

원통좌표를 이용한 주조공정의 수치해석모델 개발

목진호[†] · 박성준* · 이진호**

(2003년 10월 4일 접수, 2004년 2월 19일 심사완료)

Development of a New Simulation Method of Casting Process Based on a Cylindrical Coordinate System

Jinho Mok, Seong Joon Park and Jinho Lee

Key Words : Cylindrical Coordinates(원통좌표), SIMPLER, VOF, Equivalent Specific Heat method(등가비열법), Axi-Symmetry(축대칭), Free Surface(자유표면), Phase Change(상변화)

Abstract

Since the numerical analysis was adopted in the mold design, lots of computational methods have been proposed for the simulations of casting processes for the various shaped molds. Today, it is possible to simulate the filling and solidification processes of most casts using the VOF technique. Though the three-dimensional numerical model based on the Cartesian coordinate system can be applied to any shape of cast, it becomes very inefficient when the three-dimensional model is applied to the cast of axi-symmetrical shape since the control volume includes at least 1/4 of the physical model. In addition, the more meshes should be distributed along the circumferential boundaries of curved shape in the Cartesian coordinate system for the better results, while such curved circumferential boundary does not need to be considered in the two-dimensional cylindrical coordinate system. This motivates the present study i.e. developing a two-dimensional numerical model for the axi-symmetrically shaped casts. The SIMPLER algorithm, the VOF method, and the equivalent specific heat method have been adopted in the combined algorithm for the flow calculation, the free surface tracking, and the phase change heat transfer, respectively. The numerical model has been applied to the casting process of a pulley, and it was proven that the mesh and time effective calculation was accomplished comparing to the calculation using three-dimensional model.

기호설명

e : 단위벡터
 F, f : 체적분율
 h : 엔탈피
 L : 재료의 잠열
 R : 열저항
 T_m : 융점
 u : 속도

ρ : 밀도

하첨자

A, D, AD : Acceptor, Donor, Interface
 l, s : 액상, 고상
 P, E, W, N, S : 제어체적 중심성분
 p, e, w, n, s : 제어체적 엇갈린성분
 r, z : 원통좌표방향성분

[†] 책임저자, 회원, Nano Cast Korea
 E-mail: mok@camp.yonsei.ac.kr
 TEL:(02)-2123-4499, FAX:(02)-3127-2643

* 연세대학교 나노과학기술연구원

** 회원, 연세대학교 기계공학과

1. 서론

주조는 금속의 유동성과 응고성을 이용하기 때문에 어떠한 형상의 제품도 제작이 가능하다. 그러나 이 두 가지 요소를 잘 제어해주지 않으면 최

종제품에 치명적인 결함을 초래한다. 시행착오에 의존하던 주형제작과정에 컴퓨터시뮬레이션이 도입되며 생산성의 향상을 가져왔으며 이제 전산모사를 이용한 주형설계는 구조분야의 필수적인 분야로 자리를 잡았다. 그러나 공정중에 발생하는 자유표면 및 상변화면은 수치해의 불안정성을 가중시키며 수렴해를 얻기까지 많은 시간이 소요되기도 한다. 따라서 각 구조공정에 적합한 수치해석 모델의 개발을 통해 계산의 효율성을 높여야 함은 당연한 귀착이다. 현재 활발히 진행중인 구조공정의 수치해석에 관한 연구는 상용소프트웨어를 비롯하여 대부분 직교좌표계에 근간을 두고 있으며,⁽¹⁻³⁾ 박유주물을 위한 경계밀착좌표계의 도입을 시도하기도 하였다.⁽⁴⁾ 그러나 어느 해석방법도 축대칭형 주물의 수치해석에는 적합치 못하다. 직교좌표를 이용하는 경우 최소 1/4 대칭모델에 대한 3차원 해석으로 진행되어야 하며, 곡면의 경계처리를 위해 많은 격자가 집중적으로 배치되어야 한다. 경계밀착좌표계의 경우는 곡면의 형상을 그대로 모델링할 수 있으나 격자구성의 어려움 및 막대한 계산시간 등으로 인하여 그 적용범위는 매우 한정적이다.^(5,6) 구은모 등⁽⁷⁾은 원통좌표를 이용하여 정상상태에서 자유계면의 형상을 구하였으나 이 모델은 정상상태의 유동해석과 온도회복법에 의한 응고해석을 순차적으로 조합했기 때문에 충전 중에 발생하는 열전달해석에는 부적합하다. Tome 등⁽⁸⁾은 SMAC 알고리즘을 응용하여 2차원 축대칭모델을 이용한 전산모델을 개발하였으나 자유계면의 추적을 위하여 도입한 Marker And Cell 법으로 인하여 막대한 메모리를 필요로 하고 양적해법을 이용하기 때문에 응고해석을 고려할 경우 계산시간이 길어지는 단점이 있다. 본 연구에서는 축대칭형상의 주물의 구조공정의 수치해석을 위한 새로운 전산모델을 제시하여 환형주물의 구조공정 시뮬레이션에 적용한 후 직교좌표를 이용한 해석결과와 비교하였다. 유체유동은 SIMPLER 알고리즘에 의하여 해석하였으며, 자유계면 및 상변화 열전달의 해석을 위하여 VOF 법과 등가비열법(Equivalent Specific Heat method)을 축대칭좌표계의 성질에 맞도록 변환한 후 조합하였다. 자유계면의 거동의 계산시 양적해법이 계산시간이 적게 소요됨에도 불구하고 음적해법에 근거를 둔 SIMPLER 알고리즘을 양적해법인 SOLA 알고리즘대신 VOF 법과 조합한 것은 원심력, 자연대류, 반응용융탕 거동 등을 보다 안정적으로 고려할 수 있기 때문이다.

