

초고속 스피ndl의 내구성 향상을 위한 WC-Co 분말의 HVOF 용사 코팅

김길수^{a*}, 백남기^a, 윤재홍^a, 조동율^a, 윤석조^b, 오상균^c, 황순영^d, 천희곤^e

^a창원대학교 나노신소재 공학부, ^b(주)써머텍코리아, ^c대구기계부품연구원,
^d포항산업과학연구원, ^e울산대학교

HVOF Thermal Spray Coating of WC-Co for Durability Improvement of High Speed Spindle

K. S. Kim^{a*}, N. K. Baek^a, J. H. Yoon^a, T. Y. Cho^a, S. J. Youn^b,
 S. K. Oh^c, S. Y. Hwang^d, H. G. Chun^e

^aSchool of Nano Advanced Materials Engineering, Changwon National University,
 Changwon 641-773, Korea

^bSermatech Korea Co., LTD, Changwon 641-120, Korea

^cDaegu Machinery Institute of Components & Materials, Daegu 704-240, Korea

^dMater. & Processes Research Center, Research Institute of Industrial Science & Technology,
 Pohang 790-330, Korea

^eSchool of Materials Science & Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-741, Korea

(Received June 15 2006 ; accepted August 27 2006)

Abstract

High velocity oxygen fuel(HVOF) thermal spray coating of WC-Co powder is one of the most promising candidate for the replacement of the traditional hard chrome plating and ceramics coating because of the environmental problem of the very toxic Cr⁶⁺ known as carcinogen and the brittleness of ceramics coating. WC-Co micron and nano powder were coated by HVOF thermal spraying method for the study of durability improvement of the high speed spindle. Coatings were planned by Taguchi program for the four spray parameters of spray distance, flow rates of hydrogen, oxygen and powder feed rate. Optimal coating process was obtained by the studies of coating properties such as porosity, surface roughness, micro hardness, and micro-structure. WC-Co micron and nano powder were coated on the Inconel 718 substrate by the optimal coating process obtained in this study. The wear behaviors were studied by the sliding wear tester at room temperature and at an elevated temperature of 500°C for the application to high speed spindle. Sliding wear test was carried out for four most promising hard coatings of chrome coating, ceramics coatings such as Al₂O₃, Cr₂O₃ and HVOF Co-alloy T800 for the comparison of their wear behaviors. HVOF WC-Co coating was better than other coatings showing highest micro hardness of 1400 Hv and comparable friction coefficients with others. HVOF WC-Co coating is a strong candidate for the replacement of the traditional hard chrome plating for the high speed spindle.

Keywords: WC-Co, Wear resistance, Thermal spraying, HVOF, High speed spindle

1. 서 론

초고속용사법(HVOF)은 우수한 강도와 높은 경도를 가지는 치밀한 후막형성이 가능하고 피로특성 및 열충격에 대한 저항성이 양호하여 종래에 사용

되어 오던 전기도금 등을 통한 표면처리 방법을 대체시키고 있다. 기능성 경질크롬도금은 2.5~500 μm의 두께로 금속의 표면에 증착시켜 내마모, 내열 및 내식성 기능을 요하는 곳에 널리 사용되고 있다. 경질크롬도금은 일반적으로 Vickers 경도(300 g 하중) 8.5~10.5 GPa을 나타내나 200°C의 온도에서부터 경도가 서서히 감소되며 400°C 이상에서는 사용하기

*Corresponding author. E-mail : tycho@changwon.ac.kr

어려운 제한점이 있다¹⁾.

특히 PCB(Printed circuit board) 절단 및 홀 가공에 사용되는 초고속 스피들의 경우 시동(start)과 정지(shutdown) 시 스피들 회전축과 하우징 표면과의 순간적인 접촉이 발생할 때 마찰로 인해 500°C 이상의 고온 마찰마모가 발생하므로 기능성 경질크롬도금층이 손상된다. 이러한 표면 손상과 함께 축부가 과열되어 고가부품의 내구성이 저하되는 문제점을 안고 있다.

이러한 문제점을 해소하기 위해서는 스피들 회전축의 표면개질이 요구된다. 전통적으로 경질크롬도금과 알루미늄 옥사이드(Al_2O_3) 같은 세라믹 계열의 코팅을 사용해 오고 있는데 경질크롬도금은 도금과정과 제품에서 비소나 카드뮴보다 독성이 강한 발암물질인 Cr^{6+} 을 배출시키고 세라믹계열 코팅은 취성이 문제가 되고 있다.

경질크롬도금을 대체할 수 있는 표면개질방법으로는 WC, WC-Co 및 Co-alloy 등의 coating이 알려져 있는데²⁻⁵⁾, 본 연구에서는 WC-Co 마이크론 분말과 나노 분말을 HVOF 용사코팅 방법을 이용하여 초고속 스피들의 표면을 개질함으로써 내열 및 내마모성을 향상시키고자 하였다. 마이크론 크기의 WC-Co 분말은 이미 상용화되어 널리 쓰이고 있다⁶⁻⁸⁾. 본 연구에서는 현재 매우 활발하게 연구되고 있는 나노 WC-Co 분말을 사용해서 최적의 코팅 공정을 연구하였다. 또한 제조된 코팅의 특성을 기존의 코팅과 비교 평가하였으며, 고속 회전체의 내구성 향상을 위한 실험의 목적을 가지고 실제 환경과 유사한 형태의 왕복구동 슬라이딩 마모 실험을 통해서 실적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 제작

시편모재는 binder층의 코팅 없이도 높은 접착력을 가질 수 있도록 Inconel 718 소재를 사용하였다. 코팅 제조를 위한 분말은 후지미사의 마이크론 WC-12Co 분말과 WWA사의 나노 WC-12Co 분말을 사용하였다. WC-Co 코팅을 제조하기 위한 공정은 전처리, 용사 그리고 후처리로 하였다. 전처리 과정에서는 시편 모재(Inconel 718)를 아세톤 용액에서 5분간 초음파세척을 한 후 60 Mesh의 Al_2O_3 로 블라스팅(blasting) 처리를 하여 모재와 용사층간의 접착력을 증대시키고자 하였다. 용사공정에서는 용사조건을 산소와 수소가스 유속, 용사거리 그리고 분말의 공급속도에 변수를 두고 다구찌 실험계획법으로 표 1과 같이 9가지의 조건에 대하

Table 1. Spray condition of WC-Co conventional powder and WC-Co nano powder

Test No.	Spray condition			
	O ₂ flow (FMR)	H ₂ flow (FMR)	S (inch)	Feed (g/min)
1	30	53	6	25
2	30	57	7	30
3	30	61	8	35
4	34	53	7	35
5	34	57	8	25
6	34	61	6	30
7	38	53	8	30
8	38	57	6	35
9	38	61	7	25

여 용사코팅을 하였다. 마이크론 분말과 나노 분말의 용사 조건은 각각 1~9의 조건으로 동일하게 하였다. 용사장비는 JK3000을 사용하였으며 용사시 gun speed는 3 mm/sec로 일정하게 하였고, 용사분말의 이송가스(carrier gas)는 아르곤을 사용하였다. 시편의 냉각은 공냉으로 외부의 냉각 장치 없이 코팅을 실시하였다. 코팅후처리단계로서 가열 확산열처리를 하였다.

