

# 충전과 상변화 현상을 포함한 주조과정에 대한 연구

임 의 태\* · 김 우 승\*\*  
(1998년 11월 25일 접수)

## A Study of a Simultaneous Filling and Solidification During Casting Process

Ik-Tae Im and Woo-Seung Kim

**Key Words:** Solidification(응고), Mold Filling(주형충전), Casting(주조), Free Surface(자유표면), Natural Convection(자연대류)

### Abstract

An algorithm for modeling the filling of metal into a mold and solidification has been developed. This algorithm uses the implicit VOF method for a filling and a general implicit source-based method for solidification. The model for simultaneous filling and solidification is applied to the two-dimensional filling and solidification of a square cavity. The effects of the wall temperature and gate position on the solidification are examined. The mixed natural convection flow and residual flow resulting from the completion of a filling are included in this study to investigate the coupled effects of the filling and natural convection on solidification. Two different filling configurations (assisting flow and opposite flow due to the gate position) are analysed to study the effects of residual flow on solidification. The results clearly show the necessity to carry out a coupled filling and solidification analysis including the effect of natural convection.

### 1. 서 론

주조방식은 광범위한 분야의 제품생산에 사용되고 있으며 특히 최근에는 자동차나 항공산업 등의 분야에서 고정밀도의 주조제품에 대한 수요가 크게 증가하고 있다. 이에 따라 국내에서도 고품질의 주조제품을 낮은 생산단가로 생산하고자 하는 많은 노력이 이루어지고 있다. 주조과정은 거시적으로 볼 때 유동현상과 열전달현상의 복합적인 물리현상으로 파악할 수 있다. 유체의 유동현상에는 용탕의 형성과정에서의 유동과 탕구계를 통한 주형의 충전, 그리고 충전이 완료된 후

주형내부에서의 충전에 기인한 잔류유동과 온도차에 의한 자연대류현상이 있으며 열전달 측면에서는 크게 상변화현상과 열용량 측면이 고려될 수 있다. 상변화현상은 주형의 냉각에 의해 용융상태의 금속이 고상화되는 것과 금속의 조성이 변화하는 것을 포함한다. 이때 용고속도의 차이에 의해 주조제품과 주형에서 열용량이 발생할 수 있으며 형상이 변형될 수도 있다. 이와 같이 주조과정은 매우 복잡한 물리현상이 복합적으로 나타나는 현상으로서 이에 대한 정확한 모델링은 대단히 어려운 일이다. 지금까지의 연구도 주조과정에서의 각각의 현상에 대한 해석에 국한되어 왔다.

주조과정에서 가장 많이 연구되어 온 분야는 상변화현상이며<sup>(1,2)</sup> 최근에는 자연대류의 효과에 대한 연구와<sup>(3,4)</sup> 미시 및 거시분석에 대한 연구도<sup>(5)</sup> 활발하다. 주조과정에서의 충전시의 유동현상에 대한 연구는 컴퓨터의 발달과 함께 비교적 최근에 그 연구가 활발해지기 시작하였다. 초기에는

\* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학과

비교적 단순한 형상에 대한 충전현상에 대한 모델링이 시도되었으며<sup>(6)</sup> 효과적인 충전 알고리즘에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있다.<sup>(7, 8)</sup> 그러나 주형의 충전과정은 용탕의 충전과 동시에 냉각이 이루어지며 두께가 얇은 구조물이나 용탕의 과열상태가 낮은 경우 등 특수한 상황하에서는 충전이 완료되기 이전에 상변화 열전달에 의한 응고가 일어날 수도 있다. 따라서 충전현상과 상변화현상을 동시에 해석할 필요가 있다. 기존의 대부분의 연구는 충전시의 유동현상만을 연구하거나 충전과 충전후의 응고과정을 완전히 구별하여 연구하였다. 최근들어 충전과 응고현상을 동시에 해석하고자하는 노력이 이루어지고 있다. Wang과 Perry<sup>(9)</sup>는 얇은 형상의 구조시 초기 주형의 예열온도와 충전속도, 용탕의 과열 등에 따른 충전특성을 연구하였다. Hu 등<sup>(10)</sup>은 다이캐스팅 과정에 대해 충전과정과 상변화 현상을 모델링하였다. 그들은 주형내부에서 액체금속이 방울(droplets)형태로 공기와 섞여 있다고 가정하였다. Swaminathan과 Voller<sup>(11)</sup>는 기존의 충전 알고리즘이 가지고 있던 가장 큰 단점인 현시적 방법(explicit method)을 사용하지 않고 시간에 대해 암시적 방법(implicit method)을 사용하여 충전과 상변화 열전달현상을 해석하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 Toi 등<sup>(12)</sup>은 얇은 형상의 알루미늄 구조시 복잡한 탕구 시스템을 해석에서 제외시키고 간단한 경계조건으로 이를 대신하여 충전과 열전달현상을 해석함으로써, 해석효율을 높였다. 한편 Minaie 등은<sup>(13)</sup> 다이캐스팅 과정의 유동의 형태와 상변화 과정을 충전과정과 잔류유동기로 나누어 해석하였다. 그들은 충전이 완료되었을 때의 속도분포를 초기속도로 이용하여 충전후의 상변화 과정을 해석하였으며 순수 자연대류만을 고려한 경우의 상변화 면의 형태를 비교 연구하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 초기의 충전이 완료되거나 그 전단계까지만 해석하거나 충전과정과 충전후의 상변화과정을 분리하여 해석하여 충전과정에서의 유동과 열적현상에 대한 통합적인 해석을 수행하지 않았다. 구조과정에서의 충전과 열전달현상에 대한 전체적인 이해는 초기의 주형의 충전에서부터 충전이 완료된 후의 잔류유동과 자연대류에 의한 유동의 복합적인 효과가 응고과정에 미치는 영향을 포함하는 해석을 통해서 얻어질 수 있다.

