

# Thermal history and solid fraction prediction of gas-atomized droplets in Inconel 718 alloy during spray forming

Jin Kon Kim<sup>†</sup> and Hyun Cho

*Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

(Received November 14, 2025)

(Revised November 19, 2025)

(Accepted November 24, 2025)

**Abstract** In spray forming the variations of droplet temperatures with flight distance are very important in determining the thermal condition and overall solid fraction of the spray at the point of deposition. Gas and droplet velocities, droplet temperature and solid fraction with flight during spray forming have been predicted in Inconel 718 alloy. As the size of the droplet increases, the starting and completing points of solidification move toward a longer flight distance, and the solidification process also proceeds over a wider range of flight distance. The solidification mechanism of the droplets has a relatively small effect on the dynamic and thermal behavior of the spray droplets, while the size of the droplets has a strong effect.

**Key words** Spray forming, Inconel 718 alloy, Gas-atomized droplet, Thermal history, Solid fraction

## Inconel 718 합금의 분무 성형 공정에서 분무 액적의 열이력 및 고상 분율 예측

김진곤<sup>†</sup>, 조현

부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 부산, 46241

(2025년 11월 14일 접수)

(2025년 11월 19일 심사완료)

(2025년 11월 24일 게재확정)

**요약** 분무 성형에서 비행 거리에 따른 액적의 온도 변화는 분무 성형체의 열적 조건과 최종 고상 분율을 결정하는데 매우 중요하다. Inconel 718 합금에서 분무 성형 중 비행 거리에 따른 가스 및 액적 속도, 액적 온도 및 고상 분율을 열유체학적 모델을 통해 예측하였다. 액적의 크기가 증가할수록 응고의 시작점과 완료점은 더 긴 비행 거리 쪽으로 이동하며 더 넓은 비행 거리 범위에서 진행된다. 액적의 응고 기구는 분무 액적의 동적 열적 거동에 비교적 작은 영향을 미치지만, 액적의 크기는 강한 영향을 미친다.

### 1. 서론

분무성형법은 주조 기술에 비해 거시 편석이 없고 기존 분말 야금에 비해 공정 단계가 적다는 점 등 다양한 장점을 가지고 있는 새로운 급속 응고 및 준정형(near-net-shape) 기술로 재료 제조 분야에서 큰 관심을 받고 있다. 분무 성형에서 고에너지 가스 제트를 용융 금속 스트림과 충돌시켜 분무화시킨 후 분무 액적은 분무 영역에서 떨어진 기판에 수집되어 응고된다. 적층 중에 기판을 이동함으로써 판상, 봉상 및 관상을 포함한 준정형

형상을 만들 수 있다[1,2].

분무성형 과정에서 기판에 적층되는 분무 내의 고상 분율은 최종 미세조직에 핵심 역할을 한다[2,3]. 고상 분율이 지나치게 높은 경우 성형체의 기공을 채워줄 액상이 부족하여 밀도가 높은 적층 성형체를 얻기가 어렵다. 반면에 고상 분율이 너무 낮은 경우 과도한 액상으로 인해 분무 수율이 감소하고 가스가 액상을 교란시킴으로써 최종 성형체에 가스 기공이 형성될 수 있다. 이러한 분무 액적 내의 고상 분율은 분사 가스 압력, 용탕 유출 속도, 용탕 온도 및 분무 높이 등 공정 변수에 따라 결정되지만 실제로 낙하하는 액적의 온도 및 내부의 고상 분율을 예측하는 것은 거의 불가능하기 하기 때문에 낙하하는 액적의 고상 분율에 대한 정보는 열유체학적 모

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: kimjk@pusan.ac.kr

텔을 통한 수치 모사 연구에 주로 의존하고 있다.

