

## 터보블로워 용 회전체 주축 소재의 마찰, 마모 및 부식 저항 향상을 위한 WC-metal 분말의 초고속화염용사코팅

주 윤 곤<sup>1</sup> · 윤 재 흥<sup>1</sup> · 조 동 울<sup>2</sup> · 천 희 곤<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 금속과, RTI04-01-03, <sup>2</sup>창원국립대학교 산업기술연구원, <sup>3</sup>울산대학교 재료공학부  
(2012년 10월 23일 접수, 2013년 01월 04일 수정, 2013년 01월 05일 채택)

## HVOF spray coating of WC-metal powder for the improvement of friction, wear and corrosion resistance of magnetic bearing shaft material of turbo blower

Y. K. Joo<sup>1</sup>, J. H. Yoon<sup>1</sup>, T. Y. Cho<sup>2</sup>, and H. G. Chun<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Materials Engineering Department, <sup>2</sup>RTI04-01-03, Institute of Industrial Technology, Changwon National University, Changwon, Gyeongnam, 641-824, Korea.

<sup>3</sup>School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680 Korea

(Received October 23, 2012; Revised January 04, 2013; Accepted January 05, 2013)

High velocity oxy-fuel (HVOF) spray coating of WC-metal powder (powder) was carried out to improve the resistances of friction, wear and corrosion of magnetic bearing shaft material Inconel718 (In718) of turbo blower. A micron sized WC-metal powder (86.5% WC, 9.5% Co 4% Cr) was coated onto In718 surface using HVOF thermal spraying. During the spraying, the binder metals and alloy such as Co, Cr and Co-Cr alloy were molten and a small portion of WC particles were partially decomposed to W<sub>2</sub>C and free carbon at above its decomposition temperature of 1250°C. The free carbon and excessively sprayed oxygen formed carbon oxide gases, resulting a porous coating of porosity of 2.2±0.3%. The surface hardness of substrate increased approximately three times from 400 Hv of In718 to 1260±30 Hv of the coating. The friction coefficients of the coating were approximately 0.33 ± 0.03 at 25°C and 0.26 ± 0.03 at 450°C. These values were smaller than those of In718 substrate at both temperatures due to the lubrication from the free carbon and the cobalt oxide debris. The corrosion resistance of the coating was higher than that of In718 both in salt water of 3.5% NaCl and acid of 1 M HCl solutions, on the contrary, it was lower in base solution of 1 M NaOH. According to this study, the HVOF WC-metal powder coating is recommended for the durability improvement of magnetic bearing shaft of turbo blower.

**Keywords :** Coating, friction, wear, corrosion

### 1. 서 론

주성분이 표 1과 같이 Ni-Cr-Fe인 초합금 Inconel718 (In718)은 고온 내열, 내산화, 내식성을 위하여 개발되어 가스터빈, 항공기 엔진, 등에 사용되고 있는 고가의 소재이다. 이 같은 좋은 특성 때문에 정밀 구동이 요구되는 터보블로워 (Turbo blower)용 자성 비아링 (Magnetic bearing)의 주축회전체 소재로 사용되고 있다. 무윤활 상태에서 수만 rpm으로 고속 회전하는 주축은 주위 환경으로부터 혹은 작동 시작과 끝에서 흔히 발생하는 소착 (stick)으로 인하여

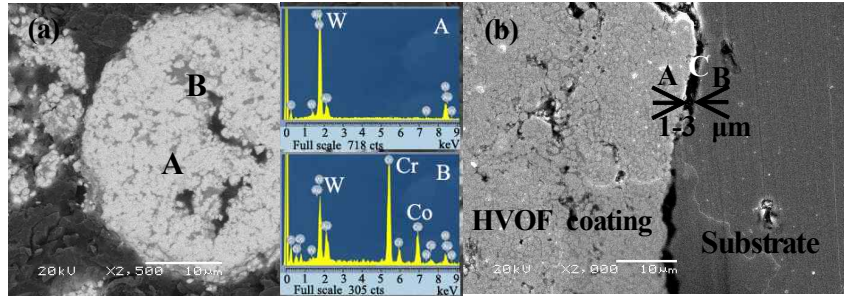
표면이 손상되어 그 내구성이 감소되고 있다. 기계 부품 및 소재의 내구성 향상을 위하여 오랜 기간 다양한 표면처리를 해오고 있다. 특히 초고속화염용사코팅 (High velocity oxygen fuel (HVOF) spray coating)은 기계 부품의 내구성 향상 및 마모 부품의 재생, 등에 이용되고 있다. <sup>1-6)</sup>