2.2 코팅층 분석

코팅층은 광학현미경, 주사전자현미경, EDS(energy dispersive X-ray spectroscopy) 및 XRD(X-ray diffraction)를 이용하여 미세조직과 조성을 분석하였으며, 경도측정을 한 뒤 상온 및 고온에서 마찰/마모시험을 실시하였다. Micro vickers 경도측정기(hardness tester)로 코팅층 단면의 중심부에서 9회 측정된 평균값으로 경도값을 산출하였으며, 광학현미경을 사용하여 얻은 코팅층의 조직사진을 영상분석기(image analyzer)를 통해 분석하여 5회의 평균값으로 코팅층의 기공도를 나타내었다.

2.3 마모 특성평가

코팅층의 마찰/마모특성은 왕복구동 방식의 마모시험기(TE77 AUTO, Plint & Partners)로 시험하였다. 초고속 스피들 표면에서 일어나는 실제의 마찰 조건과 유사하게 하기 위하여 상대재로는 직경 9.525 mm인 스테인레스볼(304SS, Hv 227)을 사용하였고, 마찰/마모시험조건은 상온 및 500°C의 고온에서 무운환 상태로 거리 2.3 mm, 35 Hz 조건하에서 10 N의 힘을 가해 4분간 마찰/마모가 일어나도록 하였으며, 이때의 마찰계수를 측정하였다. 또한 시험 중에 발생하는 마모입자는 제거하지 않았다.

3. 실험결과

3.1 분말 특성

3.1.1 WC-Co 마이크론(Conventional) 분말 특성
 Spray drying법으로 제조된 분말로서 평균 입도는 20~40 μm 이다. WC 입자와 Co 혼합에 의해 하나의 분말을 형성하고 있으며(그림 1), XRD 분석 결과

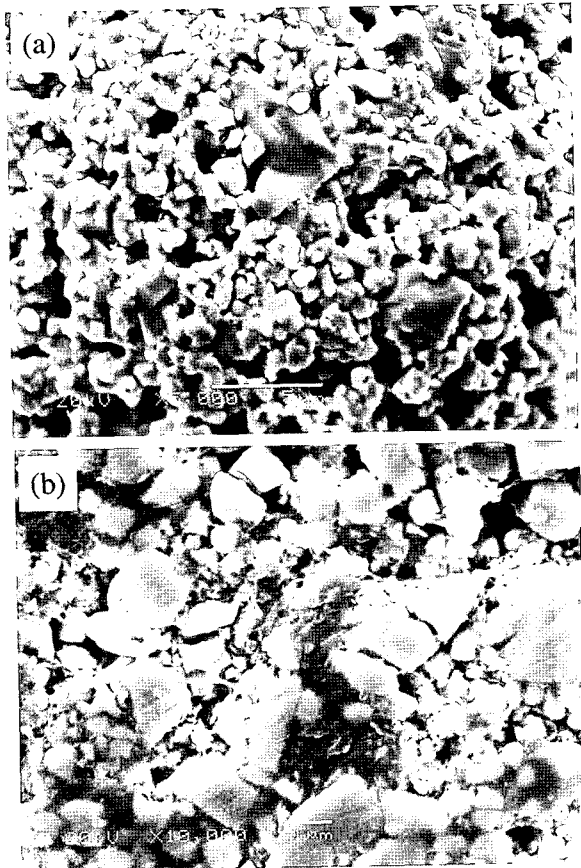


Fig. 1. SEM micrographs of the conventional powder. (a) SEM image of the powder grains, (b) SEM high resolution image of the powder.

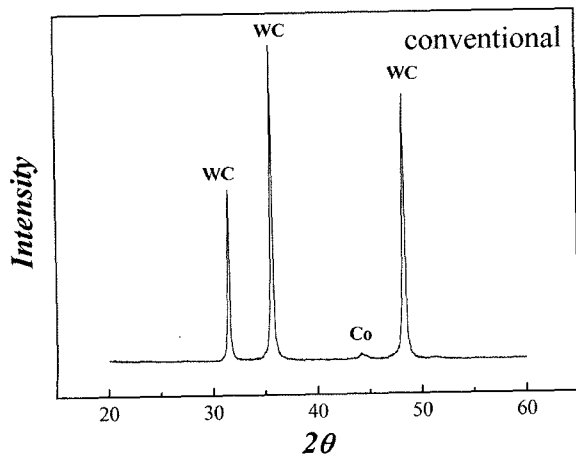


Fig. 2. XRD analysis of conventional feedstock powder.

WC, Co 상만이 존재하고 있다(그림 2).

3.1.2 WC-Co 나노 분말 특성

상용 마이크론 분말과 같은 방법으로 제조된 분말로 WC 입자의 크기가 나노 크기이다. 분말의 형상이 완전 구형이 아니며, 분말이 깨져서 미세한 분말들이 많이 존재하고 있으며(그림 3), XRD 분석 결과

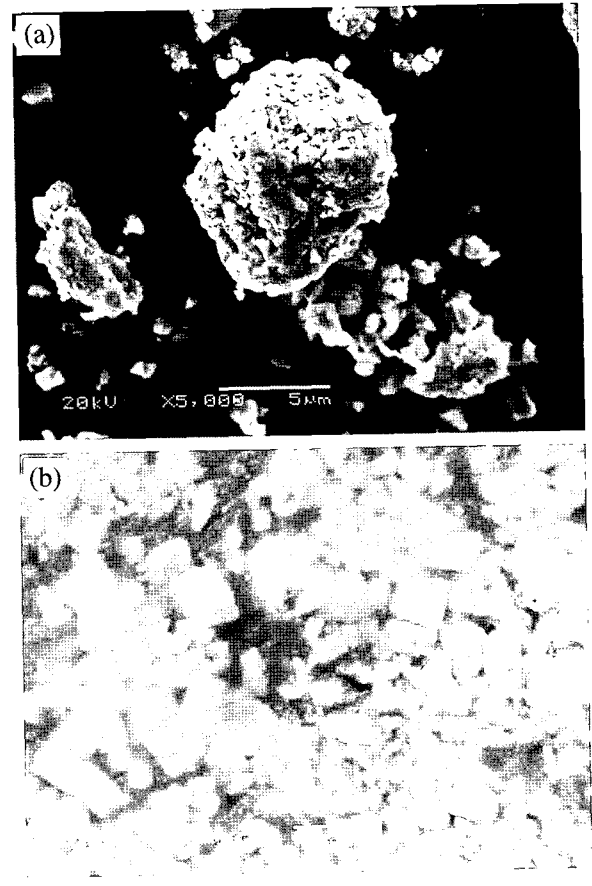


Fig. 3. SEM micrographs showing of the nanocomposite powder. (a) SEM image of the powder grains, (b) SEM high resolution image of the powder.

