

논문

# 용탕충진과정에 있어서 열 및 유동을 포함한 2차원 응고해석

김성빈, 조인성, 김진수, 홍준표

## Coupled Analysis of Heat Transfer, Fluid Flow and Solidification in the Filling of Castings

Sung-Bin Kim, In-Sung Cho, Jin-Su Kim and Chun-Pyo Hong

### Abstract

A Numerical technique has been developed for the coupled heat transfer and fluid flow calculation during the casting process. In this method the SMAC technique was coupled with the concept of Volume of Fluid(VOF) to calculate melt free surface and velocity profiles within the melt, and the Energy Marker method coupled with the finite difference method was proposed for the convective and conductive heat transfer analysis in the casting. When comparing numerical calculations with experimental observations, a close correlation was evident. It has been shown that this technique is useful for proper gating and casting design, especially for thin-walled castings. (Received July 8, 1993)

### 1. 서 론

탕구방안의 설계나 주조결함의 제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 주조공정에서 발생하는 용탕의 열 및 유동현상을 정량적으로 해석하는 일이 필요하다. 이러한 욕구를 충족시키기 위하여 지난 10여년 동안 주조품의 열전달 및 응고현상을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 해석하고자 하는 많은 노력이 경주되어 왔으며<sup>1)</sup>, 또한 MAC, SMAC 및 SOLA-VOF<sup>2~4)</sup> 계열의 유동해석방법들을 주조분야에 적용하여 주형을 충만해가는 용탕의 흐름을 수치적으로 해석하기 위한 연구도 진행되어 왔다<sup>5~7)</sup>. 그간 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 열전달 및 응고해석은 주조품의 체계적인 설계 뿐만 아니라, 주조결함 및 미세조직의 정량적인 예측에도 널리 이용되어 왔다. 그러나 여러가지 주조공정 중에서 응고현상이 용탕의 흐름에 크게 의존하는 경우나 주조결함이 주입시의 유동 및 응고현상과 복합적으로 일어나는 경우에는 열전달해석

만으로는 효과적으로 결함을 제어하기 어려운 난점들이 발생한다. 왜냐하면 기존의 응고해석 방법들은 해석초기에 단순히 전체 주물을 주입 온도로 일정하다고 가정하고 해석하지만, 실제로는 용탕주입 도중에 주형으로부터 상당한 열 손실이 있으며, misrun의 예측이나 용탕의 overheat량을 계산해야 하는 필요성이 제기되기도 한다. 따라서 주조품의 정확한 응고해석을 위해서는 용탕이 주형을 충진하는 과정에서 발생하는 열전달, 유동 및 응고현상을 동시에 해석해야 하며, 탕도방안 및 주형의 설계 등과 같은 주조방안의 설계도 이와같은 해석을 통해서 보다 효율적으로 수행될 수 있다. 이러한 의미에서 용탕의 충진단계에서 발생하는 열전달, 유동 및 응고층의 형성을 효과적으로 동시에 계산할 수 있는 수치해석모델의 개발이 필요하게 되었다. 최근 자유표면을 지닌 유체의 유동을 해석하기 위해 개발된 SOLA-VOF법을 근간으로 하여, 용탕충진단계에 있어서 열 및 유동을 동시에 해석할 수 있는 수치해석

연세대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei University)

법을 개발하기 위한 연구가 시도되어 왔고<sup>8)</sup>, 이를 현장에 적용하고자 하는 연구도 함께 진행되고 있다<sup>9)</sup>.

본 연구에서는 용탕이 주형에 주입되기 시작하여 주형을 완전히 충전할 때까지의 과정에서 발생하는 유동, 열전달 및 응고층의 형성을 해석할 수 있는 수치해석모델을 개발하고자 하였다. 또한 두께가 얇은 주물을 정밀주조법이나 다이캐스팅법으로 주조하는 경우에 발생하는 cold shut, 기포 및 수축공 등의 주조결함들을 주형을 충전하고 있는 용탕의 유동 및 응고현상을 해석함으로써 제어될 수 있음을 제시하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서 개발한 수치모델을 두께가 얇은 수직평판형상의 주조에 적용하여 그 결과를 열전달을 이용한 실험결과와 비교하고자 하였으며, 기존의 응고해석 모델로 해석한 결과와도 비교하였다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 수치해석방법의 개요와 기본방정식

주형을 충전하는 용탕의 유동, 열전달 및 응고현상을 해석할 수 있는 수치해석모델을 개발하였다. 우선 주조용으로 개량한 2차원 SMAC 법<sup>7)</sup>을 이용하여 주형을 충전하는 용탕의 유동을 해석하였다. 그 후 유체함수(VOF : volume of fluid)개념<sup>4)</sup>과 본 연구에서 개발한 Energy Marker법을 도입하여 용탕의 내부와 공기가 접한 자유표면 그리고 주형 사이의 열전달을 유한차분방식으로 해석하였다. 열전달해석에 있어서 상변화현상을 고려하였으며 온도회복법 (temperature of recovery)<sup>11)</sup>을 사용하였다. 용탕의 흐름은 2차원 유동으로 해석하였으나, 열전달해석의 경우에는 Fig. 1에서 처럼 주형의 두께방향으로의 열손실을 고려하여 실제주조의 경우에 보다 근접한 3차원 열전도모델을 사용하였다. 용탕의 유동을 비압축성의 점성유체로 다루었으며 연속방정식과 열전달 방정식 그리고 모든 비선형 항을 포함하는 완전한 Navier-Stokes식을 원시변수의 형태로 유도하여 사용하였다. 이러한 지배방정식들은 다음과 같다.

