

## Effects of spray distance and gun traverse speed on the microstructure and mechanical properties of WC-Co-Cr coatings deposited by High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) spraying

Sang-In Kim, Tae-Hyeon Kim, Su-Han Bae, Chang-Hun Hwang\*, Jong-Ho Kong\*, Jeong-Hong Lee\* and Se-Yun Kim\*\*†

*Department of Mechatronics Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea*

*\*Aerocotec Co., Ltd, Sacheon 52535, Korea*

*\*\*Department of Future Auto Motive Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea*

(Received December 5, 2025)

(Revised December 17, 2025)

(Accepted January 14, 2026)

**Abstract** This study investigates the effects of spray distance (250, 300, and 350 mm) and gun traverse speed (4, 7, and 10 mm/s) in the High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) process on the microstructural, crystallographic, and mechanical properties of WC-10Co-4Cr coatings. The WC-Co-Cr feedstock powder consists of agglomerated 1~2  $\mu\text{m}$  primary particles, which inherently promotes the formation of partially molten and unmelted particles during spraying due to heterogeneous internal and external melting behavior. When the spray distance was reduced to 250 mm at a gun traverse speed of 7 mm/s, the shortened particle flight time resulted in insufficient melting, leading to an increased fraction of unmelted particles and interfacial delamination (9.48 %). As a consequence, poor inter-splat bonding caused a reduction in Almen/bending thickness (90  $\mu\text{m}$ ) and an increase in residual stress (0.35 mm). In contrast, at a spray distance of 350 mm, the extended flight time increased particle exposure to oxygen, resulting in a higher defect content (0.872 %). Despite this, stabilization of the jet flow improved particle impact angle and lamellar stacking, yielding the highest bonding strength (77.3 MPa) and hardness (1,400 Hv). Variations in gun traverse speed significantly altered the surface thermal history and splat solidification behavior. Compared with the reference condition (300 mm, 7 mm/s), both slower (4 mm/s) and faster (10 mm/s) traverse speeds produced denser lamellar structures and enhanced splat continuity. At 4 mm/s, localized re-melting and increased binder fluidity reduced porosity but slightly degraded bonding strength due to excessive thermal input. Conversely, at 10 mm/s, suppressed surface overheating and reduced particle scattering led to a more uniform splat structure, accompanied by a slight increase in  $\text{W}_2\text{C}$  relative peak intensity and improved bonding strength (74.1 MPa). Overall, spray distance and gun traverse speed are critical parameters governing particle melting, cooling, flight stability, and binder continuity, which collectively determine splat morphology, defect distribution, decarburization behavior, and mechanical performance of WC-Co-Cr coatings.

**Key words** High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), WC-Co-Cr, Coatings

## High Velocity Oxygen Fuel(HVOF) 공정 시 분사 거리와 gun 이송 속도가 WC-Co-Cr 코팅층의 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향

김상인, 김태현, 배수한, 황창훈\*, 공종호\*, 이정홍\*, 김세윤\*\*†

경남대학교 대학원 메카트로닉스공학과, 창원, 51767

\*(주)에어로코텍, 사천, 52535

\*\*경남대학교 미래자동차공학과, 창원, 51767

(2025년 12월 5일 접수)

(2025년 12월 17일 심사완료)

(2026년 1월 14일 게재확정)

**요약** 본 연구에서는 HVOF(High Velocity Oxygen Fuel) 공정에서 분사 거리(250, 300, 350 mm) 및 gun 이송 속도(4, 7, 10 mm/s)가 WC-10Co-4Cr 코팅층의 미세·결정 구조 및 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 사용된 WC-Co-Cr 분말은

†Corresponding author

E-mail: kimseyun@kyungnam.ac.kr

1~2  $\mu\text{m}$  크기의 1차 입자가 응집된 조립화 구조를 가지며, 이로 인해 HVOF 분사 과정에서 내부·외부 용융도 차이에 의한 부분 용융 및 미용융 입자의 가능성을 내재하고 있다. 분사 거리 변화 실험 결과, 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s 조건 대비 분사 거리: 250 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s 조건에서는 분사 거리 감소로 인해 비행 시간이 감소하고, 이에 따라 입자의 용융도가 감소하여 미용융 입자와 계면 이탈율(9.48%)이 증가하였고, Splat 간 결합 불량으로 Almen/밴딩 두께 감소(90  $\mu\text{m}$ ) 및 잔류응력 증가(0.35 mm)가 나타났다. 반면, 분사 거리: 350 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s 조건에서는 비행 시간 증가로 인해 산소와 더 많은 접촉을 하여 결합율(0.872%)이 증가함에도 불구하고, 제트 유동의 안정화로 인해 충돌각도 및 적층 방향성이 개선되어 비교적 높은 분당강도(77.3 MPa)와 경도(1,400 Hv)를 나타내었다. gun 이송 속도 변화 실험에서는 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s 조건 대비 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 4 mm/s 조건과 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 10 mm/s 조건에서 모두 미세조직의 치밀성과 Splat 연속성이 향상되었다. 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 4 mm/s 조건은 적층 표면의 화염 체류 시간 증가로 인해 국부 재용융 및 바인더 유동성이 증가하여 기공을 감소 효과가 나타났으나, 과열에 따른 Splat 경계 불균일로 인해 분당강도는 다소 저하되었다. 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 10 mm/s 조건은 표면의 과열이 억제되고 입자의 비산이 줄어 Splat 구조가 보다 균일하게 형성되었으며, WC 상대 피크 강도의 소폭 증가와 함께 분당강도(74.1 MPa)가 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s 조건보다 개선되는 경향을 보였다. 전체적으로, 분사 거리와 gun 이송 속도는 입자의 용융도·냉각속도·비행, 안정성·충돌각도·바인더 연속성을 결정하는 핵심 인자로 작용하였으며, 이는 코팅층 내부의 Splat 구조, 기공·산화물 분포, 탈탄화 정도 및 Co-Cr 바인더 상의 연속성을 통해 경도, 분당강도, 적층 두께, 잔류응력 등 기계적 물성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과는 HVOF 공정을 이용한 WC-Co-Cr 코팅의 최적 공정 조건 설정 및 미세구조 수립에 유의미한 기초 자료를 제공한다.

## 1. 서 론

WC-Co-Cr 기반 초경 코팅은 우수한 경도, 마모 저항성, 내식성 및 내열성을 바탕으로 항공부품, 발전 플랜트, 자동차 산업, 오일·가스 장비 등 다양한 산업에서 구조재 및 회전 부품의 보호용 코팅으로 널리 사용되고 있다 [1,2]. 특히 WC는 높은 경도( $\approx 2,000$  Hv)와 우수한 기계적 강도를 제공하고, Co 또는 Co-Cr 바인더가 높은 인성과 결합력을 제공하여 고하중·고마찰 환경에서도 안정적인 성능을 나타낸다 [1,2]. 이러한 WC-Co-Cr계 복합 구조는 표면의 마모 저항성을 크게 향상시키기 때문에 열분사 코팅 기술 중에서도 High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) 공정을 통해 가장 널리 적용되고 있다 [3,4]. HVOF 공정은 연료(예:  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ )와 산소의 연소로 형성된 초음속 제트에 분말을 분사하여 코팅층을 형성하는 공정으로, 높은 분사 속도(600~900 m/s)와 상대적으로 낮은 화염 온도(2,500~3,000°C)를 특징으로 한다 [5]. 따라서 플라즈마 코팅 대비 탈탄화·산화가 억제된 상태에서 높은 밀도의 코팅층을 형성할 수 있으며, 산업적으로 WC-Co-Cr 코팅에 가장 적합한 공정으로 평가된다 [5]. 그러나 HVOF 공정의 특성상 분말은 짧은 시간 동안 극히 높은 온도 구배와 속도 구배를 경험하게 되며, 그 과정에서 분말의 용융도, 냉각 속도, 산화·탈탄화 경향이 크게 변화한다 [6]. 이러한 미세조직적 변화는 코팅층의 경도, 분당 강도, 잔류 응력, 기공률 등 기계적 특성에 직접적으로 영향을 미치게 된다 [6]. HVOF 코팅 공정에서, 원료 분말의 용융도와 운동 에너지가 코팅층의 미세구조 및 물성을 결정하기 때문에 분사 거리 (standoff distance)와 Gun 이송 속도 (gun traverse speed) 는 코팅층의 최종 품질을 결정하는 가장 중요한 공정이다

[7]. 분사 거리는 분말이 화염과 상호작용하는 시간, 냉각 속도, 운동 에너지, 산소 접촉량 등을 결정하며, 이는 입자의 용융도, spreading behavior, Splat 형성, 산화·탈탄화 수준에 영향을 준다 [8]. 반면 gun 이송 속도는 동일 지점에 공급되는 열 유속 (heat flux density) 과 적층되는 분말량을 조절하여 Splat 적층 거동, 바인더의 연속성, 재용융 여부, 기공 분포 등에 영향을 준다 [6]. 그러나 두 인자는 분말의 비행 조건에는 간접적으로만 영향을 미치기 때문에, 공정 조건 변화가 미세구조와 기계적 특성에 미치는 영향은 분말의 용융도·냉각 속도·충돌각도·적층 안정성 등이 상호 작용한 복합적인 결과로 나타난다. Katranidis, V. 등의 연구에서는 최대 분사 거리인 240 mm에서 잔류 응력이 전반적으로 크게 감소하고, 분사 각도에 대한 유의미한 의존성을 보이지 않는다고 보고하였다 [9]. Jadidi, M. 등의 연구는 HVOF 초음속 제트에서 일반적으로 7~9개의 shock diamond가 관찰된다고 보고하였으며, 이는 노즐 출구 직경과 출구 Mach 수에 따라 수십 mm 범위 내에서 형성되는 것으로 알려져 있으며, 최대 약 200 mm까지도 형성될 수 있다고 보고하였다 [10]. 또한 Katranidis, V. 등의 추가 연구에서 gun 이송 속도가 증가할수록 HVOF 화염이 단위 두께의 코팅을 증착하기 위해 필요한 통과 횟수가 증가하며, 이에 따라 표면 산화에 취약한 표면적이 증가하여 표면 산화가 촉진된다고 보고하고 있으며, 해당 연구는 502, 2,010 mm/s 조건에서 수행되었다 [11].