축대칭형 주물의 수치해석을 위하여 개발된 전산모델의 검증은 위하여 환형주물의 자유계면의 형상에 대한 실험(원심력 작용) 결과와 냉각곡선 취득실험(원통형 주형) 결과와의 비교를 통하여 해의 타당성을 보인다.

2. 기본방정식

원통좌표계의 각 성분은 다음과 같이 직교좌표계와 관련이 있다.⁽⁹⁾

$$x = r \cdot \cos\theta, y = r \cdot \sin\theta, z = z \quad (1)$$

이때 (x, y, z) 은 직교좌표계의 방향성분을 나타내며, (r, θ, z) 은 원통좌표계에서의 방향성분을 나타낸다. 따라서 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식은 축대칭의 경우 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial}{\partial z} u_z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + (V \cdot \nabla) u_r = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \nu \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + (V \cdot \nabla) u_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \nabla^2 u_z \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial h}{\partial t} + (V \cdot \nabla) h \right) = k \nabla^2 T \quad (5)$$

이때, $V \cdot \nabla = u_r \frac{\partial}{\partial r} + u_z \frac{\partial}{\partial z}$ 이다. 한편, 용탕의 충전 중에 발생하는 자유표면은 다음의 연속방정식과 유사한 형태의 유체체적분률전달방정식에 의하여 거동한다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r F) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z F) = 0 \quad (6)$$

이때 F 는 유체의 체적분율을 나타낸다. 한편, 상변화과정 중에 수반되는 잠열의 발생은 에너지방정식상의 생성항으로 처리되며 식 (5)의 에너지방정식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\rho \left(\frac{\partial h}{\partial t} + (V \cdot \nabla) h \right) = k \nabla^2 T - \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} - \rho (V \cdot \nabla) \Delta H \quad (7)$$

이때 ΔH 는 해당 온도에서 발생하는 잠열의 방출 혹은 흡수를 나타낸다.

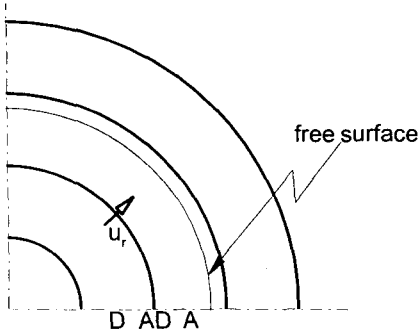


Fig. 1 Free surface movement in radial direction

3. 수치해석방법

용탕의 유동현상을 해석하기 위하여 SIMPLER 알고리즘을 적용하며, SIMPLER 알고리즘은 이미 널리 알려진 수치해석방법이므로 참고문헌의 소개로 모든 설명을 대신한다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 원통좌표계에서의 자유표면의 처리를 위한 유체체적분류이송방정식의 처리와 잠열 방출의 처리에 대해 설명한다. 유체체적분류의 이동을 나타내는 식 (6)을 명시적(explicit)인 방법을 통해 이산화하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{i,j} = F_{i,j}^0 + \frac{\Delta t}{r\Delta r} \left((ru_r F)_{i-1/2,j} - (ru_r F)_{i+1/2,j} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta z} \left((u_z F)_{i,j-1/2} - (u_z F)_{i,j+1/2} \right) \quad (8)$$