#### 1) 연속방정식

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

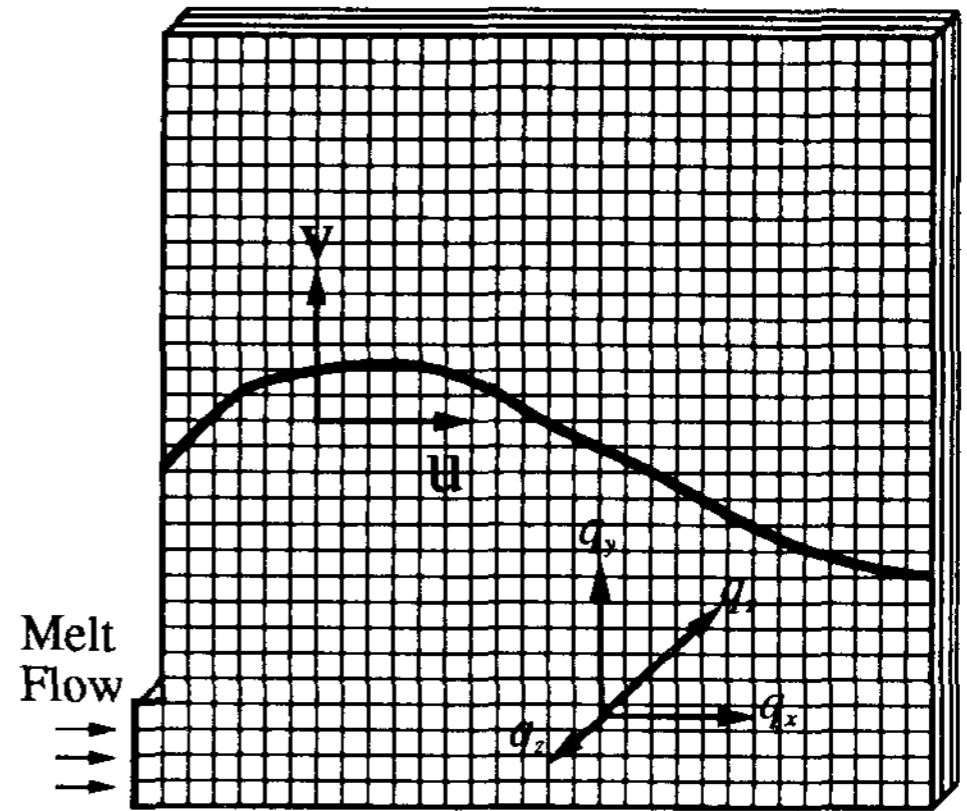


Fig. 1. Mesh configuration.

(u, v : 2 dimensional fluid flow direction  
 $q_x, q_y, q_z$  : 3 dimensional heat flow direction)

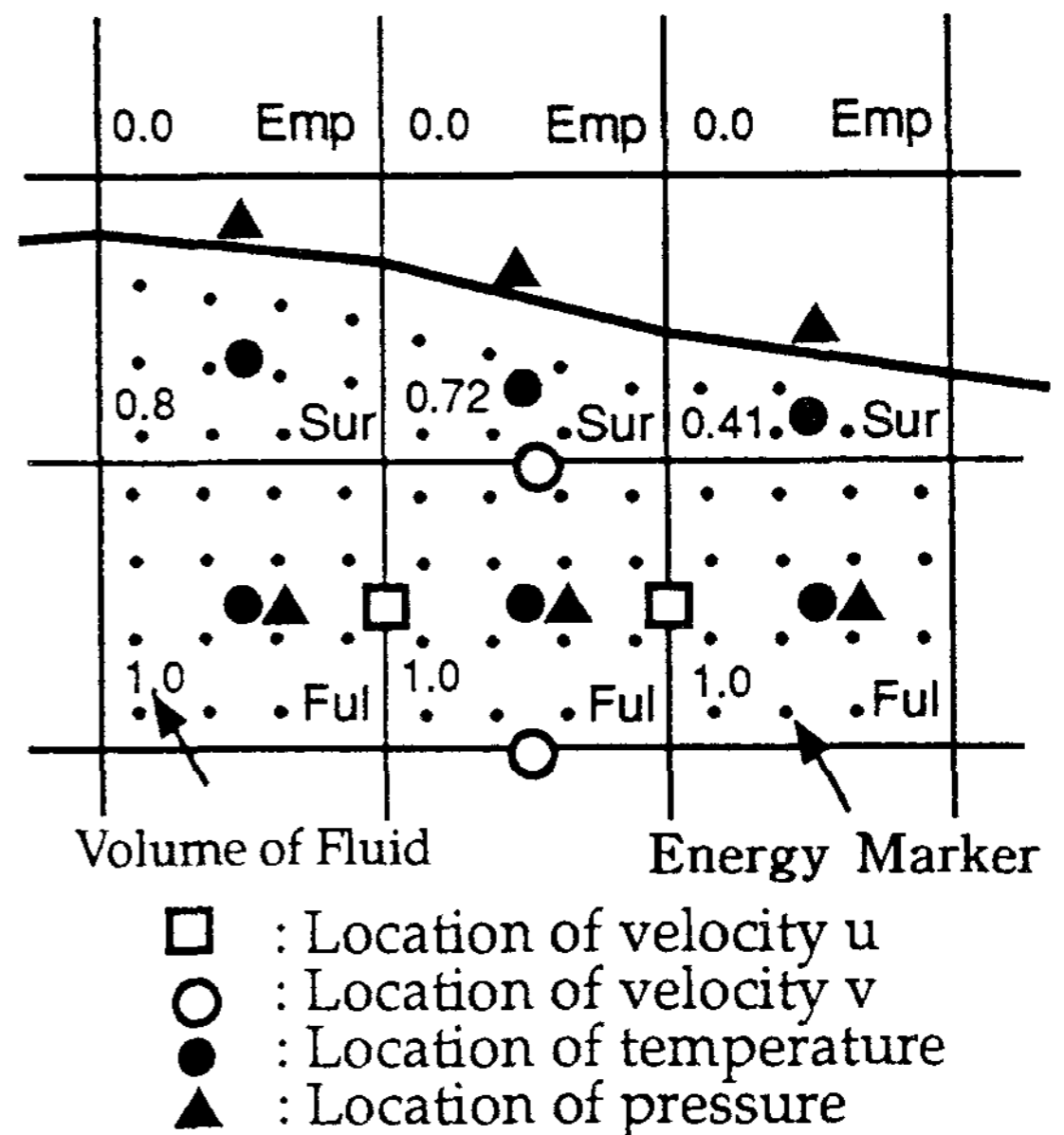


Fig. 2. The location of variables near the free surface.

(Emp : empty cell, Sur : surface cell, and Ful : full cell)

#### 2) Navier-Stokes 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + g_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + g_y$$

여기서  $u, v$ 는  $x, y$ 성분의 속도,  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력,  $g_x, g_y$ 는 중력가속도이다.