이에 본 연구에서는 WC-10Co-4Cr 조립화 분말을 이용한 HVOF 공정에서, 분말 및 HVOF 장비 공급 회사인 Oerlikon Metco사에서 권장하는 초기 공정 값(분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s)과 분사 각도에 의한 변수를 최대한 배제하기 위해 분사 거리 250, 300,

350 mm를 변수로 설정하였다. gun 이송 속도의 경우, 초기 권장 공정 값(분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s)을 참고하고, 산화를 최소화하기 위해 4, 7, 10 mm/s를 변수로 설정하였다. 해당 공정 변수들에 대해 DB를 구축하고, 각 인자들의 연관된 상호작용을 해석하기 위해 코팅층의 미세-결정구조와 기계적 특성 변화를 분석하였다. 분석의 경우, 분사 거리 변화에 따른 분말의 용융도, spreading behavior, 산화-탈탄화 경향을 고찰하였으며, gun 이송 속도 변화에 따른 열 공급량, 재용융 여부, 적층 안정성 차이를 평가하였다. 해당 연구결과는 WC-Co-Cr계 HVOF 코팅의 공정-미세구조-물성 상관관계보다 명확히 규명하고, 코팅 품질 향상을 위한 최적 공정 조건 설정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 상용 WC-10Co-4Cr 분말(H.C. Starck사의 Amperit 558)을 사용하였으며, 분말의 입도 분포는  $D_{10} = 19.5 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 28.5 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} = 41.4 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 해당 분말은 1차 입자들로 응집된 조립화 분말 구조를 갖고 있다. 1차 입자의 크기는 1~2  $\mu\text{m}$  크기를 갖는다. 코팅의 경우, Oerlikon Metco사의 High Velocity Oxygen Fuel(Robot: FANUC M-20iA, gun: DJ2600) 장비를 사용하여 코팅하였다. 코팅의 공정 조건의 경우, 분말 및 HVOF 장비 공급 회사인 Oerlikon Metco사에서 제공한 권장 조건인 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s과 문헌조사를 기반으로, 분사 거리는 250, 300, 350 mm, gun 이송 속도는 4, 7, 10 mm/s로 채택하였다. 코팅된 시편은 단면 미세구조 분석을 위해 에폭시 기반의 콜드 마운트를 진행하였으며, 자동 연마기(MECATECH 250 SPI, PRESI, France)를 사용하여 600, 1,200, 2,400 mesh SiC paper 연마 이후 3, 1  $\mu\text{m}$  다이아몬드 서스펜션 순서로 연마하였다. 미세구조 관찰 및 조성 분석은 가열로 전계방사 주사전자현미경(Apreo 2S, Thermo, 미국)을 사용하였으며, 결정구조 분석은 X선 회절 분석기(X'pert, Malvern Panalytical, 영국)를 이용하여 수행하였다. 기계적 물성의 경우, 본딩강도(MPa)는 DAEKYUNG사의 DKM-UTM 장비를 사용하여 ASTM C633 규격에 따라 인장 테스트를 진행하여 측정하였다. 경도(Hv)는 WILSON-BUEHLER사의 VH1202 장비를 사용하여 ASTM E384 규격에 따라 300G의 하중으로 측정하였다. 잔류 응력의 경우, Almen 법을 사용하였으며 해당 측정법은 스프레이 과정에서 코팅/기판에 가해지는 잔류 응력의 상대적인 양을 시편이 변형되는 수치(mm)를 통해 코팅/기판의 전체 잔류 응력 강도에 대한 정성적 지표로 사용될 수 있다[12-14]. 해당

Almen 법은 Almen Type N strip을 사용하였으며, 블라스팅 및 코팅 후 알멘게이지(ELECTRONICS INC, TSP-3 REV.B)를 사용하여 측정하였다. 결합율(%)의 경우, 단면 SEM 이미지 기반의 이미지 분석을 통해 산화물과 기공을 구분하지 않고 하나의 결합 지표로 정량화하였다. 이는 미세구조 분석 시 2차 상(산화물, Co-rich, 탈탄화 영역)과 기공을 100% 구분하기 어려운 경우가 존재하며, 산화물과 기공은 Splat 간 결합 저해, 본딩강도 및 인성 저하, 유효 하중 전달 면적 감소 등의 공통점이 존재하기 때문에 산화물과 기공을 하나의 지표로 다루었다. 해당 값은 동일 배율의 단면 SEM 이미지에서 식(1)과 같이 dark contrast 영역의 면적 분율을 계산하여 도출하였다. 미용용 입자/계면 이탈율(%)의 경우, 미용용 입자율은 입자의 용융 상태를 의미하고, 계면 이탈율은 Splat 간 결합 상태를 의미한다. 미용용 입자는 충분한 퍼짐(splat flattening)이 이루어지지 않아 Splat 간 접촉 면적을 감소시키고, 국부적인 응력 집중을 유발할 수 있기 때문에 계면 이탈 발생 가능성을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 그러나 계면 이탈은 입자의 충돌 속도와 충돌각, Co-Cr 바인더 상의 연속성, 응고 및 냉각 과정에서 수축 거동 등 다양한 공정 및 미세구조 인자의 복합적인 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 미용용 입자와 계면 이탈을 직접적인 인과 또는 비례 관계로 해석하기 보다는 공정 조건 변화에 따라 함께 영향을 받는 상호 연관된 미세구조 결합 인자로 해석하였다.

$$\text{Defect area}(\%) = (\text{dark area}/\text{total coating area}) \times 100 \quad (1)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 분말 및 코팅 시편의 미세구조 및 결정구조

Figure 1과 같이 해당 분말은 1~2  $\mu\text{m}$  입자 크기를 갖는 1차 입자들이 응집된 조립화 분말인 것을 확인하였다. 따라서 내부에 기공이 존재하며, 이는 HVOF 분사 시 내부·외부의 용융도 차이가 발생할 수 있음을 의미하고, 이에 따라 반응용 또는 미용용 WC 입자가 코팅층 내에 잔존할 수 있다. 이러한 미세구조는 높은 경도와 마모 저항성을 제공하지만 국부적인 탈탄화 반응으로 인해 식(2)와 같이  $W_2C$ 가 형성될 가능성을 증가시킨다. 탈탄화로 인해 생성된 C(s)는 기지상에 용해될 수 있으며, 결국  $O_2(g)$ 와 반응하여  $CO(g)$  또는  $CO_2(g)$ 로 형성되어 기공을 발생시키고 밀도를 감소시킨다. 또한 과도한 탈탄화 반응 시 식(3)과 같이 W-rich 영역이 형성될 수 있다. 과도한 탈탄화 반응으로 형성된 W(s)은 Co에 고용되어 Co-W-C계( $Co_3W_3C$ ,  $Co_6W_6C$  등)가 석

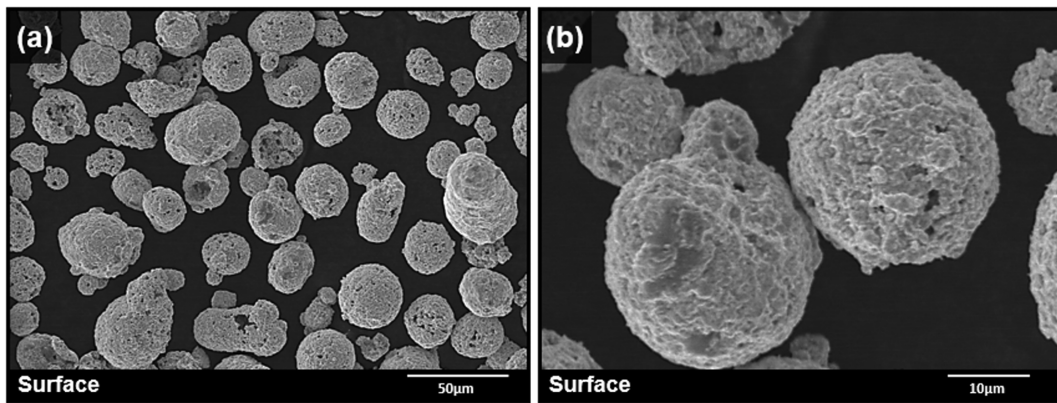


Fig. 1. Surface microstructure of amperit 558 powder.

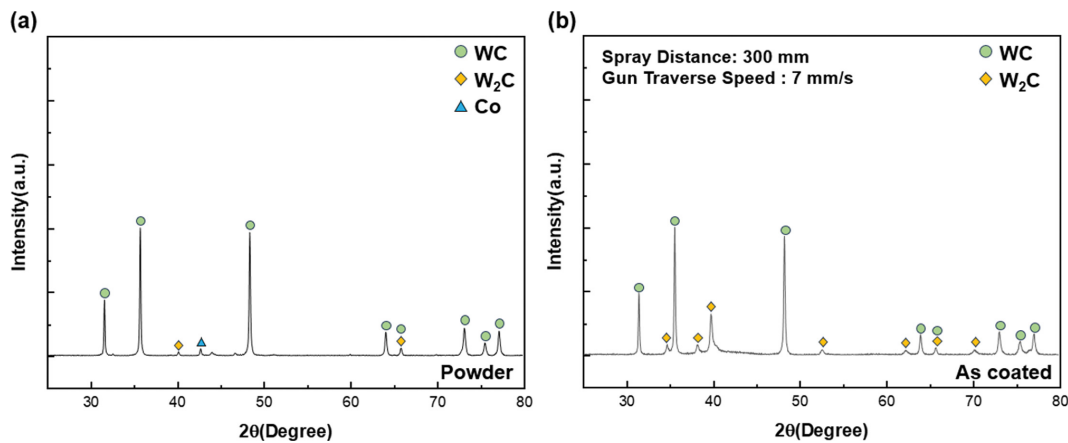


Fig. 2. Phase analysis: (a) feedstock powder and (b) HVOF-sprayed coating (spray distance: 300 mm, gun traverse speed: 7 mm/s).

