진공상온분사(VKS) 공정에서의 비행입자 가속 기구 및 속도제어를 위한 가스 유량 효과에 관한 연구

박형권 · 권주혁 · 이일주 · 이창희[†]
한양대학교 신소재공학부

Research on Acceleration Mechanism of Inflight Particle and Gas Flow Effect for the Velocity Control in Vacuum Kinetic Spray Process

Hyungkwon Park, Juhyuk Kwon, Iljoo Lee and Changhee Lee[†]

Kinetic Spray Coating Laboratory(NRL), Division of Materials Science and Engineering,
Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

(2013년 12월 31일 접수 : 2014년 2월 4일 최종수정 : 2014년 2월 5일 채택)

Abstract Vacuum kinetic spray(VKS) is a relatively advanced process for fabricating thin/thick and dense ceramic coatings via submicron-sized particle impact at room temperature. However, unfortunately, the particle velocity, which is an important value for investigating the deposition mechanism, has not been clarified yet. Thus, in this research, VKS average particle velocities were derived by numerical analysis method(CFD: computational fluid dynamics) connected with an experimental approach(SCM: slit cell method). When the process gas or powder particles are accelerated by a compressive force generated by gas pressure in kinetic spraying, a tensile force generated by the vacuum in the VKS system accelerates the process gas. As a result, the gas is able to reach supersonic speed even though only 0.6 MPa gas pressure is used in VKS. In addition, small size powders can be accelerated up to supersonic velocity by means of the drag-force of the low pressure process gas flow. Furthermore, in this process, the increase of gas flow makes the drag-force stronger and gas distribution more homogenized in the pipe, by which the total particle average velocity becomes higher and the difference between max. and min. particle velocity decreases. Consequently, the control of particle size and gas flow rate are important factors in making the velocity of particles high enough for successful deposition in the VKS system.

Key words vacuum kinetic spray(aerosol deposition), particle velocity, computational fluid dynamics(CFD), slit cell method(SCM), process gas flow.

1. 서 론

Vacuum kinetic spray(이하 VKS) 공정은 단시간에 상온에서 치밀한 세라믹 박막 및 후막을 형성시키는 공정으로, aerosol deposition 또는 vacuum cold spray라고도 일컫는다. 또한 상온에서 열원 없이 초음속의 고상분말을 모재 상에 직접 적층시킨다는 점에서 kinetic spray(이하 KS)와 비교되며, 수백 나노에서 수 마이크로 크기의 세라믹 입자를 원료 분말로 사용하는 점에서 nano particle deposition system과 비교되는 공정이다.

VKS 공정은 성막속도가 빠르고, 상온에서 적층이 이루어지며 공정 자체가 단순하고, 공정 단가가 저렴하며, 친환경적이라는 다양한 장점으로 현재 전자기기, 생체 재료, 압전 소자, 광학 재료, 고체 연료 전지, 구조 재료 등의 응용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁻⁵⁾

반면, 적층 과정이 수 마이크로 이내의 크기를 갖는 세라믹 분말 입자가 초음속 상태로 모재 상에 충돌하여 수 나노 초 이하의 짧은 시간 내에 변형/파괴/접합이 일어나게 되므로 실질적으로 직접적인 관찰이 불가능하다. 현재까지 보고된 적층 기구에 관한 논문은 수치적 해석을

[†]Corresponding author

E-Mail : chlee@hanyang.ac.kr (C. H. Lee, Hanyang Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이용한 입자 충돌 해석에 관한 논문^{1,6-7)}을 제외하고는 관찰된 미세조직적 현상⁸⁻¹⁰⁾이나 분말 및 공정 변수와 결과적인 코팅층 두께 및 특성¹⁰⁻¹⁵⁾에 관하여 서술된 논문상에 간접적으로 적층 기구를 언급하는 경우가 대부분이다.

결과적으로 현재까지의 적층 기구에 대한 이해가 부족하다고 할 수 있으며, 이러한 기구에 대한 명확한 이해 없이는 적층 효율 및 장비의 개선을 통한 공정의 활용을 극대화시키는데 제한될 수 있다.

