

마찰속도와 마찰력의 변화에 따른 세라믹 용사 코팅재의 마모특성 Wear Characteristics on Friction Velocity and Force of Plasma Sprayed Ceramic Coating Layer

김귀식 · 김성익

G. S. Kim and S. I. Kim

Key Words : Plasma Spray(플라즈마 용사), Sliding Velocity(미끄럼 속도), Friction Force(마찰력), Friction Coefficient(마찰계수), Wear Rate(마모율)

Abstract : This study is to investigate the wear behaviors of thermally sprayed ceramic coating by a pin-on-disk wear testing machine. The test specimens were plasma sprayed TiO₂ coating material on carbon steel substrate(S45C) with Ni-4.5%Al alloy bond coating. Wear characteristics, friction coefficient and wear rates, were conducted at the three kinds of loads and velocities. Wear environments were dry and lubrication friction. The friction coefficients of TiO₂ coating specimen in dry friction were almost same according to increase the friction velocity. The wear rate increased when the friction force is high. In lubrication friction, the wear hardly occurred and friction coefficient was about 0.1. The adhesiveness of TiO₂ in lubrication friction is larger than that in dry one.

1. 서 론

산업의 급속한 발전으로 항공우주, 해양개발, 신 에너지개발 분야에서 일반 구조용 부품에 이르기 까지 각종 기계시스템들은 고출력, 고정도를 요구 받고 있으며, 사용환경도 다양해지고 있다.

기계가 사용환경에서 직접 관계되는 부분은 소재의 표면이기 때문에 재료의 표면에 고온, 부식, 마모 등에 우수한 내환경 기능을 주고자하는 표면 개질기술에 대한 관심이 집중되고 있다^{1,2)}.

세라믹은 강재에 비하여 고온경도 및 강도가 높으며 내환경 기능이 뛰어나므로 금속의 표면에 세라믹을 코팅하는 기술이 주목되고 있으며, 특히 내마모성이 요구되는 절삭공구와 금형분야, 혹은 정정밀기계와 반도체산업 등에 그 활용의 폭을 넓혀 가고 있는 실정이다.

표면개질기술은 도금법, CVD, PVD, 고상접합법, 용사법 등이 있는데 이중 용사법은 플라즈마, 가스화염 또는 아크열원을 이용하여 모재에 고속으로 분사된 액체미립자의 적층에 의해 피막을 형성하는 방법으로 다른 표면개질기술에 비해 소재

및 용사재료의 선택범위가 넓고, 소재의 형상과 치수의 제약이 적으며, 설비가 간단하고 작업공정이 빠른 특징을 갖고 있으므로 공업적으로 응용범위가 넓다.

최근, 내마모성이 요구되는 실린더 라이너, 피스톤링, 브레이크 등의 자동차 부품들에 플라즈마 용사 세라믹코팅을 적용하고 있다. 용사코팅재의 마모기구는 소성변형, 균열형성, 피로에 의한 스폰링(spalling), 물질전이 등이 보고되고 있는데^{3,4)}, 이러한 마모기구는 마찰재들의 접촉유형에 따라 다르므로 다양한 접촉유형에 대한 마모 데이터가 필요하다

따라서 본 연구는 세라믹 용사코팅재의 마모특성을 평가하기 위하여, 상압플라즈마 용사에 의해 세라믹 TiO₂와 본드코팅재 Ni-4.5%Al을 기계구조용강 S45C에 코팅하고, 건마찰과 윤활환경에서 마찰력과 마찰속도의 변화에 따른 마찰계수와 마모량을 측정하고, SEM으로 마찰면을 관찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험편

마모시험에 사용한 시험편(Rotor)과 고정편(St-

접수일 : 2002년 8월 8일

김귀식 : 제주대학교 기계공학과

김성익 : 제주대학교 대학원

ator)의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 시험편의 모재는 기체구조용 탄소강 S45C이다. 고정편은 직경 5mm의 고탄소 크롬 몰리브덴강(STB2)이며 시험편의 표면과 면접촉이 되도록 하였다. 시험편의 모재와 고정편의 화학성분 및 기계적성질을 Table 1에 나타낸다.

시험편은 모재표면을 경면연마한 후 블라스팅과 초음파세척을 행하고 Table 2의 용사조건으로 본드코팅(Ni-4.5%Al)과 탑코팅(TiO₂)을 하였다. 용사후 코팅피막은 평면연삭기에 의해 표면조도가 0.05 μ m R_{max}가 되도록, 또 피막두께가 본드코팅의 경우 100 μ m, 탑코팅은 250 μ m가 되도록 연마하였다.

