

# 용탕주조법을 이용한 금속복합재료 제조공정의 열전달 해석

정창규\*, 변현중\*, 정성욱\*, 남현욱\*\*, 한경섭\*\*\*

## Numerical Modeling of Heat Transfer for Squeeze Casting of MMCs

C.K.Jung, H.J.Pyun, S.W.Jung, H.W.Nam and K.S.Han

**Key Words :** Numerical modeling(수치해석), Heat transfer(열전달), Enthalpy method(엔탈피법)

### Abstract

A finite element model for the process of squeeze casting for metal matrix composites (MMCs) in cylindrical mold is developed. The fluid flow and the heat transfer are the fundamental phenomena in the squeeze casting process. To describe heat transfer with solidification of molten aluminum, the energy equation in terms of temperature and enthalpy are applied to two dimensional axisymmetric model which is similar to the experimental system. And one dimensional flow model is employed to simulate the transient metal flow. The direct iteration technique was used to solve the resulting nonlinear algebraic equations. A computer program is developed to calculate the enthalpy, temperature and fluid velocity. Cooling curves and temperature distribution during infiltration and solidification are calculated for pure aluminum. The temperature is measured and recorded experimentally. At two points of the perform inside and one point of the mold outside, thermocouple wire are installed. The time-temperature data are compared with the calculated cooling curves. The experimental results show that the finite element model can estimate the solidification time and predict the cooling process.

### 1. 서 론

금속복합재료(metal matrix composite : MMCs)는 경량의 지지금속(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 방법이 있으며, 그 중에서 용탕주조법은 유기 및 무기성형제를 사용하여 보강재를 예비성형체로 만들고, 용융된 금속을 압력을 가하여 침투시킨 다음 응고

시킴으로서 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 지지재에 관련된 제조조건을 찾아냈다 [2]. 실험을 통해 제조조건을 찾아내는 방식은 그 결과를 신뢰할 수 있다는 장점이 있으나 과정에서 많은 시간이 노력이 소요되며 재료나 금형의 모양이 바뀌게 되면 얻은 결과를 적용할 수 없다. 따라서 공정의 이론적인 해석을 통해 제조에 미칠 여러 변수들을 평가함으로써 비용상의 문제점을 해결하고 실험의 시행착

\* 포항공과대학교 대학원

\*\* 포항공과대학교 첨단공학연구소

\*\*\* 포항공과대학교 기계과

오를 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]. 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[4]. 그러나 이 연구에서도 경계조건에 가정과 실제와 많은 차이를 보이고 있고 또한 온도와 엔탈피 사이의 비선형적 관계를 고려한 수치 해석 기법이 제대로 구현되지 못했다.

본 연구에서는 실제 제작공정과 유사한 모델을 설정하고 이전 연구에서 가정했던 입구조건과 경계조건을 실제와 가깝게 바꾸어 열전달 해석을 수행하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 모델

Fig.1 은 용탕주조를 이용한 금속복합재료의 제조과정을 나타낸다. 실린더형의 주조용 금속 몰드, 가압용 펀치, 예비성형체를 각각 예열시킨 후 유압 프레스를 사용하여 용탕을 침투, 응고시킨다.

본 연구에서는 Fig.2 와 같은 모델에 대하여 해석을 수행한다. 실제 과정과 비슷하게 몰드와 펀치로의 열전달이 있으며, 침투가 진행되는 동안에 대류에 의한 열전달도 고려한다.