상온에서 진행되는 스프레이 코팅 공정에서 입자의 속도는 입자의 운동 에너지를 결정하며, 결과적으로 성공적인 적층의 유무 및 적층 효율과 깊은 연관성을 갖는다.¹⁶⁻¹⁸⁾ 따라서 적층 기구 규명을 위한 가장 기초적이며 중요한 연구라 할 수 있다. 이에 대한 선행연구는 slit cell method(이하 SCM)를 사용하여 실험적으로 입자 속도를 측정된 결과가 보고된 바 있다.¹⁹⁾ 하지만 VKS 공정과 같이 크기와 밀도가 작은 세라믹 입자를 사용하는 경우, 가스 흐름에 의해 입자의 유동이 민감하기 때문에 SCM 실험법으로는 유동장 내의 입자의 거동을 예측하기 어렵다. 반대로 가스 및 입자 유동 해석 프로그램인 computational fluid dynamics(이하 CFD) 전산모사를 사용한 경우,²⁰⁻²²⁾ 유동장 내 입자의 거동을 관찰할 수는 있지만 많은 가정들로 인하여 실제의 경우와 결과가 다를 수 있다.

이에 본 연구에서는 VKS 적층 기구 규명의 기초가 되는 공정가스와 비행입자 가속 기구에 관한 연구를 수행하기 위하여 SCM 실험을 통하여 비행입자의 속도를 측정하고, 동시에 CFD 전산모사를 이용한 수치적 해석과 연계하여 해석함으로써 실험과 전산모사의 상호보완적인 방법으로 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 SCM 실험을 통해 입자의 평균속도를

Fig. 1. Schematic image of vacuum kinetic spraying system.

측정하였으며, 이 속도 값을 바탕으로 CFD 전산모사의 모델링 proto-type을 도출하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 vacuum kinetic spraying 공정의 개략적인 그림을 나타내었으며, 이 그림에서 노즐과 모재 사이 부분에 Fig. 2에 나타난 SCM 기구를 장착하여 속도 측정을 실시하게 된다. 제작된 SCM 기구는 4000 rpm으로 회전하는 모터 위에 전체 160 mm 길이의 얇은 막대가 장착되어 있으며, 막대의 양 끝 단에는 slit cell이 장착되어 있다. 따라서 slit cell은 약 33.5 m/s의 속도로 노즐 아래를 지나 가게 된다. Slit은 0.6 mm의 폭을 가지며, 막대 바닥에 고정된 모재와는 18 mm의 거리로 설정되었다. 노즐부터 slit 바닥까지의 거리를 2 mm로 조절하여, 총 모재까지의 분사거리를 20 mm로 설정되었다. Slit cell은 모터를 통해 좌·우로 충분한 시간 동안 회전시켜, 한 쌍의 적층 띠를 형성시킨 후 속도를 도출하였다.

선행연구 결과에 따르면 SCM 실험을 이용하여 각 공

Fig. 2. Photo and Schematic of Slit cell design used in SCM experiments.

Fig. 3. Particle velocity calculation method in SCM system: (a) mean velocity, (b) maximum velocity, and (c) minimum velocity.

정조건에 따른 입자의 최대, 최소, 평균 속도를 도출하는 것이 가능하다.¹⁹⁾ Fig. 3는 SCM 실험을 통하여 얻게 되는 적층 흔적에 따라 도출되는 (a) 평균, (b) 최대, (c) 최소 속도를 나타내고 있다. 입자의 속도가 빠르면 빠를수록 적층흔적은 노즐 중앙축에 가까워지고, 느려질수록 멀어지게 된다. 따라서 중앙축에서 적층흔적까지의 거리를 사용하여 비례식을 통해 속도를 계산해 낼 수가 있다. 하지만 최대, 최소 속도의 경우 노즐 출구에서의 분사각에 대한 부정확적인 요소가 크므로, 본 실험에서는 평균속도 값을 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.²⁰⁾

$$V_{mean} = \frac{WL}{(d_1 + d_2)/2} \quad (1)$$

여기서 V_{mean} 은 입자의 평균속도, W 는 slit이 노즐 아래를 통과하는 수평속도, L 은 분사거리, d_1 과 d_2 는 각각 중앙축과 흔적의 시작과 끝을 나타내고 있다.

