

TiO₂ 세라믹 용사코팅재의 마모특성

김 귀 식* · 김 성 익**

Wear Characteristics of TiO₂ Ceramic Coating Material

Gui-Shik Kim* · Sung-Ik Kim**

ABSTRACT

Wear behaviors of plasma sprayed ceramic coating materials have been investigated experimentally through the friction coefficient, friction force and weight loss. In wear behavior of substrate(S45C) and TiO₂ coating specimen in dry friction, the friction coefficient is monotonous with increasing the friction velocity. The amount of weight loss increase when the load is high. The wear and friction in lubrication do not occur almostly because of the lubrication property. The wear of stator, SUJ Π pin, is small in S45C, and large in TiO₂. The adhesiveness in TiO₂ wear in lubrication is larger than that in air, so the lubrication is important to the low wear of the tribology.

Key words: Plasma spray, Sliding velocity, Friction force, Friction coefficient, Wear, Friction power, Ceramic coating

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전으로 항공, 우주, 해양개발, 신 에너지 개발 분야부터 일반 구조용 부품에 이르기까지 기계구조물의 사용 환경은 다양해지고 있다 [1]. 특히 고온, 부식, 마모 등이 작용하는 가혹한 환경 속에서 사용되는 기계구조물을 위해서는 이러한 환경 중에서도 사용할 수 있는 기계적 특성이 뛰어난 소재의 개발이 필요하다.

재료가 어떠한 조건의 사용 환경에서 직접 관계되는 부분은 표면이기 때문에 최근의 연구에서는 재료의 표면에 내열, 내마모, 내식성 등의 우수한 기능을 주고자하는 새로운 기술적인 방법으로서 "표면 개질 기술"이 개발되어 관심이 집중되고 있으며 이중 용사법이 공업분야에서 폭넓게 이용되고 있다[2].

용사법의 종류는 열원의 종류에 따라 화염용사, 플라즈마용사 등이 있으며, 용사소재는 금속, 세라믹, 플라스틱 등 거의 모든 재료가 이용된다. 그중 세라믹은 내열성, 내마모성 및 경도, 화학적 안정성이 우수하므로 용사용 소재로 많이 개발되어 있으며 그 기능의 우수성 때문에 용사에 널리 이용되고 있다[3].

본 연구는 TiO₂ 세라믹용사 코팅재에 대하여 마찰속도와 하중 등의 마모 변수에 따른 마모특성을 조사하기 위하여 세라믹 TiO₂를 기계구조용강 S45C에 플

* 제주대학교 기계에너지생산공학부, 첨단기술연구소
Dep't of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ. Res. Inst. of Adv. Tech.
** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

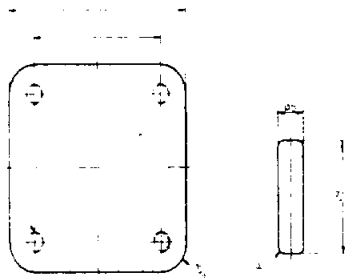
라즈마 용사코팅을 한 후 건마찰과 윤활환경 하에서 하중과 미끄럼속도의 변화에 따른 마찰계수, 마모량 및 마찰동력을 조사하고 전자현미경에 의한 마찰면의 정밀관찰을 행하여 마모기구를 검토하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 시험편

시험편은 Fig. 1에 나타낸 고정 시험편과 회전 시험편이며 각각의 화학 성분 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 고정 시험편은 $\phi 5\text{mm}$ 의 핀(pin)으로서 SUJ II를 사용하였고 회전 시험편의 코팅층 표면과 면 접촉을 할 수 있도록 하였으며, 하부측 회전 시험편은 기계구조용강 S45C를 기재로 하여 상압 플라즈마 용사장치(Metco Inc.)를 이용하여 본드 코팅 및 탑 코팅을 실시하였다.

코팅재료는 Table 2의 Ni-Al4.5wt% 합금 분말과 세라믹TiO₂을 사용하였으며 코팅두께는 Ni-Al4.5wt%는 약100 μm , TiO₂는 약250 μm 이다. 코팅시 전처리로서 블라스팅 처리 행한후 플라즈마 용사코팅을 하였다. 용사조건을 Table 3에 나타낸다. 한편 코팅전후 측정된 모재와 코팅재의 마이크로 비커어스경도 시험값을 Table 4에 나타낸다.



