

화염 스프레이 공정에서 미세 금속 입자의 거동 및 유동 특성에 대한 수치해석 연구

신동환* · 이재빈* · 이성혁†

Numerical Study of Metal Particle Behaviors and Flow Characteristics in Flame Spray Process

Dong Hwan Shin*, Jae Bin Lee* and Seong Hyuk Lee†

Key Words: CFD(전산유체역학), Discrete Phase Models(상차분모델), Flame Spraying(화염 스프레이), Micro-Metal Particle(미세 금속 입자)

Abstract

The present study conducted computational simulation for multiphase flow in the flame spray coating process with commercially available Ni-Cr powders. The flows in a flame spray gun is characterized by very complex phenomena including combustion, turbulent flows, and convective and radiative heat transfer. In this study, we used a commercial computational fluid dynamics (CFD) code of Fluent (ver. 6.3.26) to predict gas dynamics involving combustion, gas and particle temperature distributions, and multi-dimensional particle trajectories with the use of the discrete phase model (DPM). We also examined the effect of particle size on the flame spray process. It was found that particle velocity and gas temperature decreased rapidly in the radial direction, and they were substantially affected by the particle size.

기호설명

k : 난류 운동 에너지 [m^2/s^2]
 ϵ : 에너지 소멸률 [m^2/s^3]
 μ : 난류 점성 계수 [$kg/(ms)$]
 F/A : 연료-산소 비율

1. 서 론

최근 산업 및 공업의 발달로 인해 사용되는 부품이 극한의 조건에 노출되는 경우가 많아지고, 이러한 이유로 부품에 사용되는 재료들은 뛰어난 내열성, 내식성, 내마모성, 내침식성 등의 표면 성능이 요구되고 있다⁽¹⁻³⁾. 이러한 조건을 만족하는 표면 개질 기술의 한 가지가 용사(thermal spray) 기법이다. 금속이나 세라믹 등의 재료를 가열하여 녹이거나 혹은 연하게 만든 후, 미립자 상태의 금속 입자를 모재에 충돌시키고, 충돌된 입자가 응고, 퇴적 과정을 거치면서 피막을 형성하는 원리이다. 또한 용사는 모재의 종류에 관계없이 다양한 재료의 코팅 층을 형성할 수 있으며 모재의 형상이나 크기의 제약이 적어 다양한 산업분야에 적용되고 있고⁽⁴⁾, 최근 이슈가 되고 있는 태양열 집열판 표면 처리에도 이용되고 있다⁽⁵⁾. 그러나 용사 과정은 연소, 복합적인 열전달, 압축성 초음속 유동, 비압축성 아음속

(2011년 1월 17일 접수 ~ 2011년 3월 2일 심사완료, 2011년 3월 15일 게재확정)

* 중앙대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

유동, 난류 혼합, 다상 상호작용 등을 모두 고려해 주어야 하는 복잡한 과정이다⁶⁾. 용사의 종류는 매우 다양하며 본 연구에 사용된 용사 방식은 화염 용사(flame spraying)이다. 화염 스프레이 기술의 뚜렷한 장점은 다른 용사 장비에 비해 적용이 용이하며, 운용비용이 저렴하다는 점이다. 일반적으로 용사 코팅에 영향을 미치는 요소로는 금속 입자의 녹는점, 온도, 속도, 노즐 형상, 연료-산소 비율(F/A), 연소 챔버 압력 등이 있다⁶⁾.

화염 스프레이는 일반적으로 1~50 μm 의 금속 입자를 300~1200 m/s의 속도로 분사하여, 연소에 의해 발생하는 유동장에 미세 금속 입자를 실어 모재를 코팅한다. 이 때 입자의 속도, 온도, 크기는 코팅 성능의 중요한 변수이며 금속 입자의 녹는점 또는 그 이하에서 아음속/초음속의 제트 유동에 의해 생성되는 높은 운동 에너지가 코팅 품질에 영향을 미친다.

