

## 연료 종류 및 당량비에 따른 Flame Spray 화염장의 열-유동 특성 연구

이재빈\* · 김대윤\* · 신동환\* · 이성혁†

## Thermal and Flow Characteristics of Fluid with Fuel Type and Equivalence Ratio in Flame Spray Process

Jae Bin Lee, Dae Yun Kim, Dong Hwan Shin and Seong Hyuk Lee

**Key Words:** Flame spray(화염 스프레이), Fuel type(연료 종류), Equivalence ratio(당량비), Global reaction(총괄 반응), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

## Abstract

The present study aims to investigate the flow characteristics with respect to fuel type and equivalence ratio in the flame spray coating process. The flame spray flow is characterized by much complex phenomena including combustion, turbulent flows, and combined heat transfer. The present study numerically simulated the flame spray process and examined the gas dynamics involving combustion, gas temperature and velocity distributions in flame spray process by using commercial computational fluid dynamics (CFD) code of FLUENT (ver. 13.0). In particular, we studied the effect of fuel type and equivalence ratio on thermal and flow characteristics which could substantially affect the coating performance. From the results, it was found that the gas temperature distributions were varied with different fuels because of reaction times were different according to the fuel type. The equivalence ratio also could change the spatial flame distribution and the characteristics of coated layer on the substrate.

## 기호설명

$\mu$  : 가스 점성 (kg/m·s)  
 $\mu$  : 난류 점성 계수 (kg/m·s)  
 $Re$  : 레이놀즈 수  
 $\rho$  : 가스 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $u$  : 가스 속도 (m/s)  
 $k$  : 난류 운동 에너지 (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon$  : 에너지 소멸률 (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)  
 $k_{fr}$  : 반응속도상수 (cm<sup>3</sup>/gmol·s)

$A_r$  : 선지수함수 인자 (cm<sup>3</sup>/gmol·s)  
 $\beta_r$  : 온도 지수 인자  
 $E_r$  : 활성화 에너지 (kJ/gmol)

## 1. 서론

최근 산업분야의 기술발달로 인해 각종 기계에 사용되는 여러 부품들이 뛰어난 내열성, 내식성, 내마모성, 내침식성을 가지도록 요구되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 이러한 요구에 따라 등장한 표면 개질 기술 중 하나가 용사(thermal spray) 기술이다. 용사란 고온의 열원에 의한 열에너지와 고압 공정가스의 유입에 의한 운동 에너지를 이용하여 유동장 내의 입자를 용융시키고 가속시켜 코팅 대상 표면에 충돌시키고, 충돌된 입자를 응고, 퇴적시켜 코팅 층을 형성하는 기술이다. 특히, 모재의 종류

(2013년 11월 15일 접수 ~ 2013년 12월 6일 심사완료, 2013년 12월 12일 게재확정)

\*중앙대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

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

나 형상에 제약이 적고 원하는 표면 성질에 따라 코팅 재료를 선정할 수 있어 다양한 산업 분야에 응용되고 있다<sup>(4-6)</sup>.

용사의 적용범위가 넓어짐에 따라 다양한 조건에서 용사코팅의 품질을 높이기 위하여, 지배적인 영향을 끼치는 변수들과 최적의 코팅조건을 찾기 위한 수치해석적 그리고 실험적 연구가 다수 진행되고 있다.<sup>(7-9)</sup> Kaspárova<sup>(9)</sup> 등은 실험적 연구를 통해 당량비(equivalence ratio), 화염의 주입 압력 등의 변수가 용사 코팅 층에 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 다양한 용사 조건에 대한 화염 특성을 실험적으로만 분석하기에는 많은 제약 사항이 있기 때문에 최근 연구자들은 수치해석을 통하여 화염 유동장의 복합적인 물리현상과 그 특성에 대해 연구를 진행하고 있다<sup>(10-14)</sup>. Kamnis<sup>(13)</sup> 등은 수치해석적 연구를 통하여 프로판(propane, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 연료의 용사 시 속도와 온도분포를 분석하였으며 산소와의 단열 화염 온도를 기준으로 총괄반응(global reaction) 해석 모델의 신뢰도를 검증하였다. 사실 다양한 연료 종류에 따른 용사 건 및 노즐이 제작되어 산업에서 사용되고 있으나, 연료 종류에 따른 화염 특성을 파악하지 못하고 대부분 사용자의 경험에 의존하여 작업이 이루어 지는 한계점이 있다. 따라서 균일한 코팅 품질 확보를 위해 다양한 연료 조건에 따른 화염의 특성 파악과 최적의 용사 조건에 대한 기준이 요구되고 있다.