본 연구에서는 가혹한 환경에서도 사용될 수 있는 터보블로워 용 자성 비아링 주축 소재 Inconel718 표면에 WC-metal 분말을 초고속화염용사코팅법으로 코팅하여 터보블로워의 내구성을 향상시키는 연구를 하였다.

<sup>†</sup> Corresponding author: hgchun@ulsan.ac.kr

**Table 1. Chemical composition of powder and In718**

Elements	W	C	Co	Cr	Ni	Fe	Nb	Mo	Ti	Si	Mn	Cu	Al
Powder	81.3	5.2	9.5	4.0									
In718		0.08	1.0	17-21	50-55	Bal-18.5	4.8-5.5	2.8-3.3	0.6-1.2	0.35	0.35	0.3	0.2-0.8



**Fig. 1.** Powder (a), A(white)-WC rich, B(black)-binder metals rich, and HVOF coating (b).

## 2. 실험

### 2-1. WC-metal 분말의 초고속화염용사코팅

In718 기관상에 마이크론 크기의 WC-metal 분말을 초고속화염용사기 K3500으로 코팅하였다. 기관과 코팅간의 부착력을 증가 시키기 위하여 기관을 아세톤으로 약 5분간 세척 후 60 mesh의 알루미나(Alumina)분말로 약 1 분간 블라스팅(grid-blast)하였다. 3 수준의 4개 공정인자의 다구치 실험계획법으로 얻은 최적용사코팅공정(수소유속 53 FMR(1 FMR=12 scfh=9.44×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/s), 산소유속 30 FMR, 분말공급속도 25 g/min, 용사거리 7 in(17.7 cm))으로 코팅 하였다.<sup>1-5)</sup> 고압의 아르곤가스(120 psi=0.93MPa)로 분말을 공급하면서 고온용사 중인 물질의 대기 접촉을 차단하였다.

### 2-2. 표면 특성 분석

분말, 기관 및 코팅의 미세구조, 상은 주사현미경(SEM), EDS 및 XRD로 조사하였다. 코팅의 기공도는 광학현미경 사진 분석으로, 표면미세경도(surface hardness)는 경도 시험기(Vickers hardness tester)로 부하(Load) 200 gf, 측정시간 10 s 에서 측정하였다. 마찰과 마모시험은 왕복 미끄럼 시험기(reciprocating slide tester TE 77A AUTO, Plint & Partners)로 조사하였다. 마모 상대재 SUS 304 ball(직경 9.53 cm, 경도 227 Hv)로 무운환 상태의 표면을 왕복 미끄럼 운동으로 마찰과 마모를 시켰다. 마찰 전 마모면을 Ra=1.0-1.4 μm로 실리콘 카바이드 연마재와 DP-paste로 연마하였다. 왕복운동 거리, 주파수, 속도, 부하 및 실험 시간은 각각 16mm, 2.5Hz, 0.08m/s, 10N과 10min 였다. 마찰과 마모의 온도 의존성을 표면온

도 25℃와 450℃ 무운환 상태에서 실험하였다. 마모흔(wear trace)은 SEM으로 조사하였다. In718과 코팅의 부식성은 해수(3.5% NaCl), 산(1M HCl)과 염기(1M NaOH) 부식용액에서 부식실험기(CMS105B)로 부식성 실험을 하였다. 직경 1cm의시편이 전해액과 접촉하였으며, 전압은 10분 간에 걸쳐 -0.5v에서 +1.5v까지 인가 하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3-1. 분말과 코팅의 미세구조, 상 및 표면특성

마이크론 크기의 WC-metal 분말은 고속으로 분사된 수소와 산소의 연소로 생긴 최고 3500℃와 분말의 질량에 따라 최고 속력 1000m/s의 고온 고속의 화염 속에 분사된다.<sup>1-5)</sup>

