

# 용탕주조법을 이용한 금속복합재료의 침투와 열전달 해석

안인혁\* · 정창규\*\* · 한경섭\*\*\*

## Numerical Analysis of Infiltration and Heat Transfer of Squeeze Casting for MMCs

I.H. Ahn, C.K. Jung and K.S. Han

**Key Words:** Squeeze casting, metal matrix composite(MMCs), Infiltration, Heat transfer

### Abstract

The process of squeeze casting for metal matrix composites (MMCs) has been simulated numerically by using finite difference method. The governing equations to describe fluid flow through porous medium and heat transfer are applied to two dimensional model which is similar to a real system. A computational code has been developed to solve this problem. The influence on infiltration kinetics and solidification time of several parameters is investigated. Cooling curves and temperature distribution with time and position is also shown. The result can be used to design the squeeze casting for MMCs.

### 1. 서론

금속복합재료는 경량의 기지금속에 세라믹 단섬유를 보강하여 비강도, 비강성, 내열성, 내마모성을 향상시키고자 사용되는 재료이다. 내연기관 부품부터 우주, 항공 및 방위산업에서 기능재로서 각광을 받고 있을 뿐 아니라 기계, 전기 및 전자산업 등의 특수 용도에 적합한 구조재료로서도 관심을 받고 있다[1,2]. 금속복합재료 제조방법 중에서 용탕주조법은 용탕에 압력을 가하여 보강재로 만들어진 예비성형체에 용탕을 침투시켜서 제조하는 방법이다. 이 방법은 일반 주조공정의 기술과 장비를 사용할 수 있어 다른 제조방법에 비해싼 비용으로 대량 생산이 가능하며 가압에 의한 기지 금속과 보강재간의 젖음성 향상으로 보강재가 균일하게 분포된 복합재를 생산할 수 있다는 장점이 있어 주목을 받고 있다.

용탕주조법을 통한 제조 가능성과 제조물의 건

전성과 미세조직은 침투와 열전달에 의해 결정되므로 침투 기구와 응고 기구에 대한 해석이 필요하다. 이전의 연구들은[3-7]은 금형으로의 열전달이 없다고 가정하고 일차원 또는 이차원 해석을 수행하였다. 이러한 해석들은 예비성형체 외의 다른 부분들로의 열손실을 고려하지 않고 있으므로 실제 공정에 적용할 수 없다.

본 연구에서는 용탕주조법을 이용하여 단섬유 강화 복합재료를 제조하는 공정에 가까운 경계조건을 갖는 시스템을 설정하고, 유한 차분법을 이용하여 용탕의 침투와 상변화를 수반하는 열전달 해석을 수행하는 프로그램 모듈을 개발하였다. 이를 이용하여 시간에 따른 온도분포와 용탕이 받는 압력변화와 여러 공정변수에 따른 침투가능깊이와 응고완료시간의 변화를 해석하였다.

### 2. 이론

#### 2.1 모델

##### 2.2.1 지배방정식

단섬유(short fiber)로 만들어진 부피분율  $V_f$ 의 예비성형체는 기공율(porosity)이  $(1 - V_f)$ 인 다공 매질(porous medium)로 생각할 수 있다. 그

\* 대우자동차  
\*\* 포항공과대학교 대학원  
\*\*\* 포항공과대학교 기계공학과

러면 예비성형체 내에서의 유동을 지배하는 방정식은 Darcy equation이며 다음 식과 같다.

$$v = -\frac{K}{\mu}(\nabla P - \rho_m g) \quad (1)$$

용탕은 비압축성이므로 연속방정식이 성립한다.

$$\nabla v = 0 \quad (2)$$

예비성형체 내에서 용탕과 섬유 사이에 열전달이 일어나므로 각각의 재료에 대해 열전달 식을 고려하여야 한다. 그러나 섬유의 반경이 매우 작아 단위 부피 내에 열전달 면적이 매우 크므로 용탕과 섬유 사이에 순간적으로 열평형을 이룬다고 가정하였다[3]. 열전달 식은 다음과 같다.

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_m c_m v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_c \nabla T) \quad (3)$$

여기서  $v$ 는 예비성형체 내에서의 용탕의 속도로 침투해석을 통해 얻어진다. 이외 몰드, 침투되지 않은 예비성형체, 펀치에서의 열전달 식은 다음과 같다.

$$\rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

## 2.2.2 초기조건과 경계조건

본 연구에서는 Fig.1과 같은 두 개의 시스템에 대하여 해석을 수행하였다.