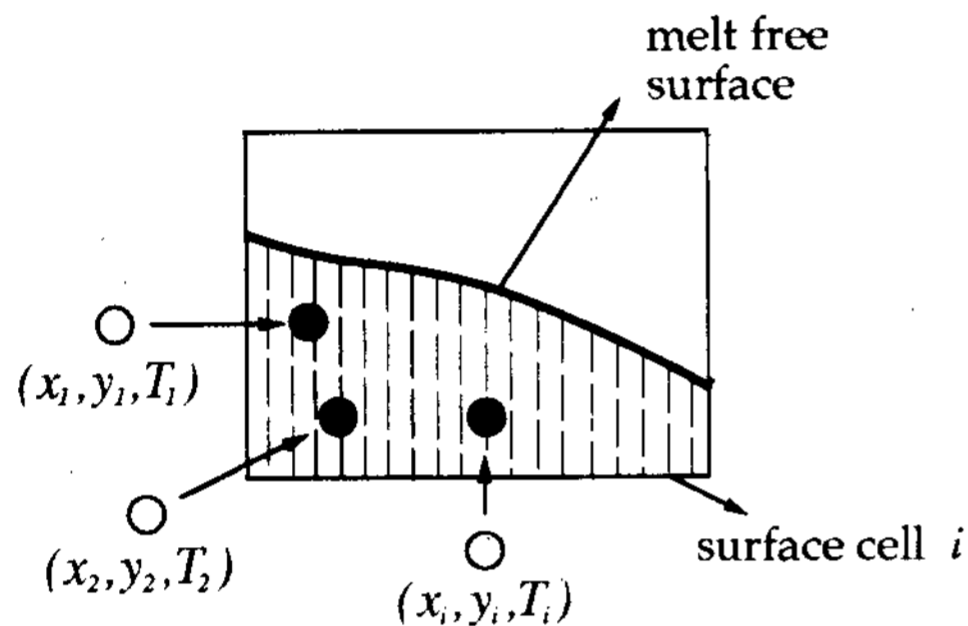
3) 열전달방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho C_p u T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho C_p v T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3)$$

여기서  $C_p$ 는 비열,  $k$ 는 열전도도,  $Q$ 는 응고 잠열이다.

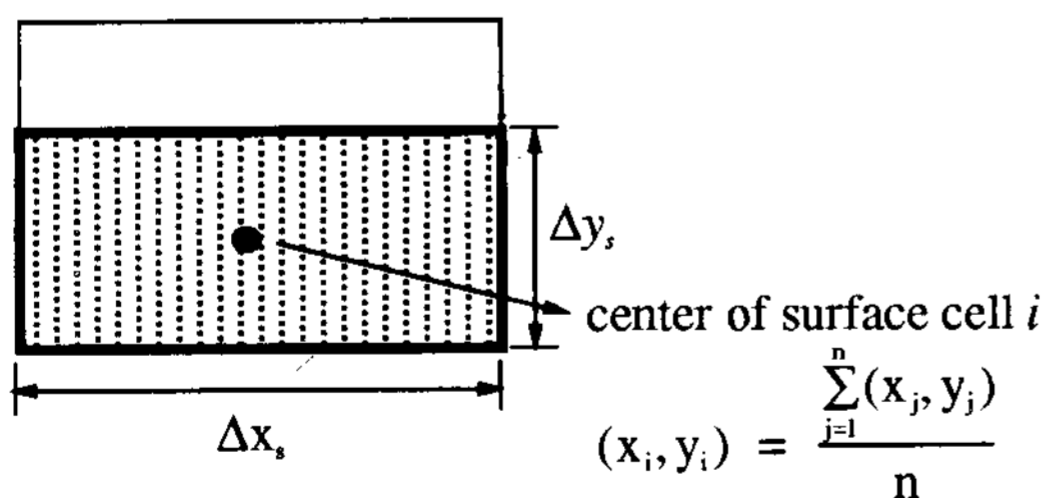
2.2 Energy Marker 개념

주형에 주입된 용탕은 주형 내부에 존재하는 공기와 복잡한 자유표면현상을 이루면서 주형을 충전하게 된다. 이때 용탕과 주형벽 및 주형내의 공기 사이에서는 열전달현상이 일어나며, 응고잠열도 발생하게 된다. 충전중의 용탕은 주형벽으로부터의 냉각효과에 의해 고상이 되면서 용탕의 유동에 장애요인으로 작용하기도 한다. 유동과 열전달 및 응고현상이 복합된 이러한 현상을 해석하기 위하여 용탕의 자유표



- Current energy marker position
- Previous energy marker position

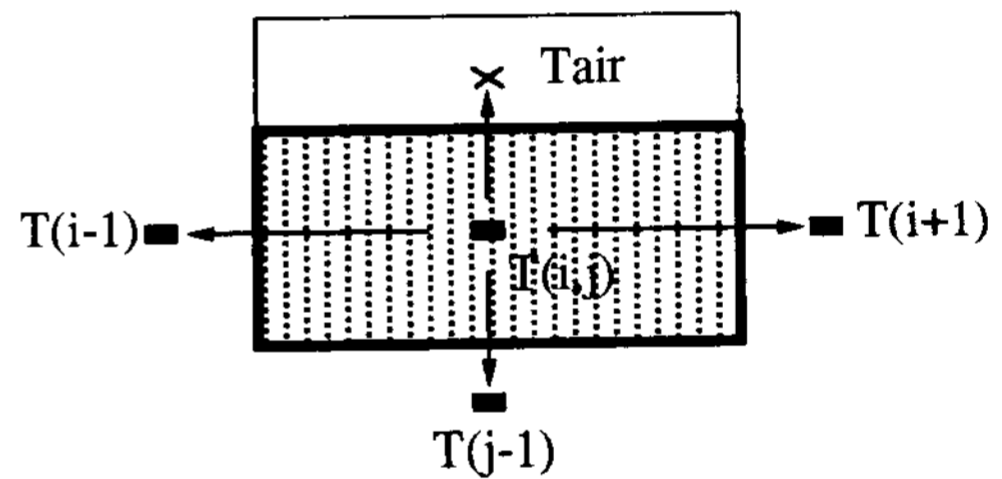
(a) Step I - Energy markers flowing into a surface cell  $i$ .



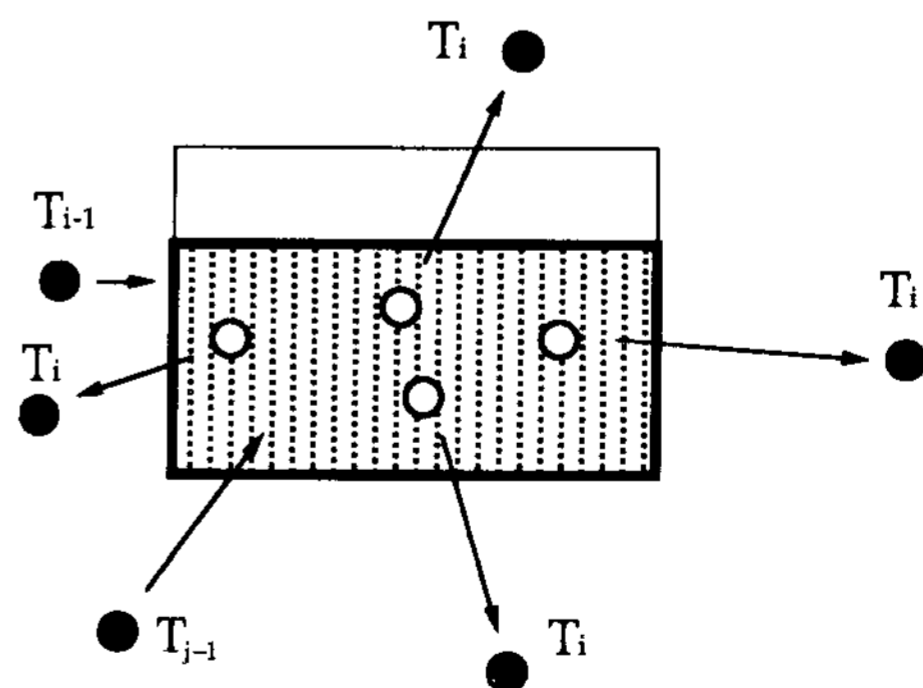
$$\text{volume of fluid of surface cell}_i = \frac{(\Delta x_s, \Delta y_s)}{(\Delta x_F, \Delta y_F)}$$

$$\text{temperature of surface cell } i (= T_i) = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{n}$$

