

〈論 文〉

분무된 금속액적의 급속응고과정에 관한 열전달 해석

안증선* · 박병규* · 이준식** · 안상호***

(1993년 7월 30일 접수)

Heat Transfer Analysis on the Rapid Solidification Process of Atomized Metal Droplets

J. S. An., B. K. Park, J. S. Lee and S. H. Ahn

Key Words: Rapid Solidification Process(급속응고과정), Undercooling(과냉각), Recalescence(재열현상), Solid Fraction(고상분율), Heat Balance Integral Method(열평형적분법)

Abstract

A mathematical model has been developed for predicting kinematic, thermal, and solidification histories of atomized droplets during flight. Liquid droplet convective cooling, recalescence, equilibrium-state solidification, and solid-phase cooling were taken into account in the analysis of the solidification process. The spherical shell model was adopted where the heterogeneous nucleation is initiated from the whole surface of a droplet. The growth rate of the solid-liquid interface was determined from the theory of crystal growth kinetics with undercooling caused by the rapid solidification. The solid fraction after recalescence was obtained by using the integral method. The thermal responses of atomized droplets to gas velocity, particle size variation, and degree of undercooling were investigated through the parametric studies. It is possible to evaluate the solid fraction of the droplet according to flight distance and time in terms of a dimensionless parameter derived from the overall energy balance of the system. It is also found that the solid fraction at the end of recalescence is not dependent on the droplet size and nozzle exit velocity but on the degree of subcooling.

기 호 설 명

A_p : 입자의 단면적	f_s : 고상분율
a, b, c : 식(17)의 계수들	g : 중력가속도
Bi : Biot수, $Bi = hR_0/k_s$	H : 계의 엔탈피
C_D : 항력계수	H_{SM} : 응해온도에서 고상의 엔탈피
c : 비열	h : 대류 열전달계수
D : 입자의 직경	K : 식(2)에서 정의된 변수
D_{LM} : 용융금속의 확산율	K_M : 동성장계수
E_a : 활성화에너지	k : 열전도율
	L : 잠열
	Pr : Prandtl수, $Pr = \nu/\alpha$
	r : 무차원 입자반경, $r = R/R_0$
	r_f : 무차원화된 상경계면의 반경

*서울대학교 대학원

**정회원, 서울대학교 기계공학과

***산업과학기술연구소 금속재료연구소

- R : 입자의 반경반향좌표
- R_0 : 입자의 반경
- R_f : 상경계면의 반경
- Re : Reynolds수, $Re = u_r D / \nu$
- Ste : Stefan수, $Ste = c_s (T_m - T_\infty) / L$
- T : 온도
- T_i : 계면온도
- T_m : 용해온도
- T_N : 핵생성온도
- T_r : 재열현상이 끝나는 온도
- T_∞ : 주위 가스온도
- t : 시간
- t_r : 입자가 완전 응고하는데 걸리는 시간
- t^* : 식(21)로 정의되는 무차원 시간
- U_i : 노즐출구속도
- u : 축방향속도
- u_r : 상대속도
- v : 반경방향속도
- V_p : 입자의 부피
- V_f : 계면의 성장속도
- x : 축방향좌표
- x_s : 상사해를 적용할 수 있는 최소거리
- y : 반경방향좌표

그리스문자

- α : 열확산계수
- β : 식(12)의 상수
- ΔT^i : 계면과냉도, $\Delta T^i = T_m - T_N$
- δ : 상경계 두께
- ϵ_r : 난류와 점성계수
- η : 식(2)에 정의된 상사변수
- θ : 무차원 온도, $\theta = (T - T_\infty) / (T_m - T_\infty)$
- θ_N : 무차원 핵생성 온도
- ν : 동점성계수
- ρ : 밀도
- τ : 무차원 시간, $\tau = ast / R_0^2$
- ϕ : 무차원 온도 좌표, $\phi = c_l (T - T_\infty) / L$
- ψ : 무차원 엔탈피, $\psi = (H - H_{sm}) / L$

하첨자

- b : 입자
- f : 상경계
- g : 가스
- l : 액상
- s : 고상

1. 서 론

금속의 조직을 개량함으로써 기계적 성질이 우수한 소재를 얻기 위해 액상의 금속이 고상으로 상변태를 일으킬 때 일어나는 여러 현상에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 시도의 하나로서 금속응고과정에 대한 연구는 1960년대 초반에 시작되었으며¹⁾ 가스분무미립화법, 멜트스피닝법 등에 의해 공업적으로 대량생산이 가능해짐에 따라 이러한 공정은 새로운 산업분야로 자리잡게 되었다.

