

碩士學位論文

플라즈마용사 세라믹코팅 강재의 마찰  
속도와 하중의 변화에 의한 마모특성



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

金 熹 坤

1 9 9 9

플라즈마용사 세라믹코팅 강재의 마찰  
속도와 하중의 변화에 의한 마모특성

指導教授 金 貴 植

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1999 年 12 月

濟州大學校 産業大學院



金 熹 坤

金熹坤의 工學 碩士學位 論文을 認准함

1999 年 12 月

審査委員長 印

委 員 印

委 員 印

# **Wear Characteristics on Velocity and Load of Ceramic Coating Steels by Plasma Spray**

**Hie-Gon Kim**

**(Supervised by professor Gui-Shik Kim)**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER  
OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL-ENERGY  
ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL INDUSTRIAL UNIVERSITY**

**1999 . DECEMBER**

# 목 차

SUMMARY .....	1
I. 서 론 .....	2
II. 재료 및 방법 .....	4
1. 시험편 .....	4
2. 시험기 .....	7
3. 실험 방법 .....	9
III. 실험 결과 및 고찰 .....	11
1. 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰계수의 변화 .....	11
1. 1 S45C의 마모 특성 .....	11
1. 2 TiO <sub>2</sub> 의 마모 특성 .....	17
2. 하중의 증가에 따른 마찰계수의 변화 .....	25
3. 마모량의 변화 .....	33
4. 마찰면의 SEM 관찰 .....	36
IV. 결 론 .....	42
V. 참고문헌 .....	43



# SUMMARY

This paper investigates of wear behavior for ceramic coated materials by the wear test of a pin on disk type wear testing machine in air and in lubrication. Test specimens are sprayed with titanium dioxide powder( $TiO_2$ ) on the carbon steel(S45C) by plasma thermal spray, and then it is tested of friction force, friction coefficient and the weight loss of the stator and the rotor by the change of slide velocities and loads

The results obtained are as follows ;

1. When S45C and  $TiO_2$  specimen are tested in dry friction and in lubrication, the friction force and friction coefficient of these specimens aren't change according to change of friction velocities, but increases by normal load.
2. When the slide velocity and load of S45C and  $TiO_2$  specimen change, the weight loss increases according to them in dry friction. But that hardly take place in lubrication.
3. When S45C and  $TiO_2$  specimen is tested dry friction in air, weight loss of the pin is little on S45C and is much on  $TiO_2$  because the hardness of  $TiO_2$  is very great. The adhesiveness onto friction area of  $TiO_2$  specimen is the larger in lubrication than that in dry friction. Minute wear powder adhered onto the surface of  $TiO_2$  specimen and that shows metallic color.

# I. 서 론

금속 재료는 항공, 우주, 해양, 신 에너지개발 등의 첨단 산업분야에서 일반 구조용 부품에 이르기까지 매우 다양하게 이용되고 있으며, 산업의 급속한 발달로 고온, 부식, 마모 등이 복합적으로 작용하는 가혹한 환경 하에서 이용이 가능한 기계적 특성이 뛰어난 소재의 개발이 절실히 요구되고 있다. 따라서 종래의 기계구조용 금속 재료로 가혹한 환경 하에서의 사용은 한계가 있으므로 신소재의 개발이 절실히 요구되어 지고 있으며[1], 최근에는 모재의 특성을 손상시키지 않고 모재의 표면에 내열성, 내부식성 및 내마모성 등의 탁월한 기능을 부여하는 표면개질 기술이 주목받고 있다.

표면 개질 법에는 습식법과 건식법으로 크게 나눌 수 있으며, 습식법은 액체 상태에서 각종화학 반응으로 재료의 표면에 석출되는 현상을 이용한 도금 법이며, 건식법은 다시 화학 증착( Chemical Vapor Deposition ; CVD)법과 물리 증착(Physocal Vapor Deposition ; PVD)법 및 용사법 등이 있다[2]. 물리 증착법은 코팅 층의 화학적 성분을 높은 에너지를 가지는 이온이나 전자 또는 중성자들의 집합체인 플라즈마 상태로 만들어 직접 모재의 표면에 화학반응을 일으키면서 코팅되도록 하는 방법이다[3]. 용사 법은 재료의 선택 범위가 다양하고 소재의 형상이나 치수의 제약을 덜 받으므로 종래의 공업분야에는 물론 우주, 항공, 전자 기기, 원자력 발전 등 첨단 공업 분야에도 그 적용범위가 확대되고 있으며, 다른 코팅 법에 비해 성분 분해 없이 플라스틱, 금속, 세라믹 등의 용융물질 대부분을 코팅할 수 있는 장점이 있다. 이중 세라믹은 다른 재료에 비하여 경도, 고온강도, 내마모성 및 화학 안정성이 우수한 특성을 가지고 있으나, 세라믹과 금속의 열팽창계수의 차이로 인해 용사피막의 잔류응력이 생겨 모재와 용사피막 사이에 중간층을 삽입할 필요가 있다. 따라서 여러 기계 부품의 수명 연장 및 효율성증대를 위해서 내마모성이 뛰어난 WC, Cr<sub>3</sub>, C, TiO<sub>2</sub> 등의 산화물을 Ni-4.5%Al을 결합제로 사용하는 것이 일반적이다.

세라믹은 일반 강에 비하여 밀도가 낮고 경도 및 압축 강도가 높으며 고온에

서도 양호한 기계적 성질을 유지한다. 또한 화학 반응에 대해서 안정되고 우수한 전기적, 열적, 자기적 특성들을 가지며 열팽창률이 작고 내열충격성, 내식성, 내마멸성이 뛰어나 각종 공구나 엔진, 가스터빈, 기계 부품 등의 특수한 환경 하에서 사용과 정밀 기기, 의료 기구의 구조 재료로서의 사용이 증가되고 있다. 또한 이러한 세라믹의 특성을 이용하여 접촉 운동을 하는 재료 표면의 내마멸성을 향상시키기 위한 방법으로 세라믹을 재료의 표면에 코팅하는 방법이 최근에 많은 연구의 대상이 되고 있다. 그러나 구조용 세라믹은 생산의 고비용과 특유한 기계적인 취성으로 인해 기계부품 재료로서의 응용은 제한된 범위에서만 이용되어져 왔다. 이에 최근에는 세라믹의 장점과 모재로 사용되는 강의 장점만을 취한 세라믹 코팅이 많이 이용되고 있다. 선진 외국에서는 이러한 단점을 보완하여 코팅의 기계적 특성 및 트라이볼로지적 특성을 향상시키기 위하여 본드 코팅(bond coating)을 적용하여 열팽창계수의 불일치 및 접착 강도를 개선하고 있으며 이에 대한 연구가 활발하다[4].

따라서 본 연구에서는 플라즈마 용사 법에 의해 기계구조용 탄소강(SM45C)의 표면에 Ni-4.5%Al을 결합제로 TiO<sub>2</sub> 코팅된 세라믹 코팅재의 대기 및 유풍환경 하에서의 마모특성을 조사하기 위하여, Pin on disk형 마모 시험기를 이용하여 하중 및 미끄럼 속도를 달리하여 이에 따른 마찰계수와 마찰력, 마모량 등의 변화를 SEM을 이용한 마모면 관찰과 함께 조사·검토하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험편

시험편은 고정 시험편과(Stator) 회전 시험편(Rotor)으로 구성되어 있으며 이들 시험편의 형상과 치수를 Fig.1에 나타냈으며 각 시험편의 화학 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 상부측 고정 시험편은  $\phi$  5mm의 핀(pin)으로서 고탄소 크롬 베어링강 SUJ II를 사용하였다 하부측 회전 시험편은 기계 구조용 탄소강(S45C)을 모재로 플라즈마 용사장치(METCO Inc.)를 이용하여 코팅하였다. 본드 코팅으로 Ni-Al14.5wt% 합금 분말을, 탑 코팅으로  $TiO_2$ 를 사용하였으며 코팅층의 두께는 본드 코팅이 약  $100\mu m$ , 탑 코팅은 약  $250\mu m$ 로 하였다. 코팅에 앞서 전 처리로 기재(S45C)의 표면에 블라스팅 처리를 하였으며, 블라스팅 조건 및 플라즈마 용사 조건을 각각 Table 2와 3에 나타내었다. 본드 코팅 분말과 탑코팅  $TiO_2$  분말의 조건을 Table 4에 나타내었다.

한편, 회전 시험편은  $\square$  90mm, 두께(t) 5mm의 사각형으로  $90^\circ$  간격으로 4개의 구멍을 제작하여 M10 볼트를 이용하여 시험기의 회전 테이블에 고정 할 수 있도록 하였으며, 접촉면을 연삭 가공하여 진실 접촉면(real contract area)을 좋게 하였다[5].

