

## 초고속 회전체의 내구성향상을 위한 Co-alloy(T800)의 초고속 용사코팅

조동율\*, 윤재홍\*, 김길수\*, 윤석조<sup>+</sup>, 백남기<sup>++</sup>, 박병철<sup>+++</sup>, 천희곤<sup>++++</sup>  
(논문접수일 2006. 5. 8, 심사완료일 2006. 9. 6)

### HVOF Spray Coating of Co-alloy(T800) for the Improvement of durability of High Speed Spindle

Tong Yul Cho\*, Jae Hong Yoon\*, Kil Su Kim\*, Suk Jo Youn<sup>+</sup>, Nam Ki Back<sup>++</sup>,  
Byung Chul Park<sup>+++</sup>, Hui Gon Chun<sup>++++</sup>

#### Abstract

Micron size Co-alloy(T800) powder was coated on Inconel 718 by HVOF thermal spraying for the studies of the improvement of durability of high speed spindle by using Taguchi program for the parameters of spray distance, flow rates of hydrogen and oxygen and powder feed rate. The optimal coating process was determined by the studies of coating properties such as micro-structure, porosity, surface roughness and micro hardness. Friction and wear behaviors of coatings were investigated by sliding wear test at room temperature and 1000<sup>o</sup>F(538<sup>o</sup>C). At both room temperature and 538<sup>o</sup>C the sliding wear debris and friction coefficients of the coating were drastically reduced compared with the surface of non-coated parent material. This shows that Co-alloy powder coating is highly recommendable for the durability improvement surface coating of high speed air-bearing spindle. At high temperature wear traces and friction coefficients of both coating and non-coating were drastically reduced compared with those of room temperature since the brittle oxides were formed easily on the surface, and the brittle oxide phases were attrited by the reciprocating sliding wear according to the complicated mixed wear mechanisms. These oxide particles, partially melts and the melts play role as lubricant and reduce the wear and friction coefficient. This also shows that Co-alloy powder coating is highly recommendable for the durability improvement surface coating on the surface vulnerable to frictional heat such as high speed spindles.

**Key Words** : HVOF(초고속용사), Co-alloy T800(코볼트 합금 T800 분말), High speed spindle(고속 회전체), Surface property(표면 특성), Corrosive wear(부식 마모)

\* 창원대학교 나노신소재공학부 (tycho@changwon.ac.kr)  
주소: 641-773 창원시 사림동 9번지  
+ (주)서머텍코리아  
++ 해군기술연구소  
+++ 태백 HS  
++++ 울산대학교 첨단소재공학부

## 1. 서론

전통적인 경질크롬도금은 도금 과정과 도금 제품으로부터 비소나 카드늄 보다 훨씬 독성이 강한 발암물질인 Cr<sup>6+</sup>을 배출 시키고 세라믹코팅은 취성의 문제가 있다. 그럼으로 최근에는 50 여 년간 항공 산업체 중심으로 사용해진 초고속용사 경질도금이 점차 증가 추세에 있다<sup>(1-5)</sup>. 초고속용사 코팅은 우수한 강도, 높은 경도, 내마모, 내열 및 내식성을 요하는 곳에 널리 사용되고 있다<sup>(5-8)</sup>. PCB wafer의 정밀 절단 및 홀 가공에 사용되는 초고속 Air-Bearing Spindle은 시동과 정지 시 스피들 하우징 표면과의 순간적인 접촉으로 인하여 국부적으로 고온(약 500°C 이상) 마찰, 마모 및 소착이 생겨 고가 핵심 부품인 스피들의 손상을 초래한다. 본 연구에서는 크롬 및 세라믹도금을 대체 할 수 있는 Co-alloy (800)의 최적 초고속 용사코팅공정을 개발하여 고가인 스피들의 수명연장을 위한 코팅층의 최적 용사조건을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 코팅의 제조