본 연구는 전산유체역학을 이용해 용사코팅 운용 조건 중 다양한 연료 종류에 따른 화염장의 특성을 파악하였다. 또한 실제 산업현장에서 연료로 많이 사용하고 있는 아세틸렌(acetylene, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)을 대상으로 당량비에 따른 화염장의 특성을 분석하였다. 이를 통해 균일한 품질의 용사코팅을 위한 연료의 종류와 당량비의 가이드라인 제공을 목표로 한다.

## 2. 연구내용

### 2.1 화염 스프레이 해석 조건

본 연구에서는 연료의 종류와 당량비의 차이에 따른 화염의 온도 및 유동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 적용한 연료는 메탄(methane, CH<sub>4</sub>), 아세틸렌, 프로판이며 연료의 주입 압력은 25 psi로 고정하였다. 또한, 당량비에 따른 화염 특성을 확인하기 위하여 아세틸렌을 대상으로 0.5, 1, 3으로 다양하게 적용하여 해석을 진행하였으며, 연료의 반응은 1차 연소 방정식으로

CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 생성되는 총괄반응을 사용하였다. 정상상태(steady state) 조건으로 계산하였으며 초기 해석 영역의 내부 온도는 278.15 K의 공기가 채워진 대기압 조건을 설정하였다.

### 2.2 화염 스프레이 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 해석 영역에 대한 형상을 나타내는 그림이며, 해석 영역은 3차원으로 구성하였다. 본 연구에서는 Sultzer Metco 사의 5P-II건의 노즐

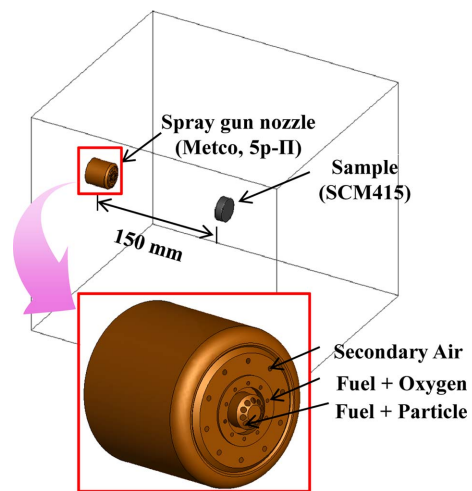


Fig. 1 Schematic representation of the flame spray gun nozzle geometry, showing three kinds of inlet holes and sample specimen located 150 mm from the gun