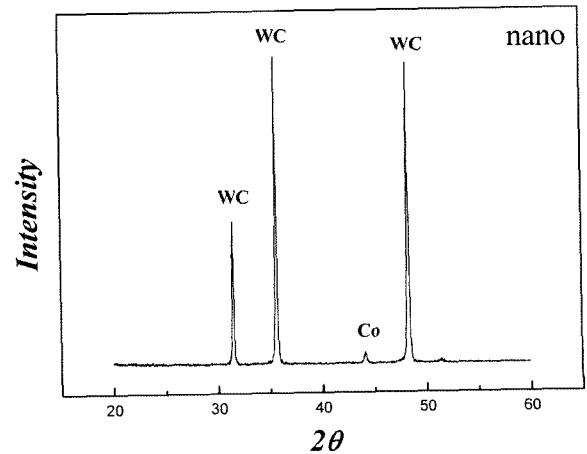


Fig. 4. XRD analysis of nano feedstock powder.

과 상용분말과 같이 WC, Co 상만이 존재하고 있다 (그림 4).

3.2 코팅층 미세조직

코팅의 두께는 300 μm 정도이며 모재와 코팅층 계면이 매우 치밀하게 나타나는 것으로 보아 접착력이 양호한 것으로 판단된다(그림 5). 그림 6에서 나노 및 마이크론 크기의 미세한 WC 입자가 Co 기지에 분산되어 있는 조직을 볼 수 있다. Co 기지 내에 초경 WC 입자의 분산으로 분산강화의 메커니즘에 의해 강도, 경도 및 마모특성이 향상된다.

짧은 코팅과정에서 열에 의한 WC 입자의 성장 혹은 분해는 매우 작아 분말의 크기와 같은 크기를 유지하고 있고, 따라서 마이크론 분말과 나노 분말의 WC 입자의 크기가 명확히 구분되었다(그림 6).

그림 1(b), 3(b), 6(a)와 6(b)에서 보는바와 같이 코팅층의 WC 입자 크기는 코팅전 분말 상태일 때와 비슷한 크기를 유지하고 있으며, 마이크론 크기의 WC 입자와 비교했을 때 나노 분말의 경우 미세한 WC 입자임을 확인할 수 있다.

코팅과정의 열 영향을 알아보기 위한 코팅층 XRD 분석결과 분말 상태에서 나타나지 않았던 W₂C와 W가 코팅 시 화염온도에 의해 약간의 WC의 상분

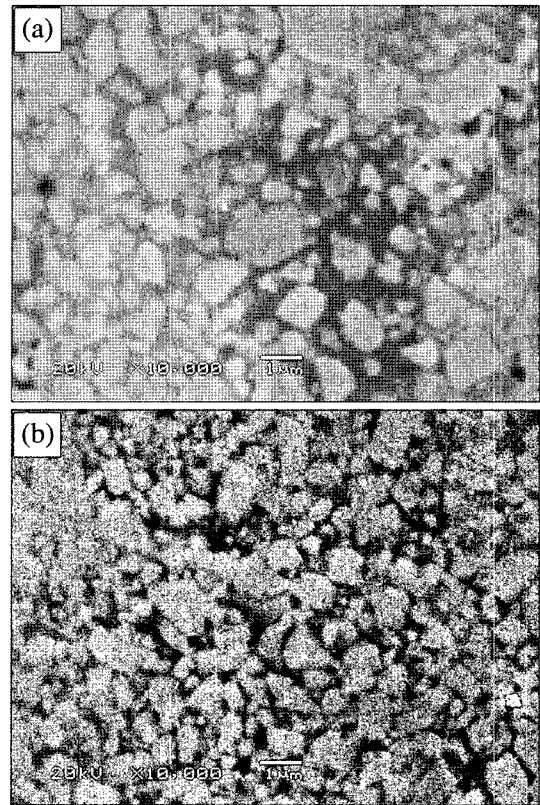


Fig. 6. SEM images of cross-sections of (a) conventional, (b) nanocomposite coatings.

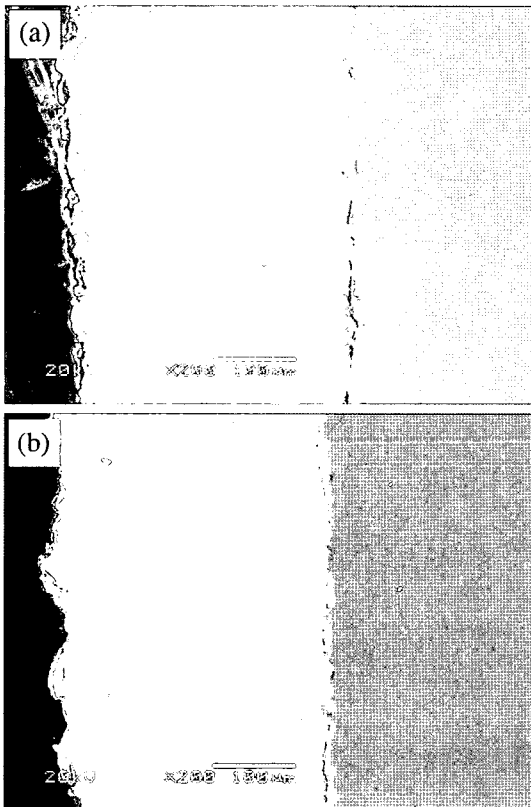


Fig. 5. SEM images of cross-sections of (a) conventional, (b) nanocomposite coatings.

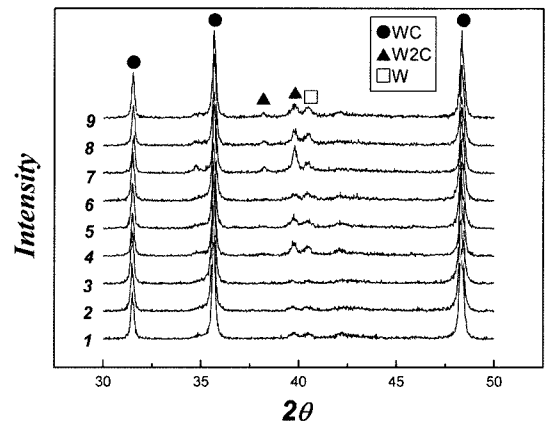


Fig. 7. XRD analysis of conventional powder coatings.

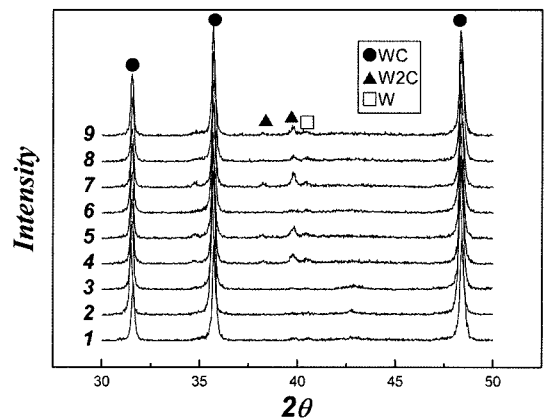


Fig. 8. XRD results of nano powder coatings.