금속응고시에는 결정립의 미세화, 편석의 감소 등 서냉응고된 재료에서는 나타나지 않는 특성을 얻을 수 있으며 이와 같은 금속응고에 의한 특유의 성질을 얻기 위해서는 응고시 과냉도를 최대한 크게 하는 것이 유리하다. 액상의 과냉도를 크게 하는 방법으로는 액상이 온도를 급격히 강하시키는 방법과 액상내의 불균열 핵생성 위치를 모두 제거하여 균일 핵생성에 의해 응고가 시작될 때까지 액상의 온도를 강하시키는 방법이 있다. 분무미립화법에서는 액상의 금속을 원심력이나 가스 등을 이용하여 미세하게 무화시킴으로써 유력한 핵생성 위치를 제거하여 큰 과냉각을 얻을 수 있게 된다. 종래의 서냉시에는 고상-액상 경계면의 성장속도가 느리기 때문에 고상-액상 경계면에서 국소적인 열역학적 평형이 이루어지고 계면의 온도는 용해온도라고 가정할 수 있다. 반면에 금속응고시에는 큰 과냉각이 얻어지므로 계면온도를 용해온도로 가정할 수 없고 미지의 계면온도에 의해 자유도가 증가하게 되므로 성장속도와 과냉각에 의해 제어되는 계면동역학의 개념이 필요하다.

응고과정을 해석하기 위해 사용하고 있는 모델에는 부피응고모델, 구형 포피응고모델, 축대칭응고모델 등이 있다. 응고과정은 재질과 핵생성기작에 따라 달라지므로 통일된 모델은 없고 구형 포피응고모델과 축대칭응고모델이 응고과정을 해석하기 위해 채택되고 있다.

Shingu와 Ozaki⁽¹⁾는 순금속의 금속응고에 대한 열전달 모델에서 과냉각을 고려하기 위하여 용해온도가 낮은 임의의 온도를 고상-액상 계면의 온도로 가정하고 이 온도에서 등온응고가 일어난다고 간주하여 냉각속도를 계산하였다. Levi와 Mehrabian⁽²⁾은 미세한 금속분말 제조시 금속응고현상을 해석하기 위하여 엔탈피모델을 이용하였으며 평행상태응

고시에 액적표면상의 한점에서 생성된 핵이 직경축을 따라 일정한 곡률반경을 가지며 응고하는 것으로 가정하였다. Clyne⁽³⁾은 미지인 고상-액상계면의 온도를 계산하기 위하여 새로운 경계조건을 도입함으로써 박편제조시의 열전달현상을 계산하였다. Gill⁽⁴⁾은 액적의 중심에서 핵생성이 일어나는 경우에 대하여 준이동 경계근사법을 이용하여 계면의 이동속도를 계산하였다. Levi⁽⁵⁾는 균일 핵생성이 일어나는 경우에 대하여 Newton 냉각조건이 유지된다고 가정하고 응고시의 열전달량을 계산하였다.

본 연구에서는 순금속에 대하여 응고과정을 액상냉각, 재열현상(recalescence), 평형상태응고, 고상냉각의 4단계로 나누어 해석하였다. 급속응고시의 과냉각을 고려하기 위해서 계면동역학에 의해 결정되는 성장속도로부터 재열현상에 의한 고상분율과 재열현상이 끝나는 온도를 결정하였다. 평형상태응고시에는 표면에서 생성된 핵이 동심원을 그리면서 내부로 응고가 진행되며, 응고된 외피에서 경계조건을 만족하도록 온도분포를 가정하고 열평형적분법을 사용하여 계면의 거동 및 고상분율을 구하였다.

2. 가스 및 입자의 거동모델

급속분말 제조 및 분무주조 공정에서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 용탕에 들어있는 용융금속이 송출관을 통하여 아래로 흘러 내리고 노즐출구에서 나온 고속의 환상가스제트에 의해 5~200 μm 정도의 작은 알갱이로 부서지게 된다. 이렇게 생성된 금속액적은 주위의 가스에 의해 급속응고된다.

액적이 응고되는 과정은 금속의 재질 및 핵생성 기작에 따라 달라지게 되므로 통일된 모델은 없다. 본 연구에서는 표면에서 핵이 생성되어 동심원을 그리면서 내부로 응고해 가는 과정에 대하여 다음

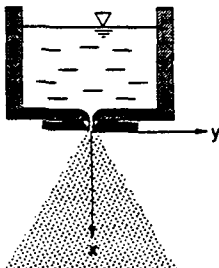


Fig. 1 Schematic representation of gas atomization

과 같이 가정하여 해석한다. 첫째, 가스가 용융금속에 닿는 즉시 액적이 구형이 되도록 용융금속의 표면장력은 충분히 크다. 둘째, 응고과정중의 밀도차에 의한 체적변화는 무시하고 전응고과정을 통하여 상경계면에서의 수지결정상의 형성 및 표면장력에 의한 과냉효과는 무시한다. 셋째, 비행중에 입자간의 충돌은 무시한다.