초합금은 고온이고 고응력, 산화 또는 부식성 환경에서 기계적 강도, 화학적 조성 및 구조를 유지할 수 있는 금속 합금 계열이다. 초합금은 주요 구성 금속을 기준으로 철 기반, 코발트 기반 및 니켈 기반 초합금으로 분류된다. 세 가지 초합금 중 니켈 기반 초합금은 고온 강도와 인성이 탁월하여 항공기, 발전 및 선박 추진용 가스 터빈에 널리 사용되고 있다[4-6].

Inconel 718 합금은 인장, 피로, 크립 및 파단 강도가 우수하고 제작이 용이하여 항공기 산업에서 가장 널리 사용되는 니켈 기반 초합금이다. 서비스 수명이 길어  $-253^{\circ}\text{C}$ 에서  $650^{\circ}\text{C}$ 까지 넓은 작동 온도 범위에서 장시간 사용할 수 있다[5,6]. 현대 항공기 엔진에서 중량 비율로 30% 이상 차지하며[5] 패스너, 액체 연료 로켓, 육상 가스 터빈 엔진 및 극저온 탱크에도 사용되고 있다.

본 연구에서는 낙하하는 액적의 동적 및 열적 거동을 예측할 수 있는 열유체학적 수치 모델[7]을 통해 Inconel 718 합금을 대상으로 액적의 크기, 초기 분사 가스 속도 등의 공정 인자들이 낙하 액적의 속도, 온도 및 응고 거동에 미치는 영향에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 시뮬레이션 모델

가스 분무 공정 중 금속의 용탕 줄기가 분사 gas와 충돌하는 지점에서 즉시 액적으로 분무화된다고 가정하면 각 액적은 분사 gas와 액적의 속도 차이에 따라 감속되거나 가속된다. 난류에 의한 분사 gas의 요동과 액적들 간의 상호 충돌 작용을 무시하고 액적이 구형이고 강체라 가정하면 액적의 운동은 중력(gravity force), 항력(drag force)과 관성력(inertia force)의 균형에 의해서 결정되며 다음과 같은 식으로 기술할 수 있다[7].

$$\rho_d V_d \frac{du_d}{dt} = V_d(\rho_d - \rho_g)g - \frac{1}{2}\rho_g A_d C_D |u_d - u_g|(u_d - u_g) \quad (1)$$

여기서  $u_d$ ,  $\rho_d$ ,  $V_d$ ,  $A_d$ 는 액적의 낙하속도, 밀도, 부피, 단면적이고  $u_g$ 와  $\rho_g$ 는 분사 gas의 속도와 밀도,  $g$ 는 중력 가속도이다. 드래그 계수  $C_D$ 는 액적의 레이놀드수  $Re = \rho_g D_d |u_d - u_g|/\mu_g$ 에 따라 변하며  $0.1 < Re < 4000$  범위에서 정확도 7% 내외로 다음과 같은 경험식으로 근사할 수 있다.  $D_d$ 는 액적의 지름이고  $\mu_g$ 는 분사 gas의 점성도이다.

$$C_D = 0.28 + \frac{6}{\sqrt{Re}} + \frac{21}{Re} \quad (2)$$

분사 gas의 거리에 따른 속도는 원형의 오리피스에서 유출되는 난류 자유 제트(turbulent free jet) 방정식을

이용하여 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다[7].

$$\frac{u_g(z)}{u_0} = \left[ 1 + \left( \frac{z}{\lambda} \right)^2 \right]^{-0.05} \quad (3)$$

여기서  $u_0$ 는 오리피스 출구의 초기 가스 속도,  $z$ 는 제트 축 방향 거리이다.  $\lambda$ 는 가스 속도 감쇠 상수(gas velocity decay constant)로  $\alpha\sqrt{A_c}$ 이며  $\alpha$ 는 실험 상수이고 난류 자유 제트에서 7.414로 알려져 있고  $A_c$ 는 가스 노즐 출구의 유효 단면적이다.