(b) Step II - Convective heat transfer calculation Here the subscripts  $s$  and  $F$  indicate surface cell and full cell, and  $n$  the total number of energy markers in a surface cell  $i$ .



(c) Step III - Conductive heat transfer calculation by the control volume FDM.



(d) Step IV - Energy markers flowing out of a surface cell  $i$ , with a new temperature  $T_i$ .

Fig. 3. Energy Marker concept.

면은 Marker법<sup>2,3)</sup>을 이용하여 해석하였으며, 오직 자유표면의 추적을 위해서만 고안된 Marker들이 열을 전달할 수 있도록 개량한 Energy Marker법을 이용하여, 용탕에 의해 전달되는 열량을 계산하였다. 그런 후 자유표면에서의 유체함수(VOF)<sup>4)</sup>를 구한 다음, 이를 이용하여 용탕과 주형 그리고 공기와의 열전달현상을 개량차분법으로 해석하였다. Fig. 2에서는 각 계산변수들의 위치를 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 유체로만 된 영역에서는 압력과 온도를 셀의 중앙에서 계산하였으며, 공기와 접한 자유표면영역의 경우에는 온도는 유체의 중심에서, 압력은 자유표면 선상에서 계산하였다. 또한 x, y방향의 속도, u, v는 엇갈린 격자망(staggered mesh) 위에서 정의하여 사용하였다. Fig. 3에서는 Energy Marker들에 의한 열전달 계산방법의 핵심을 나타내고 있다. (a)에서 보듯이 주변에 있던 Energy Marker들은 자신들의 위치와 온도를 가지고 한 셀로 유입하게 된다. (b)에서는 이러한 위치와 온도를 평균하여 자유표면 셀의 평균온도와 유체분율(VOF)을 구하게 된다. (c)에서 이렇게 해서 구해진 평균위치와 온도를 이용하여 주변 셀과 열전도를 계산한 다음, 마지막으로 (d)에서는 Energy Marker들이 새롭게 계산된 셀의 온도를 가지고 다시 주변의 셀들로 이동하게 된다. 이러한 Energy Marker법은 셀의 간격을 미세하게 나눌 경우, 유체의 열흐름을 대표한다고 간주할 수 있다.

### 3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 수치해석방법을 검증하고, 주형충진시의 용탕흐름 및 응고현상을 해석하기 위하여 평판상의 주물을 금형과 세라믹 주형을 사용해서 구조실험을 수행한 후, 이 결과를 해석결과와 비교하였다. Fig. 4에서 보듯이 가로, 세로 150×150mm의 주형을 사용하였으며, 금형의 경우 두께 9mm, 세라믹 주형의 경우는 30mm 두께로 제작하였다. 실험재료는 공업용 순 알루미늄(99.7%)을 사용했으며 주입속도는 금형의 경우 약 90cm/sec, 세라믹의 경우 약 25cm/sec로 하였다. 용탕의 흐름과

