

< 논 문 >

분무성형공정에서의 빌렛형상 모델링

장동훈* · 강신일** · 이언식***

(1996년 11월 18일 접수)

Modeling of Billet Shape in Spray Forming Process

Dong-Hoon Chang, Shinill Kang and Eon-Sik Lee

Key Words : Spray Forming(분무성형), Near-Net Shape Manufacturing(정형가공), Droplet Deposition(액적적층), Billet Shape Control(빌렛형상제어), Cam Profile(캠형상)

Abstract

A numerical method is presented to predict and analyze the shape of a growing billet produced from the "spray forming process" which is a fairly new near-net shape manufacturing process. It is important to understand the mechanism of billet growing because one can obtain a billet with the desired final shape without secondary operations by accurate control of the billet shape, and it can also serve as a base for heat transfer and deformation analysis. The shape of a growing billet is determined by the flow rate of the alloy melt, the mode of nozzle scanning which is due to cam profile, the initial position of the spray nozzle, scanning angle, and the withdrawal speed of the substrate. In the present study, a theoretical model is first established to predict the shape of the billet and next the effects of the most dominant processing conditions, such as withdrawal speed of the substrate and the cam profile, on the shape of the growing billet are studied. Process conditions are obtained to produce a billet with uniform diameter and flat top surface, and an ASP30 high speed steel billet is manufactured using the same process conditions established from the simulation.

1. 서 론

분무성형(spray forming)은 연속적으로 공급되는 용융금속에 고속의 불활성가스를 충돌시켜 분무액적을 만든 후, 반응고상태의 분무액적과 가스로 이루어진 스프레이를 하부의 기판에 분사, 적층시켜 봉상, 관상 및 관상의 성형체를 한번에 제조할 수 있는 최신 합금제조 공정이다.^(1,2) 분무성형 공정에서는 분무액적이 가스분사기(Gas atomizer)로

부터 분사되어 낙하하는 도중에 내부에서 핵생성이 일어나고, 반응고상태에서 기판에 적층되기 때문에 10~100 μm 정도의 미세한 정방형 결정립 조직을 제조할 수 있으며, 이 조직은 편석이 적기 때문에 후속적인 열처리를 단축하거나 생략할 수 있게 된다.^(1,3~7) 분무성형공정은 기판의 모양과 운동을 조절함으로써 성형체의 최종 형상을 다양하게 변화시킬 수 있는 정형가공(Near-Net-Shape Manufacturing)으로서의 장점과 더불어 용융금속으로부터 미세한 조직을 가진 다양한 형상의 성형체를 직접 제조할 수 있다는 점에서 기존의 잉곳주조나 분말 야금에 비해 매우 경제적인 공정이다.^(5~10) 특히 분말제조, 혼합, 압축, 소결 등의 다단계 공정을 거

*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

**회원, 연세대학교 기계설계학과

***포항산업과학연구원

쳐야 하는 분말야금과 비교하여 분무성형은 분말야금에 의해 제조할 수 있는 우수한 품질의 미세조직을 단일공정으로 제조할 수 있다는 장점이 있다. 분무성형공정에서 세라믹 입자를 분사가스 속에 첨가시키면 세라믹 입자가 균일하게 분포된 복합재료 (metal matrix composite)를 제조할 수 있으며,⁽⁷⁾ 이때의 조직은 급속응고되기 때문에 기존의 주조에 의해 복합재료를 만들때에 용융합금과 첨가입자와의 접촉시간이 길어져 상호 화학반응에 의해 재료의 물성치가 악화되는 현상을 방지할 수 있다. 또한 다양한 합금재료를 분무성형공정에 의해 제조할 수 있으며, 다른 방법에 의해서는 제조하기 어려운 Al, Pb, Cu, Mg, Ni, Ti, Co, steel 등의 합금도 제조할 수 있기 때문에 분무성형공정의 이용 범위는 매우 넓다.^(1,11)

한편, 분무성형이 산업적으로 경쟁력있는 제조 방법으로 발전하기 위해서는 해결해야 할 문제점이 있다. 분무성형에 의해 제조되는 성형체는 언제나 약간의 기공(porosity)을 함유하며,⁽⁵⁾ 이는 압출, 압연, 히핑(HIPing, hot isostatic pressing) 등에 의한 후속가공에 의해 치밀한 미세조직을 갖게 된다. 그리고, 재료의 미세조직과 기계적 성질을 최적화하기 위해 추가적인 열처리나 단조공정을 거치게 되는데, 이 공정중에 미세조직이 거칠어지거나 결(texture)이 발생하게 된다. 또한 분무성형공정에는 재료의 손실이 따르게 된다. 분무액적이 스프레이 형태로 성형체에 분사될 때 성형체에 도달하지 못하고 옆으로 벗어나는 액적과 표면에 충돌한 후 튀어 나가는 액적이 있으며,^(3,4,13) 후속적인 기계가공에 의해 제거되는 부분이 있다. 이와 같이 분무성형법은 새로운 합금제조 기술로 각광받고 있지만, 산업적으로 경쟁력있는 공정기술로 확립되기까지는 고도의 분말화 제어기술 및 성형과정기술이 발전되어야 한다.

