

# 니켈기 용사코팅의 스플랫 형성에 관한 연구 Study on the Splat Formation of Ni-based Thermal Sprayed Coatings

김균택 · 이상석 · 이도형 · 김영식

K. T. Kim, S. S. Lee, D. H. Lee and Y. S. Kim

(접수일 : 2011년 07월 20일, 수정일 : 2011년 11월 23일, 채택확정 : 2011년 11월 24일)

**Key Words** : Ni-based Coating(니켈기 용사코팅), Splat Formation(스플랫 형성), Microstructure(미세조직), Process Parameter(공정조건)

**Abstract** : Thermal spray coatings developed by deposition of splats, it formed by impacting molten droplets on substrates during thermal spray process. In this study, the Ni-based coatings were fabricated by thermal spray process with two different process parameters, oxygen gas flow and acetylene gas flow, with three different levels of each parameters. The morphology of splats and microstructure were observed by optical microscope. Hardness test were performed on the Ni-based coatings. It was confirmed that process parameters of thermal spray process have effect in morphology of splats. These effects also have important implications on the deposit microstructure and properties of Ni-based coatings.

## 1. 서 론

용사법(thermal spray process)은 고온의 열원을 이용하여 재료를 가열·용융시켜 기체에 분사하고, 분사된 용융입자가 기체에 충돌하여 편평·응고되는 과정을 반복하여 코팅을 형성하는 방법이다. 용융입자가 기체에 충돌하여 응고된 입자를 스플랫(splat)이라고 하며, 용사코팅은 이 스플랫들이 적층되어 형성된다.

용사코팅에는 많은 공정변수들이 있으며, 이들 공정변수들이 용사코팅의 표면특성에 영향을 미친다. 이 표면특성은 코팅의 미세구조와 밀접한 관계가 있으며<sup>1-3)</sup>, 코팅은 스플랫이 적층되어 형성되므로 용사코팅의 공정변수가 스플랫의 형성에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다<sup>4)</sup>. 또한 용사코팅은 열원을 이용하여 재료를 용융시켜 코팅하기 때문에 공정변수가 열원에 미치는 영향도 함께 고려되어야 한다.

본 연구에서는 프레임 용사법의 공정변수가 스플랫 형성에 미치는 영향을 분석하고자 스플랫을 포집하여 그 스플랫 거동을 분석하고, 코팅의 특성치로 경도 및 마모율을 측정하여 스플랫 거동에 따른 특성치의 변화를 분석하였다. 그리고 열원인 화염의 수치해석을 수행하고 그 결과를 스플랫 거동 및 코팅의 특성치와 비교·분석하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 시험편 제작을 위해 사용한 용사장치는 Sulzer Metco Co.의 flame spray system(6P-II) 이고, 용사코팅 재료는 Sulzer Metco 16C-NS 분말이다. 기체는 SS400평판을 사용하였다. Table 1은 본 연구에 사용한 16C-NS 분말의 화학조성이다.

저자들은 선행연구에서 프레임 용사코팅의 다양한 공정변수들 중 산소유량과 아세틸렌유량이 표면특성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 밝힌 바 있다<sup>5,6)</sup>. 본 연구에서는 이 두 가지 공정변수에 따른 스플랫 거동 및 특성치의 변화를 분석하기위해 Table 2에 나타난 바와 같이 9가지 조건으로 시험편을 제작하였다. 시험편은 스플랫 거동을 분석하기 위한 것과 용사코팅의 미세구조 관찰 및 특성시험을 위한 것의

Y. S. Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155  
K. T. Kim, S. S. Lee : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.  
D. H. Lee : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

2종류를 제작하였다.

용사입자의 스플랫 거동 분석을 위한 시험편은 SS400 평판을 기재로 사용하여 20×40×5 mm 크기로 가공하고 표면을 경면처리하였다. 용사건과 기재 사이에 직경 3 mm의 구멍을 가지는 스테인리스 스크린을 설치하고 구멍을 통과한 입자가 경면처리된 기재의 표면에 포집되도록 하였다. 포집된 스플랫은 광학현미경으로 관찰·분석하였다.

코팅의 미세구조 관찰 및 특성시험을 위한 시험편은 블라스트 처리된 40×40×5 mm의 SS400 기재위에 500~600 μm의 두께로 코팅하여 제작하였다. 제작된 시험편을 코팅면에 수직으로 절단하고 광학현미경으로 그 단면의 미세구조를 관찰·분석하였다.

