

주조공정의 수치해석을 위한 3차원 전산모델 개발에 관한 연구

목진호[†] · S. Patankar* · 이진호**
(2002년 4월 6일 접수, 2002년 8월 1일 심사완료)

A Study on the Development of a Three Dimensional Numerical Model for the Casting Processes

Jinho Mok, Suhas Patankar and Jinho Lee

Key Words: Three-Dimensional Effect(3차원적영향), Free Surface(자유표면), Phase Change(상변화), VOF, SIMPLER, Equivalent Specific Heat Method(등가비열법)

Abstract

A three dimensional numerical model was developed to analyze the mold filling and solidification processes straightforwardly in a casting processes. On the basis of the SIMPLER algorithm, the VOF method and the Equivalent Specific Heat method were adopted to deal with the free surface behavior and the latent heat evolution. The complete model has been validated using exact solutions and experimental results. The importance of three-dimensional effects has been highlighted by comparing the results from the three-dimensional analysis with those given by a two-dimensional analysis.

기호설명

c_p : 비열
 F : 체적률 (volume fraction of fluid)
 h_{eff} : 유효열전달계수
 k : 열전도도
 m, n : 전단, 수직 방향 단위벡터
 p : 압력
 q : 열플럭스
 S : 생성항
 t : 시간
 u, v, w : x, y, z 방향 속도
 u_i : 각방향 속도성분

x, y : 직교좌표계 방향성분
 x_i : 좌표계 방향
 ϕ : 종속변수
 μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 Γ : 확산계수
 ΔH : 잠열

하첨자

a : 주변
 $boundary$: 경계
 x, y, z : 직교좌표계 방향성분

1. 서론

주조기술은 금속제품뿐 아니라 유동성 및 응고 특성을 지니는 모든 재료를 이용한 제품생산에 적용가능하지만, 공정 중에 포함된 자유표면 및 응고계면의 형성은 최종제품에 많은 결함을 초래하게 된다. 또한 공정이 초고온에서 이루어지는 관제로 최종제품에서 나타나는 결함의 예측은 반

[†] 책임저자, 회원, Innovative Research Inc.
3025 Harbor Ln, Plymouth, MN55447
E-mail : mok@inres.com
TEL : 1-763-519-0105 FAX : 1-763-519-0238

* Innovative Research Inc.

** 회원, 연세대학교 기계공학부

복공정을 통한 시행착오법에 의하여 가능하였다. 최근 다양한 수치해석방법의 제시로 주조분야에도 시뮬레이션을 이용한 주조방안의 마련이 가능하게 되었으나, 자유표면 및 상변화현상의 존재는 해의 수렴성에 매우 불안한 요인으로 작용하기 때문에, 그 연구가 2차원해석 및 이상적인 모델을 이용한 국한적인 현상의 규명에 그치는 등 매우 제한적이었으며, 현재 현장에 적용되고 있는 상용코드는 대부분 수입에 의존하고 있다. 국내에서도 SOLA-VOF 및 SMAC 알고리즘⁽¹⁻⁴⁾을 이용한 유동해석프로그램의 개발에 박차를 가하고 있으나, 최근의 수치해석법으로 널리 이용되고 있는 SIMPLE 알고리즘에 기반을 둔 해석법은 연구사례가 매우 드물다.⁽⁵⁻⁸⁾ 본 연구에서는 SIMPLE 알고리즘을 기반으로 자유표면의 추적 및 상변화열전달을 해석할 수 있는 SIMPLER-VOF (with Phase Change)을 개발하여, 주조공정의 3차원 수치해석에 적용한 예를 실험결과와 비교하였다. 또한, 2차원 근사해석과의 비교를 통해 2차원 해석시 간과될 수 있는 3차원적 영향(three dimensional effect)에 대해서도 고찰하였다.

2. 해석 모델 및 기본방정식

본 수치해석에 이용된 모델의 형상 및 재질을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.⁽⁹⁾ 실험에서 수조(pouring basin)내의 용탕이 일정수위를 유지할 수 있도록 용탕이 공급되며 주입이 이루어진다. 용탕은 50℃ 과열된 상태로 공급되고, 냉각은 주형-주형-대기를 통하여 이루어진다. 수치해석시 주형은 100℃로 예열되었다고 가정하였으며 응고는 주형으로의 열전달 및 주형외벽을 통한 자연대류에 의하여 진행된다. 수치해석에는 엇갈린 격자를 적용하였으며 계산효율향상을 위하여 비균일 직교격자를 적용하였다. 격자수의 영향이 약 5% 이내에서 총 88616개의 격자를 사용하였으며, 유동장의 해석을 고려하여 격자의 크기 및 개수를 주물영역과 주형영역에 안배하여 배치하였다.