여기서 i, j 는 각각 반지름, 축방향 인덱스를 나타내며, $\pm 1/2$ 는 경계면을 의미한다. 따라서 식 (8)의 우변의 제 2~3 항은 제어체적의 각각의 경계면을 통해 전달되는 유체체적을 의미한다. 축방향 이송량은 일반적인 DAFA(Donor and Acceptor Flux Approximation)법을 따르지만,⁽¹¹⁾ 반지름 방향 이송량은 제어체적의 단면적이 반지름방향으로 변하므로 주의하여야 한다. Fig. 1 과 같은 경우 경계면 AD 를 통하여 이송되는 유체체적은 다음 식에 의하여 결정된다.

$$F_{AD} \cdot \Delta t \cdot u_{r,AD} \cdot r_{AD} = \text{sign}(u_{r,AD}) \cdot \min [F_{AD} \cdot \text{abs}(u_{r,AD} \cdot \Delta t) \cdot r_{AD} + CF, F_D \cdot \Delta r_D \cdot r_D] \quad (9)$$

$$CF = \max [(1 - F_{AD}) \cdot \text{abs}(u_r \cdot \Delta t) \cdot r_{AD} - (1 - F_D) \cdot \Delta r_D \cdot r_D, 0] \quad (10)$$

이때 sign 은 괄호 안의 변수의 부호를 나타내며, 우변의 F_{AD} 의 값은 다음의 판별식에 의하여 결정된다.

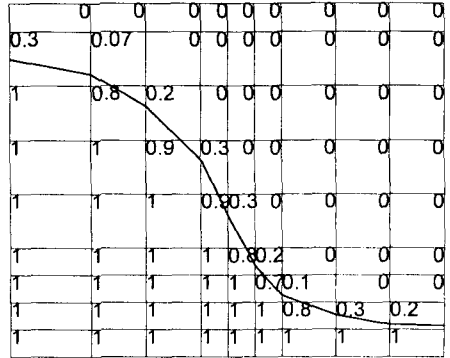


Fig. 2 Free surface tracking by VOF method (Numbers represent Volume fraction of Fluid)

$$F_{AD} = F_A \quad \text{if } (F_A \cdot \text{abs}(u_r \cdot \Delta t) \cdot r_{AD} < F_D \cdot \Delta r_D \cdot r_D) \quad (11)$$

$$F_{AD} = F_D \quad \text{if } (F_A \cdot \text{abs}(u_r \cdot \Delta t) \cdot r_{AD} \geq F_D \cdot \Delta r_D \cdot r_D) \quad (12)$$

각 경계면에서 계산된 유체체적의 값을 식 (8)에 대입하여 각 제어체적에서의 체적분율을 구하게 된다. 계산된 체적분율에 의하여 자유계면을 판별한 예를 Fig. 2에 나타내었다. F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖게 되며, 각 제어체적은 F 가 0인 경우 빈영역을, F 가 1인 경우 완전유체영역을, F 가 $0 < F < 1$ 인 경우 자유표면영역을 나타낸다.

잠열의 발생에 관한 생성항은 해의 안정성을 고려한 선형화 과정을 거쳐 이산화된다. 응고과정의 경우 $\Delta H = L \cdot (1 - f_s)$ 이므로 다음과 같은 이산화식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta H) = \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial}{\partial T} (\rho \Delta H) = \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial}{\partial T} [\rho L (1 - f_s)] \Rightarrow \frac{T - T^0}{\Delta t} \rho \frac{L}{T_1 - T_s} \quad (13)$$

여기서 기호 \Rightarrow 는 이산화를 나타낸다. 용해의 경우 $\Delta H = L \cdot (f_r - 1)$ 이 되지만, 결국 같은 이산화식으로 귀착된다. 단, 온도가 액상선이나 고상선을 통과하며 변할 경우 이산화식의 T 및 T_0 의 값이 변해야 한다. 즉, 응고과정에서 온도가 액상선을 거치며 떨어지는 경우 T_0 대신 T_{liq} 를, 고상선을 거치며 떨어지는 경우 T 대신 T_{sol} 을 대입해 주어야 한다. 용융과정에서는 용탕의 온도가 고상선을 통과하며 변하는 경우 T_0 대신 T_{sol} 을, 액상선을 통과하며 변하는 경우 T 대신 T_{liq} 를 대입해 주어야 한다. 이는 잠열은 전구간에서 발생하는 것이 아니고 머쉬영역(mushy zone)에서만 발생하기 때문이