출될 수 있으며, 결과적으로 바인더 역할을 하는 Co 기지의 연속성이 감소하여 균열이 발생하고, 인성 및 박리 저항이 저하될 수 있다.

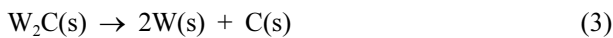
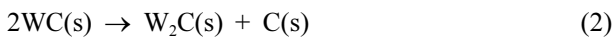


Figure 2는 WC-Co-Cr 분말과 코팅 직후 시편의 결정 구조 분석 결과를 나타낸다. Figure 2(a)와 같이 분말의 경우, 대부분의 회절 피크는 육방정계 WC 상인 것을 확인하였으며, 소량의 W<sub>2</sub>C와 Co 계열 피크가 관찰되었다. Co 계열 피크는 Cr이 고용된 Co-rich 고용체에 해당하는 것으로, 분말에 바인더 상의 존재를 의미한다. 이외 일부 저강도의 미지 피크들이 관찰되지만, 그 강도가 매우 낮고 (Co,W)<sub>6</sub>C 또는 Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C와 같은 복합 탄화물 상에 기인한 것으로 예상되며, 본 연구에서는 해당 복합 탄화물에 의한 영향이 미미하여 별도의 분석을 수행하지 않았다. 결론적으로 본 연구에 사용된 분말은 WC를 주 상으로 하고, 소량의 W<sub>2</sub>C 및 Co-Cr 바인더 상으로 구성되어 있음을 확인하였다.

Figure 2(b)는 기준 조건(분사 거리: 300 mm, gun 이

송 속도: 7 mm/s)에서 형성된 WC-Co-Cr 코팅의 결정 구조 분석 결과이다. 대부분의 회절 피크는 WC의 육방정계 구조에 해당하는 피크로 분말과 동일하게 관찰되었으며, 이는 코팅 공정 이후에도 WC가 주요 상으로서 안정적으로 유지되고 있음을 의미한다[10]. 또한, 분말 대비 W<sub>2</sub>C 피크의 상대 강도가 증가하였는데, 이는 HVOF 공정 중 고온의 화염 환경에서 WC가 부분적으로 탈탄화된 것으로 해석된다. 추가로, 일부 미약한 피크는 복합 탄화물의 존재를 시사하지만 매우 낮은 강도로 인해 정량적 분석이 어려운 수준이며 전체 구조에 미치는 영향은 제한적이다[10]. Co-Cr 바인더 상의 경우, 독립된 Co 또는 Cr 피크로 분리되어 나타나지 않으므로 바인더로서 코팅에 기여하고 있는 것을 예상할 수 있다.

Figure 3은 HVOF 코팅 시편의 표면 부근 미세구조 사진이며, Fig. 2(b)의 결정구조와 일관된 경향을 보인다. 코팅은 Co-Cr 바인더가 연속적인 매트릭스를 형성하여 WC 초경 입자를 고정시켜주고 있으며, Co에 고용된 Cr 또한 맵핑 데이터와 같이 균일하게 분포하고 있는 것으로 확인할 수 있다. 하지만 코팅 공정 중 일부 산화 및 탈탄화로 인해 Fig. 3의 Spectrum 3, 4와 Table 1과 같

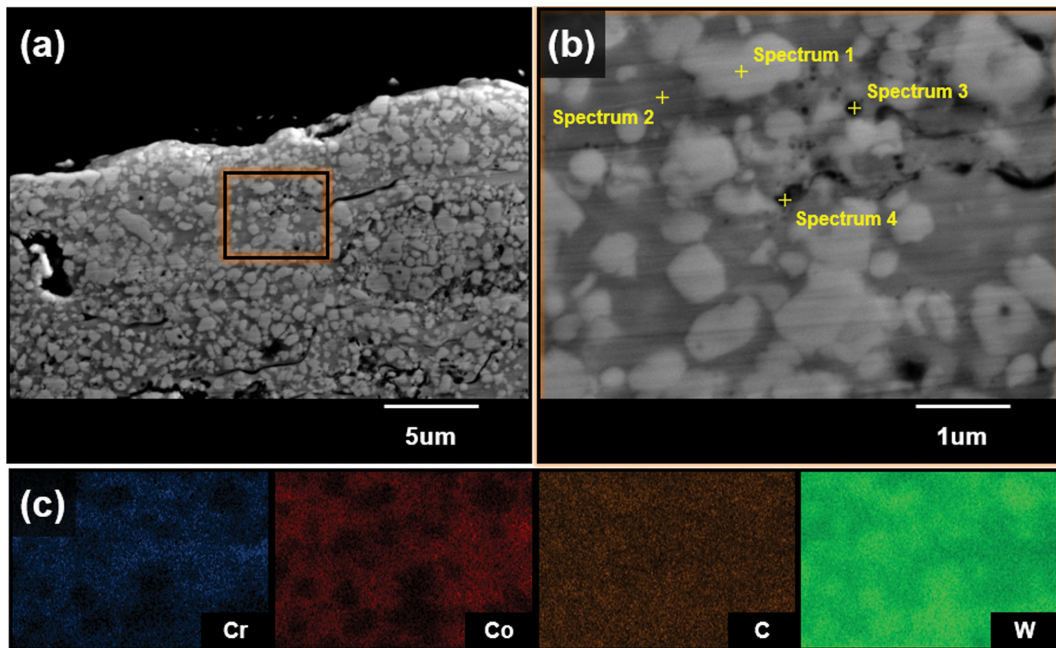


Fig. 3. HVOF-coated specimen (baseline condition: spray distance 300 mm, gun traverse speed 7 mm/s): microstructural and compositional analysis at (a) 10 kx, (b) 50 kx, and (c) elemental mapping.

Table 1  
Point-wise compositional analysis of Fig. 3(b)

Point	At%	C	O	Cr	Co	W
Spectrum 1		68.04	3.02	1.97	3.45	23.53
Spectrum 2		60.81	2.68	5.60	11.08	19.82
Spectrum 3		49.36	12.01	6.84	7.87	23.92
Spectrum 4		55.41	6.38	7.23	9.58	21.39

이 C의 Atomic%가 감소하고, O의 Atomic%가 증가하는 영역을 확인할 수 있다.

### 3.2. HVOF 공정 조건 변수 별 코팅층의 기계적 물성 및 미세-결정구조 분석

#### 3.2.1. 분사 거리의 변화가 기계적 물성에 미치는 영향

분사 거리는 노즐 출구와 기관 사이의 거리를 의미하며, 도금물 분사 중 입자가 받는 열에너지, 운동 에너지, 비행 시간, 산화 환경을 동시에 결정하는 중요 인자로 작용한다. 따라서 분사 거리의 변화는 코팅층의 미세구조와 결정구조 형성에 영향을 미치며 분당강도, 경도, 잔류응력과 같은 물리적 성질을 결정한다[9]. HVOF 노즐에서 도금물의 분사 직후에는 Fig. 4(a)와 같이 초음속 제트와 shock diamond 구조가 형성되며, 해당 영역은 높은 열·운동 에너지로 인한 급격한 팽창으로 Fig. 4(b)와 같이 축방향으로 강한 난류를 형성한다[8]. Figure 4(c)와 같이 기관이 위치하는 수백 mm에서는 shock diamond 구조가 소멸하지만 초반에 형성된 난류는 축 방향으로

전파되고, 이에 따라 분사 거리가 증가할수록 입자의 운동 에너지와 온도가 점진적으로 감소하게 된다[10]. 따라서 분사 거리가 짧을 경우 입자가 상대적으로 높은 속도와 온도를 유지한 채 기관에 도달하기 때문에 일부 입자가 과용융되어 탈탄화 및 기화가 발생할 수 있다. 또한 일부 입자는 불균일한 가열 환경으로 인해 부분 용융 상태로 존재하여 미용융 입자 및 기공을 증가시킬 수 있다. 최적 분사 거리에서는 제트 유동이 충분히 안정화되어 입자의 용융도와 비행 경로가 균일하게 유지되며, 입자 가속도 또한 최대에 도달하므로 균질한 Splat 형성과 우수한 분당 강도를 나타낸다. 반면, 분사 거리가 과도하게 길어진 경우 입자의 비행 시간이 증가하여 비행 중 냉각이 심화됨에 따라 입자의 용융도가 저하된다. 입자의 용융도가 저하된 상태에서 기관에 충돌 시 잘 퍼지지 않으며 일부 입자가 깨지거나 비산될 수 있다[11]. 입자의 용융도와 운동 에너지의 저하는 기공 증가, 불연속적인 Splat 경계, 낮은 분당 강도 등 기계적 물성 저하로 이어진다. 따라서 본 연구는 분사 거리의 변화가 코팅층의 미세구조와 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하기 위해 기준 조건인 300 mm를 기준으로 감소 조건 250 mm, 증가 조건 350 mm에서 HVOF 코팅을 수행하였다.

