

진동을 부가한 저압의 석고주조 공정 해석

김기돈*, 정준호**, 양동열*

Numerical Simulation of Plaster Casting with Pressurized Vibration

Ki-Don Kim*, Jun-Ho Jeong** and Dong-Yol Yang*

ABSTRACT

The simulated die casting process in which the traditional plaster casting process is combined with rapid prototyping technology is being used to produce Al, Mg and Zn die casting prototypes. Because of lower mechanical properties induced by the large grain structure and incomplete filling, conventional plaster casting is not suitable for the simulated die casting process. A plaster casting process with pressurized vibration was developed for the simulated die casting process[5]. In this paper, numerical simulation for the filling stage of the process has been performed to show the effect of the pressurized vibration for complete filling. Treatment of boundary condition based on the finite element method has been proposed for imparted pressurized vibration in the plaster casting process.

Key Words : Rapid Prototyping (캐속조형공정), Simulated Die-Casting Process (다이캐스팅 시작 공정), Pressurized Vibration Casting(진동·가압 주조) Finite Element Method (유한요소법),

1. 서론

캐속조형법은 금형 없이 CAD DATA로부터 2 차원 평면의 적층으로 3 차원의 형상을 만드는 공정으로 기존의 방법에 비해 빠르게 정확한 치수를 갖는 시작품을 제작할 수 있다.

제품개발 초기의 디자인 검증이나 조립성 평가 등에 국한되었던 캐속조형법의 용도가 점차 확대되어서 주조, 사출, 고속 가공 등의 기술과 결합되어 캐속 툴링(Rapid Tooling)으로 발전하였다. 이 중에서도 주조 공정에서 필요로 하는 마스터 패턴(master pattern)의 제작에 캐속조형기술이 사용되어 제품의 양산 단계 이전에 보다 정밀하고 기능성을 지닌 금속의 시작품을 생산하게 되었다.

최근에는 다이 캐스팅 공정의 시작품 개발에 캐속조형법과 일반적인 주조 기술이 결합되어 제품 양산 이전에 시작품을 평가하여 많은 비용과 시간이 소요되는 금형 설계의 수정 등을 미연에 방지하는 효과를 거두고 있다^[1-3]. 이와 같은 캐속 툴링에 사용되는 중력주조로는 좋은 표면과 정확한 치수 정밀도가 유지되는 석고 주조 공정이 많이 사용된다. 그러나 다이캐스팅 공정과 일반 중력주조 공정의 많은 차이점들 중 특히 금속의 몰드(mould)가 50~80 W/mK 의 열전도를 갖는 반면 세라믹 계열의 석고 몰드는 0.25-0.72 W/mK 정도의 열전도를 갖는 차이는 생산되는 제품의 기계적 성질을 다르게 하여 캐속 툴링으로 제작된 시작품의 품질을 저하시키며 용융금속을 몰드 내부

* 2001년 3월 6일 접수
** 한국과학기술원 기계공학과
*** Dept. of Mech. Eng., UIUC

의 캐비티(cavity)로 주입시 두 공정의 압력차에 의해서 제품의 불완전 충전의 문제가 발생한다^[4]. 이와 같은 문제점의 해결을 위하여 진동을 부가한 석고 주조 공정이 개발되었으며 주조 공정 중에 용탕에 부가된 진동은 응고시 필요한 핵생성을 촉진시켜서 내부 조직을 세밀하게 한다^[5].

Fig. 1 에서와 같이 진동이 부가된 석고 주조 공정은 용융 금속에 직접적으로 진동 에너지를 전달하게 된다.

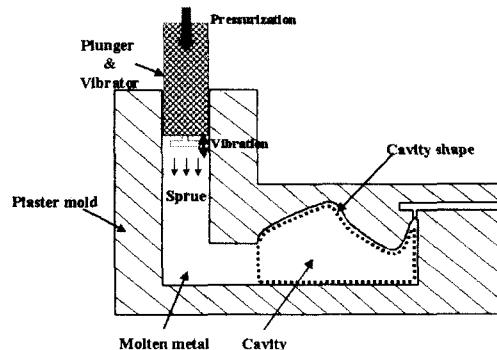


Fig. 1 Schematic diagram of improved plaster casting process

본 연구에서는 위에서 설명한 진동이 부가된 석고 주조 공정에서 충전 과정의 유동현상 해석을 위하여 다이캐스팅 공정에서 충전과정의 유한요소 해석을 위해 개발된 코드^[6]를 활용하였으며, 특히 가진부의 경계조건 처리를 위한 기법을 새롭게 적용하였다. 해석코드는 지배방정식으로 Navier-Stokes 방정식과 비압축성 연속방정식을 사용했으며, 유한요소 수식화를 위하여 penalty 방법과 predictor-corrector 방법^[7]이 적용되었다. 열전도 현상 해석을 위해서는 지배방정식으로 advective-diffusive energy 방정식을 사용했고 시간적분을 위한 θ -method^[8], 응고 잠열을 고려하기 위한 온도 회복법(temperature recovery method)^[9]을 사용했다.