가스분사된 액적의 응고과정은 가스와 액적 사이의 열전달계수에 의해 결정되며, 열전달계수는 분말과 가스의 상대속도에 의해 결정된다. 따라서 응고과정을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 가스와 액적의 속도를 계산하여야 한다. 노즐출구를 통과한 가스의 속도분포는 원형제트에 대한 상사해로부터 구할 수 있다. 분무법에 사용되는 실제 노즐의 출구형상은 원형단면이 아니지만, 노즐출구에서 조금 떨어진 부분(10~50 mm)에서부터는 원형제트에 의한 속도분포와 유사한 경향을 보인다. 원형제트에 대한 상사해를 구하면 다음과 같다⁽⁶⁾

$$u_g = \frac{3K}{8\pi\epsilon r x} \frac{1}{\left(\frac{1}{4}\eta^2 + 1\right)^2}$$

$$v_g = \frac{1}{4x} \sqrt{\frac{3K}{\pi}} \frac{\eta - \frac{1}{4}\eta^3}{\left(\frac{1}{4}\eta^2 + 1\right)^2} \tag{1}$$

여기서,

$$\eta = \frac{y}{4\epsilon r x} \sqrt{\frac{3K}{\pi}}$$

$$K = 2\pi \int_0^\infty u_g^2 y dy$$

$$\epsilon r = 0.0161\sqrt{K} \tag{2}$$

이다.

노즐출구에서부터 상사해를 적용할 수 있는 최소 거리 x_s 까지는 가스의 출구속도가 일정하다고 가정하면 분사되는 가스의 질량유량으로부터 분사가스의 출구속도를 알 수 있다. 식(1), (2)로부터 x_s 는 다음 식으로 주어진다.

$$x_s = \frac{3K}{8\pi\epsilon r U_i} \tag{3}$$

노즐출구에서 축방향좌표가 x_s 보다 큰 경우에는 상사해로부터 속도분포를 구한다.

입자의 속도는 입자와 가스의 상대속도에 대한 운동량방정식으로부터 얻어진다. 입자가 중력 및 항력에 의해서만 가속된다고 가정하면 입자의 운동

방정식은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\frac{du_p}{dt} = g + \frac{A_D C_D \rho_g}{2 \rho_p V_p} (u_g - u_p) |u_g - u_p| \quad (4)$$

$$C_D = 0.28 + \frac{6}{Re^{1.2}} + \frac{21}{Re} \quad (0.1 \leq Re \leq 4000) \quad (5)$$

3. 입자의 열전달 해석모델

비행중인 입자의 열적 거동을 예측하기 위해서 온도와 함께 엔탈피를 종속변수로 사용하는 엔탈피 모델⁽⁹⁾을 이용한다. 온도 T 에서 계의 엔탈피를 H 라 하면 H 는 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽²⁾

$$H - H_{SM} = [L + c_l(T - T_m)](1 - f_s) + c_s(T - T_m)f_s \quad (6)$$

여기서, H_{SM} 은 용해온도에서 고상의 엔탈피이고 T_m 은 용해온도이다. 이 식을 무차원변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\psi = (1 + \phi)(1 - f_s) + \frac{c_s}{c_l} f_s \phi \quad (7)$$

여기서,

$$\psi = \frac{H - H_{SM}}{L}, \quad \phi = \frac{c_l(T - T_m)}{L} \quad (8)$$

이다.

입자의 열이력은 대류열전달량이 복사열전달량에 비해 매우 크므로 대류항만을 고려하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\rho_p \frac{dH}{dt} = -\frac{6h(T - T_\infty)}{D} \quad (9)$$

또한 gas와 입자사이의 대류 열전달계수 h 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$h = \frac{[2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}]k_g}{D} \quad (10)$$

여기서, $Re = u_r D / \nu$ 이고 $u_r = |u_g - u_p|$ 이다.

식(9)를 무차원 변수인 ψ, ϕ, τ 로 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{d\psi}{d\tau} = -3Bi(\phi c_s / c_l + Ste) \quad (11)$$

이 식으로부터 주어진 시간에 대한 고상분율을 알 경우 시간에 따른 입자의 평균온도를 구할 수 있다. 고상분율을 구하기 위해서는 다음에 기술되는 각 응고과정에서의 열전달 특성을 고려하여야 한다.

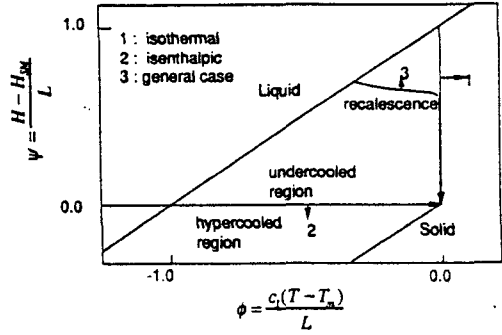


Fig. 2 Enthalpy-temperature diagram during solidification

입자의 열이력을 나타내는 엔탈피-온도선도를 Fig. 2에 나타내었다. 1번 과정은 과냉각이 없을 때의 평형상태 응고과정이며 용해온도로 일정한 등온응고과정이 된다. 2번 과정은 용해열에 해당하는 정도의 과냉각까지 핵생성이 억제될 수 있을 때 ($\psi \leq 0$)로서 외부로의 열방출이 없는 단열응고과정이다. 3번 과정은 과냉각이 존재할 때의 보통의 급속응고과정에 대한 경로이다. 과냉각에 의한 빠른 성장속도로부터 생성된 잠열이 외부로 방출되지 못하고 쌓여 계면의 온도를 급격히 상승시키다가 계면의 온도가 용해온도 근처에 왔을 때부터는 등온응고과정을 거치게 된다.