(a) Rotor (b) Stator
Fig. 1 Shapes and dimension of specimens.
(unit : mm)

Table 1. The chemical composition and mechanical properties of rotor(S45C) and stator(SUJ II)

(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 strength (MPa)	Stress (MPa)	Strain (%)	Poisson's ratio	Specific gravity g/cm ³	Young's modulus GPa
Rotor	390	670	25	-	-	-
Stator	-	1568-1960	-	0.3	7.77	208

Table 2. Powders used plasma spray

Powder	Typical size	Melting point
Ni-4.5wt.%Al	170~325mesh	660 $^{\circ}\text{C}$
TiO ₂	10~270mesh	1920 $^{\circ}\text{C}$

Table 3. Plasma spraying conditions

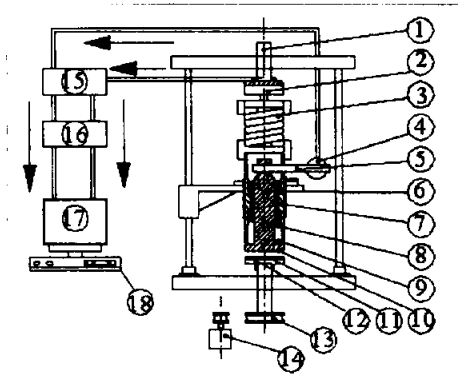
Condition	Powder feed unit		Plasma gas (psi)		Spray dis. (mm)
	Flow meter (ft ³ /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H ₂	
TiO ₂	13.5	53	80	15	100
Ni-4.5wt.%Al	13.5	68	80	15	150

Table 4. Microhardness of specimens (Hv)

Substrate		Bond coating	TiO ₂ coating
S45C	SUJ II		
260	788	261	768

2.2. 실험 방법

시험기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같은 고정시험편인 판에 접촉한 회전 시험편을 회전시키면서 소정의 하중을 가하는 면 접촉 미끄럼 마찰 형식인 Pin on Disk형으로 상은 상압하에서 실험을 실시하였다. 실험 조건을 Table 5에 나타내는 바와 같이 하중 조건은 110 N, 210 N, 310 N이며 110 N일 때는 미끄럼 속도를 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.3 m/s로 하였으며 또 210 N과 310 N일 때는 미끄럼 속도를 0.2 m/s로 하였다.



- 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 Moter
- 15 Strain amplifire 16 A/D converter
- 17 Computer 18 Printer

Fig. 2 Block diagram of friction testing machine

실험환경은 대기 중과 윤활유 중에서 실험하였다. 윤활환경 시험은 회전시험편과 같이 회전하는 윤활유 챔퍼를 설치하여 시험편이 윤활유 중에 완전히 침지 되도록 하였다. 사용한 윤활유는 API SJ급으로 매 실험마다 윤활유를 교환하였다. 마모량의 측정은 시험 전후 시험편의 무게 차로 계산하였으며, 시험편은 초음파 세척기로 30 분간 초음파 세정, 탈지 및 건조의 과정을 거친 후, 시험편의 무게를 0.1 mg까지 5회 측정하여 그 평균값을 이용하였다. 마모특성은 하중

(P), 마찰력(F), 마모량(W), 미끄럼속도(V), 미끄럼거리(L)을 측정하여 마찰계수($\mu=F/P$), 비마모량($B=W/PL$), 마찰동력($T=\mu PV$)의 관계로 정리하였다.

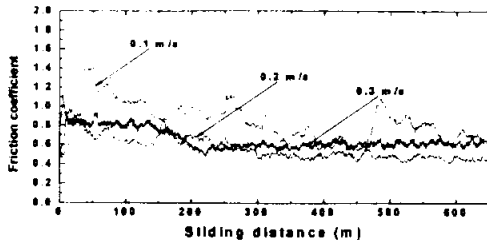
Table 5. Experimental conditions

Normal load (N)	110, 210
Sliding speed (m/s)	0.1, 0.2, 0.3
Sliding times (hr)	2
Test temperature(℃)	25
Environment	in air, in lubrication

