig. 12. Predicted velocity (a) and temperature (b) at 25min



$f$  : local liquid fraction  
 $h$  : sensible enthalpy [J/kg]  
 $k$  : thermal conductivity [W/m°C]  
 $L$  : latent heat of fusion [J/kg]  
 $Ra$  : Rayleigh number,  $\frac{g\beta(T_{hot} - T_m)X^3}{\nu\alpha}$

**그리스 문자**

$\alpha$  : thermal diffusivity [m<sup>2</sup>/s]  
 $\phi$  : dependent variables  
 $\lambda$  : relaxation factor  
 $\mu$  : dynamic viscosity [kg/ms]

**하첨자**

$init$  : initial state  
 $k$  : iteration counter  
 $m$  : melting point  
 $nb$  : neighboring node point

**참고문헌**

- 1) Lacroix, M., Voller, V. R., 1990, "Finite difference solutions of solidification phase change problems: transformed versus fixed grids", Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 17, pp. 25~41.
- 2) Hang, K. Y., 1994, Numerical analysis of heat transfer and thermal stress in the phase change process, Ph.D. Yonsei Univ.
- 3) Cho, W. K., Hur, N., Melting analysis with an enthalpy formulation in fixed grid system, KIST.
- 4) Voller, V. R., Cross, M., 1981, Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method, J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 545~556.
- 5) Brent, A. D., Voller, V. R. and Reid, K. J., 1988, Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal, Numerical Heat Transfer, Vol. 13, pp. 297~318.
- 6) Gau, C., Viskanta, R., 1986, Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall, J. Heat Transfer, Vol. 108, pp. 174~181.
- 7) Patanka, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington D.C..
- 8) Peric, M., 1985, A Finite Volume Method for the Prediction of three-dimensional fluid flow in complex ducts, Ph.D. Imperial College, 1985.
- 9) Rhie, C. M., 1981, A numerical study of the flow past an isolated airfoil with separation, Ph.D. Thesis, Dept of Mech, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 10) Voller, V. R., 1990, Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems, Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 17, pp. 155~169.
- 11) Voller, V. R., Swaminathan, C. R., 1993, Treatment of discontinuous thermal conductivity in control volume solutions of phase change problems, Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 24, pp. 161~180.
- 12) Swaminathan, C. R., Voller, V. R., 1993, On the enthalpy method, Int. J. Numerical Methods in Heat & Fluid Flow, Vol. 3, pp. 233~244.
- 13) Voller, V. R., Cross, M. and Markatos, N. C., 1987, An enthalpy method for convection/diffusion phase change, Int. J. Numerical Methods Eng., Vol. 24, pp. 271~284.
- 14) Voller V. R., Prakash, C., 1987, A fixed grid numerical modeling methodology for convection/diffusion mushy region phase change problems, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 30, pp. 1709~1719.
- 15) Webb, B. W., Viskanta, R., 1986, Analysis of heat transfer during melting of a pure metal from an isothermal vertical wall, Numerical Heat Transfer, Vol. 9, pp. 539~558.
- 16) Chiang, K. C., Tsai, H. L., 1992, Shrinkage-induced fluid flow and domain change in two-dimensional alloy solidification, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 7, pp. 1763~1770.