용사장비는 JK3000를 사용하였으며, 용사 시 Gun speed는 3mm/sec로 일정하게 하였고, 용사분말의 Carrier gas는 아르곤을 사용하였으며, 작업 환경에서 자연 냉각을 하였다. 코팅 제조를 위한 분말소재는 Table 1처럼 Satellite사의 Co-alloy T800(Co-45.7wt.%, Mo-28wt.%, Cr-17wt.%, Si-3.2wt.%) 상용 분말을 사용하였다. Co-alloy T800 코팅공정은 전처리, 용사 그리고 후처리로 하였다. 시편의 모재는 253°C에서 705°C까지 탁월한 강도를 유지하며, 980°C까지 내산화성이 탁월하고 700°C에서도 높은 크리프강도를 가져 제트엔진, 펌프몸체 및 부품, 열간 압출 다이, 고온탄성스프링 등에 사용되는 Inconel718로 하였다. 전처리과정에서는 시편모재를 야세톤용액에서 5분간 초음파세척을 한 후 60Mesh의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 Blasting 처리를 하여 모재와 용사층간의 접합력을 증대시키고자 하였다. 용사공정에서 용사조건을 용사거리, 산소와 수소가스 유속, 그리고 분말의 공급속도를 변수로 하였고 실험계획법인 응용프로그램 미니탭을 이용하여 최적화시켜 Table 2와 같이 16가지의 공정에 따라 코팅 하였다.

Table 1 Chemical composition of T800(wt.%)

Co	Mo	Cr	C	S	O	Fe	Ni	P	Si
bal.	28.370	17.550	0.019	0.003	0.021	0.680	0.650	0.009	3.100

Table 2 Process parameters of HVOF Co-alloy T800 coatings

	Oxygen (FMR)	Hydrogen (FMR)	Ratio (O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> )	Distance (inch)	Feed Rate (g/min)
1	34	60	0.57	5	20
2	34	65	0.52	5	20
3	34	70	0.42	5	30
4	34	75	0.44	5	30
5	38	60	0.63	5	20
6	38	65	0.58	5	20
7	38	70	0.54	5	30
8	38	75	0.51	5	30
9	42	60	0.70	5	30
10	42	65	0.66	5	30
11	42	70	0.60	5	20
12	42	75	0.56	5	20
13	46	60	0.77	5	30
14	46	65	0.71	5	30
15	46	70	0.66	5	20
16	46	75	0.61	5	20

\* 1FMR = 12 scfh

### 2.2 코팅층의 분석

코팅층 분석은 광학현미경, 주사전자현미경 및 EDX 등을 이용하여 미세조직과 조성을 분석하였으며, 표면거칠기와 경도측정을 한 뒤 상온 및 고온 1000°F(538°C) 험을 하였다. 표면거칠기는 Surface Roughness Tester을 사용하여 7회 측정값을 평균하여 표면조도를 얻었다. 또한 Micro Vickers Hardness tester로 코팅층 단면의 중심부에서 9회 측정된 평균값으로 경도값을 산출하였으며, 광학현미경을 사용하여 얻은 코팅층의 조직사진을 Image Analyzer를 통해 분석하여 5회의 평균값으로 코팅층의 기공도를 나타내었다.

### 2.3 마찰과 마모시험

코팅층의 마찰과 마모특성은 왕복구동 방식의 마모시험

기(TE77 AUTO, Plint & Partners)로 시험하였고, 시편의 크기는 50× 25× 3mm로 하였다. 초고속 스프인들 표면에서 일어나는 마찰조건과 유사하게 하기위하여 상대재로는 직경 9.525mm인 스테인레스볼(SUS 304, Hv 227)을 사용하였고, 마찰과 마모시험 조건은 상온 및 538℃ 고온 무윤활 상태에서 왕복거리 2.3mm, 35Hz 조건(스테인레스볼의 속도는 0.161m/sec)하에 10N의 힘으로 4분간 마찰과 마모가 일어 나도록하면서 마모량 및 마찰계수를 측정하였다. 시험 중에 발생하는 마모입자는 제거하지 않았으며 시편은 시험전 후에 0.0001g의 정밀도를 갖는 전자저울을 사용하여 무게를 측정하여 마모에 의한 무게 감소량을 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분말 및 코팅의 미세조직

Co-alloy T800 상용분말의 미세조직은 그림 1과 같이 입자는 직경 5~30 $\mu$ m 크기의 구형이며 균일하게 섞여 있다.