분무성형공정에서 기관에 충돌하는 액적의 응고 정도는 매우 중요한 고려 대상이 된다.^(3,4,12,13) 이는 액적들이 가스에 의해 가속되어 기관에 적층될 때 액적과 적층표면의 응고 정도가 너무 높거나 낮게 되면 적층효율(sticking efficiency)이 나빠지고 재료의 손실이 많아지기 때문이다. 액적과 적층표면의 응고정도는 액적의 비행거리, 용탕의 과열(super heat), 미립화 가스의 초기속도 등에 의해 결정되며, 따라서 분사기와 적층표면과의 거리, 용탕의 과열, 미립화 가스의 초기속도 등은 적층효율

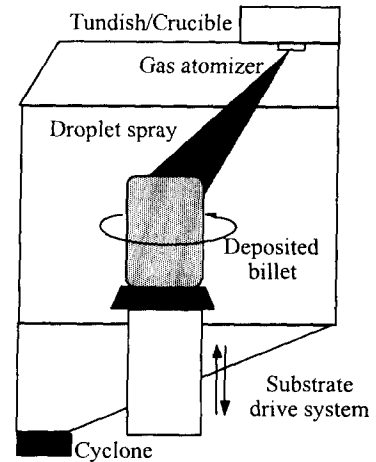


Fig. 1 Schematic of the spray forming process for the production of a high speed steel billet

을 고려하여 알맞게 유지되어야 한다.^(3,4,12,13) 가스 분무기는 캠 메카니즘에 의해 스캔하면서 기관에 스프레이를 분사하는데, 이때 가스분무기를 스캔하는 목적은 성형체에 도달하는 스프레이 밀도, 액적의 크기와 엔탈피를 성형체의 전 표면에서 균일하게 하는 것이다. 또한 가스분무기를 스캔함으로써 직경이 큰 빌렛을 제조할 수 있고, 성형체 표면에 스프레이의 분사량을 조절하여 다양한 형상의 성형체를 만들 수 있다. 액적이 적층되는 기관은 회전하면서 성형체가 성장하는 속도와 동일한 속도를 가지고 하강하여 적층이 이루어지는 표면과 분사기와의 거리는 일정하게 유지되게 된다. Fig. 1은 원통형 빌렛을 제조하기 위한 분무성형공정을 나타내는 개략도이다.

분무성형공정의 모델링 및 해석적인 연구가 Grant, Annavarapu, Mathur 등에 의해 진행되어 왔다. Grant^(3,4,12) 등은 분무액적의 동역학적/열적 내력을 기술하는 컴퓨터 모델을 개발하였고, 분사 가스의 속도와 액적크기 분포를 측정하여 적층시의 스프레이 고상률을 예측하였으며, 이를 빌렛의 열전달 모델에 사용하여 액적이 적층되는 빌렛표면의 고상률과 온도를 계산하였다. 그리고 알루미늄 합금을 분무성형함에 있어 스프레이 운동역학, 스프레이 냉각, 빌렛 열전달 등을 실험을 통해 고찰한 후 이를 컴퓨터 모델에 의해 계산한 결과와 비교하여 모델을 검증하였다. Annavarapu^(5,6) 등은 분무성형에 의해 판상 성형체를 제조함에 있어 공정조건을 변화시키며, 성형체의 미세조직변화를 관찰하

였으며, 분사거리와 기관의 속도가 미세조직에 주는 영향을 고찰하였고, 분무성형에 의한 원통형 빌렛의 제조시에 빌렛의 입자크기 변화를 최소화하기 위한 공정조건을 도출하였다. Mathur^(2,9) 등은 Osprey 스프레이 적층공정에 대한 통합 모델을 개발하여 액적-가스 간의 상호작용과 액적이 기관에 부착/응고되는 과정을 설명하였고, 액적의 속도와 온도를 비행거리의 함수로서 예측하였다. 또한 1차원 열전달해석을 통해 판상 성형체의 온도분포 이력을 예측하였다.

분무성형공정은 매우 많은 공정인자에 의해서 지배되므로 이러한 각 인자가 공정에 미치는 영향을 이해하고 이에 대한 기초 자료를 얻는 것은 분무성형법에 의한 새로운 합금 제조기술 개발에 있어서 매우 중요하다.⁽⁵⁾ 특히 성형체의 응고거동이나 열전달 현상을 규명하고, 미세조직을 제어하기 위해서는 성형체의 성형과정을 이해하는 것이 필수적이다.^(2,9) 성형체의 형상을 결정짓는 요인으로는 스프레이의 밀도분포, 분사기의 초기위치, 용탕의 체적 유출속도, 성형기관 하강속도, 캠의 형상에 따른 분사기의 스캔 양상 등을 들 수 있는데, 본 연구에서는 성형체의 열전달, 응력 및 변형거동 해석의 이전 단계로서, 원통형 빌렛의 성장 메커니즘을 이론화한 뒤 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성장모델을 확립하였다. 이 모델을 기초로, 직경이 일정하고 윗면이 평평한 원통형 빌렛을 제조하기 위한 공정조건을 도출하였으며, 이에 따른 빌렛의 형상을 계산하였고, 도출된 공정조건을 바탕으로 ASP30 합금 고속도 공구강 빌렛을 제작하였다. 또한 기관의 하강속도를 변화시켜 가면서 빌렛의 형상을 예측하였고, 이를 통해 기관의 하강속도가 빌렛형상에 미치는 영향을 고찰하였다. 윗면이 볼록하거나 오목하지 않고 평평하여 후속적인 기계가공이 필요없는 원통형 빌렛을 제조하기 위한 분사기의 이론적인 스캔속도를 유도한 후, 이를 근거로 스캔 구동캠의 형상을 설계하였으며 캠에 의한 스캔 양상이 빌렛형상에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 스프레이 적층속도 및 스캔 구동캠 형상 결정