초기조건( $t=0$ )으로서 용탕을 침투시키기 전의 금형, 펀치, 예비성형체는 각각 금속의 녹는점보다 낮게 예열시킨다. 용탕은 금속의 녹는점 이상의 과열된 온도로 침투된다. 시스템 1의 경우에는 예비성형체로 침투하기 직전의 용탕의 온도가 침투되는 동안 일정하게 유지되는 반면 시스템 2는 금형과 펀치로의 열전달에 의해 온도가 변한다. Fig.1에서 시스템 1의 경계 (1), (2), (3)와 예비성형체의 아래쪽 경계면과 시스템 2의 경계 (1), (2)에서는 공기와 대류에 의한 열전달이 있고, 시스템 2에서의 경계 (3), (4)에서는 일정한 온도로 유지된다고 가정하였다.

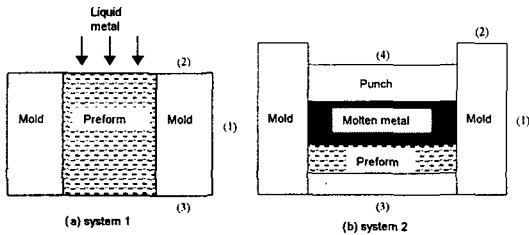


Fig.1 Geometry of systems for analysis

예비성형체와 용탕의 경계면에서의 조건은 기존 연구의 가정과는 다르게 유속(flow rate), 즉 펀치속도(punch velocity)가 일정한 것으로 가정하였다.

침투머리에서의 저항압력인 capillary pressure는 다음과 같은 식으로 나타난다[8].

$$P_c = -\frac{4V_f \gamma \cos \theta}{d_f(1-V_f)} \quad (5)$$

## 2.2.3 물리상수

침투율에 관하여 Langmuir's equation은 섬유 배향에 평행한 유동일 때의 식이고 Happel's equation은 섬유 배향에 수직인 유동일 때의 식이며 각각 다음과 같이 나타난다.

$$K = \frac{r_f^2}{4V_f} \left( -\ln V_f - \frac{3}{2} + 2V_f - \frac{V_f^2}{2} \right) \quad (6)$$

$$K = \frac{r_f^2}{8V_f} \left( -\ln V_f + \frac{V_f^2 - 1}{V_f^2 + 1} \right) \quad (7)$$

여기서 임의로 배열된 단섬유 예비성형체의 침투율은 이 두 값의 평균값이라 가정하였다.

용탕이 식으면서 섬유 주위에서부터 응고가 일어난다고 가정할 수 있다[3]. 따라서 섬유의 지름과 부피분율이 커지는 것으로 생각할 수 있다. 새로운 섬유의 지름과 부피분율은 다음 식으로 구해진다.

$$V_{sf} = (1 - V_f)g_s + V_f \quad (8)$$

$$r_{sf} = \sqrt{\frac{V_{sf}}{V_f}} r_f \quad (9)$$

용탕 온도에 따른 점성의 변화와 3차원 임의로 배열되어 있는 실린더 모양의 섬유로 강화된 단섬유 보강 복합재료에서의 열전도 계수는 각각 다음과 같다.

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (10)$$

$$k_c = k_m \left( 1 - \frac{V_f(k_m - k_f)[0.5(k_f - k_m) + 3k_m]}{k_m(k_f - k_m)(1.5 - V_f) + 3k_m^2} \right) \quad (11)$$

## 2.2.4 엔탈피법

용탕의 상변화를 동반한 열전달 해석을 위해 엔탈피를 사용하는 방법을 사용했다. 식.3을 엔탈피에 관한 식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\rho_c \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k_c \nabla T) - \rho_m c_m v \cdot \nabla T \quad (13)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 온도분포

해석에서 쓴 기준 조건은 Table 1과 같다. 시스템 1에서 침투 시작 후 3.54초에 침투에 필요한 압력이 유압 프레스가 낼 수 있는 최대 압력(30MPa)에 도달하게 되어 침투가 끝났다. 그 때까지 용탕이 침투한 거리는 66.5mm로 나타났다.