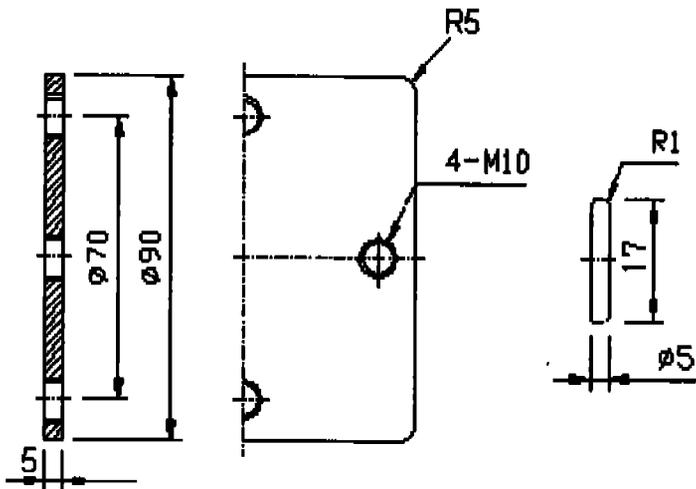


Fig. 1 Dimention of specimen(unit:mm)

Table 1. The chemical composition and mechanical properties of S45C

(a) Chemical composition (wt %)

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Cu
Rotor (S45C)	0.45	0.21	0.75	0.026	0.02	0.13	0.01
Stator (SUJ II)	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 <sup>3</sup>	Young' modulus GPa
Rotor (S45C)	390	670	25	-	-	-
Stator (SUJ II)	-	1568-1960	-	0.3	7.77	208

Table 2 Blasting conditions

Material composition	Powder size ( $\mu\text{m}$ )	Air pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Distance (mm)
White alumina	15 - 53	5.5	50 - 100

Table 3 Spraying conditions

condition Powder	Type 9MP powder feed Unit		Plasma gas (psi)		DC (A)	DC (V)	Spray distance (mm)
	Flow rate (ft <sup>3</sup> /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H <sub>2</sub>			
TiO <sub>2</sub>	13.5	53	80	15	500	65 - 70	75 - 100
Ni-4.5wt%Al	13.5	68	80	15	500	65 - 70	100 - 175

Table 4 Powder conditions

Condition Powder	Typical composition	Typical size range ( $\mu\text{m}$ )	Melting point
TiO <sub>2</sub>	Titanium dioxide 99% minimum	8 - 88 microns	1920°C
Ni-4.5wt%Al	Aluminum 4.5% Nickel balance	45 - 90 microns	660°C

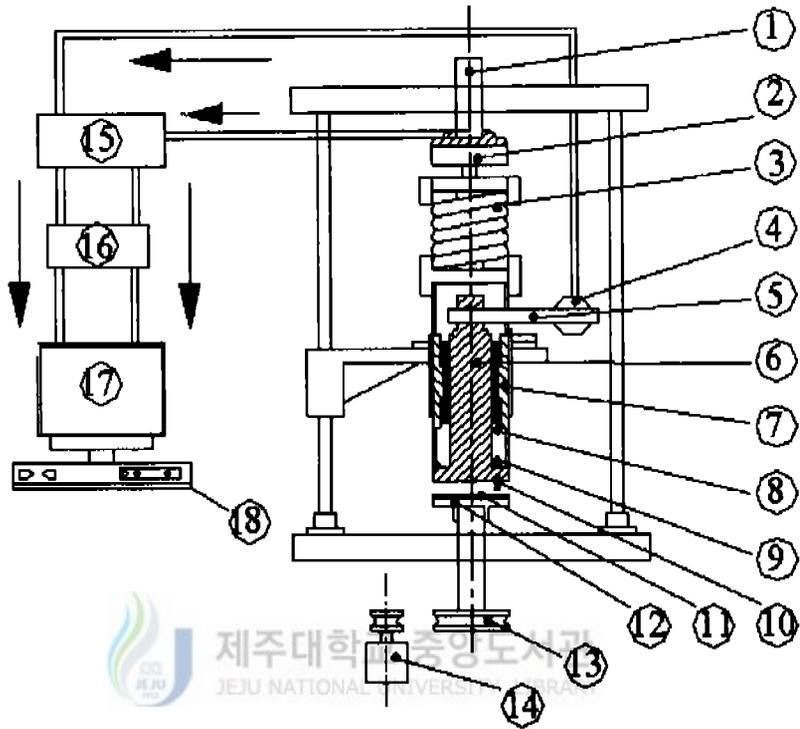
## 2. 시험기

본 실험에 사용된 시험기는 Fig. 2에 나타낸 Pin on disk형 마모시험기이다. 시험기의 자체의 고유 진동을 줄이기 위하여 중량이 무겁도록 재질을 선택하였고 스프링 부분은 스프링 상수가 서로 다른 이중 스프링을 사용하였다.

본 시험에 사용한 모터는 교류 저속 동기 모터(DKM EMPS, 대경 Mach Co.)로서 정회전, 역회전, 급가속, 급감속 시에도 오차가 전혀 발생하지 않으며, 변속 운전은 주파수 변환 장치에 의하여 회전수를 선택할 수 있으며, 전압의 변동하여도 회전수는 일정하다. 또 부하가 변하여도 Slip 현상이 없이 정속도 운전이 가능하다[6].

제어기로는 80486 마이크로 프로세서(micro processor)를 내장한 퍼스널 컴퓨터를 사용했다. 연 속계 신호와 이산계 신호를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A 변환기는 12 비트의 분해 능력을 가지는 Advantech 사의 PCL-812 PG를 사용했다. 하중과 마찰력을 감지하는 로드셀은 NTS 제품인 LCW-500 K 형으로 정격 용량이 5 KN이다. 로드셀에서 검출한 스트레인을 증폭해 주는 스트레인 앰플리파이어는 Kyowa 사 제품인 DPM-612 형으로  $\pm 5$  V의 용량을 가진다





- |                    |                  |                      |
|--------------------|------------------|----------------------|
| 1. Pressure handle | 2. Load cell     | 3. Coil spring       |
| 4. Load cell       | 5. Torque arm    | 6. Torque arm holder |
| 7. Pressure rod    | 8. Pressure ring | 9. Thrust bearing    |
| 10. Stator         | 11. Roter        | 12. Turnning table   |
| 13. Belt pulley    | 14. Moter        | 15. Strain amplifire |
| 16. A/D converter  | 17. Moniter      | 18. Computer         |

Fig. 2 Block diagram of friction testing machine

### 3. 실험 방법

마찰 형태는 고정 시험편(stator)인 핀(pin)에 접촉한 회전 시험편(rotor)을 회전시키면서 소정의 하중을 가하는, 면 접촉 미끄럼 마찰 형식인 pin on disk 형으로 상온 상압하에서 실험을 실시하였다. 실험 조건을 Table 5에 나타내는 바와 같이 하중 조건은 110N, 210N, 310N이며 110N일 때는 미끄럼 속도를 0.1m/s, 0.2m/s, 0.3m/s로 하였으며 또 210N과 310N일 때는 미끄럼 속도를 0.2m/s로 하였다. 미끄럼 속도를 달리해서 미끄럼 마찰거리는 각 속도마다 2 hr로 하였다. 실험 환경은 대기 중인 건조 미끄럼 마찰과 윤활 환경 속에서 실험하였다. 윤활은 회전 원판과 같이 회전할 수 있는 윤활유 챔퍼를 설치하여 윤활유 중에 고정 핀과 같이 회전할 수 있는 시험편이 완전히 침지된 상태에서 회전할 수 있도록 하였다.

윤활유는 API SJ급 7.5W/30(SK Co.)으로 양질의 것을 사용하였고 매 실험마다 윤활유를 교환하고 적정 윤활이 되도록 보충했다.

마모량의 측정은 시험 전후 시험편의 무게 차로 계산하였으며, 시험편은 초음파 세척기로 30 분간 초음파 세정, 탈지 및 건조의 과정을 거친 후, 시험편의 무게를 0.1mg까지 5회 측정하여 그 평균값을 이용하였다. 주사형 전자 현미경(SEM)을 이용하여 마찰에 의한 마모특성 및 마찰면 관찰을 실시하였다.

나재의 경도 값과 코팅 층의 경도 값을 마이크로 비커어스 경도기로 10회 측정하여 평균한 경도 값을 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 고정시험편의 경도값이 Hv 788로서 시험편들 중 가장 큰 경도값을 가지고 있다. 본드 코팅재로서는 Ni 4.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말을 사용하였고 본코팅에 사용한 세라믹은 TiO<sub>2</sub> 분말로서 화학적 성분을 Table 7에 나타내었다.

Table 5. Experimental conditions

Normal load (N)	110, 210, 310
Sliding speed (m/s)	0.1, 0.2, 0.3
Sliding times (hours)	2
Test temperature(°C)	25
Environment	in air, in lubrication

Table 6. Microhardness of specimens (Hv)

Substrate		Bond coating	TiO <sub>2</sub> coating
S45C	SUJ II		
260	788	261	768

Table 7. Chemical compositions of TiO<sub>2</sub> ceramic powder(wt%)

TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO
Bal	0.4	0.2	0.12	0.05	0.03

## IV. 실험 결과 및 고찰

### 1. 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰계수의 변화

#### 1. 1. S45C의 마모 특성

110N의 수직 하중을 가하여 S45C의 모재 시험편을 공기 중에서도 윤활 중에서 마찰 마모 실험한 결과 중 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰계수 및 하중과 마찰력의 변화를 Fig. 3과 - Fig. 5에 나타냈으며 Fig. 3은 미끄럼 속도가 0.1m/s이며 Fig. 4는 미끄럼 속도 0.2m/s, Fig. 5는 미끄럼 속도가 0.3m/s에서 실험한 것이다. 그림 가운데 Fig (a)는 공기 중에서 실험한 것이고 Fig (b)는 윤활 중에서 실험한 것이다. 각각의 그림에서 상단 선은 수직 하중을, 중간 선은 마찰력, 하단 선은 마찰계수를 나타내는 선이다. 그리고 미끄럼 되는 시간은 2hr로 일정 하게 하였다.