분사 거리 250 mm 조건에서는 노즐과 기관 사이의 거리가 상대적으로 감소하면서 입자가 기관에 도달하기까지의 비행 시간이 짧아지고, 그에 따라 화염에 체류하는 시간이 감소한다. 이로 인해 입자의 온도는 상대적으로 높지만 입자 내부까지 충분히 가열·용융되지 못하여 용융도의 분포가 비교적 불균일하다. 이러한 열 및 유동

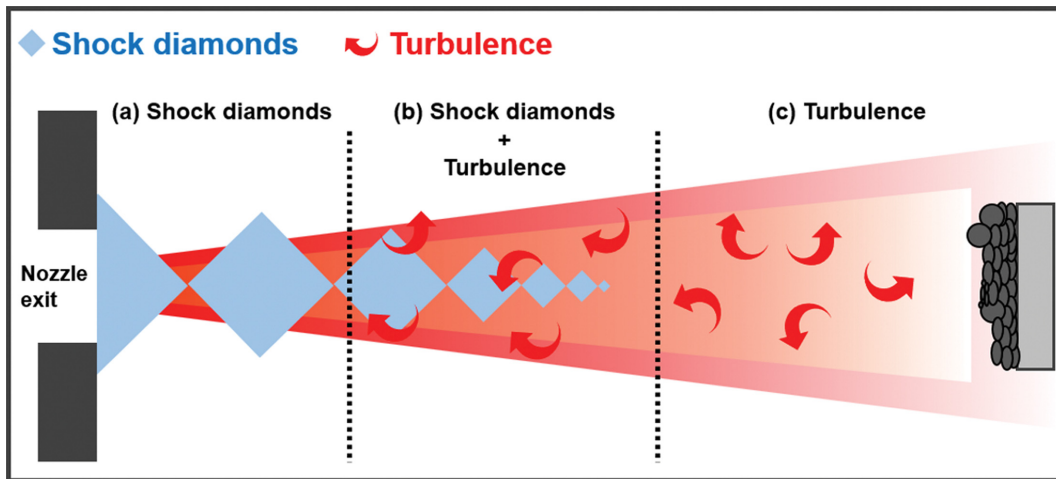


Fig. 4. Schematic illustration of (a) shock diamonds, (b) shock diamonds with turbulent mixing, and (c) the turbulent jet region formed during the HVOF process.

조건은 코팅층의 미세조직과 기계적 물성에 다음과 같은 영향을 미친다[9].

Figure 5(a) 및 Table 2와 같이 분당강도의 경우, 73.8 MPa로 소폭 증가하였다. 이는 비행 거리가 짧아졌기 때문에 입자의 충돌 속도가 상대적으로 높고, 계면 산화도 다소 억제된 것으로 해석된다. Figure 5(b) 및 Table 2와 같이 경도의 경우, 1,356 Hv로 소폭 감소하였지만, 그 영향은 미미한 것으로 보인다. Figure 5(c) 및 Table 2와 같이 Almen/벤딩 시편 두께는 90  $\mu\text{m}$ 로 감소하였는데, 이는 비교적 불균일한 용융도로 인해 부분 용융 또는 미용융 입자의 증가로 인한 영향으로 예상된다. 부분 용융 또는 미용융 입자는 기관에 충돌 후 Splat 간의 결합이 약해 재비산 또는 Splat의 파편화가 쉽게 일어날 수 있다. 이로 인해 실질적으로 기관에 증착되는 입자가 감소한 것으로 해석된다. Figure 5(d) 및 Table 2와 같이 잔류 응력의 경우, 250 mm에서는 입자의 온도가 상대적으로 높기 때문에 기관과의 온도 차이가 크다. 따라서 Splat(입자)은 충돌 직후 급냉이 비교적 빠르게 진행되며 열수축한다. 이 과정에서 미용융 입자와 미세 기공은 불균일하게 분포하고 있으며, 이로 인해 Co-Cr 바인더의 연속성이 감소하여 응력이 완만하게 분산되지 못하고 잔류 응력이 0.35 mm로 소폭 증가한 것으로 해석된다. Figure 5(e) 및 Table 2와 같이 결합율(%)의 경우, 상대적으로 높은 입자 온도는 비행 시간이 감소함에도 불구하고 입자 표면에서 산화 반응을 진행시킨 것으로 예상된다. 추가로 미용융 입자가 증가함에 따라 Splat 경계 및 바인더 영역에 미세 기공이 잔존하기 때문에 결합율(%)이 기준보다 높은 0.872%인 것으로 해석된다. Figure 5(f) 및 Table 2와 같이 미용융 입자/계면 이탈율의 경우, WC-Co-Cr 조립화 분말이 짧은 비행 시간으로 인해 부분적으로 용융되어 기관에 충돌 시 퍼짐(Spreading)

이 충분히 일어나지 않거나 Splat 내부에 고상 코어가 남아 증착되지 않고 계면에서 튀어오르는 입자가 증가한다. 따라서 250 mm 조건에서 미용융 입자/계면 이탈율이 9.48%로 크게 증가한 것으로 해석된다.

분사 거리 350 mm 조건에서는 분말 입자가 기관에 도달하기까지의 비행 시간이 길어지지만, 화염의 유효 가열 영역을 벗어난 이후 공기와의 혼합 및 열손실이 증가하여 비교적 큰 냉각 효과를 보인다. 입자의 용융도는 부분 용융 상태에 가까워지며, 이는 입자가 기관에 충돌 시 퍼짐과 적층 거동에 직접적인 영향을 미친다.

Figure 5(a) 및 Table 2와 같이 분당강도의 경우, 용융도는 감소하지만 동시에 난류가 점진적으로 안정화됨에 따라서 제트의 유동이 충분히 안정화될 수 있다. 그에 따라 입자의 비행 궤적 안정화, 충돌각도 균일화로 인해 Splat 간 접합이 강화될 수 있다. 이에 따라 분당강도는 세 조건 중 77.3 MPa로 가장 높은 값을 나타낸다. Figure 5(b) 및 Table 2와 같이 경도의 경우, 1,400 Hv로 가장 높은 값을 나타낸다. 이는 비행 거리가 증가함에 따라 공기에 노출되는 시간이 증가하게 되고, 표면의 부분적인 산화 및 탈탄화 반응이 촉진된 것으로 보인다. 이에 따라 WC보다 경도가 높은  $\text{W}_2\text{C}$ 의 형성이 전체 경도 상승에 기여한 것으로 해석된다. Figure 5(c) 및 Table 2와 같이 Almen/벤딩 시편 두께의 경우는 90  $\mu\text{m}$ 로 기준 조건보다 감소하였다. 이는 입자의 용융도가 감소하여 퍼짐이 억제되어 재비산된 것으로 보인다. 이로 인해 동일한 분사 횟수에도 실제 기관에 적층되는 유효 적층량이 감소한 것으로 해석된다. Figure 5(d) 및 Table 2와 같이 잔류 응력의 경우 0.34 mm로 기준 조건보다 약간 증가하였다. Figure 5(e) 및 Table 2와 같이 결합율(%)의 경우, 비행 시간이 증가함에 따라 공기와 접촉하는 시간이 증가하여 산화 반응이 촉진된 것으로 보이며, 0.958%

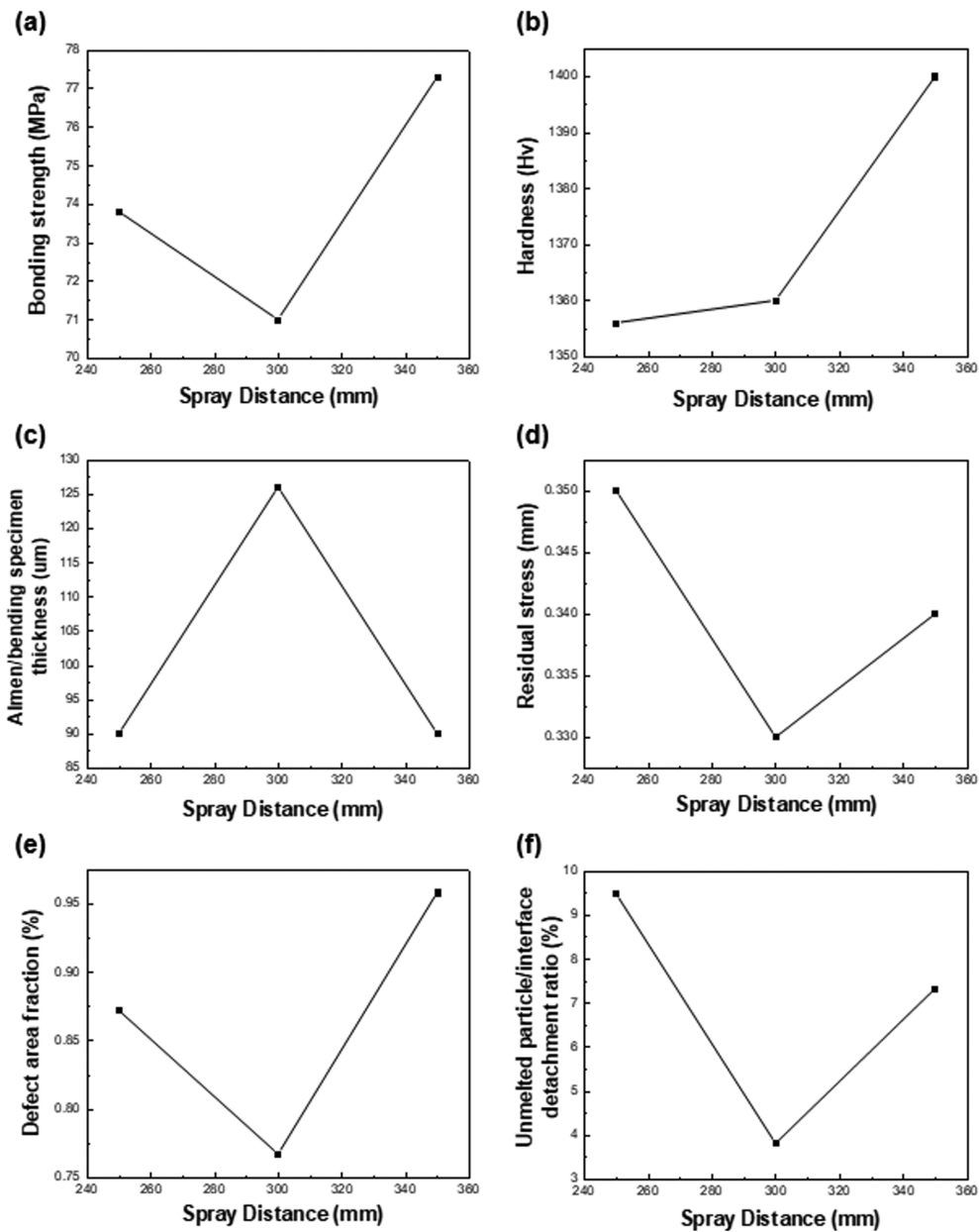


Fig. 5. Trends of (a) bonding strength, (b) hardness, (c) Almen/bending specimen thickness, (d) residual stress, (e) Defect area fraction, and (f) unmelted particle/interface detachment ratio as a function of spray distance.