2.1 스프레이의 체적 적층속도 모델

분무성형공정에서 분무화된 액적들은 스프레이 형태로 낙하하며, 기관에 가까워질수록 스프레이의

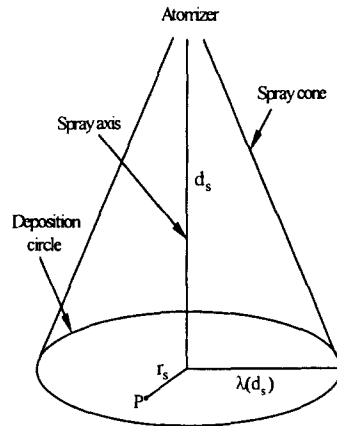


Fig. 2 Deposition circle in the spray cone

폭은 넓어진다. 성형체의 형상을 제어하기 위해서는 스프레이의 체적유출을 예측하는 것이 매우 중요하다. Fig. 2는 분사기로부터 분사되는 스프레이 콘을 나타내는 개략도이며, 모든 액적이 스프레이 축과 평행하게 운동한다는 가정하에 스프레이 속의 임의점 $P(r_s, d_s)$ 에서 스프레이 축방향으로의 체적 적층속도(volumetric deposition rate, m^3/m^2s) $\dot{m}(r_s, d_s)$ 을 정구분포식을 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(9,17)

$$\dot{m}(r_s, d_s) = \dot{m}_0(d_s) \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{r_s}{\lambda(d_s)}\right)^n\right] \quad (1)$$

여기서, d_s 는 분사기로부터 점 P가 위치한 적층원까지의 거리이며, r_s 는 적층원 중심으로부터 점 P까지의 거리이다. 또한 \dot{m}_0 은 점 P를 포함하는 적층원 중심에서의 체적 적층속도이며, 스프레이 반가폭 λ 는 적층원 중심으로부터 체적 적층속도가 $0.5\dot{m}_0$ 되는 지점까지의 거리를 의미하고, n 은 분무액적이 스프레이 중심부에 집중되어 있는 정도를 나타내는 인자이다.

식 (1)을 적분하면 분사기의 노즐로 유입되는 용융 금속의 체적유출속도(overall volumetric flow rate, m^3/s) Φ_V 를 계산할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

$$\Phi_V = \int_0^\infty \dot{m}(r_s, d_s) 2\pi r_s dr_s \quad (2)$$

식 (2)에 식 (1)을 대입하면, 다음과 같이 \dot{m}_0 와 Φ_V 의 관계식을 구할 수 있다.

$$\Phi_V = \int_0^\infty \dot{m}(r_s, d_s) 2\pi r_s dr_s = 2\pi \dot{m}_0(d_s) \lambda^2 \kappa(n) \quad (3)$$

여기서, $\kappa(n) = \frac{\Gamma(2/n)}{n(\ln 2)^{2/n}}$

$\Gamma(a) = \int_0^\infty e^{-t} t^{a-1} dt$ 는 Gamma 함수

분무성형공정에서 액적의 비행궤적은 직선으로 관측되므로, (17) 적층속도를 예측함에 있어 스프레이의 반가폭(λ)은 분사기로부터의 수직거리 d_s 에 따라 직선적으로 증가하는 것으로 가정할 수 있으며, 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\lambda(d_s) = c_1 d_s + c_2 \tag{4}$$

여기서, c_1, c_2 는 분사거리에 따른 스프레이 반가폭을 결정하는 상수로서 실험적으로 결정되는데, 이때 분사축을 기관에 수직으로 고정시키고 서로 다른 분사거리에서 스프레이를 적층시켜 λ 를 측정 한 후 식 (4)에 의해 c_1, c_2 를 구한다. 식 (4)을 식 (3)에 넣은 후 m_0 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$m_0(d_s) = \frac{\Phi_v}{2\pi(c_1 d_s + c_2)^2 x(n)} \tag{5}$$

식 (4), (5)을 식 (1)에 대입하여 스프레이 내부의 임의점 (r_s, d_s)에서 스프레이 축방향으로의 체적 적층속도를 r_s 와 d_s 를 이용하여 전개하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m(r_s, d_s) = \frac{\Phi_v}{2\pi(c_1 d_s + c_2)^2 x(n)} \times \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{r_s}{c_1 d_s + c_2}\right)^n\right] \tag{6}$$

2.2 스캔속도 및 캠형상 결정

분사기는 캠에 의해 스캔되며, 이때 구동캠의 운동에 의해서 스프레이 분사축 스캔각도의 시간에 따른 변화를 계산하는 것은 빌렛 표면의 임의점과 분사기와의 상관위치벡터를 구하는 기초 자료로 필요하다. 캠의 회전속도가 ω_c 일때 시간 t 가 경과한후 캠의 회전각은 $\varphi = \omega_c t$ 이다. 캠변위 δ 는 회전각 φ 의 함수로서 주어지며, 분사기가 기관위에서 스캔하는 모양을 나타낸 Fig. 3으로부터 다음의 관계식이 성립한다.