Fig. 3의 (a)를 보면 미끄럼 거리가 220m가 될 때까지 0.9의 높은 마찰계수를 보이면서 진행되다가 0.5 정도로 낮아짐을 알 수가 있고 0.6 정도의 값으로 정상 마모의 현상을 보이고 있다. 이것은 공기 중에서의 마찰 마모 실험을 행할 때 천이 점을 보이고 있는 것으로 초기의 마모 상태를 설명해 주고 있다. 서로 접촉하고 있는 상부 시험편인 stator의 경도가 Table. 6에서 나타난 것과 같이 788로서 하부 시험편인 rotor의 경도 260보다 월등하게 높게 나타나고 있다. 따라서 경도가 높은 stator가 상대적으로 약한 경도 값을 가진 rotor를 수직 하중 110N으로 밀면서 생긴 마모 분말을 퇴적시키다가 어느 시점에서 탈락되고 있음을 알 수 있다. Fig. 3 (a)그림에서 하단 선을 보면 약 60m와 110m, 130m정도에서 마찰계수가 갑자기 상승했다가 하강된 현상을 볼 수 있는데 급격하게 마찰계수의 상승과 그대로 정상상태를 보이는 등의 복잡한 거동을 나타내는 현상이었다. Fig. 4나, Fig. 5의 (a)그림 등에서 보이는 복잡한 마모 형태나 마찰 거동을 나타내는 요인으로서 접촉면 개재 물에 의한 영향이 고찰되었고 거기에 대해

서는 Godet나 Iwabuchi가 연구하여 발표된 제3의 개재물(Third body approach)에 의해서 설명할 수 있다. 제3의 개재물은 두 물체간에 접촉된 개재 물에 의한 것이며 본 연구에서는 마모 분말을 의미한다[7]. 이와 같이 천이 점을 지나고 정상상태인 마모가 진행이 되면서 마모 분말의 생성 응집, 밀집화, 퇴적층 형성이 연속적으로 생겨남을 볼 수가 있으며 이것이 접촉 경계면에 하나의 물체 양상을 보여 준다는 이론에 근거했다[8].

한편 마찰력도 마찰계수의 변화에 절대적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 결국 마찰 마모 시험 전과정에 걸쳐서 마찰력의 변화를 마찰계수의 변화와 아주 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4은 미끄럼 속도를 0.2m/s에서 Fig. 5은 미끄럼 속도를 0.3m/s로 마찰 마모 실험을 한 것을 나타내었다. Fig. 4에서 공기 중의 마찰계수를 나타내는 선을 살펴 보면 약 300m 부근이 천이점이 되고 있음을 알 수 있고 Fig. 5에서는 약 430m인 지점인 것을 알 수 있다. 이상에서 공기 중에서 미끄럼 속도가 0.1m/s - 0.3m/s로 증가하면서 천이 점은 220m, 310m, 430m로 길어짐을 알 수 있었고 초기 마모의 상태가 점점 더 증가하고 있음을 알 수 있었다.

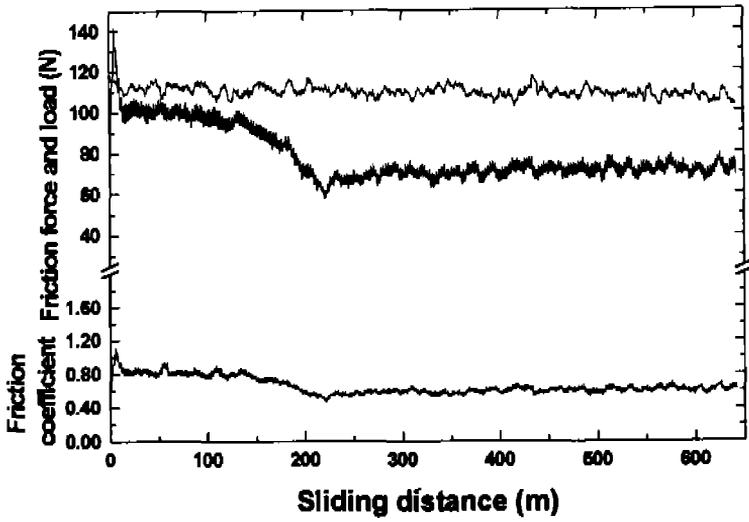
Fig. 5에서의 마찰계수를 살펴보면 상하로 굴곡이 심하다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 금속끼리 접촉해 있는 그 상태에서 미끄럼 속도가 빨라지게 되고 마모 분말의 생성이 더욱 빨라지게 됨으로서 퇴적되는 시간도 짧아지게 되고 따라서 탈락되는 시간도 더욱 빨라지게 된다. 것처럼 빠른 마모 분말의 생성에서 탈락에 이르기까지 접촉하고 있는 상대재의 금속 사이에는 마찰열이 반드시 생겨난다. 마찰열과 응착이라는 것이 섞여 응착 마모라는 형태로 설명할 수 있는데 응착 마모에서 마일드 마모(Mild friction)와 시비어 마모(severe friction)가 서로 뒤섞이는 경우가 적지 않다. 실제로 마모 분말을 보면 산화되어서 시커멓게 탄 모습을 보였다.

110N의 수직 하중에서 미끄럼 속도 0.1m/s에서 윤활 상태로 마찰 마모 시험한 것을 Fig. 3의 (b)에 나타내었다. 윤활 상태에서의 마찰 마모 시험에서는 공기 중에서의와는 전혀 다른 양상을 보여 주고 있다. 우선 특이하게 공기 중에서의와 같은 천이점이 없다는 것이고 있어도 마찰 마모가 시작되는 초기에 잠깐 있게되며 수직 하중, 마찰력, 마찰계수를 나타내는 것이 일정하다는 것이다[9]. Fig. 4의

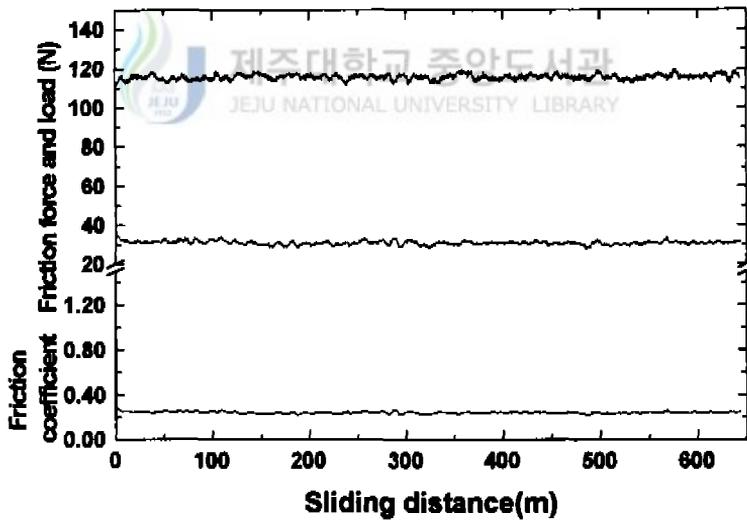
(b)와 Fig. 5의 (b)를 같이 보면 미끄럼 속도가 증가하면 할수록 수직 하중, 마찰력, 마찰계수를 나타내는 곡선이 약간의 진폭으로 움직여진다는 것뿐이다.

공기 중에서의 S45C인 시험편을 미끄럼 속도 0.1m/s - 0.3m/s에서 실험하여 그 마찰계수는 약 0.6 정도이고 윤활 중에서는 0.25로 거의 일정 하여서 Holm의 법칙 즉, 마찰력은 미끄러지는 속도에 무관하다라고 하는 것에 일치하고 있다. 마찰력의 변화가 마찰계수에 끼치는 영향을 보면 마찰계수의 변화도 미끄럼 속도에 무관하다는 것을 알 수 있을 것이다.