Fig.3은 시스템 2에서 시간에 따른 용탕, 예비성형체, 금형과 펀치의 일부분의 온도 분포를 나타내고 있다. 시간이 경과됨에 따라 금형과 펀치로 열전달이 일어나는 모습이 보이며 온도가 녹는점인 부분, 즉 응고가 일어나고 있는 부분이 타원형의 형상으로 그 크기가 줄어들고 마지막으로 예비성형체 윗부분에서 응고가 일어남을 보여준다.

Fig.4는 Fig.2의 요소분할도에 표시한 노드에서의 온도 변화 추이를 보여주고 있다. T<sub>1</sub>은 예비성형체와 닿고 있는 용탕의 온도로 침투하는 동안 예비성형체 내로 침투하여 냉각된 용탕과 예비성형체와의 열전달에 의해 온도가 감소하였다가 위쪽의 용탕이 계속 내려오므로 다시 온도가 증가한다. 예비성형체의 중앙인 T<sub>2</sub>의 경우는 침투가 일어나면 약 730℃로 증가하였다가 천천히 냉각되어 22초에 응고가 완료된다. 아래쪽 모서리 부분인 T<sub>3</sub>에서는 침투가 일어나자마자 응고가 되어 급속히 냉각됨을 볼 수 있었다. 금형의 외벽 T<sub>4</sub>에서는 18초에 가장 높은 605℃로 가열되어 공기에 의해 서서히 냉각된다.

#### 3.2 압력 변화

시스템 1에서 입구에서의 압력 변화는 처음에는 완만하게 압력이 증가하다가 침투 깊이가 커지고 금형으로의 열손실로 외벽에 응고가 일어나

Conditions	
Initial temperature of molten metal	780℃
Initial temperature of preform	450℃
Initial temperature of mold & punch	450℃
Fiber volume fraction	15%
Punch velocity	0.016m/s
Maximum pressure of hydraulic press	30MPa

Table 1. Reference condition for simulation

게 됨으로 압력이 크게 증가하여 최대 압력에 도달하였다. 부피분율이 큰 예비성형체일수록 보다 짧은 시간 내에 최대 압력에 도달하게 되며 따라서 침투 깊이가 짧아진다.

시스템 2에서 시간에 따른 입구에서의 압력은 거의 선형적으로 증가하여 423kPa에 도달했을 때 침투가 끝난다. 따라서 기준 조건하에서는 20mm 예비성형체에 침투하기 위해서는 최소 423kPa의 압력이 필요하다.

#### 3.3 최대 침투 가능 깊이

시스템 1에서 공정변수들이 미치는 영향을 살펴보았다. 초기온도를 높일수록 침투 깊이는 깊어지는 것으로 나타났다. 금형 초기온도가 낮을수록 용탕의 금형으로의 열전도 효과가 커짐으로 침투가능 깊이는 짧아졌다. 반대로 온도가 알루미늄의 녹는점에 근접함에 따라 크게 증가폭이 커졌다. 예비성형체의 부피분율이 커질수록 섬유와의 열평형으로 용탕이 잃어버리는 열이 커지고 섬유 주위에 응고가 더 많이 일어나게 되어 침투율을 감소시킨다. 결국 같은 길이의 침투에 대해 입구에 걸리는 압력이 더 커지므로 최대 침투가능 깊이는 감소하였다. 예비성형체의 초기 온도가 낮을수록 그 감소하는 정도가 커짐을 알 수 있고 부피분율 30%의 경우 예비성형체의 초기온도가 300℃인 경우는 침투가 불가능하나 600℃이면 66mm 깊이로 침투 가능하다는 결과가 나왔다. 따라서 예비성형체의 초기온도가 높을수록 침투가능 깊이는 깊어지며 부피분율이 큰 예비성형체에 대하여 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 펀치의 속도가 커질수록 침투깊이가 깊어짐을 알 수 있었는데 이것은 용탕을 빨리 침투시킬수록 같은 거리를 침투할 때 금형으로의 열전도에 의한 열손실이 적어짐으로 인한 것이라 사료된다.

