

노즐 형상변화에 따른 HVOF 용사총에서의 유동특성에 관한 수치적 연구

백재상[†]· 김윤제^{*}

A Numerical Study on Flow Characteristics in HVOF Thermal Spray with Various Torch Shapes

Jae-Sang Baik and Youn-Jea Kim

Key Words: High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray(HVOF 열용사), Torch(토치), CFD(전산 유체 역학), Combustion(연소)

Abstract

HVOF thermal spray guns are now being widely used to produce protective coatings, on the surfaces of engineering components. HVOF technology employs a combustion process to heat the gas flow and melt the coating materials which are particles of metals, alloys or cermets. Particle flow which is accelerated to high velocities and combustion gas stream are deposited on a substrate. In order to obtain good quality coatings, the analysis of torch design must be performed. The reason is that the design parameters of torch influence gas dynamic behaviors. In this study, numerical analysis is performed to predict the gas dynamic behaviors in a HVOF thermal spray gun with various torch shapes. The CFD model is used to deduce the effect of changes in nozzle geometry on gas dynamics. Using a commercial code, FLUENT which uses Finite Volume Method and SIMPLE algorithm, governing equations have been solved for the pressure, velocity and temperature distributions in the HVOF thermal spray torch.

1. 서 론

기호설명

v_x : 축방향 속도(m/s)
 v_r : 반경방향 속도(m/s)
 p : 정압(Pa)
 k : 열전도율(W/mK)
 \vec{J}_i : j 종의 확산 플럭스
 h_j : j 종의 엔탈피

HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) 열용사 기술이란 연소반응으로부터 얻어지는 초음속의 연소기체 유동 내부에 용사분말을 주입하여, 거의 반응용 상태가 된 분말을 고속으로 금속과 플라스틱 등의 모재에 충돌시켜, 내마모성과 내열성이 높은 모재 피막을 형성하는 기술이다. 일반적으로 HVOF 용사 기술은 대기상태에서 모재의 피막을 형성시키게 되므로, 모재 온도를 증가 시킬 필요가 없어 변형이 없으며, 다양한 재질의 모재를 단시간에 피막 시킬 수 있는 장점이 있다. 또 모재의 큰 기계적 변형을 수반하지 않고, 마모된 부품의 복원 및 표면특성의 개선에도 용사기술을 적용할 수 있어, 장래 이 기술에 대한 공업적인 응용은 크게 확대되리라 예상된다. HVOF 열용사

[†] 성균관대학교 대학원

^{*} 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@skku.edu

TEL : (031)290-7448 FAX : (031)290-5889

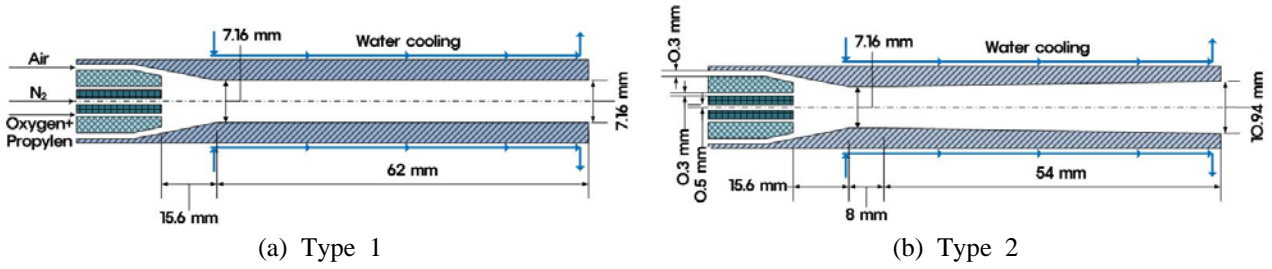


Fig. 1 Schematic of the HVOF thermal spray torch

기술의 개발초기에는 WC, Cr₃C₂ 등 내마모성 Cermet 코팅에 주로 적용되었으나 최근에는 다양한 코팅 공정이 개발되어 Cermet 뿐만 아니라 초합금코팅을 이용한 표면경화처리, 내식성 강화, 고온부식 및 산화에 대한 저항성 강화 등 여러 가지 용도로 사용되고 있다.⁽¹⁾