화염 스프레이 공법에는 앞서 언급한 제어 가능한 변수들과 기온, 습도와 같은 환경적 요인들이 용사 코팅층의 품질에 영향을 미친다^{7,8)}. 그러나 실제 현장에서는 용사 코팅 성능 및 신뢰도 향상을 위한 정량적 분석 없이 작업자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 공정의 결과물은 균일하지 않은 코팅 층으로 인해 제품 성능을 저하시키는 원인이 된다. 또한 현재 대부분의 연구가 파우더(powder) 개발 및 표면 특성 등에 국한되어 있어, 복합적인 열전달, 상변화, 연소 현상에 대한 물리적 현상 규명에 대해서는 연구가 미진한 상태이며, 이러한 연구를 위해서는 화염장의 측정이 필수적이거나 실험적으로 구현하기가 쉽지 않은 상황이다. 따라서 간접적인 연구 방법인 수치해석을 통해 화염 유동장에 대한 정성적 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

본 연구는 전산유체역학을 이용하여 화염장과 입자 거동의 특성을 연구하는 것으로 화염 스프레이 과정에서 온도/속도 분포도를 확인하고 화염장에 대해 분석한다. 또한, 다양한 크기의 금속 입자를 이용하여 화염장 내에서의 입자 거동을 연구하고, 코팅 과정에 있어 적절한 코팅 거리 및 금속 입자의 크기 결정에 대한 가이드라인을 제공하는 것이 본 연구의 최종 목표이다.

2. 연구 내용

2.1 화염 스프레이 해석 조건

본 연구에서 사용한 금속 입자는 실제 실험에서 사용하고 있는 평균 지름이 45 μm 인 Ni-Cr으로 Sulzer Metco

사의 43F-NS를 모사하였으며 입자의 녹는점은 약 1700 K이다. 또한 입자 크기에 따른 영향을 고려하기 위해 다양한 지름의 금속 입자를 사용하여 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 연료는 아세틸렌(acetylene, C_2H_2)이며 연료의 주입 압력은 13 psi로 설정하였으며 연료의 밀도를 고려하여 속도로 환산하면 연료 초기 분사 속도는 약 300 m/s로 아음속에 해당한다. 연료-산소 비율은 3:1로 설정하였으며 반응물로는 이산화탄소와 물이 생성되는 1차 연소 방정식으로 글로벌 반응(global reaction)을 사용하였다. 즉, 라디칼(radical)이 생성되는 단일단계 반응을 배제하였다.

본 연구에서는 화염 스프레이 과정에서 금속 입자의 비산 속도, 대상 표면에 도달할 때의 금속 입자의 온도, 대상 표면과의 거리 등에 대해 해석을 수행하였다. 금속 입자는 유동에 영향을 미치지 않는다는 가정 하에 정상 상태(steady state) 조건으로 계산하였다. 초기 해석 대상의 내부 온도는 300 K로 공기가 가득한 상태(대기압)로 조건을 설정하였다.

2.2 화염 스프레이 모델링

본 연구에서 사용한 해석 영역에 대한 정보를 Fig. 1에 나타내었다. 해석 영역은 2차원 축대칭(2D axisymmetric)으로 구성하였으며, 중심축을 따라 입자가 분사되고 그 바깥쪽으로 연료와 산소가 분사되는 것으로 설정하였다. 수치해석 시 압력에 의한 역류(reversed flow)의 영향을 배제하기 위해 유동의 진행 방향과 이에 상응하는 부분의 해석 영역을 충분히 길게 설정하였다. 2차원 모델링은 격자 전용 프로그램인 ANSYS ICEM-CFD 12.0을 이용하였으며, 사각격자를 사용하여 약 10만개의 격자를 구성하였다.

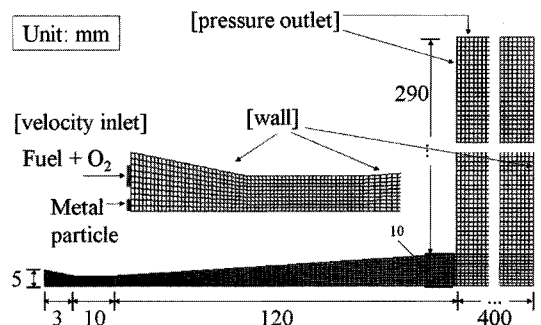


Fig. 1 Schematics and dimension of the calculating domain in the flame spray process

2.3 지배 방정식

본 연구는 화염 스프레이의 유동 및 온도 분포를 분석하기 위하여 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 종 보존방정식을 사용하였고, 연속방정식은 제어체적에서의 질량 보존의 법칙에 기초하고 있으며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식은 제어체적에 작용하는 힘의 합이 제어체적의 운동량의 변화와 같다는 것을 의미하며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)의 항들은 제어체적의 각 방향에 수직으로 유출되는 운동량, 제어체적에 작용하는 압력, 밀도 차이로 인한 중력 및 점성력을 각각 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