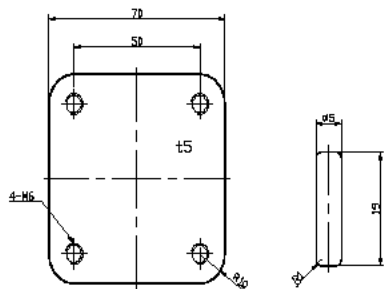
모재와 코팅재 및 고정편의 경도를 Table 3에 나타낸다. 경도는 마이크로 비커스 경도시험기에 의해 시험하중 500gf, 하중유지시간 15초로 하여 10회 측정후 그 평균치를 경도치로 하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에 사용한 시험장치는 Fig. 2에 나타낸 pin on disk형의 마모시험기이다.

부하하중과 마찰력은 Load Cell(NTS Co., LCW-500K)에서 검출하여 스트레인 증폭기(Kyowa Co., DPM612)를 거쳐 A/D변환기(PCL-812PG)에 의해 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터에 저장된 후 프로그램에 의해 마찰계수와 마찰거리를 산출하였다.

마모시험은 고정편에 접촉한 코팅시험편을 회전시키면서 소정의 하중을 가하는 면접촉 미끄럼 마찰형식으로 실험조건을 Table 4에 나타내었다. 하중조건을 3종류로 하고, 1종류의 하중조건당 마찰속도를 3종류로 하였다. 실험환경은 실온의 대기과 윤활환경이다. 윤활은 시험편과 함께 회전하는 윤활유 챔버를 설치하여 유중에 고정편과 시험편이 완전히 침지되도록 하였다. 윤활유는 API SJ 급으로 매 실험마다 윤활유를 교환하였다.



(a) Rotor (b) Stator

Fig. 1 Shapes and dimension of specimens (unit : mm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of rotor and stator

(a) Chemical composition (wt. %)

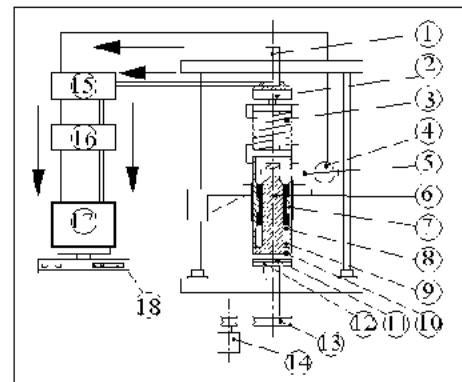
	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Cu
Rotor	0.45	0.21	0.75	0.02	0.02	0.13	0.01
Stator	0.95~1.10	0.15~0.35	0.5	0.25	0.25	1.30~1.60	0.25

(b) Mechanical properties

	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Blongation (%)	Poisson's ratio	Young's modulus (GPa)
Rotor	390	670	25	0.3	210
Stator	-	1568~1960	-	0.3	208

Table 2 Spraying conditions

Condition	Powder feed Unit		Gas (MPa)		DC (A)	DC (V)	Dis. (mm)
	Flow meter (m ³ /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H ₂			
TiO ₂	0.38	53	0.5 5	0.1 0	500	65 ~ 70	75 ~ 100
Ni-4.5wt%A 1	0.38	68	0.5 5	0.1 0	500	65 ~ 70	100 ~ 175



- ① Pressure handle
- ② Load cell
- ③ Coil spring
- ④ Load cell
- ⑤ Torque arm
- ⑥ Torque arm holder
- ⑦ Pressure rod
- ⑧ Pressure
- ⑨ Thrust bearing
- ⑩ Stator
- ⑪ Rotor
- ⑫ Turning table
- ⑬ Belt pulley
- ⑭ Motor
- ⑮ Strain amplifier
- ⑯ Computer
- ⑰ A/D converter
- ⑱ Printer

Fig. 2 Block diagram of friction testing machine

마모량의 측정은 시험전과 시험후에 시험편을 초음파세척을 행하고 완전히 건조시킨 후 정밀천평으로 5회 중량을 측정하여 그 평균치를 측정값으로 결정하였다.

그리고 마모시험후 표면을 금속현미경과 주사형 전자현미경(SEM)으로 정밀관찰 하였다.