따라서 HVOF 열 스프레이 공정을 최적화 하기 위해서 건(gun)타입을 포함한 공급원료, 유량, 연소 압력, 연료와 산소의 비, 등의 결과를 연구 하기 위하여 많은 실험적 연구가 수행 되었다⁽²⁻³⁾. 하지만 공정이 가지고 있는 복잡성 때문에 수많은 시행착오와 노력이 따르기 때문에 물리화학적 현상의 기본적 이해를 포함한 포괄적인 수치모델이 필요하다. 따라서 본 연구의 주된 목적은 노즐 형상 변화에 따른 수치해석 모델을 통하여 운동량, 열전달 메커니즘, 열스프레이 동작 성능 향상의 깊은 이해와 설계 변수에 따른 특징을 고찰 하는데 있다.

2. 수치해석

2.1 해석 모델

해석에 사용된 HVOF 열용사총의 개략도를 Fig. 1에 도시하였는데, 15.6 mm의 연소실과 62 mm의 바렐부로 구성되어있다. Type 1의 바렐부는 끝단과 끝단이 7.16 mm로 일정하지만 Type 2는 8 mm 구간은 일정하지만 그 후 바렐 바깥쪽으로 2°가 기울어져 끝단에서의 직경이 10.94 mm이다. 연소 반응을 위하여 각각 공기, 프로필렌 + 산소, 운송가스인 질소가 3개의 입구를 통해 공급되고 표적과 열용사총 입구와의 거리는 150 mm이다.

Figure 2에 나타난 수치해석에 사용된 격자계는 상용코드인 FLUENT의 계산격자 전처리 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 2차원 축대칭 격자계

를 구성하였다. 두 가지 형상에 대한 최적의 격자수를 얻기 위해 10~30만개 사이에서 격자수를 5만 개 단위로 변화시켜 가면서 해석한 결과 두 가지 형상 모두 약 20만개 사이의 격자수에서 수렴성 및 결과가 가장 우수한 상태로 나타났다.

2.2 지배방정식

HVOF 열용사 시스템의 열유동 특성을 고찰하기 위해 사용된 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 각각 다음과 같다.

연속 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} [r \mu (2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}))] \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \mu (\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x})] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} [r \mu (\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r})] \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \mu (2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}))] \\ & - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (4)$$

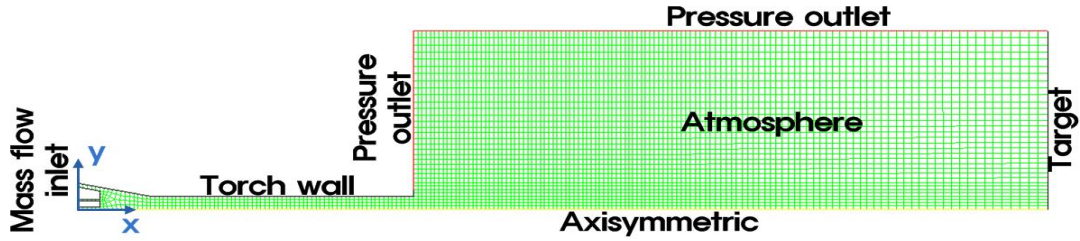


Fig. 2 Grid system and computational domain.

에너지 방정식:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \\ \nabla \cdot (k \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau \cdot \vec{v})) + S_h \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)의 오른쪽 항은 각각 열전도, 확산, 점성 소산에 의한 에너지 변환을 나타내었고 S_h 는 화학 반응에 의한 열을 포함하고 다음과 같이 나타낸다.

$$S_h = - \sum_j \left(\frac{h_j}{M_j} + \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT \right) R_j \quad (6)$$

여기서 R_j 는 j 종의 생성되는 부피정도를 나타낸다.

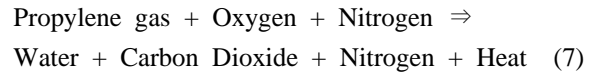
2.3 수치해석 방법 및 경계조건

HVOF 열용사총의 유동 특성과 연소반응을 고찰하기 위해서 상용코드 프로그램인 FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 유동 및 연소반응을 구현하기 위해 사용된 지배 방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이고 난류 모델을 해석하기 위해 Launder와 Spalding⁽⁴⁾이 제시한 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 비선형 지배 방정식의 해를 구하기 위하여 계산영역을 여러개의 격자계로 구분하였으며 이산화 작업을 통하여 선형화한 후 해를 구하였다. 본 연구에서는 지배 방정식을 이산화 하는 방법으로 유한체적법 (finite volume method)과 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하였다⁽⁵⁻⁶⁾.