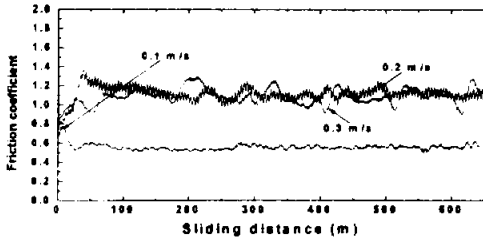
III. 실험 결과 및 고찰

3.1. 미끄럼 속도에 따른 마찰계수의 변화

S45C와 TiO₂시험편을 수직 하중 110 N, 대기 중에서 미끄럼 속도 증가에 따라 마찰계수의 변화를 Fig. 3에 윤활 중의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3 (a)에서 보면 초기마모의 정도를 보여주고 있는데 0.1 m/s에서 보면 초기마모가 60 m, 270 m 및 490 m의 세번에 걸쳐서 이루어지고 있다. 초기마모는 마찰계수가 급격히 상승했다가 다시 감소하는 현상이 반복되는 것으로 S45C의 경우는 고정편의 심한 연삭이 발생하여 마모 분말이 커지고 있고 또 소음도 크게 되었다. 0.2 m/s 일 때는 상승과 하강이 반복되다가 260 m부터 다시 정상마모가 시작이 되는 천이점이 시작되고, 0.3 m/s에서는 220 m정도에서 초기마모와 정상마모의 갈라지는 것을 알 수가 있으며 따라서 미끄럼 속도가 빨라질수록 천이점이 길어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3 (b)의 TiO₂에서 보면 고정 시험편의 경도와 비슷하게 회전 시험편의 경도가 상당히 높으므로 초기마모의 정도가 0.1 m/s일 때는 30 m정도, 0.2 m/s일 때는 50 m, 0.3 m/s는 70 m정도로 상당히 빨리 일어났다가 정상마모로 돌아갔다. 이것은 경도의 차이가 적음을 의미하며 미끄럼 속도가 0.1 m/s일 때의 마찰계수가 0.59 정도로 낮은 것은 상대적으로 경도가 높은 회전 시험편 위를 고정 시험편이 천천히 돌기 때문일 것으로 사료된다. 한편 윤활중에

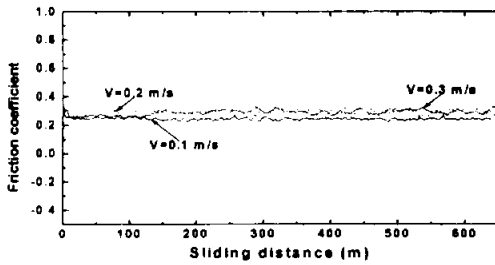


(a) Substrate

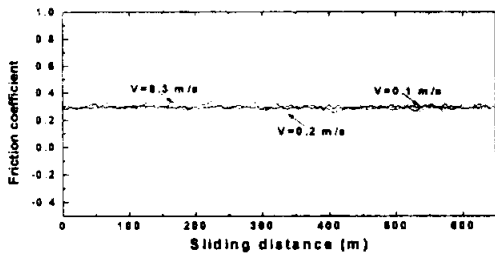


(b) TiO₂

Fig. 3 Friction coefficient vs. sliding distance on load 110N in air



(a) Substrate



(b) TiO₂

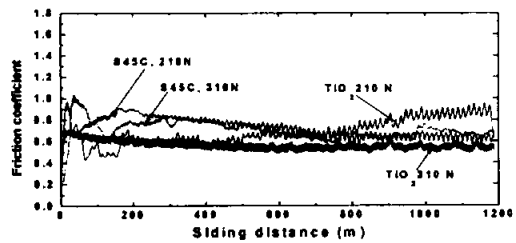
Fig. 4 Friction coefficient vs. sliding distance on 110N in lubrication oil

S45C를 시험한 것은 Fig. 4 (a), TiO₂를 시험한 것은 (b)에 나타냈다. Fig. 4(a)와 (b)에서 마찰계수는 0.3 정도로 거의 같으며 초기마모의 경향도 보여주지 않고 있다. 이것은 제3의 물질이 접촉 상대면의 직접 접촉을 막아주고 있음을 설명해 주고 있다.

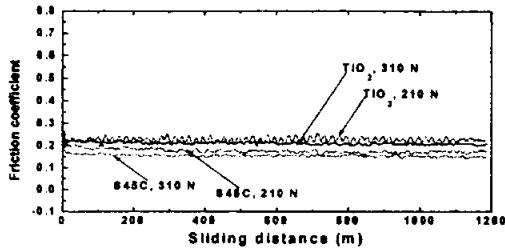
3.2. 하중에 따른 마찰계수의 변화

S45C와 TiO₂ 시험편을 210 N 및 310 N으로 대기 중에서의 윤활 중에서 실험한 마찰계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)의 S45C에서 하중 210 N과 310 N을 가한 것을 비교해 보면 마모 초기에서 마찰계수가 210 N의 편이 높음을 나타낸다. 마찰 거리가 300 m 지나면서 거의 비슷한 결과를 나타내지만 하중 210 N의 편이 변동폭이 커짐을 알 수 있다. 이는 마모초기에 생성하여 밀집화 된 마모분말이 마찰 거리가 길어지면서 탈락이 되는데 마모분말이 탈락되기 전에 제3의 물질상태인 산화물로 존재하므로 마찰계수가 적어진다[4].