본 실험에서는 지름 $0.3 \mu\text{m}$ Al_2O_3 , $0.5 \mu\text{m}$ TiN 과 ZrO_2 불과 에탄올 분위기에서 300 rpm 10시간 불밀링 처리된 $1.5 \mu\text{m}$ BMG(bulk metallic glass)가 사용되었으며, 모재는 Aluminum sheet가 사용되었다. VKS 공정의 조건은 Table 1와 같다.

3. 수치해석 모델링

VKS 공정에서의 가스 및 유동장 내 비행입자 속도를 해석하기 위하여 상용 컴퓨터 소프트웨어인 ANSYS Fluent

v.12.1을 사용하였으며, 초음속 유동에 대한 해석을 위하여 1차원적 등엔트로피유동 해석을 실시하였다. 또한 노즐 및 진공챔버 안의 3차원적 난류(turbulent flow) 해석을 위하여 Reynold's-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식이 사용되었으며, $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하였다. 이러한 모델에 대한 설명과 압축성 유체에 대한 유체역학적 해석 및 수치해석 절차는 선행연구와 Fluent 매뉴얼을 통해 알 수 있다.²²⁻²³⁾

본 연구에서는 연구의 경제적 및 시간적 효율성을 위하여 관찰이 필요한 부분에 대한 전산모사 모델링 및 해석을 진행하였으며, 이에 대한 모델링 디자인은 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4를 살펴보면, 노즐과 진공 챔버의 일부분인 진공 박스로 이루어져 있으며, 노즐의 디자인은 실험에 사용된 입구 $0.4 \times 5.0 \text{ mm}^2$ 의 convergent-barrel 형태의 slit 노즐의 설계도와 일치시켜 적용하였으

Fig. 4. Vacuum kinetic spraying(VKS) system modeling design in CFD simulations.

Table 1. Vacuum kinetic spraying(VKS) parameters.

Process gas	He
Gas consumption	2-181/min
Working distance	20 mm
Chamber pressure	6.0×10^{-2} Torr

Table 2. Various powder properties used in CFD.

	Al ₂ O ₃	TiO ₂	TiN	BMG
Density (g/cm ³)	3.960	3.890	5.220	7.650
C _p (J/g-k)	0.753	0.714	0.752	0.550
Thermal conductivity (W/m-k)	30.0	13.0	19.0	10.0
Average powder size (mm)	0.1~25.0	0.5	0.5	1.5

며, slit부터 진공 박스의 바닥까지는 SCM 분사거리인 20 mm로 설정하였다. 노즐 입구는 mass flow inlet을 경계조건으로 하고 있으며, 실제 실험에서 사용된 공정가스유량을 변수로 설정하였다. 진공 박스의 벽은 pressure outlet을 경계조건으로 설정하였으며, 실제 적층 공정이 시작되는 압력값인 6.0×10^{-2} Torr로 설정하였다. 해석은 압축성 유동 해석에 적합한 density-based solver로 수행하였으며, discrete phase 모델을 사용하여 초음속으로 가속화된 가스 유동 안에서의 분말 입자의 거동을 추적하였다. 전산모사에 사용된 분말 입자는 구형으로 가정하였으며, SCM 실험에서 사용되었던 소재와 그 크기를 동일하게 하여 proto-type을 도출하였다. 후에 다양한 크기의 Al₂O₃ 입자를 사용하여 proto-type의 조건을 통해 비행입자 거동을 분석하였다. 전산모사에 사용된 구체적인 분말 특성은 Table 2과 같다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5(a)는 지름 0.3 μ m Al₂O₃ 분말을 14 L/min의 가스유량으로 SCM 실험을 수행한 대표적인 시편을 나타내고 있다. 그림에서 표시된 한 쌍의 적층 띠를 통해 평균 속도를 도출하였다. 앞서 언급하였듯이, 중앙에 가까운 적층 흔적이 빠른 입자 속도를 의미하며, 먼 쪽은 상대적으로 느린 입자 속도를 의미한다. 이러한 적층 띠는 2~14 L/min의 가스유량에서는 Fig. 5(a)와 같이 선명한 적

Fig. 6. 0.3 μ m Al₂O₃ particle velocity changes along to z-axis path length at 14 L/min gas flow.