$$\delta(\varphi) = \eta \tan \varepsilon(\varphi) \tag{7}$$

여기서, ε 은 중심 분사축과 스캔시의 분사축이 이루는 각이며, 캠 회전각 φ 의 함수이다. 분사축

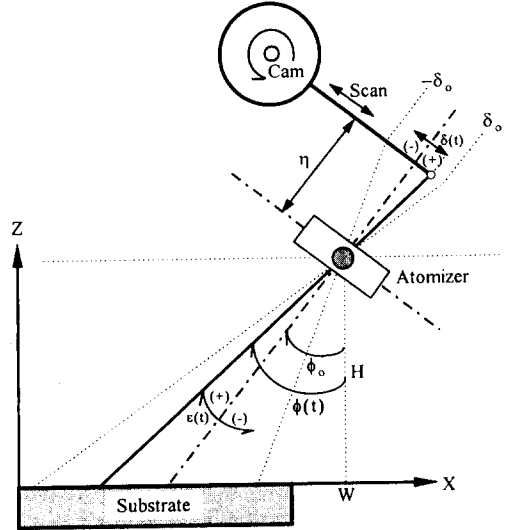


Fig. 3 Scanning of gas atomizer with cam rotation

의 초기 경사각 ϕ_0 와 스캔각도 ϕ 의 관계식은 $\phi(\varphi) = \phi_0 + \varepsilon(\varphi)$ 이며, 이 식의 양변에 탄젠트를 취하고 식 (7)을 적용하면 스캔각도 ϕ 와 캠변위 δ 의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tan \phi(\varphi) &= \frac{\tan \phi_0 + \tan \varepsilon(\varphi)}{1 - \tan \phi_0 \tan \varepsilon(\varphi)} \\ &= \frac{\eta \tan \phi_0 + \delta(\varphi)}{\eta - \tan \phi_0 \delta(\varphi)} \end{aligned} \tag{8}$$

캠의 설계시 사용되는 기본적인 함수값은 캠변위 $\delta(\varphi)$ 이며, 이 함수값을 제어함으로써 분사기의 스캔운동양상을 조절할 수 있다. 이와 같이 캠의 운동은 스캔각도를 지배하기 때문에, 캠변위함수 $\delta(\varphi)$ 를 조절함으로써 원하는 적층 양상을 얻을 수 있는 것이다.

원통형 빌렛 제조시, 적층이 이루어지는 빌렛 상면의 성장속도를 전 표면에 걸쳐 균일하도록 만들기 위해서는 빌렛의 중심부보다 가장자리에 더 많은 스프레이가 적층되도록 분사기의 스캔 양상을 조절하여야 한다. Fig. 4는 스프레이가 적층되는 원통형 빌렛의 상면을 나타내는데, 부채꼴 oab는 분사기가 빌렛 상면의 가장자리로부터 중심까지 1회 스캔하는 동안 적층이 이루어지는 영역이다. Fig. 4에서 면적소 dA 에 미소시간 dt 동안 적층되는 용탕부피를 dV 라 할때, 다음의 관계식이 성립한다.

$$dV = \Phi dt \tag{9}$$

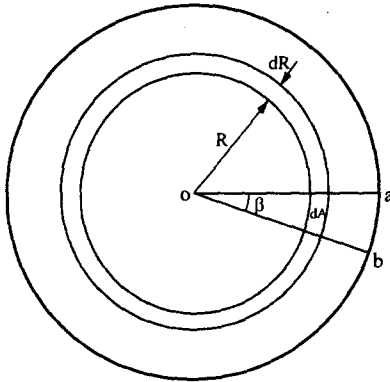


Fig. 4 Top surface of the billet under spray deposition

$$dV = dAh \approx R \beta dR h \quad (10)$$

여기서, Φ_v 는 분사기의 체적 유출속도이며, h 는 적층두께이고, β 는 부채꼴 oab 의 중심각이다. 식 (9), (10)으로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\Phi_v}{\beta h} \frac{1}{R} \quad (11)$$

식 (11)에서 dR/dt 은 원통형 빌렛의 상면에서 분사기의 스캔속도이며, 이는 기관의 반경위치 R 에 반비례해야 함을 알 수 있다. 그러나 챔의 회전에 의해 분사기는 기관의 가장자리와 중심부에 반복적으로 왕복하며 스캔하기 때문에, 스캔속도를 식 (11)과 동일하게 만들 수는 없으며, 원통형 빌렛을 제조하기 위한 챔의 프로파일은 스캔속도가 식 (11)에 최대한 근접하면서 빌렛의 중심과 가장자리에서는 0이 되도록 제작되어야 한다.