상용분말을 이용하여 제조한 코팅면의 미세조직은 그림 2의 (a)와 같이 미세입자들이 비행 중 용사가스의 화염 속에서 고온 용융(국부적으로 3500℃)된 후 기판에서 급냉응고

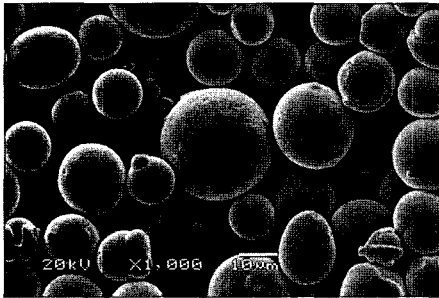


Fig. 1 Particle shapes of Co-alloy T800 powders

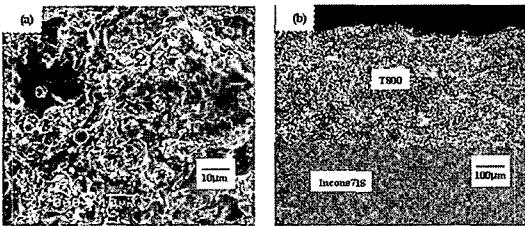


Fig. 2 SEM micrographs showing microstructure of coating of Co-alloy T800 ; (a) surfaces and (b) cross section

조직을 보여 주고 있다. 코팅층의 두께는 약 350 $\mu$ m로서 단면의 미세조직은 그림 2의 (b)와 같이 용융액적이 응고되면서 적층된 코팅층과 모재와의 접촉면이 선명하게 나타나고 있다.

코팅면은 EDS 분석결과 T800분말의 조성구와 유사하였으며 그림 3 코팅층의 XRD에서 Co상은 결정성을 유지하고 있으나 기타 성분은 비정질 상태로 응고 되어 있다. 즉, 용융된 미세 분말의 용융액적이 비행하여 모재에 적층되는 과정에서 안정된 Co-alloy 코팅층이 형성되는 것을 알 수 있다.

최적의 용사공정은 산소와 수소의 유량 그리고 분말 공급율에 따른 표면조도, 경도 그리고 기공도로 결정하였다.

코팅면의 표면조도는 산소와 수소의 유량이 각각 38~42 FMR와 60FMR 일 때 그리고 분말 공급율이 20g/min일 때 그림 4와 같이 가장 낮게 나타났다. 코팅층 경도는 그림 5와 같이 산소와 수소 유량이 각각 38~42FMR와 65~75 FMR 이고 분말 공급율이 30g/min 일때 가장 높은 값을 보였다. 기공도는 그림 6에서와 같이 산소와 수소의 유량이 각각