구조과정에 의한 제품생산에서도 다른 생산방법과 마찬가지로 고품질의 제품을 적은 비용으로 생산하는 것이 중요하다. 지금까지 많은 경우 과학적 연구방법에 의한 설계보다는 경험에 의존한 시행착오적인 설계방법이 적용되어 왔다. 그러나 이러한 접근방법은 많은 비용과 시간이 요구된다. 따라서 공학적 접근방법에 의해서 구조과정 전체에 대한 모델링방법을 개발하는 것은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 충전현상과 상변화 열전달을 통합하여 초기 충전에서부터 상변화에 의한 응고까지의 전체 구조과정에 대한 통합적인 해석을 시도하였다. 특히 충전이 완료된 후의 상변화과정에 대해 충전과정에 기인한 잔류유동과 자연대류에 의한 유동이 응고과정에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 이론 및 지배방정식

구조과정의 유동현상은 충전이 이루어지는 동안에는 자유표면이 존재하는 자유표면 유동이며 응고과정은 응고면의 위치가 시간에 따라 변하는 이동경계를 갖는 문제이다. 용융상태의 액체금속이 뉴턴유체이고 층류유동이라고 가정하면 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + S \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $t$ 는 시간,  $\mu$ 는 점성계수,  $k$ 는 열전도계수이며,  $H$ 와  $T$ 는 각각 엔탈피와 온도를 나타낸다. 운동량 방정식의  $S$ 는 생성항을 나타내며 응고현상과 자연대류 효과를 포함할 경우 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>(14)</sup>

$$S = -\frac{C(1-f_L)^2}{f_L^3} \mathbf{u} + \rho g \beta (T - T_{ref}) \quad (4)$$

여기서  $C$ 는 응고형태에 따른 상수이며,  $\mathbf{u}$ 는 속도벡터,  $f_L$ 은 액상분율,  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 체적팽창계수, 그리고  $T_{ref}$ 는 기준온도를 나타낸다.

식 (4)의 우변의 첫째항은 다공성물질 내에서의 유동현상을 옹고된 영역에 대해 적용한 것으로서 옹고가 이루어진 고상은 유동에 영향을 받지 않고 고정되어 있다고 가정하는 수치상 옹고현상을 모델링한 것이다. 이러한 모델링은 갈륨의 용융문제에서 실험적으로 검증되었다.<sup>(14)</sup> 합금의 옹고과정에서는 옹고와 관련되어 용질의 재분포가 일어나며 거시적, 미시적 편석이 발생하지만 이와 관련된 연구는 본 연구의 범위를 벗어나기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다.

## 2.1 수정된 유체체적법

주형의 충전현상은 주형내부에 용융상태의 액체금속과 공기가 동시에 존재하며 그 경계가 시간에 따라서 변하는 이동자유표면을 갖는 유동현상이다. 따라서 이의 해석을 위해서는 자유표면을 추적하기 위한 알고리즘의 도입이 필요하다. 주형이나 탕구 등의 설계를 위해서는 정확한 자유표면의 추적을 통한 주형내부의 액체금속의 상태를 파악해야만 한다. 이러한 주형내부의 상태에 따라 액체금속과 접촉한 부분과 그렇지 않은 부분에서 주형을 통한 열전달이 큰 차이가 나며 이러한 열전달의 차이는 옹고현상에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 충전과정의 해석에 가장 많이 사용된 방법은 유체체적(Volume-Of-Fluid, VOF)법<sup>(15)</sup>으로서 2차원 직교좌표계의 경우 유체의 체적분율을 나타내는 F에 대한 지배방정식인 식 (5)를 이용하여 시간에 따른 유체의 변화를 해석하는 것이다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

위 식의 F함수는 유체에 의해 점유된 점에서는 1의 값을 가지며 점유되지 않은 점에서는 0의 값을 갖는다. 계산하고자 하는 격자계에 대해서 식 (5)를 통해 얻어진 F값은 자유표면에 대한 정보를 주게되며 0과 1 사이의 값을 갖는 점은 자유표면을 나타내는 점이다. VOF 방법은 자유표면을 포함한 유동문제의 해석에 광범위하게 사용되었으며 주형의 충전문제에도 성공적으로 적용되었다. 그러나 VOF 방법은 시간에 대해 현시적 차분방법을 사용하기 때문에 일반적으로 계산에 너무나 많은 시간이 소요된다. 따라서 이러한 제약을 피하기 위해서는 큰 시간증분을 사용할 수 있는 시간에 대해 암시적 차분법을 이용한 VOF

법을 사용하는 것이 효율적이다. 암시적 VOF법<sup>(16)</sup>은 관심을 두고 있는 제어체적이 채워지고 있는 동안에는 인접한 제어체적으로 유체를 전달하지 않으며 완전히 채워진 후에 비로서 유체가 인접한 제어체적으로 유출될 수 있다고 가정하는 것이다. 이 가정은 상류도식의 개념을 이용하여 아래와 같이 식 (5)를 변형함으로써 적용할 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial G}{\partial x} + v \frac{\partial G}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} G &= 0 & \text{if } F < 1 \\ G &> 0 & \text{if } F = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