3. 성형체 형상 모델링

3.1 성형체와 분사기의 상관위치벡터

실제의 분무성형공정에서는 분사기가 스캔을 하고 기관은 회전을 하면서 하강하지만, 모델링에서는 기관과 좌표계는 고정되어 있으며, 분사기가 기관주위를 회전하면서 스캔 및 상승하는 것으로 설정한다. 성형체와 분사기의 상관위치벡터를 나타낸 Fig. 5로부터 벡터 r_s 와 d_s 를 벡터 A , P , S 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$r_s = B - P = A + \left(\frac{P \cdot S - A \cdot S}{S \cdot S} \right) S - P \quad (12)$$

$$d_s = B - A = \left(\frac{P \cdot S - A \cdot S}{S \cdot S} \right) S \quad (13)$$

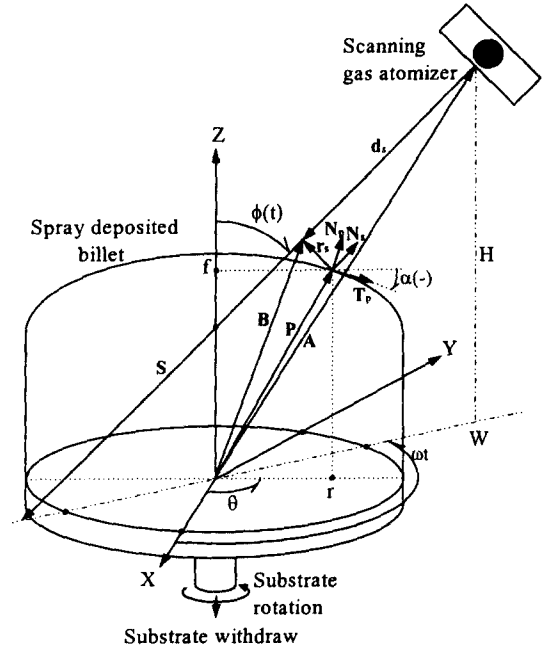


Fig. 5 Position vectors representing relations between spray axis, substrate, and billet

벡터 P 는 적층속도가 계산되는 빌렛 곡면위의 임의의 점 P 를 표시하는 벡터로서 시간과 무관하며, 직교좌표계에서 다음 식과 같이 표시된다.

$$P = [x, y, z] = [r \cos \theta, r \sin \theta, f] \quad (14)$$

여기서, θ 는 점 P 와 Z 축을 포함하는 면이 X 축과 이루는 각도이며, r 과 f 는 형상매개변수로서 r 은 Z 축으로부터 점 P 까지의 거리이고, f 는 X - Y 면으로부터 점 P 까지의 거리이다.

A 는 원점으로부터 분사기까지의 위치벡터인데, 기관의 회전속도가 ω 이고, 하강속도가 v 일 때, $t=0$ 일때의 분사기 초기위치벡터 $A_{(t=0)} = [W, 0, H]$ 를 Z 축으로 ωt 만큼 회전시키고 vt 만큼 평행이동시키면 임의의 시간 t 에서 분사기의 위치벡터 A 는 다음과 같다.

$$A = [W \cos \omega t, W \sin \omega t, H + vt] \quad (15)$$

S 는 분사기로부터 스프레이 중심축이 X - Y 평면과 만나는 점까지의 위치벡터이며, 위치벡터 A 와 스캔각 $\phi(t)$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$S = [- (H + vt) \cos \omega t \tan \phi(t), - (H + vt) \sin \omega t \tan \phi(t), - (H + vt)] \quad (16)$$

식 (14), (15), (16)을 식 (12), (13)에 대입하여 $|d_s|$ 와 $|r_s|$ 를 구하면 다음과 같다.

$$|d_s| = |(H + vt - f) \cos \phi(t) + (W - r \cos(\omega t - \theta)) \sin \phi(t)| \quad (17)$$

$$|r_s| = \left[W^2 + r^2 - 2Wr \cos(\omega t - \theta) + (H + vt - f)^2 - (\sin \phi(t) (W - r \cos(\omega t - \theta)) + \cos \phi(t) (H + vt - f))^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

Fig. 5로부터 임의점 P에서 스프레이축과 평행인 단위벡터 N_s 와 표면에 수직인 단위벡터 N_p 를 구하면 다음과 같다.

$$N_s = \frac{-d_s}{|d_s|} = [\cos \omega t \sin \phi(t), \sin \omega t \sin \phi(t), \cos \phi(t)] \quad (19)$$

$$N_p = [-\cos \phi \sin a, -\sin \theta \sin a, \cos a] \quad (20)$$

여기서, a 는 점 P에서의 접선벡터 T_p 와 Z면이 이루는 각이며, 다음의 관계를 이용하여 구한다.

$$\tan a = \frac{df}{dr} \quad (21)$$

3.2 성형체의 평균성장두께 및 형상함수 결정

빌렛 표면의 임의점에서 스프레이 축방향으로의 적층속도를 구한 식 (6)의 $\dot{m}(r_s, d_s)$ 에 $N_s \cdot N_p$ 를 곱하면 빌렛 표면에 수직방향의 적층속도 Ψ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi(r, \theta, t) &= \dot{m}(r_s, d_s) \{N_s \cdot N_p\} \\ &= \frac{\Phi_V}{2\pi(c_1 d_s + c_2)^2 x(n)} \cdot \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{r_s}{c_1 d_s + c_2} \right)^n \right] \\ &\quad \cdot (\cos a \sin \phi(t) - \sin a \cos \theta \cos \omega t \sin \phi(t) - \sin a \sin \theta \sin \omega t \sin \phi(t)) \end{aligned} \quad (22)$$

표면에 도달한 분무액적이 모두 적층된다고 가정하고, 식 (22)을 적분하면 성형체의 평균성장두께 Δh 를 구할 수 있다.

$$\Delta h = \int_t^{t+\Delta t} \Psi(r, \theta, t) dt \quad (23)$$

Fig. 6은 빌렛 표면의 임의점 P를 포함하며, X-Y 평면에 수직인 빌렛 단면을 나타낸 그림이다.