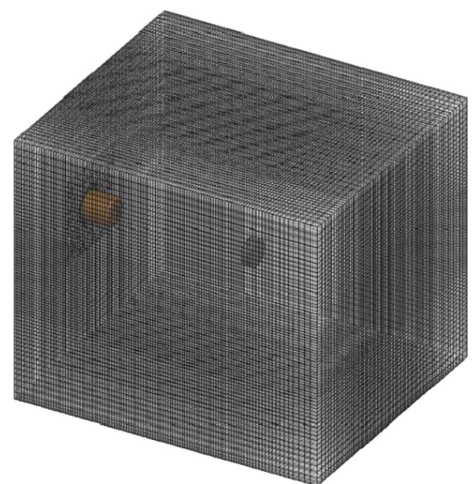


Fig. 2 Computational grid including flame spray gun nozzle and sample specimen

을 Pro-engineer Wildfire 5.0을 이용하여 형상화 하였다. 노즐은 Fig. 1과 같이 반지름이 서로 다른 3개의 동심원을 중심으로 각 10개씩 배치되어 있는데 중간 위치의 노즐에서 입자와 연료가 분사되고 가운데 노즐에서 연료가 분사되며 바깥쪽 노즐에서는 공기가 분사된다. 수치해석 시 압력에 의한 역류를 배제하기 위해 유동의 진행방향과 이에 상응하는 부분의 해석 영역을 충분히 크게 설정하였다.

Lee<sup>(14)</sup> 등은 용사 거리에 따른 코팅 층의 접착력에 대한 연구를 통하여 적절한 용사 거리를 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 적절한 용사거리인 150 mm로 용사 노즐과 시편 사이의 거리를 고정하여 수치해석을 진행하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 격자를 나타낸 것이며, 격자 전용 프로그램인 ANSYS ICEM-CFD 13.0을 이용하여 구성하였다. Hybrid mesh를 이용하여 화염 장 주변에 약 148만 개, 화염 장 외부에 약 40만 개의 격자를 생성하여 총 188만 개의 격자를 구성하였다. Table 1은 본 연구에서 고정적으로 사용한 각 노즐의 경계조건, 연료의 종류, 각 연료의 단열화염온도 및 아세틸렌의 당량비 조건을 나타낸다. 단열화염온도는 메탄의 경우 일반 공기-연료 반응 시 2248 K이다. 하지만 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 산소-연료를 공급하여 순산소 반응으로 화염을 형성시키고 있기 때문에 메탄, 아세틸렌, 프로판에 대하여 순산소 반응 시 단열화염 온도를 계산하였다.

Table 1 Summary of experimental details

Process	Details
Fuel-oxygen inlet pressure	25 psi
Cooling air inlet pressure	15 psi
Fuel type	Methane Acetylene Propane
Acetylene equivalence ratio	0.5 1 3
Adiabatic flame temperature (stoichiometric Oxy-Fuel combustion at 1 atm)	Methane : 3053 K Acetylene : 3324 K Propane : 3123 K
Environmental conditions	14.7 psi (1 atm) 293.15 K
Spray distance	150 mm

### 2.3 지배방정식

본 연구에서는 화염 스프레이의 유동 및 온도 분포를 분석하기 위해서 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 종(species) 보존방정식을 사용하였다. 연속방정식은 제어체적에서의 질량 보존 법칙을 나타내는 식으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식은 제어체적에 작용하는 힘의 합이 제어체적의 운동량 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 외력 및 Reynolds stress를 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

식 (3)의 에너지 방정식은 제어체적의 에너지 변화율과 제어체적에 가해진 일이 열의 변화율 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.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \vec{J}_j + R_i + S_i \quad (4)$$

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

난류 운동 에너지 방정식

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

난류 운동 에너지 방정식의 소멸률

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

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

한편, 난류점성계수  $\mu$ 는 다음과 같은 난류운동에너지  $\kappa$ 와 에너지 소멸률  $\varepsilon$ 의 관계식으로 주어진다.

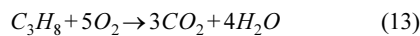
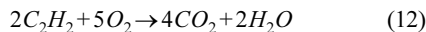
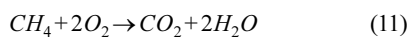
$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

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

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.099, \sigma_k = 1.3 \quad (9)$$