층 띠를 얻을 수가 있다. 하지만 이 SCM 실험에서 d₁과 d₂은 사진과 OM을 통해 값을 정하게 되기 때문에, 어느 정도의 오차가 발생할 수 있다. 또한 Fig. 5(b)와 같이 입자의 최대속도가 지나치게 큰 경우, 두 적층 띠가 겹쳐버리기 때문에 속도를 도출하기가 힘들다. 이러한 경우, 각 입자 별 2~14 L/min의 공정 조건에서 구한 속도를 기반으로 CFD 전산모사 proto-type을 결정한 후, 18 L/min의 가스유량 설정을 통해 입자 속도를 결정하였다.

Fig. 6는 14 L/min 가스유량에서 노즐의 수직 방향인 z축의 path 길이에 따른 지름 0.3 μ m Al₂O₃ 입자의 속도변화를 나타내고 있다. 입자는 노즐의 convergent부에서 속도가 감소되고, barrel부에서 급속도로 가속이 된다. 따라서 노즐 출구 앞에서 1000 m/s에 가까운 속도를 나타내고 있다. 하지만 그 후에 급감속되고, 불안정한 모습을 보이고 있으며, 같은 convergent-barrel 노즐을 사용

Fig. 5. Representative SCM specimen pictures of deposited Al₂O₃ particle having diameter 0.3 μ m at (a) 14 and (b) 18 L/min gas flow rate.

Fig. 7. The particle average velocity graph of various size and materials with a variety of mass flow derived from SCM experiments (closed shape) and CFD simulation (opened shape).

한 KS 공정에서의 입자속도변화와 상당한 차이를 보이고 있다.²⁴⁾ 반면 KS 공정의 가스속도 변화와 VKS 공정에서의 입자 속도변화를 살펴보면 급가속과 급감속되고, 불안정한 경향도 유사함을 알 수 있다. 이는 KS 공정에 비하여 VKS 공정에서 사용되는 분말의 크기가 상당히 작고 밀도가 낮기 때문에 가스흐름에 민감하게 반응한다는 것을 나타내고 있다.²¹⁻²²⁾ 따라서 VKS 공정에서는 KS 공정에서 spray watch를 이용하여 평균속도를 도출하고, 이를 충돌속도로 적용한 것처럼 평균속도와 충돌속도를 동일하게 사용하기에는 다소 무리가 있기 때문에 향후 충돌속도에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 SCM 실험에서 식 (1)을 사용하여 평균속도를 도출한 후 이 값을 이용하여 Fig. 6의 입자속도 그래프에 적용하여 전산모사에서의 proto-type을 설정하였다. SCM에서 분사거리가 20 mm가 되므로 Fig. 6에서도 노즐 출구부터 20 mm까지의 입자속도의 평균값을 사용하여 이 값을 SCM을 통해 구해진 평균속도값과 일치시켜 다른 조건을 설정하였다. 유량에 따른 SCM과 CFD에서의 평균속도 변화는 Fig. 7와 같다. Fig. 7의 그래프에서 속이 찬 도형은 SCM 결과를 나타내며, 비어 있는 도형은 CFD 결과를 나타낸다. 0.3 μm Al₂O₃와 0.5 μm TiN의 경우 가스유량 2와 6 L/min에서는 다소 오차를 보이지만, 10과 14 L/min에서는 상당히 유사함을 확인할 수 있다. BMG 분말의 경우 SCM과 CFD에서의 결과값이 상당한 차이를 보이는데, 이는 VKS 공정 적층을 위해 불밀링 전처리하는 과정에서 분말은 상당히 불규칙적인 형태를 갖게 되며, 크기 범위가 상당히 넓게 분포되기 때문에 다른 분말의 경우보다 오차가 큰 것으로 사료된다. 모든 분말에 있어서는 앞서 언급하였듯이

Fig. 8. The particle average velocity graphs of various size Al₂O₃ with a variety of mass flow in CFD simulation.