Table 1 Boundary condition for inlet

Propylene (slm)	Oxygen (slm)	Air (slm)	Nitrogen (slm)
60	96	384	12.5

연소 반응에서 공기는 산소와 질소로 구성되는 것으로 가정하였고 다음과 같은 연소 메카니즘을 고려하였다.



프로필렌과 산소의 화학 반응에 의하여 물과 이산화탄소가 발생하고 질소는 화학 반응에 참여하지 못한다. 또한 연소에 의해 열이 발생되고 열에 의해 물이 증발된다. 따라서 다음과 같은 화학 반응식을 통하여 연소모델을 구현하였다⁽⁷⁾.



연소 반응에서 반응율은 연료와 산소의 난류 혼합율에 의해 결정되는 eddy-dissipation 모델⁽⁸⁾을 사용하였고, C_3H_6 와 O_2 의 질량 분율은 0.1101: 0.2074로 1.82의 당량비를 가진다. 수치 모사에 사용되는 산소, 프로필렌, 공기 그리고 입자의 운송가스로 사용되는 질소의 유량은 Table 1에 나타내었다. 바렐은 냉각수에 의해 냉각되므로 400K인 등온 조건을 사용하였고 모든 벽경계면에서 속도성분은 점착 조건 (no-slip condition)을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

HVOF 용사총의 기체역학적 연구를 수행하기 위해 질량, 운동량, 에너지 방정식과 화학방정식은 상용코드 FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하였다.

Figure 3은 Type 1 과 Type 2에 대한 압력, C_3H_6 의 질량 분율, 온도, 마하수, 속도 분포를 나타낸다. 챔버에서는 산소와 프로필렌이 반응하여 두 모델의 최고온도가 약 2830K로 같지만 바렐부의 형상에 의해 압력은 Type 1은 1.7×10^5 Pa