며, 고상율 혹은 액상율의 값을 $0 \leq f \leq 1$ 로 제한시키기 위한 조치이다. 식 (7)의 우변의 제 3 항은 상류도식(Upwind scheme)에 의하여 이산화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho(V \cdot \nabla) \Delta H) \\ & \Rightarrow L \cdot a_E (f_E - f_P) + L \cdot a_W (f_P - f_W) \\ & \quad + L \cdot a_N (f_N - f_P) + L \cdot a_S (f_P - f_S) \\ & = L (\sum a_{NB} \cdot f_{NB} - \sum a_{NB} \cdot f_P) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum a_{NB} &= a_E + a_W + a_N + a_S \\ a_E &= \max[-\rho_e u_e \Delta A_e, 0] \\ a_W &= \max[\rho_w u_w \Delta A_w, 0] \\ a_N &= \max[-\rho_n u_n \Delta A_n, 0] \\ a_S &= \max[\rho_s u_s \Delta A_s, 0] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 L 은 잠열, f 는 액상율을 나타낸다. 응고 과정의 경우 $f=f_i$ 을, 용융과정의 경우 $f=f_s$ 를 적용하는데, $\frac{\partial}{\partial x} f_i = \frac{\partial}{\partial x} (f_i - 1) = \frac{\partial}{\partial x} (-f_s)$ 이므로 어느 경우에도 $f=f_i$ 을 사용하여도 무관하다. 순금속의 경우는 머쉬영역이 존재하지 않으므로 에너지방정식에서 식 (14)가 나타나지 않는다. 또한, $T_r=T_s=T_m$ 이 되므로 식 (13)에서 T_r-T_s 를 아주 작은 값으로 두고 계산할 수 있다.

4. 경계조건

주조공정에서의 경계조건은 일반적인 경계조건보다 다소 복잡하다. 속도장에서 사용되는 경계조건을 먼저 살펴보기로 한다. 용탕과 주형의 경계에는 점착벽 조건을 적용하며, 자유표면에서는 응력의 평형을 이용하여 경계조건을 구할 수 있다. 원통좌표에서 응력tensor의 각 성분은 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\frac{\tau}{\mu} = e_r e_r (\partial_r u_r + \partial_z u_z) + e_\theta e_\theta \frac{2u_r}{r} - e_r e_\theta \frac{u_\theta}{r} - e_\theta e_r \frac{u_\theta}{r} \quad (16)$$

이를 각 방향성분별로 정리하면 축대칭형상에 대한 다음의 자유표면 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (17)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (18)$$

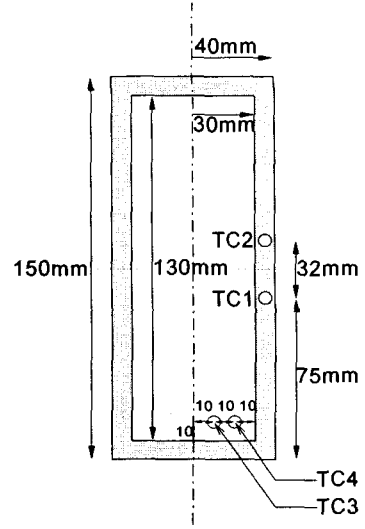


Fig. 3 Experimental model for validation

$$\tau_{rz} = \tau_{zr} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (19)$$

한편 주물의 냉각시 고려해야 할 경계는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 즉, 주형벽과 냉각수 (혹은 대기), 용탕과 주형, 자유표면으로 나누어지며, 주형의벽과 냉각수 및 자유표면에서는 대류열전달조건을 적용한다.⁽¹²⁾

$$q_{surface} = h_\infty (T_\infty - T_{surface}) \quad (20)$$

주형과 용탕사이에는 응고가 진행됨에 따라 미세한 틈새가 생길 수 있으며 주물의 분리를 위하여 이형제를 도포하기도 한다. 특히 미세한 틈새는 응고가 진행함에 따라 수축량이 증가하므로 틈새가 변하며, 열전달을 방해하는 요인이 된다. 편의상 주형과 주물간 간격 δ_{gap} 이 항상 열전도율 k_{gap} 의 이형제(release agents)로 채워져 있다고 한다면, 주형과 용탕간의 유효열전달계수 및 열전달량은 다음의 식을 따른다.