연소 모델로는 Arrhenius expression<sup>(10)</sup>을 이용하여 종의 생성 및 소멸률을 계산하는 laminar finite rate model을 사용하였다.  $A_r$ 은 pre-exponential factor,  $E_r$ 은 activation energy이며 본 연구에서는  $3.66 \times 10^{10}$ ,  $1.26 \times 10^8$  (J/kg·mol)으로 각각 적용하였다. 실제 연소 과정에서는 intermediate species가 생성되는 연차적 반응으로 화학 반응이 일어나기 때문에 다중반응 모델(multi reaction model)의 적용이 필요하나, Robi<sup>(15)</sup> 등에 따르면 다중 반응 모델과 단일 반응 모델(single reaction model)의 수치 해석 결과 경향이 일치하기 때문에 본 연구에서는 총괄 반응을 적용하여 계산을 수행하였다. 메탄과 산소의 단일 이론 반응식은 식 (11)과 같으며, 아세틸렌과 프로판의 단일 이론 반응식은 각각 (12), (13)과 같다.

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \quad (10)$$



본 연구에서는 화염 스프레이 유동의 속도 및 온도, 압력 구배, 입자 유동을 모사하기 위하여 범용 열 유체 해석 프로그램인 FLUENT 13.0을 이용하였으며, 해석 시간은 3.5 GHz, 12GB RAM(IntelR Core™ i7 2700K CPU)을 사용하여 4 node를 병렬 연결하여 약 4시간의 처리시간이 소요되었다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 연료의 종류와 당량비에 따라 화염 특

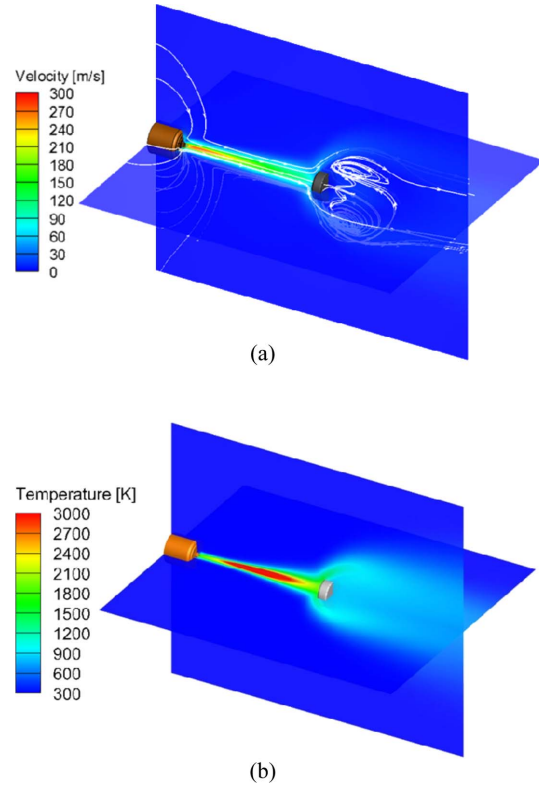


Fig. 3 3D contours of (a) flame velocity, and (b) temperature distributions

성 및 형상을 예측하기 위하여 화염 온도와 속도 분포를 분석하였다. Fig. 3은 아세틸렌을 연료로 하고 당량비가 1인 경우 화염장의 속도 및 온도분포를 3차원으로 나타낸 그림이다. 화염의 속도는 노즐 입구에서 최고 약 300 m/s로 나타나며, 시편 근처에서는 벽면효과에 의하여 약 80 m/s로 예측되었다. 본 속도는 녹는점에 도달하지 못하여 용융되지 않은 입자들도 충분한 운동에너지로 코팅이 가능함을 의미한다. 화염용사는 초기 용사 시에 연료와 산소를 혼합하여 분사하기 때문에 예혼합연소의 거동을 보인다. 화염장의 온도분포에서 최고 온도는 노즐로부터 약 60 mm인 지점에서 약 3300 K으로 나타나며 시편 근처에서는 약 1800 K으로 예측되었다.