충전과정중의 자유표면을 포함한 3 차원 과도유도장을 해석하기 위하여 VOF 방법^[10]을 채용했다. 3 차원 비직교 격자에 대하여 VOF 방법을 적용하기 위하여 3 차원으로 확장한 충전 형상기법(filling pattern technique), 이류처리기법(advection treatment technique), 유연화기법(smoothing-technique)^[11] 등

을 사용하였다.

2. 열 유동 해석

2.1 지배방정식

3 차원 용융재료의 유동해석을 위한 지배방정식으로써 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이 사용되었다.

연속(continuity)방정식:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2-1)$$

Navier-Stokes 방정식:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij}(u) + \rho f_i \quad \text{in } \Omega \quad (2-2)$$

여기서, $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu d_{ij}$,

$$d_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i=1,2,3, \quad j=1,2,3$$

그리고 t , u_i , p , ρ , μ , f_i 는 각각 시간(time), x_i 방향속도(velocity)성분, 압력(pressure), 밀도(density), 점도(viscosity), 내력(internal force)이며 σ_{ij} 는 응력(stress), d_{ij} 는 변형율 텐서(strain tensor)이다.

에너지(energy) 방정식은 다음과 같고

$$\rho c_p (\dot{T} + u_i T_{,i}) = (kT_{,j})_i + Q \quad \text{in } \Omega \quad (2-3)$$

여기서 c_p , k , Q 는 각각 비열(heat capacity), 열전도도(thermal conductivity), 열원(heat source)이다.

자유표면 $\partial\Omega_s$ 에서는 다음과 같은 응력에 대한 평형방정식이 적용된다.

$$\begin{aligned} \sigma_n &= -p + 2\mu_{air} \frac{\partial u_n}{\partial x_n} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_s \\ \tau &= \mu_{air} \left(\frac{\partial u_n}{\partial x_t} + \frac{\partial u_t}{\partial x_n} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

여기서 σ_n , τ , μ_{air} 는 각각 수직응력(normal stress), 전단응력(shear stress), 공기의 점도이다. 첨자 n , t 는 유동선단에서의 수직과 수평 단위 방향

벡터를 의미한다. 유동선단에서 표면장력(surface tension), 점성응력(viscous stress), 공기압은 고려하지 않는다. 금형 접촉면 $\partial\Omega_{wall}$ 에는 벽면의 전단응력을 고려한 미끄러짐 조건(slip condition)[12]을 적용했으며, 전면 전단응력은 다음과 같이 계산된다.

$$f_t = \rho \frac{|u_i| u_i}{C^2} \quad (2-5)$$

여기서 $C = A \ln y^+ E = A \ln y^+ + B$, $A = 2.5$, $y^+ \geq 90$ 이고 u_i 는 벽면에 대한 전단속도성분이며 E 는 벽면주름상수(rugosity coefficient)이다. 본 연구에서는 $B=5.5$ 와 $y^+=100$ 을 사용했다.

벽면 경계면에 대한 수직 속도 성분 u_{nw} 은 다음과 같이 처리한다.

$$u_{nw} = 0 \quad on \quad \partial\Omega_{wall} \quad (2-6)$$

게이트(gate) 경계면 $\partial\Omega_{inflow}$ 에는 다음과 같은 필수경계조건(essential boundary condition)이 적용된다.

$$u_i = \bar{u}_i \quad on \quad \partial\Omega_{inflow} \quad (2-7)$$

여기서 u_i 는 게이트 경계면에 설정된 속도 성분이다. 해석 초기($t=0$)에는 설정된 속도 값 u_i° 을 전체 영역에 대해 정의되며, 본 연구에서는 $u_i^\circ = 0$ 이 사용된다.

$$u_i = u_i^\circ \quad on \quad \Omega \quad at \quad t=0 \quad (2-8)$$

온도에 대한 경계조건은 온도 값이 설정된 경계면 $\partial\Omega_1$, 열유량(heat flux)이 설정된 경계면 $\partial\Omega_2$, 열전도 경계면 $\partial\Omega_3$ 에 대하여 다음과 같이 적용된다.

$$\begin{aligned} T &= T_0 \quad on \quad \partial\Omega_1, \\ (kT_j)n_i &= q \quad on \quad \partial\Omega_2, \\ and \quad (kT_j)n_i &= -h(T - T_{neigh}) \quad on \quad \partial\Omega_3 \end{aligned} \quad (2-9)$$

여기서 T_0 , q , h , T_{neigh} 는 각각 설정된 온도 값, 설정된 열유량, 열전도 계수(heat transfer coefficient), 인접 절점(neighbor node)의 온도 값이다.