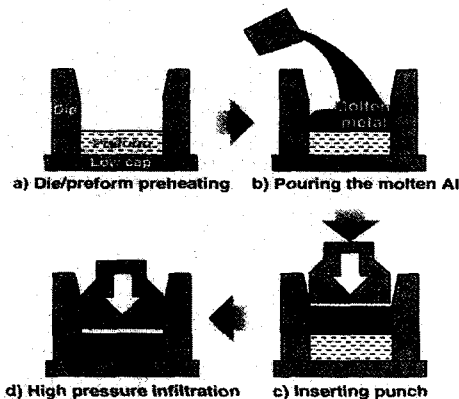


Fig. 1 Schematic diagram of squeeze casting

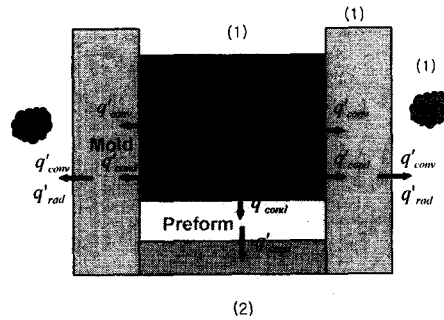


Fig. 2 Analysis model

#### 2.1.1 지배방정식

용융된 금속이 비압축성이고 가정하면 용탕 침투시에 다음과 같은 연속방정식이 성립한다.

$$\nabla v = 0 \quad (2.1)$$

실제 용탕의 유동은 3 차원이나 여기서는 유동이 높이 방향으로만 있다고 가정한다. 따라서 용탕의 초기이동속도는 펀치의 속도와 같으며 식 (2.1)을 통해서 시간에 따른 침투거리와 각 부분에서 침투속도를 구할 수 있다. 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[2,4]. 이러한 가정하에서 용탕이 침투한 부분에서의 에너지식은 다음과 같다.

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_m c_m v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_c \nabla T) \quad (2.2)$$

그리고 침투가 일어나지 않은 영역에서는 다음과 같이 전도만을 고려한다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_c \nabla T) \quad (2.3)$$

#### 2.1.2 초기조건과 경계조건

초기조건으로서 금형과 펀치는 기지재의 녹는점보다 낮게 예열시킨다. 용탕은 금속의 녹는점 이상의 과열된 온도에서 사용된다. Fig.2 에서 경계 (1)에서는 대류와 복사에 의한 열전달을 고려하였다. 여기에 온도에 따라 복사 열전달의 변화는 없다고 가정하였다. 경계(2)는 단일조건을 사용하였

다. 예비성형체와 용탕의 경계면에서 조건은 기존의 연구들과는 달리 유속이 일정한 것으로 가정을 하였다. 본 연구와 같이 유압 프레스로 압력을 가하는 경우에는 용탕의 침투속도가 프레스의 하강 속도와 같다고 가정하는 것이 실제에 가깝다[4].

### 2.1.3 물리상수

열전달에 관계된 상수들로는 열전도 계수와 열용량이 있다. Hatta 와 Taya[5]는 단섬유 보강 복합재료에서 섬유의 배열에 따른 열전도 계수를 예측하는 식을 유도하였다. 이 모델에 따르면 3 차원 임의로 배열되어 있는 실린더 모양의 섬유로 강화된 단섬유 보강 복합재료에서의 열전도 계수는 다음과 같다.

$$k_c = k_m \left( 1 - \frac{V_f (k_m - k_f) [0.5(k_f - k_m) + 3k_m]}{k_m (k_f - k_m) (1.5 - V_f) + 3k_m^2} \right) \quad (2.4)$$

여기서 온도에 따른 열전도계수의 변화는 고려하지 않았다.

복합재료의 열용량은 rule of mixture 로 계산한다.

$$(\rho c)_c = V_f (\rho c)_f + (1 - V_f) (\rho c)_m \quad (2.5)$$

## 3. 수치해석

2 장에서 침투와 열전달 지배방정식을 유한요소법을 사용하여 풀었다. 요소 분할도는 Fig.3 과 같고

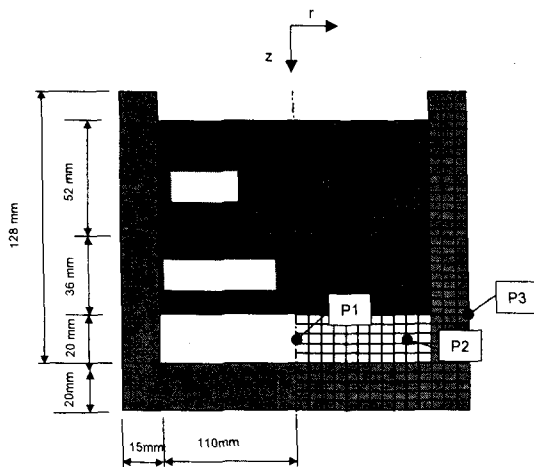


Fig. 3 Mesh diagram for numerical model

축대칭이므로  $r, z$  방향의 2 차원 해석을 하였다. 4 절점 사각 요소를 사용하였으며 전체 요소의 개수는 457 개, 절점의 수는 507 개이다.