$$h_{eff} = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{\frac{\delta_{cast}}{k_{cast}} + \frac{\delta_{gap}}{k_{gap}} + \frac{\delta_{mold}}{k_{mold}}} \quad (21)$$

$$q_{cast-mold} = h_{eff} (T_{cast} - T_{mold}) \quad (22)$$

5. 결과 및 고찰

해석에 사용된 각 조건 및 물성치는 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 Properties and casting conditions

Al-2%Cu (Cast)	Liquidus Temperature	928K
	Solidus Temperature	821K
	Thermal Conductivity	192.5 W/mK(solid)
		103.2 W/mK(liquid)
	Density	2091 kg/m ³
	Specific Heat	903 J/kg K
Latent Heat	3.82E5 J/kg	
AISI 1010 (Mold)	Thermal Conductivity	64 W/mK
	Density	7830 kg/m ³
	Specific Heat	434 J/kgK
h _∞ (AISI1010 - Air)		2 W/m ² K
h _{eff} (Al-2%Cu - AISI1010)		1600 W/m ² K
Initial Mold Temperature		353 K
Initial cast Temperature		973 K
Air Temperature		303 K
Al (Cast)	Liquidus Temperature	933 K
	Thermal Conductivity	227.3 W/mK(solid)
		103.2 W/mK(liquid)
	Density	2058 kg/m ³
		2380 kg/m ³
	Specific Heat	1063.8 J/kg K
		1082.6 J/kg K
Latent Heat	3.91E5 J/kgK	
Dynamic Viscosity	0.055 kg/ms	
Cu (Mold)	Thermal Conductivity	339 W/mK
	Density	8920 kg/m ³
	Specific Heat	385.7 J/kg K
h _∞ (Cu - Water)		2000 W/m ² K
h _{eff} (Al - Cu)		1000 W/m ² K
Initial Mold Temperature		373 K
Initial cast Temperature		943 K
Air Temperature		298 K

5.1 전산모델의 검증

5.1.1 유동해석

Fig. 3 은 개발된 2차원 축대칭 전산모델의 유동해석의 타당성을 보이기 위해 실험실 규모로 제작한 원심주조 장치이다. 약 200cm³ 의 Al-2wt% Cu 를 주입한 후, 1500rpm 으로 회전시키며 응고시켰다. 응고완료 후 축방향으로 절단함으로써 자유계면의 형상을 실험적으로 구하였다. Fig. 4는 실험으로부터 구해진 용탕의 두께와 수치해석으로부터 구해진 자유계면의 위치를 비교하여 보여준다. 주물이 1500rpm 의 고속으로 회전하고 있지만, 회전력에 의한 원심력 외에도 중력도 작용하므로 주물의 두께가 일정하지 않고 주물의 아랫부분이 윗부분에 비해 두껍게 나타나는 것은 실험과 수치해석 모두에서 공통된 현상이다. 한편, 강제회전의 가정하에서 구한 엄밀해의 결과는 수치해석결과와

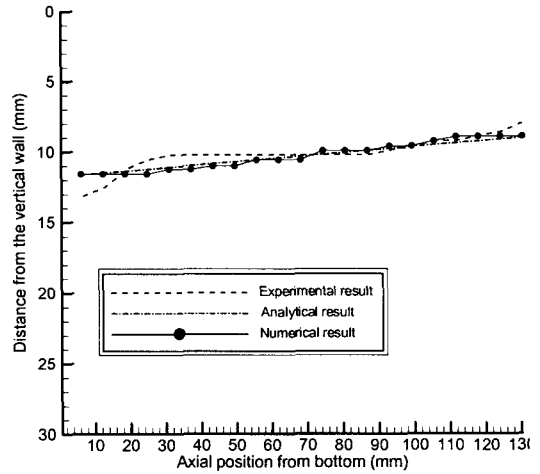


Fig. 4 Comparison of free surface calculations

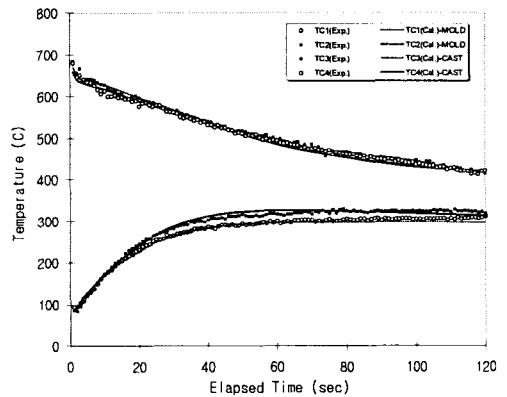


Fig. 5 Temperature variations in cast and mold

잘 일치하는 반면 실험결과는 수치해석결과와 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 수치해석 및 엄밀해에서 응고과정에 대한 고려를 제외한 사실에 기인한다.