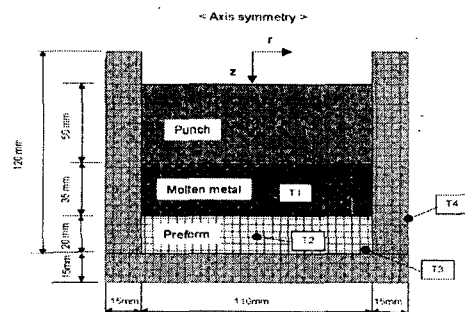


Fig. 2 Mesh diagram for numerical analysis

### 3.4 응고완료시간

시스템 2에 대하여 공정변수가 응고완료시간에 미치는 영향을 살펴보았다. 용탕의 초기온도가 올라갈수록 응고에 필요한 시간은 길어진다. 온도가 녹는점인 용탕도 20mm 예비성형체에 침투 가능하며 응고완료에 걸리는 시간은 27여초로 나왔다. 용탕의 초기온도 900℃이하까지는 50초 이내에 응고가 완료되는 것으로 나타났다. 금형의 초기 온도가 300℃이면 29초만에 응고가 완료되며 600℃이면 응고완료에 57초의 시간이 걸리는 것으로 나타나 비교적 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 예비성형체의 초기온도가 300℃에서 600℃로 증가할 때 응고완료시간은 선형적으로 증가하여 약 7초 정도 길어졌다. 따라서 큰 영향이 없었다.

### 4. 결론

1) 시스템 2에 대하여 각 노드에서의 냉각곡선과 시간대별 온도분포를 구하였고 이를 통해 기준조건에서는 42.1초에 응고가 완료되며 예비성형체 윗부분에서 마지막으로 응고가 일어난다.

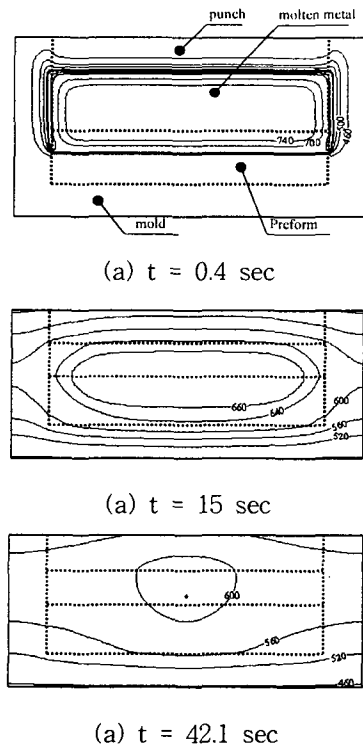


Fig. 3 Temperature distribution of system 2

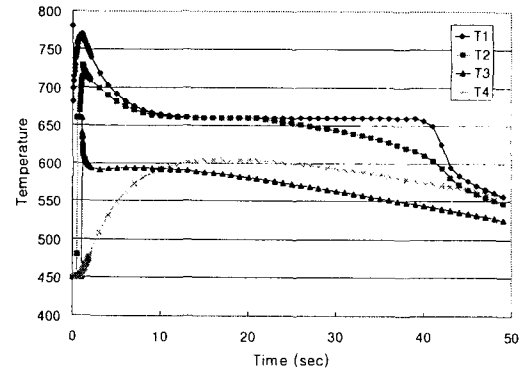


Fig. 4 Calculated cooling curves for system 2

- 2) 용탕이 침투깊이는 각 부분의 초기 온도와 유입속도에 영향을 받는다. 특히 큰 부피분율의 예비성형체에 대해서는 예비성형체의 초기온도에 크게 영향을 받는다.
- 3) 용탕주조 공정에서 응고완료시간은 주로 용탕과 금형의 초기온도에 영향을 받으며 예비성형체의 부피분율과 초기온도에는 별로 영향 받지 않는다.

### 후 기

본 연구는 1999년도 한국과학기술연구원의 경량 금속 복합재료 개발의 위탁연구로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. T. W. Clyne and J. F. Mason, Metallurgical Transaction, Vol. 18A, 1987, pp. 1519-1530.
2. 한경섭, 김영한, 대한기계학회지, 제32권, 제1호, 1992, pp. 46-56.
3. A. Mortensen, L.J. Masur, J.A. Cornie and M.C. Flemings, Metallurgical Transactions, Vol. 20A, 1989, pp. 2535-2557.
4. X. Tong and J. A. Khan, J. of Heat Transfer, Vol.118, 1996, pp. 173-180.
5. Z. H. Xia, Y. Zhou, Z. Mao and B. Shang, Metallurgical Transaction, Vol. 23B, 1992, pp. 295-302.
6. T. Yamauchi and Y. Nishida, Acta metall.mater., Vol. 43, 1995, pp. 1313-1321.
7. 이진승, 포항공과대학교 석사학위논문, 1998.
8. A.Mortensen and J.A. Cornie, Metallurgical Transactions, Vol. 18A, 1986, pp.1160-1163.