Table 2  
Mechanical properties of coatings according to spray distance

	Bonding strength (MPa)	Hardness (Hv)	Almen/bending specimen thickness ( $\mu\text{m}$ )	Residual stress (mm)	Oxide/porosity fraction (%)	Unmelted particle/interface detachment ratio (%)
Decreased (250 mm)	73.8	1,356	90	0.35	0.872	9.48
Standard (300 mm)	71	1,360	126	0.33	0.767	3.81
Increased (350 mm)	77.3	1,400	90	0.34	0.958	7.33

가장 높은 값을 갖는다. Figure 5(f) 및 Table 2와 같이 미용용 입자/계면 이탈율(%) 또한 입자의 냉각 속도가 증가하고, 부분 응고된 입자들이 적층되지 않고 반발되거나 비산되었기 때문으로 해석된다.

Figure 6은 분사 거리에 따른 코팅층의 결정상 변화를 확인하기 위해 XRD 분석을 수행한 결정구조 데이터이다. 결정구조 분석 결과, 세 조건 모두 결정상은 WC와  $W_2C$ 로 동일하며, 분사 거리 변화에 따른 결정상의 변화

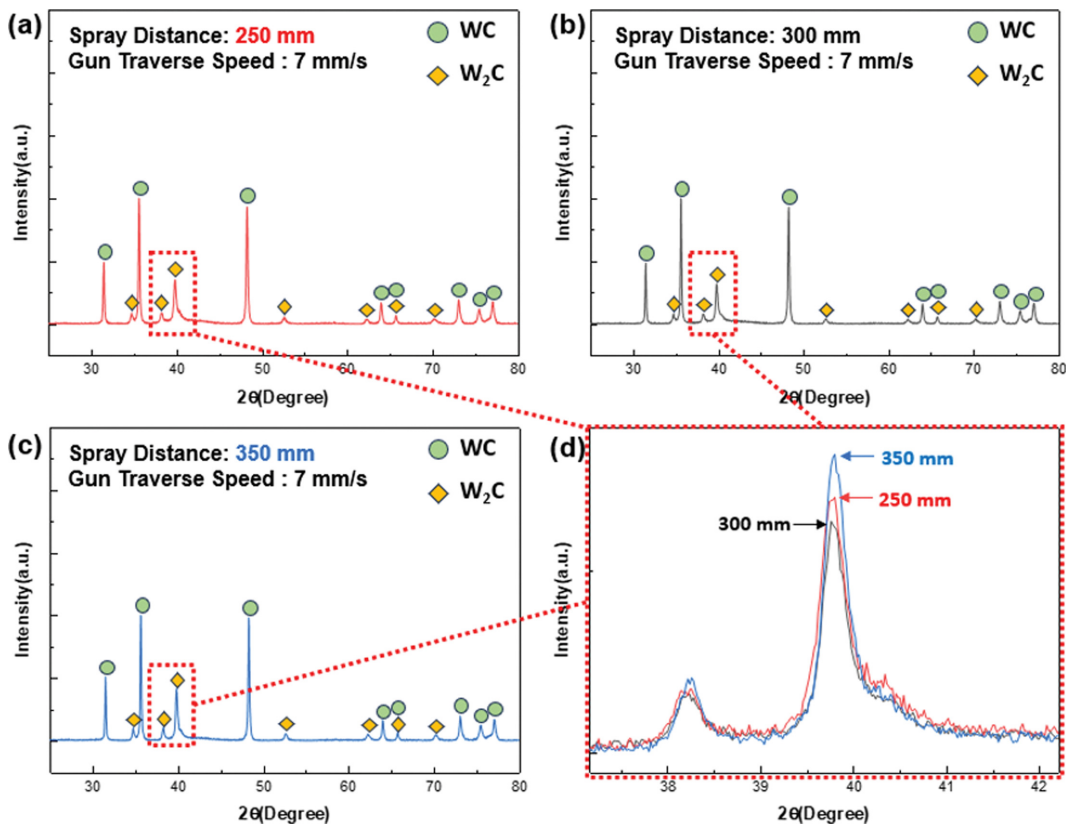


Fig. 6. XRD patterns of the coatings deposited at different spray distances: (a) 250 mm, (b) 300 mm, and (c) 350 mm (d) overlap.

는 크지 않다. 하지만 분사 거리 감소(250 mm), 분사 거리 증가(350 mm) 두 조건 모두 기준 조건(300 mm) 과 대비하여 피크 상대 강도가 증가하였다. Figure 6(d) 와 같이 분사 거리 감소 조건은 짧은 비행 시간으로 인한 높은 체류에 의해 기준 조건보다 탈탄화 반응이 촉진되어 W<sub>2</sub>C 피크 강도가 상대적으로 미세하게 증가하는 경향을 보였으며, 분사 거리 증가 조건에서는 비행 중 냉각 시간이 증가함에도 불구하고 공기에 노출되는 시간이 증가함에 따라 부분적인 탈탄화가 진행되어 기준 조건 대비 W<sub>2</sub>C 피크가 증가하는 것으로 해석된다. 이는 분사 거리 변화로 인해 입자의 탈탄화 정도, 냉각 속도, 용융도가 다르게 작용한 것을 시사한다. 추가로 정량 분석의 경우, C 원소는 경량 원소이기 때문에 SEM&EDS 로 분석 시 신뢰성이 떨어진다. 하지만 XRD 데이터의 Peak Intensity 차이만으로 경향을 파악하기에 충분하다고 판단된다.

Figure 7은 분사 거리(250, 300, 350 mm)에 따른 코팅층의 미세구조 사진이며, 분사 거리 변화에 따라 코팅층의 밀도, Splat 연결성, Co-Cr 바인더의 연속성, 산화-탈탄화, 기공의 분포가 뚜렷하게 달라지는 경향을 확인할 수 있다. 또한 해당 미세구조는 기계적 물성과 일치하는 결과를 나타낸다. Figure 7(a) 분사 거리 감소 조건의 경우, 기준 조건 대비 밀도와 산화-탈탄화 및 기공의

분포가 양호해졌지만, 여전히 코팅층 전반에 걸쳐 낮은 밀도와 불균일한 구조가 관찰된다. 이는 분사 거리가 짧아 입자의 비행 시간이 부족해짐에 따라 분말의 용융도가 충분히 확보되지 못한 상태로 기판에 충돌하기 때문으로 해석된다. 실제로 Table 2와 같이 미용용 입자/계면 이탈율(9.48%)과 결합율(0.872%)은 가장 높은 값을 나타냈으며, 이는 미세구조에서 관찰할 수 있는 불균일한 Splat 구조, 산화-탈탄화, 기공과 직접적으로 연관된다. 낮은 용융도와 불완전한 퍼짐은 적층 효율을 저하시켜 Alme/벤딩 두께가 90 μm로 감소하였고, 열-기계적 수축이 극부적으로 집중되면서 잔류응력도 0.35 mm로 기준 조건 대비 소폭 증가하였다. 그럼에도 불구하고 입자의 충돌 속도가 상대적으로 높아 계면 접합이 크게 저하되지 않아 본딩강도는 73.8 MPa로 기준 조건보다 소폭 향상된 수준을 유지한 것으로 해석된다. Figure 7(c) 분사 거리 증가 조건의 경우, 코팅층이 가장 높은 밀도와 균일한 Splat 구조를 보인다. 장거리 비행으로 인해 분말의 용융도가 일부 감소하여 Table 2와 같이 미용용 입자/계면 이탈율(7.33%)이 증가하고, 결합율(0.958%) 또한 동일하게 증가하였으나(이는 Fig. 8 및 Table 3과 같이 산화물 형성이 결합율 증가에 영향을 미친 것으로 보인다), 전체적으로 제트 유동이 충분히 안정화된 구간에 위치하기 때문에 입자의 충돌각도와 비행 방향이 잘

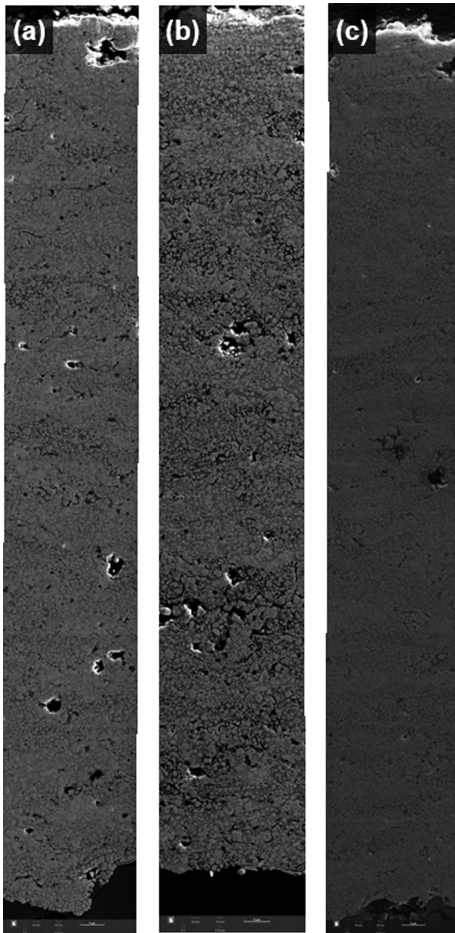


Fig. 7. Microstructures of the coating layer as a function of spray distance: (a) Decreased spray distance (250 mm), (b) Standard condition (300 mm), (c) Increased spray distance (350 mm).