2.2 유한 요소 수식화

유동장에 대한 지배방정식 (2-1)과 (2-2)을 Galerkin 방법과 penalty 방법[7]을 사용해서 약형(weak form)을 만들면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\rho \dot{u}_i \bar{u}_i + \rho u_j u_{i,j} \bar{u}_i + \lambda u_{i,j} \bar{u}_{i,i} + 2\mu u_{i,j} \bar{u}_{i,j}) d\Omega \\ = \int_{\Omega} \rho f_i \bar{u}_i d\Omega \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서 u_i , $u_{i,j}$, λ 는 각각 속도함수, 가중함수, 별칙(penalty)상수이고 λ 를 포함한 항은 reduced integration 기법에 의해 적분된다. 식(2-10)의 유한요소수식화를 위해서 속도함수, 가중함수는 각 요소영역에 대하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} u_k &= U_{k\beta} N_{\beta}, \quad \bar{u}_i = \bar{U}_{ia} N_a \\ on \quad \Omega_c \quad (\beta=1, 2, \dots, 8, \alpha=1, 2, \dots, 8) \end{aligned} \quad (2-11)$$

여기서 $U_{k\beta}$ 과 \bar{U}_{ia} 는 속도함수와 가중함수(weighting function)에 대한 절점(node)값, N_{β} 와 N_a 는 속도성분과 가중함수에 대한 형상함수(shape function)이다. 식 (2-11)을 식 (2-10)에 대입하면 다음과 같은 유한요소방정식을 얻게 된다.

$$M_{i\alpha j\beta} \dot{U}_{j\beta} + C_{i\alpha j\beta} U_{j\beta} + N(u_i)_{i\alpha} = F_{i\alpha} \quad (2-12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} M_{i\alpha j\beta} &= \int \rho N_a N_{\beta} \delta_{ij} d\Omega, \\ C_{i\alpha j\beta} &= \int (\lambda N_{a,i} N_{\beta,j} + \mu N_{a,j} N_{\beta,i} + \mu \delta_{ij} N_{a,k} N_{\beta,k}) d\Omega, \\ N(u_i)_{i\alpha} &= \int \rho N_a u_k u_{i,k} d\Omega \\ 그리고 \quad F_{i\alpha} &= \int N_a f_i d\Omega \quad 이다 \end{aligned}$$

비선형 방정식인 식 (2-12)를 계산하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 Predictor-Corrector 방법[7]을 채택했다.

Predictor

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{n+1} &= u_n + (1-\gamma) \Delta t a_n, \\ u_{n+1}^0 &= \tilde{u}_{n+1} \end{aligned} \quad (2-13)$$

Corrector

From l=0 to l=L { (2-14)

$$(M_{\alpha\beta} + \gamma\Delta t C_{\alpha\beta})U_{j\beta(n+1)}^{(l+1)} = M_{\alpha\beta} \tilde{U}_{j\beta(n+1)} + \gamma\Delta t (F_{i\alpha} - N(u_{i(n+1)}^{(l)})_{i\alpha}) \\ a_{n+1} = \frac{(u_{n+1}^{(L+1)} - \tilde{u}_{n+1})}{\gamma\Delta t}, \quad u_{n+1} = u_{n+1}^{(L+1)}$$

여기서, u_n , a_n , Δt , γ 는 각각 속도, 가속도, 속도 증분, 해석의 안정성을 높이기 위한 설정 값이며 L은 반복수정작업(corrector iteration)의 수이다. 본 연구에서는 γ 와 L 값을 각각 1로 사용했다.

에너지 방정식의 약형(weak form)

$$\int_{\Omega} (\rho c_p \dot{T} \bar{T} + \rho c_p u_i T_{,i} \bar{T} + k_{ij} T_{,j} \bar{T}_{,i}) d\Omega + \int_{\partial\Omega_3} h T \bar{T} d\Omega \\ = \int_{\Omega} Q \bar{T} d\Omega + \int_{\partial\Omega_2} q \bar{T} d\Omega + \int_{\partial\Omega_3} h T_{neigh} \bar{T} d\Omega \quad (2-15)$$

을 유한요소 수식화를 위해서 온도함수 T 와 가중함수 \bar{T} 을 다음과 같이 정의한다.

$$T = T_{\beta} N_{\beta}, \quad \bar{T} = \bar{T}_{\alpha} N_{\alpha} \quad (2-16)$$

여기서 T_{β} 와 \bar{T}_{α} 는 T 와 \bar{T} 의 절점 값이다.