예비성형체 내에서 용탕은 1 차원 유동, 즉  $z$  방향으로만 흐른다고 가정하였다. 침투머리의 이동은 quasi-stationary front 근사법을 사용하였다. 이 방법은 일정한 시간 구간 동안에는 고정된 침투 영역에 대해 열전달 해석을 수행하는 방법이다.

금형과 펀치, 섬유의 열특성의 온도에 따른 변화는 고려하지 않았다. 또한 경계조건에서 사용되는 열전달 계수도 온도에 따라 일정한 것으로 가정하였다.

### 3.1 침투해석

용탕의 침투가 일어났을 때 몰드로의 열손실로 인해 몰드 외벽에 응고가 일어나게 되고 용탕이 흐를 수 있는 채널의 지름이 줄어들게 된다. 용탕의 속도는 입구에서 유속이 일정하다고 가정하였으므로 연속방정식에 의하여 구할 수 있다.

$$\pi R_i^2 v_0 = \pi R_c^2 (1 - V_{sf}) \cdot v_{i,j} \quad (3.1)$$

### 3.2 엔탈피 법

응고시 일어나는 잠열의 방출을 고려하기 위해 엔탈피법(enthalpy method)을 사용한다. 이 방법은 에너지식의 이너셔(inertia)항에서 온도 대신에 엔탈피로 바꾸어 사용하는 방법이다[4].

### 3.3 열전달 해석

#### 3.3.1 엔탈피 공식화

어떤 2 차원 도메인에서 축대칭, 비정상 상태의 에너지 식은 식(2.3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = C_{px} \frac{\partial T}{\partial t} + C_{pm} v_z \frac{\partial T}{\partial z} - Q \quad \text{in } \Omega \quad (3.2)$$

용융금속이 응고되면서 방출하는 잠열은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3.3)$$

한편 엔탈피, 응고율, 온도의 관계는 다음식으로 정의할 수 있다.

$$H(T) = \int_{T_{ref}} C_{pc}(T) dT + L(1 - f_s) \quad (3.4)$$

식(3.4)를 온도  $T$ 로 미분하여 정리한 다음 식(3.3)과 같이 식(3.2)에 대입하면,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial H}{\partial t} + C_{pm} v_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.5)$$

용융금속이 응고하는 구간에서는 온도의 변화가 없으므로 불연속이지만 전 구간에서 연속인 엔탈피를 주 변수로 사용함으로써 보다 쉽게 고려될 수 있다.

일반적인 경계조건과 초기조건은 다음과 같다.

Boundary condition( $t > 0$ )

$$T = \bar{T} \quad \text{at } \Gamma_r \quad (3.6a)$$

$$K_r \frac{\partial T}{\partial r} n_r + \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} - C_{pm} v_z T \right) n_z = q \quad \text{at } \Gamma_q \quad (3.6b)$$

Initial condition( $t=0$ )

$$T(r, z; t=0) = T_0(r, z) \quad \text{in } \Omega \quad (3.7)$$

### 3.3.2 공간근사

식(3.5)의 유한요소 해석 모델은 두 단계의 공식화 과정을 거친다. 첫 번째로 공간근사(spatial approximation)로서 시간에 대한 편미분 방정식을 시간에 대한 상미분 방정식으로 바꾸는 단계이다. 두 번째는 구한 상미분 방정식을 시간 근사법을 이용하여 시간에 대한 근사식으로 바꾼다[19].

