고속화염용사코팅으로 제조된 WC-CoFe 코팅의 기계적 특성에 관한 연구

주윤곤* · 조동율* · 하성식** · 이찬규* · 천희곤*** · 허성강* · 윤재홍*[†]
*창원대학교 나노신소재공학부, **한국제강, ***울산대학교

The Mechanical Properties of WC-CoFe Coating Sprayed by HVOF

Yun-Kon Joo*, Tong-Yul Cho*, Sung-Sik Ha**, Chan-Gyu Lee*, Hui-Gon Chun***,
Sung-Gang Hur*, Jae-Hong Yoon*[†]

*Dept. of Nano & Advanced Materials Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

**Han Kook Steel & Mill, Ltd., Gyeongnam 637-824, Korea

*** School of Materials Science & Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-741, Korea

Abstract HVOF thermal spray coating of 80%WC-CoFe powder is one of the most promising candidate for the replacement of the traditional hard chrome plating and hard ceramics coating because of the environmental problem of the very toxic Cr^{6+} known as carcinogen by chrome plating and the brittleness of ceramics coatings. 80%WC-CoFe powder was coated by HVOF thermal spraying for the study of durability improvement of the high speed spindle such as air bearing spindle. The coating procedure was designed by the Taguchi program, including 4 parameters of hydrogen and oxygen flow rates, powder feed rate and spray distance. The surface properties of the 80%WC-CoFe powder coating were investigated roughness, hardness and porosity. The optimal condition for thermal spray has been ensured by the relationship between the spray parameters and the hardness of the coatings. The optimal coating process obtained by Taguchi program is the process of oxygen flow rate 34 FRM, hydrogen flow rate 57 FRM, powder feed rate 35 g/min and spray distance 8 inch. The coating cross-sectional structure was observed scanning electron microscope before chemical etching. Estimation of coating porosity was performed using metallurgical image analysis. The Friction and wear behaviors of HVOF WC-CoFe coating prepared by OCP are investigated by reciprocating sliding wear test at 25°C and 450°C. Friction coefficients (FC) of coating decreases as sliding surface temperature increases from 25°C to 450°C.

(Received October 31, 2011; Revised November 15, 2011; Accepted December 16, 2011)

Key words: HVOF, Taguchi program, Wear performance, WC-CoFe

1. 서 론

전통적인 경질크롬도금과 세라믹 코팅은 금속 표면에 증착시켜 내마모, 내열, 내식성 등을 필요로 하는 곳에 널리 사용되어 왔다[1, 2]. 그러나 크롬도금은 400°C 이상에서 사용하기 어려운 특성을 가지고 있을 뿐 아니라 도금 과정에서 독성이 강한 발암물질인 Cr^{6+} 을 배출 시키고 세라믹 코팅의 취성문제를 가지고 있다[1, 2]. 최근에는 고속화염 용사법(HVOF: High Velocity Oxy-Fuel)은 미세분말 소재를 부품표면에 코팅하여 마모나 부식 환경 등의 가혹한 분위기하에서 부품들의 수명 향상을 필요로 하

는 자동차, 항공기 등의 산업 분야에 응용되고 있다[3]. 세계 Air Bearing 장치의 주된 생산 업체인 Westwind Air Bearing와 JEVCO International은 경질크롬도금을 활용한 스피들(Spindle)을 도입함으로써 120,000 RPM 이상의 공기베어링(Air Bearing) 장치를 생산하고 있다. 고속 회전체의 축 부는 RPM이 증가할수록 고열이 발생하고 침식 마모가 심하여 점점 고가의 재질을 사용하게 되었다. 그러나 금속 재질은 고온에서 열적 변형이 심하고 물리적 특성이 감소함으로써 원자재의 원가 상승에 비해서 그 수명 향상에 한계를 가지게 되었고 고온에서 축 부가 고착되는 현상이 나타났다. 이를 개선하고자