비정상 상태 에너지 방정식인 식 (2-15)를 θ 방법^[8]을 사용해서 다음과 같이 유한요소 수식화를 한다.

$$\bar{T}_{\alpha} [M_{\alpha\beta}^{\theta} \frac{(T^{n+1} - T^n)}{dt} + K_{\alpha\beta}^{\theta} (\theta T^{n+1} + (1-\theta)T^n)] \\ = \bar{T}_{\alpha} F_{\alpha} \quad (2-17)$$

여기서,

$$M_{\alpha\beta} = \int_{\Omega} \rho c_p N_{\alpha} N_{\beta} d\Omega,$$

$$K_{\alpha\beta} = \int_{\Omega} \rho c_p N_{\alpha} u_i N_{\beta,i} d\Omega + \int_{\Omega} \int k_{ij} N_{\alpha,i} N_{\beta,j} d\Omega \\ + \int_{\partial\Omega} h N_{\alpha} N_{\beta} d\Omega,$$

$$F_{\alpha} = \int_{\Omega} N_{\alpha} Q d\Omega + \int_{\partial\Omega_2} N_{\alpha} q d\Omega + \int_{\partial\Omega_3} h N_{\alpha} T_{neigh} d\Omega$$

θ 는 0부터 1 사이의 값 중에서 선택되며(본 연구

에서는 $\theta=0.5$), $M_{\alpha\beta}$ 는 집중질량행렬(lumped mass matrix) $M_{\alpha} = \int \rho c_p N_{\alpha} d\Omega$ 으로 대체된다.

옹고점열을 고려하기 위해서는 옹고 경계면 Γ 를 따라 다음과 같은 경계조건이 부가되어야 한다.

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + k_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho L \frac{\partial X}{\partial t} \quad \text{on } \Gamma \quad (2-18)$$

여기서, 첨자 s 와 l은 고상(solid phase)과 액상(liquid phase)을 의미하며, L과 X는 각각 옹고점열(latent heat)과 옹고경계면이다. 위의 경계조건을 처리하기 위해서 Tszeng 등이 제안한 온도 회복법(temperature recovery method)[9] 이 사용되었다. 식 (2-12)와 식 (2-17)은 각각 대류항(convective term)을 포함하고 있기 때문에 Re 수가 큰경우(>100) 안정된 해석결과를 얻지 못 하는 경우가 발생할 수 있기 때문에 Brooks^[13] 등이 제안한 streamline upwind 기법을 채용해 해석했다.

2.3.3 차원 충전 형상기법

VOF 방법은 이류(advection)방정식

$$\dot{f} + u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 \quad (2-19)$$

로부터 충전율(volume fraction) f를 계산하고 이를 통해 유동선단을 예측하는 방법이다. 충전형상기법^[11]은 비균일 격자에 대해서 효율적으로 비정상 상태의 유동선단을 예측하기 위한 방법으로, 2 차원 사각요소내의 조합으로 가정해야 한다. 먼저 각 6 면체 요소는 해당요소의 충전율과 주위 요소들의 충전율에 따라 8 가지 충전형상 중에서 한개의 충전형상이 결정된다. 이는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같은 규칙 테이블(rule table)에 의해 결정될 수 있다. 이어서 해당 요소내부에 존재하는 자유 표면의 위치와 형상을 결정하여야 된다.

2 차원 4 각 요소에서는 자유표면의 형상이 수학적 관계식에 의하여 계산될 수 있으나, 3 차원 내삽법에 의하여 정의되는 3 차원 곡면으로 구성된 6 면체 요소의 경우에는 이러한 관계식을 수학적으로 정의하기가 용이하지 못하다. 따라서 수치적 반복 계산에 의하여 자유표면의 형상을 예측했으며, 그 과정은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 이러한 수치기법을 사용하여 비균일 형상의 6 면체

요소에 대하여 효과적으로 자유선단의 형상을 예측할 수 있다.

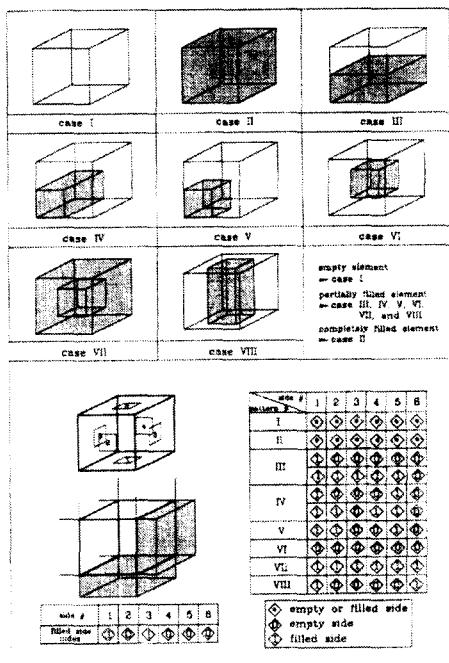


Fig. 2 Filling patterns of hexahedral element

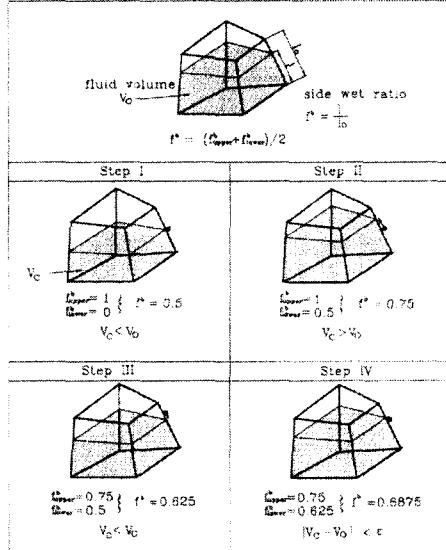


Fig. 3 Numerical iteration to obtain the side filling ratio in hexahedral element