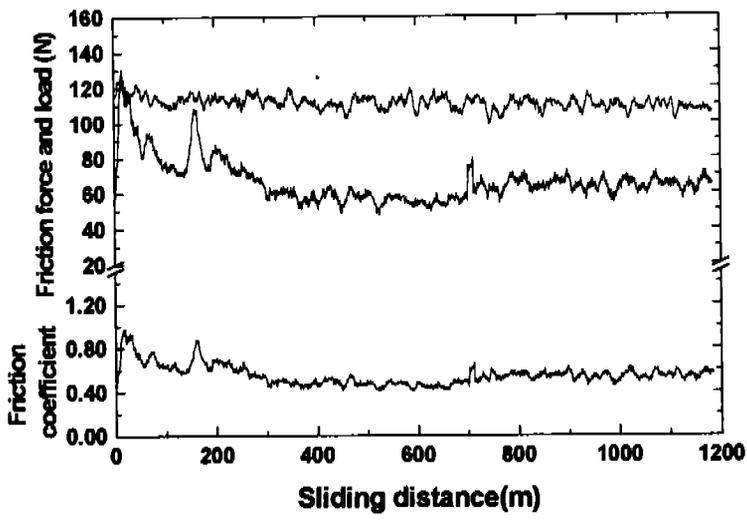


(a) in air

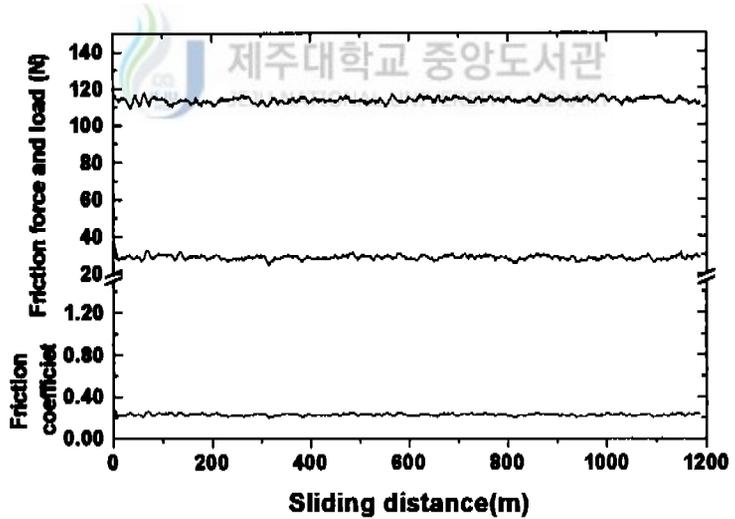


(b) in lubrication

Fig. 3 The friction coefficient of carbon steel S45C ( $V=0.1\text{m/s}$ )

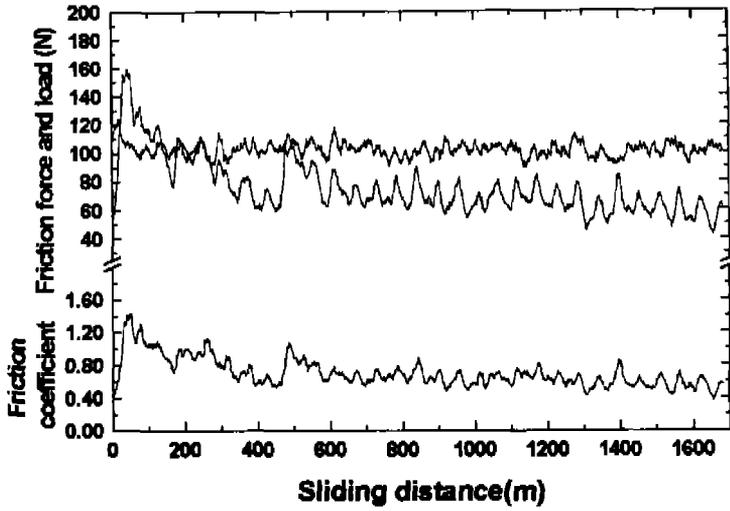


(a) in air

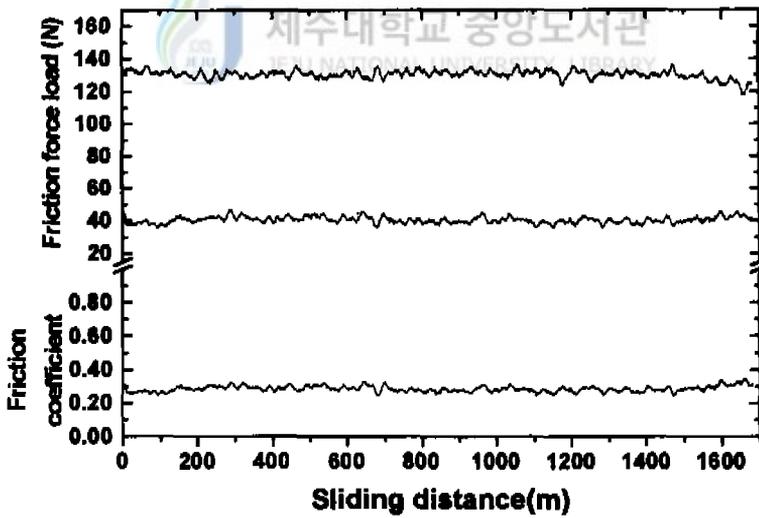


(b) in lubrication

Fig. 4 The friction coefficient of carbon steel S45C(V=0.2m/s)



(a) in air



(b) in lubrication

Fig. 5 The friction coefficient of carbon steel S45C( $V=0.3\text{m/s}$ )

## 1. 2. $TiO_2$ 의 마모 특성

S45C 기재 위에  $TiO_2$ 를 플라즈마 용사로 코팅한 시험편을 마찰 마모 실험하여 미끄럼 속도의 증가에 따른 마찰력의 영향과 마찰계수의 변화를 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타내 보였다. 그림에서 (a)는 공기 중에서 실험한 것이고 (b)는 윤활 중에서 실험한 것이다. 수직 하중 110N이 가해지면서 Fig. 6은 미끄럼 속도가 0.1m/s이고 Fig. 7은 미끄럼 속도 0.2m/s, Fig. 8은 미끄럼 속도가 0.3m/s이다. 여기에서 Fig. 6, 7, 8의 상단 선은 수직 하중을, 중간 선은 마찰력, 하단 선은 마찰계수를 나타내고 있다.

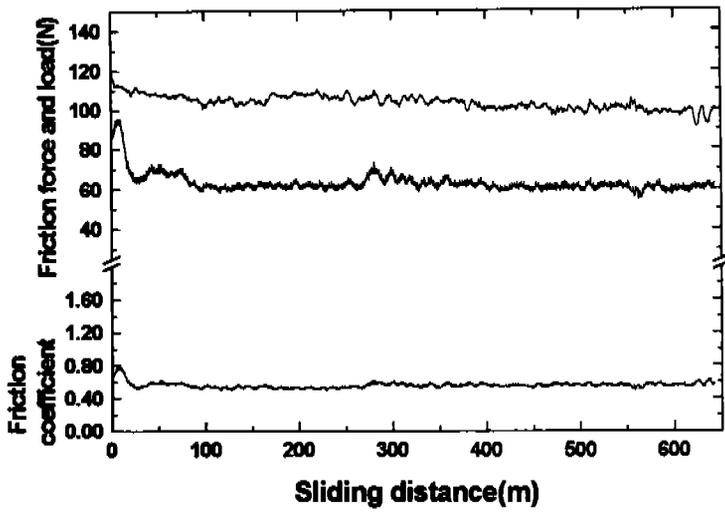
대기 중에서의 마찰력이 Fig. 6에서 보면 0.1m/s인 경우 약 65N 정도로 끝까지 일정한 값을 보이고 있으나 Fig. 7의 0.2m/s에서는 85N으로 비교적 일정하게 보이고 있고 미끄럼 속도의 영향으로 나타난 약간의 상하 진폭을 보이고 있다. 그러나 Fig. 8에서 미끄럼 속도가 0.3m/s가 되면서 사정이 많이 달라지게 되는 경향을 보여 주고 있다. 즉, 마찰력의 선도를 보면 500m 부근에서 초기마모와 정상마모가 이루어지는 천이점이 되고 있다. 100m에서 1차적으로 마찰력이 급속한 하강을 했고 다시 300m 부근에서 마찰력이 하강을 시작하여 500m되는 부근에서 최저의 마찰력을 보이고 있다.

이것은  $TiO_2$ 의 코팅층이 상부 시험편과 마찰 마모를 진행하면서 미세한 편이 마모 분말이 생겨나고 높은 경도 값을 가진 고탄소 크롬 베어링 강 SUJ II의 단면에 마모 분말을 응착 시키고 티타니아  $TiO_2$ 도 마찬가지로 응착 시키면서 지나가게 되는 즉, 전단력을 발생시켰다고 본다[10]. 뒤에서 이야기가 되겠지만 마모량을 보아도 0.1m/s에서 rotor 1.4mg, stator 14.1mg이고 0.2m/s일 때 각각 5.6, 22.9mg이며 0.3m/s일 때 11.3, 35.3mg이었다. 따라서 미세한 마모 분말이 응집되었다가 전단력에 의한 탈락으로 생각될 수 있다. 또 재료의 밀리는 현상이나 패이게 되는 현상과 함께 연식 마모와 응착 마모의 섞이는 형태로 볼 때 마찰계수가 약 0.6 - 0.9 정도에서 상승과 하강을 반복하고 있다고 생각할 수 있겠다.