Table 3 Microhardness of specimens (Hv)

Substrate		Bond coating	TiO ₂ coating
S45C	STB2		
260	788	261	768

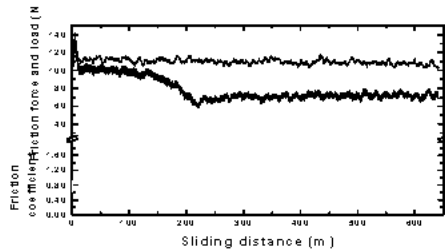
Table 4 Experimental conditions

Normal load (N)	110, 210, 310
Sliding speed (m/s)	0.1, 0.2, 0.3
Sliding distance (m)	1200
Environment	air, lubrication oil

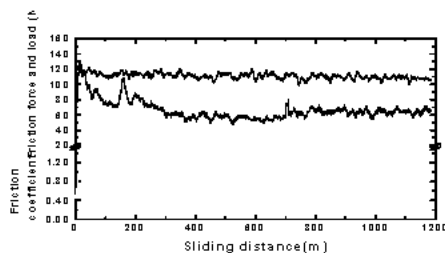
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 모재의 마찰 속도에 따른 마모거동

용사 코팅재와의 비교를 하기 위하여 건마찰중 모재 S45C에 대하여 부하하중 110N일 때, 마찰 속도에 따른 마찰계수 및 마찰력을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 마찰속도가 0.1 m/s, (b)는



(a) 0.1 m/s



(b) 0.2 m/s

Fig. 3 The friction coefficient of substrate (S45C) in air

0.2 m/s에서의 결과이다. 그림들 중에서 상단선은 부하하중을, 중간선은 마찰력, 하단선은 마찰계수를 나타낸다.

Fig. 3 (a)의 마찰속도 0.1 m/s에서, 마모초기에는 마찰계수가 1.1로 비교적 높은 마찰계수를 보이나, 220m 이후에는 약 0.6의 균일한 마찰계수로 되는 정상마모 현상을 보이고 있다. Fig. 3(b)의 0.2m/s에서도 마모초기의 높은 마찰계수가 마찰거리 300m 이후에 약 0.6으로 정상마모로 되지만 마찰력의 변동이 0.1m/s의 경우보다 심하게 나타난다.

이는 고정편의 경도보다 경도가 작은 모재표면이 연삭마모되어 그 산화물⁵⁾이 마찰면에 게재되므로 나타나는 현상으로 마찰속도가 빠르면 그 현상이 현저하다.

한편 윤활유 중의 모재의 마모는 마찰속도에 관계없이 마모초기부터 최종까지 0.22의 마찰계수를 나타내었다.

3.2 TiO₂ 코팅재의 마찰속도에 따른 마모거동

TiO₂ 코팅재에 대하여 부하하중을 110N으로 하고 마찰속도를 변화하였을 때 마찰거리에 따른 마찰계수와 마찰력의 관계를 Fig. 4와 5에 나타내었다.

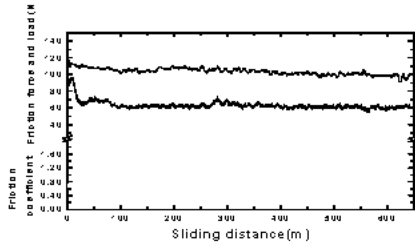
Fig. 4(a)의 마찰속도 0.1 m/s, 건마찰에서의 결과는 마찰력은 약 65N, 마찰계수가 0.6이며, Fig. 5(a)의 0.2 m/s에서는 마찰력 85N, 마찰계수 0.75 로 부하하중이 동일함에도 마찰계수의 차가 나타난다.

이것은 TiO₂ 코팅층과 고정편과의 마모과정에서 발생한 경질의 마모 산화물에 의해 TiO₂ 코팅 표면을 연삭함으로서 발생한 현상이다. 특히 고정편과 TiO₂ 코팅층의 경도가 비슷하므로 마찰면의 온도 상승으로⁶⁾ 미세한 마모 분말이 응착되었다가 전단력에 의해 탈락되는 응착마모와 표면이 밀리거나 패이는 연삭마모의 혼합형태의 마모과정을 거치면 동일한 하중이 부하되더라도 마찰속도에 따라 마찰계수의 차가 발생된다.