2.4 가진부 처리 기법

캐비티(cavity)에서의 유동은 Fig. 4처럼 충전압과 마찰력, 표면장력을 포함하는 일종의 저항력이 평형을 이룰 때 정지하게 된다. 진동에 의한 충전도 향상에 관한 실험^[5]처럼 Step 1에서는 용탕이 주입되어 충전압과 저항력이 일치하여 유동이 정지하고 Step 2에서는 용탕의 유동이 정지한 상태에서 진동 장치가 작동하여 용탕의 충전압을 증가 시킨다. 충전과정에서의 저항력은 크게 벽면에서의 마찰력과 유동선단부의 표면장력으로 구분될 수 있다. 마찰력은 금형은 표면 거칠기와 용융재료의 점도, 그리고 수치해석에 사용되는 요소의 크기에 의해 결정이 되며, 표면장력은 유동선단의 곡률반경과 정확한 형상을 예측할 수 있어야 한다. 이러한 마찰력과 표면장력을 실험 현상에 매우 근사하게 모델링해야만, 중력에 의한 충전압과 저항력이 평형상태를 이루어 정지하는 위치를 정확하게 예측할 수 있으나 실제로 이는 용이하지 못하다. 이에따라 본 연구는 실험에 의해 중력주조시에 유동선단의 정지위치를 알 수 있다는 점에 착안해서 수치해석을 위한 다음과 같은 가정하에서 수행했다. Step 1이 끝난 시점에서는 중력과 충전압이 평형상태를 이루므로 Step 2에 들어가서는 중력, 마찰력, 표면장력을 모두 0으로 설정한 상태에서 가진부의 경계조건만으로 충전과정을 해석하면 중력과 마찰력, 표면장력이 존재하는 실제현상을 근사하게 예측할 수 있다는 가정이다. 즉, Step 1에서 실험에 의해 얻어진 정지위치까지 중력과 마찰력을 모두 고려한 상태에서 충전과정을 해석한다. 이어, Step 2에서는 온도장은 Step 1에서 얻어진 결과를 사용하고 속도장, 중력, 마찰력 모두를 0으로 재설정한 후 진동부의 경계조건만으로 해석을 수행한다. 이로써 진동부가 용융재료의 충전에 미치는 효과를 근사적으로 모사하고자 한다.

실험에 쓰인 진동자가 솔레노이드의 힘에 의해서 한쪽 방향으로 움직이고 반대 방향에서는 사각파의 신호가 0인 부분에서 스프링(spring)의 탄성력으로 복원이 되는 방법으로 진동이 부가되는 데 이때 관성력에 의해서 사각파로 전달 되는 신호는 사인파(Sine wave)로 모사될 수 있으며, 진폭(D=0.5mm)은 진동자의 폭(W=25mm)에 비하여 매우 작기 때문에 고정격자를 사용해서 해석했다. 진동자의 측면과 실린더의 역할을 하는 벽면사이

는 2mm의 틈이 존재하고 있다. 벽면과 진동자의 틈이 없다면 진동자가 중력의 반대방향으로 이동할 경우, 진동자의 하단부분과 유체가 접촉하는 부분의 경계조건으로 진동자의 이동속도를 사용할 수 있으며, 이는 이론적으로 진동자의 진동은 유동선단의 진동만을 유발시킬 뿐 평균 유동선단의 평균진전에는 도움을 줄 수 없게 된다.

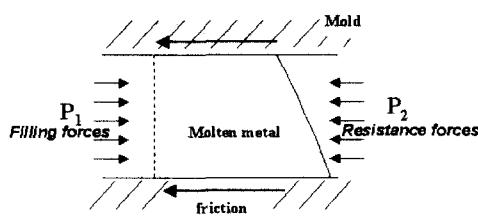


Fig. 4 Flow of molten metal in cavity

그러나 본 연구에서는 진동자 측면과 벽면사이에 틈이 존재하기 때문에 이와는 다른 복잡한 현상이 발생하게 된다. 진동자가 하강하는 경우는 진동자와 접촉하는 용탕면에서 수직속도 경계조건으로 진동자의 속도를 사용하고 [Fig. 5], 수평속도 성분을 자유 미끄럼조건으로 설정하면, 용탕이 하강하는 현상과 진동자와 벽면의 틈으로 진동자의 위로 이동하는 현상 모두 자연스럽게 고려된다. 이에 반해, 진동자가 위로 상승하면서 진동자의 하단 용탕부에 압력이 낮아지게 되고, 이에 따라 진동자와 벽면의 틈으로 진동자의 위에 존재했던 용탕이 유입되거나 스프루의 하단부와 캐비티에 충전돼 있던 용융재료가 중력의 역방향으로 이동하게 된다. 이렇게 진동자가 상승할 경우 진동자가 하강할 경우와 같이, 경계면에 진동자의 속도를 경계조건으로 사용하게 되면, 진동자와 접촉하고 있던 용탕이 진동자가 상승시 동반상승한다는 가정이므로 진동자와 벽면사이에 상당한 틈이 존재하는 본 연구의 경우에는 합당하다고 볼 수가 없다. 앞에서 언급한 바와 같이 틈은 진동자에 2/25(틈의 길이/진동자의 크기) 정도로 용융재료가 충분히 자연스러운 이동이 가능하며, 중력방향을 고려할 때, 진동자의 위에서 유입되는 유량이 스프루의 하단에서 유입되는 유량에 비하여 상당히 크다고 가정하면, 진동자가 상승하는 효과는 캐비티에서의 용탕의 진전에 큰 영향을 주지 않는다고