식 (3)의 에너지방정식은 제어체적의 에너지 변환율과 제어체적에 가해진 일이 열의 변화를 합과 같다는 열역학 제 1법칙으로부터 얻을 수 있으며, 열전달 현상과 온도 분포를 예측하기 위해 사용된다. 식 (4)는 종 보존방정식으로 연소 반응물과 생성물 사이의 종이 보존됨을 의미한다.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

난류 유동장 해석에는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 속도와 압력의 연결은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 온도 변화에 따른 가스 밀도 계산은 비압축성 이상기체의 상태방정식(incompressible ideal gas law)을 적용하였다. 표준 $k-\epsilon$ 모델은 2 방정식 모델(two-equation model)의 일종으로 난류유동을 지배하는 속도 스케일과 길이 스케일을 수송방정식 형태로 나타낸 것이다. 이 모델에서 이용되는 k 및 ϵ 수송방정식의 최종 형태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

난류 운동 에너지 방정식

$$\frac{\partial(\rho u_k k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + P - \rho \epsilon \quad (5)$$

난류 운동 에너지 방정식의 소멸률

$$\frac{\partial(\rho \mu_k \epsilon)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} P - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기에서 난류 생성항 P 는 식 (7)과 같다.

$$P = -\overline{\rho u_i u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad (7)$$

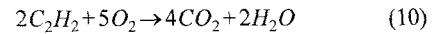
한편, 난류점성계수 μ_t 는 다음과 같은 난류운동에너지 k 와 에너지 소멸률 ϵ 의 관계식으로 주어진다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

하지만 위 난류모델은 완전 난류영역에서만 사용할 수 있으며, 벽면 부근에서는 벽함수(wall function)를 사용한다. 이 난류 모델에 사용된 모델 상수는 각각 다음과 같다.

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.3 \quad (9)$$

본 연구에 사용된 연소 모델을 선정하기 위해 화염 스프레이 연소 과정에서 분사되는 연료와 산소가 글로벌 반응을 하며, 또한 연소 생성물에 고형 탄소성분이 없어 연소 시 char의 생성은 없는 것으로 가정하였다. 화염 스프레이 내에서 일어나는 공기와 휘발성 기체 간의 반응모델은 eddy-dissipation 모델을 사용하여 계산하였고, 이 때 아세틸렌과 산소와의 단일 이론 반응식은 식 (10)과 같으며, 단일 조건일 때 이론 최대 온도가 3358 K임을 확인하였다.



$$H_{react} = \sum_{react} N_i \vec{h}_i = H_{\Pi} = \sum_{\Pi} N_i \vec{h}_i$$

다음으로 금속 입자가 포함된 난류 유동을 모사하기 위하여 식 (11)과 같이 상차분모델(Discrete Phase Model, DPM)을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (11)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{Re}{24}$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$$

또한 화염 스프레이 연소 시 고온현상을 더 실제적으로 모사하기 위해 연소 계산 과정에 복사열전달 효과를 고려하였고, 복사열전달 모델로는 P-1모델을 사용하였으며 시간에 대해서는 Runge-Kutta 방법을 사용하였다⁽⁹⁾.

본 연구에서는 화염 스프레이 유동의 속도 및 온도, 압력 구배, 입자 유동을 모사하기 위하여 범용 열·유체 해석 프로그램인 Fluent(ver. 6.3.26)를 이용하였으며, 해석 시간은 1.6 GHz, 4GB RAM(Intel® Core™ i7 CPU Q720)을 사용하며 8 node를 병렬 연결하여 약 3시간의

처리 시간이 소요되었다.

3. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 화염 스프레이 코팅 성능을 파악하기 위하여 화염 온도, 화염 속도, 금속 입자의 온도, 금속 입자의 속도 분석을 통해 노즐과 코팅 대상 표면 사이의 적절한 거리에 대해 분석을 하였으며, 유동장 내에서 입자 크기에 따른 해석을 바탕으로 용사 조건에 따른 적절한 입자 크기의 선택에 대해 논의하였다. 세부적으로 모재와 화염 스프레이 노즐 사이의 일반적인 거리인 130~180 mm의 조건을 고려하여 화염 스프레이 코팅 과정을 분석하였다. 본 연구에서 고려한 화염 스프레이의