수치해석에 이용된 순수알루미늄 및 주형에 대한 물성치는 실험에서 권장하는 값을 적용하였으나,⁽⁹⁾ 응고해석에 필요한 정보가 충분히 주어지지 않은 관계로 예열온도 및 외부열전달계수 등은

Table 1 Material properties used in the present study

Material (Latent Heat : J/kg)	Conductivity (k:W/mK)	Specific Heat (c _p :J/kgK)	Density (ρ :kg/m ³)	Viscosity (μ :m ² /s)
Pure Aluminum (293820J/kg)	Liquid Phase	90.0	1080.0	0.092
	Solid Phase	210.0	1202.0	1E30
No Bake Sand	0.586	993.0	1520.0	1E30

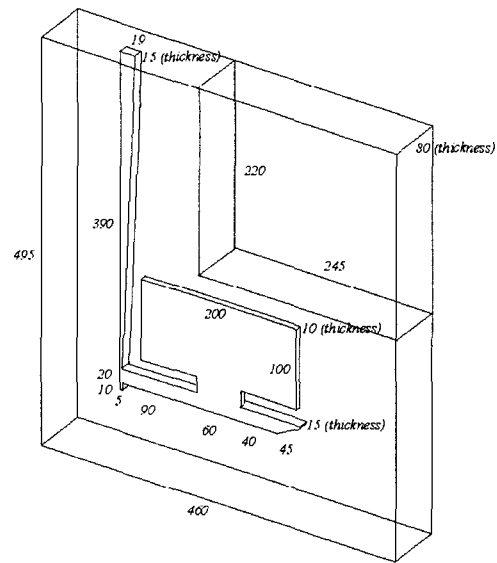


Fig. 1 Physical model used in the present study

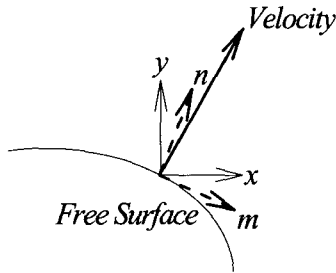
적절한 값으로서 앞서 기술한 바와 같이 가정하였다. 또한, 실험결과 최종응고에 소요되는 시간이 12초에서 63초까지 변화의 폭이 크기 때문에 실험에 의한 응고해석결과는 공통적인 현상인 최종응고위치의 결과만을 비교대상으로 삼았으며, 실험에 의한 최종응고위치는 사각주물의 중앙부 하단으로 나타났다.⁽⁹⁾

2.1 기본방정식 및 경계조건

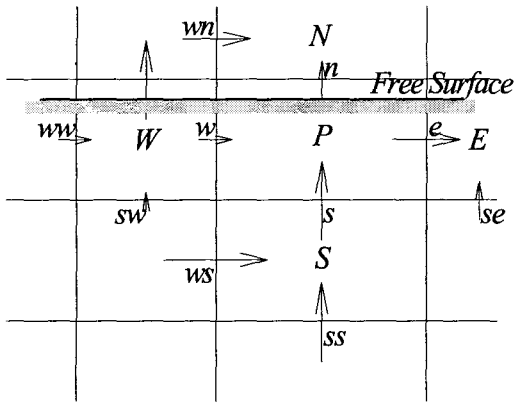
모든 전달현상과 관련된 미분방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 각각의 항은 왼쪽부터 차례로 비정상항, 대류항, 확산항, 그리고 생성항을 의미한다. 식 (1)은 Table 2의 정의에 의하여 운동량보존방정식, 에너지보존방정식 등을 나타낸다.⁽¹⁰⁾

Table 2 Definitions of Φ , Γ , and S in Eq. (1)

Variable Equation	Φ	Γ	S
Volume Fraction	F	0	0
Continuity	1	0	0
Moment (Velocity)	u	μ	$-\partial p / \partial x$
	v	μ	$-\partial p / \partial y + \rho \cdot g$
	w	μ	$-\partial p / \partial z$
Energy (Temperature)	T	k / c_p	$\rho / c_p (\partial \Delta H / \partial t)$



(a) Unit vectors on free surface



(b) Grid system with one example of free surface

Fig. 2 Unit vectors and control volume at free surface

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \cdot \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S \quad (1)$$

유동장의 해석에는 점착벽 경계조건 및 수직·전단응력조건을 적용하였으며,⁽¹¹⁾ 특히 자유표면에 적용되는 수직 및 전단응력조건은 수치해석의 정확성과 직접적으로 관계된다. 다음 식으로 표현되는 조건을 동시에 만족시킬 때 자유표면에서의 속도장이 수립되었다고 판단하였다.