용사코팅의 경도는 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 하중 500 gf, 압입시간 10초의 조건으로 측정하였다.

마모시험은 제작된 용사코팅의 표면을 #2000 사포로 조도를 일정하게 한 후 실시하였다. 미끄럼속도는 0.1 m/s, 하중은 20 N으로 하였다. 상대마모재로는 직경 8 mm의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 구를 사용하였고, 마모거리는 1000 m로 하였다. 마모시험 전과 후의 무게를 측정하여 마모량을 구하였다.

화학구조해석을 위한 소프트웨어는 ICFM-CFD

V11 (Mesh Creation)과 STAR-CCM+V5.06 (Pre-Post Processor & Solver)를 사용하였으며, 난류모델은 Realizable k-ε Two-layer model을, 연소모델은 Eddy break-up model를 사용하였다. 연소반응의 화학반응식은 아래와 같다.

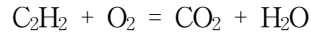


Table 1 Chemical compositions of Ni-based powder used(wt %)

Ni	Cr	Si	B	Cu	Mo	Fe	C
Bal.	14.5	6.7	17.4	2.2	1.5	2.11	1.9

Table 2 Control parameters and their levels

Oxygen gas flow (m <sup>3</sup> /hr)	0.99, 1.25, 1.50
Acetylene gas flow (m <sup>3</sup> /h)	1.25, 1.56, 1.87
Powder feed rate (kg/h)	16.33
Spray distance (m)	0.24

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 경면처리된 기재에 포집된 스플랫의 광학현미경사진으로서, 스플랫의 형상은 산소유량과 아세