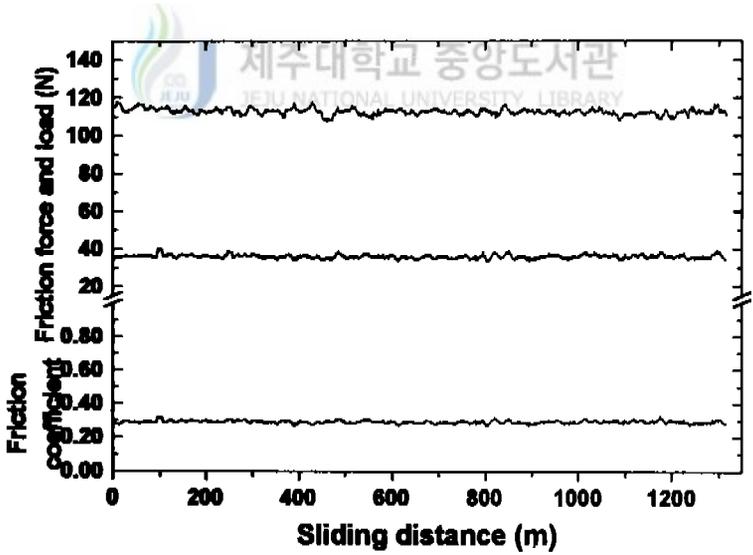
한편 마찰면의 온도 상승을 생각해 볼 수 있다.  $TiO_2$  세라믹 코팅한 면의 표면 돌기가 미세하게 많고 또 stator면은 평면이라고 가정을 해보면 접촉 면적이

극히 작기 때문에 이 두개가 미끄러지면서 접촉할 때 순간적으로 높은 온도가 발생 될 수 있다[11]. 이것은 극 표면만의 온도 상승이며 온도 상승에 의해 마찰 면이나 마모 분말에는 기계적인 성질이 변화되어 연결 화되거나 또는 표면이 산화됨은 물론 응착이 더욱 촉진 될 수도 있는 것으로 생각된다. 실제로 미세한 마모 입자가 검정 색으로 산화되었음도 확인할 수 있었다. 이것은 마찰력이 클 수록 큰 열을 발생한다고 생각되며 미끄럼 마찰인 경우 응착한 국부의 일그러짐도 열원으로서 생각되어 진다[12].

TiO<sub>2</sub>의 윤활 상태에서의 마찰 계수의 변화를 Fig. 6 - Fig. 8의 (b)에 나타냈다. 우선 Fig. 6은 0.1m/s로 마찰 마모 시험을 실시한 것인데 마찰력을 나타내 보인 중간 선을 보면 35N을 일정하게 나타내 보였지만 60m, 130m, 240 m, 400m 부근에서 3회 정도의 아주 작은 진폭이 나타나고 있다. 이것은 금속과 금속 사이에 유체 물질인 윤활유가 존재하여 직접적인 금속 접촉이 일어나지 않으므로 비록 적은 미끄럼 속도이긴 하지만 미세한 마모 분말들의 응집, 탈락되는 현상을 볼 수 있다. 미끄럼 속도가 0.1m/s일 때는 그 응집되었다가 탈락되는 현상이 띄엄띄엄 나타나지만 미끄럼 속도가 0.2m/s일 때의 Fig. 7과 미끄럼 속도가 0.3m/s일 때의 Fig. 8에서 보면 마모 분말들이 그 양은 매우 적지만 연속적으로 생성되었다가 응집하여 이내 탈락되고 있음을 볼 수 있다. 이상과 같이 윤활 도중의 TiO<sub>2</sub> 코팅 층의 마모는 110N의 수직 하중에서 0.1m/s, 0.2m/s, 0.3m/s의 미끄럼 속도에서의 마찰계수는 0.28정도로 변함이 없다고 본다.

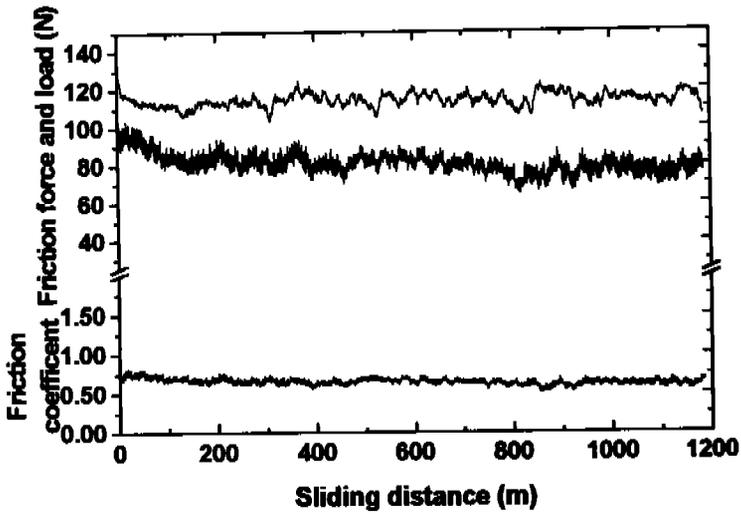


(a) in air

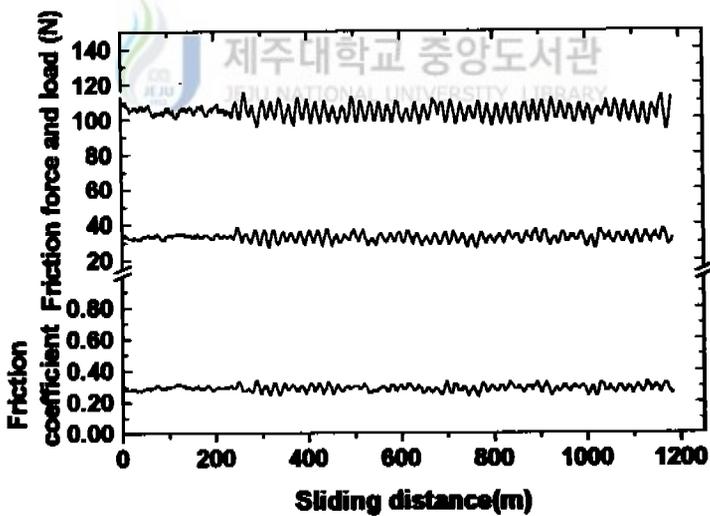


(b) in lubrication

Fig. 6 The friction coefficient of  $TiO_2$  coating( $V=0.1m/s$ )

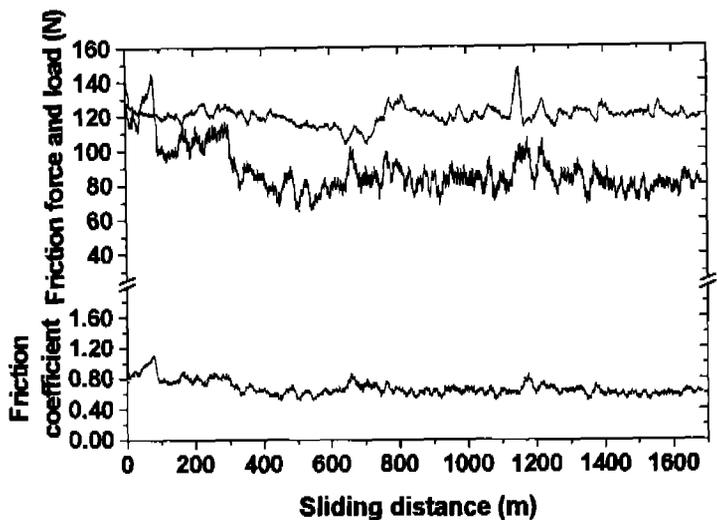


(a) in air

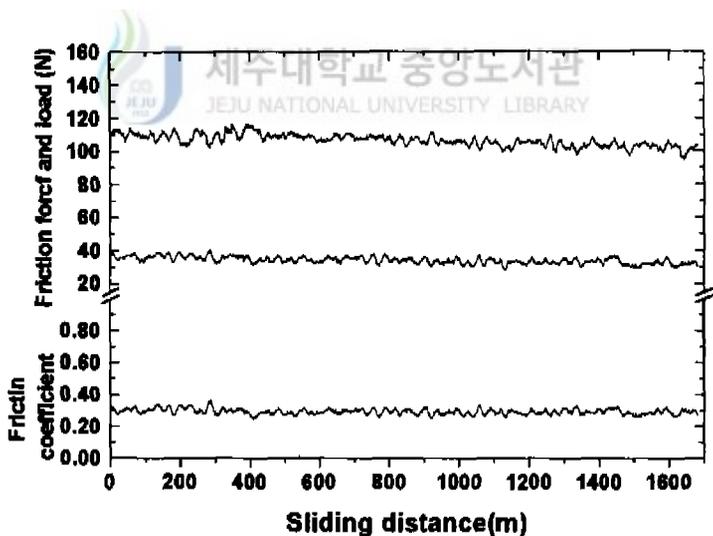


(b) in lubrication

Fig. 7 The friction coefficient of  $\text{TiO}_2$  coating( $V=0.2\text{m/s}$ )