약 0.1-1.0 초간 화염 속을 이동하는 동안, 접합체 역할을 하는 금속 (binder metals) Co, Cr 및 Co-Cr 합금은 용융되고, 금속카바이드는 금속과 자유 탄소로 분해되며, 특히 일부분의 WC는 그의 분해 온도 1250℃ 이상에서 W<sub>2</sub>C와 자유 탄소(free carbon)로 분해되었다.<sup>5-9)</sup> 액적(splat)과 부분 용융된 입자들은 기관과 충돌하여 금속기지(Matrix, binder)내에 WC 입자를 점합한 그림 1 과 같은 다공성의 코팅을 형성하였다. 그림 1 에서 보듯이 코팅은 화학적, 구조적으로 분균일하며 다공성이다. 이는 코팅 중에 기지 금속들은 용융되나 WC 입자는 표면에서 일부가 W<sub>2</sub>C와 자유 탄소로 분해하며 공정이 매우 비평형이기 때문이다. 코팅 중에 금속 카바이드에서 분해된 자유탄소와 용사 시 과잉 공급된 산소가 반응하여 산화탄소가스를 형성하며, 이 가스가 분출하면서 기공이 많은 다공성 코팅을 만

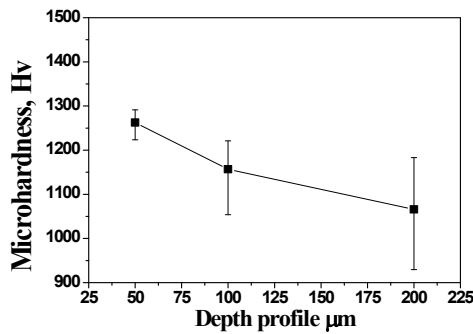


Fig. 2. Depth profile of micro-hardness.

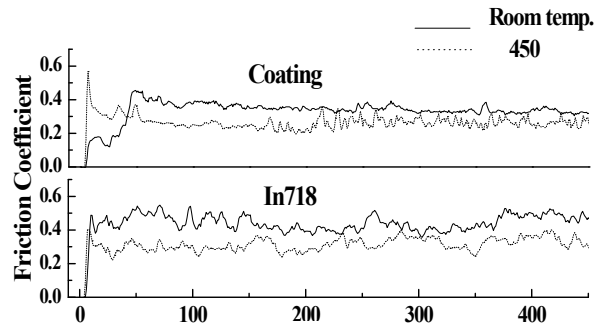


Fig. 3. Friction coefficient of In718 and coating.

는다. 그림 1 과 같은 다공성 표면을 조사한 결과 표면 기공도는  $2.2 \pm 0.3\%$  였다. 그림 2 미세경도의 단면 분포에 의하면, 경도는 깊이  $200 \mu\text{m}$  에서 약  $1060 \pm 100 \text{ Hv}$  이고 표면에서  $1260 \pm 30 \text{ Hv}$  로 표면에서 경도가 가장 컸다. 이는 표면층이 대기에 접하여 신속히 냉각됨으로써 경도가 큰 WC가 경도가 낮은  $\text{W}_2\text{C}$  로의 분해가 적었기 때문이다. 이 표면경도는 In718( $400\text{Hv}$ )과 일반 금속 및 합금( $200\text{--}500\text{Hv}$ ) 보다 각각 2-5 배 컸다.

### 3-2. 마찰 마모의 온도 의존성 및 부식특성

무윤활 상태의 왕복동 마모실험에 의하면 그림 3 과 같이 In718 기관의 마찰계수는  $25^\circ\text{C}$  와  $450^\circ\text{C}$  에서 각각  $0.48 \pm 0.06$  과  $0.32 \pm 0.06$  이었고, 코팅은  $25^\circ\text{C}$  와  $450^\circ\text{C}$  에서 각각  $0.33 \pm 0.03$  과  $0.26 \pm 0.03$  이었다. 두 시편 모두 온도 증가 시 마찰 계수의 감소세를 보였다. 이는 온도 상승 시 표면이 부드러워지고 금속산화물이 증가하고 마모로 탈착된 미세 산화물 입자가 윤활 역할을 하기 때문이다. 본 실험 온도 구간에서 코팅의 마찰 계수가 In718 보다 작았으며

그림 4 와 같이 마모흔(wear trace)도 작았다. 이는 코팅 내에 석출되었던 자유탄소와 특히 Co 산화물이 윤활 역할을 하였기 때문이다.