수직응력조건

$$2\mu \left[n_x n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x n_y \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + n_y n_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] = p_a$$

$$2\mu \left[n_y n_y \frac{\partial v}{\partial y} + n_y n_z \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + n_z n_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = p_a \quad (2)$$

$$2\mu \left[n_z n_z \frac{\partial w}{\partial z} + n_z n_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + n_x n_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] = p_a$$

전단응력조건

$$\mu \left[2n_x m_x \frac{\partial u}{\partial x} + (n_x m_y + n_y m_x) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2n_y m_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] = 0$$

$$\mu \left[2n_y m_y \frac{\partial v}{\partial y} + (n_y m_z + n_z m_y) \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + 2n_z m_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\mu \left[2n_z m_z \frac{\partial w}{\partial z} + (n_z m_x + n_x m_z) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2n_x m_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] = 0$$

이때 n 과 m 은 자유표면에 대한 수직방향 및 전단방향 단위벡터성분을, 하첨자 x 와 y 는 좌표방향을 나타내며, Fig. 2(a)에 나타내었다.

한편, 열전달의 해석을 위해서 각각의 경계를 저항회로로 보고, 경계에서의 유효열전달계수를 구하였다.⁽¹²⁾

$$q_{boundary} = h_{eff}(T_2 - T_1) \quad (4)$$

이때, T_1 및 T_2 는 인접한 두 영역의 온도이며, h_{eff} 는 두 영역간의 유효열전달계수이다.

2.2 수치해석 방법

SIMPLE 알고리즘은 이미 설명이 필요 없을 정도로 널리 알려져 있으므로 문헌에 대한 언급으로 모든 설명을 대신하고,⁽¹⁰⁾ VOF법에 대한 개념

과 함께 SIMPLE 알고리즘과 VOF법의 조합, SIMPLE 알고리즘과 등가비열법의 조합에 대한 설명으로 넘어가고자 한다.

SIMPLE 알고리즘에서 사용하는 운동량방정식에 대한 이산화방정식과 VOF 법에 의한 이산화 방정식을 Fig. 2(b)에 나타난 제어체적을 예로 들어 각각 정리해보면

$$a_e u_e = \Sigma a_{nb} u_{nb} + (p_P - p_E)A + b \quad (5a)$$

$$F_P = F_P^{old} - \frac{\Delta t}{\Delta x_P} (u_e^{old} F_e^{old} - u_w^{old} F_w^{old}) - \frac{\Delta t}{\Delta y_P} (v_n^{old} F_n^{old} - v_s^{old} F_s^{old}) \quad (5b)$$

가 되며, A 는 압력구배가 작용하는 제어체적면의 면적을, b 는 압력구배항을 제외한 생성항을, 하첨자는 변수가 정의되는 제어체적에서의 위치를 나타내며, 하첨자 nb 는 엇갈린 격자에서의 인접 제어체적을 의미한다. 이전 시간단계에서의 속도 및 체적분율을 나타내는 $u_e^{old} \cdot F_e^{old}$ 등의 값은 Donor and Acceptor 방법⁽²⁾에 의하여 그 값이 결정된다. 즉, u_e^{old} 의 부호에 따라 유체를 주는가 혹은 받는가가 결정되면 Donor 혹은 Acceptor의 기능이 P, E cell에 부여되고, 두 cell 내를 차지하고 있는 유체의 체적분율에 의해서 경계 e 를 통해 Donor에서 Acceptor로 전달되는 체적분율의 양이 결정된다. 이 때 VOF법은 현시적인 방법에 의하여 계산이 진행되므로 $t + \Delta t$ 단계에서의 열, 운동해석에 앞서 식 (5a)에 의하여 구해진 t 단계에서의 속도분포를 식 (5b)에 적용하여 $t + \Delta t$ 단계에서의 자유표면의 위치가 결정되어야 한다. 따라서 시간증분은 현시적인 VOF법이 적용될 수 있는 범위 내에서 결정되었다.

한편, 응고발생 시 수반되는 잠열은 Table 1에 나타난 생성항으로서 처리되며⁽¹³⁾ 그 이산화식은

$$S = \frac{\rho}{c_p} \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = \frac{\rho}{c_p} \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

(단, $\Delta H = L \cdot f_s$, $f_s = \frac{T_{liq} - T}{T_{liq} - T_{sol}}$)

$$\Rightarrow \frac{\rho}{c_p} \frac{L}{\Delta t (T_{liq} - T_{sol})} (T_P^{old} - T_P) = S_C + S_P T_P$$

와 같이 선형화 시킬 수 있다. 이때, 온도변화가 액상선이나 고상선을 통과하며 진행되는 경우는 잠열의 발생구간에 대해서만 상기 계산이 포함되어야 하므로 T_P^{old} 나 T_P 를 T_{liq} 나 T_{sol} 등으로 대신하여야 한다. 액상선을 통과하며 응고하는 경우, $T = T_{liq} - \Delta T$, $T^{old} = T_{liq} + \Delta T$ 이므로 T^{old} 대신에 T_{liq} 를 식에 대입해 주어야 하며, 액상선을 통과하느냐 고상선을 통과하느냐, 혹은 응고과정이나 용융과정이나에 따라 대입하는 온도값이 달라진다. 이 과정은 고상물이나 액상물이 $0 \leq f \leq 1$ 을 만족하도록 하는 과정이다.