해로 나타났다. 분말 상태에서 결정상으로 나타났던 Co상은 용사과정에서 고온으로 가열된 후 10^6 K/s 이상의 속도로 급냉¹⁰⁾되어 Co 상은 비정질 상으로 존재하고 있다. 일반적으로 WC의 상분해 과정은 탈탄에 의해 W_2C , W_3C 와 W로 상분해가 진행되는데 본 연구에서는 W_2C 이외의 분해된 상은

발견되지 않았다(그림 7, 8).

3.3 코팅층 특성

3.3.1 코팅층 경도

각 조건에서의 코팅층의 경도 차이는 크지 않았으며, 마이크론 분말과 나노 분말의 경우도 경도값

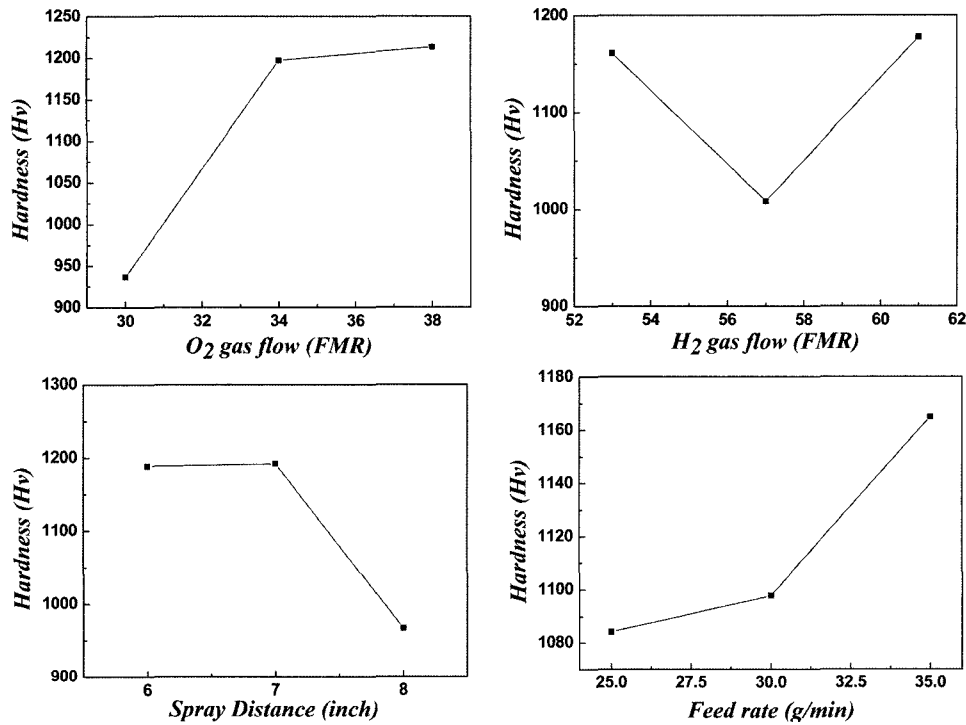


Fig. 9. Variation of hardness of conventional powder coating with spraying parameters.

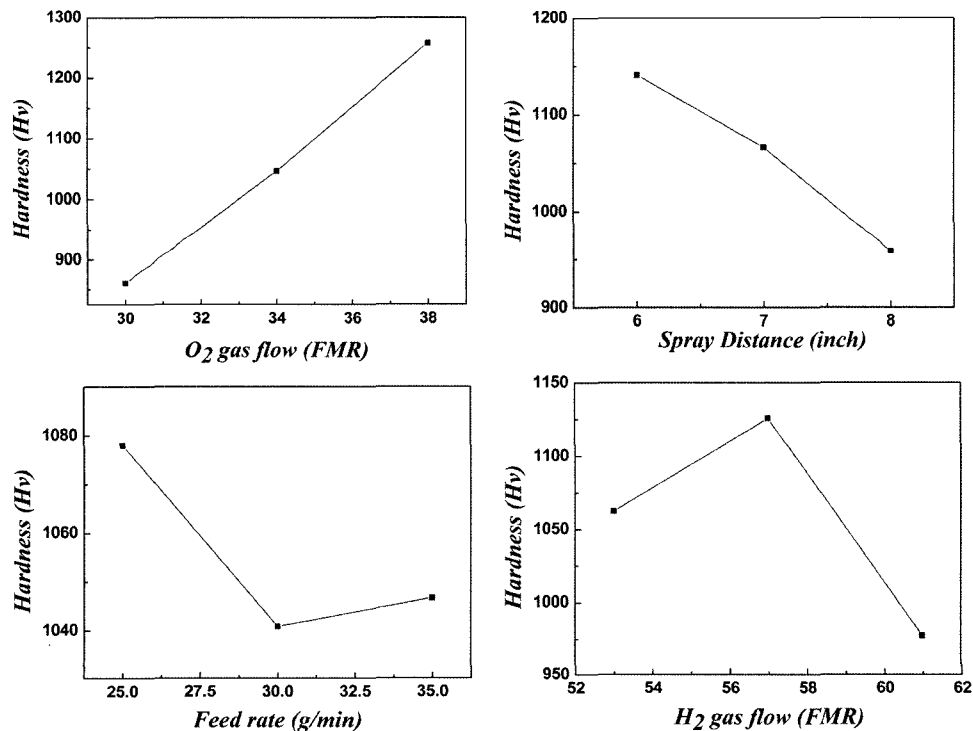


Fig. 10. Variation of hardness of nano powder coating with spraying parameters.

의 큰 차이는 나타나지 않았다. 마이크론 분말의 경우 산소 38 FMR, 수소 61 FMR, 용사 거리 6~7 in, 분말공급을 35 g/min일 때 가장 높은 경도값을 나타냈다. 나노 분말의 경우 산소 38 FMR, 수소