경우, 대상 표면을 코팅함에 있어 금속 입자의 온도가 녹는점에 근접하는 조건이 매우 중요하며, 또한 균일한 코팅 품질을 얻기 위하여 화염 스프레이의 온도 분포 역시 매우 중요한 요소임을 확인하였다. Fig. 2~5는 각각 화염 스프레이 계산에 따른 화염 유동장의 온도 및 속도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 화염의 온도 분포를 나타낸 것으로 대칭축을 기준으로 해석 영역 내 화염의 온도 변화 분포를 확인할 수 있다. 해석 영역에서 화염의 최고 온도는 2469 K, 최저 온도는 초기 조건인 300 K로 나타났다. 해석 결과 노즐에서 거리가 멀어질수록 화염의 속도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 화염이 빠른 속도로 전파되기 때문에 연료-산소 비율에 따라 연료 과농(fuel rich) 조건에서 온도가 높게 나타나며, 화염 외부 온도의 변화가 적은 것은 화염의 빠른 전파 속도에 비해 열전달이 느리게 진행되기 때문이다. 화염의 온도 분포 분석은 코팅하고자 하는 대상 표면과 노즐 사이의 적절한 거리를 선정하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

Fig. 3은 노즐을 통과한 후 대칭축을 따라 노즐 시작 부분부터 150, 200, 250, 300, 350, 400 mm 떨어진 곳에서의 반경 방향으로 온도 분포를 나타낸 것이다. 노즐에서 거리가 멀어질수록 대칭축 상의 화염 온도가 낮아짐을 확인할 수 있고, 대칭축에서 반경 방향으로 멀어질수록 화염의 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 연료와 산소의 비율에 따른 효과 및 화염의 전파 속도에 따른 효과에 의한 결과라 판단한다. 노즐로부터 거리가 가까울수록 온도 분포 그래프의 폭이 좁고 거리가 멀어질수록 완만한 곡선의 형태가 나타나는 것은 화염 속도가 낮아짐에 따라 확산에 의해 주변으로 열이 전파되는 효과 때문이다.

Fig. 4는 화염의 속도 분포를 나타낸 결과이다. 최고 속도는 3051 m/s로 연료와 산소가 분사되는 곳에서 노즐의 폭이 좁아지는 영역에서 나타났으며, 코팅 대상 표면 부근의 속도를 자세히 보기 위해 최고 속도를 500 m/s까지 표현하였다. 음속이 공기 중에서 약 331 m/s인 것을 고려하면 대칭축을 따라 이동하는 화염의 속도는 상당히 큰 운동에너지를 내포하고 있음을 의미한다. 아음속 또는 초음속의 화염 유동은 녹는점에 도달한 금속 입자 이외에 녹는점에 이르지 못한 금속 입자의 코팅 성능에 영향을 미칠 것으로 판단한다. 따라서 화염의 속도 역시 신뢰도 있는 표면 코팅에 있어 중요한 요소라 할 수 있다.