공정계 합금에서 낙하하는 분사 액적의 전형적인 냉각 거동은 액상 냉각, 핵생성과 재취(recalescence), 편석 응고(segregated solidification), 공정 응고(eutectic solidification), 고상 냉각 다섯 단계 과정을 거쳐 진행된다고 할 수 있다[2,3]. 가스 분무 시 액적의 냉각은 주로 대류에 의해 진행되며 복사 기여도는 무시할 수 있고, 액적의 크기가 작아 액적 내 온도 구배를 무시하면 액적의 열이력은 뉴토니안 열전달 수식으로 표현할 수 있다. 액상과 고상의 두 상이 포함된 액적의 경우 단위질량당 엔탈피  $H_d$ 는 액적의 온도  $T_d$ 와 액적 내 고상 분율  $f_s$ 과 밀접한 관계가 있다. 위와 같은 조건에서 직경이  $D$ 인 낙하 액적의 열이력 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$C_{pd} \frac{dT_d}{dt} = \Delta H_d \frac{df_s}{dt} - \frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (4)$$

$$C_{pd} = C_L - (C_L - C_S)f_s \quad (5)$$

$$\Delta H_d = \Delta H_F - (C_L - C_S)(T_L - T_d) \quad (6)$$

여기서  $C_{pd}$ ,  $C_L$ ,  $C_S$ 는 단위질량당 액상/고상 혼합체, 액상과 고상의 열용량이고,  $\Delta H_F$ 는 단위질량당 응고 잠열,  $T_L$ 은 액상선 온도이다. 열전달 계수  $h$ 는 Ranz-Marshall 관계식으로 계산할 수 있다.

$$h = \frac{k_g}{D} (2.0 + 0.6\sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}) \quad (7)$$

여기서  $k_g$ 는 분사 gas의 열전도도,  $Pr = C_{pg}\mu_g/k_g$ 은 가스 Prandtl 수,  $C_{pg}$ 는 단위질량당 가스 비열이다.

응고가 시작되기 전까지는 액적은 완전히 액상이기 때문에 식(4)에서 고상에 관한 항을 무시하면 다음과 같은 액상 상태의 열이력 식을 얻을 수 있다.

$$C_L \frac{dT_d}{dt} = - \frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (8)$$

초기에 액적은 분사 gas의 대류에 의해 급격히 냉각되어 핵생성 온도에 도달한다. 이때 고상의 핵생성으로 다량의 응고 잠열이 발생하여 과냉된 액적은 급격히 가열되는 재취과정이 일어나게 되고 액적의 온도는 거의 액상선 온도까지 순간적으로 상승한다. 그러나 핵생성과

재취 현상은 예측하기 어려울 뿐 아니라 재취 과정은 매우 빠르게 진행되어 최종 응고에 미치는 영향이 적기 때문에 [3] 본 연구에서는 무시하고 액상선과 고상선 사이에서 균일하게 핵생성이 일어나는 것으로 가정하였다.

분무 액적의 온도가 액상선에 도달했을 때 응고가 시작되어 편석 응고가 진행되며 이러한 편석 응고 거동은 다음과 같이 Schiel 방정식을 따르는 것으로 가정하였다.

$$\left(C_{pd} - \Delta H_d \frac{df_s}{dT_d}\right) \cdot \frac{dT_d}{dt} = -\frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (9)$$

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_M - T_d}{T_M - T_d^0}\right)^{\frac{1}{1-k_0}} \quad (10)$$

$$\frac{df_s}{dT_d} = -\frac{1}{(1-k_0)(T_M - T_d)} \left(\frac{T_M - T_d}{T_M - T_d^0}\right)^{\frac{2-k_0}{1-k_0}} \quad (11)$$

여기서  $k_0$ 는 평형분배계수(equilibrium partition ratio),  $T_M$ 은 순수 용매 물질의 용융점이다.

액적의 온도가 공정온도( $T_E$ )에 도달하면 남아 있는 액상은 공정 반응을 거쳐 완전히 고상으로 응고가 완료된다. 공정 반응 동안 액적의 온도는 공정 온도로 유지되며 생성된 고상 분율은 다음과 같은 미분 방정식으로 계산할 수 있다[7].

$$[\Delta H_F - \Delta C(T_L - T_E)] \frac{df_s}{dt} = \frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (12)$$

여기서  $\Delta C = C_L - C_S$ 이다.