18 L/min에서는 입자 속도가 빨라서 SCM 상에서 적층 피가 겹치기 때문에 실험 값은 측정할 수 없었으며, CFD 결과만 나타나 있다. 18 L/min값은 2~14 L/min의 속도 추이와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 도출된 입자의 속도는 선행연구에서 제시된 속도범위와 잘 맞는 것을 알 수 있다.^{1,6)}

Fig. 8는 SCM 실험과 CFD 전산모사를 통해 도출된 proto-type을 적용하여 다양한 크기의 Al₂O₃ 입자에 대한 가스유량별 평균속도를 나타내고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 지름 0.1~1.0 μm 크기의 Al₂O₃의 경우, 약 50 m/s 이내의 차이를 보이며 가스유량에 따른 유사한 속도 그래프가 나타난다. 하지만 3.0 μm 이상에서는 현저하게 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있으며 가스유량에 따른 속도증가 폭 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 10.0과 25.0 μm 크기에서는 100 m/s 내외의 속도를 가지며, 가스유량에 따른 변화도 거의 없었다. 이를 통하여 VKS 공정에서 입자 크기가 비행속도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 결과적으로 입자의 운동 에너지 및 적층률을 결정하는 것으로 판단할 수 있다. 흥미로운 것은 0.1 보다 0.3과 0.5 μm 크기에서 속도가 더욱 빠르게 나타났다는 점인데, 이것은 크기와 밀도가 커질수록 관성이 커지기 때문에 가스 흐름에 따라 감속되는 정도가 증가되는 것에서 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 입자가 너무 작을 경우, 모재 상에 충돌하지 못하고 가스 흐름과 이동을 같이 하여 적층에 참여할 수가 없다.¹⁾

입자의 속도는 공정가스의 drag-force에 의해 결정된다.^{20,22)} 따라서 일반적으로 비행입자의 속도는 가스 유량의 세기, 즉 가스압에 의하여 결정된다. 하지만 VKS 공정에서는 KS 공정보다 낮은 가스압을 사용하지만 굉장히 빠른 입자 속도가 나타나는데, 이는 두 공정에서

Fig. 9. (a) Graph of particle velocity difference between maximum (d_1) and minimum (d_2) with mass flow increase in the case of diameter $0.3 \mu\text{m}$ Al_2O_3 , and (b) Schematic image explaining the occurrence of the decrease of max. and min. velocity gap.

가스나 입자가 가속되는 기구가 다르기 때문에 가능하다. 즉, KS 공정에서는 $1.5\sim 3.0$ MPa의 가스압을 사용하여 노즐 입구에서 가해지는 강한 압축력과 수렴-발산 노즐을 통과하며 점차 가속되어 가스 및 입자가 초음속화 되지만, VKS 공정에서는 0.6 MPa의 가스압만이 사용되기 때문에 강한 압축력에 의하여 가스 및 입자가 가속화된다고 보기는 힘들다. 오히려 노즐 출구 부분에서 진공에 의해 당기는 힘에 의하여 가스가 가속화되고, 동시에 가스 drag-force에 의하여 입자가 가속된다. 노즐 출구 부근에서의 급작스러운 가속은 이러한 진공의 당기는 힘에 의해 나타나는 것으로 볼 수 있으며, 또한 거리에 따라 안정적인 속도를 유지하는 KS 공정과는 다르게 노즐 출구부터 나타나는 불안정한 입자 속도는 이러한 가속 기구 차이에 의한 것으로 사료된다. 따라서 입자 가속 기구가 다르기 때문에 공정의 낮은 가스압 사용에도 적층에 유효한 속도를 얻기 위해서는 가스유량에 민감하게 반응할 수 있는 수 마이크로 이하의 작은 분말^{21,22)}이 사용되어야 한다는 것을 알 수 있으며, 결과적으로 VKS 공정에서 입자 속도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 두 챔버의 압력차라고 할 수 있다. 하지만 실제적으로 진공 정도를 조절하여 속도를 제어하는 것은 힘들기 때문에, VKS 공정에서는 가스유량에 따라 적층에 유효한 입자의 속도를 제어하는 것이 일반적이다. 입자 속도에 따른 적층 효율을 판단하기 위해선, 가스유량 조건에 따른 입자속도 변화 원인을 생각해 볼 필요가 있다.