연료의 종류에 따라 산소와 반응하는 시간 및 연소속도가 다르기 때문에 초기 연료분사속도가 동일할 경우, Fig. 4와 같이 비교적 화학반응시간이 빠른 아세틸렌의 경우가 다른 연료에 비해 노즐로부터 최고 온도에 도달하는 거리가 비교적 짧게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 축 방향으로 최고온도가 나타나기 이전에 시

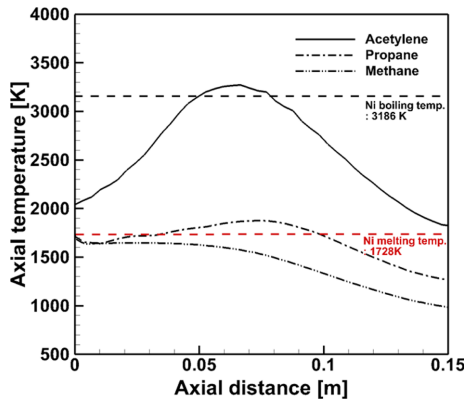


Fig. 4 Axial gas temperature in the axial direction with respect to different fuels at the stoichiometric condition

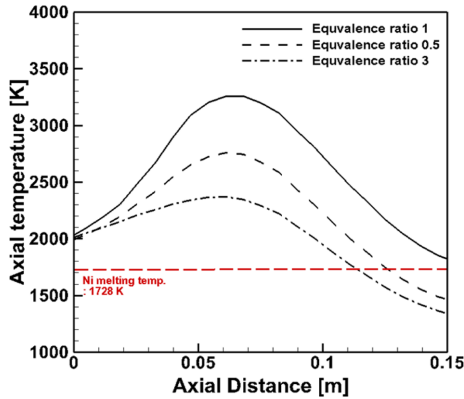
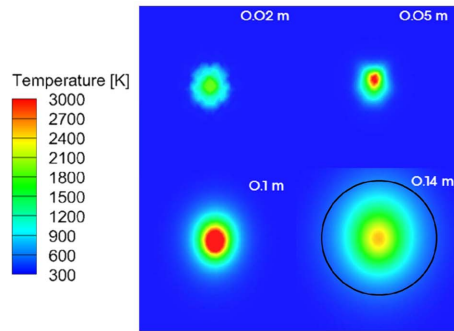


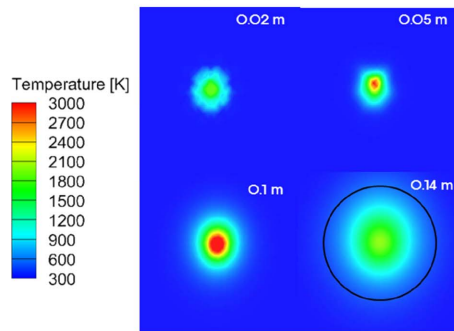
Fig. 5 Axial gas temperature in the axial direction with respect to the equivalence ratio of the acetylene case

편이 위치하는 경우 시편의 주위에서 최고온도가 나타나게 되어 시편 혹은 코팅 층에 영향을 줄 수 있으며 본 데이터는 용사 거리 선정에 활용될 수 있다. 또한, Fig. 4에서 단일화염 온도가 가장 높은 아세틸렌을 연료로 사용한 경우 화염의 최고 온도가 가장 높게 나타났다. 용융점이 1728 K인 니켈 입자를 코팅하고자 할 경우, 메탄을 연료로 사용한 화염이 니켈 입자를 용융시키기 어렵기 때문에 메탄은 본 운용 조건에 대해 부적합한 연료라고 할 수 있다. 또한, 아세틸렌의 경우 당량비를 1로 연소시키면 니켈의 끓는점을 초과하기 때문에 입자를 증발시킬 가능성이 있으므로 적합하지 않다.