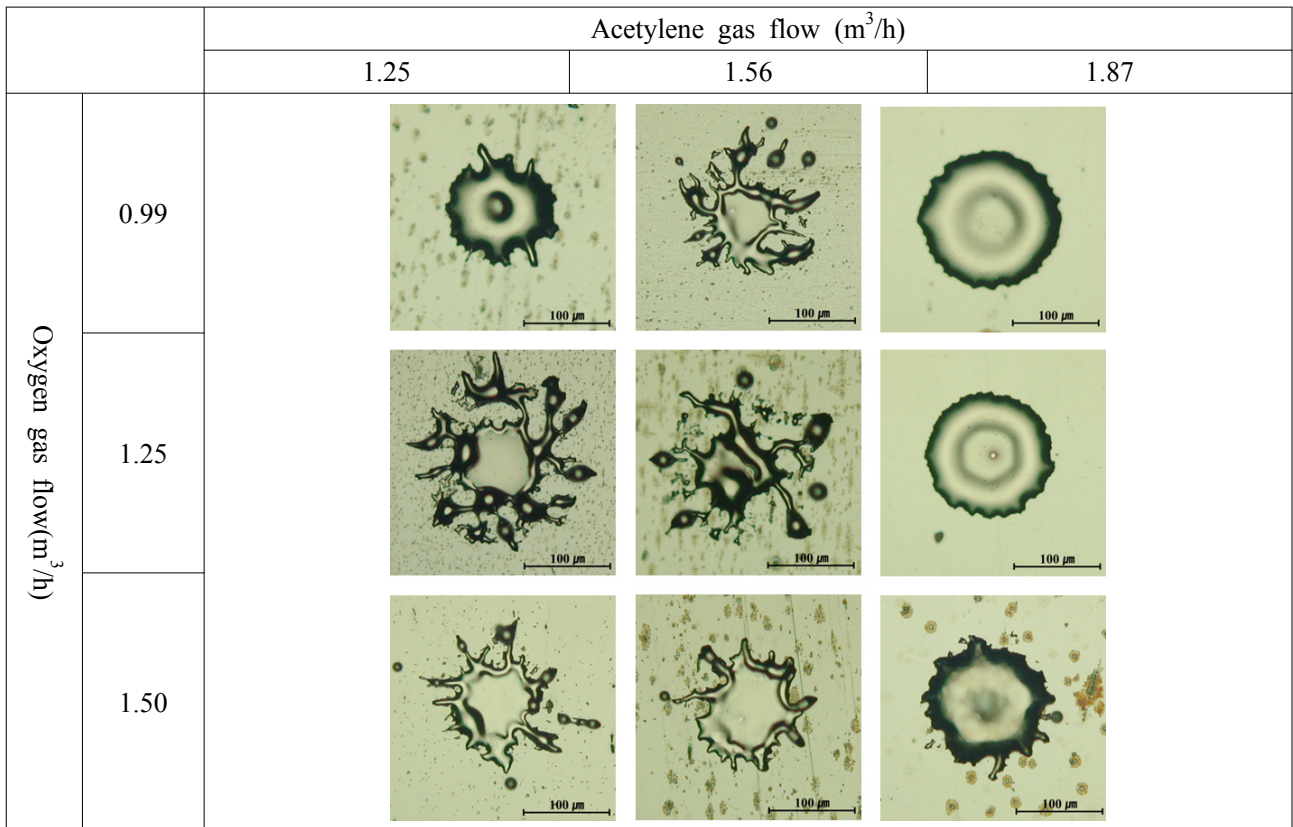


Fig. 1 Morphology of splats formed on polished surface according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

틸렌유량에 따라 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 산소 유량이 0.99 m<sup>3</sup>/h인 경우 아세틸렌유량에 따른 스플래트의 변화를 살펴보면, 아세틸렌유량이 1.25 m<sup>3</sup>/h인 경우에는 스플래싱(splashing)이 크게 나타나지 않지만 아세틸렌유량이 1.56 m<sup>3</sup>/h인 경우에는 스플래싱이 나타나고 1.87 m<sup>3</sup>/h인 경우에는 원판 형태의 스플래트가 관찰된다. 산소유량이 1.25, 1.50 m<sup>3</sup>/h인 경우에는 아세틸렌유량이 1.25, 1.56 m<sup>3</sup>/h일 때 스플래싱이 뚜렷이 관찰된다. 그리고 아세틸렌유량이 1.87 m<sup>3</sup>/h인 경우에는 산소유량이 1.50 m<sup>3</sup>/h인 경우에만 약한 스플래싱이 관찰되지만 나머지 경우에는 거의 원판 형태에 가까운 것을 볼 수 있다. S. Sampath 등의 연구에 따르면, 기재의 표면온도에 따라 스플래트의 형상이 매우 민감하게 반응하므로 스플래싱이 발생하는 온도 이상으로 기재를 예열할 필요가 있다<sup>7)</sup>. 본 연구에서는 각각의 조건에 따라 코팅전 용사건을 좌우로 10회 왕복 이송시켜 용사건의 화염으로 기재를 예열 하였다. 각 조건에 따라 측정된 기재 표면의 온도를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 1과 비교하여 보면, 예열 온도가 200 °C 부근일 때 스플래트는 원판 형태를 띠고 있으며, 180 °C 이하에서는 스플래싱이 발생한 것을 알 수 있다. 기재의 표면 온도에 따른 스플래트 형상의 차이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 용융된 입자가 기재와 충돌할 때 기재의 온도가 낮으면 입자의 냉각속도가 매우

빠르고, 따라서 충돌 면에서부터 급격하게 응고되기 시작한다. 이로 인해 용융입자의 표면장력이 급격히 낮아져서 스플래싱이 발생하게 된다. 반대로 기재의 온도가 일정온도 이상인 경우에는 냉각속도가 느리기 때문에 용융입자가 충분히 원형으로 기재표면에 넓게 형성될 수 있고 표면장력이 높아 입자가 흩어지지 않고 디스크 형태의 스플래트를 형성하게 된다. 또한 산소유량 0.99 m<sup>3</sup>/h, 아세틸렌유량 1.25 m<sup>3</sup>/h인 경우에는 기재의 온도가 120 °C 이하로 비교적 낮기 때문에 용융입자가 충돌한 직후 흩어지기 전에 응고됨으로서 낮은 기재표면 온도에서도 스플래싱이 뚜렷이 관찰되지 않는 것으로 판단된다.