가스유량에 따른 입자속도 변화는 앞서 언급하였듯이 drag-force에 의한 결과이다. VKS 공정에서는 가스유량이 증가함에 따라 관 안의 가스 밀도가 커지기 때문에 전체적으로 drag-force가 높아져 Fig. 7과 8에 나타나 있듯이 입자의 평균속도가 증가하게 된다.²⁵⁾ Fig. 9(a)를 통해 가스 유량에 따라 관 내의 가스 밀도가 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 9(a)에서 지름 $0.3 \mu\text{m}$ Al_2O_3 의 SCM 실험에서 가스유량에 따라 나타나는 적층 때의 두께를 의미하며, 이는 곧 최대, 최소 입자의 속도차이를 나타낸다. 가스유량이 증가함에 따라 최대, 최소 입자 속

도 차이가 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 주입되는 가스유량이 증가함에 따라 관 안의 가스 밀도가 증가되고, 결과적으로 관 안의 가스 유량이 균일하게 되면서 나타나는 것으로 볼 수 있다. 즉, 낮은 가스 유량에서는 관 내의 가스 분포가 불균일하기 때문에 분포된 입자마다 drag-force 차이가 크게 발생되지만, 가스 유량이 높아져 가스의 분포가 균일해지면, 점차 drag-force도 균일하게 되어 최대, 최소 입자속도의 차이가 줄어드는 것으로 사료된다. 따라서 가스 유량의 증가는 가스 밀도 증가와 관 내의 가스가 균일하게 된다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 SCM 실험을 통해 도출된 평균속도 값을 CFD 전산모사 상에 적용하여 VKS 속도 도출을 위한 proto-type 모델링을 설정하였으며, 이를 통하여 다양한 크기의 Al_2O_3 입자에 관한 수치해석을 실시하였다. 그리고 그 결과값을 바탕으로 KS와 VKS 공정에서의 가스 및 입자 가속기구의 차이에 관한 고찰을 하였으며, 이에 더하여 가스 유량 변화에 따른 입자 속도 변화에 관한 고찰을 실시하였다. VKS 공정에서는 KS 공정과는 다르게 가스압에 따른 압축력에 의해 가스가 가속되는 것이 아닌, 진공이 잡아당기는 힘에 의하여 가스가 가속된다. 따라서 0.6 MPa의 작은 가스압으로도 굉장히 높은 입자 속도가 나타날 수 있다. 또한 VKS 공정에서는 KS 공정과 유사하게 가스유량 증가에 따른 drag-force 증가에 의해 입자속도가 증가되는 경향을 보이지만, 동시에 관 내의 가스 분포가 점차 균일해져 최대, 최소 속도 차이가 점차 줄어드는 결과를 보였다. 보통 VKS 공정에서는 KS 공정보다 낮은 가스압이 사용되기 때문에 서브마이크론의 충분히 작은 크기의 분말 입자가 적층에 유효한 높은 입자속도를 얻기에 적합하다. 따라서 입자의 크기가 수 마이크로로 큰 경우, VKS 공정의 낮은 가스 밀도에 의하여 입자가 가속되는 정도가 작았다. 또

한 크기가 크면 클수록 가스유량에 둔감한 경향이 나타났다.

