

Kinetic Spraying 기술 (2)

- Gas-particle Interaction -

이 창 회

Kinetic Spraying Technology (2)

- Gas-particle Interaction -

Chang-Hee Lee

저온 분사코팅 공정은 가스 유동장내에 비행입자를 주입하고, 비행입자가 가스 유동장 사이에서 운동에너지와 열에너지 얻어 입자와 모재가 충돌할 때 소성변형을 일으키며 적층되는 기술이다. 이때 입자가 얻게 되는 운동에너지(500~1500m/s)가 입자가 얻는 열에너지(100~200℃)비하여 크기 때문에 저온 용사 공정에서 입자의 적층은 입자의 온도보다는 속도에 의하여 많은 영향을 받는 것으로 받아들여지고 있다. 따라서 입자의 적층기구에 관한 연구는 입자의 속도에 따른 영향을 고려한다. 현재까지 입자의 적층을 위해서는 최소한의 임계속도가 있다고 알려져 있다. 물론 입자적층을 위한 임계속도는 분말과 모재의 성분과 순도, 분말의 크기와 모재의 조도에 따라 변화한다. 그러나 입자 속도 이외의 다른 변수에 의한 영향은 입자 속도의 영향이 적층에 미치는 영향에 비하여 미비하다. 입자 적층에 가장 많은 영향을 미치는 변수는 입자의 속도이므로 충분한 입자의 속도를 얻을 수 있는 노즐의 제작이 필요하며 이를 위해서 가스 압력과 온도 노즐의 형상에 따른 입자의 속도 변화의 이해가 필요하다.

먼저 저온 분사공정 중의 입자 온도에 대해 관찰해보자. 저온 분사공정 중의 입자 온도는 공정 가스 온도가 가스의 속도를 높이기 위하여 상온에서 600℃까지 가열 되므로 높은 가스 온도에 의하여 가열된다. 그러나 가스는 냉각 되면서 운동에너지를 얻기 때문에, 노즐을 통과하면서 가스의 속력이 증가함에 따라 냉각된다. simulation 결과를 보면 입자가 느리고 뜨거운 가스와 접촉하는 시간보다 빠르고 차가운 가스와 접촉하는 시간이 많음이 밝혀졌다. 따라서 입자의 온도는 공정 조건의 가스 온도까지 가열 되지 않으며 물질에 따라 최대 250℃ 까지 가열 되는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 저온 분사코팅은 de Laval 타입(수축/팽

창 노즐)을 사용한다. 높은 압력과 예열된 가스는 노즐의 throat 부분에서 음속에 도달하고 노즐 팽창부에서 가스가 팽창하며 초음속의 속도를 얻게 된다. 노즐에서의 가스의 유동을 등 엔트로피 가스 유동 모델로 가정할 때 노즐 throat에서의 음속의 속도는 가스의 온도와 분자량에 의존한다. 음속의 속도 에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$v_s = \sqrt{\gamma RT / M_w} \quad (1)$$

여기서 γ 는 비열의 비율(ratio of specific heat)이다. 단원자 가스(Monatomic gas)에 대해 γ 는 1.66, 2원자 가스(diatomic gas)에 대해 γ 은 전형적으로 1.4이다. R 은 가스 상수(8314 J/kmolK)이며, T 는 가스 온도 그리고 M_w 는 가스의 분자량이다. 가스 속도 v 와 소리 속도의 관계는 다음과 같이 국부적 마하수(local Mach number) M 으로 표시될 수 있다.

$$v_g = M \cdot v_s \quad (2)$$

국부적 마하수는 단지 노즐의 내부의 기하학적인 형태에 의존하며, 등 엔트로피 가스유동 모델에서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{A}{A^*} = \left(\frac{1}{M} \right) \left[\left(\frac{2}{\gamma + 1} \right) \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma + 1) / [2(\gamma - 1)]} \quad (3)$$

여기서 A 는 노즐 내부의 단면 영역이고 A^* 는 노즐 구멍부분의 영역이다. 가스온도는 또한 국부적 마하수의 함수이다.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (4)$$

여기서 T_0 은 노즐입구에서 측정된 공급된 가스온도이다. 이와 같은 방법으로, 출구 쪽 가스속도는 식 1에서 식 4로부터 계산될 수 있다. 가스속도를 증가시키기 위한 편리한 방법은 공정 가스온도를 증가시키거나 헬륨과 같은 더 작은 분자량을 가진 가스를 사용하는 것이다.

1차원적 수치 모델(One-dimensional numerical model)에서, 입자속도는 가스 유동체의 흐름 내 단일 입자의 저항력(drag force)에 의해 계산될 수 있다. 입자 가속은 식 5에 의해 다음과 같이 묘사될 수 있다.

$$\rho_p \pi D^3 \frac{dv_p}{dt} = \frac{\rho_g (v_g - v_p)^2}{2} C_D \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

여기서 ρ_p 는 입자 밀도(particle density), D 는 입자 지름(particle diameter), ρ_g 는 가스 밀도(gas density), v_p 는 입자 속도(particle velocity), 그리고 C_D 는 저항 계수(drag coefficient)이다. 식 3의 dt 는 dx/v_p 로 대치될 수 있으며, x 는 축방향의 위치이다. 따라서, 입자의 저항 방정식은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\frac{dv_p}{dx} = \frac{3\rho_g C_D (v_g - v_p)^2}{4\rho_p v_p D} \quad (6)$$

식 6을 이용해서 저온 분사에서 공정가스로 질소를 사용했을 때의 실험적 데이터의 상관관계를 다음과 같이 입자속도, 가스속도 그리고 가스압력이 포함되어있는 실험적 방정식을 얻었다.

$$v_p = \frac{v_g}{1 + 0.85 \sqrt{\frac{D}{x} \sqrt{\frac{\rho_p v_g^2}{P_0}}}} \quad (7)$$

P_0 은 노즐 입구에서 측정된 공급된 질소가스의 압력이다. 입자속도의 간단한 실험적 상관관계를 가지고 있는 식 2를 가지고 가스속도를 사용했을 때, 가스온도와 압력은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$v_p = \frac{1}{M \sqrt{\frac{M_{N_2}}{\gamma RT} + 0.85 \sqrt{\frac{D}{x} \sqrt{\frac{\rho_p}{P_0}}}}} \quad (8)$$

여기서 M_{N_2} 는 질소가스의 분자량이다.

식 8을 통하여 입자의 속도는 노즐의 형상에 따라 결정되는 Mach number와 공정가스의 온도와 압력, 분자량, 입자의 밀도와 지름, 노즐에서의 거리등의 함수임을 알 수 있다.

그러나 모든 공정 변수에 따른 실제적 제한이 있으므로, 충분한 입자속도를 얻기 위해서는 최적의 노즐 디자인이 필요하며, 고온 고압의 가스사용을 피하는 것이 바람직하다.



- 이창희(李昌禧)
- 1956년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 표면개질 및 용접
- e-mail : chlee@hanyang.ac.kr