분극곡선 그림 5 에 의하면 해수 3.5% NaCl 용액에서 코팅은 In718 에 비하여 가역전류밀도(교환전류밀도), 임계양극전류밀도 및 피팅전류밀도가 낮아 부식속도(전류밀도)가 느리고 내식성이 강하였다. 또한 코팅의 부동태전위가 낮아 쉽게(낮은 전위에서) 부동태피막을 형성하고, 피팅전위가 높아 피팅이 쉽게 일어나지 않아 내식성이 더 좋았다. 산성용액 1M HCl 에서는, 그림 6 와 같이 코팅은 In718 에 비하여 임계전류밀도, 피팅전류밀도, 부동태전위가 낮고 피팅전위가 높기 때문에 내식성이 강하다. 코팅의 가역전위는 3.5% NaCl 용액에서와 다르게 In718 의 것 보다 수십 배 컸다. 이는 염소이온( $\text{Cl}^-$ )이 3.5% NaCl 용액에서  $0.06\text{M}$  인데 비하여 1M HCl 에서 약 17 배 크고 기공내에서 염소이온에 의한 틈부식과 공식이 활발하기 때문이다.<sup>9-12)</sup> 그러나 87%가 세라믹이고 13%가 금속인 코팅은 낮은 전위(약  $-0.2\text{v}$ )에서 부동태피막을 형성하기 때문에 내식성이 강하

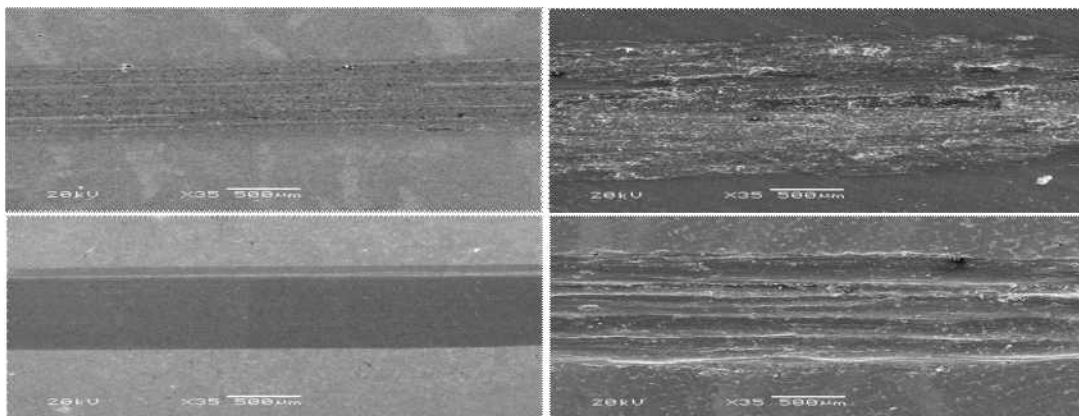


Fig. 4. Wear traces of coating and In718 at both  $25^\circ\text{C}$  and  $450^\circ\text{C}$ .

었다. 부식 초기에는 전 표면에서 균일하게 부식반응( $M \rightarrow M^{n+} + ne$ )이 일어난다. 그 후 코팅기공 내에서는 부식된 금속이온( $M^{n+}$ )이 용액(bulk solution) 속으로 이동하기 어렵기 때문에 기공(틈) 내에 축적된다. 기공 내 용액의 전기적 중성을 위하여 기공 속으로 염소이온이 이동하여 그 농도를 증가시키며, 그 결과 염화금속( $M^{n+} + n Cl^- \rightarrow MCl_n$ )을 형성한다. 이 염화금속은 물과 반응하여 수산화금속과 염산( $MCl_n + n H_2O \rightarrow M(OH)_n + n HCl$ )을 만들면서 틈부식을 촉진한다. 이 수산화금속피막은 부식되는 금속원자의 확산장벽층(부동태피막)을 만들어 부식을 억제하지만 부식

전위가 피팅전위 이상이 되면 이 피막이 파괴되면서 부식속도가 급증한다.