할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 5 같이 상승 속도벡터를 0으로 설정한 사인파를 진동자와의 접촉면에서 진동자면에 대한 수직속도성분의 경계조건으로 사용했다.

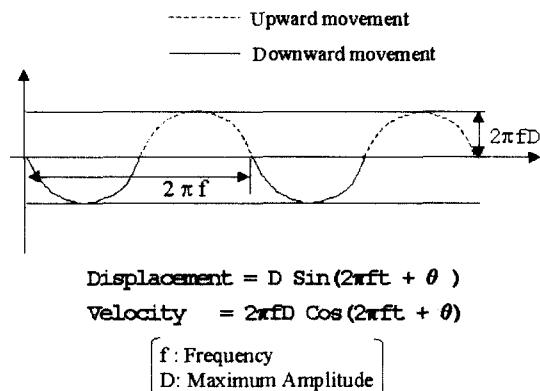


Fig. 5 Assumption of vibration effect

3. 해석 결과

3.1 캐비티 형상의 캐비티 충전

충전 과정의 모사를 위해서 Fig. 6과 같이 캐비티와 몰드의 솔리드 모델링(Solid Modeling)으로부터 격자(mesh)를 구성하였다. 사용된 요소수는 960개이며 절점수는 1430개이다.

수치 모사에서는 Table 1.에서와 같은 재료상수를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 7은 Step 1에서 캐비티의 충전과정을 나타내고 있다. 진동자는 작동하지 않는 상태에서 중력과 마찰력을 고려한 수치모사를 통해, 진동장치가 없는 중력주조 실험 [Fig. 9(a)]에서 얻은 유동선단의 정지위치까지 해석상의 유동선단을 진전시켰다. 그 위치에 도달할 때까지 걸리는 시간은 0.126sec로 예측되었다. Step 2에서는 Step 1에서 계산된 온도분포를 사용하고 중력과 마찰력이 상쇄된다는 가정하에서 이들을 모두 0으로 설정한 후 진동자를 작동시켜 해석을 수행했다. 완전충전까지 0.320sec가 소요되는 것으로 예측되었다. Fig. 2는 Step 2의 충전과정을 보여주고 있다. 스프루에 채워져 있는 용탕의 상단이 진동자의 작동에 의해 오목하게 들어간 것을 볼 수 있다.

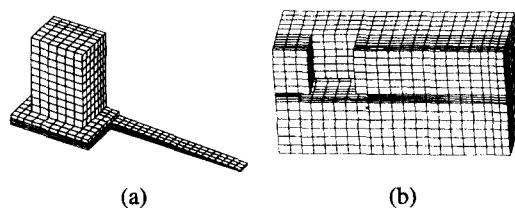


Fig. 6 Grid configuration of simplified shape: (a) cavity,
(b) mold

Table 1 Thermo-physical properties of materials

Property	Molten metal(Al)	Mold (plaster)
Conductivity(cal/cm/s/°C)	2.2×10^{-1}	0.2×10^{-3}
Specific heat(cal/g/°C)	2.56×10^{-1}	2.35×10^{-1}
Density(g/cm ³)	2.385	1.44
Melting temp.(°C)	660	.
Latent heat(cal/g)	94.0	.



Fig. 7 Filling patterns at Step1



Fig. 8 Filling patterns at Step2

Fig. 10 은 완전충전이 된 직후 용탕과 몰드의 온도분포를 보여주고 있다. 최저온도를 보이고 있는 유동선단부 온도가 응고온도(660°C)보다 충분히 높기 때문에 완전충전이 가능하다고 예측되었으며 이는 실험결과[Fig. 9(b)]하고도 일치하고 있다. 앞에서도 언급한 바와 같이 Step 2 의 충전시간은 중력에 의해 충전이 이루어지는 Step 1 에 비해 3 배이상 길게 나타났다. 이 결과는 진동 효과가 유동선단의 진전에 도움을 주고 있으나 중력보다 그 효과가 작다는 것을 보여 주고 있다. 물론, 진폭을 증가시킴으로써 효과를 증대시킬 수는 있다. 그러나, 우리는 박벽 제품의 효과적인 충전을 위

해서는 추가적으로 강제적 가압이 필요하다고 판단하고, 다음단계로 가압과 진동이 동시에 부가하는 장치를 개발했다^[5]. 다음장에서 이에 대한 설명과 수치해석결과를 보이도록 하겠다.