식(3.5)의 weak form은 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \left[ K_r \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial W_i}{\partial r} + K_z \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial W_i}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial t} W_i + C_{pc} v_z \frac{\partial T}{\partial z} W_i \right] dV = \int_{S_q} \left[ C_{pm} v_z n_z T + q_n \right] W_i dS \quad (3.8)$$

어떤 한 요소,  $\Omega^e$ 내에서 온도와 엔탈피의 근사는 다음과 같이 정의한다.

$$T^e = N_j^e(r, z) T_j^e(t), \quad H^e = N_j^e(r, z) H_j^e(t) \quad (3.9)$$

식(3.8)에 대입하여 정리하면 유한요소 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$[M^e] \{ \dot{H}^e \} + [K^e] \{ T^e \} = \{ F^e \} \quad (3.10)$$

where

$$M_{ij}^e = 2\pi \int_{\Omega^e} \rho c N_i^e N_j^e r dr dz$$

$$K_{ij}^e = 2\pi \int_{\Omega^e} k \left( \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) r dr dz + 2\pi \int_{\Gamma} h_c N_i N_j ds$$

$$F_i^e = 2\pi \int_{\Gamma} h_c T_x N_i^e ds$$

### 3.3.3 시간근사

식(3.10)에 시간근사를 도입한다. 가장 일반적으로 사용되는 방법이  $\theta$ -family 근사법이다.

$$\{ H \}^{n+1} = \{ H \}^n + \Delta t \left[ \Theta \{ \dot{H} \}^{n+1} + (1 - \Theta) \{ \dot{H} \}^n \right] \quad (0 \leq \Theta \leq 1) \quad (3.11)$$

Crank-Nicolson scheme( $\Theta = 0.5$ )이 비교적 수렴성이 좋은 것으로 알려져 있다.

### 3.3.4 비선형방정식의 해법

식(3.10)은 비선형이고 비대칭이다. 따라서 전체 요소를 합친 행렬식도 비선형이고 비대칭이다. 이 식을 풀기위해서 축차근사법(iteration method)을 도입해서 선형화한 대수식(algebraic equation)을 사용하여 근사해를 구한다. 그 중 직접 축차근사법(direct iteration method)은 계산 시간이 비교적 많이 든다는 단점이 있으나 알고리즘이 간단하고 프로그램으로 구현하기 쉬운 장점이 있다.

$$\begin{aligned} & [M^e(T^e)^n] \{ H^e \}^{n+1} + \Theta \Delta t [K^e(T^e)^n] \{ T^e \}^{n+1} \\ & = [M^e(T^e)^n] \{ H^e \}^n + (1 - \Theta) \Delta t [K^e(T^e)^n] \{ T^e \}^n \\ & \Delta t \left( \Theta \{ F^e(T^e)^n \}^{n+1} + (1 - \Theta) \{ F^e(T^e)^n \}^n \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

식(3.12)에서  $n=0$ 일 때 각 부분의 온도와 엔탈피는 초기조건값을 사용한다. 다음  $n=1$ 일 때의 값을 축차 근사법을 이용하여 해를 구하는 과정을 오차가 정해진 범위내에 들어올 때까지 반복한다. 일반적으로 오차는 전체 절점값의 실효값(root-mean-square value)을 사용한다[21].

$$\left[ \frac{\{ \Delta H \}^T \{ \Delta H \}}{\{ H \}^T \{ H \}} \right]^{1/2} \leq \varepsilon \quad (3.13)$$

$\epsilon$  값은  $10^{-3}$ 을 사용한다.

#### 4. 실험

본 연구에서 개발한 유한요소 모델을 검증하기 위하여 순수 알루미늄을 사용하여 용탕주조 공정 동안에 온도변화를 측정하여 비교하였다.

실험조건은 Table 1 과 같다. K-type 열전대를 사용하였고, 출력된 전압신호를 AD 변환기를 사용하여 PC 에 저장하였다. 온도측정은 세점에서 수행되었다. 각각 몰드의 한 가운데, 프리폼 절반 높이에서 몰드 벽에서 1cm 떨어진 점, 그리고 몰드 외벽에 바닥에서 2cm 떨어진 점이다. 실험장치의 개념도는 Fig.4 와 같다. 그리고 해석에서 몰드 바닥면을 단열로 가정하였기 때문에 실험에서도 이 조건을 만족시키기 위해 바닥에 단열재를 사용하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

2D 축대칭인 실린더형 시스템에 대하여 유한요소 모델을 개발하고 용탕주조시 일어나는 응고 기작을 수치적으로 모사하였다. 시간스텝도식으로 Crank-Nicolson 방법을 사용하였고, 시간 간격(time step)은 0.01 초로 하였다.