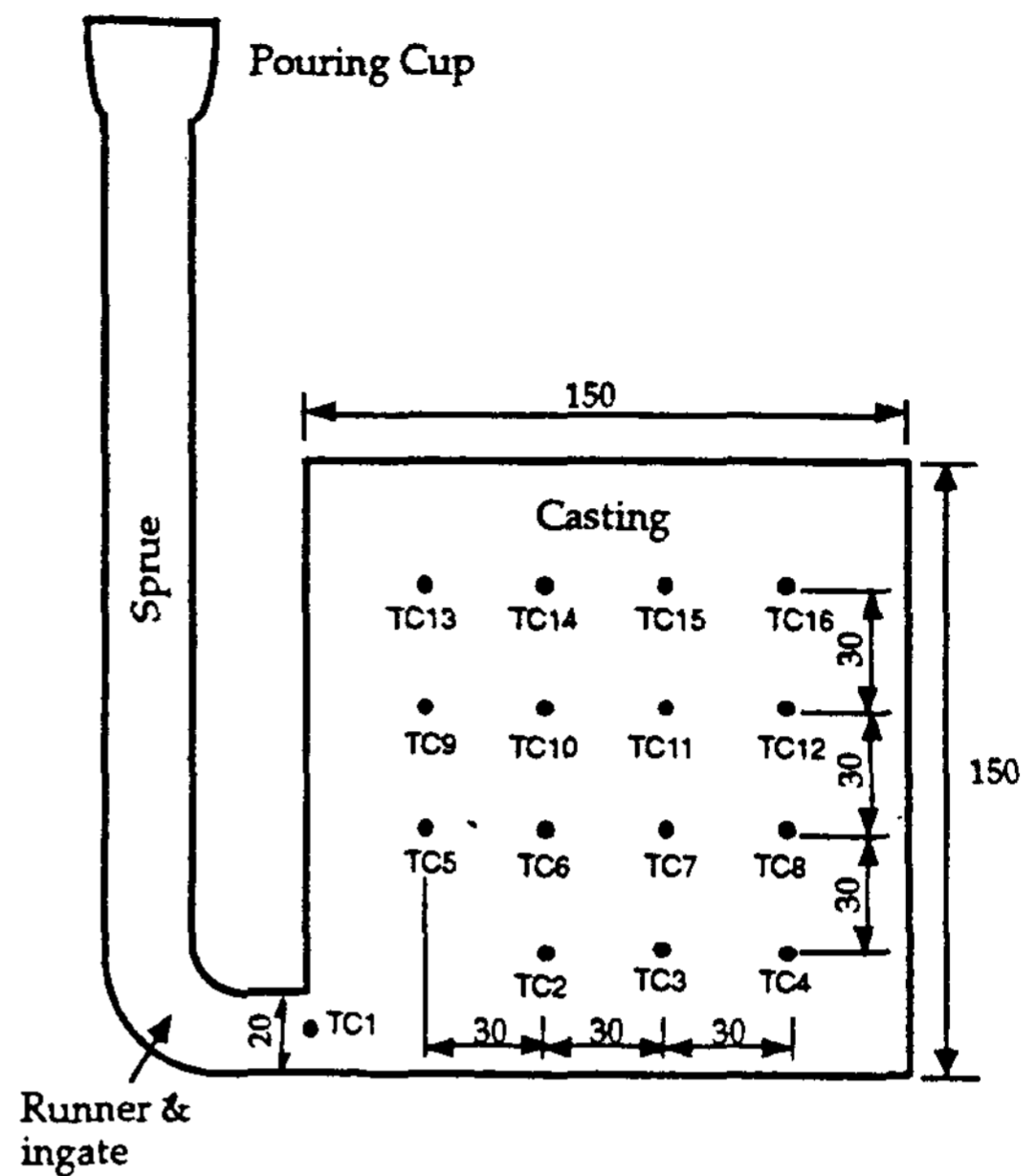
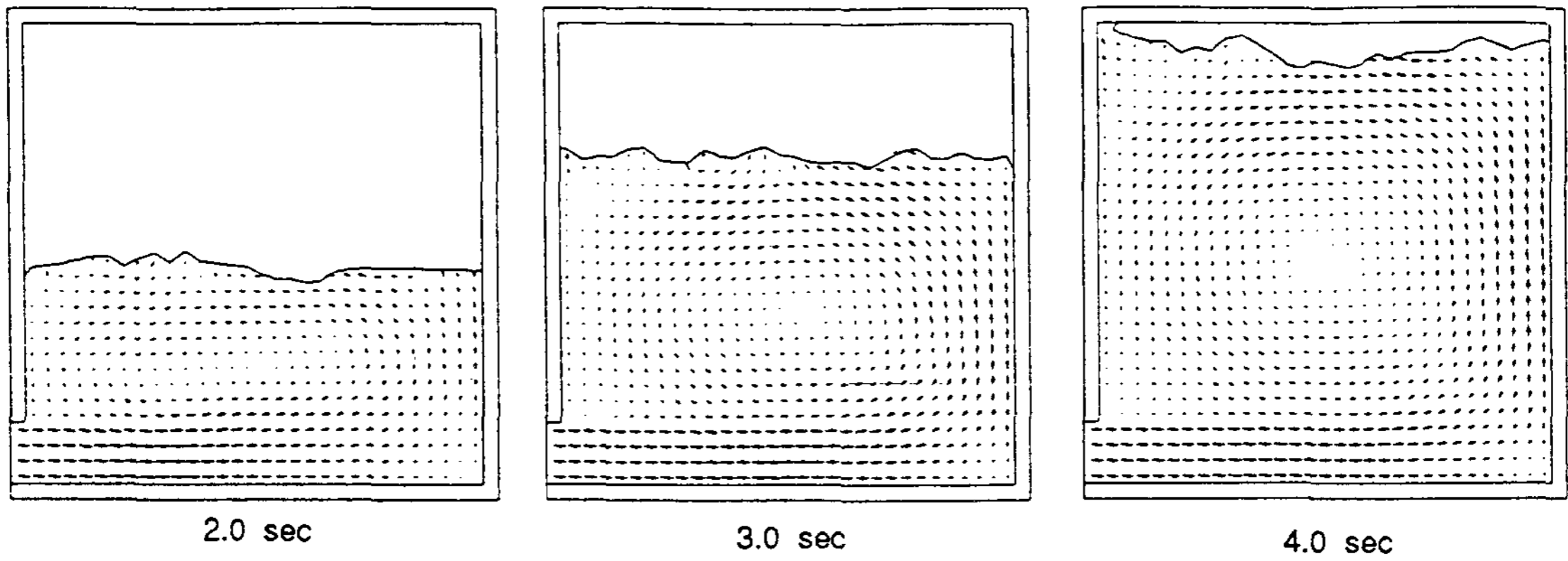


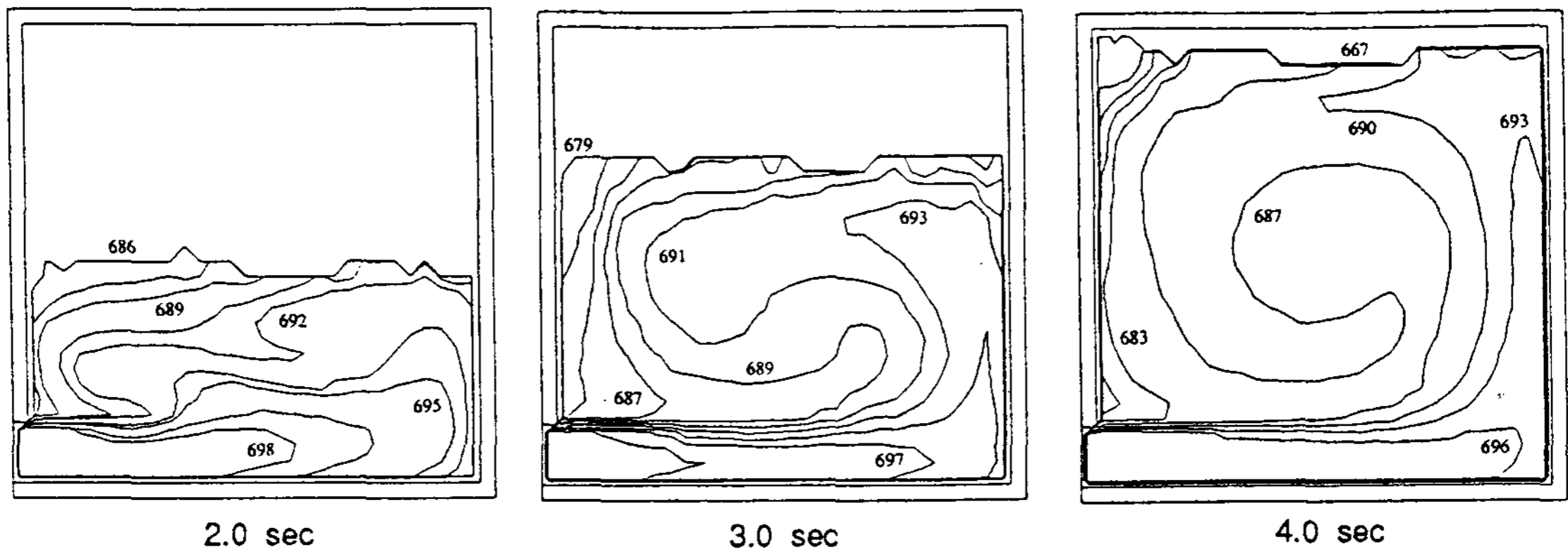
Fig. 4. Geometry and dimensions of the vertical plate casting.