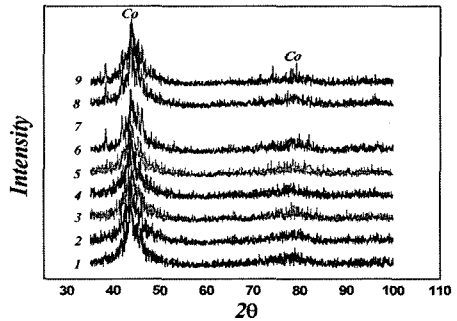


Fig. 3 XRD results showing the phase composition of Co-alloy coating

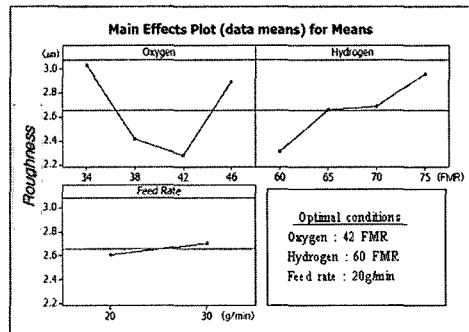


Fig. 4 Variation of roughness with spraying parameters

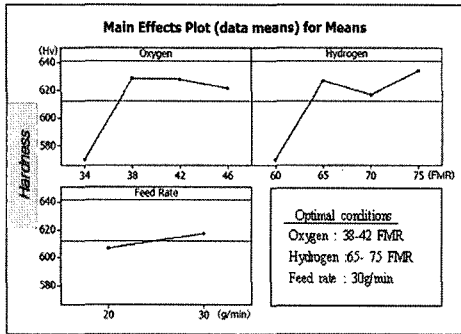


Fig. 5 Variation of hardness with spraying parameters

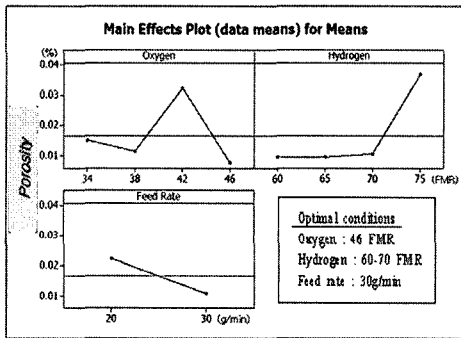


Fig. 6 Variation of porosity with spraying parameters

48FMR와 60~70FMR 그리고 분말 공급율이 30g/min 일 때 가장 낮은 값을 나타냈다.

이 자료를 분석한 결과 최적의 용사공정은 산소와 수소 유량 그리고 분말 공급율이 각각 38~42FMR, 65~70FMR 과 30g/min 일 때이다.

### 3.2 마찰 · 마모 특성

시편 경도 상, 중, 하의 것을 택하여 마모흔과 경도와의 상관관계를 조사하였다. 그림 7에서 상온과 고온 모두에서 코팅표면의 마모흔과 경도와의 뚜렷한 상관관계를 관찰하지 못하였다. 고온 마모흔은 상온에 비하여 반 이상으로 현저히 작게 나타났다. 고온마모에서 CoO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, MoO<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub>, 등 취성이 큰 산화물이 쉽게 많이 형성된 때문이다<sup>(9)</sup>. 이들은 왕복 슬라이딩 하는 상대재와의 마찰에 의하여 국부적 과열과 용융액적의 생성 등으로 조성된 가혹한 마모환경에서 가열된 대기 속에 있는 산소와 수증기에 의한 산화마모, 상대재와의 연마마모 및 코팅과 상대재의 미세 마모입자와 이들의 용융액으로 구성된 혼탁액에 의한 슬러리 침식

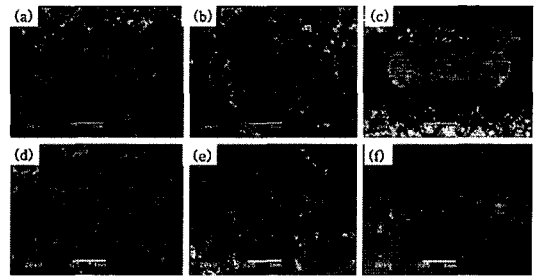


Fig. 7 Hardness of coating(Hv) and wear traces; (a) 738, (b) 610, (c) 480 at room temperature, (d) 738, (e) 610, (f) 480 at high temperature of 538°C

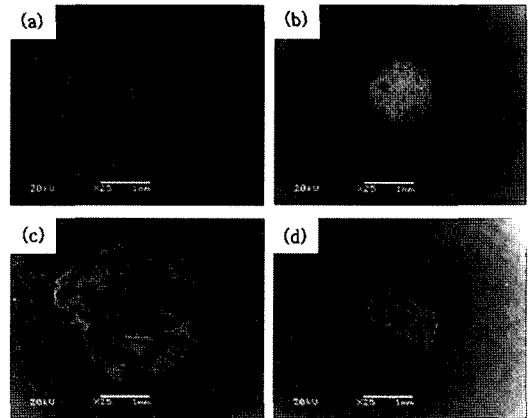


Fig. 8 Wear traces of counter sliding SUS304 ball sliding with : (a) non-coated at room temperature, (b) non-coated at 538°C, (c) coated at room temperature and (d) coated at 538°C

(Slurry erosion) 등 다양한 메카니즘의 마모를 일으킨다. 이 마모로 생성된 미세 산화물 분말과 마찰로 인한 국부 과열로 용융 혹은 부분적으로 용융된 용융액이 윤활제 역할을 하기 때문에 고온 마모흔이 상온의 것에 비하여 작은 것이다. 이는 본 마모실험과 유사하게 고속회전체가 작동 중 순간적인 접촉(슬라이딩)을 할 때 이 Co-alloy T800 코팅층이 윤활제 역할을 하여 회전체의 내구성을 향상 시킬 수 있음을 보여주고 있다<sup>(11,12)</sup>.