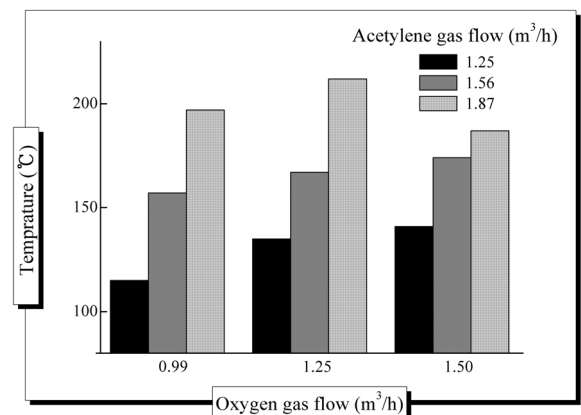


Fig. 3 Substrate temperature according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

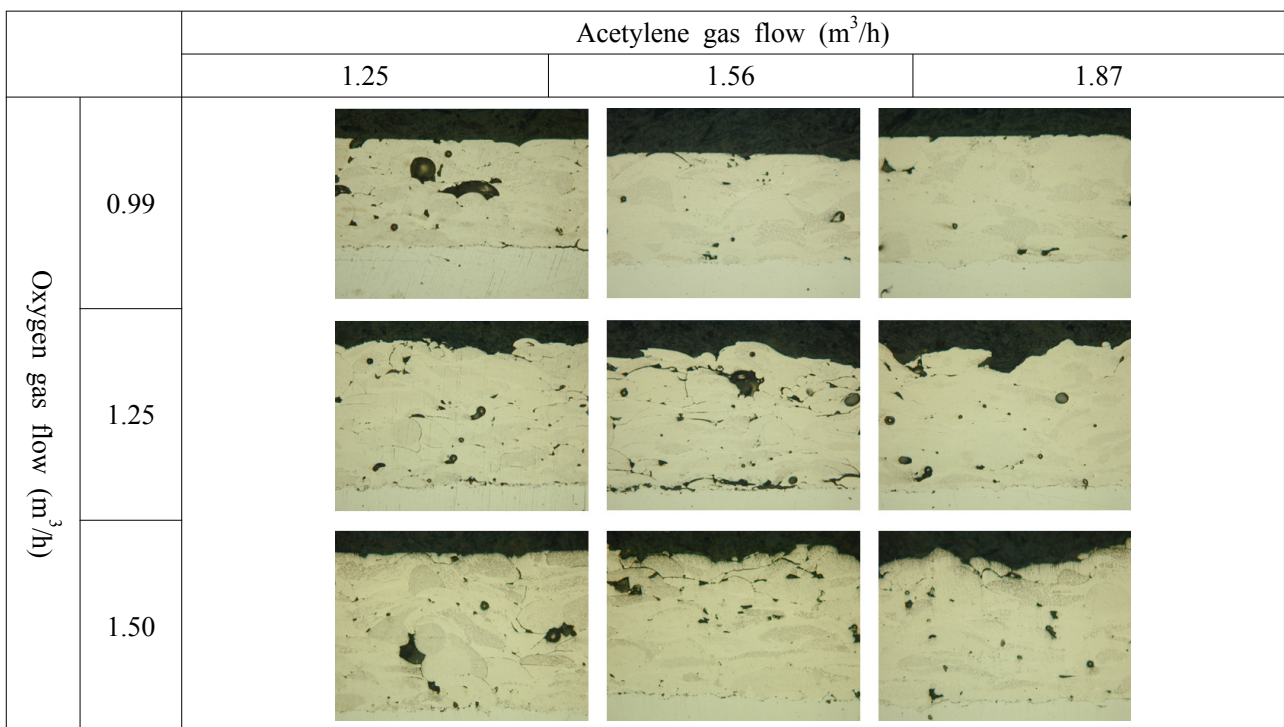


Fig. 3 Microstructure of coatings according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

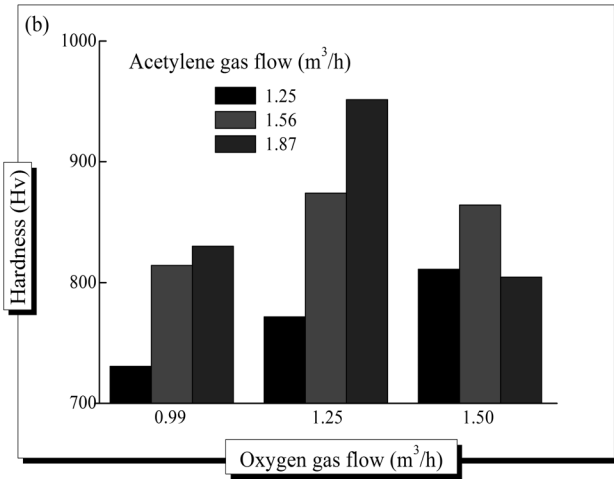


Fig. 4 Hardness of coatings according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