입자가 완전히 고상일 경우 식(4)에  $f_s = 1$ 을 대입하면 다음과 같은 고상 상태의 열이력 식을 얻을 수 있다.

$$C_S \frac{dT_d}{dt} = -\frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (13)$$

### 3. 결과 및 고찰

Inconel 718 합금은 의사 2원 공정계 상태도를 보이는 합금계로 알려져 있다[8,9]. 전술한 냉각 및 응고 모델을 이용하여 낙하하는 액적의 속도와 열이력, 액적 내 고상의 분율을 계산하였다. 분사 가스는 Ar이고 가스 노즐 출구의 유효 단면적은  $2.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ , 분사 가스의 온도는  $500^\circ\text{C}$ 로 가정하였다. 또한 분무 액적 내부에서 액상과 고상의 밀도는 동일하다고 가정하였다. 계산에 사용된 분사 가스와 Inconel 718 합금의 열물리적 특성값은 Table 1에 나타내었다.

Figure 1은 지름이 10, 20, 30, 45, 70, 100 그리고 150  $\mu\text{m}$ 인 분무 액적의 비행 거리에 따른 낙하 속도 변

Table 1  
Thermophysical properties of Argon gas and Inconel 718 alloy

Argon Gas [10]			
$C_{pg}$	519 J/kg·K	$u_g$	$1.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
$k_g$	0.0164 W/m·K	$\rho_g$	1.654 kg/m <sup>3</sup>
Inconel 718 alloy [11,12]			
$C_L$	650 J/kg·K	$k_0$	0.44
$\Delta H_F$	$210 \times 10^3 \text{ J/kg}$	$T_M$	1,455°C
$\rho_d$	$7.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$T_L$	1,336°C
		$T_E$	1,185°C

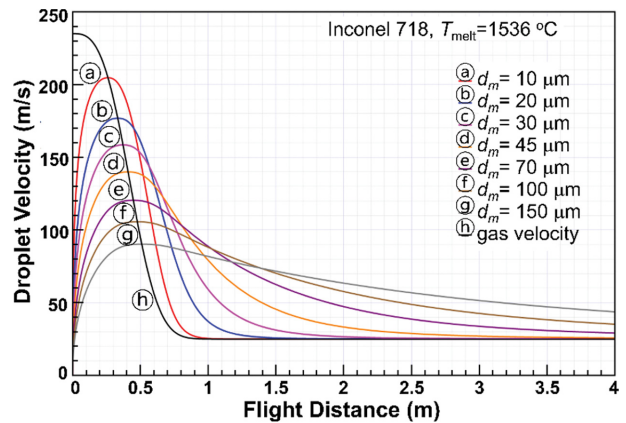


Fig. 1. Gas and Inconel 718 droplet velocities with flight distance.

화이다. 가스의 초기 속도는 235 m/s로 가정하였다. 각 액적은 액적의 속도가 분사 가스의 속도와 같아 질 때까지 가속되어 이 때 최대 속도에 도달한다. 액적의 크기가 작을수록 더 빨리 가속되어 빠르게 최대 속도에 이른다. 10  $\mu\text{m}$  액적의 최대 속도는 비행 거리 0.27 m에서 204 m/s이고 100  $\mu\text{m}$  액적은 0.48 m에서 106 m/s이다. 액적이 작을수록 레이놀드수가 작기 때문에 항력이 커져 큰 액적에 비해 효과적으로 가속된다. 최대 속도에 도달한 후에는 액적의 속도가 분사 가스 속도보다 크기 때문에 액적은 감속하게 된다. 액적이 작을수록 항력의 영향으로 최대 속도에서 뚜렷한 최대점을 보이고 감속 속도가 빠르며 액적의 크기가 증가할수록 관성력의 영향이 증가하기 때문에 최대점 이후 속도의 감소 변화가 완만해진다. 10  $\mu\text{m}$  액적의 경우 액적 속도가 비행 거리 1 m에서 분사 가스 속도에 근접하지만 70  $\mu\text{m}$ 보다 큰 액적은 4 m에서도 분사 가스 속도보다 크다.