한편, 모든 계산이 3차원 임의의 형상에서 이루어지도록 하기 위하여 각각의 제어체적에 기능을 부여하여 유출경계영역, 빈영역, 자유표면영역, 완전유체영역, 주입구영역, 냉각수(혹은 대기)영역, 단열경계영역, 주형영역, 고상화영역, 대칭경계영역 등을 나타내도록 하였다.

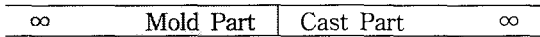
3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석모델의 검증

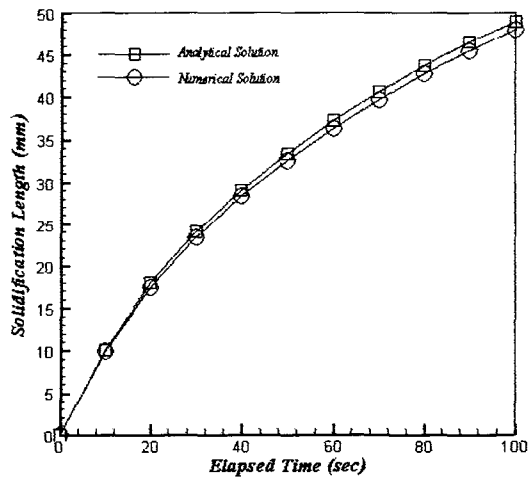
충진과정에 대한 검증은 X-ray 촬영을 이용한 실험결과⁽⁹⁾와의 비교와 함께 다음 절에 포함되었다. 본 논문에서 인용한 실험결과는 1995년 Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process VII에서 벤치마킹한 유명한 문제로서 총 9개팀이 참가하여 서로의 독자적인 수치해석결과들을 제시하였으며, 그 중 반복실험 결과사진⁽⁹⁾ 및 Ohnaka 등의 수치해석결과⁽¹³⁾를 비교대상으로 하였다. 상변화과정에 대한 실험결과와의 비교는 응고자체가 초고온에서 이루어져 직접 용탕의 응고과정을 가시적으로 관찰할 수 없기 때문에, 주형의 온도측정을 통한 간접비교가 가능하다. 벤치마킹에 이용된 모델은 문헌상 응고해석에 필요한 조건이 충분히 주어지지 않았고, 다른 실험결과를 통한 주형에서의 온도변화 곡선과 본 연구에 이용된 알고리즘에 의한 수치해석 결과와의 비교를 문헌⁽¹⁴⁾에서 자세히 언급하였기 때문에, 본 논문에서는 상변화면의 이동에 대한 엄밀해와의 비교⁽¹⁵⁾를 통해 상변화 열전달에 대한 본 수치해석모델의 타당성을 보였다.

Table 3 Property values used for verification

Property name	Mold Part	Cast Part
Conductivity (J/m s K)	large enough	41.9
Specific Heat (J/kg K)	-	627.9
Density (kg/m ³)	-	7000
Initial Temperature / Liquidus Temperature (K)	293 / -	1753 / 1753
Latent Heat (J/kg)	-	27209.3
Contact Heat Transfer Coefficient (J/m ² s K)	-	2093.0



(a) Model for verification



(b) Phase front tracking

Fig. 3 Phase front tracking in the semi-infinite mold

Fig. 3(a)는 상변화면 이동의 검증에 이용된 반무한대의 1차원 모델이며, 시간의 경과에 따른 응고계면의 위치를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 이때 주형측에 사용된 물성치들은 문헌상에서 계산의 편의상 적용된 값들이다.⁽¹⁵⁾ 응고계면의 이동이 초기에 빠르게 진행되다 점차 늦어지는 경향이 정확히 일치하며 시간대별 계면의 이동거리도 수치해석의 경우가 미세하게 짧게 나타날 뿐 잘

일치한다. 이 미세한 차이는 수치해석상에서 ∞ 길이를 나타내기 위해 충분히 긴 유한한 길이의 주물 혹은 주형 끝단을 단열로 처리한데서 기인한 것으로 ∞ 를 나타내는 유한한 길이를 크게 해줄수록 엄밀해에 더욱 근접한 결과를 보인다.