그림 8에서 코팅과 비코팅층 마모실험의 경우 상대재의 마모흔은 모두 고온에서 작게 나타나는데 이는 앞에서와 같이 고온산화물의 윤활제 역할 때문이다. 코팅층 마모에 사용된 상대재 마모흔은 상온과 고온 모두에서 모재에 사용되었

던 것 보다 작게 나타나는데 이는 Co-alloy 코팅층의 윤활성이 모재의 것 보다 좋기 때문이며, Co-alloy 코팅이 회전체의 내구성 향상을 시킬 수 있음을 보여주고 있다. 또한 용융 혼은 상온과 고온 모두에서 코팅층 마모에 사용되었던 상대재에서 보다 크게 나타나는데 이는 코팅면에 보다 많은 용융액이 형성되어 윤활성을 향상시켜 회전체의 내구성을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

그림 9는 모재와 코팅층 경도 변화에 따른 마모량과 마찰계수 및 코팅층 온도와 마찰계수 관계를 나타내었다. 코팅층은 비코팅 모재에 비하여 마모량과 마찰계수가 현저히 작게 나타났다. 이는 코팅층의 윤활성이 뛰어나 내 마모특성을 향상시켜 재료의 내구성을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다. 또한 상온에 비하여 고온(538℃)에서 마찰계수가 현저히 감소하였다. 이는 고온에서 코팅층 표면에 생성된 산화물이 마모되어 윤활제 역할을 하기 때문에 사료되며 마찰열로 인하여 손상되는 재료의 표면코팅에 Co-alloy T800이 적합함을 보여 주고 있다. Co-alloy 코팅층은 모재에 비하여 마모량과 마찰계수가 크게 감소하였는데 이는 재료의 내구성 향상을 위하여 코팅이 필수적임을 입증하고 있다. 코팅층의 경도 변화에 따른 마모량과 마찰계수의 뚜렷한 변화는 본 실험의 범위에서는 관찰되지 않았다.

그림 10은 표면산화도에 따른 마모량과 마찰계수 및 코팅

층 온도변화에 따른 마찰계수를 나타내고 있다. 코팅층 산화도 증가에 따라 미소한 마모량 증가와 마찰계수 감소의 경향을 보인다. 이는 마모 실험 전에 코팅층에 존재하던 산화물(Native oxides)의 양이 마모실험 중에 생성되는 양에 비하여 적기 때문에 표면산화도는 마모량과 마찰계수에 큰 영향을 주지 못하고 있기 때문으로 사료된다. 또한 이 코팅층은 고온에서 마찰계수가 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 고온에서 활발한 산화로 윤활제 역할을 하는 산화물이 저온 때보다 많이 생성되고 용융량이 증가하기 때문이다. 코팅층은 비코팅 Inconel 718에 비하여 마모량과 마찰계수가 현저히 작은 것은 내마모성 향상을 위하여 Co-alloy T800의 코팅이 유용함을 보여준다. 마찰계수와 경도, 마찰계수와 코팅층의 산화량을 비교하여 분석한 결과 산화량은 마찰계수에 직접적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다<sup>(3,12)</sup>.

#### 4. 결론

고속회전체의 내구성 향상을 위하여 Co-alloy T800의 최적 초고속용사코팅 공정을 개발하고, 이 공정으로 제조한 코팅의 재료적 특성과 왕복 슬라이딩 마찰과 마모 거동을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험계획법인 응용 프로그램 미니탭을 사용하여 구한 최적의 용사조건으로 코팅을 제조한 후 표면조도, 경도 및 기공도를 분석한 결과 최적의 공정은 O<sub>2</sub> gas 38~42FMR, H<sub>2</sub> gas 65~70FMR, 분말 공급율은 30g/min 이다.
- (2) Co-alloy T800 코팅은 비코팅 Inconel 718에 비하여 상온과 고온 모두에서 마모흔, 마모량과 마찰계수가 현저히 작고 코팅층은 고온에서 마모흔과 마찰계수가 감소한다. 고로 Co-alloy T800 코팅은 고온 윤활성이 뛰어나 초고속회전체와 같은 마찰과 마찰열에 취약한 부분에 코팅함으로써 회전체의 내구성을 향상시킬 수 있다.
- (3) Co-alloy T800 코팅층은 타 물체와 접촉하여 슬라이딩할 때 발생하는 국부적 과열로 생성된 취성이 강한 산화물이 윤활제 역할을 하여 내마모성을 향상 시킨다. 고로 Co-alloy T800 코팅은 윤활제를 사용하지 않는 Air Bearing spindle과 같은 초고속회전체의 내구성 향상을 위한 코팅으로 적합하다.