제어된 상태에서 코팅이 수행된 것으로 보인다. 이러한 유동적 안정성은 Splat 간 기계적 결합과 계면 접합을 강화하게 되고, 이로 인해 본딩강도는 77.3 MPa로 가장 높은 값을 나타냈다. 또한 부분 탈탄화에 따른  $W_2C$  생성 및 비행 시간 증가에 의한 냉각효과 증가로 입자의

Table 3  
Point-wise compositional analysis of Fig. 8(b)

Point	At%	C	O	Cr	Co	W
Spectrum 1		54.24	1.58	4.25	15.22	24.71
Spectrum 2		64.65	2.20	1.15	4.99	27.00
Spectrum 3		27.69	35.44	10.97	7.02	18.89
Spectrum 4		18.57	46.66	21.48	4.09	9.19

성장을 억제하는 효과가 반영되어 경도는 1,400 Hv로 가장 높은 수준을 보인다. 비행 중 형성된 미세 기공은 국부적 변형 여유 공간으로 작용하여 잔류 응력은 0.34 mm로 중간 수준을 나타냈으며, Almen/벤딩 시편 두께는 낮은 용융도로 인해 90  $\mu\text{m}$ 로 감소하였다. 결과적으로 분사 거리 감소 조건은 용융 부족으로 인해 결합이 증가하는 저밀도 구조를 나타내며, 분사 거리 증가 조건은 용융도는 부분적으로 감소하지만 유동 안정성에 의해 가장 균일하고 치밀한 Splat 구조가 형성되었다.

3.2.2. Gun 이송 속도의 변화가 기계적 물성에 미치는 영향

Gun 이송 속도는 분말 분사 노즐이 기관 표면을 이동하는 속도를 의미하며, 이는 분말의 비행 조건 자체를 변화시키지는 않지만, 분말이 기관에 적층되는 순간 표면의 열환경(열 공급량 및 냉각속도)과 적층 압력을 변화시켜 코팅층의 미세조직, 경도, 기공율, 잔류응력, 본딩강도 등에 직·간접적으로 영향을 주는 중요한 공정 변수이다[11]. Gun 이송 속도가 느린 경우, 동일한 위치에 화염이 더 오래 머무르게 되는데, 이는 단위면적 당 에너지 밀도가 증가하기 때문에 코팅 표면에서 탈탄화 및 산화 반응이 촉진되고, 적층된 입자의 냉각속도가 감소하며, Co-Cr 바인더가 과도하게 연화된다[11]. 추가로, 이미 적층되어 있던 Splat이 재용융될 수 있다[11]. 해당 현상들은 코팅층의 미세구조를 불균일하게 만들고, 기계

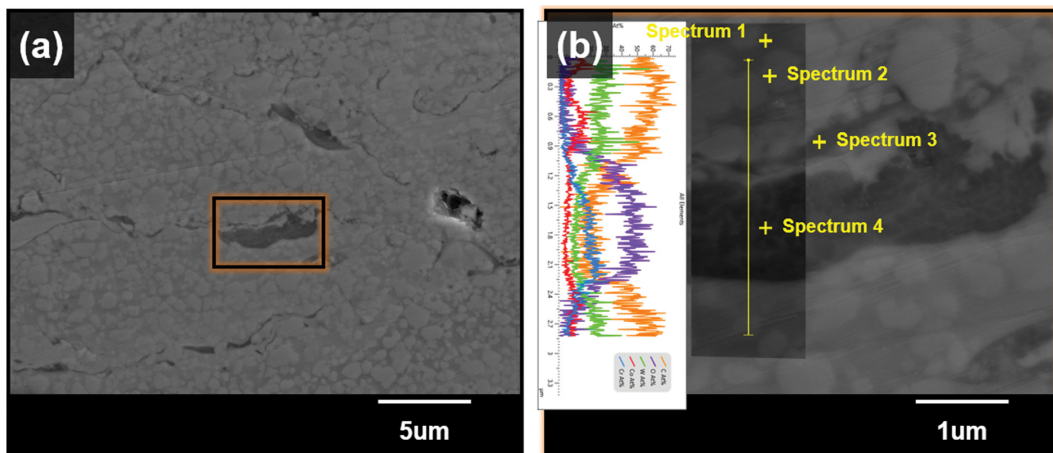


Fig. 8. Oxide microstructure of the coating deposited at the increased spray distance (350 mm).

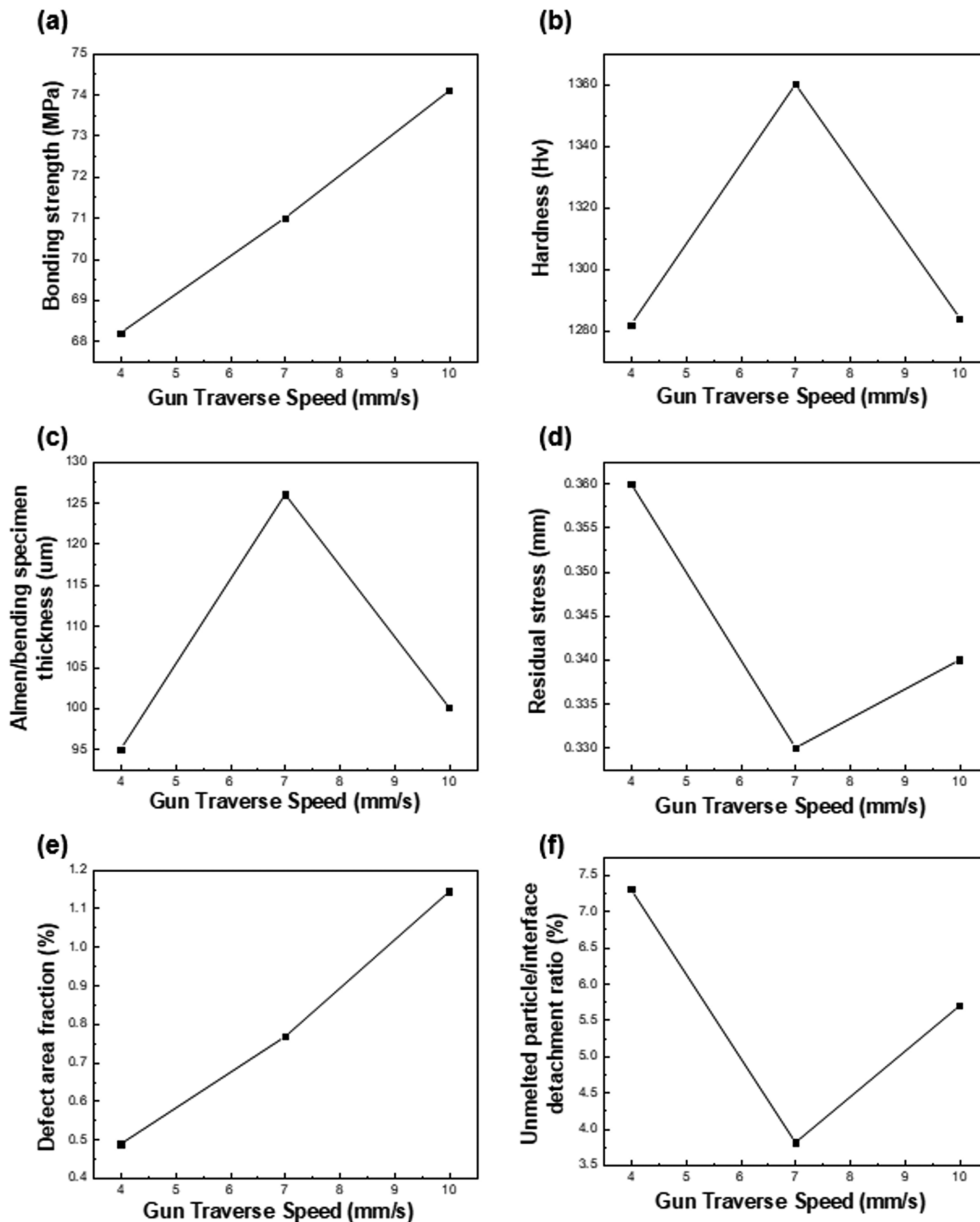


Fig. 9. Mechanical properties of the coatings as a function of gun traverse speed: (a) bonding strength, (b) hardness, (c) Almen/bending specimen thickness, (d) residual stress, (e) Defect area fraction, and (f) unmelted particle/interface separation rate.

적 물성을 저하하는 데에 기인한다. Gun 이송 속도가 빠른 경우, 표면이 충분히 가열되지 못한 상태에서 분말이 적층되어 Splat(입자)이 급속 냉각되고, 이로 인해 미용융 입자가 증가하거나 기공이 증가할 수 있으며, 코팅 두께가 비교적 감소하게 된다. 또한 요구하는 두께에 도달하기 위해서는 HVOF 화염이 통과하는 횟수가 증가하게 되며, 이 과정에서 산화물 형성이 촉진된다[10]. 따라서 gun 이송 속도는 Splat(입자)의 용융-응고-유동 거동에 영향을 미친다. 결과적으로 Splat(입자) 간 결합력, Co-Cr 바인더의 Splat 구조 균일성, 입계 결합 형성 여부 등을 결정한다. 본 연구는 Oerlikon Metco사에서 권장하는 초기 공정 조건(분사 거리: 300 mm, gun 이송 속

도: 7 mm/s)을 기준으로 gun 이송 속도 4, 7, 10 mm/s를 적용하여 형성된 코팅층의 미세구조 및 기계적 물성 변화를 분석하였다.