57 FMR, 용사거리 6 in, 분말공급을 25 g/min에서 가장 높은 경도 값을 보였다(그림 9, 10). 일반적으로 용사거리 증가는 분말의 열에 노출 시간을 증가시키므로 WC의 분해를 증가시켜 경도를 감소시킬

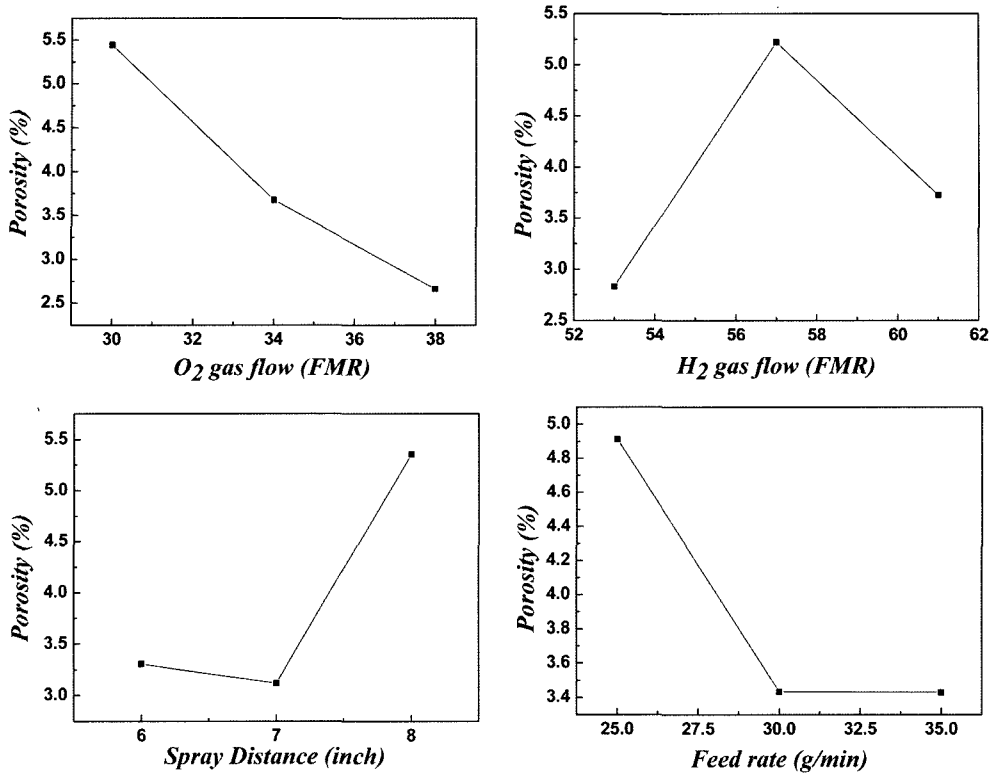


Fig. 11. Variation of porosity of conventional powder coating with spraying parameters.

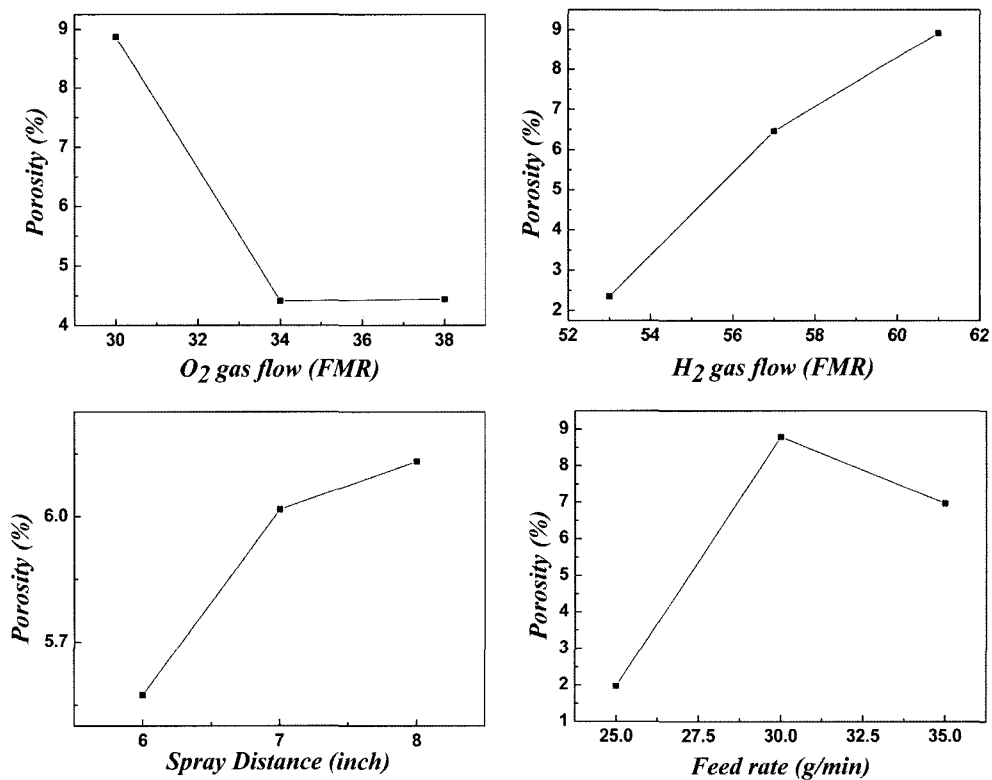


Fig. 12. Variation of porosity of nano powder coating with spraying parameters.

것으로 사료되며, 분말공급을 증가하는 분말에 의한 열의 흡수로 온도를 낮추어 열분해를 감소시키는 효과를 나타내나, 0.1-1 ms의 짧은 비행시간 동안 온도, 압력 및 열에 노출시간 등에서 고도의 비평형계를 유지 함으로 Co의 용해, WC상 분해 등에 대한 이론적인 예측은 불가능하므로 실제 실험 자료를 통하여 최적의 공정을 구하였다.

3.3.2 기공도

기공도는 각 조건에 따라 큰 차이를 나타냈다. 공정변수에 의한 영향이 아주 크게 작용하였다. 그리고 마이크론 분말이 나노 분말에 비해 더 많은 기공을 함유하고 있다.

마이크론 분말의 경우 산소 38 FMR, 수소 53 FMR, 용사 거리 7 in, 분말공급을 30~35 g/min일 때 가장 낮은 기공도를 나타냈다. 나노 분말의 경우 산소 34~38 FMR, 수소 53 FMR, 용사거리 6 in, 분말공급을 25 g/min에서 가장 낮은 기공도를 나타냈다(그림 11, 12).

3.4 마찰/마모 특성

3.4.1 마찰계수

마찰계수는 상온일 때 더 낮은 값을 보였다. 각 조건에 따른 마찰계수의 차이는 크지 않았다. 상온 마찰 실험에서 마이크론 분말의 경우 산소 34 FMR, 수소 61 FMR, 용사 거리 7 in, 분말공급을 35 g/min

일 때 가장 낮은 마찰계수를 나타냈다. 나노 분말의 경우 산소 38 FMR, 수소 61 FMR, 용사거리 6 in, 분말공급을 25 g/min에서 가장 우수한 마찰계수 값을 나타냈다. 고온 마찰 실험에서 마이크론 분말의 경우 산소 34 FMR, 수소 61 FMR, 용사 거리 7 in, 분말공급을 35 g/min일 때 가장 낮은 마찰계수를 나타냈다. 나노 분말의 경우 산소 38 FMR, 수소 61 FMR, 용사거리 6 inch, feed rate 35 g/min에서 가장 우수한 마찰계수 값을 나타냈다(그림 13~16).

코팅층의 경도가 높기 때문에 본 실험에서 마모량이 매우 적어 측정이 불가능했다.