강제회전가정에 의한 엄밀해는 아래와 같다.

$$z = \frac{w^2}{2g} r^2 + \frac{w^2}{2g} (R-t)^2 + \frac{h}{2} \tag{23}$$

(w: 각속도, R: 반지름, h: 높이, t: 평균두께)

5.1.2 응고해석

Fig. 3 과 같은 모델을 이용하여 주형내를 용탕으로 채운 후, 주형의 회전없이 응고시키며 주형 및 주물에서의 온도변화곡선을 열전대를 통해 취득하였다. 그 결과를 수치해석을 통해 구한 온도변화곡선과 비교하였다.(Fig. 5) 주물측 온도변화를 보면 바닥면과 측면의 냉각벽면의 영향을 받는 4 번 열전대에서의 온도가 다소 빠르게 떨어지고,

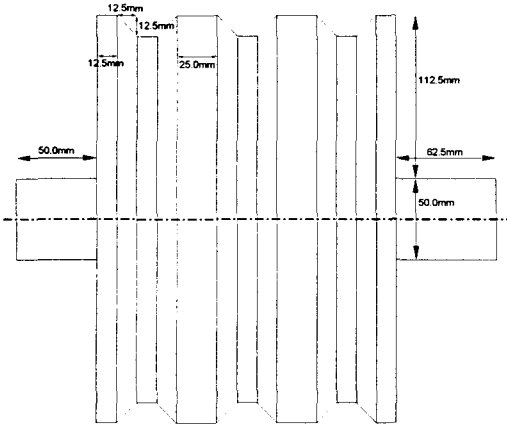


Fig. 6 Dimensions of belt pulley

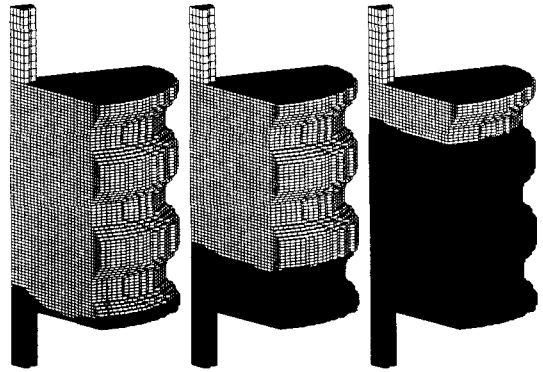
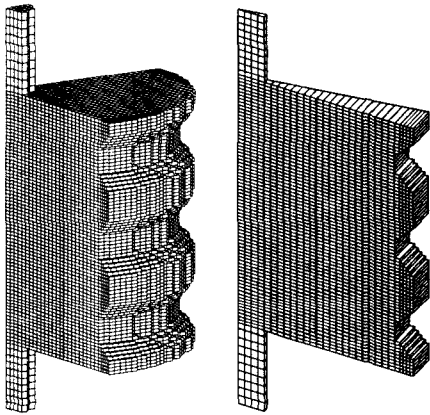


Fig. 8 Filling sequences calculated from 3-D model (18.4 s until final filling)



(a) Cartesian Coordinate (b) Cylindrical Coordinate
Fig. 7 Comparison of grid generations

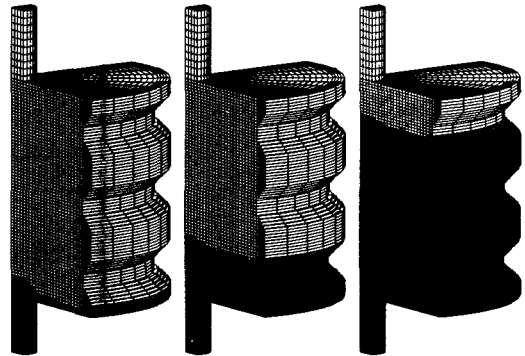


Fig. 9 Filling sequences calculated from a new model (18.0 s until final filling)

두 지점 모두 응고초기에 이미 응고가 완료되어 이후 거의 같은 비율로 냉각이 이루어진다. 주형 측 온도변화를 보면 상하대칭인 위치에 열전대가 설치되어 있으나 자연대류의 영향으로 1 번 열전대에서 온도가 낮게 나타난다. 응고초기에 온도가 급하게 상승하다 점차 정상상태의 열전달에 접근하며 온도변화곡선의 기울기가 완만해짐을 알 수 있다.