온도변화를 측정하기 위하여 16개의 CA열전대를 장치하였으며 personal computer와 Data Acquisition사의 DT2825 A/D convertor를 사용하여 0.05sec 시간간격으로 주입 후 약 4분까지의 결과를 측정하였다.

Fig. 5는 세라믹 주형을 사용한 수평평판의 구조를 해석한 결과이다. Fig. 5에 나타낸 용탕 흐름 및 온도분포에서 볼 수 있듯이 주형을 충전하는 과정에서의 온도분포는 시간경과에 따른 용탕의 흐름분포에 의하여 크게 영향을 받는다. 즉, 주형의 중앙부에서 일어나는 와류의 영향으로 온도분포 역시 와류형의 분포를 갖게 된다. 충진이 거의 완료단계에 이르렀을 때 주형으로부터의 냉각효과에 의해 주입구 부근과 주형상단 부분의 용탕의 온도차는 약 30°C 정도에 이르게 된다. 금형의 경우에도 이와 유사한 해석결과를 얻을 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 세라믹 주형 및 금형에 있어서 충전하고 있는 용탕의 흐름을 열전대로 측정한 결과와 이를 수치해석한 결과를 비교한 것이다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 용탕유동의 해석결과와 실험 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 금형구조에의 경우에는 주형의 충전말기에 있어서 용탕흐



(a) Calculated flow pattern



(b) Calculated temperature distributions

Fig. 5. Calculated flow pattern and temperature distributions in the ceramic mold casting at various time intervals during the filling stage.

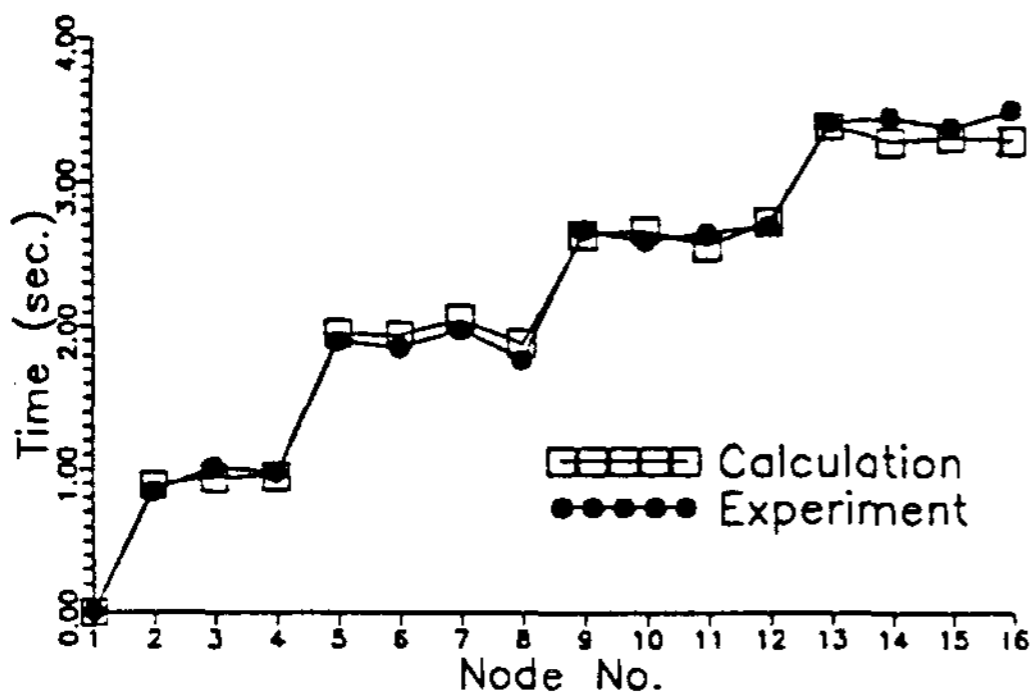


Fig. 6. Comparison between calculated and measured contact times for a ceramic mold.