[†]Corresponding author. E-mail : jhyoon@changwon.ac.kr

Cr 경질 도금을 수행 하였지만 도금에서도 역시 고착현상 및 코팅 탈락 등의 문제가 나타났다. 알루미늄 계열의 옥사이드의 경우에 Bushing과의 접촉이 발생하지 않을 경우에 축 부에 대한 내마모성 및 내열성이 우수하지만 Air Bearing Spindle이 시동(Start)과 정지(Shut off)시에 부싱(Bushing)과의 마찰이 잦아짐에 따라 그 충격을 견디지 못하고 코팅이 탈락하기 때문에 코팅 고유의 특성을 발휘하지 못하고 있다. 국내 일부 업체에서 적용하고 있는 알루미늄 계열의 용사 코팅은 Cr 경질에 비해 약간의 내소착성은 우수하지만 내충격성이 약하기 때문에 부품의 수명 향상에 별다른 기여를 하지 못하고 있다. 이로 인해 국내의 전자 및 반도체 업체들은 세계 일류의 제품을 생산하기 위해 고가의 수입 제품을 선호하고 있다. 이러한 크롬을 이용한 표면경화 대신에 WC계 및 Co 합금 등과 같은 소재를 코팅하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 내마모성 및 내식성이 우수한 WC-CoFe 분말을 HVOF 법을 이용하여 인코넬 718 기판에 코팅하였다. 용사 코팅 공정 인자(산소유속, 수소유속, 용사거리 및 분말공급량)에 대하여 3수준 4인 다구짜 실험계획법을 이용하여 최적 용사코팅공정기술을 개발하였고, 마찰/마모시험을 통하여 그 특성을 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 준비

WC-CoFe코팅의 기판은 binder층의 코팅 없이도 강한 접착을 하며 부식 환경에서 사용되는 Inconel 718 소재를 사용하였다. 코팅 분말은 표 1과 같은 화학조성을 가지고 spray drying 법으로 제조된 그림 1과 같은 입도 20~40 μm 의 WC-CoFe 상용분말을 사용하였다. 코팅 공정은 전처리, 용사 그리고 후 처리로 하였다. 전처리 과정에서는 시편 모재를 아세톤 용액에서 5분간 초음파 세척을 한 후

60 mesh의 Al_2O_3 로 blasting 처리를 하여 모재와 용사층간의 접착력을 증대시키도록 하였다. 용사공정에서는 3수준 4인자; 산소와 수소가스 유속, 용사거리 그리고 분말 공급율에 대하여 다구짜 실험계획법으로 표 2와 같은 9가지의 공정으로 용사코팅을 하였다. 용사장비는 JK3500을 사용하였으며 용사 시 용사건 속도는 3 mm/s로 일정하게 유지하였다. 용사 분말의 캐리어 가스는 180 psi의 아르곤을 사용하였다. 용사코팅 후 냉각은 별도의 냉각장치 없이 공냉을 하였다.

2.2 WC-CoFe 코팅층 분석

코팅 층은 광학현미경, 주사전자현미경, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 및 XRD (X-ray Diffraction)를 이용하여 미세조직과 조성을 분석하였으며, 미소경도시험기로 코팅 층 단면 중심부에서 15회 측정된 후 측정치가 가장 큰 값과 작은 값을 제외하고 평균값으로 경도 값을 산출하였으며, 광학현미경을 사용하여 얻은 코팅 층의 조직사진을 영상분석기(Image analyzer)를 통해 분석하여 코팅 층의 기공도를 얻었다.