Fig. 5는 노즐을 통과한 후 대칭축을 따라 각 위치에서

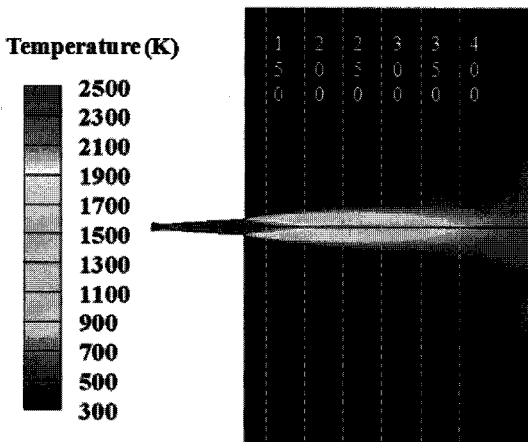


Fig. 2 Contours of gas static temperature

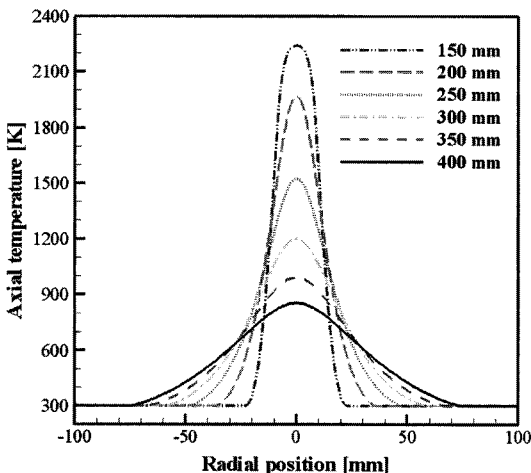


Fig. 3 Axial gas temperature in the radial direction at different locations

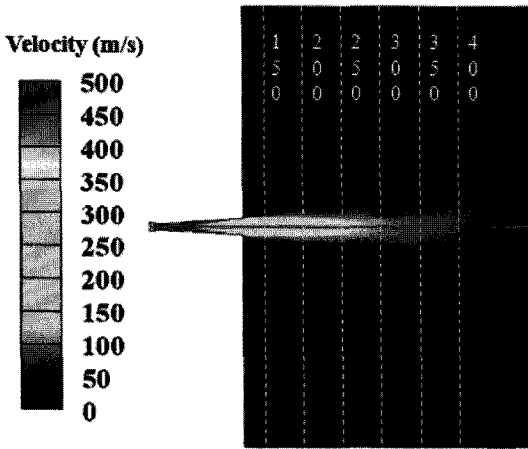


Fig. 4 Contours of gas velocity magnitude

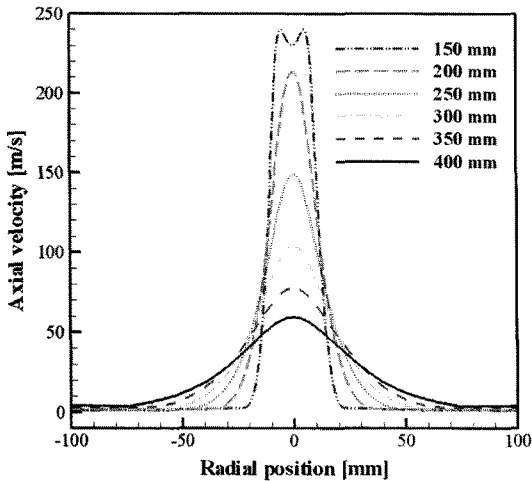


Fig. 5 Axial gas velocity in the radial direction at different locations

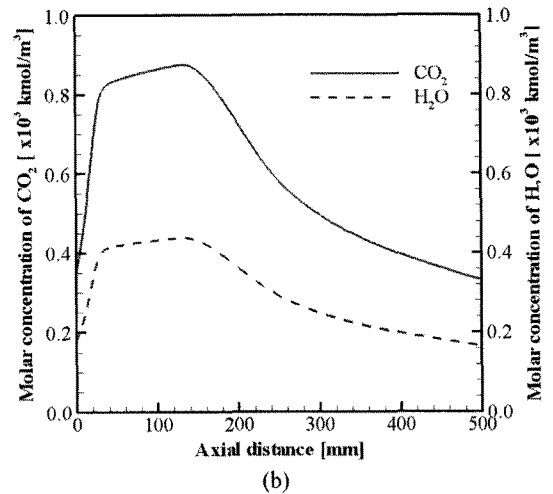
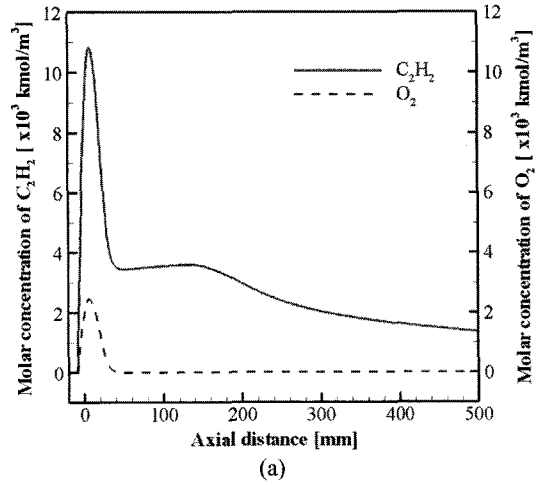


Fig. 6 Species concentration of the combustion process. (a) reactants of combustion; fuel and oxygen, (b) products of combustion; carbon dioxide and vapor

의 반경 방향의 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타난 경향과 유사하게 노즐에서 멀어질수록 화염의 속도는 작아지며, 반경 방향으로 멀어질수록 화염의 속도가 작아지는 것을 알 수 있다. 각 위치에 대해 대칭축 상에서 속도가 가장 빠르게 나타나는 것은 초기 아음속으로 분사된 연료와 산소의 직진성에 따른 영향으로 사료된다. 노즐로부터 거리가 150 mm 떨어진 지점에서 포물선 형상이 나오지 않는 것은 화염이 노즐을 빠져나오는 과정 중 벽면 끝단을 통과하면서 유동이 빨라지기 때문이다.