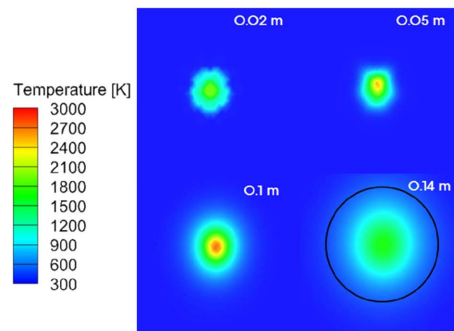
Fig. 5는 아세틸렌을 연료로 고정하고 서로 다른 당량비에 따른 노즐 입구로부터 시편 방향으로의 온도분포를 비교한 그래프이다. 이론 혼합비(당량비: 1)일 때 화



(a) Equivalence ratio : 1



(b) Equivalence ratio : 0.5



(c) Equivalence ratio : 3

Fig. 6 2D contours of flame temperatures at different locations with respect to the equivalence ratio( $\phi$ ); (a)  $\phi=1$ , (b)  $\phi=0.5$ , and (c)  $\phi=3$

염온도가 가장 높은 것을 확인할 수 있고 당량비가 0.5인 경우와 3인 경우, 화염의 온도가 낮게 예측되었다. 특히, 당량비가 3인 경우, 반응 후의 잉여 연료가 화염의 온도를 낮추는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 앞서 Fig. 4의 결과와 같이 본드코팅에 사용되는 니켈 입자의 경우 이론혼합비의 연소 조건에서는 입자가 끓는점을 넘어 증발할 가능성을 확인 할 수 있다. Lee<sup>(8)</sup> 등은 시편에 충돌 직전 입자의 상태에 따라 코팅 층의 특성을 분석한 결과 화염내에서 용융된 입자가 일부 응고 된

후 충돌할 때 접착력이 뛰어나다고 보고하였다. 또한, Fig. 6은 노즐 입구로부터 대표적인 거리에서의 당량비에 따른 화염 단면을 비교한 그림이다. 노즐로부터 0.14 m 떨어진 시편 근처에서 화염 형상을 보면, 이론혼합비의 경우 시편 중앙에서 약 2700 K의 높은 온도 분포를 확인 할 수 있다. 이와 같이 높은 화염의 온도 분포는 시편에 국부적인 열손상을 입히게 되므로 불균일한 코팅층을 얻게 된다. 따라서 화염 온도에 따른 니켈 입자에 적절한 아세틸렌의 당량비는 0.5 또는 3이 될 수 있으나, 연료희박조건인 당량비 0.5의 경우는 잉여 산소에 의한 입자 및 시편의 산화 가능성이 있기 때문에 연료 과잉 조건이 적절하다고 판단한다. 반면, 끓는점이 3500 K 가량인 티타늄이나 세라믹 재료를 용사할 경우는 이론혼합비로 용사하는 것이 타당하다고 판단된다. 화염의 온도가 비교적 낮게 나타난 당량비 3인 경우, 잉여 연료에 의한 열손실로 인하여 시편 근처에서 화염의 크기가 작게 나타났다고 사료된다. 본 결과들을 통해 화염 용사 시 시편의 크기 및 입자의 종류를 고려한 용사조건을 선택해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 화염 스프레이의 연소과정을 수치해석 기법을 통해 3차원으로 모사하였고, 화염의 온도와 속도 분포를 통해 연료 조건에 따른 해석 영역 내 유동장의 특징을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아세틸렌, 프로판, 메탄 등 각 연료의 종류에 따라 화염의 최고 온도 및 해석 영역 내에서 온도 변화의 큰 차이가 남을 확인하였다. 따라서 코팅 입자 특성에 따라 충분히 용융시킬 수 있는 적절한 연료를 선택해야 한다.

2) 아세틸렌과 산소의 당량비를 이론혼합비로 연소시킨 경우 니켈 입자의 끓는점 이상의 온도 분포가 나타나며, 입자의 증발 가능성을 확인하였다. 또한 당량비 0.5의 연료 희박 조건에서는 잉여 산소로 인한 입자 및 시편의 산화가 우려됨으로 연료 과농 조건의 연소가 가장 적합한 것으로 판단한다.