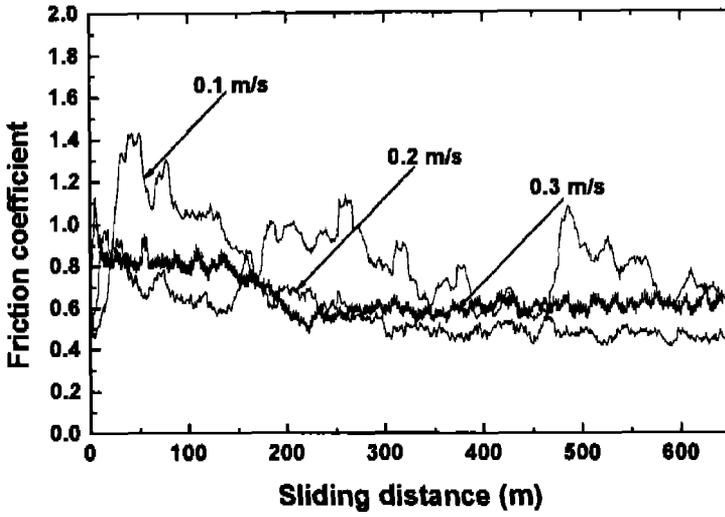
(a) in air



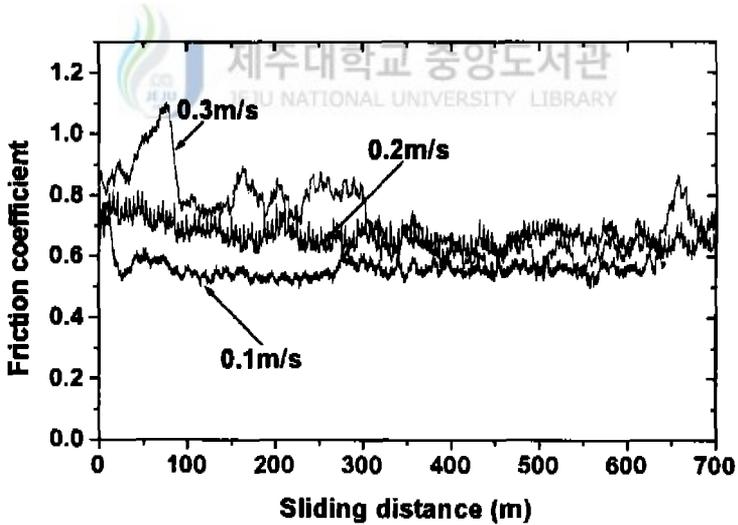
(b) in lubrication

Fig. 8 The friction coefficient of  $\text{TiO}_2$  coating ( $V=0.3\text{m/s}$ )

S45C와 TiO<sub>2</sub>시편을 수직 하중 110N, 대기 중에서 미끄럼 속도 0.1m/s - 0.3m/s로 시험했을 때의 마찰계수의 변화만을 Fig. 9에 나타냈으며 (a)에는 S45C이고 (b)는 TiO<sub>2</sub>를 시험한 것이다. 초기마모 쪽의 변화를 보기 위하여 미끄럼 마찰 거리를 650m까지 만을 보였다. 그리고 Fig. 10은 윤활 도중의 시험을 나타낸 것이다. Fig. 9 (a)에서 보면 초기마모의 정도를 보여주고 있는데 0.1m/s에서 보면 초기마모가 160m, 440m 및 590m정도로 세 번에 걸쳐서 이루어지고 있다. 초기마모는 마찰계수가 급격히 상승했다가 다시 감소하는 현상이 반복되는 것으로 S45C의 경우는 고정 핀의 심한 연삭이 발생하여 마모 분말이 커지고 있고 또 소음도 크게되었다. 따라서 600m부근에서 정상적인 마모가 시작되었다. 0.2m/s일 때는 상승과 하강이 반복되다가 260m부터 다시 정상마모가 시작이 되는 천이점이 시작되고, 0.3m/s에서는 220m정도에서 초기마모와 정상마모의 갈라지는 때로 볼 수가 있다. 미끄럼 속도가 빨라질수록 천이점이 길어지는 것은 미끄럼 속도의 인자에 의한 것이라고 생각된다[13]. 그리고 Fig. 9의 (b)의 TiO<sub>2</sub>에서 보면 고정 시험편의 정도와 비슷하게 회전 시험편의 정도가 상당히 높으므로 초기마모의 정도가 0.1m/s일 때는 30m정도, 0.2m/s일 때는 50m, 0.3m/s는 70m정도로 상당히 빨리 일어났다가 정상마모로 돌아갔다. 이것은 정도의 차이가 적음을 의미하며 미끄럼 속도가 0.1m/s일 때의 마찰계수가 0.59 정도로 낮은 것은 상대적으로 정도가 높은 회전 시험편 위를 고정 시험편이 천천히 들기 때문일 것으로 사료된다. 한편 윤활 도중에 S45C를 시험한 것은 Fig. 10 (a), TiO<sub>2</sub>를 시험한 것은 (b)에 나타냈으며 Fig. 10 (a), (b)의 값이 0.3 정도로 거의 같으며 초기마모의 경향도 보여주지 않고 있다. 이것은 제3의 물질이 접촉 상대면의 직접 접촉을 막아주고 있음을 설명해 주고 있다.

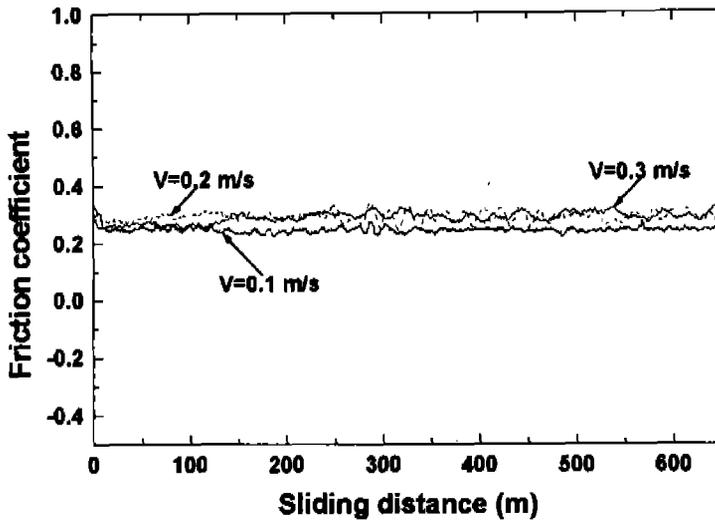


(a) S45C (load=110 N)

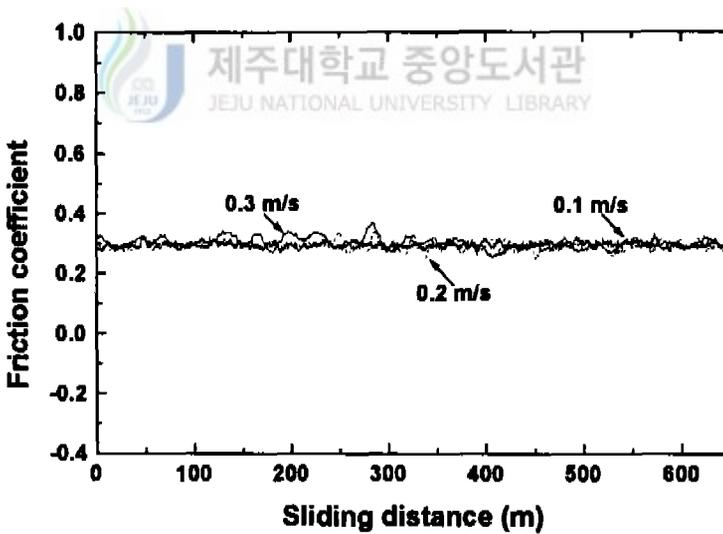


(b) TiO<sub>2</sub> (load=110 N)

Fig. 9 Friction coefficient vs. sliding distance (in air)



(a) S45C (load=110 N)



(b)  $\text{TiO}_2$  (load=110 N)

Fig. 10 Friction coefficient vs. sliding distance(in lubrication)

## 2. 하중의 증가에 따른 마찰계수의 변화

S45C의 수직 하중의 변동에 따르는 마찰력, 마찰계수의 변화를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었으며 각각의 그림에서 공기 중에서의 실험은 (a)에 나타냈고 윤활 중에서의 실험은 (b)에 나타냈다. 미끄럼 속도를 0.2m/s로서 210N의 수직 하중을 가한 것을 Fig. 11에 나타냈으며 310N의 수직 하중을 가한 것을 Fig. 12에 나타냈다. (a)와 (b)의 그림에서 상단 선은 수직 하중을 나타냈고 중간 선은 마찰력, 하단 선은 마찰계수의 변화를 나타냈다.

Fig. 11 (a)에서 건조 마찰인 경우 마찰력이 약 50m 부근에서 급상승을 했다가 140 - 150m 부근에서 급속도로 하강하는데 그 커브가 250N에서 130N에 이르고 있다. 따라서 마찰계수도 1.0을 조금 넘어 섰다가 약 0.6으로 떨어지는 결과를 보였는데 이것은 초기 마모가 매우 심하였음을 말해 주고 있다. 일반적으로 건조 마찰의 경우에 마모의 초기 단계로서 마모 분말이 매우 빠르게 생성이 될 뿐만 아니라 결국 마모 량도 급속도로 많아짐을 말해 주고 있다. 또한 서로 찢겨짐이라든지 연삭현상(plowing)에 의한 어브레시브 마모(abrasive friction) 마모를[14] 보여 주기도 한다. 따라서 연삭 작용에 의해 모재로부터 분리된 칩(chip)이 상대 마멸 재에 응착되고 다시 연삭 작용을 일으키는 들기로 작용하기 때문에 마멸 량은 급증하게 된다. 이렇게 마모 분말이라는 제 3의 물질이 생성이 되고 그 미세한 입자들이 모여서 어느 정도의 퇴적되어 있다가 stator의 미는 힘이라든지 rotor에 의한 회전력에 의해서 전단력이 발생하여 입자들이 탈락되는 현상이 매우 짧은 시간 내에 이루어짐을 알 수가 있겠다. 초기 마모를 지나서 즉 천이 점을 지나면서 마찰계수는 점점 상승을 하다가 다시 하강을 하는데 그 사이에 미세한 마찰계수의 상승과 하강이 계속되고 있다. 마찰력을 나타내는 선도와 마찰계수 선도 둘 다 모두 선의 굴곡이 심해서 마찰력이 심하게 변화되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12에서 (a) 그림을 보면 마찰력이 330N에서 급격하게 상승을 하였다가 220N으로 급속도로 하강한 것이 50m 부근에서 이루어 졌음을 볼 수 있다. 따라서 마찰계수도 역시 약 0.98로 상승하였다가 0.6으로 하강을 한 뒤에 점차로 200m에 이르기까지 0.88부근으로 상승을 하였다가 다시 이 실험이 끝날 때까지

점차로 감소를 하고 있다. 이것은 뒷부분에 SEM 사진을 보면 알겠지만 응착 현상도 보여 주고 있으며 마찰력, 마찰계수를 나타내는 선이 상승과 하강을 주기적이고 연속적으로 계속되고 있음을 알 수 있으며 뒷부분으로 갈수록 그 상승과 하강되는 선도가 커지고 있음을 알 수 있겠다. Fig. 11의 윤활 상태 중의 (b)와 Fig. 12에 (b)를 보면 마찰계수가 0.16, 0.18로 거의 일정하게 똑 같아짐을 볼 수 있다.