TiO₂ 코팅재에 대한 하중 210 N과 310 N에서의 마찰계수의 변화를 보면 약 700m의 마모거리 까지 S45C 보다 작다. 이는 TiO₂가 상대재인 SUJ II와 비커어스 경도가 비슷하므로 용착 마모가 발생하기 때문으로 생각된다[5]. 본 연구에서 시험편들의 경도가 크므로 마찰열에 의하여 용착마모가 발생하였다. 이는 시험 후 관찰한 마모면이 검정색으로 산화되어 있는 것으로 증명된다. 한편 Fig. 5 (b) 윤활 중의 마찰계수는 TiO₂가 S45C 보다 크며 약 0.2이다. TiO₂와 S45C 모두 하중 210 N의 편이 310 N보다 크지만 그 정도는 미미하다.



(a) in air



(b) Lubrication

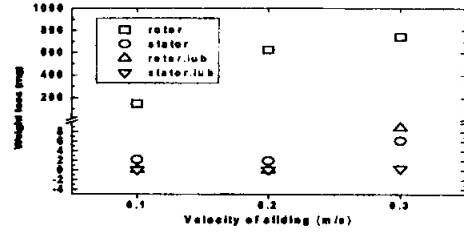
Fig. 5 Friction coefficient vs. sliding distance at friction velocity 0.2m/s

3.3. 마모량과 비마모량의 변화

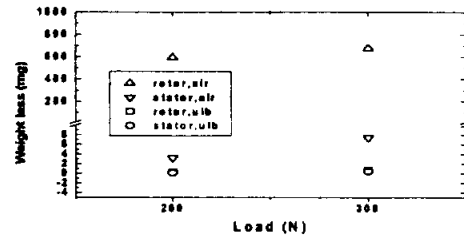
미끄럼 거리에 따른 마모량은 Fig. 6(a), 하중에 따른 것은 Fig. 6(b)에 나타냈다. Fig. 6(a)의 대기 중 S45C의 경우 미끄럼속도가 증가할수록 마모량이 커지는데 이는 Stator의 경도가 높으므로 경도가 작은 S45C의 마모면을 연삭하는, 일종의 버핑 또는 폴리싱(Buffering or polishing) 현상이 발생하기 때문으로 생각된다. (b)에는 하중의 증가에 따라 마모량도 증가하고 있음을 알 수 있다. 결국 공기 중에서의 TiO₂의 회전 시험편의 마모량이 적고 pin의 마모량이 크게 됨을 알 수 있으며 하중이 커질 수록 마모량도 공기 중에서는 점점 커져감을 볼 수 있다. 윤활 도중에서는 stator의 마모량이 미끄럼 속도, 하중의 증가하여도 미미하다.

Fig. 7은 미끄럼 속도와 비마모량의 관계를 나타낸 것이다. (a)는 공기 중, (b)는 윤활 중에서 실험한 것이다. Fig. 7(a)에서 각 시험편들의 비마모량은 S45C를 제외하고는 미끄럼속도에 관계없이 $1.0 \times 10^{-6} \text{g/Nm}$ 이하로 나타난다. S45C는 미끄럼 속도 0.2 m/s에서 $4.0 \times 10^{-6} \text{g/Nm}$ 이며, 미끄럼 속도 0.3 m/s일 때 $1.10 \times 10^{-5} \text{g/Nm}$ 로 미끄럼 속도와 비마모량의 관계는 足立 등[6]의 보고와 같이 미끄럼 속도가 증가하면 비마모량도 증가하였다. TiO₂ 코팅재의 경우 미끄럼 속도가 증가에 따른 비마모량의 증가 정도는 적다.

한편 Fig. 7(b)의 윤활 중에서 각 시험편들의 비마모량은 S45C의 0.3 m/s의 경우를 제외하고는 $2.0 \times 10^{-8} \text{g/Nm}$ 이하로서 매우 적다.