##### 5.1 온도분포

Fig.5 는 시간에 따른 용탕, 예비성형체, 금형과 펀치 일부분의 온도분포를 나타내고 있다. 초기조건에서 침투가 시작되어 시간이 지나수록 펀치와 금형에 닿는 용탕의 일부가 냉각되기 시작하며 침투가 끝나고 모서리에서부터 차츰 냉각되어 응고된 부분이 늘어난다. 이 후 금형과 펀치로 전달된

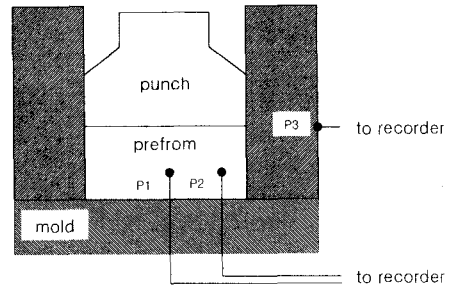


Fig. 4 Arrangement used for recording cooling curves

용탕의 열에 의해 온도가 상승하고 있으며 용탕의 가운데 부분은 응고가 일어나지 않은 부분으로서 타원형상으로 크기가 줄고있다. 마지막으로 예비성형체 윗부분에서 온도가 순수알루미늄의 상변화 온도인  $660^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어지면서 응고가 끝난다.

Fig.6 은 Fig.3 의 요소 분할도에 표시한 노드에서의 온도변화 곡선을 보여준다. 실선은 계산한 값이고, 점선은 측정된 값이다. 응고시간예측에 있어  $P_1$  에서 21 초 정도로 실험값과 계산값이 비교적 일치하고 있다. 응고가 완료되는 이 점을 지난 후에는 실험값이  $50^{\circ}\text{C}$  정도 상승한다. 이것은 금속이 응고되면서 응축이 일어나 몰드와 금속사이에 공간이 생기게 되어 열전달 계수가 작아지게 된다. 더불어 최종 응고부분이  $P_1$  의 위쪽에 있으

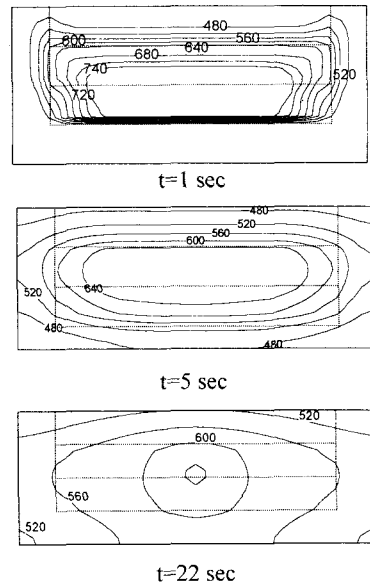


Fig. 5 Temperature distribution during infiltration and solidification

Table 1. Reference conditions for simulation

Conditions	
Initial temperature of molten metal	$780^{\circ}\text{C}$
Initial temperature of perform	$450^{\circ}\text{C}$
Initial temperature of mold & punch	$450^{\circ}\text{C}$
Fiber volume fraction	15%
Punch velocity	0.02m/s
Max. pressure of hydraulic press	25Mpa

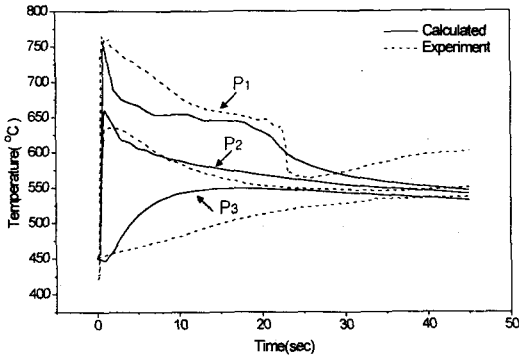


Fig. 6 Calculated and measured cooling curves

므로 이 점에서 방출된 잠열이 온도를 상승하게 한 것으로 생각된다.  $P_2$ 에서는 비교적 정확한 예측을 하고있음을 보여준다.  $P_3$ 에서는 공정초반에 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 몰드의 열전도계수가 온도변화에 영향을 받지 않는다고 가정했기 때문이다. 몰드의 초기온도와 최고온도에서 열전도 계수의 차이가 실제로 존재한다. 해석에서는 두 온도에 해당하는 열전도 계수의 중간 값을 사용하였으나, 실제 몰드의 열전도 계수는 온도가 증가하면 그 값도 커진다. 따라서 공정초기에는 해석에서 사용된 열전도 계수가 실제 값보다 크므로 실험값보다 빨리 온도가 상승하는 것으로 나타나게 된다.