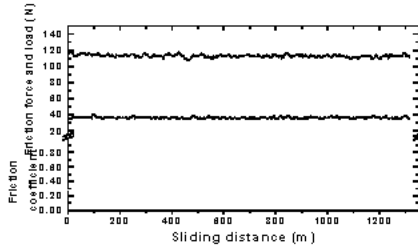
TiO₂ 코팅재의 윤활상태에서의 마찰계수의 변화를 Fig. 4(b)와 5(b)에 나타내었다. 마찰속도에 관계없이 마찰계수는 0.27의 값으로 모재 윤활의 경우보다 약간 상승하였다.

3.3 부하하중에 따른 마모거동

건마찰중 모재 S45C에 대하여 마찰속도 0.2m/s일 때, 부하하중의 변화에 따른 마찰계수 및 마찰력을 Fig. 6에 나타내었다.

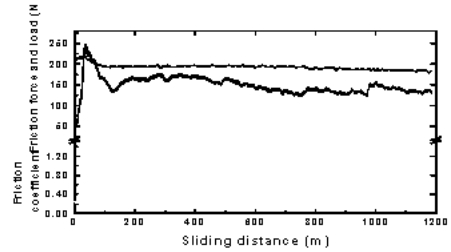


(a) in air

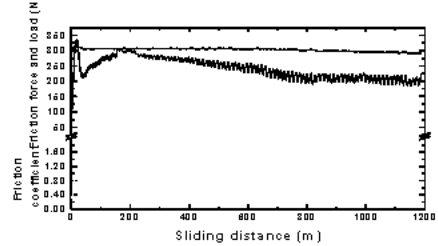


(b) in lubrication

Fig. 4 The friction coefficient of TiO₂ coating at friction velocity 0.1m/s

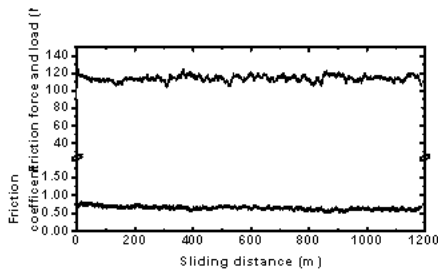


(a) 210N

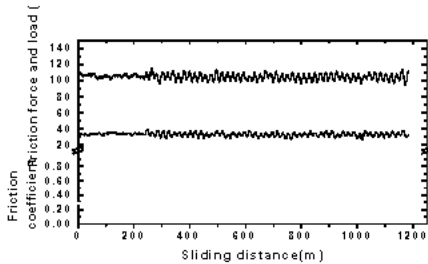


(b) 310N

Fig. 6 The friction coefficients of substrate (S45C) at 0.2m/s

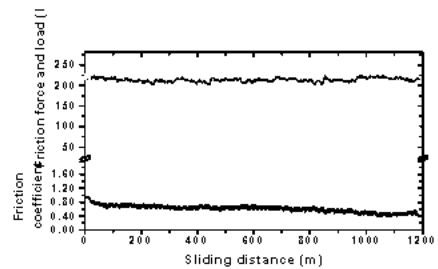


(a) in air

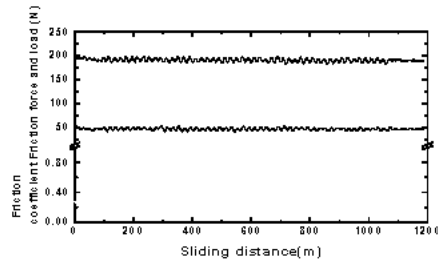


(b) in lubrication

Fig. 5 The friction coefficient of TiO₂ coating at friction velocity 0.2m/s



(a) in air



(b) in lubrication

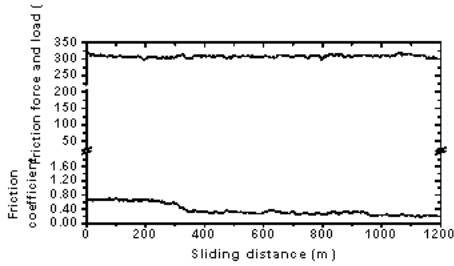
Fig. 7 The friction coefficient of TiO₂ coating at applied load 210N