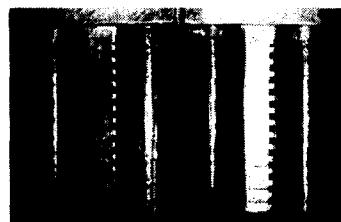


Fig. 9 Result of filling test for wedge shape cavity



Fig. 10 Temperature filed: (a) cavity, (b) plaster mold

3.2 가압·진동에 의한 캐비티(다이캐스팅 시 작품) 충전

3.2.1 가압·진동 부가 조건의 처리

가압과 진동이 동시에 부가되는 장치는 Fig.11에 나타낸 바와 같이 플런저(plunger)가 가압을 하면서 진동판에 의해 진동이 가해지는 방식으로 제작되었다. 진동판과 실린더사이의 틈은 매우 작기 때문에 이를 통한 용탕의 흐름은 무시할 수 있다. 진동판은 속도 V로 일정하게 이동하는 플런저에 대해 상대적 진동운동을 하기 때문에 진동판의 절대이동속도 V_{vib} 는 Fig. 11를 참조하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_{\text{vib}} = V + 2\pi f D \sin(t/2\pi f) \quad (3-1)$$

여기서, f는 진동수, D는 진폭, t는 시간이다. 해석은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 먼저, Step 1에서 앞절에서 설명한 기법과 동일한 방법으로 중력주조 실험을 통해 얻어진 유동선단의 정

지위치까지 마찰력과 중력을 고려해서 충전과정을 모사한다. 이어 Step 2에서 충전압과 저항력이 일치했다고 가정하고 초기속도와 중력을 0으로 설정한 후, 가압과 진동이 부가되게 된다. 가압 및 진동을 부가하기 위한 경계조건으로는 Fig. 11에 나타낸 속도를 케이트에서의 경계조건으로 사용했다.

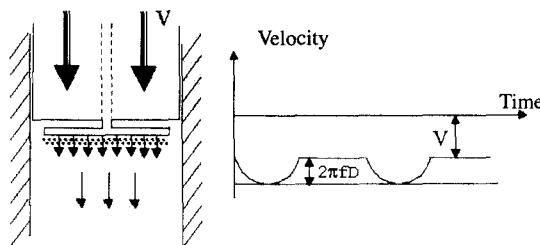


Fig. 11 Assumption of pressurized vibration effect

3.2.2 해석 결과

수치 모사에 적용된 다이캐스팅 시작품은 'End Clutch Cover'로서 현재 현장에서 자동차용 부품으로 생산되는 제품이다. 이 제품의 충전과정 모사를 위해 실제 3 차원 형상을 단순화시켰으며, Fig. 12 와 같이 솔리드 모델링 캐비티의 격자를 구성하였다. 총 요소수는 1846 개이고 절점수는 2771 개이다. 수치 모사에 이용된 재료 상수들은 Table 1.과 같으며 플런저의 가압 속도는 25 mm/sec로 설정했으며, 진동판의 진동수 $f=15\text{Hz}$ 과 진폭 $D=0.5\text{mm}$ 을 사용해서 해석했다.

Fig. 13 는 Step 1에서의 충전 경향과 온도 분포를 나타내고 있다. 충전율 75%에서 유동선단의 위치가 중력주조실험에서 얻은 결과[Fig.15(a)]와 유사하게 나타났기 때문에 이 시점에 Step 1의 해석을 마쳤다. 이어 중력과 마찰력을 0을 설정한 상태에서 케이트부분에 속도경계조건을 부가하고 해석을 수행했다. Fig.13에서 나타난 바와 같이 용탕은 케이트로부터 유출된 후 중력에 의해 캐비티의 하단부부터 충전시켰다. 캐비티의 두께는 평균 2mm이고 균일하지 않기 때문에 용탕의 유출 초기에도 유동선단이 직선으로 뻗어나가지 못하고 측면으로 퍼지면서 중력에 의해 아래로 흘러내려가는 모습을 보였다. Step 1과 Step 2를 거쳐 완전 충전될 때까지 용탕의 온도가 용융온도보다 높

은 상태를 유지한 것은 완전충전된 시편을 얻은 실험결과와 일치한 경향을 보인 것이다. 본 개발 공정은 대량생산을 위한 것이 아니라 소량의 시작 품제작을 위한 것이며, 플런저는 저속으로 이동시키는 것이 시제품의 품질향상에 유리하기 때문에, 완전충전이 가능한 최소 속도로 플런저 이동속도를 찾는 것이 필요하다. 이러한 필요에 의해 본 해석코드는 유용하게 활용될 것으로 판단된다. 본 공정에 대한 실험 연구를 통해 진동판에 의한 진동은 용고조직의 미세화를 촉진하여 기계적 성질과 표면정밀도를 향상시킨다는 결과를 얻었다^[5]. 향후 연구분야로써 가압진동에 의한 조직 미세화에 관한 연구가 필요하다 하겠다.