## 3. 수치적 모델링

### 3.1 충전과정

충전과정과 충전후의 주형내부의 유체유동과 열적거동을 해석하기 위해서 적용한 수치해석방법은 다음과 같다. 연속방정식, 운동량방정식 그리고 유체체적에 대한 전달방정식은 모두 시간에 대해 완전 암시적방법을 사용하여 차분되었다. 먼저 운동량방정식과 연속방정식을 통해 속도를 구한 후 식 (6)과 (7)을 이용하여 새로운 유체의 진행상태를 계산하고 유체에 의해 점유된 영역에 대해 에너지방정식을 풀어서 온도와 액상분율을 결정한다. 새롭게 계산된 유체함수 F를 이용하여 다시 속도를 계산하고 그에 따른 유체함수와 온도 및 액상분율을 수정하며 반복전후의 계산영역 내의 전체 유체의 체적과 온도의 변화가 수렴조건을 만족하면 수렴한 것으로 간주하여 다음 시간단계로 진행하였다. 충전과정의 해석에는 2.1절에 설명되어 있는 암시적으로 수정된 유체체적법을 적용하였으며 이에 대한 자세한 풀이방법은 참고문헌<sup>(16)</sup>에 나타나 있다. 고상화가 진행된 영역에 대해서는 식 (4)의 우변의 첫째항을 통해 속도를 감소시켰다. 이때 C의 값으로는  $1.6 \times 10^3$ 을 사용하였으며<sup>(14)</sup> 분모가 0이되는 것을 방지하기 위해서 액상분율의 값에 0.001을 더하였다.

### 3.2 엔탈피법에 의한 상변화의 해석

식 (3)의 에너지방정식은 상변화의 이동경계를 추적할 필요가 없는 엔탈피법을 적용한 것으로서 엔탈피와 온도의 관계식이 주어질 경우 매우 효율적으로 사용할 수 있다. 일반적으로 온도와 엔

발피의 관계식은 비선형이며 불연속점이 존재하기 때문에 계산이 까다로우며 계산효율 또한 낮다. 상변화문제물 해석할 때 발생하는 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔으며 본 연구에서는 암시적 충전해석과 상용하도록 엔탈피와 온도 관계식의 실제 기술품을 사용하여 계산효율을 크게 향상시킨 다음과 같은 암시적 해석방법을 사용하였다.

엔탈피는 다음식과 같이 일반적으로 정의할 수 있다.

$$H = (1 - f_l) \int_{T_w}^T c_s dx + f_l \int_{T_w}^T c_l dx + f_l L \quad (8)$$

여기서 하첨자  $s$ 와  $l$ 은 고상과 액상을 나타내며  $L$ 은 용고잠열을 나타낸다. 만약 밀도와 비열이 온도에 관계없이 각 상에서 일정하고 고상의 속도가 0인 수직상 용고형태라고 가정하면 식 (3)의 에너지방정식은 식 (8)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \nabla \cdot (uT) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho L \frac{df_l}{dt} \quad (9)$$

용고에 의한 생성항을 처리하기 위한 방법은 다음과 같다. 먼저 식 (9)에 대한 차분식을 일반적인 표현으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_p T_p^{m+1} = \sum a_{nb} T_{nb}^{m+1} + d[f_l^{old} - f_l^{m+1}] + b \quad (10)$$

여기서  $a_p$ ,  $a_{nb}$  그리고  $d$ 는 차분식에 의한 계수를 나타내며 상첨자  $old$ 는 전 시간단계의 값,  $m+1$ 은 반복단계를 나타낸다. Taylor 급수전개에 의하여  $f_l^{m+1}$ 은

$$f_l^{m+1} = f_l^m + \left(\frac{df_l}{dT}\right)_p [T_p^{m+1} - T_p^m] \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 이를 식 (10)에 대입하면 다음과 같이 되며

$$(a_p - S_p) T_p^{m+1} = \sum a_{nb} T_{nb}^{m+1} + S_c + b \quad (12)$$

여기서

$$S_p = -d \left(\frac{df_l}{dT}\right)_p \quad (13)$$

$$S_c = d[f_l^{old} - f_l^m + \left(\frac{df_l}{dT}\right)_p T_p^m]$$

와 같이 나타낼 수 있다. 한편 풀이과정은 다음과 같다. 먼저 식 (13)을 이용하여 식 (12)를 풀고 식 (11)을 통해서 액상분율을 수정하였다. 이 방

법이 지금까지 상변화 해석에 많이 사용된 엔탈피법 중 겉보기 열용량법(apparant heat capacity method)과 가상적인 열흐름에 기초한 방법(fictitious heat flow method)에 비해서 매우 효율적이므로<sup>(17)</sup> 본 연구에서는 이 방법을 사용하여 상변화 현상을 해석하였다. 그리고 열물성치는 각상의 분율에 의한 평균값을 사용하였으며 예를 들어 전도계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = (1 - f_l) k_s + f_l k_l \quad (14)$$

#### 4. 적용예제

##### 4.1 상변화 현상에 대한 검토

Fig. 1과 같은 알루미늄 합금의 용고현상에 대해 본 연구에서 적용한 방법을 이용하여 해석하여 그 타당성을 검토하였다. 초기에 700℃로 유지되는 액체상태의 알루미늄합금이 500℃인 왼쪽 면을 통해 냉각된다. 윗면과 아랫면은 단열되어 있고 오른쪽면은 700℃로 유지된다고 하였으며 용고잠열은 용고기간 동안 선형적으로 방출되며 따라서 액상분율은 아래식과 같이 온도에 대한 선형함수로 가정하였다.

$$f_l = \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, \quad T_s \leq T \leq T_l \quad (15)$$

해석에 사용한 물성치는 Table 1에 나타내었다. 유동은 자연대류에 의해 야기되며 식 (4)와 우변과 같이 Boussinesq 근사를 도입하였다. 동일한 문제에 대해 Swaminathan과 Voller<sup>(17)</sup>가 사용한 격자와 같은 30× 30의 균일격자를 사용하여 계산하였으며 이때  $C$ 의 값으로는  $1.6 \times 10^5$ 을 사용하였다.

