

# 가압주조법을 이용한 금속복합재료 제조공정의 침투와 열전달 해석

정창규\* ·한경섭\*\*

## Numerical Simulation of Infiltration and Solidification for Squeeze Casting of MMCs

C.K. Jung and K.S. Han

### Abstract

A finite element model is developed for the process of squeeze casting of metal matrix composites. The fluid flow and the heat transfer are fundamental phenomena in squeeze casting. The equations for the clear fluid flow and the flow in porous media are used to simulate the transient metal flow. To describe heat transfer in the solidification of molten aluminum, the energy equation is written in terms of temperature and enthalpy. A direct iteration technique is used to solve the resulting nonlinear algebraic equations. The cooling curves and temperature distribution during infiltration and solidification were calculated for a simplified model with pure aluminum. The developed program can be used for squeeze casting process of complex geometry, boundary conditions and processing parameter optimization.

**Key Words:** Numerical Modeling, Heat transfer, Squeeze casting, Enthalpy method, Metal matrix composites

### 1. 서론

금속복합재료(metal matrix composite : MMCs)는 경량의 기지금속(Al, Mg)에 세라믹 단섬유나 분말을 보강하여 기계적 성질 및 고온 안정성, 열전도성, 내마모성을 향상시키고자 개발된 재료이다[1,2]. 최근에는 자동차 부품에 적용되어 경량화는 물론 내구성 향상에 기여를 하고 있으며 항공, 방위산업 및 전자산업 등의 특수용도로서 사용되는 등, 그 활용범위가 넓어지고 있다.

금속복합재료 제조방법으로는 분말야금법, 용탕주조법, 복합주조법, 분사주조법 등의 여러 방

법이 있으며, 그 중에서 용탕주조법은 유기 및 무기성형체를 사용하여 보강재를 예비성형체로 만들고, 용융된 금속을 압력을 가하여 침투시킨 다음 응고시킴으로서 제조하는 방법이다. 이 방법은 기존의 주조공정과 유사하여 생산기술이 널리 알려져 있으며, 대량생산에 적합한 방법으로 알려져 있다. 또한 가압하에서 용탕이 응고되기 때문에 양호한 조직을 얻을 수 있으며, 원하는 부분의 국부보강과 2차 가공이 별로 요구되지 않는 near-net shape 주조 가능성 등의 장점이 있어 주목을 받고 있다[2].

용탕주조법에 의한 금속복합재료의 제조조건은 금속복합재료의 제조 가능성과 기계적 성질 등에 큰 영향을 미치므로 최적의 조건을 확립하는 것이 필요하다. 예전에는 반복적인 실험을 통하여 특정한 보강재와 기지재에 관련된 제조조건을 찾아냈다[2]. 이 방법은 많은 시간과 노력이 소요되며 재료나 금형의 모양이 바뀌게 되면 얻은 결과를 적용할 수 없다 없다는 문제점이 있다. 따라

\* 포항공대 기계공학과 대학원

\*\* 포항공대 기계공학과

서 공정의 이론적인 해석을 통해 제조에 미칠 여러 변수들을 평가함으로써 비용상의 문제점을 해결하고 실험의 시행착오를 줄이는 과정이 필요하다.

용탕주조법의 주된 기구는 침투와 열전달 현상이므로 침투 기구와 응고 기구에 대한 해석이 필요하다. 이전에 수행되었던 이론적인 연구들은 금형을 설정하지 않거나 혹은 금형으로의 열전달이 없다는 조건과, 입구에서 압력이 일정하다고 가정하고 일차원 또는 이차원 해석을 수행하였다 [3,4]. 이러한 연구들은 금형을 포함한 외부로의 열손실을 고려하고 있지 않으며 입구 조건들이 유압프레스로 압력을 가하는 경우에는 부적절하다. 최근에 금형을 포함한 시스템을 설정하고 침투과정뿐만 아니라 침투가 완료된 후의 금형으로의 열전달에 의한 응고를 해석한 연구가 있었다 [5]. 그러나 이 연구에서도 경계조건의 가정에 실제와 많은 차이를 보이고 있고 또한 온도와 엔탈피 사이의 비선형적 관계를 고려한 수치 해석 기법이 제대로 구현되지 못했다.

본 연구에서는 실제 제작공정과 유사한 입구조건과 경계조건을 가정하여 침투와 열전달 해석을 수행하고자 한다.

## 2. 유한 요소 모델

### 2.1 유동해석

용융된 금속이 비압축성이고 가정하면 용탕 침투시에 다음과 같은 식이 성립한다.