3.2 충전과정의 고찰

Fig. 4은 Fig. 1에 나타난 주형 내부로 순수 알루미늄이 충전해 가는 과정을 단계별로 보여주는 그림으로 3번의 반복실험,⁽⁹⁾ 당시 벤치마킹문제를 해석했던 Ohnaka 등의 수치해석,⁽¹³⁾ 2차원 수치해석, 본 조합알고리즘을 이용한 3차원 수치해석에 대한 결과를 각각 나타낸다. 먼저 약 0.75초 후의 충전상태를 보여주는 Fig. 4(a)를 보면 모두 세 번의 반복실험을 포함한 모든 결과가 정확히 일치하지는 않으나, 실험결과에서 보면 세 경우 모두 유로를 거쳐 사각주형 내로 들어가는 유동의 방향이 오른쪽으로 향하고 있음이 명확히 나타난다. Ohnaka 등의 결과는 명확히 유동이 오른쪽으로 향하지는 않고 대체로 유동이 바닥면과 수직하게 주형내로 들어가고 있다. 그러나, 2차원 수치해석 결과는 오히려 유동이 왼쪽으로 향하는 경향이 강하게 나타나고 있다. 3차원 수치해석결과는 자유표면에서의 유동현상 및 유동의 방향이 거의 실험결과와 일치하고 있다. 이는 두께방향(3차원 방향) 구속력이 배제되어 유동의 관성력이 커짐으로서 나타나는 결과로, 유로의 끝단을 돌아 나오는 유동의 영향이 실제보다 과장되었기 때문이다. 약 1.0초 후의 결과를 비교해 보면 (Fig. 4(b)), 주입이 이루어지는 입구 쪽(왼쪽)의 자유표면의 수위가 낮게 나타나고 상대적으로 오른쪽의 수위는 높게 나타난다. 다소의 차이는 보이나 이러한 경향은 실험결과 및 각 수치해석 수치해석결과에서 공통적으로 나타나고 있다. Ohnaka 등의 해석결과는 세 번째 반복실험결과와, 본 수치해석결과는 첫 번째 반복실험결과와 잘 일치하고 있으며, 2차원 수치해석의 경우는 큰 관성력으로 인하여 앞서 언급한 자유표면의 굴곡이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 약 1.50초 후의 결과인 Fig. 4(c)에서는 2차원 수치해석 결과와 3차원 수치해석 결과의 차이가 극명하게 나타난다. 우선 실험결과를 고찰해 보면 자유표면이 비교적 평활해진 상태로 충전이 진행되고 있음이 반복실험결과에서 공통적으로 나타

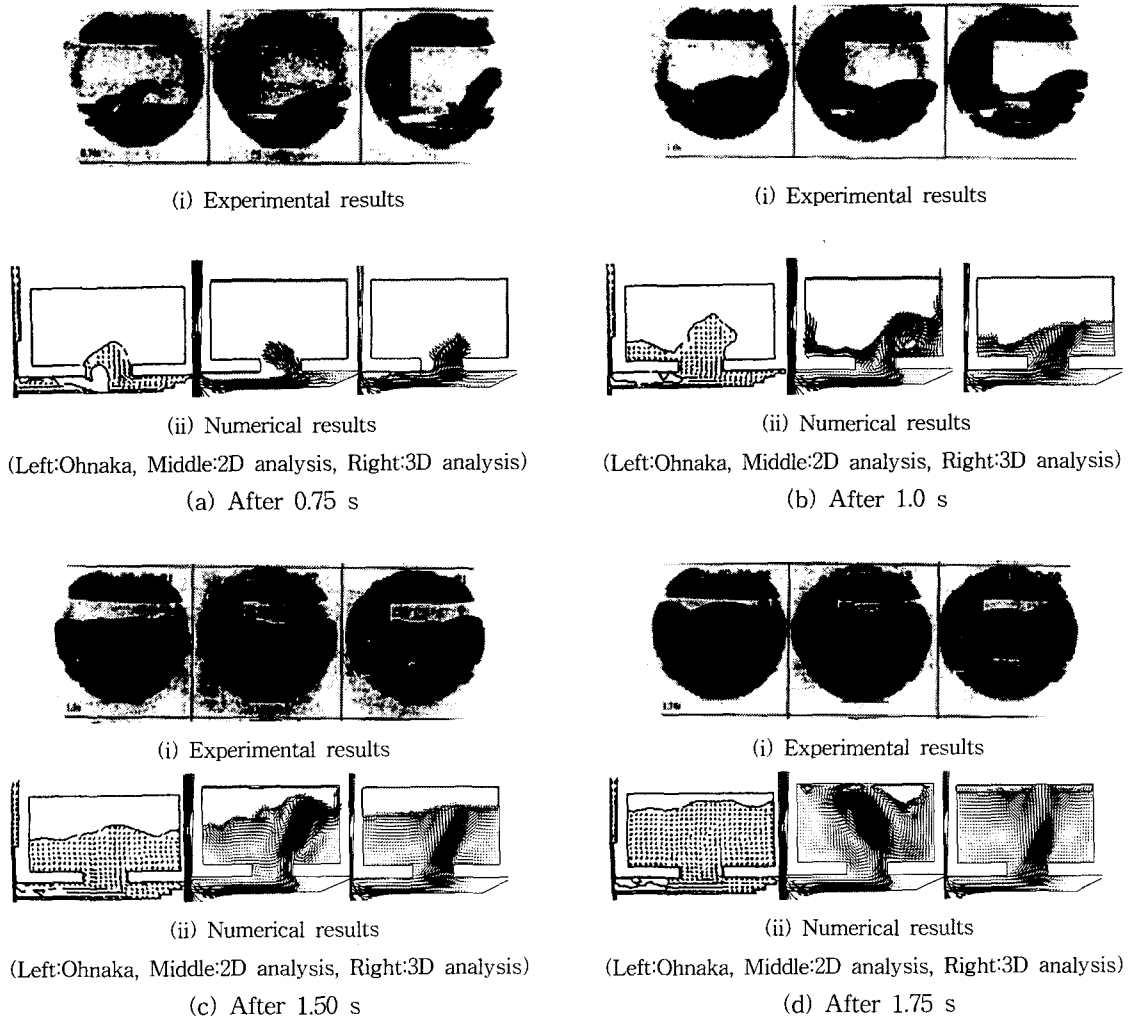
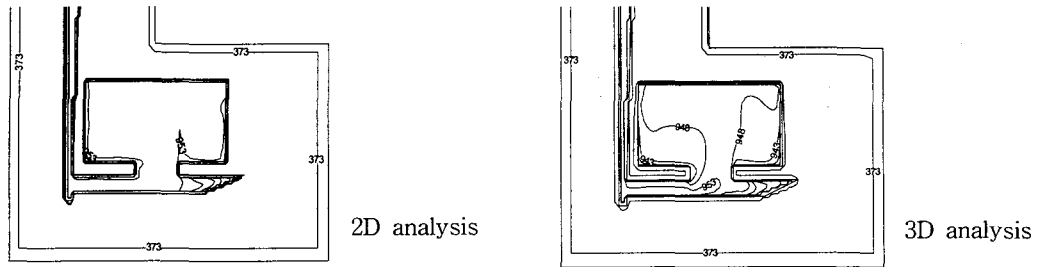