5.2 벨트풀리의 주조공정에 적용

Fig. 6 은 축대칭 형상을 갖는 대표적인 주물인 벨트풀리이다. 풀리의 지지대중 짧은 쪽 지지대가 아래를 향하는 형상의 주형을 제작하여 중력의 역방향으로 0.3m/s 의 유속으로 알루미늄 용탕을 주입하는 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 7 은 3차원 모델을 이용하여 격자생성을 한 결과(a)와 2차원 축대칭 모델을 이용하여 격자생성을 한 결과(b)를 비교하여 보여주고 있다. 3 차원 수

치해석에 이용된 총 격자수는 103455 개이고, 2 차원 수치해석에 이용된 총 격자수는 3135 개였다. 3차원 모델의 경우 유한체적성분이 사면체인 반면, 2차원 축대칭모델의 경우 유한체적성분이 사각단면의 고리모양이고 Fig. 7(b)는 그 일부를 파이모양으로 잘라내어 나타낸 것이다. Fig. 8, 9 은 각각의 경우에 대한 연속적인 충전과정을 보여준다. 두 가지 해석 모두 유사한 충전경향을 보이며 충전완료시간이 각각 18.4sec (3차원해석)과 18.0sec (2차원해석)인 등 만족할 만한 해석결과를 보였으나, 계산에 소요된 시간은 3차원의 경우 약 69 시간 (충전해석만), 2차원해석의 경우 약 11 시간 (충전해석+응고해석)이었으며 사용된 컴퓨터는 PIII 866MHz 였다.

일반 주조품의 하나인 벨트풀리 이외에도 원심주조, 연속주조 등에서 축대칭형상의 주조품은 쉽게 찾아볼 수 있다. 이 경우 3차원 전산모델을 이용하여 자유계면을 추적하고 응고해석을 수행하는 것보다 2차원 축대칭전산모델을 도입함으로써 계산에 소요되는 시간과 비용을 획기적으로 절감

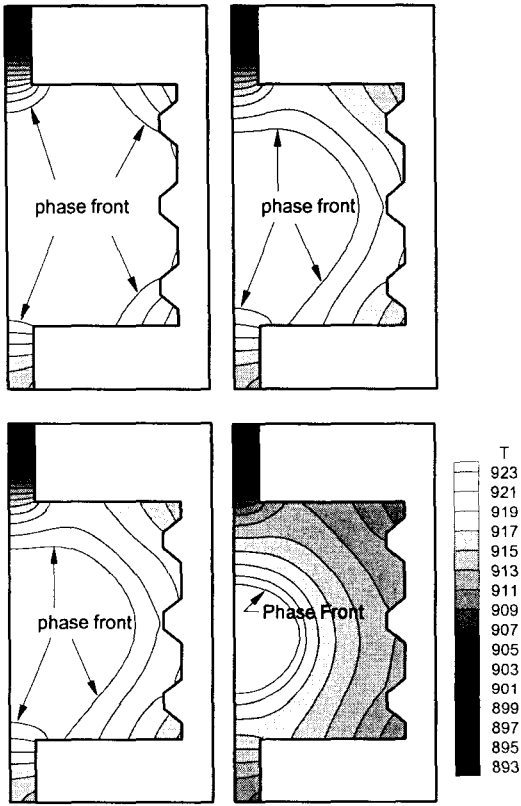


Fig. 10 Solidification sequences

할 수 있음을 간단한 해석 예를 통해 보일 수 있었다.