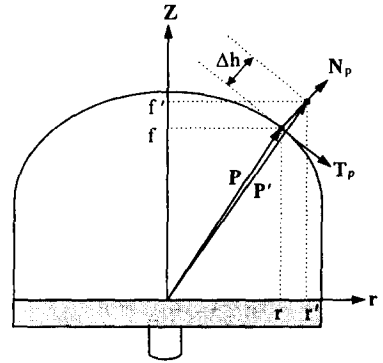


Fig. 6 Schematic showing incremental change of billet shape

벡터 P 는 빌렛 곡면위의 임의의 점 P를 표시하며, 벡터 P' 은 점 P가 미소시간 t 동안 표면에 수직방향으로 성장한 후의 위치를 나타낸다. 이때 다음의 관계식이 성립한다.

$$P' = P + \Delta h N_p \quad (24)$$

식 (24)에 (14), 식 (20), (23)을 대입하여 다음 식을 구한다.

$$\begin{aligned} P' &= [x', y', z'] = P + \Delta h N_p \\ &= [r \cos \theta - \Delta h \cos \theta \sin a, r \sin \theta - \Delta h \sin \theta \sin a, f + \Delta h \cos a] \end{aligned} \quad (25)$$

식 (25)으로부터 벡터 P' 의 원통좌표계 성분 r' 과 f' 은 다음과 같다.

$$r' = \sqrt{(x')^2 + (y')^2} = r - \Delta h \sin a \quad (26)$$

$$f' = z' = f + \Delta h \cos a \quad (27)$$

식 (26), (27)에 초기의 형상매개변수 r 과 f 를 넣어, 미소시간 Δt 후의 개선된 형상매개변수 r' , f' 을 구함으로써 성장하는 성형체의 형상을 계산한다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 공정조건 확립

빌렛의 직경이 0.14 m의 일정한 값을 유지하며, 뒷면이 평평한 봉상성형체를 제조하기 위해 도출된 공정조건을 Table 1에 보였으며, 이를 바탕으로 계산된 빌렛형상은 Fig. 7과 같다. 이와 같이 표면의 성장속도가 균일하고 일정한 정상상태의 적층이 이루어지면, 균일한 미세조직을 갖는 빌렛을 제조

Table 1 Process conditions to produce desired billet shape

Overall volumetric flow rate (ϕ_v)	0.00004 m ³ /s	Initial tilting angle of spray axis (ϕ_0)	34°
Rotational velocity of substrate (ω)	2 π rad/s	Rotational velocity of cam (ω_c)	2 $\pi \times 8.1$ rad/s
Total number of substrate rotations	500	Half scan angle	3°
Substrate withdrawal velocity (v)	0.0004 m/s	Max. displacement of cam (δ_0)	0.01m
Height from substrate to atomizer (H)	0.25 m	c_1, c_2	0.12, 0.003
Width from substrate center to atomizer (W)	0.2 m	Cam equation	$\exp[3(\varphi - \pi)] \sin \varphi$

할 수 있게 된다.⁽⁶⁾ Fig. 8은 시뮬레이션으로부터 도출된 공정조건하에서 제작된 직경 0.14m의 ASP30 합금 고속도 공구강 빌렛형상이다.

4.2 기관의 하강속도가 빌렛형상에 미치는 영향

Fig. 9(a)는 Table 1의 공정조건에서 기관 하강속도를 $v=0.00025$ m/s로 변화시켜 나온 결과이며 Fig. 9(b)는 기관 하강속도가 $v=0.00055$ m/s 일때 계산된 결과이다. 하강속도가 빌렛의 성장속도에 비해 느린 경우에는 빌렛의 가장자리에 집중적인 분사가 이루어져 Fig. 9(a)와 같이 빌렛 하부보다 상부의 반경이 점점 커지며, 빌렛의 윗면이 오목한 형상이 된다. 반대로 Fig. 9(b)와 같이 하강속도가

너무 빠른 경우에는 중심부에 집중적인 분사가 이루어져 빌렛의 윗면이 볼록하고 전체적으로 가늘고 길며 하부보다 상부의 반경이 작은 형태가 된다. 균일한 반경을 유지하는 봉상성형체를 만들기 위해서는 빌렛이 성장하는 속도에 맞추어 기관을 하강 시킴으로써, 적층이 이루어지는 빌렛 윗면과 분사기와의 거리를 일정하게 유지시켜 주는 것이 필요함을 알 수 있다.

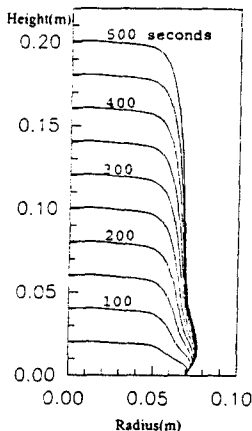


Fig. 7 Desired billet shape at each elapsed time

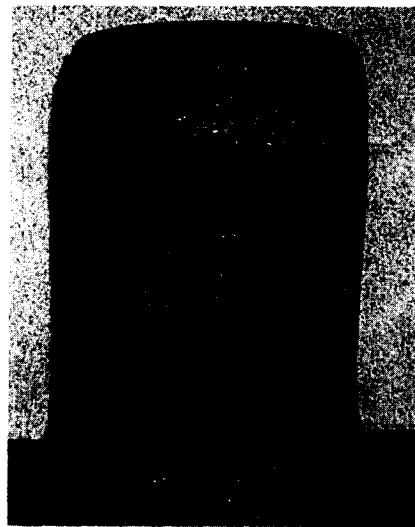


Fig. 8 Photograph of the high speed steel billet manufactured by spray forming process using the process conditions in Table 1