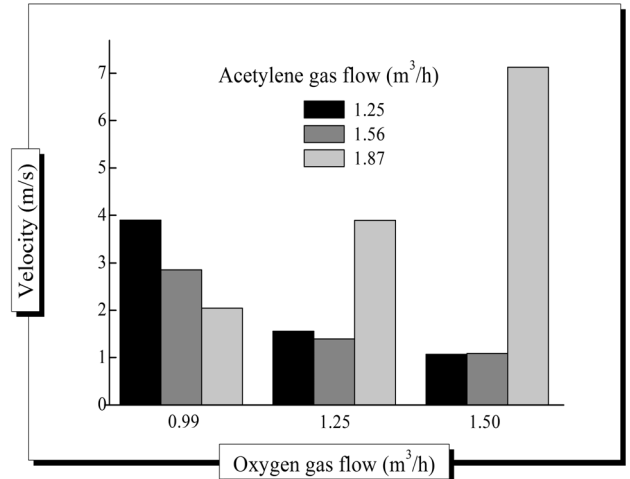


Fig. 7 Numerical analysis results of flame velocity according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

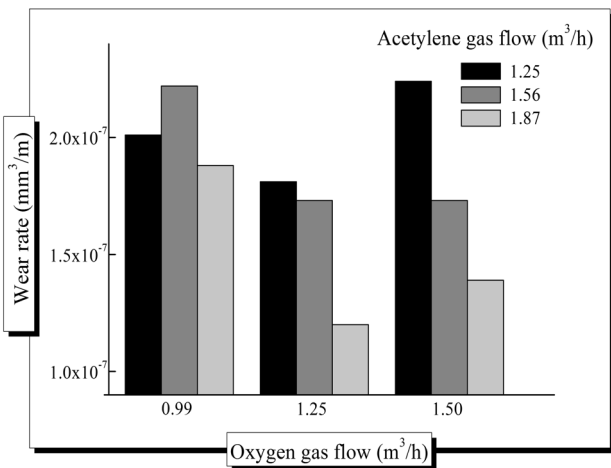


Fig. 5 Wear rate of coatings according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

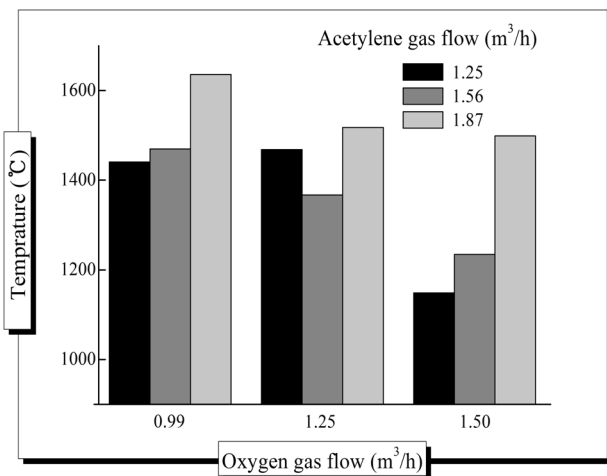


Fig. 6 Numerical analysis results of flame temperature according to oxygen gas flow and acetylene gas flow

Fig. 3은 각각 조건에 따른 용사코팅의 미세구조를 나타낸 것이다. 스플랫의 형상이 원판 형태에 가까울수록, 스플래싱에 의한 용융입자의 흩어짐이 적을수록 용사코팅의 미세구조는 조밀하고 기공이 적은 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 각각의 조건으로 제작한 용사코팅의 단면 경도측정의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 1과 3에서 나타난 바와 같이 스플랫의 형상이 원판 형태에 가깝고 스플래싱이 나타나지 않아 미세구조가 조밀한 경우의 경도가 높게 나타난다. Fig. 5는 각각의 조건에 따른 용사코팅의 마모율을 나타낸 그래프이다. 경도의 경우와 마찬가지로 스플랫의 형상이 원판에 가까운 경우 낮은 마모율을 나타낸다.