결과적으로 VKS 공정에서 성공적인 적층을 위해서는 적절한 입자 크기와 가스 유량 제어를 통해 적층에 유효한 속도가 되어야 하며, 향후 이러한 입자속도 데이터베이스를 바탕으로 VKS 공정에서의 입자와 모재의 충돌속도에 관한 연구를 통해 적층기구 규명의 토대를 마련할 것으로 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2011-0016724).

References

1. J. Akedo, J. Therm. Spray Technol., **17**(2), 181 (2008).
2. B. D. Hahn, Y. L. Cho, D. S. Park, J. J. Choi, J. H. Ryu, J. W. Kim, C. W. Ahn, C. Park, H. E. Kim and S. G. Kim, J. Biomater. Appl., **27**(5), 587 (2013).
3. J. J. Choi, D. S. Park, B. G. Seong and H. Y. Bae, Int. J. Hydrogen Energy, **37**, 9809 (2012).
4. J. H. Ryu, B. D. Hahn, J. J. Choi, W. H. Yoon, B. K. Lee, J. H. Choi and D. S. Park, J. Am. Ceram. Soc., **93**(1), 55 (2010).
5. O. Y. Kwon, H. J. Na, H. J. Kim, D. W. Lee and S. M. Nam, Nanoscale Res. Lett., **7**, 261 (2012).
6. J. Akedo, J. Am. Ceram. Soc., **89**(6), 1834 (2006).
7. D. M. Chun and S. H. Ahn, Acta Mater., **59**, 2693 (2011).
8. F. Cao, H. K. Park, G. Y. Bae, J. A. Heo and C. H. Lee, J. Am. Ceram. Soc., **96**(1), 40 (2013).
9. H. K. Park, J. A. Heo, F. Cao, J. H. Kwon, K. C. Kang, G. Y. Bae and C. H. Lee, J. Therm. Spray Technol., **22**(6), 882 (2013).
10. F. Cao, H. K. Park, J. A. Heo, J. H. Kwon and C. H. Lee, J. Therm. Spray Technol. **22**(7), 1109 (2013).
11. A. Iwata and J. Akedo, J. Cryst. Growth, **275**, e1269 (2005).
12. D. W. Lee, H. J. Kim and S. M. Nam, J. Korean Phys. Soc., **57**(4), 1115 (2010).
13. D. W. Lee and S. M. Nam, J. Ceram. Process Res., **11**(1), 100 (2010).
14. D. W. Lee, H. J. Kim, Y. H. Kim, Y. H. Yun and S. M. Nam, J. Am. Ceram. Soc., **94**(9), 3131 (2011).
15. C. W. Kim, J. H. Choi, H. J. Kim, D. W. Lee, C. Y. Hyun and S. M. Nam, Ceram. Int., **38**, 5621 (2012).
16. H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff and H. Kreye, Acta Mater., **51**, 4379 (2003).
17. T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi and H. Kreye, Acta Mater., **54**, 729 (2006).
18. G. Y. Bae, Y. Xiong, S. Kumar, K. C. Kang and C. H. Lee, Acta Mater., **56**, 4858 (2008).
19. M. Lebedev, J. Akedo, K. Mori and T. Eiju, J. Vac. Sci. Technol. A, **18**(2), 563 (2000).
20. H. Katanoda and K. Matsuo, Mater. Trans., **47**(7), 1620 (2006).
21. M. W. Lee, J. J. Park, D. Y. Kim, S. S. Yoon, H. Y. Kim, D. H. Kim, S. C. James, S. Chandra, T. Coyle, J. H. Ryu, W. H. Yoon and D. S. Park, J. Aerosol Sci., **42**, 771 (2011).
22. D. M. Chun, J. O. Choi, C. S. Lee and S. H. Ahn, Surf. Coat. Technol., **206**, 2125 (2012).
23. Ansys Fluent User's Guide, Release 14.0, ANSYS, Inc., November 2011 (2011).
24. W. Y. Li, H. Liao, H. T. Wang, C. J. Li, G. Zhang and C. Coddet, Appl. Surf. Sci., **253**, 708 (2006).
25. K. Naoe, M. Nishiki and A. Yumoto, J. Therm. Spray Technol., **22**(8), 1267 (2013).