Fig. 6은 연소 반응에 따른 종 밀집도(species concentration)를 도식화 한 그래프이다. 앞서 설명한 결과와 마찬가지로 해석 영역 앞쪽 부분에서 연료 과농 조건이 형성됨과 활발한 연소가 일어나는 것을 알 수 있고, 연

소 생성물 역시 해석 영역의 앞쪽에서 많이 나타나며 뒤쪽으로 갈수록 적어지는 것을 확인하였다. 앞선 설명에서 해석 영역의 뒤쪽에서 온도가 다소 낮게 나타나는 것은 대류에 의해 해석영역의 뒤쪽으로 전파된 연소 생성물과 반응에 참여하지 않은 연료가 연소에서 발생하는 열을 흡수하는 역할을 하기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 해석 영역을 따라 이동하는 금속 입자의 크기가 입자의 속도에 미치는 영향에 대해 분석한 결과이다. 금속 입자의 거동을 모사하기 위하여 삼차분모델 중 escape 조건을 사용하였다. 금속 입자의 크기는 질량 및 열용량과 관련이 있고 이에 따라 입자의 거동 및 온도 분포는 달라진다. 이를 검증하기 위하여 동일한 화염 유

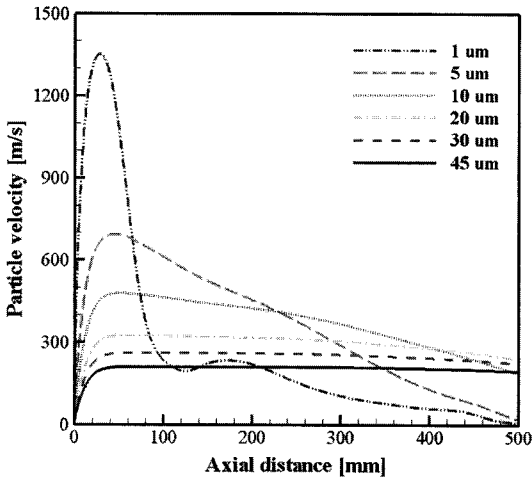


Fig. 7 The effect of particle size for the axial particle velocity

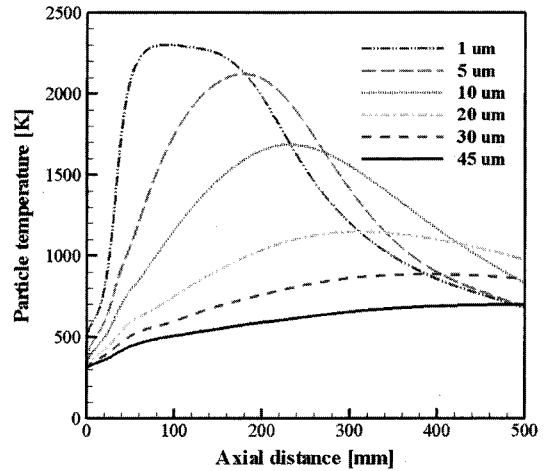


Fig. 8 The effect of particle size for the axial particle temperature

동장에 대해 다양한 크기의 금속 입자를 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 금속 입자들의 평균 지름은 1, 5, 10, 20, 30, 45 μm 이며, 지름 1 μm 의 Ni-Cr 입자의 경우 화염의 유동장에 가장 영향을 많이 받으며 속도 분포 역시 빠르게 증가했다가 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 입자의 크기가 커질수록 화염 유동장의 영향이 적으며 45 μm 입자의 경우 초기 속도가 증가한 후 일정한 속도를 유지하며 해석 영역을 빠져나가는 것을 알 수 있다. 즉, 금속 입자의 크기는 질량의 차이를 의미하고 입자가 작은 경우 유동에 의해 속도 분포가 불안정해지며, 이는 신뢰도 높은 코팅 품질에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Fig. 8은 대칭축 방향으로 이동하는 다양한 크기의 Ni-Cr 입자들의 온도 변화를 나타낸 것이다. 해석 결과 모든 입자들은 Ni-Cr의 녹는점인 3200 K 이하로 입자가 연소 반응에 의해 소실되지 않으며, 입자 크기에 따라 온도 상승 정도가 차이가 나는 이유는 동일한 열용량을 가지는 입자들의 질량 차이에 기인한다. 금속 입자의 크기가 1, 5 μm 인 경우 Ni-Cr의 녹는점 1700 K 이상으로 가열되며, 10 μm 의 경우 노즐로부터 거리가 약 200 mm 지점에서 녹는점에 도달함을 확인하였다. 또한, 입자의 크기가 20, 30, 45 μm 인 경우는 해석 영역 내에서 녹는점에 도달하지 못하는 것을 확인하였다. 즉, 1, 5, 10 μm 크기 입자의 경우 노즐 시작부에서 거리가 약 250 mm되는 지점까지 충분히 녹은 상태에서 코팅이 가능하다는 것을 의미한다. 이와 대조적으로 입자의 크기가 20, 30, 45 μm 인 경우는 녹는점 이하의 온도를 나타

내지만, 입자의 속도를 고려할 때 충분히 큰 운동에너지를 가지며, 본 효과와 연소에 의한 입자 온도 상승이 상호작용하여 코팅이 이루어질 것으로 판단한다. 따라서 화염 스프레이 코팅에 있어서 용사 건의 종류에 따른 적절한 크기의 입자를 선택하는 것이 높은 신뢰도를 가지는 코팅을 위해 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통해 화염 스프레이의 입자 분사 및 연소 과정을 수치해석 기법을 이용하여 모사하였고, 화염의 온도 분포와 속도 분포를 통해 연소 반응 시 나타나는 해석 영역 내 유동장의 특징을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 45 μm 금속 입자의 경우, 유동장 내에서 녹는점보다 낮은 온도인 700 K까지만 가열되지만, 약 220 m/s의 속도에서 만들어지는 높은 운동에너지에 의해 코팅이 이루어지는 것으로 판단된다.