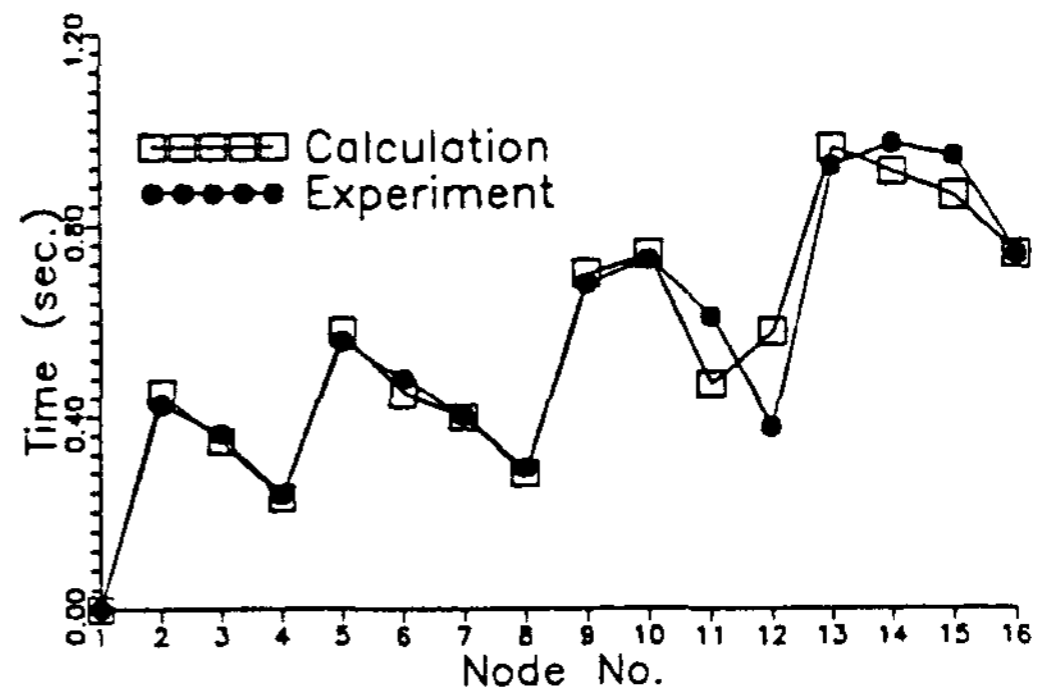
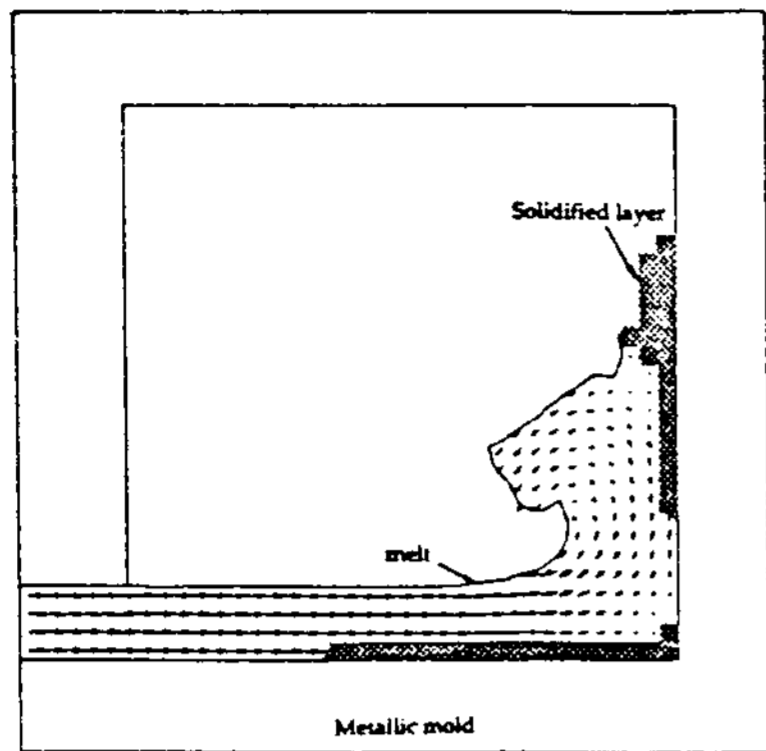
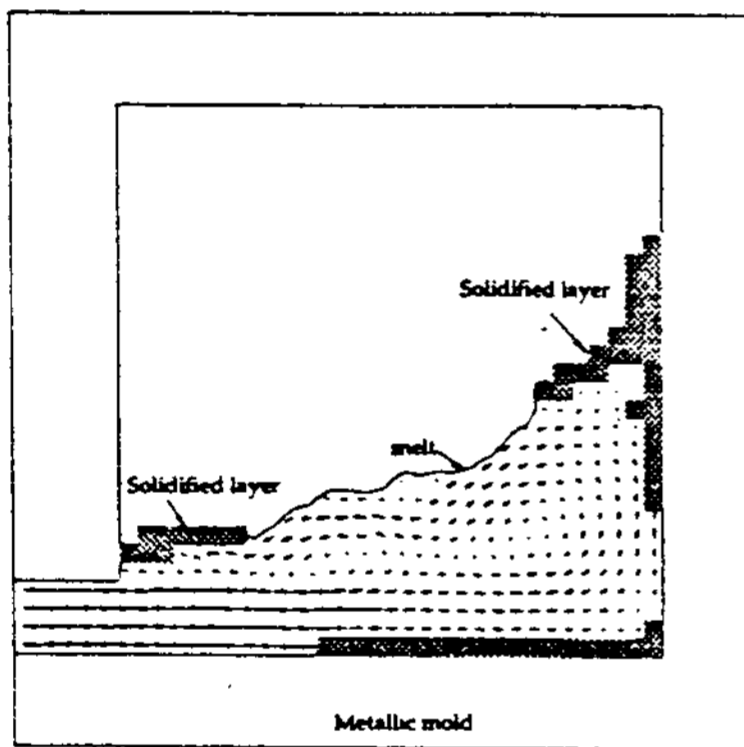


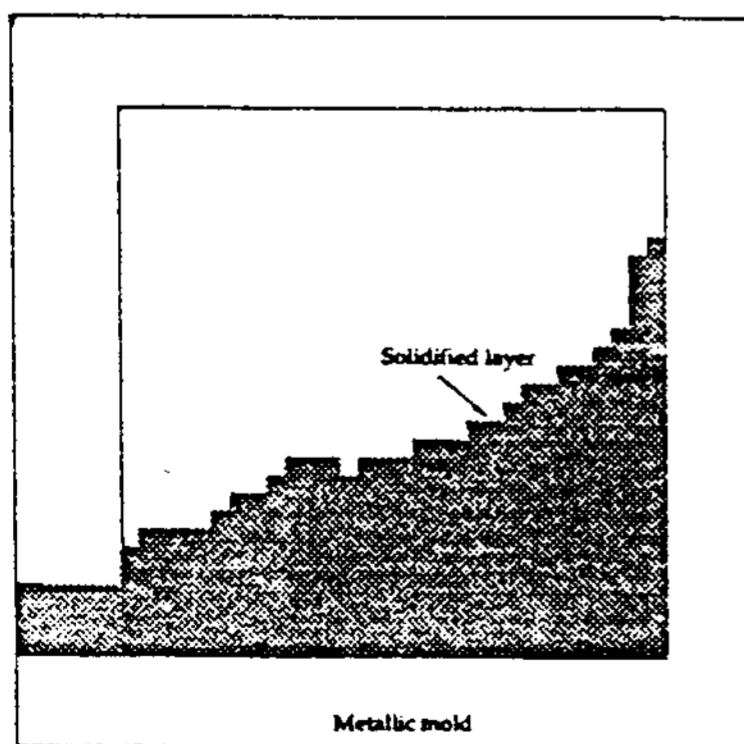
Fig. 7. Comparison between calculated and measured contact times for a metallic mold.



0.45 sec



0.55 sec



0.6sec

Fig. 8. Calculated flow pattern and cold shut formation in the metallic mold casting with an insufficient superheat of 20°C.

름이 주형으로부터 역압력을 받기 때문에 실험 결과가 수치해석결과와 약간 차이가 나는 양상을 보여주고 있다. Fig. 8은 금형주조에 있어서 낮은 주형온도와 불충분한 예열상태에서 용탕을 주입했을 때, 주형벽으로부터 일어나는 응고층의 형성과정을 해석한 것이다. 이때 용탕의 주입온도는 700°C, 주형의 온도는 25°C로 만들어 주어서 일부러 misrun을 유발하여 실험결과를 해석결과와 비교하고자 하였다. 이와 같은 결과에서 보듯이 misrun을 방지할 수 있도록 적절한 용탕예열온도와 주형온도를 설정하기 위해서는 용탕의 흐름과 동시에 응고해석을 복합적으로 수행하여야 함을 알 수 있다. Fig. 9는 본 연구에서 제안한 모델과 일반적인 응고해석모델의 해석결과를 비교한 것이다. 기존의 응고해석모델의 경우, 충전완료시에 초기온도를 단순히 주입온도로 가정하고 해석하지만 실제로는 (a)에서 보는 바와 같이 부위별로 상당한 온도차가 존재한다. 따라서 보다 정확한 응고해석을 바탕으로 구조결함을 예측하거나 구조방안을 설계하기 위해서는 초기온도분포를 고려한 응고해석이 필요함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

주형을 충전하는 용탕의 유동, 열전달 및 응고현상을 해석할 수 있는 수치해석모델을 개발하였다. 구조용으로 개량한 2차원 SMAC법을 이용하여 주형을 충전하는 용탕의 유동을 해석하였고, 유체함수(VOF)개념과 Energy Marker법을 도입하여 충전과정에 있어서의 용탕의 열전달현상을 유한차분법으로 해석하였다. 세라믹 주형과 금형을 사용한 평판상 구조를 통해 수치모델의 정확성을 검증하였고, 충전과정에 있어서의 용탕흐름의 정확한 예측 뿐만 아니라, 적절한 용탕예열온도 및 주형의 온도의 계산 그리고 실제에 보다 가까운 응고해석을 통해서 구조결함을 예측하고 제어하기 위해서는 본 연구에서 제시한 유동, 열전달 및 응고현상을 복합적으로 해석할 수 있는 수치해석법이 필요하리라고 사료된다.