그림 13~16에 의하면 마모실험 온도가 25°C에서 500°C로 증가 시 마찰계수는 마이크론 WC-Co에서는 $\mu = 0.62 - 0.66$ 에서 $\mu = 0.70 - 0.82$ 로, 그리고 나노 WC-Co에서는 $\mu = 0.55 - 0.63$ 에서 $\mu = 0.66 - 0.77$ 로 증가하였다. 일반적으로 재료의 경도는 내마모성에 주로 영향을 미치며, 재료의 미세구조와 연성도 마모과정에서 중요한 역할을 한다고 보고되고 있다⁹⁻¹². 본 실험 조건에서 마찰시험 초기에는 WC를 감싸고 있는 WC에 비하여 경도가 작고 용융점이 1485-1505°C로 낮은 Co가 산화마모와 연마마모 (abrasive wear)에 의하여 먼저 마모되면서 취성이 강한 CoO, Co₃O₄ 등 코발트 산화물 분말이 마모되어^{13,14} 고체, 부분액체 및 액체 윤활제 역할을 하므로 고온에서 마찰계수가 감소할 것으로 예측되

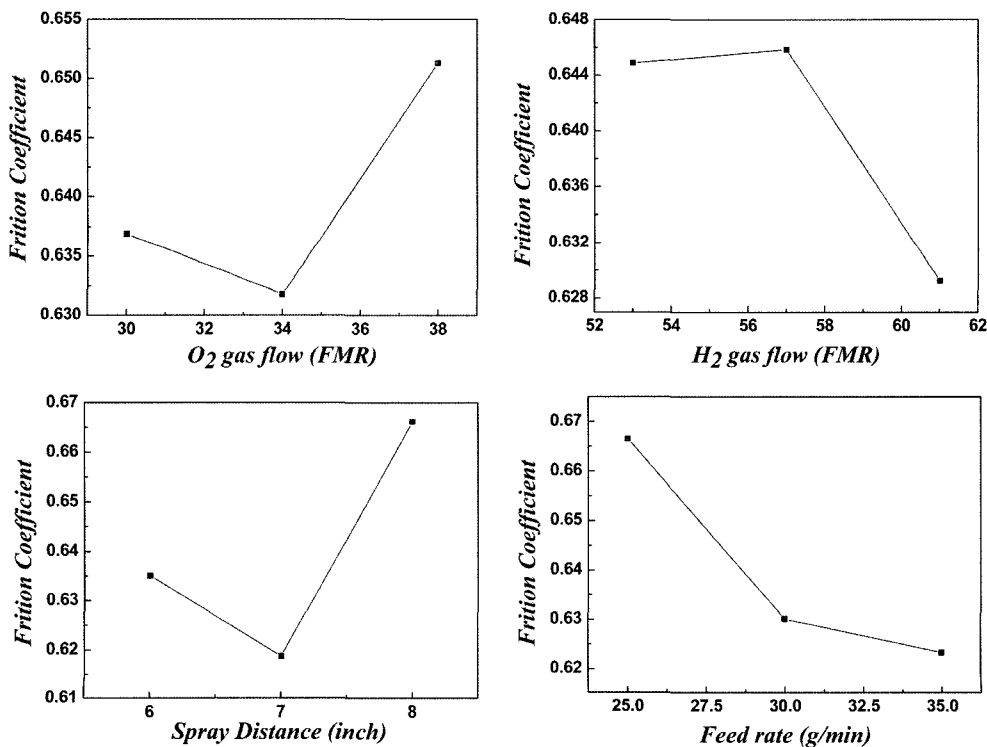


Fig. 13. Variation of friction coefficient of conventional powder coating with spraying parameters at room temperature.

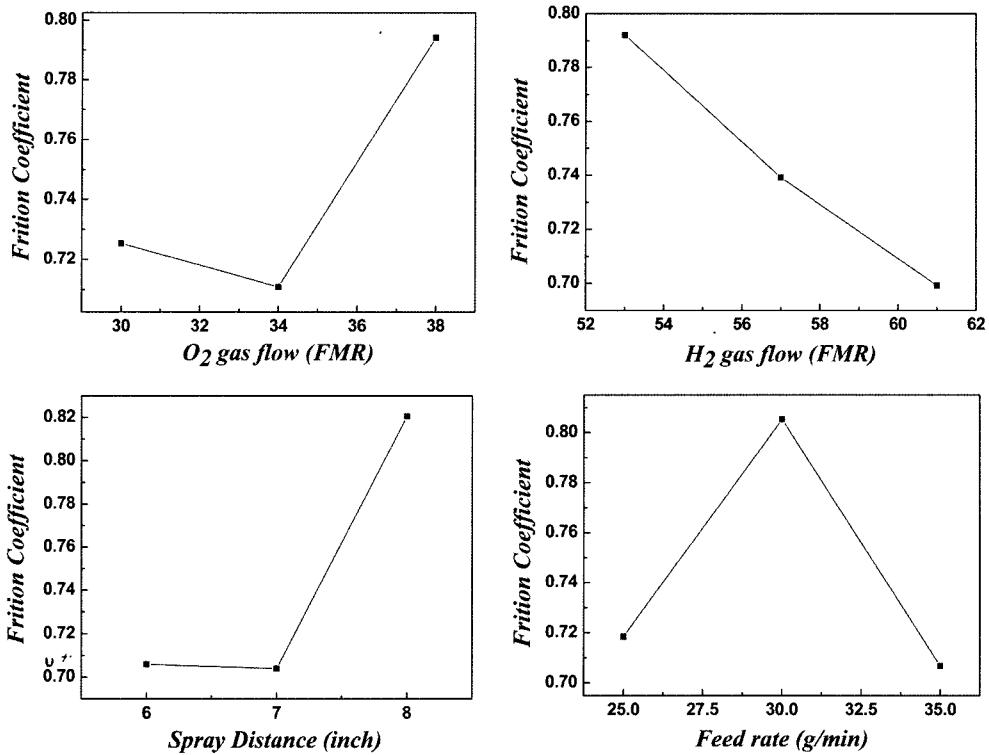


Fig. 14. Variation of friction coefficient of conventional powder coating with spraying parameters at 500°C.

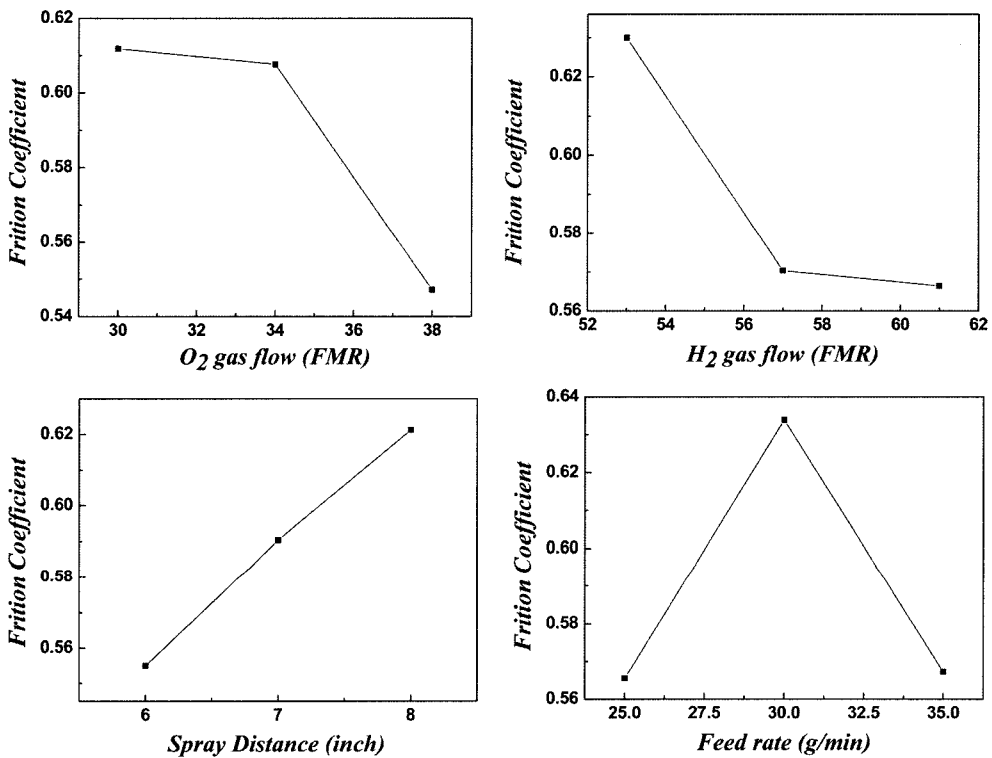


Fig. 15. Variation of friction coefficient of nano powder coating with spraying parameters at room temperature.