Table 1 Thermophysical properties of an aluminum alloy.

Conductivity, $k$	100.0 W/m℃
Specific heat, $c$	1000.0 J/kg℃
Density, $\rho$	2500.0 kg/m <sup>3</sup>
Latent heat, $L$	400.0 kJ/kg
Viscosity, $\mu$	0.0025 kg/m s
Coefficient of thermal expansion, $\beta$	$4.0 \times 10^{-3}$

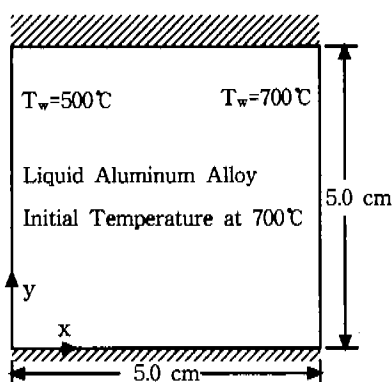


Fig. 1 Problem specification of a solidification of an aluminum alloy.

Fig. 2는 이에 대한 해석결과로서 (a)는 Swaminathan과 Voller<sup>(17)</sup>의 결과이며 (b)와 (c)는 각각  $t=20.0, 30.0$  sec일 때의 본 연구의 결과이다. 등온선의 간격은  $25^\circ\text{C}$ 이며  $T_s$ 와  $T_L$ 은 고상선과 액상선을 나타낸다. Swaminathan과 Voller<sup>(17)</sup>의 결과는 시간에 대한 언급이 없기 때문에 본 연구의 결과와 정량적으로 직접 비교할 수는 없지만 전반적인 응고형태는 잘 일치함을 볼 수 있다.

4.2 충전과 상변화 현상의 통합해석

본 연구에서 제안된 충전에서부터 충전완료후의 응고과정까지의 통합된 해석 알고리즘을 Fig. 3과 같은 사각형 형태에 대해 적용하였다. 오른쪽 윗부분을 통해 충전이 이루어지며 왼쪽면을 제외하고는 모두 단열되어 있다고 가정하였다. 충전되는 액체금속은 앞의 상변화 문제와 동일하며 따라서 물성치도 동일한 값을 사용하였다. Fig. 4의 (a), (b), (c)에 시간에 따른 충전과정을 나타내었다. 왼쪽벽의 온도는  $500^\circ\text{C}$ 로 유지되며 입구의 충전속도는  $0.1\text{m/sec}$ 로서 입구크기를 기준으로 한 Reynolds수는 1000이다. 2개의 등온선은 각각 고상선과 액상선의 온도에 해당하는  $550^\circ\text{C}$ 와  $650^\circ\text{C}$ 를 나타낸다. 충전이 이루어지는 동안 공기와 접한 부분에서 나타나는 고상선과 액상선은 액체금속의 온도가 아니고 접촉면의 공기의 온도이므로 고상화물 나타내지는 않는다. 왼쪽의 낮은 온도로 유지되는 벽에 부딪히기 전에는 주입되는 액체금속의 온도는 냉각이 이루어지지 않기 때문에 일정한 온도로 유지된다. 그러나 (b)의  $t=1.0$  sec

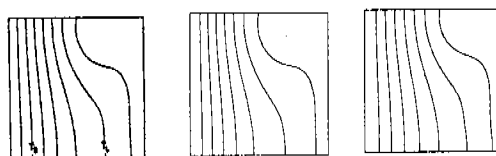


Fig. 2 Solidification of an aluminum alloy in the presence of natural convection, (a) by Swaminathan and Voller,<sup>(17)</sup> (b) present study at  $t = 20$  sec, and (c) present study at  $t = 30$  sec.

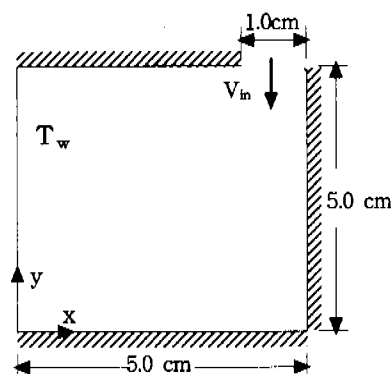


Fig. 3 Schematics of a problem for filling and solidification.