Figure 2는 여러 액적 크기에서 비행 거리에 따른 액적 온도의 변화에 대한 계산 결과이다. 액적은 액상 냉각, 편석 응고, 공정 응고 및 고상 냉각의 네 온도 구간을 거쳐 응고가 진행되는 것을 확인할 수 있다. 완전히 액상인 액적은 액상선 온도에 도달하기까지 분무 가스의 대류로 인해 빠르게 냉각된다. 분무 액적의 온도가 액상선에 도달했을 때 응고가 시작되어 편석 응고가 진행되

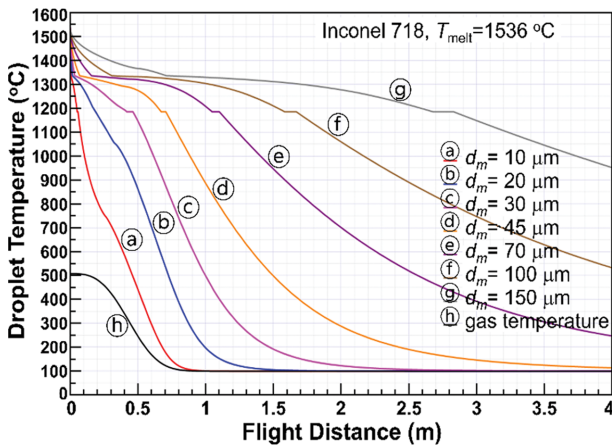


Fig. 2. Inconel 718 droplet temperatures with flight distance.

고, 편석 응고는 Schiel 식을 따라 진행되기 때문에 액적의 온도는 비교적 느리게 감소한다. 액적의 크기가 클수록 대류 열전달 계수가 감소하기 때문에 더 넓은 비행 거리 영역에 걸쳐서 편석 응고가 일어나게 된다. 액적의 온도가 공정 온도에 도달했을 때 잔존하는 액상은 공정 반응을 거쳐 완전한 고상으로 응고된다. 크기가 10 μm 와 20 μm인 액적은 공정 반응 구간이 매우 짧아 공정 수평 구간이 거의 보이지 않으며 액적의 크기가 증가할수록 공정 응고가 시작되고 종결되는 지점은 더 먼 비행 거리 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 마지막으로 완전히 고상이 된 액적의 온도는 잠열의 방출이 없기 때문에 빠르게 감소한다. 비행 거리가 0.5 m일 때 150 μm 액적은 아직 응고가 시작되지 않았으며 크기가 30 μm보다 작은 액적은 온도가 공정 온도보다 낮아 완전한 고상이고 중간 크기의 액적은 응고가 시작되었지만 아직 공정 온도에 도달하지 않아 액상-고상 2상 상태이다.

Figure 3은 액적 크기별 비행 거리에 따른 고상 비율의 계산 결과이다. 크기가 20 μm 이하인 액적은 매우

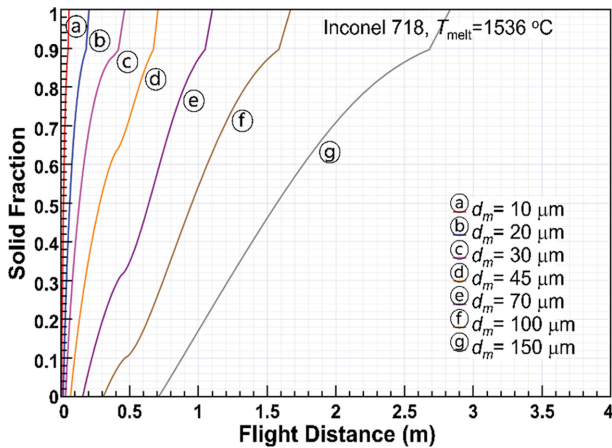


Fig. 3. Inconel 718 droplet solidified fractions with flight distance.