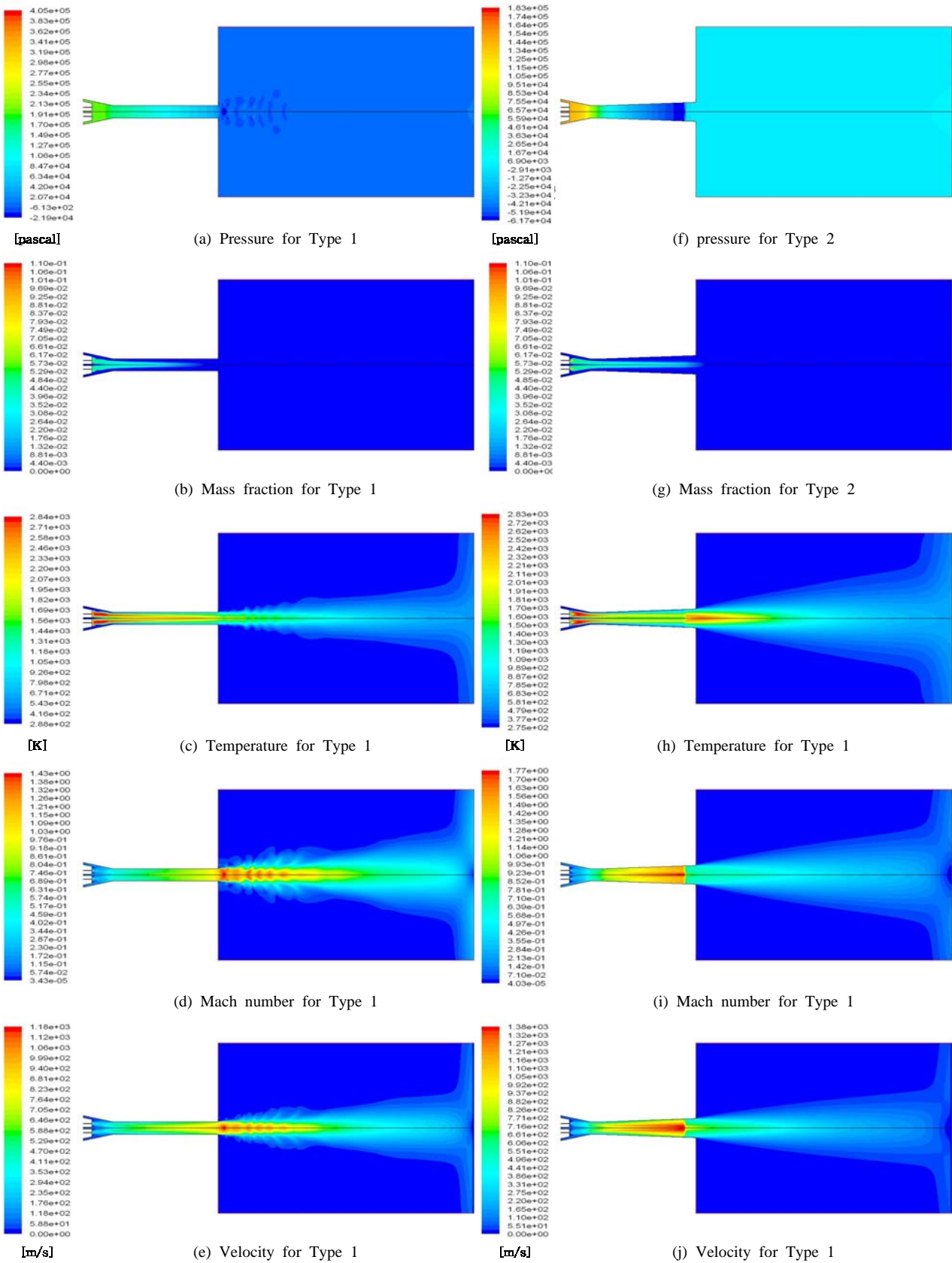
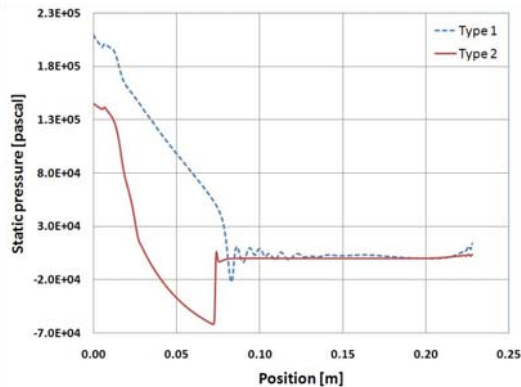
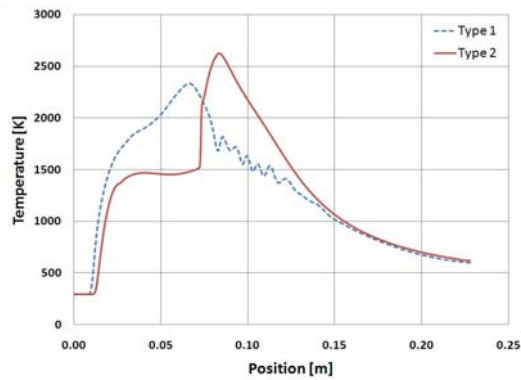


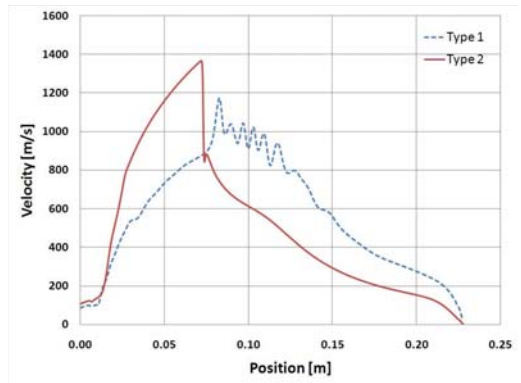
Fig. 3 Contours of pressure, mass fraction of C_3H_6 , temperature, Mach number, velocity distribution with Type 1 and Type 2.



(a) Static pressure



(b) Temperature



(c) Velocity

Fig. 4 Distribution of static pressure, temperature, velocity along the axial position.