용융된 금속이 노즐에서 분사된 고속의 가스에 닿는 순간 미세한 분말로 부서지고 높은 표면장력에 의해 구형액적이 된다. 용해온도보다 50~200 K 정도 높게 과열된 급속액적은 핵생성 온도까지 냉각된다. 이 과정은 액상냉각과정이므로 고상분율이 0인 경우에 대해 식(11)로부터 액적의 온도를 구할 수 있다.

핵생성이 일어나기 전에 액상이 심하게 과냉된 경우에는 재열현상을 고려하여야 하며 이 경우에는 액상내의 원자나 분자가 이동하려는 구동력이 매우 커서 계면의 이동속도는 계면동역학에 의해 결정된다. Turnbull⁽¹⁰⁾에 의해 제시된 정상상태 연속성장 에 대한 계면의 성장속도는 다음과 같다.

$$V_f = \beta \left(\frac{D_{LM}}{\delta} \right) \exp\left(-\frac{E_d \Delta T^i}{T^i} \right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{L \Delta T^i}{RT_m T^i} \right) \right] \quad (12)$$

여기서, ΔT^i 와 T^i 는 계면과냉도 및 계면의 온도이고 β 는 Cahn 등⁽¹¹⁾에 의해 제안된 상수 1~100

이다. 아주 크지 않은 과냉각에 대해서 식(12)는 $V_f \cong K_M \Delta T$ 로 나타낼 수 있으며, 알루미늄의 경우 동성장계수(kinetic growth coefficient) K_M 은 약 $0.02 \text{ m/s} \cdot \text{K}$ 이다. 재열현상 중에 계면의 성장속도로부터 상경계면의 위치를 알 수 있고, 이때 액적의 고상분율은 $f_s = 1 - r_f^3$ 이 된다. 계산된 고상분율로부터 재열현상이 끝났을 때의 입자온도를 구할 수 있다.

계면이 과냉각되어 생성된 핵이 성장하는 경우, 성장속도가 매우 크기 때문에 상변화시 생기는 잠열은 외부로 빠져 나가지 못하고 계면의 온도를 상승시키게 된다. 이와 같은 재열현상이 일어나는 동안 계면의 온도는 증가하게 되고 성장속도는 점점 작아져서 잠열의 발생률과 외부로의 열방출이 같을 때 재열현상은 끝나게 된다. 재열현상이 끝나는 온도를 T_r 라 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \rho_p L V_p \frac{df_s}{dt} &= \rho_p L V_p \frac{df_s}{dR_f} K_M (T_r - T_m) \\ &= h (T_r - T_\infty) A_p \end{aligned} \quad (13)$$

재열현상이 끝난 후에는 계면의 온도가 거의 용해온도에 가까워지므로 상경계면에 대한 에너지 보존식으로부터 계면의 이동속도를 구한다. 재열현상이 끝난 후의 평형상태응고과정은 열평형적분법⁽¹²⁾을 이용하여 계면의 이동속도를 구한다. 액상영역은 용해온도로 일정하다고 보고 고상영역에서 경계조건을 만족하는 온도분포를 가정해서 계면의 이동속도를 구한다.

고상영역내의 열전달은 전적으로 전도에 의존하므로 1차원 열전도 방정식을 적용한다. 지배방정식과 경계조건을 무차원화하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (14)$$

$$\theta|_{r=r_f} = 1 \quad (15a)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=1} = -\text{Bi} \theta|_{r=1} \quad (15b)$$

$$\left. \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \right|_{r=r_f} = -\text{Ste} \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right) |_{r=r_f} \quad (15c)$$

$$\left. \frac{\partial r_f}{\partial \tau} \right|_{r=r_f} = \text{Ste} \left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=r_f} \quad (15d)$$

윗식들에 나타난 무차원변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_m - T_\infty}, \quad r = \frac{R}{R_0}, \quad r_f = \frac{R_f}{R_0}, \quad \tau = \frac{\alpha t}{R_0^2} \quad (16)$$

여기서, R_f 는 입자의 중심에서 상경계면까지의 거리이다.