나, 곧 경도가 크고 용융점이 2710-2720°C로 높고 내산화성이 강한 세라믹 WC의 돌출부(표면적의 1% 이하)가 상대재 304SS와 고압력으로 접하게 되고, 고온과 고압에서 이들 작은 접촉점들은 분자간 및

원자간 인력이 증가하여 강한 화학적 흡착 혹은 화학결합을 하게 되며, 또한 고온에서 두 표면의 접촉점간 Co-Fe와 Co-Cr의 상호 확산과 용해(Large mutual solubility) 및 1500°C 이상으로 국부적으로

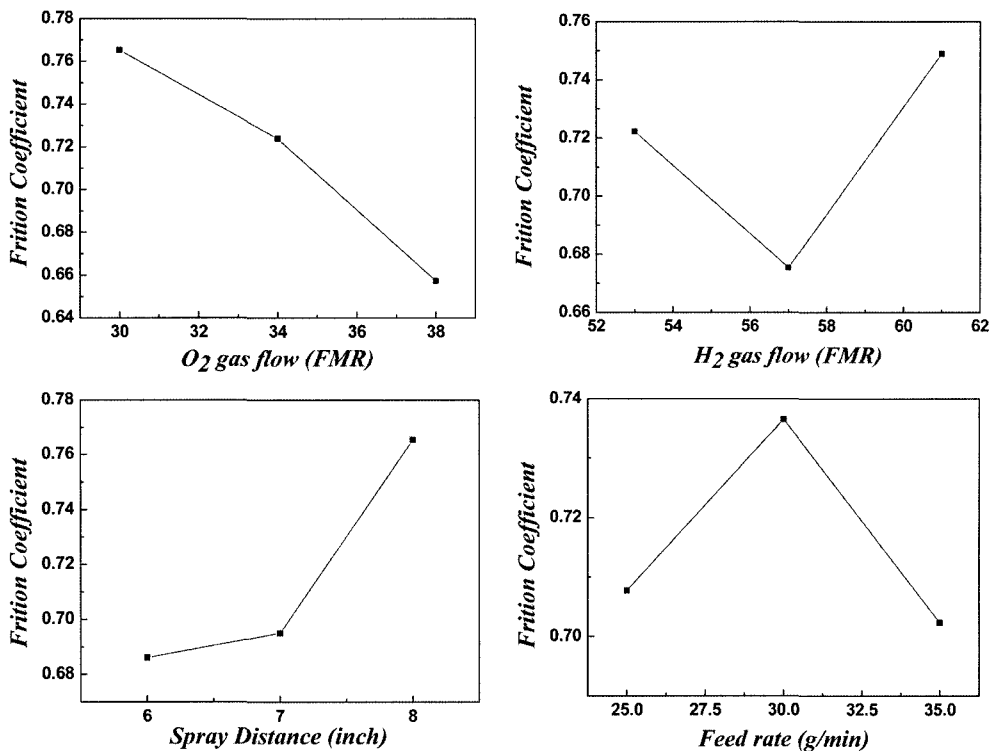


Fig. 16. Variation of friction coefficient of nano powder coating with spraying parameters at 500°C.

가열된 부분의 용융과 응고 과정에서 국부적 용접이 발생하여 부착마모(Adhesive wear)가 일어나기 때문에 마찰계수가 증가하는 것으로 사료된다.

상온과 500°C 모두에서 나노 WC-Co 코팅의 마찰계수가 작게 나타난다. 이는 단위 질량당 표면적이 수십 배 큰 나노 WC-Co 입자가 비행시간 열을 수십 배 더 많이 흡수하여 WC 상분해 온도 1250°C 이상의 고온으로 가열되어 경도가 작고 용융온도가 2780-2790°C로 낮은 W₂C와 W로 분해한다. W-Co 상태도에 의하면 855°C 이상에서 εCo가 αCo(4 at% 이상의 W 함유)로 되고 1505°C 이상에서 용융된다. C-Co 계에서는 αCo(5 at%까지의 C 함유)가 1321°C 이상에서 용융된다. 이들은 마모 실험에서 고체, 부분고체 혹은 용융 상태로 마찰표면에서 마모되어 고체, 부분고체 및 액체 윤활제 역할을 하는데 그 윤활 역할이 고온코팅이 되는 나노 WC-Co 코팅에서 크기 때문이다.

3.5 마이크론, 나노 WC 분말 코팅과 타 코팅과의 비교

마이크론 및 나노 WC-Co 분말 코팅과 일반적으로 내마모용으로 많이 쓰이고 있는 Al₂O₃, Cr₂O₃, Co 합금(T800) 및 Cr 도금표면과의 경도 및 마찰마모 특성을 비교해 보았다.

그림 17은 각 조건 및 각 코팅에 대한 경도측정 값이다. WC-Co 코팅이 가장 우수한 경도를 나타내

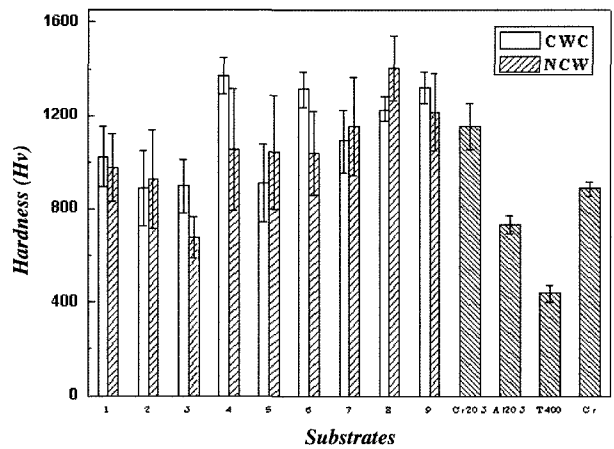


Fig. 17. Hardness of micron and nano WC-Co coatings prepared by 9 different coating processes, and Cr₂O₃, Al₂O₃, Co-alloy T400 and Cr coating.