염기성용액 1M NaOH에서는 그림 7과 같이 코팅의 가역전류밀도, 임계전류밀도 및 피팅전류밀도가 크고, 가역전위와 피팅전위가 낮아 내식성이 약하였다. 금속의 부식(양극)반응은 빠르기 때문에 부식속도는 음극반응속도가 지배한다. 1M NaOH 강한 염기성 용액에서는 음극반응으로 수소이온이 매우 적기 때문에 용존산소에 의한 복극반응(depolarization)이 반응속도를 지배한다.<sup>12)</sup> 100% 금속인 In718은 Cr(20%), Ni(50%), Fe(19%)이 강한 금속

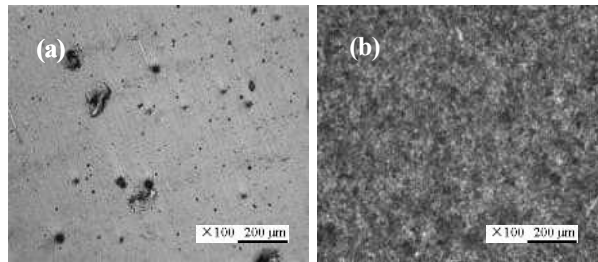
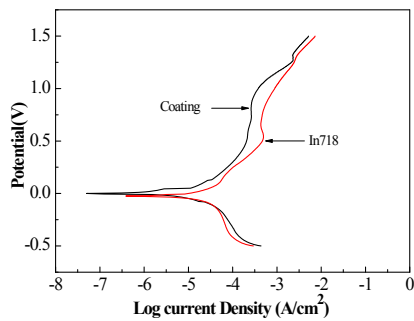


Fig. 5. Polarization curves of In718 and coating, and micro-structures of surface; (a) In718, (b) coating in 3.5% NaCl.

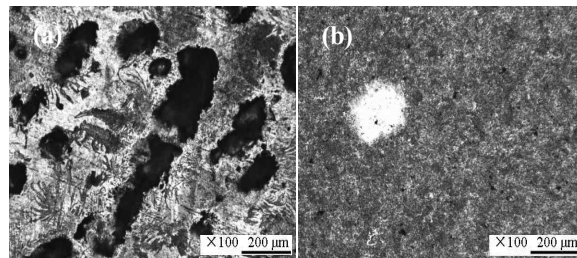
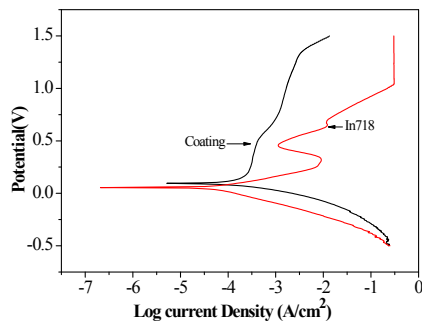


Fig. 6. Polarization curves of In718 and coating, and micro-structures of surface; (a) In718, (b) coating in 1M HCl.

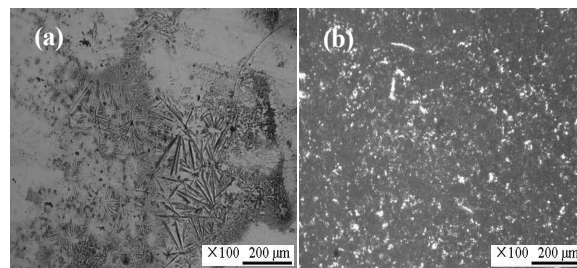
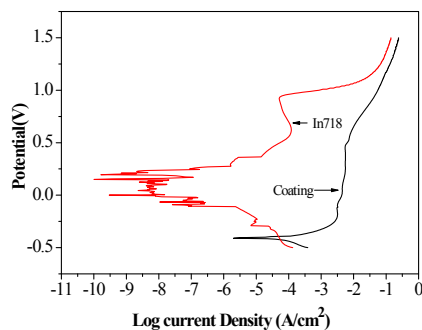


Fig. 7. Polarization curves of In718 and coating, and micro-structures of surface; (a) In718, (b) coating in 1M NaOH.