Table 2. Process of HVOF WC-CoFe coating designed by Taguchi method

	O ₂ flow rate (FMR)	H ₂ flow rate (FMR)	Feed rate (g/min)	Spray distance (inch)
1	30	53	25	6
2	30	57	30	7
3	30	61	35	8
4	34	53	35	7
5	34	57	25	8
6	34	61	30	6
7	38	53	30	8
8	38	57	35	6
9	38	61	25	7

Table 1. Chemical compositions of WC-CoFe powder and Inconel718

(wt.%)

Element		W			C			Co		Fe		
WC-CoFe		70.3			17.33			11.77		0.7		
Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Al	B	Nb	Cu
Inconel 718	0.08	0.35	0.35	17-21	50-55	1	2.8-3.3	0.65-1.15	0.2-0.8	0.006	4.75-5.5	0.3

2.3 WC-CoFe 코팅층 마찰/마모 시험

최적 용사코팅공정기술(OCP)로 제조된 WC-FeCo 코팅층 그리고 모재인 인코넬 718의 마찰/마모 성능을 비교하기 위하여 왕복구동방식의 마찰/마모시험기를 사용하였다. 마모시험은 코팅의 초기 표면 거칠기의 영향에 민감하므로 코팅된 시편의 표면을 1 μm 의 다이아몬드 페이스트까지 연마하였다. 마찰조건은 상대재로 직경 1 cm인 스테인레스 볼을 사용하였다. 상온에서 무윤활 상태로 거리 1.6 cm, 2.5 Hz 조건에서 10 N의 하중을 가해 10분간 실시하면서 마찰계수를 측정하였고, 마모시험 후 SEM과 surface profiler를 이용하여 마모흔을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 WC-CoFe 분말 특성 분석

Spray drying법으로 제조된 WC-CoFe 분말의 SEM 이미지와 EDS 결과를 그림 1에 나타내었다. 분말은 세라믹특성을 가진 고경도의 WC입자가 결합체 역할을 하는 Co 기지 내에 혼합된 형태이며, 분말의 평균 입도는 20~40 μm 나타내었다. 그림 2의 (a)에 분말의 XRD 분석 결과에서 알 수 있듯이 분

말은 WC, Co 그리고 Fe 상이 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2. WC-CoFe 코팅층 분석

실험계획법에 의해 제조된 WC-CoFe 코팅의 XRD 결과를 그림 2의 (b)에 나타내었다. XRD 분석 결과 WC, Co, Fe 결정상과 분말에서는 나타나지 않았던 W_2C 결정상이 존재하였다. 초고속화염용사(용사) 동안 액적이 3,500°C의 화염 속에서 용해 혹은 부분 용해되며, 1,000 m/s의 고속으로 기관에 증착되는 과정에서 분말내 WC의 일부가 열분해 온도 이상에서 금속과 흑연으로 분해가 일어났기 때문이다[4]. 그림 3에 용사법에 의해 제조된 코팅시편의 단면과 표면의 SEM 이미지를 나타내었다. 코팅의 두께는 약 150 μm 이다. 단면과 표면의 이미지를 보면 다공성의 코팅이 형성 되었는데 이는 WC의 열분해로 인하여 생성된 탄소가 과잉 공급된 산소와 반응하여 이산화탄소 가스를 생성하고, 이산화탄소 가스가 코팅층을 통해서 배출되기 때문이다[4].

3.3. WC-CoFe 코팅층의 특성

그림 4에 보여진 표면 특성과 공정변수들과의 관

Fig. 1 SEM image and EDS of WC-CoFe powder.

Fig. 2. XRD of WC-CoFe powder and OCP coating.

Fig. 3. SEM of surface and cross-section of coating.

Fig. 4. Correlation between surface properties and spray parameters.

Fig. 5. SEM image of cross-section and EDS spectrum of OCP coating layer.