대기 중에서 수직 하중을 210N으로 하고 S45C의 위에  $TiO_2$ 를 코팅한 회전 시험편(rotor)에 마찰 마모 실험한 것과 윤활 도중에서 수직 하중이 195N으로 실험한 것을 Fig. 13 (a)과 (b)에 나타냈다. 미끄럼 속도는 0.2m/s로 일정하게 했다. Fig. 13 (a)에서 마찰력의 거동을 보면 100m 부근에서 급격하게 하강을 했다가 700m에서 1000m까지 약간 하강을 하였다. 이것은  $TiO_2$ 의 강한 경도에서 원인이 되는 것 같다.

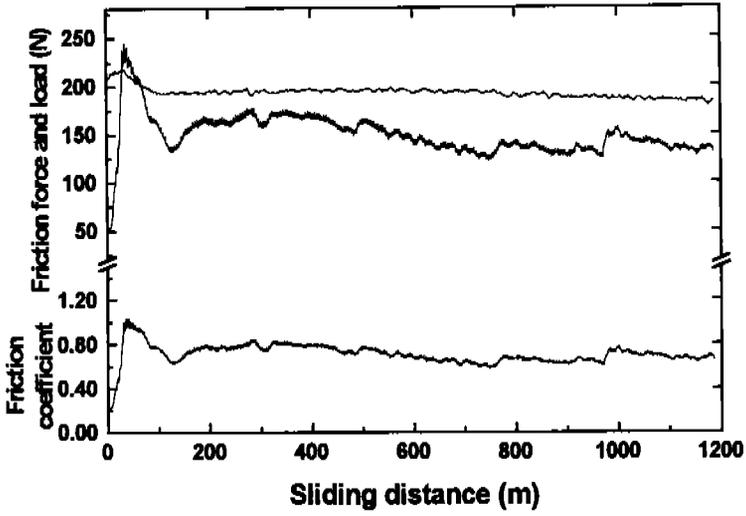
마찰계수의 거동을 보면 마찰력과 거의 같은 변수를 가지고 진행되었다. 이것은 상대 재인 고탄소 크롬 베어링강(SUJ II)과  $TiO_2$ 를 마찰 마모를 시킨 결과로서 비커어스 경도가 비슷하여 응착 마모의 전형적인 모습을 볼 수 있었다. 마모량의 비교에서도 알 수 있듯이 회전 시험편인  $TiO_2$ 보다 고정 시험편이 훨씬 마모가 되어져서 핀(pin)의 응착 마모라고 생각된다. 또 건조 미끄럼 마찰 마모에서 응착의 효과로 마찰열을 들 수가 있는데 본 연구에서도 미세 분말이 탈락이 되면서 검정색으로 산화되어 마찰열의 효과라고 생각할 수 있었다. 한편 Fig. 13 (b) 윤활 도중에서의 실험한 것을 보면 수직 하중과 마찰력 및 마찰계수를 나타내는 선도가 약간의 진폭을 보일 뿐이어서 마찰과 마모에서 윤활의 효과를 알 수가 있고 마찰열의 영향을 거의 볼 수가 없었다.

Fig. 14 (a)과 (t)는 수직 하중만 310N으로 실험한 것을 나타냈다. 마찰력의 거동을 살펴보면 수직 하중이 너무 세기 때문에 나타난 선도가 300m의 제 1기로 볼 수 있고 300m - 1000m를 제 2기로 보고 마지막으로 끝까지를 제 3기로 볼 수 있겠다. 각 기마다 마찰력이 감소하고 나아가서 마찰계수도 마찬가지로 영향을 받는다.  $TiO_2$ 를 실험하면서 볼 수 있는 것으로 고정 핀의 마모량이 더욱 많았으며 마찰열도 매우 높게 생성되었다고 본다. Fig. 14 (b)를 보면 수직 하중이 300N이고 마찰력 60N이며 마찰계수는 0.22로서 Fig. 13 (b)보다 마찰계수가 조

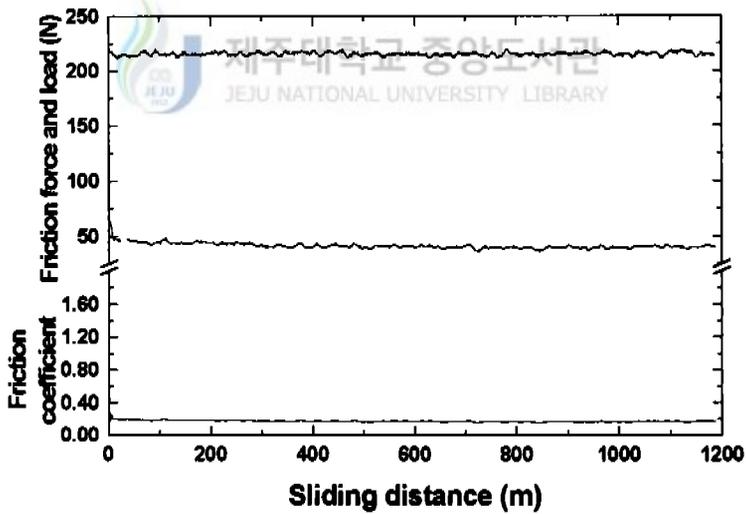
금 낮았으며 각각 나타내는 선도의 진폭도 많이 평활 해졌다.

S45C와  $TiO_2$  시험 편을 210N 및 310N으로 대기 중에서도 윤활 도중에서 실험한 것을 Fig. 15에 나타내 보였다. S45C의 실험에서는 210N이나 310N의 하중을 가했을 때 마찰계수는 비슷한 값을 보였으나  $TiO_2$ 는 하중이 증가할수록 마찰계수는 감소하였다.



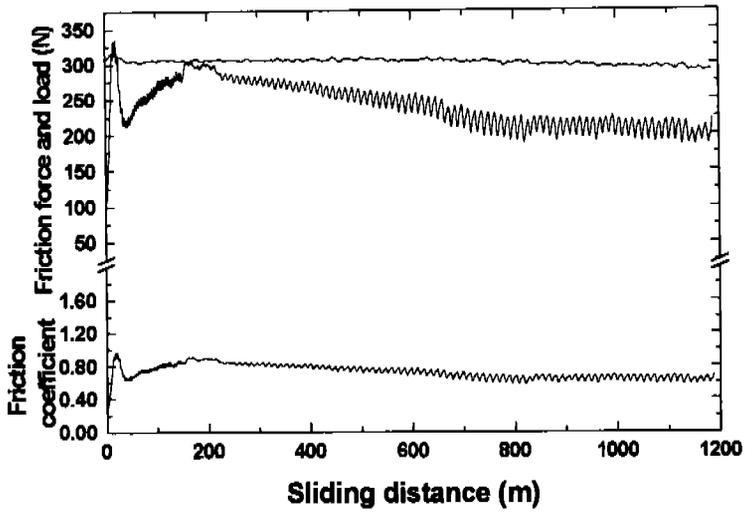


(a) in air (load=210 N)

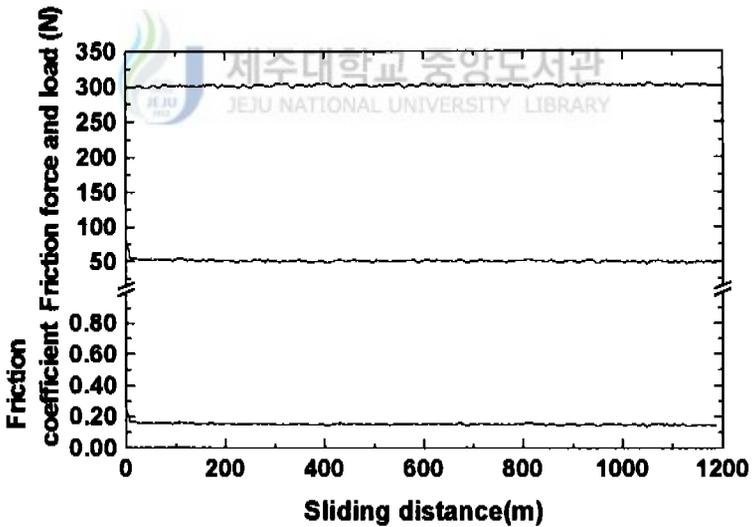


(b) in lubrication (load=210 N)