에서 볼 수 있듯이 왼쪽벽에 접촉한 순간부터 이미 냉각이 이루어지고 있음을 알 수 있으며  $t=1.5$  sec에서는 왼쪽벽에서부터 고상선이 형성되는 것을 통해 이미 고상화가 진행되고 있음을 보여 준다. 따라서 충전과정을 생략하고 응고과정을 해석하는 경우는 정확한 해석이 될 수 없음을 알 수 있다. Fig. 5에 충전이 완료된 후인  $t = 2.5, 5.0, 7.5$  sec에서의 유동장과 고상선과 액상선의 진행과정을 나타내었다. 왼쪽벽에서 냉각된 유체의 흐름에 의해 주형의 하부에 비해 상부의 고상화 진행속도가 빠르게 나타난다. 그러나 고상선과 액상선의 사이인 머시영역의 윗부분에 2차 유동이 형성되어 고상선의 진행이 늦어지고 있음을 볼 수 있으며 고상화가 진행됨에 따라 2차 유동의 크기가 커지게 된다. 그러나 충전과정을 포함하지 않은 해석에서는 이러한 2차유동이 발생하지 않는다. 머시영역내의 유동현상은 머시영역에 대한 모델링 방법에 따라 영향을 받을 것으로 생각되며 따라서 본 연구에서 나타난 머시영역내의

2차유동의 크기와 형태도 머시영역에 대한 모델링 방법에 영향을 받을 것이다. 그러나 2차 유동의 발생은 응고과정에서 편석(segregation)의 형태에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문에 매우

중요하다.

Fig. 6은 왼쪽벽의 온도가 400℃로 유지될 때 충전과정에서부터의 해석결과로서 (a)는 시간에 따른 유동장의 변화를 (b)는 고상선과 액상선의

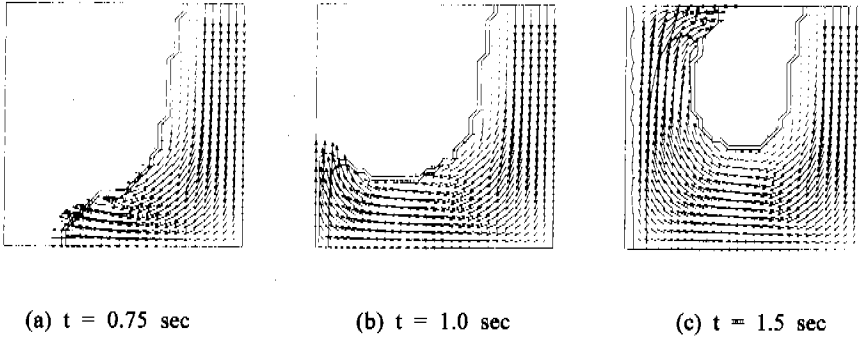


Fig. 4 Results for the simultaneous filling and solidification at  $T_w=500^\circ\text{C}$  and  $v_{in}=0.1\text{m/s}$ .

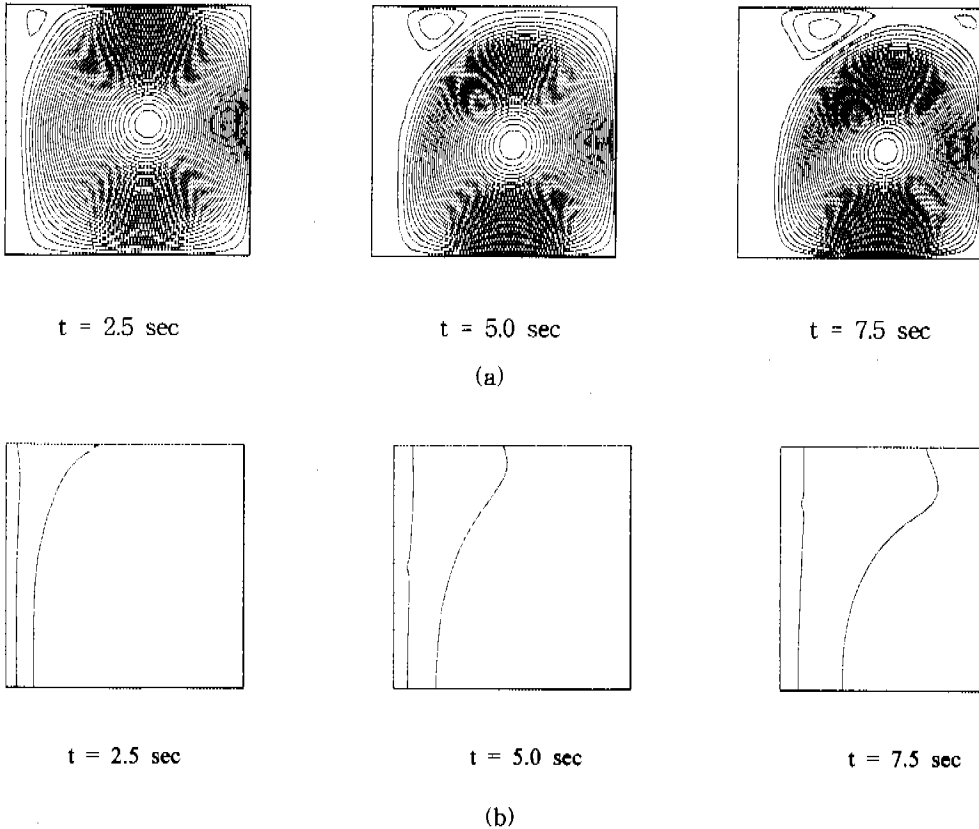


Fig. 5 Results for the simultaneous filling and solidification after the mold was completely filled, in the case of the wall temperature of  $500^\circ\text{C}$  and inlet velocity of  $0.1\text{ m/s}$ , (a) streamlines at  $t=2.5, 5.0$  and  $7.5\text{ sec}$  and (b) progress of the liquidus and solidus lines at  $t=2.5, 5.0$  and  $7.5\text{ sec}$ .