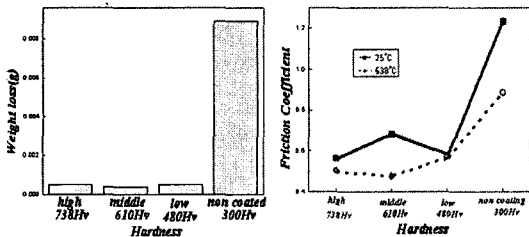


Fig. 9 Effect of hardness on weight loss and friction coefficients

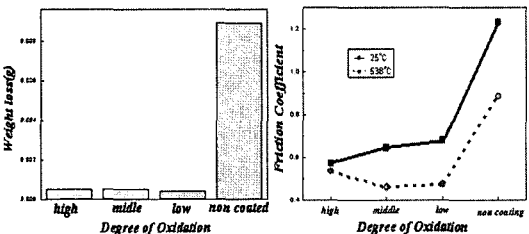


Fig. 10 Effect of degree of oxidation on weight loss and friction coefficients

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Sartwell, B. D. and Bretz, P. E., 2006, "HVOF Thermal Spray coatings. Replace Hard Chrome," <http://www.jgpp.com/publications/articles/hvofarti.pdf>, pp. 1~10.
- (2) Kim, B. M., Hwang, H. S., Cho, H. S. and Lee, C. H., 2003, "Coating Properties of Nanostructured WC-Co for Process Variables of HVOF," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 41, pp. 695.
- (3) Song, E. P., Ahn, J. H., Lee, S. H. and Kim, N. J., 2005, "Microstructure and Wear Resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt% TiO<sub>2</sub> Coatings Plasma-Sprayed using Nanocrystalline Powders," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 43, pp. 438.
- (4) Park, S. Y. C. and Park, G. 2004, "Wear Properties of WC-Co Nano-particle Coatings Fabricated by Detonation Gun spraying," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 42, pp. 582.
- (5) Davis, R., 2004, *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM Thermal Spray Society, USA, pp. 3~4.
- (6) Kim, H. M., 2000, "the Effect of Post-Spray Heat Treatment on the Wear-Resistance of the TiC-Fe Coating Fabricated by HVOF Process," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 38, pp. 125.
- (7) Sartwell, B. D., Legg, K. O., Schell, J., Sauer, J., Natishan, P., Dull, D., Falkowski, J., Bretz, P., Devereaux, J., Edwards, C. and Parker, D., 2004, "Validation of HVOF WC/Co Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Aircraft Landing Gear," *Naval Research Laboratory Report Number NRL/MR/6170-0-8762*, pp. 104~133.
- (8) Sartwell, B. D., Legg, K. and Bodger, B., 1999, "HVOF Thermal Spray Coatings as an Alternative to Hard Chrome Plating on Military & Commercial Aircraft," *AESF/EPA conference for environmental excellence*, Vol. 231, pp. 1~3.
- (9) Cotton, F. A. and Wilkinson, G., 1988, *Advanced Inorganic Chemistry*, 5th edition, Wiley Interscience, USA, pp. 724~730.
- (10) Knight, R. and Smith, R. W., 1998, "Thermal Spray Forming of Materials, Powder Metal Technologies and Applications," Vol. 7(ASM Handbook, ASM International), pp. 408~419.
- (11) Back, N. K., Kim, K. S., Yoon, J. H., Youn, S. J. and Cho, T. Y., 2006, "Wear behavior of Co-alloy T800 coating prepared by HVOF thermal spraying," *8th Int'l Conf., Advanced Surface Engineering(Tokyo, Japan)*, PB 29.
- (12) Cho, T. Y., Yoon, J. H., Kim, K. S., Youn, S. J., Baek, N. K., Park, B. C. and Chun, H. G., 2006, "HVOF spray coating of Co-alloy for the improvement of durability of high speed spindle," *Proceedings of KSMTE Spring Conference*, pp. 291~296.