며 용사공정 8(산소와 수소의 유속이 각각 38과 57 FMR, 용사거리 6 inch와 분말 공급을 35 g/min)에서의 경도는 약 1400 Hv의 높은 값을 나타내고 있다. Cr₂O₃나 Al₂O₃의 경우 WC-Co만큼 우수한 코팅을 형성하지 못하기 때문에 실제 재료 자체의 경도보다 낮게 나타난다. 그림 18의 마찰계수 비교에서 나노 WC-Co 코팅의 경우 상온보다 고온에서 더 높은 마찰계수가 나타났는데, 이는 마모 실험 초기에는 WC를 감싸고 있는 Co와 상대대간의 마찰에 의한 산화와 연마마모가 주도하나 노출된 경도가 큰

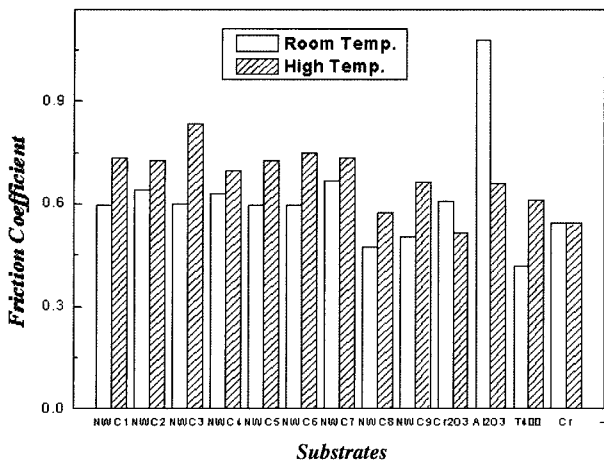


Fig. 18. Friction coefficients of nano WC-Co powder coatings, Cr₂O₃, Al₂O₃, Co-alloy T400 and Cr coating at room temperature and 500°C.

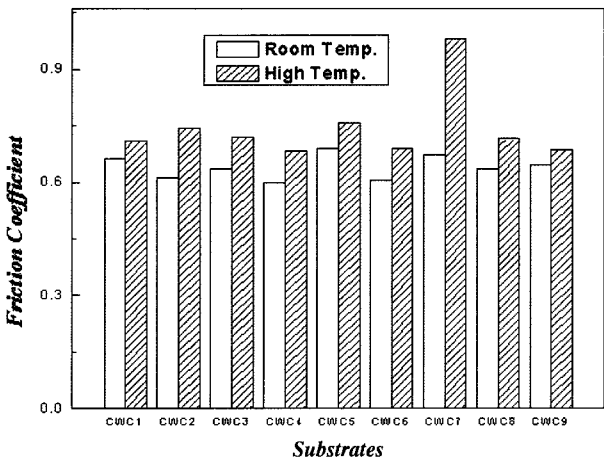


Fig. 19. Friction coefficients of conventional WC-Co powder coating at room temperature and 500°C.

WC가 상대재와 마찰을 하면서 고온에서 WC-Co와 상대재 표면간의 화학적 부착과 화학적 결합, 그리고 코팅의 Co와 상대재 스테인레스강의 Fe와 Cr간의 상호 용해 및 국부적 용접으로 인하여 부착마모가 일어나기 때문이다. Al₂O₃, Cr₂O₃ 코팅에서는 고온에서 마찰계수가 작게 나타나는데 이는 주로 연마마모에 의하기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

1. 마이크론 WC-Co 코팅의 최적 조건은 산소와 수소의 유속이 각각 34-38 FMR와 61 FMR이고 용사거리는 7 in, 분말 공급율은 35 g/min이고, 나노 WC-Co 코팅의 최적 조건은 산소와 수소의 유속이 각각 38 FMR와 57 FMR이고 용사거리는 6 in, 분말 공급율은 25 g/min이다.

2. 마이크론과 나노 WC-Co 분말은 SEM(scanning electron microscope)과 XRD에서 모두 WC 상이 Co 기지에 쌓여 있음을 보여 주며, 코팅면은 용융 후 급냉된 비정질 Co 기지 속에 WC와 일부 열분해로 생성된 W₂C와 W를 보여주고 있다.

3. 마찰계수는 마이크론과 나노 모두에서 상온에서 보다 고온(500°C)에서 높게 나타났다. 이는 고온에서는 주로 부착마모 메커니즘에 의한 마모가 발생하기 때문이다.

4. 마찰계수는 상온과 고온 모두에서 나노 WC-Co에서 낮게 나타난다. 나노 WC-Co는 단위 질량당 표면적이 수십 배 크기 때문에 비행 시 더 많은 열을 흡수한다. 고온도가 높아 저 열분해로 보다 많은 W₂C, W와 C 상을 만든다 이들은 W-Co계에서 εCo와 αCo, C-Co계에서 αCo의 미세한 상들을 형성하며, 이들은 세라믹인 WC와 부착력도 약하고 또한 용점이 비교적 낮으므로 본 실험환경에서 고체, 액체 혹은 부분 액체로써 윤활제 역할을 하기 때문으로 사료된다.

5. 경도는 공정에 따라 약간의 차이는 있으나 나노 WC-Co에서 약간 작게 나타난다. 이는 보다 고온 코팅이 되므로 경도가 낮은 새로운 W₂C와 W상이 보다 많이 생긴 때문이다.

6. 마이크론과 나노 WC-Co 고속용사 크팅은 다른 재료의 코팅 보다 내마모 코팅으로 우수하므로 고속회전체의 내구성 향상을 위한 표면 코팅으로 적합하다.

후 기

이 논문은 2004년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2004-005-D00111).

이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. B. D. Sartwell *et al.*, *HVOF Thermal Spray coatings Replace Hard Chrome*, <http://www.jgpp.com/publications/articles/hvofarti.pdf> (2006).
2. B. M. Kim, S. Y. Hwang, H. S. Choi, C. H. Lee, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 41 (2003) 695.
3. E. P. Song, J. H. Ahn, S. H. Lee, N. J. Kim, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 43 (2005) 438.
4. S. Y. Park, C. G. Park, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 42 (2004) 582.
5. H. M. Kim *et al.*, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 38 (2000) 125.
6. B. D. Sartwell *et al.*, *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/6170-04-8762, April 2004.
7. B. D. Sartwell, K. Legg, B. Bodger, HVOF Thermal Spray Coatings as an Alternative to Hard Chrome Plating on Military & Commercial Aircraft, AESF/EPA Conference for Environmental Excellence, 231 (1999), USA.
 8. JG-PP, Joint Group on Pollution Prevention, <http://www.jg-pp.com> (2005). <http://www.dualranksb.com/services3.html> (2004).
 9. B. Hwang, J. Ahn, S. Lee, Metall. Mater. Trans., 33A (2002) 2933.
 10. J. R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, USA (2004).
 11. ASM Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication and Wear Technology.
 12. D. A. Rigney, Fundamentals of Friction and Wear of Materials, ASM Materials Science Seminar, Pittsburgh, PA (1981).
 13. F. A. Cotton, G. Wilkinson, Advanced Inorganic Chemistry 5th ed. Wiley Interscience, USA (1988).
 14. T. Y. Cho *et al.*, 2006 Spring Conf., Korea Machine Tool (2006) 291-296.