Fig. 6(a)와 (b)에서 마모초기에 마찰력이 부하하중 이상으로 급격히 상승했다가 감소하는데, 이것은 연삭마모에 의해 생성된 마모분말이 퇴적되어 있다가 고정편의 추력 혹은 회전시험편의 회전력에 의해서 전단력이 발생하여 입자들이 탈락되는 현상이다⁷⁾. 부하하중에 따른 모재의 마모거동은 초기마모에서 정상마모로 천이하는 마찰거리가 110N일 때 220m, 210N일 때 140m, 310N일 때 50m로 부하하중이 증가하면 천이 마찰거리

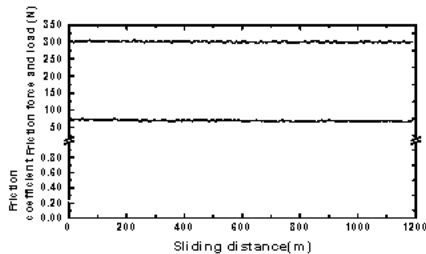
가 감소한다.

한편, TiO₂ 코팅재에 대하여 마찰속도 0.2m/s 일 때 부하하중 200N과 300N에서의 마모시험 결과를 Fig. 7과 8에 나타낸다. Fig. 7(a)의 부하하중 210N, 건마찰의 경우 마찰력은 마모 초기부터 종료까지 서서히 감소하나, 마찰계수는 약 0.8을 유지하였다. 그러나 Fig. 8(a)의 부하하중 310N에서 마찰력의 거동은 마찰거리 300m의 전후가 판이하게 다르다. 이는 부하하중이 너무 크

기 때문에 고정편과 TiO₂ 코팅층과의 마모에서 고정편의 마모량이 크고 마찰열이 높기 때문에 생긴 현상으로 이에 따라 마찰계수도 마찰거리의 증가와 더불어 초기의 0.8에서 0.4로 감소하고 있다. 한편 Fig. 7과 8(b)의 윤활유중 마찰계수는 약 0.2로 비슷하게 나타난다.



(a) in air



(b) in lubrication

Fig. 8 The friction coefficient TiO₂ coating at applied load 310N

3.4 마모량의 변화

Fig. 9에 모재에 대하여 부하하중 110N에서의 마찰속도에 따른 마모량에 대하여 나타낸다. 210N과 310N의 부하하중에서는 마모량이 극단적으로 크게 되므로 110N에 대하여만 정리한 것이다.

건마찰에서의 모재 시험편(rotor)은 마찰속도가 증가할수록 마모량이 증가한다. 상대편인 고정편(stator)은 모재에 비하여 경도가 높으므로 절대 마모량이 적고 마찰속도가 증가하여도 마모량의 증가도 근소하다. 한편 윤활중에서는 고정편과 모재 모두 마모량이 매우 적다. 고정편의 경우 마찰속도에 관계없이 마모량이 일정하나, 모재는 0.3m/s의 마찰속도에서 마모량이 증가하였다.

Fig. 10의 TiO₂ 코팅재에 대하여 마찰속도 0.2m/s에서 210N과 310N의 부하하중과 마모량의 관계를 나타낸다. 건마찰시 마모량은 부하하중 모두 TiO₂ 코팅재(rotor)가 고정편(stator)에 비하여 크지만, 코팅재와 고정편 모두 부하하중의 차이에 의한 마모량의 차이는 근소하다. 한편 윤활중에서는 코팅재와 고정편의 마모량은 부하하중에 관계없이 동일하다.

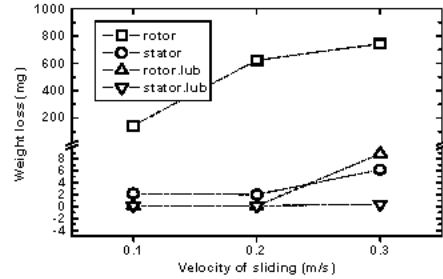


Fig. 9 Weight loss of substrate(S45C)

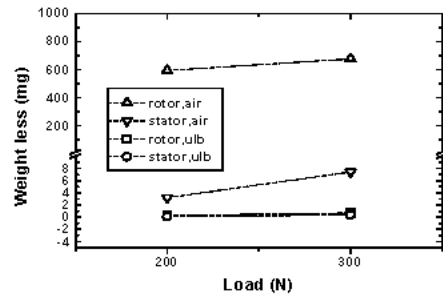


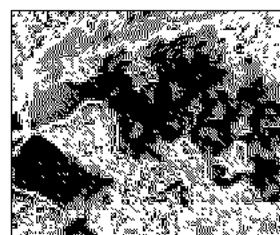
Fig. 10 Weight loss of TiO₂ coating

3.5 마모면 관찰

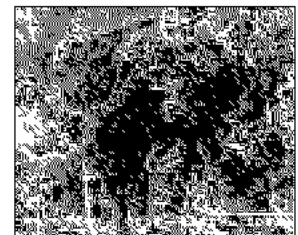
마모실험 후의 마모면들은 주사형 전자현미경으로 정밀 관찰하였다. 그 일례로서 건마찰과 윤활중에서 실험한 TiO₂ 코팅재의 마모면을 Fig. 11에 나타낸다.