이고 Type 2는 1.5×10^5 Pa 로 유지된다. 연소가 진행된 후 고온의 배출 가스는 바렐을 통과하면서 운동에너지로 변환된다. 그 결과 압력과 온도는 감소하고 가스 속도는 유동 방향을 따라 증가한다. 형상 변화에 따른 바렐 내부의 유동 속도를 살펴보면 Type 1은 바렐이 평행하고 Type 2는 바렐 끝단으로 갈 수록 발산하는 형태이기 때문에 바렐 양 끝단의 압력차는 Type 2가 크다. 따라서 Fig. 3(e)와 (j)에 도시하였듯이 바렐에서는 Type 2의 유동 속도가 빠르다. 이러한 결과는 x

축 방향의 거리에 따라 압력, 온도, 속도를 나타낸 Fig. 4에서도 잘 나타나 있다. 그래프에서 x축 방향으로 0에서 0.08 m까지는 챔버와 바렐을 포함하는 토치 부분이고 그 중 챔버 부분은 0.015 m이다. 그 이후로는 대기상태로 0.15m의 거리를 갖는다. Figure 4(a)를 보면 토치 끝단 이후, 대기상태의 압력 값은 101325 Pa로 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 하지만 챔버 안에서 연소에 의해 발생한 높은 압력은 바렐부에서 급격히 떨어진다. 즉 연소에 의해 발생한 열이 운동에너지로 변환되는 것을 보여주며 연소가스의 가속에 의해 토치 끝단부에서의 압력은 대기압보다 떨어진다. Type 2의 챔버 내부 압력값은 Type 1보다 작으나 토치 끝단부와 대기와의 압력차는 Type 1보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 형상 변화에 따른 온도를 살펴보면 Fig. 4(b)에서 보듯이 챔버부의 온도는 거의 동일한 값을 나타낸다. 하지만 바렐의 형상에 의해 압력차가 크게 나타나 연소가스가 급격히 가속된 Type 2에서는 바렐부의 온도가 1500K로 거의 일정함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 HVOF 열용사총의 열유동에 영향을 주는 바렐 부분의 형상 변화에 따라 기체역학적 특성을 고찰하기 위해 평행한 바렐 부분과 2° 경사진 바렐에 대하여 각각 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

바렐의 형상과는 관계없이 챔버에서 프로필렌과 산소의 연소반응에 의해 생성된 온도는 2830K로 거의 같으나 바렐의 형상 변화에 따라 열유동 특성은 큰 차이를 나타내었다. 또한 토치 내부의 압력과 대기와의 압력차는 HVOF 열용사 유동에 상당한 영향을 끼쳤다.

향후에는 수치해석의 결과를 비교 검증하기 위하여 실험적으로 연소실내의 압력을 결정하는 연료가스의 유량, 연료가스와 산소의 비, 그리고 토치 형상 변화에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단 지정 우수공학연구센터인 성균관대학교 플라즈마응용 표면기술연구센터 (센터번호 : R11-2000-086-0000-0)와

2007년도 2단계 두뇌한국(BK21) 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wielage, B., Wank, A., Pokhmurska, H., Grund, T., Rupprecht, C., Reisel, G., Friesen, E. 2006, "Development and Trends in HVOF Spraying Technology," *Surface & Coatings Tech.*, Vol. 201, pp. 2032~2037.
- (2) de Villiers Lovelock, H. L., Richter, P.W., Benson, J. M., Young, P. M., 1998, "Parameter Study fo HP/HVOF Deposited WC-Co Coatings," *Journal of Thermal Spray Tech.*, Vol. 7, pp. 97~107.
- (3) dHearley, J. A., Little, J. A., Sturgeon, A. J., 2000, "The effect of spray parameters on the properties of high velocity oxy-fuel NiAl intermetallic coatings," *Surface & Coatings Tech.*, Vol. 123, pp. 210~218.
- (4) Launder, B. E., and Spalding, D. B., 1972, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London
- (5) Patankar, S. V., 1990, *Theoretical Hydrodynamics*, 5th Ed, Hemisphere, New York.
- (6) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D.C.
- (7) Gu, S., Eastwick, C. N., Simmons, K. A., McCartney, D. G., 2001, " Computational Fluid Dynamic Modeling of Gas Flow Characteristics in a High-Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray System," *Journal of Thermal Spray Tech.*, Vol. 10, pp. 461~469.
- (8) Fluent Inc., 1998. *Fluent User's Guide (V.5)*