Gun 이송 속도가 4 mm/s로 감소한 경우, 화염이 동일 위치에 머무르는 시간이 증가하여 이미 적층된 코팅층 표면이 반복적으로 과열된다. 이에 따라 이미 적층된 Splat이 재용융되어 유동성이 증가할 수 있으며, Co-Cr 바인더의 국부적 유동이 증가하여 Fig. 9(e)와 같이 일부 기공을 소멸시켜 기공율이 감소할 수 있다. 하지만 이러한 과정에서 Co-Cr 바인더의 고갈 영역이 형성되어 Splat 간의 경계가 연속성 있고 균일하게 형성되지 않아 Fig. 9(a)와 같이 분당강도가 저하될 수 있다. 결과적으로

표면의 온도-유동성이 불균일해지는 것이고, 이는 Splat이 적층될 때 퍼짐이 불안정해질 수 있음을 의미한다. 따라서 일부는 과도하게 퍼지거나 반대로 충분히 퍼지지 못하게 되는데, 이 때 충분히 퍼지지 못한 Splat들이 미용용 입자처럼 관찰된다. 이에 따라 Fig. 9(f) 및 Table 4와 같이 미용용 입자/계면 이탈율이 7.48 %로 높은 것을 확인할 수 있다. 이러한 구조는 Splat 간 연속성을 저하시켜 코팅 적층 두께가 감소하며, 이에 따라 Fig. 5(c)와 같이 Almen/벤딩 시편 두께가 95  $\mu\text{m}$ 로 최소값을 보인다. 과열된 Splat은 응고 시 큰 수축 변형을 유발하기 때문에 Fig. 9(d)와 같이 잔류 응력이 기준 조건인 7 mm/s 보다 증가하고, 0.36 mm로 가장 높은 값을 보인다. WC의 탈탄화에 따른  $\text{W}_2\text{C}$  형성이 경도 증가에 기여할 수 있지만 실제로 미용용 입자-기공-계면 등으로 인해 Fig. 9(b)와 같이 경도는 1,280 Hv로 감소한 것으로 보인다.

Gun 이송 속도가 10 mm/s로 증가한 경우, 화염이 동일 지점을 머무는 시간이 감소하기 때문에 동일 면적에 공급되는 열량이 감소한다. 이러한 공정 특성은 표면 온도가 충분히 상승하지 못한 상태에서 Splat이 적층된다. 결과적으로 Splat이 퍼지는 것을 억제하고, 빠른 냉각으로 인해 Splat 간 미세 기공이 형성될 가능성이 증가한다. 실제로 Fig. 9(f) 및 Table 4와 같이 미용용 입자/계면 이탈율이 5.7%로 기준 조건보다 증가한 것을 확인할 수 있으며, Fig. 9(e) 및 Table 4와 같이 결함율을 또한 1.144%로 기준 조건 대비 크게 증가하였다. 결함율이 기준 조건보다 증가한 것은, Splat 간 공극의 증가보다는 산화물 형성 증가의 영향이 지배적인 것으로 판단된다. 미세구조 관찰 결과 Splat 구조가 상대적으로 균일하고 조밀하게 형성되는 경향을 보였으나, 표면이 목표 두께에 도달하기까지 반복적으로 HVOF 화염에 노출되면서 누

Table 4  
Mechanical properties of the coating layers as a function of gun traverse speed

	Bonding strength (MPa)	Hardness (Hv)	Almen/bending specimen thickness ( $\mu\text{m}$ )	Residual stress (mm)	Oxide/porosity fraction (%)	Unmelted particle/interface detachment ratio (%)
Decreased (4 mm/s)	68.2	1,282	95	0.36	0.488	7.3
Standard (7 mm/s)	71	1,360	126	0.33	0.767	3.81
Increased (10 mm/s)	74.1	1,284	100	0.34	1.144	5.7

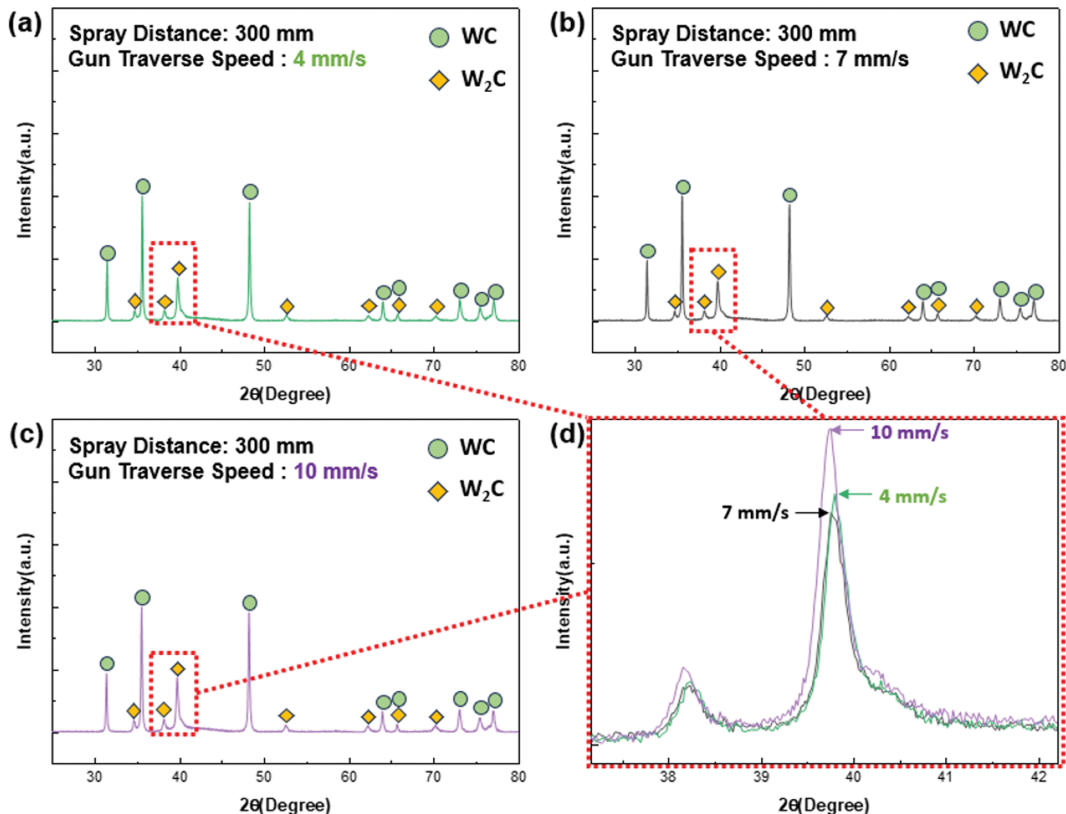


Fig. 10. XRD patterns of the coatings deposited at different gun traverse speeds: (a) 4 mm/s, (b) 7 mm/s, and (c) 10 mm/s (d) overlap.

적 열 노출이 증가하였고, 이에 따라 입자 및 코팅층의 재가열에 의한 산화 반응이 촉진된 것으로 해석된다 [10]. 따라서 본 연구에서 관찰된 결합율(%)의 증가는 기공 증가에 의한 것이 아니라, 산화물 형성 증가에 기인한 결과이다. 또한 입자 용융도의 감소로 인해 부분 용융 상태의 입자가 증가하게 되고, 이에 따라 Fig. 9(c) 및 Table 4와 같이 Almen/벤딩 시편 두께는 100  $\mu\text{m}$ 로 감소하며, 이는 4 mm/s 조건과 기준 조건의 중간 수준이다. 경도의 경우는 용융도 저하로 인해  $\text{W}_2\text{C}$  형성이 일부 증가함에도 불구하고 기공-미용융 입자 증가로 인해 1,284 Hv로 기준 조건보다 낮은 값을 보였으며, 표면 과열이 없기 때문에 탈탄화 및 산화 반응이 억제되어 본딩강도는 74.1 MPa로 기준 대비 소폭 증가하였다. 이는 gun 이송 속도에서 입자 충돌 속도는 상대적으로 유지되지만 용융도 저하와 미세 기공 증가로 인해 Splat 간 결합이 충분히 향상되지 못한 것으로 해석된다. 잔류 응력의 경우, Fig. 9(c) 및 Table 4와 같이 입자 냉각의 영향과 미세 기공 증가에 의한 응력 완화 효과가 동시에 작용하여 0.34 mm로 분사 거리: 300 mm, gun 이송 속도: 7 mm/s 조건과 유사한 값을 나타냈다. 결과적으로 10 mm/s 조건은 분말 용융도 저하와 적층 효율 감소로 인해 미세조직적 결합이 증가하는 경향을 보이고, 이에 따라 경도와 적층 두께는 감소하지만 안정적인 분사 패턴 유지로 인해 본딩강도의 큰 변화는 없는 것으로 해석된다.

Figure 10은 gun 이송 속도에 따른 코팅층의 결정상 변화를 확인하기 위해 XRD 분석을 수행한 결정구조 데이터이다. 모든 조건에서 WC와  $\text{W}_2\text{C}$ 가 주요 상인 것으로 관찰되었으며, 전체적인 피크 패턴은 세 조건 간 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 HVOF 공정에서 WC 기반 분말이 공정 온도 범위 내에서 안정적인 탄화물 상을 유지하기 때문에 gun 이송 속도의 변화가 결정상에 미치는 영향이 미미한 것을 의미한다.

4 mm/s 조건은 기준 조건과 비교했을 때 WC와  $\text{W}_2\text{C}$  피크의 상대 강도 및 폭에서 유의미한 변화가 관찰되지 않았다. 이 조건에서는 노즐의 이동 속도가 느려짐에 따라 입자가 비행 중 냉각되는 시간은 기준과 유사하지만 화염의 체류 시간이 길어져 과용융이 증가할 수 있다. 그럼에도 불구하고 XRD 분석에서 WC  $\rightarrow$   $\text{W}_2\text{C}$ 로의 상 변환이 기준 조건과 유사한데, 이는 탈탄화가 국부적으로 발생하더라도 결정상 변화로 명확히 드러날 정도로 진행되지는 않았음을 시사한다. 반면 10 mm/s 조건에서는  $\text{W}_2\text{C}$  피크의 상대 강도가 기준 조건 대비 소폭 증가하는 경향을 보인다. 이는 gun 이송 속도가 증가할수록 동일 위치에 대한 재가열 효과가 감소하여, 분사 과정 중 형성된  $\text{W}_2\text{C}$  상이 코팅층 내에 상대적으로 많이 보존되기 때문으로 해석된다. 4, 7 mm/s 조건에서는 표면 과열 및 재용융에 의해 일부  $\text{W}_2\text{C}$ 가 다른 복합 탄화물

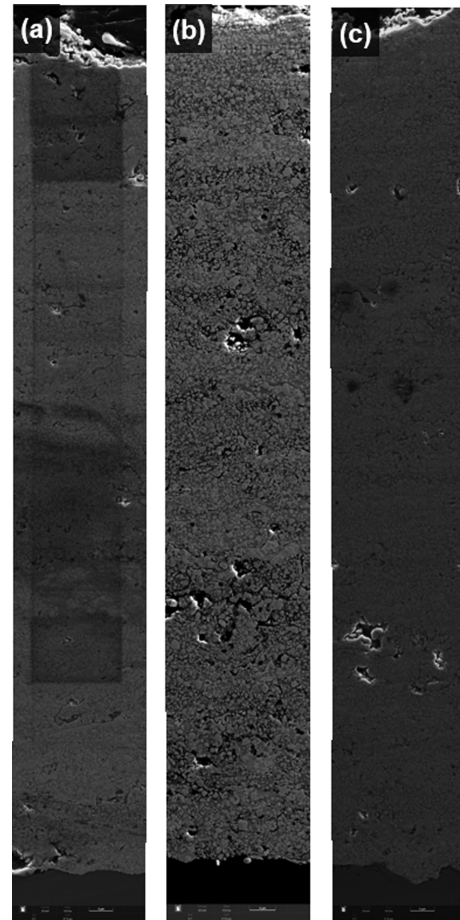


Fig. 11. Microstructure of the coating layer as a function of gun traverse speed: (a) decreased speed (4 mm/s), (b) standard condition (7 mm/s), and (c) increased speed (10 mm/s).