계에서 표면경도는 $H_v = 750 \sim 1,100$ 로 일반기계부품에 사용되는 소재보다 약 1.5배 이상 높은 경도 값을 나타내었고, 산소 34 FMR, 수소 57 FMR, 용사거리 8 inch 그리고 분말 공급량 25 g/min 일 때 가장 높은 경도를 나타내었다. 일반적으로 용사거리 증가는 분말의 열에 노출 시간이 증가하므로 WC의 분해를 증가시켜 경도를 감소시킨다. 분말 공급량의 증가는 분말에 의한 열 흡수로 분말온도를 낮추어 열분해를 감소시켜 경도를 높이는 효과를 나타낸다. 기공도는 산소의 유속 변화에 가장 큰 변화를 나타내었으며, 산소 30 FRM, 수소 61 FRM, 용사거리 8 inch 그리고 분말 공급량 35 g/min 일 때 가장 낮은 기공도를 나타내었다. 용사층의 기공의 크기 및 분포는 용사층 특성에 영향을 주는 중요한 요소 중의 하나로 기공의 생성 원인은 판의 적층구조 특이성에 기인하는데 불완전한 판 사이에는 조대한 기공이 생기게 되고, 용융된 액적이 모재에 충돌하여 퍼질 때 판의 모서리 부분에서 다시 튀어 오르는 입자 위에 후속 액적이 응고된 입자에 충돌하여 판을 형성할 때, 중간크기의 기공이 생기게 된다. 또 다른 원인은 용융된 액적에 가두어져 있던 가스가

Table 3. Optimal coating processes for hardness, porosity and roughness

Factor	Unit	OCP		
		Hardness	Porosity	Roughness
O ₂ flow rate	FMR	34	38	30
H ₂ flow rate	FMR	57	53	57
Spray distance	Inch	8	6	7
Feed rate	g/min	35	25	30

Fig. 6. Friction coefficient vs. the sliding time of WC-CoFe coating layer.

모재에 충돌하여 판을 형성할 때, 가스가 포집 되면서 판 내에 미세한 크기의 기공이 고립되게 된다. 이와 같이 생긴 기공의 크기와 분포는 용사 변수들을 적절히 조절함에 따라 제어가 가능하며, 또한 용사층의 기계적 특성에도 영향을 미치기 때문에 용사 변수 최적화를 통하여 기공의 크기와 분포를 제어하여야 한다. 표면 거칠기는 기공도 및 경도와 같이 산소 유속 변화에 가장 큰 변화를 보였으며 산소 38 FRM, 수소 61 FRM, 용사거리 7 inch 그리고 분말 공급량 25 g/min 일 때 가장 작은 거칠기를 보였다.

3.4 최적 용사 코팅공정 도출

표 2와 같은 실험계획법으로 제작된 시편의 표면 특성분석을 통해 그림 4와 같은 결과값을 바탕으로 분산 분석을 실시하여 경도에 대해서는 높으면 높을수록 좋은 결과 이므로 망대특성을 적용하고, 기공도 및 표면 거칠기에 대해서는 낮으면 낮을수록 좋은 결과 이므로 망소특성을 적용하여 표 3과 각 표면특

성에 대한 최적공정을 선정하였으며, 연구에 사용된 분말이 내마모 특성을 향상시키기 위해 용사 조건의 최적화가 요구된다. 코팅층의 내마모 특성은 경도,

기공도 및 표면 거칠기 복합적으로 작용하겠지만 인자들 간의 상반된 결과가 발생하여, 연구의 목적인 내마모성 향상을 고려하여 경도, 기공도 그리고 표면

Fig. 7. Wear trace and EDS spectra at different temperatures.

거칠기로 최적공정의 우선순위를 설정하였다. 모든 특성에 있어 가장 큰 기여도를 보인 산소의 유량 34 FRM, 수소유량 57 FRM, 용사거리 8 inch 그리고 분말 공급량 35 g/min이 최적코팅공정이다[5]. 도출된 최적공정으로 용사한 WC-CoFe 코팅층의 표면 특성 및 마찰마모 특성을 평가 하였다.