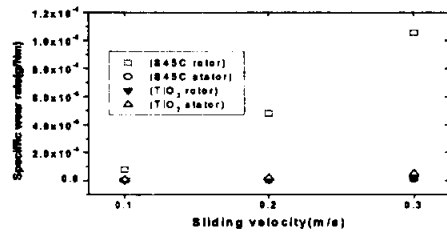


(a) Substrate

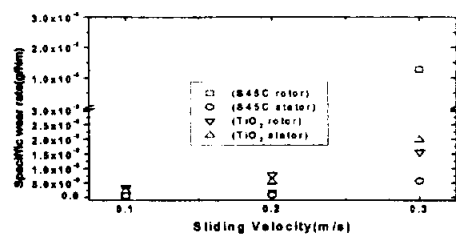


(b) TiO₂

Fig. 6 Weight loss vs. load



(a) in air



(b) in lubrication oil

Fig. 7. Specific wear rate vs. friction velocity

3.4. 마찰 동력

Fig. 8은 하중 100N에서 미끄럼 속도의 변화에

다른 미끄럼 거리와 마찰 동력의 관계를 나타낸다. Fig. 8의 (a)에서 S45C의 대기중 마찰 동력은 미끄럼 거리에 따라 변동폭이 크며, 미끄럼 속도가 0.3 m/s일 때 특히 크다. 윤활유 중의 마찰동력은 미끄럼속도와 거리에 관계없이 거의 비슷하다. Fig. 8(b)의 TiO₂의 경우도 거의 유사하다. 그러나 S45C의 경우는 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰 동력의 증가는 작지만 TiO₂는 미끄럼 속도가 증가하면 마찰 동력도 현저히 증가되었다. 이 [7]도 이와 유사한 결과를 보고하였다.

Fig. 9는 미끄럼 속도 0.2 m/s에서 하중의 변화에 따른 미끄럼 거리와 마찰 동력의 관계를 나타낸다. S45C와 TiO₂ 모두 하중이 크면 마찰동력이 크다. 공기 중에서는 건조 미끄럼 마찰에서의 초기 마모가 이루어지고 따라서 마찰 동력도 그 초기에 심하게 상승과 하강이 계속되다가 정상화되고 있다. Fig. 8에서 나타난 미끄럼 속도에 따른 마찰 동력의 경우와 비교하면 마찰동력에 미치는 미끄럼 속도의 효과보다 하중의 증가에 따른 효과가 큼을 알 수 있다.

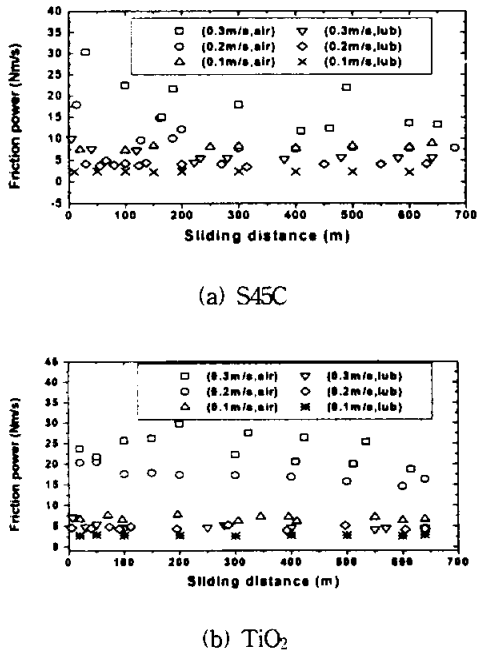


Fig. 8 Friction power vs. sliding distance

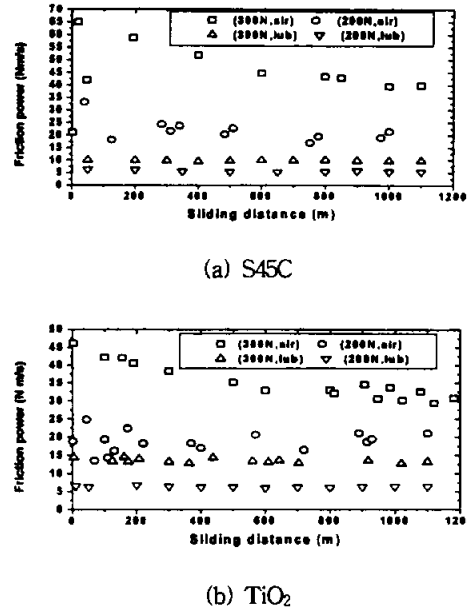


Fig. 9. Friction power vs. sliding distance(0.2m/s)

3.5. 마모면 관찰

Fig. 10은 실험후 관찰한 대기 중과 윤활 중에서의 마모면을 SEM 사진으로 비교한 것이다. Fig. 10(a)의 TiO₂를 코팅재의 마모면은 미소 돌기들로 다수 관찰된다. TiO₂의 표면은 거의 마모되지 않은 상태이며, 상대재 SUJ II가 TiO₂ 표면에 부분적으로 부착되어 있는 상태로 용착마모가 발생하였다. SUJ II가 검은 색을 띠고용착된 현상을 볼 때 마찰열 때문이라고 고찰된다.