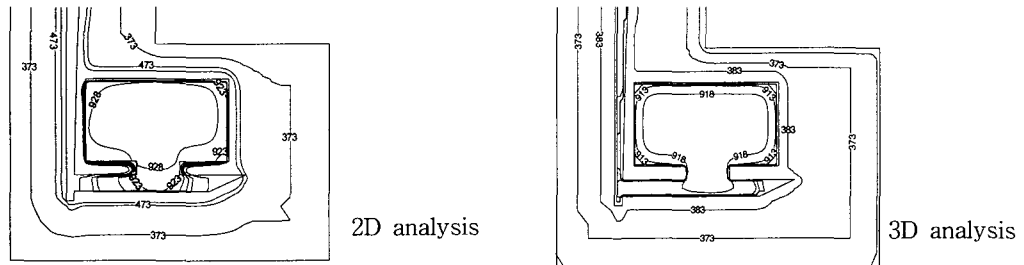
Fig. 4 Sequence of filling process

난다. Ohnaka의 해석결과 및 본 연구의 3차원 수치해석 결과 역시 이러한 경향을 잘 반영하고 있다. 그러나 2차원 수치해석 결과에서는 두께 방향의 구속력이 배제되었기 때문에 자유표면의 굴곡이 여전히 심하게 나타나고 있으며, 결국 최초로 나타난 물결현상이 큰 관성력으로 인하여 충전 후기까지 유지가 된다. 마지막으로 충전완료 직전의 결과를 보면 (Fig. 4(d)), X-ray 촬영 실험결과를 통해서 최종 충전 위치가 어디인지 정확히 판단하기 어려우나, 여전히 자유표면은 대체로 평활하게 유지되고 있으며, 주형의 상부에서 비교적 균일하게 최종 충전 위치가 나타날 것으로 예측할 수 있다. Ohnaka의 수치해석결과

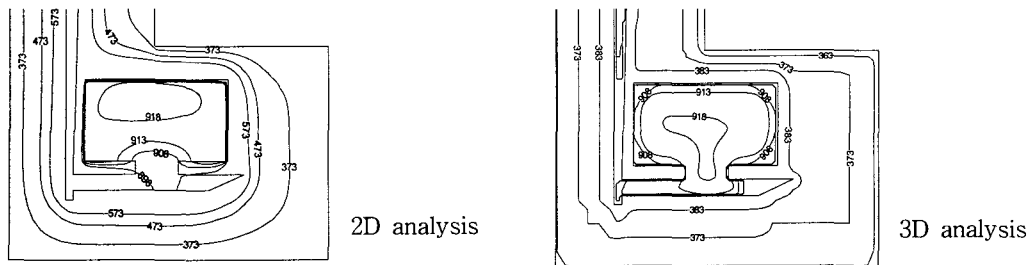
가 가장 잘 일치하며, 본 수치해석 결과는 역시 이러한 실험결과를 잘 반영하며 만족할 만한 결과를 보여주고 있다. 이러한 차이는 같은 시간대에서의 충전상태를 비교하기 때문에 나타나는 차이로서 충전에 소요된 시간이 각 해석마다 약간의 차이를 보인다. Ohnaka의 수치해석결과는 약 2.3초,⁽¹³⁾ 본 수치해석결과는 약 2.025초로 나타났으며, 반복실험결과는 1.83초에서 2.4초까지 나타났고 평균적으로 약 2.2초가 소요되었다.⁽⁹⁾ 2차원 수치해석 결과는 이전의 과정에서 관찰된 바와 마찬가지로 상당히 다른 결과를 보여준다. 우선 최종 충전 위치가 명확히 오른쪽에 치우쳐서 나타나며 이는 물결치는 현상이 유지되면서