진행과정을 나타낸다. 충전과정은 벽의 온도가 500℃인 Fig. 4의 결과와 유사하므로 생략하였다. 유동장의 형태는 왼쪽벽의 온도가 500℃인 Fig. 5의 결과와 유사하지만 더욱 빠른 냉각으로 인해 고상화의 진행이 빠름을 볼 수 있다. 특히 Fig. 5의 (b)와 비교해 볼 때 액상선에 비해 고상선의 진행이 빠름을 볼 수 있으며 유동현상에 비해 냉각이 지배적이기 때문에 머시영역이 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 4, 5, 6의 해석결과는 충전에 의한 유동의 방향이 부력에 의해 발생하는 유동의 방향과 반대인 경우이다. 충전에 의한 유동방향과 자연대류의 유동방향이 같은 경우에 대한 유동과 상변화 과정을 해석하기 위하여 주입구를 하부의 벽 ( $y=0$ )에 위치시켜서 충전과 상변화 현상을 해석

하였다. 주입구의 x방향의 위치는 앞의 해석과 동일하게 하였으며 왼쪽벽의 온도는 500℃로 유지된다고 하였다. Fig. 7은 이에 대한 해석결과로서 충전이 완료된 후인  $t=2.5$  sec에서  $t=7.5$  sec까지의 유동장과 고상선, 액상선을 나타낸다. Fig. 5와 비교해 볼 때 고상화가 빠르게 이루어지는 부분이 완전히 다르며 자연대류와 잔류유동의 방향이 같기 때문에 유동장에서 2차 유동의 크기가 더 크고 그 발달이 빠르다. 본 연구에서 고려한 왼쪽경계의 온도가 400℃인 모델의 Grashof 수는  $9.8 \times 10^6$ 으로 한쪽 경계의 길이기준으로 한 Reynolds 수의 제곱과의 비(Richardson 수)가 0.4로서 자연대류의 효과가 비교적 미약한 경우이다. 그러나 잔류유동과 자연대류의 유동방향이 동일한 경우에는 서로 다른 경우에 비해 빠른 속

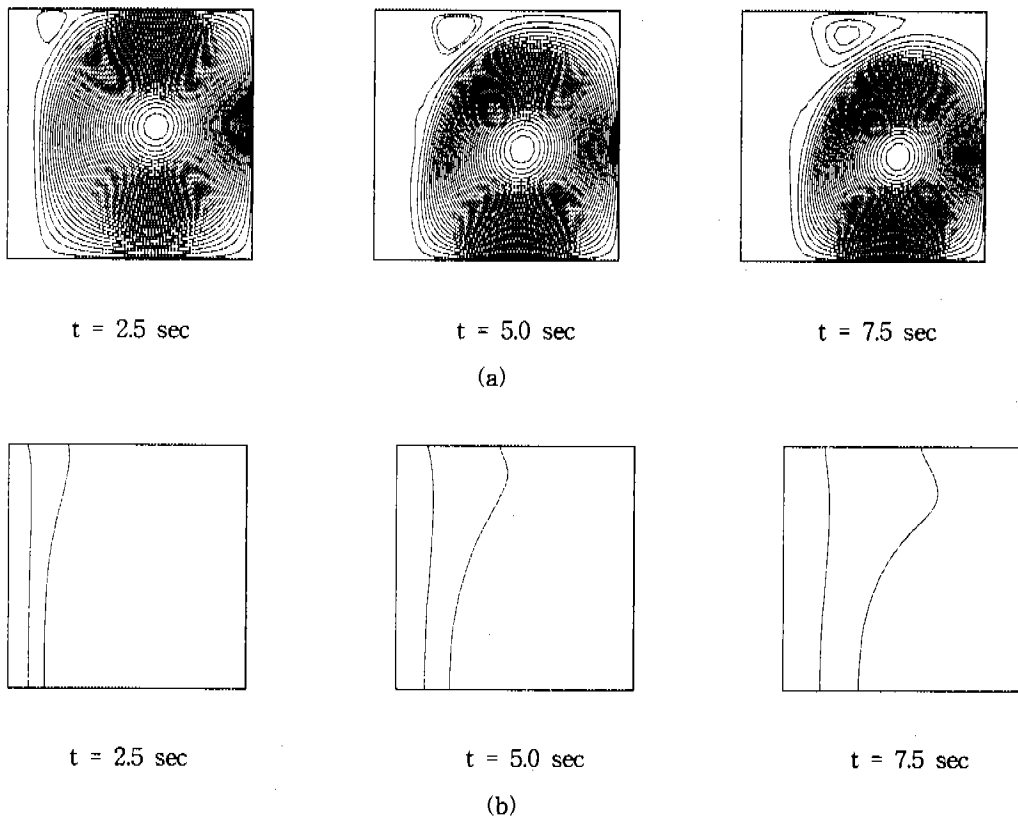


Fig. 6 Results for the simultaneous filling and solidification after the mold was completely filled, in the case of the wall temperature of 400℃ and inlet velocity of 0.1 m/s, (a) streamlines at  $t=2.5$ , 5.0 and 7.5 sec and (b) progress of the liquidus and solidus lines at  $t=2.5$ , 5.0 and 7.5 sec.

도의 영향으로 머시영역에서 2차 유동의 발달이 빠른 것을 볼 수 있다. 머시영역에서는 액상영역에 비해 상대적으로 속도의 크기가 작기 때문에 잔류유동에 대한 자연대류의 영향이 액상영역에 비해 확실하게 나타난다.