열평형적분법을 적용하기 위하여 고상내의 온도분포는 다음과 같이 가정한다.

$$\theta = \frac{c + a(r - r_f) + b(r - r_f)^2}{r} \quad (17)$$

식(7)에서 경계조건 식들 (15a), (15b), (15c)를 만족하는 a, b, c 는 다음과 같다.

$$a = 1 + \frac{1}{\text{Ste}} \frac{r_f^2 + \text{Bi} r_f (1 - r_f) - A}{1 - r_f^2 + \text{Bi} (1 - r_f)^2} \quad (18a)$$

$$b = \frac{(1 - \text{Bi}) r_f}{1 - r_f^2 + \text{Bi} (1 - r_f)^2} - \frac{r_f + \text{Bi} (1 - r_f)}{1 - r_f^2 + \text{Bi} (1 - r_f)^2} a \quad (18b)$$

$$c = 1 \quad (18c)$$

여기서, A 는 다음과 같이 표시된다.

$$A = \sqrt{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}$$

$$A_1 = (2\text{BiSte} + 2\text{Bi}^2\text{Ste}) r_f,$$

$$A_2 = (\text{Bi}^2 - 4\text{Bi}^2\text{Ste}) r_f^2$$

$$A_3 = (2\text{Bi} - 2\text{Bi}^2 - 2\text{BiSte} + 2\text{Bi}^2\text{Ste}) r_f^3,$$

$$A_4 = (1 - \text{Bi})^2 r_f^4$$

무차원화된 전도방정식(14)의 양변을 고상영역에 대해 적분하고 상경계면의 에너지균형식(15d), 고상영역의 온도분포식(17)을 적용하여 정리하면 상경계면의 이동속도에 대한 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1 - 3r_f^2}{2} + \left(\frac{1}{3} - \frac{r_f}{2} + \frac{r_f^3}{6} \right) \frac{da}{dr_f} \right. \\ & + a \left(-\frac{1}{2} + \frac{r_f^2}{2} \right) + \left(\frac{1}{4} - \frac{2}{3} r_f + \frac{r_f^2}{2} - \frac{r_f^4}{12} \right) \frac{db}{dr_f} \\ & \left. + b \left(-\frac{2}{3} + r_f - \frac{r_f^3}{3} \right) + r_f^2 + \frac{r_f^2}{\text{Ste}} \right] \frac{dr_f}{d\tau} \\ & = r_f (a - 1) + b (1 - r_f^2) \end{aligned} \quad (19)$$

위식으로부터 상경계면의 위치를 알 수 있고 따라서 식(11)로부터 입자의 온도를 구하기 위한 고상분율을 계산할 수 있다. 상경계면의 위치는 4차 Runge-Kutta 방법으로 계산하여 구하였다.

액적이 완전히 응고된 후 고상에서의 냉각과정에서는 고상분율이 1인 경우에 대한 식(11)로부터 온도를 구할 수 있다.

4. 결과 및 검토

앞에서의 해석모델을 알루미늄, 니켈, 구리, 철

Table 1 Thermophysical properties of pure Al, Ni, Cu, Fe

Properties		Unit	Al	Ni	Cu	Fe
Melting temperature	T_m	(K)	933	1728	1256	1810
Heat of fusion	L	(J/kg) $\times 10^{-5}$	3.95	2.93	2.02	2.72
Specific Heat		(J/kg \cdot K) $\times 10^{-3}$				
Liquid	c_l		1.09	0.60	0.49	0.764
Solid	c_s		1.19	0.59	0.49	0.787
Thermal conductivity		(W/m \cdot K)				
Liquid	k_l		90.8	30	165	34.6
Solid	k_s		210.8	60	244	40.3
Thermal diffusivity		(m ² /s) $\times 10^5$				
Liquid	α_l		3.4	0.556	0.37	0.638
Solid	α_s		7.18	1.1	5.55	0.712
Density	ρ	(kg/m ³)	2700	8900	8933	7610
Kinetic coefficient	K_M	(m/s \cdot K)	0.02	0.012	0.021	0.02

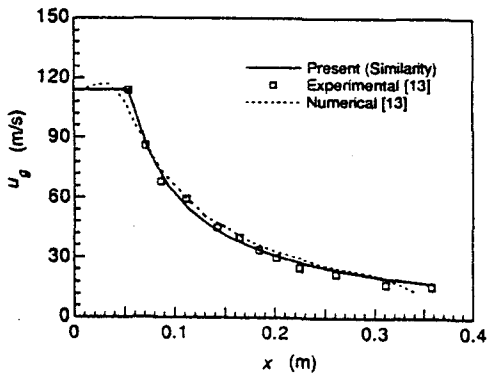


Fig. 3 Gas velocity along the center-line axis of the gas atomizer (gas flow rate = 2.7×10^{-3} m³/s)

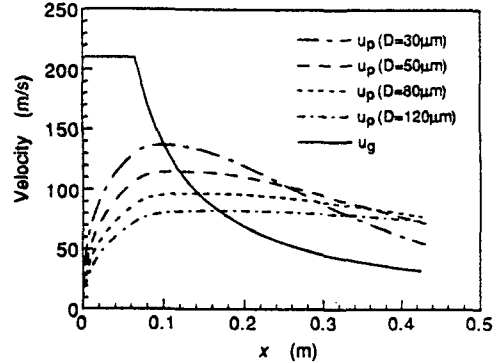


Fig. 4 Gas and droplet velocities along the center-line axis of gas atomizer (nozzle diameter = 10 mm, inlet velocity = 210 m/s)

등 순수 금속입자의 급속냉각과정에 대하여 적용하여 입자의 온도변화, 고상분율 등을 구하였다. 알루미늄 입자에 대한 결과들을 대표적으로 제시하였으며 가장 중요한 변수인 고상분율에 대해서는 4가지 금속입자에 대한 결과를 나타내었다. Table 1에 계산에 사용한 각 금속의 물성치를 표시하였다.