상으로 변할 수 있지만, 10 mm/s 조건에서는 후속 열처리 효과가 상대적으로 감소하여 더 많은  $\text{W}_2\text{C}$  상이 유지된 것으로 해석된다.

Figure 11은 gun 이송 속도에 따른 코팅층의 미세구조 사진이다. 미세구조 비교 시 Fig. 11(b) 기준 조건 대비 (a) 4 mm/s, (c) 10 mm/s 조건에서 전반적으로 기공 분포가 감소하고 Co-Cr 바인더의 Splat 구조가 보다 연속적인 형태로 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 기준 조건에서는 미용융 입자와 Splat 경계에 형성된 불연속적 기공들이 광범위하게 분포하며, 적층 방향으로 형성된 기공과 Splat 간의 경계가 뚜렷하게 관찰된다. 이는 기준 조건에서 분말이 화염에 노출되는 열 및 유동 조건이 부분 용융과 과용융이 혼합된 영역에 위치하고 있는 것으로 해석된다. 반면 4 mm/s 조건에서는 노즐의 이동 속도가 감소함에 따라 단위 면적 당 분말 공급 밀도가 증가하고, 동일 위치가 화염에 노출되는 시간이 상대적으로 증가하여 적층되는 Splat이 비교적 안정적으로 적층되며, 이에 따라 더 조밀하고 연속적으로 형성된다. 10 mm/s 조건의 경우, 동일하게 기준 조건보다 기공 및 결

합의 분포가 감소하는 경향을 보인다. 이는 gun 이송 속도가 증가할수록 동일 위치에 화염이 노출되는 시간이 감소함에 따라 열 축적이 억제되고, 이에 따라 과용융된 입자들이 비산하거나, 높아진 유동성에 의한 Co-Cr 바인더의 고갈 영역이 억제되기 때문으로 해석된다.

결과적으로 4, 10 mm/s 조건 모두 Oerlikon Metco사에서 제공한 권장 조건 대비 미세조직이 더 조밀하고 균일한 구조를 경향을 나타낸다. 이는 Splat의 적층 안정성과 과도한 열 축적에 의한 입자의 비산 및 Co-Cr 바인더 고갈 영역의 억제와 같은 요인들이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 따라서 gun 이송 속도가 기준 조건에서 벗어날 경우, Splat 적층 거동이 오히려 개선될 수 있음을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 WC-Co-Cr 조립화 분말을 대상으로 HVOF(High Velocity Oxygen Fuel) 공정의 분사 거리(250, 300, 350 mm) 및 gun 이송 속도(4, 7, 10 mm/s)의 변화가 코팅층의 미세-결정구조, 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 각 공정 변수는 WC 기반 코팅층의 용융도, 비행 중 열유동 환경, 적층 효율, Splat 구조의 연속성을 지배하여 최종 코팅의 성능에 결정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

분사 거리 변화는 입자의 열-운동 에너지와 용융도를 직접적으로 제어하였다. 250 mm에서는 짧은 비행 시간으로 인해 용융도가 불균일해져 미용융 입자(9.48%)와 기공(0.872%)이 증가하였으며, 이에 따라 낮은 밀도의 Splat 구조와 높은 잔류 응력(0.35 mm)이 형성되었다. 반면 350 mm에서는 난류가 안정화된 영역에서 코팅이 이루어져 가장 균질한 Splat 구조가 형성되었고, 이에 따라 본딩강도(77.3 MPa)와 경도(1,400 Hv)가 가장 높은 값을 나타냈다. 분사 거리 변화에 따른 결정상은 WC 및  $W_2C$ 로 동일하게 유지되었으며,  $W_2C$  상대 강도의 변화는 분사 거리 증가/감소에 따른 부분적 탈탄화 정도의 차이를 보였다.

Gun 이송 속도의 변화는 분말 비행 조건보다는 코팅 표면의 열 축적 정도와 Splat 적층 거동을 조절하는 인자임을 확인하였다. 4 mm/s 조건에서는 과열 및 재용융 현상이 발생하여 Splat 간 연속성이 저하되고 미용융 입자(7.3%)와 높은 잔류 응력(0.36 mm)을 보였다. 반면 10 mm/s 조건에서는 열 축적 억제로 인해 더 균일한 Splat 구조와 비교적 낮은 결함 분포를 보이며, 기준 조건 대비 본딩강도(74.1 MPa)가 소폭 향상되었다. XRD 분석에서는 gun 이송 속도의 변화가 결정상에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으나, 10 mm/s 조건에서

$W_2C$  피크가 소폭 증가하는 것을 통해 코팅 공정 시 형성된  $W_2C$ 가 빠른 냉각에 의해 비교적 보존되는 경향을 확인하였다.

종합적으로, HVOF 공정에서 WC-Co-Cr 코팅의 품질은 단일 인자가 아닌 열-유동-적층 거동의 복합적 상호작용에 의해 결정되며, 본 연구는 공정 조건 최적화를 위한 실질적 기준을 제시한다. 특히 350 mm 분사 거리와 10 mm/s gun 이송 속도는 Splat 구조 안정성, 높은 경도 및 본딩강도 측면에서 가장 우수한 성능을 제공하는 조건으로 해석된다. 또한 본 연구는 WC 조립화 분말의 구조적인 특성(내부 기공으로 인한 용융 분포)이 HVOF 공정 시 코팅층의 상변화 및 결함 형성에 영향을 미친다는 점을 확인하였으며, 향후 WC 기반 고성능 코팅 설계에 유용한 기초 자료를 제공한다.

#### 감사의글

본 연구는 중소기업기술정보진흥원의 중소기업기술혁신개발(R&D) 사업(RS-2024-00414247)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사합니다.

#### References

- [1] A. Wank, B. Wielage, H. Pokhmurska, E. Friesen and G. Reisel, "Comparison of hardmetal and hard chromium coatings under different tribological conditions", *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 1975.
- [2] G. Bolelli, R. Giovanardi, L. Lusvardi and T. Manfredini, "Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement", *Corros. Sci.* 48 (2006) 3375.
- [3] D. Cheng, G. Trapaga, J.W. McKelligand and E.J. Lavernia, "Mathematical modelling of high velocity oxygen fuel thermal spraying of nanocrystalline materials: an overview", *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 11 (2002) R1.
- [4] D.E. Crawmer, "Thermal Spray Processes", in *Handbook of Thermal Spray Technology*, J.R. Davis, Ed., (ASM International, Materials Park, OH, 2004) p. 54.
- [5] E. Need, "Overview of chromium and cadmium alternative technologies", *Surf. Modif. Technol.* 1 (2002) 1.
- [6] J. Yuan, Q. Zhan, J. Huang, S. Ding and H. Li, "Decarburization mechanisms of WC-Co during thermal spraying: Insights from controlled carbon loss and microstructure characterization", *Mater. Chem. Phys.* 142 (2013) 165.
- [7] D. Naha, S. Chatterjee, M. Ghosh, J.D. Majumdar and A. Majumdar, "HVOF sprayed WC-CoCr coating on mild steel: microstructure and wear evaluation", *IOSR J. Appl. Phys.* 8 (2016) 47.
- [8] A. Dolatabadi, J. Mostaghimi and V. Pershin, "Effect of a cylindrical shroud on particle conditions in high velocity oxy-fuel spray process", *Sci. Technol. Adv. Mater.* 3 (2002) 245.
- [9] V. Katranidis, S. Gu, B. Allcock and S. Kannis,

- “Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness”, *Surf. Coat. Technol.* 311 (2017) 206.
- [10] M. Jadidi, S. Moghtadernejad and A. Dolatabadi, “A comprehensive review on fluid dynamics and transport of suspension/liquid droplets and particles in high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spray”, *Coatings* 5 (2015) 576.
- [11] V. Katranidis, S. Gu, T.R. Reina, E. Alpay, B. Allcock and S. Kamnis, “Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part B: Influence of kinematic spray parameters on microstructure, phase composition and decarburization of the coatings”, *Surf. Coat. Technol.* 328 (2017) 499.
- [12] Y.Y. Santana, P.O. Renault, M. Sebastiani, J.G. La Barbera, J. Lesage, E. Bemporad, E. Le Bourhis, E.S. Puchi-Cabrera and M.H. Staia, “Characterization and residual stresses of WC-Co thermally sprayed coatings”, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2008) 4560.
- [13] T.C. Totemeier and J.K. Wright, “Residual stress determination in thermally sprayed coatings—a comparison of curvature models and X-ray techniques”, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 3955.
- [14] P. Bansal, P.H. Shipway and S.B. Leen, “Residual stresses in high-velocity oxy-fuel thermally sprayed coatings—Modelling the effect of particle velocity and temperature during the spraying process”, *Acta Mater.* 55 (2007) 5089.