자연대류효과를 고려하면서 충전과정에서부터 상변화 과정을 해석한 결과와 자연대류만을 고려하여 상변화과정을 해석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 자연대류는 충전이 완료되는 시간인  $t = 2.5 \text{ sec}$ 에서 시작된다고 가정하였으며 왼쪽 면의 주형의 온도는  $500^\circ\text{C}$ 이고 오른쪽 아래에서 충전이 이루어진다고 하였다. nc로 나타낸 자연대류만을 고려하여 상변화를 해석한 경우는 자연대류 효과에 대한 고려 없이 충전과정만을 해석한 결과(filling)와 자연대류를 고려하면서 충전과정을

해석한 경우(nc+filling)와 액상선에서 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 그리고 충전과정을 고려하면서 자연대류를 포함한 해석결과와 액상선이 자연대류 효과를 포함하지 않은 결과와 액상선보다 강한 유동의 영향으로 약간 더 휘어져 있음을 볼 수 있는데 이것은 머시영역의 발달에 자연대류가 미약하지만 영향을 미침을 보여준다. 따라서 주조과정의 해석에서 충전과정을 포함하는 것이 올바른 유동의 예측을 위해서 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 9에는 아래에서 충전되는 경우와 위에서 충전되는 경우에 대해 왼쪽경계의 온도가  $400^\circ\text{C}$ 일 때와  $500^\circ\text{C}$ 인 경우 시간에 따른 주형내부에 충전된 금속의 체적에 대한 응고된 금속의 체적의 비율 나타내었다. bottom으로 표시된 아래에서

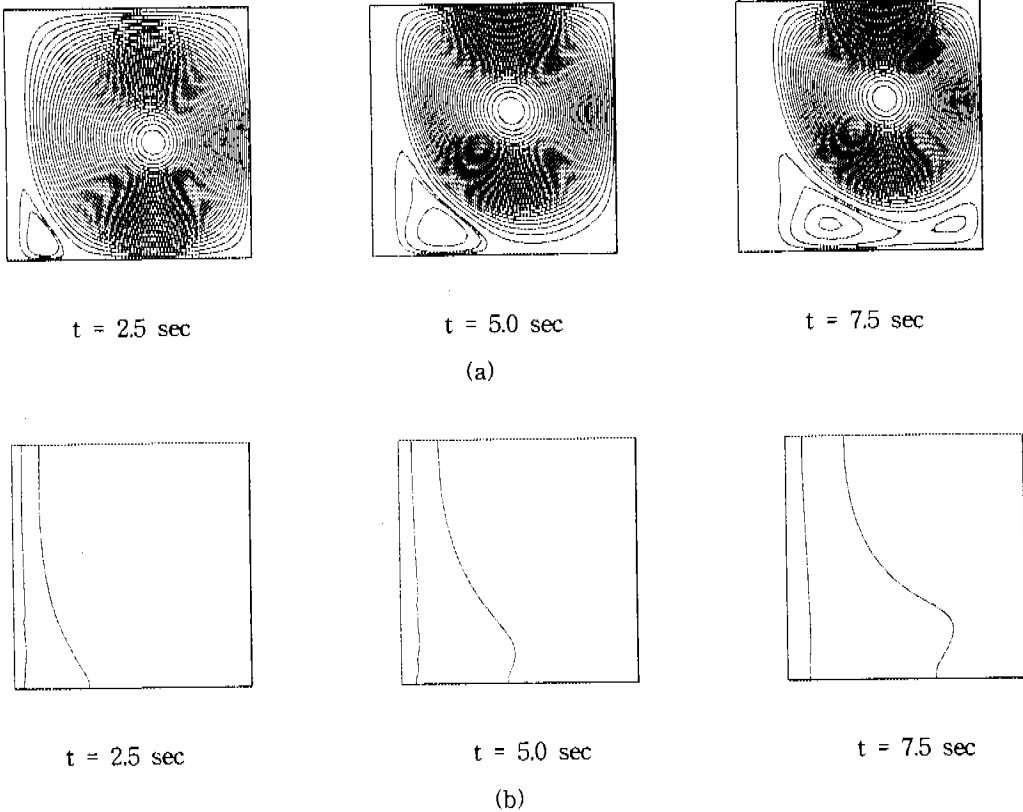


Fig. 7 Results for the simultaneous filling and solidification after the mold was completely filled, in the case of the bottom filling and wall temperature of  $500^\circ\text{C}$ , (a) streamlines at  $t=2.5, 5.0$  and  $7.5 \text{ sec}$  and (b) progress of the liquidus and solidus lines at  $t=2.5, 5.0$  and  $7.5 \text{ sec}$ .



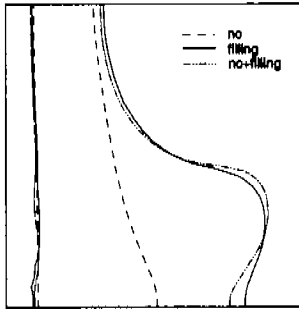


Fig. 8 Solidus and liquidus lines for three different cases with the gate located at the right corner of the bottom wall (nc : natural convection only, filling : filling only, nc+filling : considering both filling and natural convection).

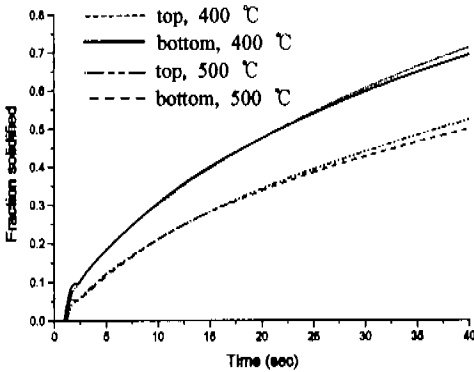


Fig. 9 Solidified volume fraction with time for the different gate position and wall temperature.