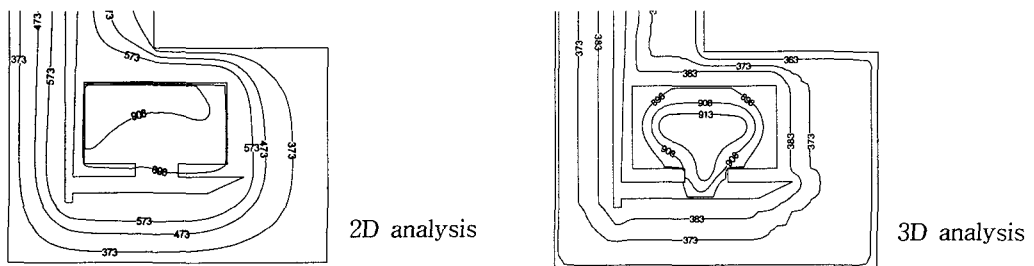
(a) Just after completion of filling



(b) At 5% solidification fraction



(c) At 20% solidification fraction



(d) At 70% solidification fraction

Fig. 5 Sequence of solidification process

자유표면의 이동이 이루어지기 때문이다. 앞서 설명한 모든 현상은 주형의 설계시 압탕 등의 위치가 고려되어야 하는 경우, 중요한 공정제어변수인 최종 충전위치를 정확히 예측하기에는 2차원 수치해석은 한계가 있음을 단적으로 보여주는 예이다. 많은 구조물의 형상이 2차원으로 묘사하기에 한계가 있는 경우가 빈번히 발생하며, 주물의 두께 역시 주형 내 유동현상과 밀접히 관계되므로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 구조방안의 마련시 보다 정확한 결과를 원할 경우 3차원 수치해석은 필수적인 수단이다.

3.3 응고과정의 고찰

3차원 응고해석의 결과 두께방향으로의 냉각효과로 인한 주물에서의 응고진행속도 및 주형자체의 온도변화뿐 아니라, 최종 응고위치에서도 2차원 응고해석결과와 차이를 보인다. Fig. 5(a)는 충전 완료 직후의 주물과 주형에서의 온도분포, Fig. 5(b) - (d)는 이후 주요 단계별 온도분포를 비교해서 보여주며(왼쪽 : 2차원 응고해석, 오른쪽 3차원 응고해석), 여기서 3차원 해석결과는 사각용기의 중앙단면에서의 온도분포를 나타내고 있다. 충전 완료 직후의 온도분포를 보여주는 Fig. 5(a)에서는 충전이 약 2초 직후에 완료되기 때문에 열전도율이 낮고 비열이 큰 주물사로 된 주형내 온도가 두 해석결과에서 모두 크게 변하지 않지만, 알루미늄 용탕의 냉각은 3차원 해석결과에서 더 많이 진행되었음을 쉽게 알 수 있다. 이는 두께방향으로의 열전달이 고려되었기 때문에 나타나는 당연한 결과이다. 5%, 20%씩 응고가 진행되었을 때 온도분포를 보여주는 Fig. 5(b), (c)를 통하여 응고의 진행정도뿐 아니라 온도분포 경향에서도 두 해석간에 차이가 나타남을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서는 주물과 주형에서 나타나는 절대온도의 차이는 있으나, 응고의 진행 경향은 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 그러나 주형의 체적이 주물의 응고에 직접적인 영향을 미치기 때문에 응고가 진행됨에 따라 그 경향에서도 차이가 커지기 시작하며, Fig. 5(c)에서 알 수 있듯이 응고가 주형-주물간 모든 경계에서 시작되어 점차 주물의 중심부로 응고계면이 이동하는 3차원 해석결과와는 달리, 2차원 응고해석에서는 응고가 주물의 하단부에서 먼저 시작되고 있다. Fig. 5(d)는 응고가 약 70% 가량 진행된