상사해로부터 계산된 분사기의 중심축에서의 분사가스의 속도를 Fig. 3에 나타내었다. 지수함수적으로 감소하는 Bewlay와 Cantor⁽¹³⁾의 실험 및 수치해석 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

분사가스의 중심축($y=0$)을 따라 비행하는 알루미늄 입자에 대하여 비행거리에 따른 가스 및 입자의 속도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 분사가스는 직경이 10 mm인 노즐에서 분사되는 상온(300 K)의 질소가스이다. 노즐출구속도가 210 m/s일 때 직경이 각각 30, 50, 80, 120 μ m인 입자의 거동을 나타내었다. 입자의 속도는 노즐출구에서부터 증가하다가 가스의 속도보다 커지는 시점부터 진행방향으로 항력이 작용함에 따라 감소하게 되며 결국은 종단속도에 도달하게 된다. 입자의 직경이 작을수

록 항력이 커지므로 가속도가 커서 가스유동에 대한 추종성이 높아지는 경향을 나타낸다.

Fig. 5는 가스에 대한 알루미늄 입자의 상대속도로부터 계산한 입자의 위치에 따른 열전달계수의 변화를 나타낸다. 입자가 비행함에 따라 열전달계수는 감소하다가 증가하게 되며 열전달계수가 최소가 되는 위치는 상대속도가 0인 곳이다. 입자의 직경이 커짐에 따라 가스와 입자의 속도차는 증가하지만 열전달계수는 감소함을 알 수 있다. 이는 속도차보다 입자의 크기가 열전달계수에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

비행거리에 따른 입자의 고상분율을 Fig. 6에 나타내었다. Maher 등⁽¹⁴⁾이 Al-7%Si 입자에 대하여 해석한 결과와 비교하여 잘 일치함을 알 수 있다. 입자가 클수록 응고되는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 예를 들어 노즐출구에서 모재까지의 거리가

400 mm인 경우, 입자의 직경이 30 μm 일 때는 모재에 닿기 전에 완전히 응고되지만 50 μm 일 때는 80% 정도 응고되며, 80 μm 일 때는 40% 정도 응고된다. 따라서 급속응고공정에서 분사노즐로부터 모재까지의 최적 거리는 입자 크기의 분포에 따라 결정됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 입자의 직경과 노즐출구속도에 따른 고상분율의 변화를 나타내고 있다. 정해진 고상분율에 도달하기까지 입자가 비행한 거리는 노즐출구에서의 분사가스의 속도가 크고 입자의 크기가 클수록 길어진다. 이는 분사가스의 속도가 클 때에는 열전달계수가 증가하여 입자의 응고시간은 단축되지만 이에 비해 상대적으로 입자의 속도도 증가하여 비행거리가 길어지기 때문이며 입자의 크기가 큰 경우에는 열전달계수가 입자의 직경의 제곱근에 반비례하므로(식(10) 참조) 응고시간이 많이 소요되고 따라서 비행거리가 길어지기 때문이다. 한편, 정해진 위치에 도달할 때의 입자들의 고상분율을 살펴보면 입자의 크기가 작고 노즐출구에서의 분사가스속도가 작을수록 높은 고상분율을 얻게 됨을 알 수 있다. 따라서 분무화되는 입자의 크기가 크고 분사가스의 속도가 클수록 모재를 노즐에서부터 더 멀리 떨어진 곳에 위치시켜야 함을 알 수 있다.

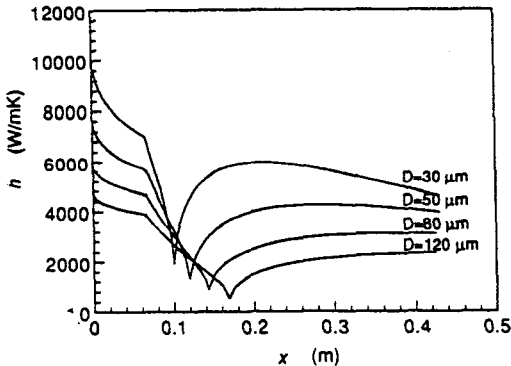


Fig. 5 Heat transfer coefficient along the center-line axis of gas atomizer (nozzle diameter=10 mm, inlet velocity=210 m/s)

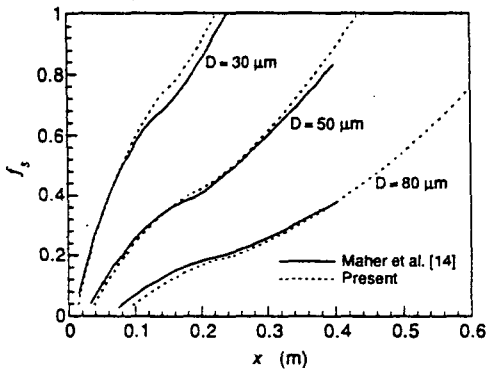


Fig. 6 Solid fraction of Al droplet along the center-line axis of the gas atomizer ($U_i=210$ m/s, $\Delta T=15$ K)