급격히 고상 비율이 증가하며 크기가 증가할수록 고상 비율의 증가 속도는 감소한다. 공정 응고 동안 형성된 고상의 비율은 액적의 크기에 무관하게 약 10 %로 계산되었다. 이는 액적 크기의 증가가 응고 과정을 지연시키고 있음을 보여준다. 예로 기관이 1 m 거리에 떨어져 있다면 45 μm 액적은 100 % 고상 상태로 기관에 충돌하며 반면에 100 μm 액적은 고상이 약 55 %인 상태로 기관에 충돌하게 된다.

합금의 응고 과정 중 액상선과 고상선 사이에서 진행되는 평형응고가 가장 단순한 응고 과정이라 할 수 있다. 분무 액적의 온도가 액상선에 도달했을 때 응고가 시작되어 고상선에서 응고가 완료되며 이 때 액상과 고상은 평형을 이루고 응고가 진행된다. 이와 같이 고상과 액상에서의 확산이 완전하다고 가정하는 평형 상태에서는 지렛대 규칙이 적용되며 다음과 같이 응고 과정을 계산할 수 있다.

$$\left( C_{pd} - \Delta H_d \frac{df_s}{dT} \right) \cdot \frac{dT_d}{dt} = - \frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (14)$$

$$f_s = \frac{1}{1 - k_0} \left( \frac{T_L - T_d}{T_M - T_d} \right) \quad (15)$$

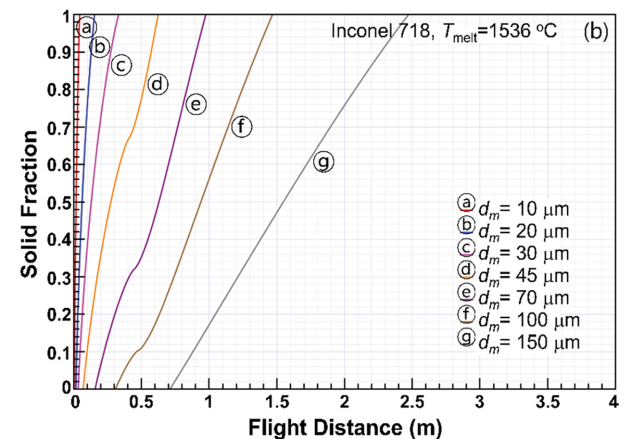
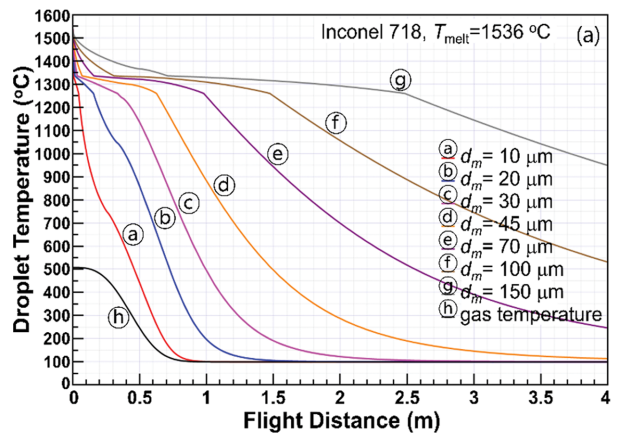


Fig. 4. Inconel 718 (a) droplet temperatures and (b) solidified fractions with flight distance for equilibrium solidification.

$$\frac{df_s}{dT_d} = - \frac{T_M - T_L}{(1 - k_0)(T_M - T_d)^2} \quad (16)$$

응고가 시작되기 전 액상 상태와 응고가 끝난 고상 상태의 열이력은 식(8)과 (13)을 이용해 동일하게 계산할 수 있다.