3) 당량비에 따른 화염 형상을 비교한 결과, 노즐 근처에서는 연소 조건에 관계 없이 유사한 형태의 화염 형상이 예측되었으나, 시편 주변에서는 이론혼합비일 때 화염의 형상이 가장 크고 국부적으로 온도가 높은 영역이 발생하였다. 반면, 연료 과농 조건일 때 화염의 형상이 가장 작게 예측되었으며, 따라서 적절한 당량비

를 선택한 후, 시편의 크기에 따른 적절한 용사 거리를 선정할 필요가 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국 학술진흥재단의 지원(KRF-2011-0027387)으로 진행되었으며, 그리고 본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20114030200020)을 받아 수행한 연구과제입니다.

#### 참고문헌

- (1) V. P. Rotshtein, D. I. Proskurovsky, G. E. Ozur, Yy. F. Ivanov and A. B. Ro. Markov, "Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams", Surf. Coat. Tech., Vol. 180~181, 2004, pp. 377~381.
- (2) M. Astramd, T. I. Selinder, F. Fietzke and H. Klostermann, "PVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated cemented carbide cutting tools", Surf. Coat. Technol., Vol. 188~189, 2004, pp. 186~192.
- (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, 2004, pp. 249~255.
- (4) S. Matthews and B. James, "Review of thermal spray coating applications in the steel industry: Part 1-Hardware in steel making to the continuous annealing process", J. Therm. Spray Technol., Vol. 19, 2010, pp. 1267~1276.
- (5) R. L. Williamson, J. R. Fincke and C. H. Chang, "A computational examination of the sources of statistical variance in particle parameters during thermal plasma spraying", Plasma Chem. Plasma Process., Vol. 20, 2000, pp. 115~124.
- (6) L. Pawlowski, "The science and engineering of thermal spray coatings", John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
- (7) Sarka Houdkova, Michaela Kasparova and Jan Schubert, "The Spraying Parameters Optimization of The HVOF Stellite 6 Coating", METAL 2012 Brno, 23~25, May, 2012.
- (8) J. B. Lee, D. H. Shin, J. H. Moon and S. H. Lee, "Effect

- of Flame Spray Distance on the Adhesive Characteristics of Ni-20mass%Cr Layers on SCM415 Substrates”, *Mat. Trans.*, Vol. 53, 2012, pp. 2043~2048.
- (9) Michaela Kasparova, Sarka Houdkova and Jana Cubrova, “Thermally Sprayed Coatings For High Temperature Application”, *METAL 2012 Brno*, 23~25, May, 2012.
- (10) D. H. Shin, J. B. Lee and S. H. Lee, “Numerical study of metal particle behaviors and flow characteristics in flame spray process”, *J. ILASS-KOREA*, Vol. 16, 2011, pp. 37~43.
- (11) H. Tabbara and S. Gu, “Computational simulation of liquid-fuelled HVOF thermal spraying”, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 204, 2009, pp. 676~684.
- (12) D. H. Shin, J. B. Lee, J. L. Wi, S. Park, N. Kim, M. Cho, J. M. Kim and S. H. Lee, “Flattening characteristics of Ni<sub>20</sub>Cr thermal-sprayed coating layers on pre-heated SCM415 substrates”, *Mat. Trans.*, Vol. 52, 2011, pp. 1515~1521.
- (13) S. Kamnis and S. GU, “Numerical modeling of propane combustion in a high velocity oxygen-fuel thermal spray gun”, *J. Chemical Engineering and Process.*, Vol. 45, 2006, pp. 246~253.
- (14) J. B. Lee, D. H. Shin and S. H. Lee, “Effect of Flame Spray Distance on Particle Behavior and Morphological Characteristics of Ni<sub>20</sub>Cr Coated Layers,” *ILASS-KOREA*, Vol. 17, 2012, pp. 128~133.
- (15) Robi Bandyopadhyay and Per Nysten “A Computational Fluid Dynamic Analysis of Gas and Particle Flow in Flame Spraying”, *ASM International, JTTEE* 12, 2002, pp. 492~503.