## 5.2 응고완료시간

개발한 프로그램에서 초기 온도 조건을 바꾸어 가면서 응고완료시간의 변화를 살펴보았다. 응고 완료 시간은 침투 시작을 기점으로 하여 예비성형체에 침투된 용탕과 침투되지 않은 용탕이 모두 응고가 끝나는 점까지의 시간으로 정의하였다.

Fig.7에 용탕, 몰드, 예비성형체의 초기온도에 따른 응고완료시간의 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 용탕과 몰드의 초기온도에는 비교적 큰 영향을 받고 있으며 예비성형체의 초기온도에는 별 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이것은 상대적인 열용량의 차이가 몰드와 기지재는 금속이므로 세라믹 재질의 예비성형체 보다 크므로 응고완료 시간에 미치는 영향이 크게 나타난다.

## 6. 결론

본 연구를 통해 용탕주조를 이용한 금속복합재료 제조시 일어나는 상변화를 수반한 열전달을 해석

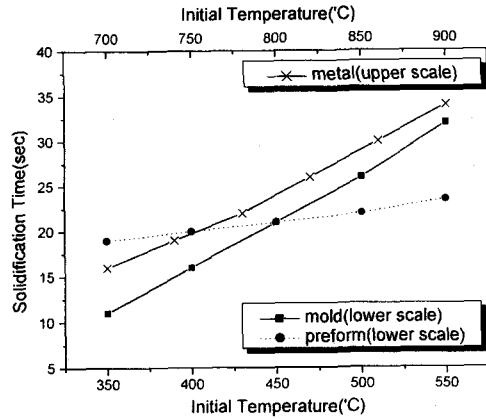


Fig. 7 Effect of initial temperature of parts on the solidification time

하는 축대칭, 2D 유한요소 프로그램을 개발하였다.

1. 개발한 프로그램을 이용하여 각 부분에서의 냉각곡선과 시간대별 온도분포를 구하였고, 이를 통해 기준조건에서는 22 초에 응고가 완료되며 예비성형체의 윗부분에서 마지막으로 응고가 일어난다.
2. 용탕주조 공정에서 측정된 냉각곡선과 해석에서 구한 냉각곡선이 비교적 일치하고 있으며, 개발한 프로그램이 실제 공정을 유사하게 예측하는 것으로 판단된다.
3. 응고완료시간은 주로 용탕과 금형의 초기온도에 영향을 받으며 예비성형체의 초기온도에는 별로 영향을 받지 않는다.

## 참고문헌

- (1) T.W. Clyne and J.F.Mason, 1987, "The Squeeze Infiltration Process for Fabrication of MMCs," *Metall. Trans.*, V.18A, pp.1519-1530
- (2) 한경섭, 김영한, 1992, "금속복합재료의 제조와 응용," 대한기계학회지, 32 권 1 호, pp46-56
- (3) A. Mortensen, L.J. Masur, J.A. Cornie and M.C. Flemings, 1989, "Infiltration of Fibrous Preforms by a Pure Metal:Part I,II," *Metall. Trans.*, V.20A, pp.2535-2557
- (4) 안인혁, 2000, "용탕주조를 이용한 금속복합재료의 침투와 열전달해석," 포항공대석사학위논문
- (5) H. Hatta and M. Taya, 1985, "Effective Thermal Conductivity of a Misoriented Short Fiber Composite," *J. of Appl. Phys.*, V.58, No.9, pp.2478-2486
- (6) G.S. Reddy, W.J. Mascarenhas and J.N. Reddy, 1993, "Numerical Simulation of Solidification of Molten Aluminum Alloys in Cylindrical Molds," *Metall. Trans. B*, V.24, pp.677-684