Figure 4(a)와 (b)는 평형 응고를 가정했을 때 액적 크기별 비행 거리에 따른 액적 온도와 고상 분율의 계산 결과이다. Figure 2와 3에 나타난 편석/공정 응고 경우와 비교해 보면 응고 시작점은 동일하지만 응고가 끝나는 온도는 증가하고 비행 거리는 약간 감소한다. 따라서 동일한 고상 분율이 되는 비행 거리 또한 약간 감소하지만 그 차이는 크지 않다. 30, 45 그리고 70  $\mu\text{m}$  액적에서 고상 분율이 0.7이 되는 비행 거리는 평형 응고일 때 0.19, 0.44 그리고 0.77 m이고 편석/공정 응고 경우 0.21, 0.48, 0.80 m로 차이는 10% 미만이다. 이러한 계산 결과는 분무 성형 동안 응고 과정 및 열이력을 계산하는 출발점으로 가장 단순한 모델인 평형 응고를 적용할 수 있음을 시사한다.

#### 4. 결 론

Inconel 718 합금의 분무 성형 공정에 있어 낙하하는 액적의 비행 거리에 따른 속도, 온도 및 고상 분율을 열 유체학적 모델을 통해 계산하였다. 액적의 크기가 증가할수록 응고가 시작되고 완료되는 지점은 더 먼 비행 거리 쪽으로 이동하였으며, 응고 과정 또한 더 넓은 비행 거리 구간에 걸쳐 진행되었다. 응고 과정을 다르게 가정한 두 경우, 편석/공정 응고와 평형 응고에서 고상 분율의 계산 결과가 10% 미만으로 크게 차이 나지 않았다. 분무 액적의 동적 열적 거동에 액적의 응고 기구는 미치는 영향이 비교적 작으며 액적의 크기가 강한 영향을 미친다.

#### 감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- [1] A.R.E. Singer and J.M. Alexander, "The principles of spray rolling of metals", *Metals Mater.* 4 (1970) 246.
- [2] P. Mathur, D. Apelian and A. Lawley, "Analysis of the spray deposition process", *Acta Metall.* 37 (1989) 429.
- [3] P.S. Grant, B. Cantor and L. Katgerman, "Modelling of droplet dynamic and thermal histories during spray forming-I. Individual droplet behaviour", *Acta Metall. Mater.* 41 (1993) 3097.
- [4] T.M. Pollock and S. Tin, "Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure, and properties", *J. Propuls. Power* 22 (2006) 361.
- [5] H. Qi, "Review of INCONEL 718 Alloy: Its history, properties, processing and developing substitutes", *J. Mater. Eng.* 2 (2012) 92.
- [6] E. Akca and A. Gursel, "A review on superalloys and IN718 nickel-based INCONEL superalloy", *Periodicals Eng. Natural Sci.* 3 (2015) 15.
- [7] E.S. Lee and S. Ahn, "Solidification progress and heat transfer analysis of gas-atomized alloy droplets during spray forming", *Acta Metall. Mater.* 42 (1994) 3231.
- [8] G. Knorovsky, M. Cieslak, T. Headley, A. Romig and W. Hammett, "Inconel 718: a solidification diagram", *Metall. Trans. A* 20 (1989) 2179.
- [9] J. Andersson, S. Raza, A. Eliasson and K.B. Surreddi, "Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives", ed. by E. Ott, et al. (The Minerals, Metals & Materials Society, Pittsburgh, 2014), p. 145.
- [10] T.F. Irvine, Jr. and P.E. Liley, "Steam and Gas Tables with Computer Equations", Academic Press, Orlando, (1984).
- [11] G. Pottlacher, H. Hosaeus, E. Kaschnitz and A. Seifert, "Thermophysical properties of solid and liquid Inconel 718 alloy", *Scand. J. Metallurgy* 31 (2002) 161.
- [12] A.S. Agazhanov, D.A. Samoshkin and Y.M. Kozlovski, "Thermophysical properties of Inconel 718 alloy", *J. Phys. Conf. Ser.* 1382 (2019) 012175.