충전되는 경우는 충전에 의한 잔류유동과 자연대류에 의한 유동의 방향이 같은 경우(assisting flow)이며 top으로 나타낸 결과는 뒷 부분에서 충전이 이루어져서 잔류유동과 자연대류 유동이 서로 다른 방향을 갖는 경우(opposite flow)이다. 냉각되는 경계의 온도가 400℃인 경우와 500℃인 경우 모두 유동의 방향이 반대인 경우(top)가 동일한 경우(bottom)에 비해 미약하지만 시간이 경과하면서 빠른 냉각이 이루어짐을 볼 수 있다.

이것은 같은 방향인 경우에는 주형내부의 유동이 상대적으로 강해서 전체적으로 대류효과가 강한 반면 유동의 방향이 반대인 경우는 낮은 온도로 유지되는 경계와의 접촉시간이 더 길기 때문에 판단된다. 따라서 빠른 냉각을 위해서는 충전시 자연대류에 의한 유동방향을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 금속주조과정에 대해 충전과정에서부터 충전이 완료된 후의 응고과정에 이르기까지 전 과정을 통합적으로 모델링 하였다. 특히 충전과정은 암시적 충전 알고리즘을 이용하였으며 이에 따라 에너지방정식도 암시적 풀이방법을 이용하였다. 자연대류 현상도 함께 포함하여 해석하였으며 충전방향, 냉각조건 등의 변화에 따른 응고과정을 해석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 전체적인 유동특성에서는 충전과정이 지배적인 영향을 미치지만 머시영역에서는 충전과정에 기인한 잔류유동과 자연대류 현상이 복합적으로 나타나기 때문에 충전과정과 자연대류에 대한 해석이 동시에 고려되어야 한다.
- (2) 냉각조건이 동일한 경우 자연대류와 충전과정에 의한 잔류유동의 방향이 반대인 경우에 냉각이 빠르게 진행되었다.
- (3) 충전방향이 서로 다른 경우를 비교한 결과 유동의 방향이 동일한 경우가 서로 반대인 경우에 비해 2차 유동이 더욱 빠르게 발달됨을 알 수 있다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 98년도 핵심전문연구(과제번호 : 981-1006-039-2)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 대해 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Crank, J., 1988, *Free and Moving Boundary Problems*, Oxford University Press, NewYork.
- (2) Ozisik, M. N., 1993, *Heat Conduction*, John Wiley & Sons, Inc.

- (3) Shyy, W., Chen, M. H., 1990, "Steady-State Natural Convection with Phase-Change," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 11, pp. 2545~256.
- (4) Salcudean, M., Abdullah, Z., 1988, "On the Numerical Modelling of Heat Transfer During Solidification Processes," *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 25, pp. 445~473.
- (5) Beckermann, C., Wang, H. P., Bertram, L. A., Sohal, M. S., Guceri, S. I., 1994, *Transport Phenomena in Solidification*, HTD-Vol. 284, AMD-Vol. 182, ASME.
- (6) Hwang, W. S., Stoehr, R. A., 1983, "Fluid Flow Modeling for Computer Aided Design of Castings," *J. of Metals*, Oct., pp. 22~29.
- (7) Muttin, F., Coupez, T., Bellet, M., Chenot, J. L., 1993, "Lagrangian Finite-Element Analysis of Time-Dependent Viscous Free-Surface Flow Using an Automatic Remeshing Technique : Application to Metal Casting Flow," *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 36, pp. 2001~2015.
- (8) Swaminathan, C. R., Voller, V. R., 1994, "A Time-Implicit Filling Algorithm," *Appl. Math. Modelling*, Vol. 18, pp. 101~108.
- (9) Wang, H. P., Perry, E. M., 1991, "An Interactive Parametric Analysis Tool for Thin-Walled Investment Casting," *Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process V*, TMS, pp. 595~602.
- (10) Hu, J., Eckert, E. R. G., Goldstein, R. J., 1992, "Numerical Simulation of Flows, Heat Transfer and Solidification in Pressure Die Casting," *HTD-Vol. 194, Modern Developments in Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer*, ASME, pp. 67~74.
- (11) Swaminathan, C. R., Voller, V. R., 1993, "Numerical Modelling of Filling and Solidification in Metal Casting Processes : A Unified Approach," *Proceedings, Numerical Methods in Thermal Problems*, Swansea, U. K.
- (12) van Tol, R., van den Akker, H. E. A., Katgerman, L., 1994, "CFD Study of the Mould Filling of a Horizontal Thin Wall Aluminum Casting," *HTD-Vol. 284/AMD-Vol. 182, Transport Phenomena in Solidification*, ASME, pp. 203~213.
- (13) Minaie, B., Stelson, K. A., Voller, V. R., 1991, "Analysis of Flow Patterns and Solidification Phenomena in the Die Casting Process," *J. of Engineering Materials and Technology, Trans. of ASME*, Vol. 113, pp. 297~302.
- (14) Brent, A. D., Voller, V. R., Reid, K. J., 1988, "Enthalpy Porosity Technique for Modelling Convection-Diffusion Phase Change : Application to the Melting of a Pure Metal," *Numerical Heat Transfer*, 13B, pp. 297~318.
- (15) Hirt, C. W., Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (16) 임익태, 김우승, 1998, "암시적 방법을 이용한 충전 알고리즘의 개발," 대한기계학회 논문집B, 제22권 제1호., pp. 104~112.
- (17) Swaminathan, C. R., Voller, V. R., 1993, "On the Enthalpy Method," *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, Vol. 3, pp. 233~244.