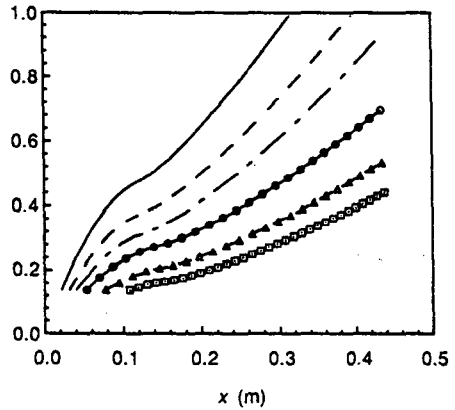


Fig. 7 Solid fractions of pure aldroplet along the center-line axis of the gas atomizer for various conditions

과냉도가 50 K일 때 비행거리에 따른 입자의 온도를 Fig. 8에 나타내었다. 초기에 용해온도보다 50 K 과열된 상태의 액적은 핵생성온도 T_N 까지 액상냉각되고 과냉된 액적은 재열현상에 의해 매우 짧은 시간 동안 용해온도까지 올라가게 되며 재열현상이 끝난 후에는 용해온도로 일정하게 유지되면서 평형상태응고과정을 거친 다음 고상냉각과정으로 들어감을 볼 수 있다. 입자의 크기가 작을수록 모든 과정에서 소요되는 시간이 짧아짐을 알 수 있다. 또한 입자의 크기가 80, 120 μm 인 경우에는 아직 평형상태응고과정에 머물러 있음을 보여준다.

Fig. 9에는 알루미늄, 니켈, 구리, 철에 대하여 입자의 직경과 노즐출구속도를 변화시켜가며 비행 시간에 따른 고상분율의 변화를 나타내었다. 각 금속에 대해 입자의 크기가 50, 80 μm , 노즐출구속

도가 200, 300 m/s인 4가지 조합인 경우에 대하여 그 결과를 도시하였다. Fig. 9의 종속은 무차원 시간으로서 다음과 같이 유도하였다.

물질의 조성이 달라지면 물성치가 바뀌므로 응고 모델에서 무차원수 Bi와 Ste가 달라지게 된다. 열전달계수가 일정하다고 가정하고 입자에 대한 전체 에너지균형식을 핵생성이 시작되는 시간에서 완전히 응고되는 시간까지 적분하면 완전응고되는데 걸리는 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_r = \frac{\rho_p c_l D}{6h} \frac{(T_m - T_N) + L/c_l}{T_m - T_\infty} \quad (20)$$

가스와 입자의 상대속도가 0일 때의 열전달계수, $h = 2k_g/D$ 를 기준으로 하여 식(20)을 정리하고 무차원 시간을 $t^* = t/t_r$ 로 정의하면 다음과 같이 된다.

$$t^* = \frac{k_g}{k_s} \frac{\text{Ste}}{1 + (1 - \theta_N)(c_l/c_s)\text{Ste}} \frac{\alpha_s t}{D^2} \quad (21)$$

Fig. 9에서 식(21)로 주어지는 무차원 변수를 도입함으로써 Fig. 7에서와는 달리 입자의 크기, 노즐출구속도 그리고 금속의 종류에 따른 영향을 모두 수용하여 비교적 동일한 경향으로 시간에 따른 고상분율의 분포를 나타낼 수 있음을 보여준다. 따라서 식(21)의 무차원 변수를 사용하면 급속 냉각공정의 설계에 있어서 입자의 크기, 노즐출구속도 그리고 금속의 종류에 무관하게 대략적인 모재의 위치를 설정할 수 있을 것으로 본다.

매개변수해석을 통한 계산결과에서 핵생성온도의 변화에 따른 재열과정후의 응고된 고상분율이 입자의 크기에 거의 영향을 받지 않았기 때문에 직경이

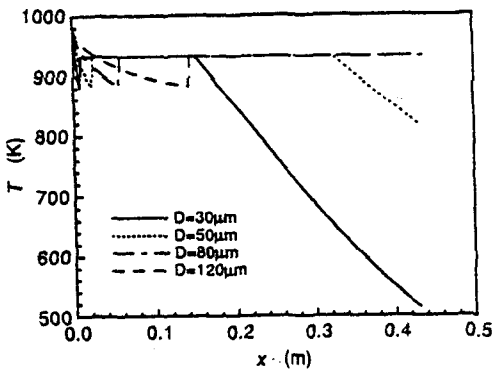


Fig. 8 Calculated temperatures of pure Al droplet along the centerline axis of the gas atomizer for various diameters ($U_1=210$ m/s, $\Delta T^1=50$ K)