상태에서 주형과 주물에서의 온도분포를 보여주며, 3차원 응고해석의 경우는 최종응고가 주물의 중심부에서 나타날 것으로 예측할 수 있는 반면, 2차원 응고해석의 경우는 주물의 왼쪽 상단에서 최종응고가 나타날 것으로 예측된다. 즉, 실험에서 나타난 최종 응고위치(주물의 중앙부)⁽⁹⁾를 3차원 수치해석을 통하여 정확히 예측하였으나, 2차원 수치해석의 경우 다른 위치에서 최종응고가 발생하게 된다. 이러한 차이들의 근본적인 원인은 주형의 냉각능력에서 찾을 수 있다. 즉, 주형은 주물의 열에너지를 효과적으로 대거나 냉각수로 전달하는 것 외에, 주형의 비열이 크다면(특히 사형주조의 경우) 주형 자체로도 상당한 냉각효과를 야기시키며, 이 두가지 역할 모두 주형의 체적과 밀접한 관계가 있다. 결국, 구조방안의 마련시 또 하나의 중요한 설계변수인 최종응고위치의 정확한 예측은 3차원 응고해석을 통해 가능하다. 수치해석을 통한 구조공정 중에 발생할 수 있는 결함의 예측은 주형의 설계시 실험에 의한 시행착오에서 오는 시간적, 경제적 손실을 최소화할 수 있는 현장적용 가능한 수단으로서 의미가 있으므로 이러한 결과로부터 3차원 응고해석의 중요성이 부각될 수 밖에 없다.

4. 결 론

SIMPLER 알고리즘을 기반으로 자유표면 및 응고계면의 추적이 가능한 새로운 조합알고리즘(SIMPLER-VOF with Phase Change)을 개발하고 이를 사각용기내의 충전 및 응고과정에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용한 구조공정의 3차원 수치해석을 통하여 2차원 근사 수치해석시 나타날 수 있는 오류 및 간과되는 부분 등을 정확히 지적할 수 있었다.

(2) 본 알고리즘을 이용한 수치해석을 통하여 실험을 통해서 많은 제약이 따르는 자유표면 및 응고계면의 이동을 단계별로 정확히 관찰할 수 있으며, 주형의 설계 시 구조결함을 최소화할 수 있는 최종 충전위치 및 응고위치의 예측뿐 아니라 유용한 정량적인 데이터를 제공함으로써 실험을 통한 시행착오에서 오는 손실을 최소화할 수 있음을 보였다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc.연수 지원비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Amsden, A.A. and Harlow, F.H., 1970, "The SMAC Method : A Numerical Technique for Calculating Incompressible Flows," Los Alamos Scientific Laboratory, *Tech. Report LA-4370*.
- (2) Nichols, B.D., Hirt, C.W. and Hotchkiss, R. S., 1980, "SOLA-VOF : A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries," Los Alamos Scientific Laboratory, *Tech. Report LA-8355*.
- (3) Woo-Seung Kim, Yong Bok Kwon and Ik Tae Im, 1998, "Filling Analysis in the Casting Process Using an Implicit VOF Method," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1400~1409.
- (4) Ik-Tae Im and Woo-Seung Kim, 1999, "A Study of Simultaneous Filling and Solidification During Casting Process," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 23, No. 8, pp. 987~996.
- (5) Bennon, W.D. and Incropera, F.P., 1987, "A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change System - I. Model Formulation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 10, pp. 2161~2170.
- (6) Beckermann, C. and Viskanta, R., 1993, "Mathematical Modeling of Transport Phenomena during Alloy Solidification," *ASME Appl. Mech. Rev.*, Vol. 46, No.1, pp. 1~27.
- (7) Lee, J. H. and Hwang, K. Y., 1995, "Effects of Density Change and Cooling Rate on Heat Transfer and Thermal Stress During Vertical Solidification Process," *Transactions of the KSME*, Vol. 19, No. 4, pp. 1095~1101.
- (8) Lee, J., Mok, J. and Hong, C.P., 1999, "Straightforward Numerical Analysis of Casting Process in a Rectangular Mold : From Filling To Solidification," *ISIJ International*, Vol. 39, No. 12, pp. 1252~1261.
- (9) Sirrell, B., Holliday, M. and Campbell, J., 1995, "the Bench Mark Test 1995," *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes VII*, pp. 915~933.
- (10) Patankar, S., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington.
- (11) Nichols, B.D. and Hirt, C.W., 1971, "Improved Free Surface Boundary Conditions for Numerical Incompressible Flow Calculation," *Journal of Computational Physics*, Vol. 8, pp. 434~448.
- (12) Mills, A.F., 1992, *Heat Transfer*, IRWIN, Boston.
- (13) Ohnaka, I., Zhu, J., 1995, "Computer Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer of the Benchmark Test by DFDM/3DFLOW," *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes VII*, pp. 971~974.
- (14) Koo, E.M., Mok, J.H., Lee, J., Hong, C.P., Yoon, W.S., 2001, "Numerical Analysis of Fluid Flow of Molten Metal and Solidification Characteristics in the Casting Process under Centrifugal Force," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 39, No. 3, pp. 367~373.
- (15) Ohnaka, I., 1984, *Computer Aided Heat Transfer and Solidification (Application to Casting Process)*, WhanSun, Osaka.