Fig. 10(b)의 윤활중에서의 마모면은 용착이라는 면은 유사하지만 용착 되어진 두께가 대기 중에서 보다 얇고 면적은 더욱 늘어났으며 용착된 면의 색깔도 거의 변하지 않았다. SUJ II의 색깔이 거의 변하지 않았다는 것은 마찰열이 작음을 나타낸다.

Fig. 10(c)와 (d)의 S45C의 경우 실험후 초음파 세척시 표면에 분말 상의 마모 산화물이 많은 상태였으며, SEM관찰에서 큰 마모트랙이 관찰되었다. 이는 상대재와의 경도차에 의해 S45C가 연삭마모 되었음을 나타낸다. 건마찰에서의 마모트랙은 윤활중의 트랙보다 깊고 심하다.

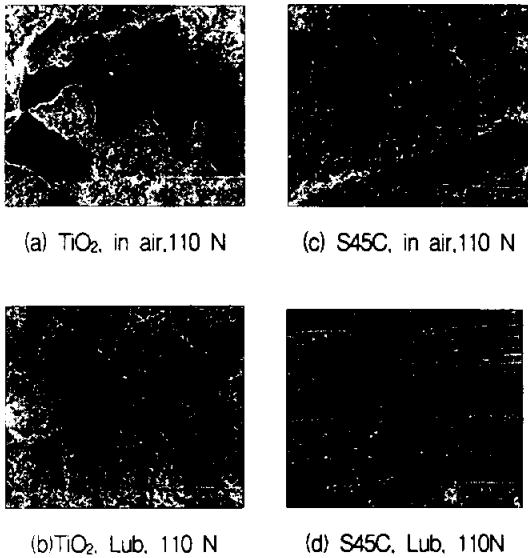


Fig. 10 Wear surfaces on sliding velocity at 0.2m/s

IV. 결 론

세라믹 TiO₂ 플라즈마 용사 코팅재의 윤택환경 중 에서 부하중과 마찰속도의 변화에 따른 마찰계수, 마모량 및 마찰동력을 비교 검토한 결과는 다음과 같 다.

1. 기재와 코팅재의 공기중 마모에서, 마찰속도가 증 가하여도 마찰력과 마찰계수는 변화하지 않지만 마모량은 증가한다.
2. 건마찰 중 TiO₂코팅재는 용착마모가 발생하고, S45C 연삭마모가 발생한다. 윤택 중에서는 S45C 와 TiO₂ 모두 마모의 정도는 작다.
3. 고정편 SUJ Π 는 기재S45C와의 마모에서 비마멸 율이 매우 적었지만 TiO₂와의 비마멸율은 증가하 였다. 마찰속도가 증가하면 마찰동력도 증가한다.

참고문헌

[1] C. C. Bernt, 1992, Journal of Thermal Spray Technology, 5(4), p.351.

[2] D. J. Varacalle, Jr., J. R. Knibroe, V. L. Smith-Walter, G. Irons, 1991, Coatings applied with the plasma-spray process using nickel-aluminum powders, ICLASS-91, pp.113-120

[3] 冲猛雄. 1990. 表面改質による材料の高性能化技 術 Boshoku Gijutsu 39, 4. pp.201-210.

[4] 久野正人, 出水 敬, 石神逸男, 三浦健一, 網野榮二, 1992. ホウ素イオン注入處理を施した304, Si3N, WC-9%の摩擦摩耗特性評價. 材料. Vol. 42, No. 473, pp.202-208.

[5] 遠藤吉郎. 1972. 表面工學(金屬の表面損傷とそ の 防止法). 養賢堂發行.

[6] 足立幸志, 加藤康司, 井上英治, 鍵本良實. 1995. アルミナセラミックスのトライボロジ-特性に及 ぼす溫度の影響(摩耗特性とトライボフィルム形成 の關係. 日本機械學會論文集(C編). 61卷 586号. pp.2553-2558

[7] 이영제, 1996, 미끄럼환경의 변화에 따른 Si3N4 의 마멸거동. 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제 6호, pp.1753-1761.