산화물피막을 형성하여 부식속도를 억제하므로 내식성이 코팅 보다 강하였다. 본 실험에서 약 1.0V의 높은 전위까지 보호피막을 유지하고 그 이상의 전위에서 보호피막이 파괴되면서 피팅이 생겼다. 코팅의 반응 초기에는 전 표면에서 복극반응이 진행되나, 기공 내에서는 용액의 정체로 인하여 용존 산소가 고갈되고 반응성이 강한 Cr(전극정위; -0.74V)과 Co(-0.28)가 각각 4%와 9.5%로 적기 때문에 보호피막 형성이 어렵다. 본 실험에서 부식전류밀도가 증가하여 약 5mA/cm<sup>2</sup>가 될 때까지 보호피막을 형성치 못하였다. 또한 코팅과 In718은 같은 시편의 겉보기면적(apparent area)에서 코팅의 진면적(true area)은 기공으로 인하여 매우 크기 때문에 반응 속도가 크게 증가하였다.

#### 4. 결론

In718 표면에 WC-metal 분말을 초고속화염용사코팅을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. WC의 열분해로 생성된 자유탄소와 초과 공급된 산소가 반응하여 탄산가스를 만들면서 다공성의 코팅이 제조되었다.
2. 코팅으로 표면경도가 400 Hv에서 1260±30 Hv로 약 3배 증가하였다.
3. 25°C와 450°C에서 코팅의 마찰계수는 각각 0.32±0.03과 0.26±0.03이고 In718은 0.48±0.06과 0.32±0.06이다. 코팅의 마찰계수가 작아 코팅의 내마모성이 더 좋았다.
4. 코팅은 In718에 비하여 해수(0.35% NaCl)와 산(1M HCl)에서 내식성이 강했으나 염기성용액(1M NaOH)에서 약했다.
5. 본 연구 결과, 자성 비아링 주축소재의 내구성 향상을 위하여 WC-metal 분말의 초고속화염용사코팅을 권장한다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신 사업(RTI 04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. J. R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, USA (2004).
2. T. Y. Cho, Y. K. Joo, J. H. Yoon, H. G. Chun and S. H. Zhang, Adv. Mat. Res. **561**, 1052 (2012).
3. T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. S. Kim, K. O. Song, Y. K. Joo, W. Fang, S. H. Zhang, S. J. Youn, H. G. Chun, S. Y. Hwang, Surf. Coating Tech., **202**, 5556 (2008).
4. T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. S. Kim, S. J. Youn, N. K. Baek, B. C. Park and H. G. Chun, Transactions, Korea Society, Machine Tool Engineers, **15-6**, 32 (2006).
5. S. Y. Park, C. G. Park, J. Kor. Inst. Met & Mater, **42**, 582 (2004).
6. T. Y. Cho, J. H. Yoon, S. K. Hur, H. G. Chun, Shi-hong Zhang, Mater. Sci. Forum, **686**, 654 (2011).
7. T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. S. Kim, W. Fang, Y. K. Joo, K. O. Song, S. J. Youn, S. Y. Hwang and H. G. Chun, J. Kor. Inst., Surf. Eng., **40-4**, 170 (2007).
8. Shi Hong Zhang, Jae Hong Yoon, Ming Xi Li, Tong Yul Cho, Yun Kon Joo, Jae Young Cho, Mater. Chem. & Phys., **119**, 458 (2010).
9. T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. S. Kim, K. O. Song, Y. K. Joo, W. Fang, S. H. Zhang, S. J. Youn, H. G. Chun, S. Y. Hwang, Adv. Mater. Res. **26 - 28**, 1325 (2007).
10. Jae-Bong Lee, Mater. Chem. & Phys., **99**, 2224 (2006).
11. S. J. Kim, J. C. Park, M. S. Han and S. K. Jang, Corros. Sci. Tech., **9**, 331 (2012).
12. H. Y. Lee, Corrosion of Metals, Yeungyung Moonwhasa, (2004).