2) 금속 입자의 크기가 너무 작을 경우, 유동장에 의해 입자의 거동이 매우 불안정해지며, 이는 코팅의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

3) 화염 스프레이 작업에 있어 코팅 대상 표면과 노즐 사이의 적절한 거리 선정을 위해서는 금속 입자의 가열 효과와 속도에 의한 운동에너지 효과를 반드시 고려해야 한다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2010-0028181)으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) V. P. Rotshtein, D. I. Proskurovsky, G. E. Ozur, Yu. F. Ivanov and A. B. Ro. Markov, "Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 180~181, pp. 377~381, 2004.
- (2) M. Astrand, T. I. Selinder, F. Fietzke and H. Klostermann, "PVD-Al₂O₃-coated cemented carbide cutting tools", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 188~189, pp. 186~192, 2004.
- (3) J. F. Li and F. H. Stott, "Statistical approach for minimizing cracks in combined flame spraying and laser surface modification of refractory ceramics", *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 563, Issue 2, pp. 249~255, 2004.
- (4) K. Ghosh, T. Troczynski and A. C. D. Chaklader, "Aluminum-silicon carbide coating by plasma spraying", *J. of Thermal Spray Technology*, No. 7, pp. 78~86, 1998.
- (5) B. A. Kim, K. H. Choi and S. H. Roh, "Research on surface coating of a solar collector using thermal spray foaming methodology for low cost", *한국태양에너지학회 논문집*, Vol. 26, No. 3, pp. 9~16, 2006.
- (6) H. Tabbara and S. Gu, "Computational simulation of liquid-fuelled HVOF thermal spraying", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 204, pp. 676~684, 2009.
- (7) K. T. Kim and Y. S. Kim, "Process optimization for thermal-sprayed Ni-based hard coating by design of experiments," *한국동력기계공학회지*, Vol. 13, No. 5, pp. 89~94, 2009.
- (8) J. C. Kwon, M. K. Cho, I. H. Kim, T. W. Hong, S. Y. Kweon, Y. G. Lee, S. W. Park and S. C. Ur, "Fabrication of graphite-Ni composite powders and effect of thermal spray coating parameters on mechanical and microstructural properties", *한국분말야금학회지*, Vol. 12, No. 2, pp. 136~145, 2005.
- (9) Fluent Inc., "FLUENT 6.3 User's Guide", 2006.
- (10) ANSYS Inc., "ANSYS ICEM-CFD 12.0 Manual", 2009.