용탕 영역:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_0 \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho_0 f_i = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - P\delta_{ij}; \quad \tau_{ij} = 2\mu D_{ij} \quad (3.a)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.b)$$

경계조건:

$$u_i = f_i^u \text{ on } \Gamma_u \quad (3.c)$$

$$T_i \equiv \sigma_{ij} n_j = f_i^T \text{ on } \Gamma_T \quad (3.d)$$

예비성형체 영역:

$$\frac{\rho_0}{\phi} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \left( \frac{\mu_e}{x} \right) u_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -P\delta_{ij} + \mu_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_0 f_i = 0 \quad (4)$$

여기에서  $\phi$ 는 예비성형체의 공극률이고,  $x$ 는 침투율이다. 식 (1),(2)을 유한요소공식화를 하면 다음과 같다.

$$-\left[ \int_{\Omega} \Phi \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} d\Omega \right] u_i = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \left[ \int_{\Omega} \rho_0 \Psi \Psi^T d\Omega \right] \dot{u}_i + \left[ \int_{\Omega} \rho_0 \Psi (\Psi^T u_j) \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_j} d\Omega \right] u_i \\ & + \left[ \int_{\Omega} \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_j} d\Omega \right] u_i + \left[ \int_{\Omega} \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} d\Omega \right] u_j \\ & - \left[ \int_{\Omega} \frac{\partial \Psi}{\partial x_i} \Phi^T d\Omega \right] P = \left[ \int_{\Omega} \rho_0 \Psi f_i d\Omega \right] + \left\{ \int_{\Gamma} T_i \Psi d\Gamma \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

여기에서  $\Phi$ 는 각각 속도와 압력의 보간함수이다.

### 2.2 침투면 해석

유동장에 따른 침투면의 이동은 level set법을 이용하였다. 이 방법은 연속적인 level 함수의 0-level로 계면을 나타내며 다음과 같이 정의된다.[6]

$$F(x_i, t) = \begin{cases} +d, & x_i \in \Omega_f \quad \text{int the filled region} \\ 0, & x_i \in \Gamma \quad \text{on the interface} \\ -d, & x_i \in \Omega_0 \quad \text{in the empty region} \end{cases} \quad (7)$$

$F$ 값은 유동해석으로부터 얻어진 속도값을 이용하여 다음의 식으로 얻어진다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

### 2.3 열전달 해석

예비성형체 내에서 용탕과 섬유 사이에 열전달이 일어나므로 각각의 재료에 대해 열전달 식을 고려하여야 한다. 섬유의 반경이 매우 작아 단위부피내에 열전달 면적이 매우 크므로 용탕과 섬유 사이에 순간적으로 열평형을 이룬다고 가정하였다[3]. 이러한 가정하에서 용탕이 침투한 부분에

서의 에너지식은 다음과 같다.

$$\rho_0 C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - Q = 0 \quad (9)$$

$$T = f^t \text{ on } \Gamma_T \quad (10.a)$$

$$-\left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) n_i = q_i, n_i = q_c + q_r + q_a = f^q \text{ on } \Gamma_q \quad (10.b)$$

용융금속이 응고되면서 방출하는 잠열은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (11)$$

한편 엔탈피( $H$ ), 응고율( $f_s$ ), 온도의 관계는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$H(T) = \int_{T_m} C_p(T) dT + L(1 - f_s) \quad (12)$$

$T$ 로 미분하면,

$$\frac{\partial H}{\partial T} = C_p(T) - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \quad (13)$$

식(11),(13)을 (9)에 대입하면 다음과 같다.[7]

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \rho_0 C_v u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (14)$$

식(15)의 유한요소 공식화는 다음과 같다.

$$\left[ \int_{\Omega} \Theta \Theta^T d\Omega \right] \dot{\mathbf{H}} + \left[ \int_{\Omega} \rho_0 C \Theta (\Psi^T u_j) \frac{\partial \Theta^T}{\partial x_j} d\Omega \right] \mathbf{T} + \left[ \int_{\Omega} k_{ij} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} \frac{\partial \Theta^T}{\partial x_i} d\Omega \right] \mathbf{T} = - \left\{ \int_{\Gamma} \Theta q d\Gamma \right\} \quad (15)$$

## 2.4 물리 상수

반지름이  $r_j$ 인 섬유모양의 보강재로 구성된 부피분율이  $V_j$ 인 예비성형체의 침투율은 섬유의 배향에 따라 식 (16),(17)로 나타낼 수 있다. 각각은 유동이 섬유배향에 평행할때와 수직일때의 침

투율을 나타내며 해석에서는 두 값의 평균값을 사용하였다.[5]

$$K = \frac{r_f^2}{4V_f} \left( -\ln V_f - \frac{3}{2} + 2V_f - \frac{V_f^2}{2} \right) \quad (16)$$

$$K = \frac{r_f^2}{8V_f} \left( -\ln V_f + \frac{V_f^2 - 1}{V_f^2 + 1} \right) \quad (17)$$

3차원 랜덤배열의 단섬유 예비성형체를 사용한 복합재료에서 열전도 계수는 다음과 같다.[8]

$$k_c = k_m \left( 1 - \frac{V_f(k_m - k_f)[0.5(k_f - k_m) + 3k_m]}{k_m(k_f - k_m)(1.5 - v_f) + 3k_m^2} \right) \quad (18)$$

복합재료의 열용량은 rule of mixture로 계산하였다.

$$(\rho C)_c = V_f(\rho C)_f + (1 - V_f)(\rho C)_m \quad (19)$$

## 3. 결 과

### 3.1 모델

개발한 프로그램을 이용하여 단순화된 모델에 대하여 침투와 열전달 해석을 수행하였다. 경계조건과 초기조건은 Fig.1 과 같다. 몰드-분위기의 열전달계수는  $50 \text{ W/Km}^2$ 을 사용하였고, 몰드-분위기 면을 제외한 다른 면은 단열 조건을 사용하였다. 몰드-금속의 열전달 계수는  $30000 \text{ W/Km}^2$ 으로 가정하였다.