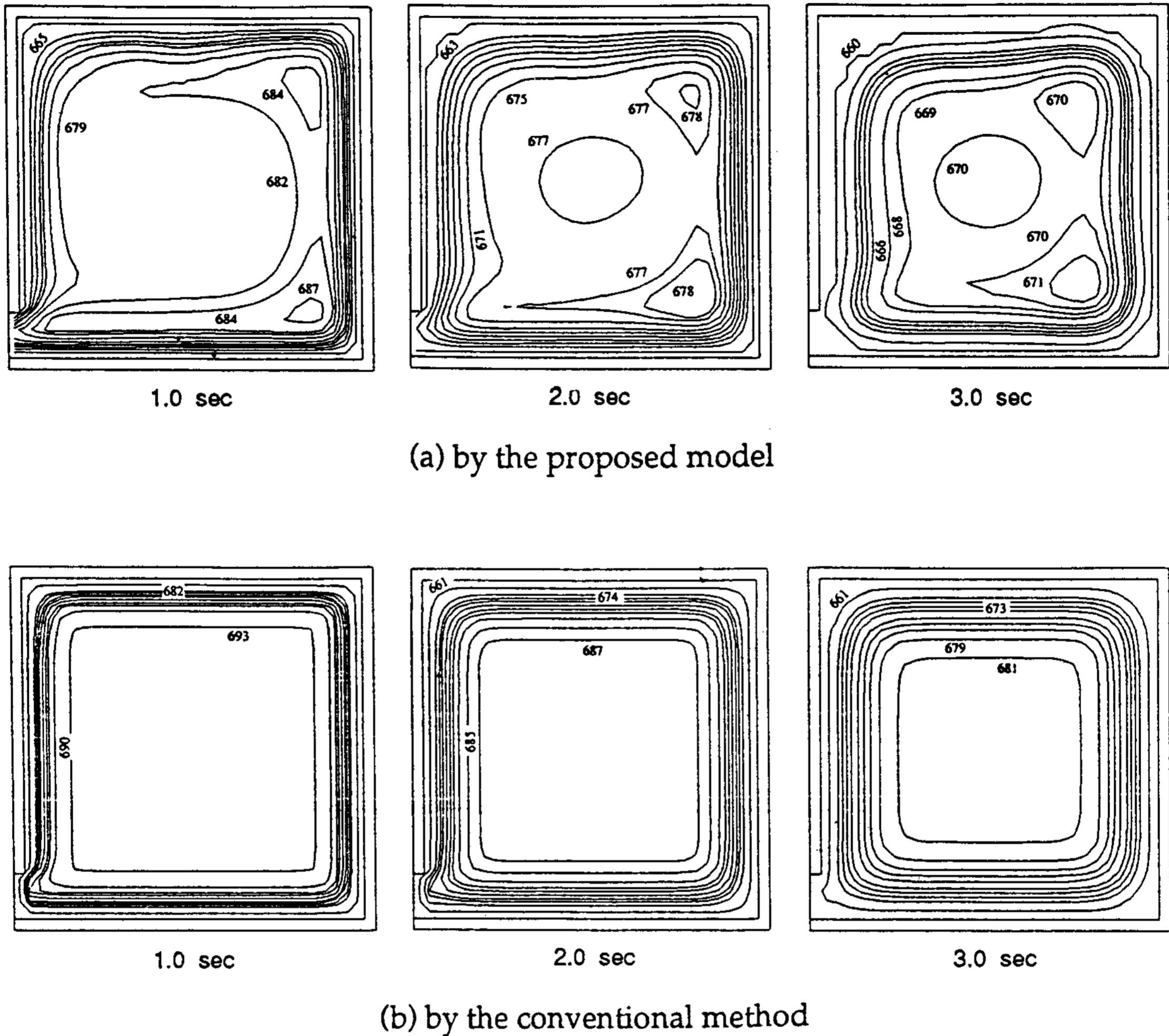


Fig. 9. Calculated temperature distributions in the ceramic mold casting after the mold cavity is filled.

참 고 문 헌

1. E. Niyama, "Application of Computer Simulation in the Foundries", Modeling of Casting and Solidification Processes 1991, C. P. Hong, E. Niyama and W. S. Hwang(Eds.), Yonsei Univ. Press(1992), p. 319~327
2. J. E. Welch, F. H. Harlow, P. J. Shannon and B. T. Dally, "The MAC Method-A Computing Techniques for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid Flow Problem Involving Free Surfaces", Tech. Report LA-3425, Los Alamos Scientific Laboratory, 1965
3. A. A. Amsden and F. H. Harlow, "The SMAC Method, A Numerical Technique for Calculating Incompressible Flows", Tech. Report LA-4370, Los Alamos Scientific Laboratory, 1980
4. B. D. Nichols, C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss, "SOLA-VOF, A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries", Tech. Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, 1980
5. R. A. Stoehr, C. Wang, W. S. Hwang and P.

- Ingerslev, Modeling and Control of Casting and Welding Processes III, TMS(1986), p. 303~313
6. K. Anzai and T. Uchida, Modeling of Casting and Welding and Advanced Solidification Processes, V. M. Rappaz, M. R. Ozgu and K. W. Mahin(Eds.), TMS(1991), p. 741~748
  7. 최정길, 김성빈, 홍준표, "SMAC법을 이용한 2차원 탕류해석에 관한 연구", 한국주조공학회지, Vol. 12, No. 1, p. 40~50. 1992
  8. R. A. Stoehr and C. Wang, "Coupled Heat Transfer and Fluid Flow in the Filling of Castings", AFS Trans.(1988), p. 733~740
  9. M. Lipinski, W. Schaefer and S. Anderson, "Modeling of combined heat and fluid flow for determination of filling sequence for real complex shaped castings", Modeling of Casting and Welding and Advanced Solidification Processes, V. M. Rappaz, M. R. Ozgu and K. W. Mahin(Eds.), TMS(1991), p. 771~776