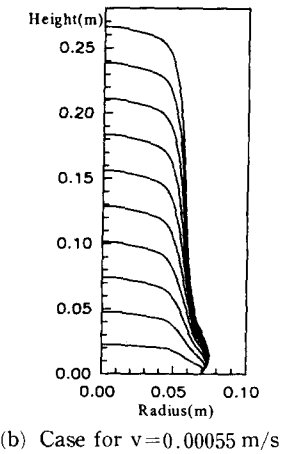
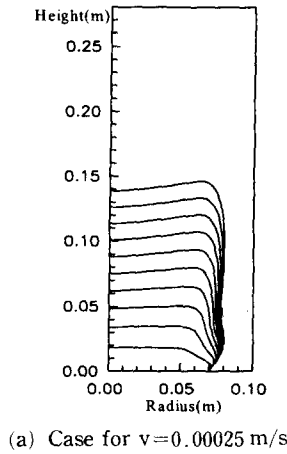


Fig. 9 Billet shape variation due to different withdrawal speeds

4.3 캠에 의한 스캔양상이 빌렛형상에 미치는 영향

Fig. 10의 Cam 1은 분사기가 빌렛의 중심보다 가장자리에 오래 머물도록 설계되어 Fig. 7의 빌렛형상 계산에서 사용한 캠이며, Cam 2는 분사기가 빌렛의 중심과 가장자리에 같은 시간 머물도록 고안되었다. Fig. 10(a)는 두 캠의 Radial Velocity를 나타내며, (b)는 두 캠의 단면변위를 나타낸다. 캠의 Radial velocity를 적분하여 단면변위를 구하는데, 이때 δ 는 $-0.01 \text{ m} \leq \delta \leq 0.01 \text{ m}$ 이 되도록 되었다.

Fig. 11(a)는 Table 1의 공정변수를 그대로 유지하고 캠형상을 Cam 1에서 Cam 2로 교체하여 계산한 빌렛형상이다. Cam 2에 의한 스캔은 빌렛의 가장자리보다 중심부에 단위 표면적당 많은 액적을

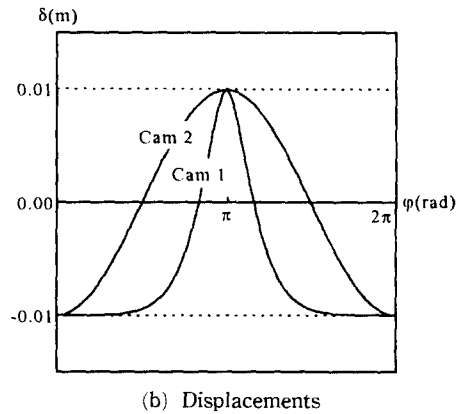
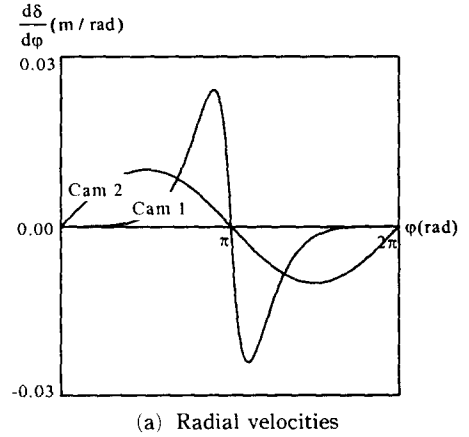
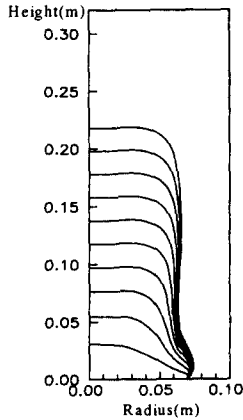


Fig. 10 Cam radial velocities and displacements for Cam 1 and Cam 2.

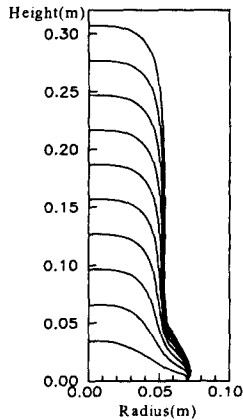
Cam 1 model Eq. (radial vel.) : $\exp[3(\varphi-\pi)]\sin\varphi$
 Cam 2 model Eq. (radial vel.) : $\sin\varphi$

분사하게 되며, 따라서 초기의 약 150회전까지는 빌렛의 상부로 가면서 반경이 작아지는 형상을 유지한다. 그러나 이로 인해 빌렛의 수직방향 성장속도가 기관의 하강속도를 초과하여 생기는 거리가 누적됨에 따라 빌렛의 반경이 다시 커지고 윗면 중심부가 오목해지기 시작하는데, 이는 기관의 하강속도가 빌렛성장속도 보다 느릴때 나타나는 전형적인 현상이다.