3.5 최적 용사 코팅층의 표면 특성 평가

최적 코팅조건으로 용사된 코팅층의 특성을 분석한 결과 다구찌 프로그램 조건으로 용사된 조건에서는 대부분이 불완전한 splat 적층에 의한 조대한 기공들이 존재하거나, 기공의 분포가 상부에 밀집되어 있는 형태를 보였으나 최적 조건으로 용사된 코팅층의 기공은 용융된 droplet들 사이에 포집되어 있던 가스가 방출되면서 미세한 기공이 많이 존재하였고, 기공도는 1.5%로 현저히 낮은 결과를 나타냈고, 표면 거칠기 또한 $3.4 \mu\text{m}$ 로 비교적 낮은 수치를 나타내었다[6]. 경도값 측정 결과는 HV 1,120를 나타내었다.

3.5 최적 용사 코팅층의 마찰마모 특성 평가

그림 6과 같이 WC-CoFe 코팅 마찰계수는 25°C 에서 0.604 그리고 450°C 에서 0.556으로 고온에서 마찰계수가 감소함을 알 수 있다. 이는 용점이 낮은 금속 Co와 Fe가 마모실험에서 취성이 강한 산화물을 형성하고 이들이 마모되어 고체 및 액체 윤활제 역할을 하기 때문이다. 그림 7의 마모흔을 비교해 보면 상온에서의 마모흔 보다 고온에서의 마모흔이 3배이상 크게 나타났다. 이는 고온에서의 표면 경도의 감소로 연삭마모가 그리고 상대재와 코팅층사이의 미끄럼면간의 접착력 증가로 웅착마모가 증가하였기 때문이다. 상온 마모흔 EDS분석 결과 마모흔의 중심부에서 마모 상대재의 성분인 크롬과 마찰 열로 인한 산화가 발생하여 산소 피크가 존재하였고, 고온 마모흔에서는 3번의 EDS 분석 결과에서 크롬, 니켈 및 산소 피크가 존재하였고, 나머지 EDS 분석 결과에서는 산화가 발생하여 산소 피크만 존재하였다. 마모흔을 surface profiler로 분석한 결과인 그림 8에서 보듯이 상온과 고온에서 연삭마모에 의한 마모흔이 제거됨에 따라 발생하는 groove가 발생하지 않은 것으로 보아 코팅은 상온과 고온에서 내마모성이 좋은 것으로 판명 되었다.

Fig. 8. Wear depth profile of WC-CoFe coating layer.

3. 결 론

1. WC-CoFe 코팅의 표면특성은 공정인자에 따라 큰 차이를 보이며, 경도에 대한 최적화염용사코팅공정은 산소 유속 34 FMR, 수소유속 57 FMR, 분말 공급율 35 g/min과 용사거리는 8 inch 였다.
2. WC-CoFe 코팅의 마찰계수는 25°C 에서 0.604 와 450°C 에서 0.556로 나타났고, 온도 상승에 따라 감소하였다.
3. 고온에서 피트 모양의 흠이 발생하지 않아 내마모성향상을 위한 표면처리 방법으로 적합하다.

사 사

This work was supported by Korea Research Foundation Grant(KRF-2006-005-J02701).

참고문헌

1. T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. S. Kim, S. J. Youn, N. K. Baek, and H. G. Chun, J. Kor. Crystal Growth and Crystal Technology **16** (2006) 121.
2. S. B. D. Sartwel and P. E. Bretz, HVOF Thermal Spray coatings Replace Hard Chrome, <http://www.jgpp.com/publications/articles/hvofarti.pdf> (2006).
3. S. Y. Park and C. G. Park, J. Kor. Inst. Met. & Mater. **42** (2004) 582.
4. J. K. N. Murthy, b. Venkattaraman, surf. Coat. Technol., **200** (2006) 2642.

5. P. J. Ross, Tachuchi Techniques for Quality Engineering, p63, McGraw-Hill, New York (1998).
6. T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. S. Kim, S. J. Youn, N. K. Baek, H. G. Chun, and S. Y. Hwang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. **39** (2006) 240.