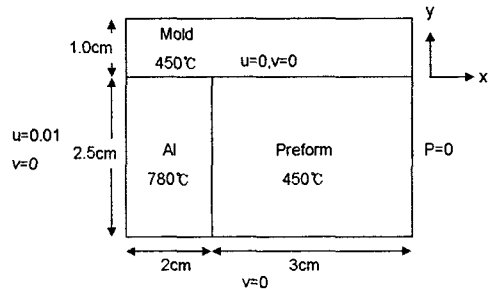


Fig. 1 Geometry and boundary condition of the mode

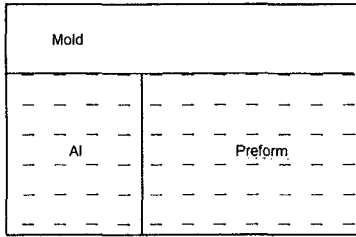


Fig. 2 Velocity field during infiltration

### 3.2 유동해석

Fig. 2는 침투때의 유동을 나타낸다. 해석결과 침투가 시작되고 3초후 침투면이 끝단에 도달하여 침투가 끝나며 이 동안 유속의 크기는 거의 일정한 것으로 나타났다. 이것은 용탕이 일정하게 침투입구에서 밀려 들어가는 경계조건을 사용했기 때문에 짧은 시간동안 침투가 완료되기 때문에 금속이 응고되는 부분이 없으므로 거의 일정한 유속을 유지하는 것으로 나타난다.

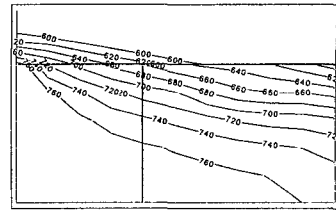
### 3.2 열해석

Fig.3 은 침투시작으로부터 각각 3초, 30초가 지났을때의 온도분포를 보여준다. 침투가 끝나는 3초에는 몰드 벽쪽으로부터 응고가 일어나고 있으며, 30초가 지나면서 예비성형체 부분의 금속이 거의 응고가 끝이 나는 것을 보여준다. 이것은 몰드 외벽으로만 열출입이 있고 용탕의 양을 무한으로 가정하였으므로 냉각 시간이 길게 나타난다. 따라서 실제 조건을 보다 잘 반영하려면 한정된 양의 용탕과 모델 왼쪽 경계의 열전달을 고려해야 할 것으로 생각된다.

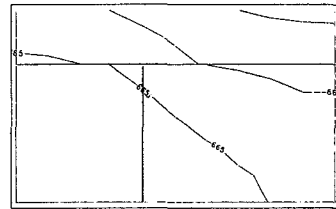
## 4. 결론

본 연구를 통해 용탕주조법을 이용한 복합재료 조시 일어나는 침투와, 금속의 상변화를 포함한 열전달을 해석하는 3차원 유한요소 프로그램을 개발하였다.

1. 단순화된 모델을 가정하여 침투시 용탕의 유동과 침투면의 이동을 계산하였고, 각 부분에서의 시간대별 온도분포를 구하였다. 이를 통해 기준조건에서는 3초에 침투가 완료되며, 30초가 지나서 응고가 완료된다.



(a) t=3 sec



(b) t=30 sec

Fig. 3 Temperature distribution

2. 개발한 프로그램을 복잡한 3차원 형상의 모델 해석과 가압주조공정 변수를 최적화하는데 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) T.W. Clyne and J.F.Mason : Metall. Trans., 1987, V.18A, pp.1519-1530.
- (2) 한경섭, 김영한 : 대한기계학회지, 32권1호, 1992, pp.46-56.
- (3) A. Mortensen, L.J. Masur, J.A. Cornie and M.C. Flemings : Metall. Trans., 1989, V.20A, pp.2535-2557.
- (4) T. Dopler, A. Modaressi, V. Michaud : Metall. Trans. B, 2000, V.31B, pp.225-234.
- (5) 안인혁, 2000, 포항공대석사학위논문
- (6) S. Osher and R. Fedkiw, Level set methods and dynamic implicit surfaces, Springer, 2003
- (7) G.S. Reddy, W.J. Mascarenhas and J.N. Reddy : Metall. Trans. B, 1993, V.24, pp.677-684.
- (8) H. Hatta and M. Taya : J. Appl. Phys, 1985, V.58, No.9, pp.2478-2486