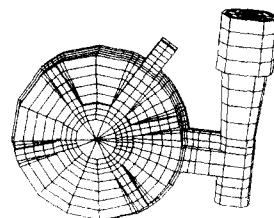


Fig. 12 Grid configuration of 'End clutch cover'

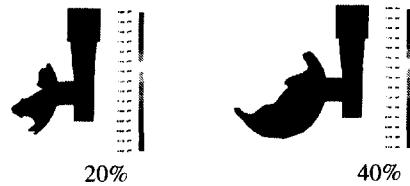


Fig. 13 Filling patterns and temperature field at Step 1

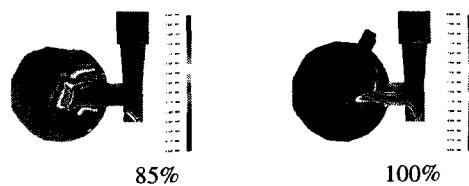


Fig. 14 Filling patterns and temperature field at Step 2

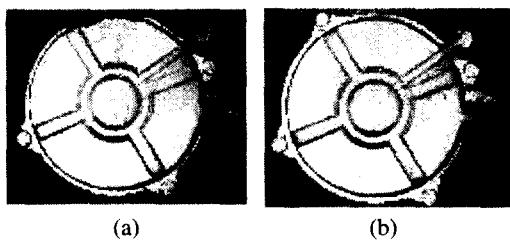


Fig. 15 (a) Prototype produced by conventional plaster casting process, (b) Prototype produced by plaster casting process with pressurized vibration

4. 결론

본 연구에서는 다이캐스팅 공정을 위한 시작품의 기계적 성능 향상을 위해 개발된 진동·가압 석고 주조 공정의 수치 모사를 수행하였다. 수치 모사에는 다이캐스팅 공정 중의 충전과정 해석을 위한 유한요소해석 코드가 활용되었으며 가진부 처리를 위한 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 활용하여 쇄기 형상으로 두께가 변화하는 캐비티에 대한 충전 해석을 수행하였으며, 실제의 실험과 매우 유사한 경향을 예측할 수 있었다. 현재 다이캐스팅 공정으로 생산되는 부품인 'End Clutch Cover' 시작품의 진동·가압 석고 주조 공정에 대한 수치모사를 수행하였다. 해석을 통해 실험 결과와 근사한 충전경향을 예측할 수 있었으며, 개발된 코드가 본 공정의 중요한 공정 변수인 풀전저 이동속도의 최적값을 찾는데 활용될 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. A. Kochan, "Rapid prototyping trends," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 150-152, 1997.
2. N. P. Karapatis, J. P. S. van Griethuysen and R. Glardon, "Direct rapid tooling: a review of current research," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 77-89, 1997.
3. M. C. Warner and J. Renaud, "Rapid prototyping simulated die casting, lower prototype tooling costs and faster product development are benefits that outweigh limitations," NADCA 18th international die casting congress and exposition, Indianapolis, U.S.A., Oct., 1995.
4. M. C. Warner and J. Renaud, "Rapid prototype simulated die casting," *Rapid Prototyping & Manufacturing '96*, Dearborn, U.S.A., April, 1996.
5. 김기돈, 양동열, 박태권, "폐속조형을 이용한 다이 캐스팅 제품의 시작 공정 설계 및 제작," 한국정밀공학회 춘계학술대회, 1999.
6. 정준호, "유한요소법을 이용한 다이캐스팅 공정에 있어 충전과정의 수치적 모사," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1998.
7. T. J. R. Hughes, Wing Kan Liu and Alec Brooks, "Finite element analysis of incompressible viscous flows by the penalty function formulation," *J. Comput. Physics*, Vol. 30, pp. 1-60, 1979.
8. W. L. Wood and R. W. Lewis, "A comparison of time marching schemes for the transient heat conduction equation," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 9, pp. 679-689, 1975.
9. T. C. Tszeng, Y. T. Im, and S. Kobayashi, "Thermal analysis of solidification by the temperature recovery method," *Int. J. Mech. Tools Manufact.*, Vol. 29, pp. 107-120, 1989.
10. C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of fluid(VOF)method for the dynamics of free boundaries," *J. Comp. Phys.*, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
11. J. H. Jeong and D. Y. Yang, "Finite element analysis of transient fluid flow with free surface using VOF(Volume of Fluid) method and adaptive grid," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 26, pp. 1127-1154, 1998.
12. G. Dhatt, D. M. Gao and A. Ben Cheikh, "A finite element simulation of metal flow in moulds," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 30, pp. 821-831, 1990.
13. A. N. Brooks and T. J. R. Hugues, "Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations," *Computer Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 32, pp. 199-259, 1982.