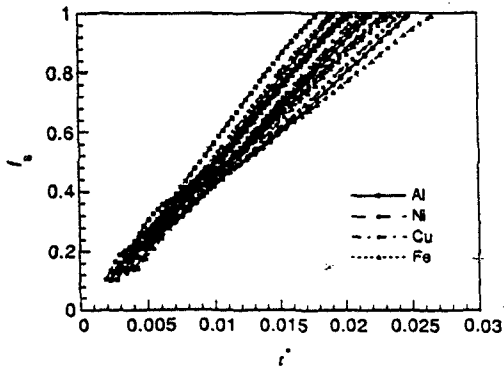


Fig. 9 Calculated solid fraction of different materials for various conditions

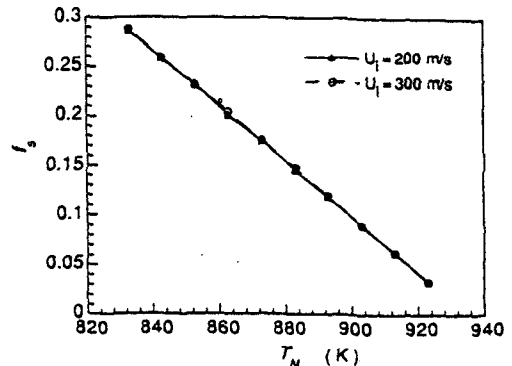


Fig. 10 Solid fraction of pure Al due to recalescence ($D=50$ μm)

50 μm 인 입자에 대한 결과만을 Fig. 10에 나타내었다. 과냉도가 증가함에 따라 고상분율은 거의 선형적으로 증가하고 노즐출구속도에는 거의 영향을 받지 않았음을 알 수 있다.

5. 결 론

가스분사법에 의해 생성된 액적의 응고과정을 액상냉각, 재열과정, 평형상태응고, 고상냉각으로 나누어 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정해진 고상분율에 도달하기까지 입자가 비행한 거리는 노즐출구에서의 분사가스의 속도가 크고 입자의 크기가 클수록 길어지며 정해진 위치에 도달할 때의 입자들의 고상분율은 입자의 크기가 작고 노즐출구에서의 분사가스속도가 작을수록 커진다.

(2) 전체계의 에너지평형식으로부터 유도된 무차원수를 도입함으로써 입자의 크기, 노즐출구속도 그리고 금속의 종류에 따른 영향을 모두 수용하여 비교적 동일한 경향으로 시간에 따른 고상분율의 분포를 나타낼 수 있었다.

(3) 재열현상에 의해 응고되는 고상분율은 노즐출구의 속도변화에는 거의 영향을 받지 않으며 핵생성온도가 감소함에 따라 선형적으로 증가한다.

참고문헌

- (1) Shingu, P. H. and Ozaki, R., 1975, "Solidification Rate in Rapid Conduction Cooling," *Metall. Trans. A*, Vol. 6, pp. 33~37.
- (2) Levi, C. G. and Mehrabian, R., 1982, "Heat Flow during Rapid Solidification," *Metall. A*, Vol. 13, pp. 221~234.
- (3) Clyne, T. W., 1984, "Numerical Treatment of Rapid Solidification," *Metall. Trans. B*, Vol. 15, pp. 369~381.
- (4) Gill, W. N., 1984, "Rapid Solidification of

Subcooled Small Metallic Drops: Internal Nucleation," *J. of Crystal Growth*, Vol. 66, pp. 351~368.

- (5) Levi, C. G., 1988, "The Evolution of Microcrystalline Structures in Supercooled Metal Powders," *Metall. Trans. A*, Vol. 19, pp. 699~708.
- (6) Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill.
- (7) Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press.
- (8) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1990, *Introduction to Heat Transfer*, 2nd ed., John Wiley and Sons.
- (9) Shamsundar, N. and Sparrow, E. M., 1975, "Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Model," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 333~340.
- (10) Turnbull, D., 1949, *Thermodynamics in Physical Metallurgy*, American Society for Metals.
- (11) Cahn, J. W., Hilling, W. B., and Sears, G. W., 1964, "The Molecular Mechanism of Solidification," *Acta Metallurgica*, Vol. 12, pp. 1421~1439.
- (12) Lunardini, V. J., 1981, *Heat Transfer in Cold Climates*, Van Nostrand Reinhold Company.
- (13) Bewlay, B. P. and Cantor, B., 1989, "Gas Velocity Measurement from Close-Coupled Spray Deposition," *Material Science and Engineering*, Vol. A118, pp. 207~222.
- (14) Maher, P. P., Grant, P. S., Cantor, B. and Katgerman, L., 1990, "Manufacture of Spray Formed Al Based Alloys and Composites," *First International Conference on Spray Forming*.
- (15) Lavernia, E. J., Gutierrez, E. M., Szekely, J. and Grant, N. J., 1988, "A Mathematical Model of the Liquid Dynamic Compaction Process, Part 1: Heat Flow in Gas Atomization," *Int. J. of Rapid Solidification*, Vol. 4, pp. 89~124.