Fig. 10 은 2차원 축대칭 모델을 이용하여 해석한 응고과정을 단계별로 보여준다. 벨트폴리와 같은 길이의 반지름 162.5mm 의 구리주형을 이용해 응고시키는 경우에 대한 수치해석 결과이다. 지지대와 폴리의 원주방향 끝단에서 점차 응고계면이 폴리의 중앙으로 이동하며 최종응고는 중앙보다 다소 아래쪽에서 나타난다. 이는 충전이 시작되면서 이미 금형과 용탕간에 열전달이 시작된다는 사실에 기인하며, 충전과정 중의 열전달이 고려되지 않는다면 최종응고 위치는 비교적 정중앙에서 나타날 것이다. 3차원 응고해석은 생략하였으나, 유동해석의 경우처럼 두 가지의 해석이 같은 결과를 보여주더라도 상변화 열전달 과정에서의 잠열 처리로 인한 계산 상의 비효손실이 3차원 해석의 경우 2차원 해석에 비해 매우 크다.

6. 결론

축대칭 형상의 주물의 주조공정 해석에 적용하

기 위하여 SIMPLER 알고리즘과 VOF 법, 등가비열법을 조합한 2차원 축대칭전산모델을 개발하였다.

원심주조실험과 냉각곡선취득실험을 통해 개발된 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 벨트폴리의 주조과정에 적용시키고 3차원 모델을 이용한 해석결과와 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 원심력하에서 용탕의 자유계면의 형상을 수치해석을 통해 구하고 실험결과 및 엄밀해와 비교한 결과 실험결과와 매우 근접하고 엄밀해와 거의 일치하였다.

(2) 정지된 원통형 주형내 용탕의 응고과정 중 나타나는 주형 및 주물에서의 온도변화를 수치해석을 통해 구하고 실험결과와 비교하였으며, 두 해석결과가 잘 일치하였다.

(3) 벨트폴리의 주조공정 중 충전과정을 개발된 2차원전산모델과 기존의 3차원 전산모델을 이용하여 각각 해석한 결과, 두 결과가 잘 일치하였다. 그러나 2차원으로 해석하는 경우 격자수는 3차원 해석의 약 1/33, 해석시간은 3차원해석의 약 1/6 가 소요되어 개발된 2차원 전산모델이 축대칭모델에 적용할 수 있는 효율적인 전산모델임을 보였다. 또한 2차원 전산모델을 이용하여 응고과정을 해석함으로써 주조공정의 전 과정에 대하여 적용할 수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) Kim, W. S., Kwon, Y. B. and Im, I. T., 1998, "Filling Analysis in the Casting Process Using an Implicit VOF Method," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1400~1409.
- (2) Im, I. T. and Kim, W. S., 1999, "A Study of Simultaneous Filling and Solidification during Casting Process," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 23, No. 8, pp. 987~996.
- (3) Mok, J., Patankar, S. and Lee, J., 2002, "A Study on the Development of a Three Dimensional Numerical Model for the Casting Processes," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1436~1444.
- (4) Hong, C. P., Lee, S. Y. and Song, K., 2001, "Development of a New Simulation Method of Mold Filling Based on a Body Fitted Coordinate System," *ISIJ International*, Vol. 41, No. 9, pp. 999~1005.
- (5) Lee, J. 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(B)*, Vol. 19, No. 4, pp. 1095~1101.
- (6) Lee, K. H., Mok, J. and Lee, J., 2001, "The Effect of Thermosolutal Convection on Macrosegregation During Alloy Solidification," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1337~1345.
- (7) Koo, E. M., Mok, J. H., Lee, J., Hong, C. P. and Yoon, W. S., 2001, "Numerical Analysis of Fluid Flow

- of Molten Metal and Solidification Characteristics in the Casting Process Under Centrifugal Force," *Journal of Korea Institute of Metal and Materials*, Vol. 39, No. 3, pp. 367~373.
- (8) Tome, M. f., Castelo, A., Murakami, J., Cuminato, J. A., Minghim, R., Oliveria, M. C. F., Mangiavacchi, N. and Mckee, S., 2000, "Numerical Simulation of Axisymmetric Free Surface Flow," *Journal of Computational Physics*, Vol. 157, pp. 441~472.
- (9) White, F. M., 1991, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, Singapore.
- (10) Patnakar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington
- (11) Nichols, B. D., Hirt, C. W. and Hotchkiss, R. S., (10) 1980, "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries," *Los Alamos Scientific Laboratory*, Tech. Report LA-8355.
- (12) Mok, J., Hong, C. P. and Lee, J., 2003, "Development of a New Simulation Method of Mold Filling and Solidification Based on the SIMPLER Algorithm," *ISIJ International*, Vol. 43, No. 8, pp. 1212~1218.
- (13) Mills, A. F., 1992, *Heat Transfer*, IRWIN, Massachusetts.