Fig. 11(b)는 Cam 2에 의한 분사축 스캔시의 빌렛 성장속도에 상응하는 속도로 기관을 하강시켜 나온 결과이다. 이때 $v=0.0006$ m/s이며 500회전 성형시킨 빌렛의 모양은 높이 0.05m이후 일정한 반경을 유지하며, 빌렛의 윗면은 Fig. 7에 비해 볼록한 반구형상을 이룬다.



(a) Case for $v=0.0004$ m/s



(b) Case for $v=0.0006$ m/s

Fig. 11 Billet shapes produced from Cam 2

5. 결 론

본 연구에서는 분무성형시 성형체의 성장 메카니즘을 이론화한 뒤 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 원통형 빌렛의 성장모델을 확립하였고, 빌렛의 형상을 결정짓는 요인중 기관의 하강속도와 분사기의 스캔양상을 조절하는 캠의 형상을 변화시켜 이에 따른 빌렛의 형상을 예측하였다. 기관의 하강속도는 빌렛의 성장속도에 맞게 조절되었고, 이를 통해 적층이 이루어지는 빌렛 윗면과 분사기와의 거리가 일정하게 유지되어 균일한 반경을 갖는 원통형 빌렛 형상을 얻을 수 있었다. 캠의 형상은 원통형 빌렛의 특성상 빌렛의 중심부보다 가장자리에 액적이 많이 분사되도록 고안되어, 빌렛 상면이 불룩해지

거나 오목해지는 것을 피하고 평면 형상을 얻을 수 있었다. 기관의 하강속도와 캠의 형상을 제어함으로써 균일한 적층을 유도할 수 있었다. 직경이 일정하고 윗면이 평평한 빌렛을 제조하기 위해 도출된 공정조건을 바탕으로 ASP30 합금 고속도 공구강 빌렛을 제작하였다. 본 연구에서 개발된 분무성형시 성형체의 형상모델링을 바탕으로 성형체 내부의 열전달과 변형거동 등에 대한 연구가 진행 중이다.

참고문헌

- (1) Estrada, J. L. and Duszczuk, J., 1990, "Characteristics of Rapidly Solidified Al-Si-X Preforms Produced by the Osprey Process," *Journal of Materials Science*, Vol. 25, pp. 1381~1391.
- (2) Mathur, P., Apelian, D. and Lawley, A., 1989, "Analysis of the Spray Deposition Process," *Acta Metall.*, Vol. 37, pp. 429~443.
- (3) Grant, P. S., Cantor, B. and Katgerman, L., 1993, "Modeling of Droplet Dynamic and Thermal Histories During Spray Forming-I. Individual Droplet Behaviour," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 41, pp. 3097~3108.
- (4) Grant, P. S., Cantor, B. and Katgerman, L., 1993, "Modeling of Droplet Dynamic and Thermal Histories During Spray Forming-II. Effect of Process Parameters," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 41, pp. 3109~3118.
- (5) Annavarapu, S., Apelian, D. and Lawley, A., 1988, "Processing Effects in Spray Casting of Steel Strip," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19A, pp. 3077~3086.
- (6) Annavarapu, S. and Doherty, R. D., 1993, "Evolution of Microstructure in Spray Casting," *The International Journal of Powder Metallurgy*, Vol. 29, pp. 331~342.
- (7) Grant, P. S. and Kim, W. T., 1989, "The Monitoring of Deposit Surface Temperatures During Spray-Forming by Infrared Thermal-Imaging," *Scripta Metallurgica*, Vol. 23, pp. 1651~1656.
- (8) Newbery, A. P. and Cantor, B., 1992, "Arc Spray Forming of Nickel Aluminides," *Scripta*

- Metallurgica et Materialia*, Vol. 27, pp. 915~918.
- (9) Annavarapu, S., Apelian, D. and Lawley, A., 1990, "Spray Casting of Steel Strip: Process Analysis," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21 A, pp. 3237~3256.
- (10) Kang, B., Zhao, Z. and Poulikakos, D., 1994, "Solidification of Liquid Metal Droplets Impacting Sequentially on a Solid Surface," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 436~445.
- (11) Cantor, B., 1993, "Optimizing Microstructure in Spray-formed and Squeeze-cast Metal-matrix Composites," *Journal of Microscopy*, Vol. 169, pp. 97~108.
- (12) Grant, P. S., Maher, P. P. and Cantor, B., 1994, "Heat Flow in Spray-formed Al-4Cu," *Materials Science and Engineering*, Vol. A179/A180, pp. 72~76.
- (13) Lee, E. S. and Ahn, S., 1994, "Solidification Progress and Heat Transfer Analysis of Gas-atomized Alloy Droplets During Spray Forming," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 42, pp. 3231~3243.
- (14) Trapaga, G. and Matthys, E. F., 1992, "Fluid Flow, heat Transfer, and Solidification of Molten Metal Droplets Impinging on Substrates: Comparison of Numerical and Experimental Results," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 23B, pp. 701~718.
- (15) Gutierrez-Miravete, E. and Lavernia, E. J., 1989, "A Mathematical Model of the Spray Deposition Process," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20A, pp. 71~85.
- (16) Lee, H. C., Yeo, D. H. and Oh, K. H., 1993, "A Mathematical Model of Rod-growth Mechanism by Spray Forming," *Light Materials for Transportation Systems*.
- (17) Forest, J., Lile, S. and Coombs, J., 1993, "Numerical Modeling of the Osprey Process," *Proc. 2nd Inter. Conf. on Spray Forming* (Ed. J. W. Wood) 117.