Fig. 6과 7은 수치해석 결과 구해진 노즐로부터 0.24 m 지점의 화염의 온도 및 속도를 나타낸 그래프이다. 0.24 m는 본 연구에서 시험편을 제작할 때의 용사거리이다. 아세틸렌유량이 증가함에 따라 화염의 온도는 증가한다. 화염의 속도는 산소유량이 0.99 m³/h인 경우 아세틸렌유량이 증가함에 따라 속도가 감소하고, 1.25 및 1.56 m³/h인 경우에는 0.99 m³/h인 경우와 달리 아세틸렌유량이 1.87 m³/h인 경우에 특히 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이상의 수치해석 결과와 Fig. 1과 2의 결과를 비교해 보면 화염의 온도가 1500 °C 이상인 경우 화염의 속도에 관계없이 스플랫의 형상이 원판에 가깝게 형성된 것을 알 수 있고, Fig. 1에서 관찰된 산소유량 1.50 m³/h, 아세틸렌유량 1.87 m³/h인 경우 약하게 스플래싱이 나타난 것을 볼 수 있는데 이것은 수치해석 결과에서 나타난 바와 같이 화염의 속도가 매우 빠르기 때문에 용

용된 입자가 기재에 충돌할 때 약간의 스플래싱이 발생한 것으로 판단된다. 또한, Fig. 2와 수치해석 결과를 비교해 보면 화염의 온도가 높더라도 화염의 속도가 빠른 경우에는 기재의 표면온도가 낮으며, 화염온도가 비교적 낮은 경우에서도 화염의 속도가 느린 경우에는 기재의 표면온도는 높게 나타난다.

이상의 결과들로부터 산소유량 및 아세틸렌유량의 변화는 화염의 온도 및 속도에 영향을 미치며, 이러한 화염의 온도와 속도의 변화에 따라 스플랫 거동은 달라지고, 결과적으로 용사코팅의 미세구조 및 특성치에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 프레임 용사법의 공정변수가 스플랫 형성에 미치는 영향을 분석하고자 스플랫을 포집하여 그 스플랫 거동을 분석하고, 코팅의 특성치로 경도 및 마모율을 측정하여 스플랫 거동에 따른 특성치의 변화를 분석하였다. 그리고 열원인 화염의 수치해석을 수행하고 그 결과를 스플랫 거동 및 코팅의 특성치와 비교·분석하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

1. 산소유량 및 아세틸렌유량은 용사코팅을 형성하는 스플랫 거동에 큰 영향을 미친다.
2. 스플래싱의 발생은 기재의 표면온도와 밀접한 상관관계가 있다. 기재의 표면온도가 200 °C 이상인 경우 원판 형태의 스플랫이 형성되며, 180 °C 이하에서 스플래싱이 발생한다.
3. 스플래싱이 발생하지 않고 스플랫이 원판 형태로 형성된 경우 코팅은 높은 경도와 낮은 마모율을 나타낸다.
4. 화염의 온도 및 속도는 산소유량과 아세틸렌유량의 변화에 민감하게 반응하며, 기재의 온도에 영향을 미치고 결과적으로 코팅의 미세구조에 특성치에 영향을 미친다.

#### 후 기

본 과제는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

#### 참고 문헌

1. E. Celik et al., 2005, "Corrosion behavior of plasma spray coatings", Surface and Coatings Technology, Vol. 193, pp. 297-302.
2. R. Gonzalez et al., 2006, "Wear behavior of flame sprayed NiCrBSi coatings remelted by flame or by laser", Wear, Vol. 262, pp. 301-307.
3. Yasunari Ishikawa et al., 2006, "Sliding wear properties of HVOF sprayed WC-20% Cr3C2-7%Ni cermet coatings" Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 4718-4727.
4. Rajeev Dhiman, Andre G. McDonald, Sanjeev Chandra, 2007, "Predicting splat morphology in a thermal spray process", Surface & Coatings Technology, Vol. 201, p. 7789-7801.
5. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2009, "Process Optimization for Thermal-sprayed Ni-based Hard Coating by Design of Experiments", Journal of Korea society for Power System Engineering, Vol, 13, No. 5, pp. 89-94.
6. K. T. Kim, J. D. Kim and Y. S. Kim, 2011, "Effect of Process Parameters on the Hardness and Wear Rate of Thermal Sprayed Ni-based Coatings", Journal of Korea society for Power System Engineering, Vol, 15, No. 1, pp. 51-56.
7. S. Sampath, X. Jiang, 2001, "Splat formation and microstructure development during plasma spraying: deposition temperature effects" Materials Science and Engineering A, Vol. 304-306, pp. 11.25-150.