Fig. 11(a)의 코팅재의 건마찰시험 마모면은 검은색으로 응착되어 있고 일부에는 코팅층이 탈락된 모습을 보인다. 이는 시험편 표면의 세라믹 입자의 탈락으로 마모입자들이 생성되고 점차 마찰이 진행되면서 고정편에서 세라믹 표면으로 물질전이⁸⁾가 발생되며 이들이 응착되었다.

Fig. 11(b)의 코팅재의 윤활시험 마모면은 응착 마모면을 나타내는 것은 동일하지만 응착면의 두께가 건마찰의 경우보다 얇고 응착면의 색은 거의 변하지 않았다.



(a) TiO₂, in air, 110N, 0.2m/s



(b) TiO₂, Lub., 110N, 0.2m/s

Fig. 11 Wear surfaces

4. 결 론

내마모성 세라믹 TiO₂를 상압 플라즈마 용사코팅을 실시하여 건마찰과 윤활 상태에서 마찰속도와 부하하중에 따른 마모특성을 조사하여 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 건마찰과 윤활 중에서 마찰속도의 증가에 따른 TiO₂ 코팅재의 마찰력과 마찰계수의 변화는 거의 없으며 그 값이 일정하였다.
2. 건마찰에서 TiO₂ 코팅재의 마찰속도와 부하하중의 변화에 따른 마모량의 관계는 마찰속도와 부하하중이 증가함에 따라 마모량도 증가하지만, 윤활중에서의 마모량은 극소하며, 거의 동일하다.
3. TiO₂ 코팅재의 마모특성은 상대재인 고정편과의 경도차에 의해 결정된다. 고정편과 경도가 비슷한 TiO₂ 코팅재는 응착마모를, 경도가 작은 모재 S45C는 연삭마모를 나타낸다.
4. TiO₂ 코팅재의 응착마모 상태는 건마찰의 경우 마찰열에 의해 변색된 응착마모면을 보이나, 윤활중의 경우는 응착마모면을 보이나 윤활유의 냉각에 의해 변색이 되지 않는다.

참 고 문 헌

1. 冲猛雄, "表面改質による材料の高性能化技術", 防蝕技術, Vol. 39, No. 4. pp.201~210, 1990
2. M. Nakagawa, "Recent Trends in Thermal Spray Technology", Jour. of Japan Thermal Spraying Society, Vol. 34, No. 3, pp. 147~155, 1997
3. J. M. Cuetos, E. Fernandes, R. Vijande, A. Rincon and M. C. Perez, "Plasma-sprayed Coating Treated with Lasers", Wear, Vol. 169, pp. 173~179, 1993
4. Y. Wang, Y. Jin and S. Wen, "The Analysis of the Friction and Wear Mechanism of Plasma-sprayed Ceramic Coatings at 450°C", Wear, Vol. 128, pp. 265~276, 1998
5. 久野正人, 出水 敬, 石神逸男, 三浦健一, "ホウ素イオン注入處理を施した304, Si₃N₄, WC-9%の摩擦摩耗特性評價", 材料. Vol. 42, No. 473, pp. 202~208, 1992
6. 채영훈, 박병희, 김석삼, "Al₂O₃/NiCr 코팅의 미끄럼 마멸 특성", 대한기계학회논문집(A),

Vol. 23, No. 7, pp. 1245~1252, 1999

7. 안희석, 김학관, 김창희, "A Study on the Wear Characteristics of Plasma Sprayed WC-12Co and WC-12Co/NiCrSiB Mixed Matrix Composites", 제5회 용사기술 Workshop, pp. 76~81, 1998
8. Z. F. Zhang, L. C. Zhang and Y. W. Mai, "Wear of Ceramic Particle Reinforced Metal-Matrix Composites", Journal of Materials Science, Part 1, pp. 1961~1966, 1995