Fig. 11 The friction coefficient of carbon steel S45C( $V=0.2\text{m/s}$ )

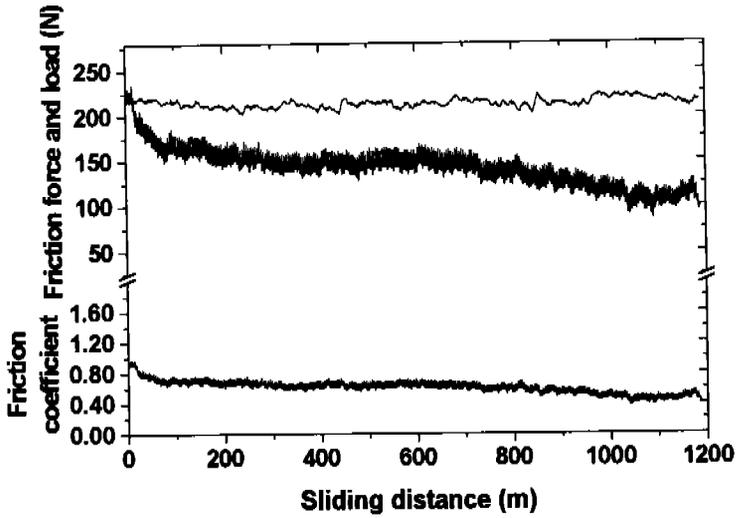


(a) in air (load=110 N)

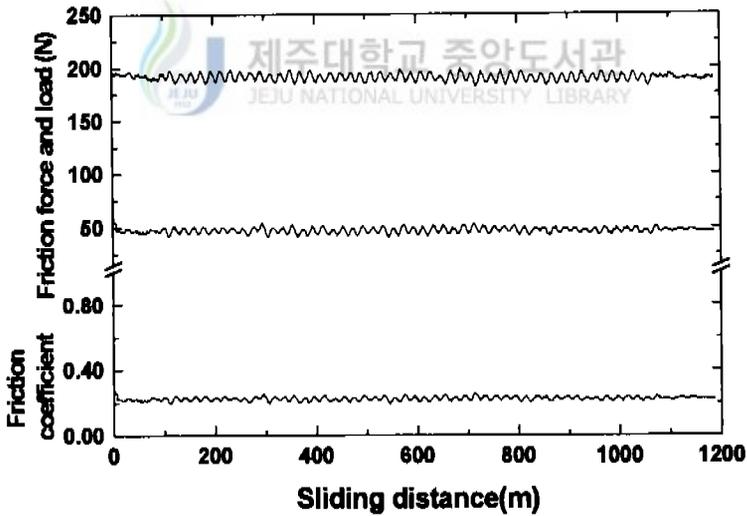


(b) in lubrication(load=110 N)

Fig. 12 The friction coefficient of carbon steel S45C( $V=0.2\text{m/s}$ )

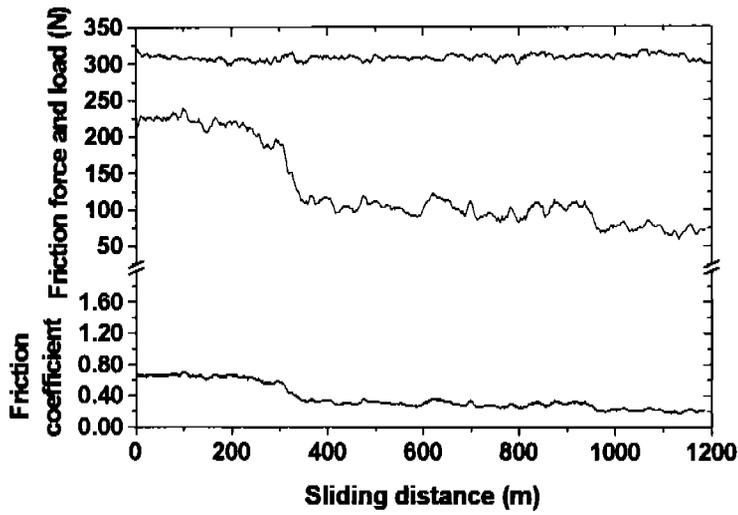


(a) in air (load=210N)

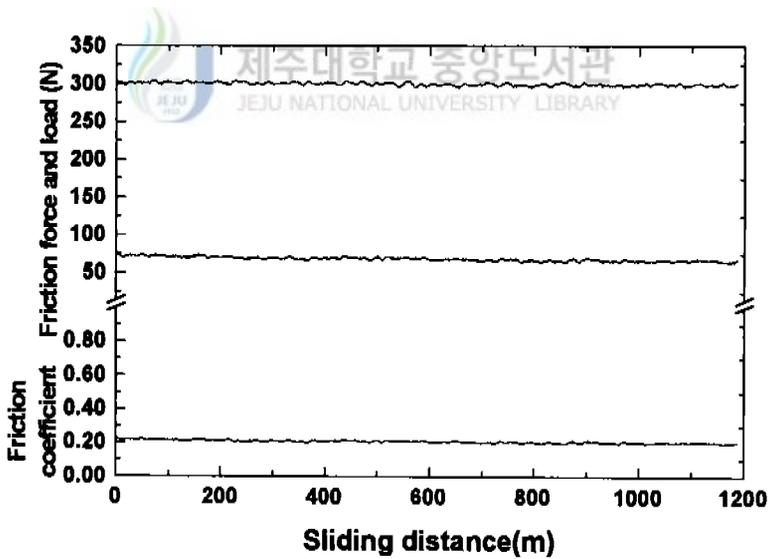


(b) in Lubrication(load=210N)

Fig. 13 The friction coefficient of  $\text{TiO}_2$  coating( $V=0.2\text{m/s}$ )

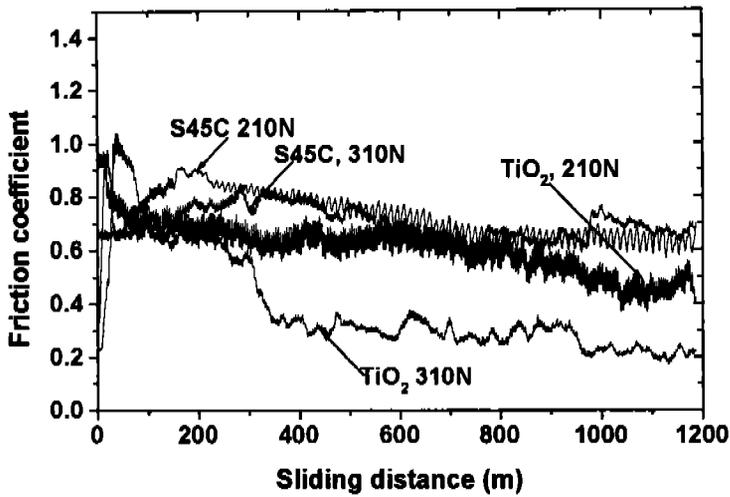


(a) in air(load=310N)

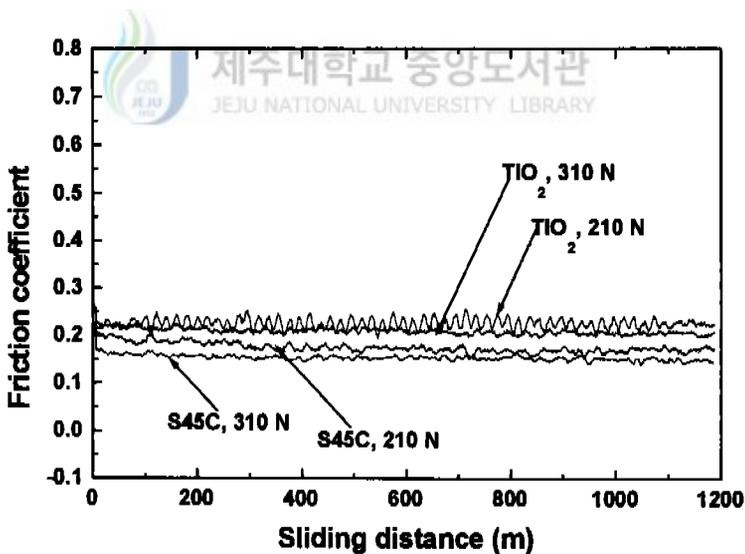


(b) in Lubrication(load=310N)

Fig. 14 The friction coefficient  $\text{TiO}_2$  coating( $V=0.2\text{m/s}$ )



(a) in air



(b) in Lubrication

Fig. 15 Friction coefficient vs. sliding distance(0.2m/s)

### 3. 마모량의 변화

Fig. 16은 미끄럼 거리에 따른 마모 량의 변화를 나타낸 것이다. rotor인 하부 시험편인 S45C 시험편을 stator인 상부 시험편인 SUJ II에 의해 110N의 하중을 가한 상태에서 미끄럼 속도가 0.1m/s - 0.3m/s에서 마찰을 시켜 마모 량을 측정하였고 공기 중에서도 윤활 환경 하에서 실험하여 그 마모 량을 비교 검토하였다. 실험 전에 시험편인 rotor와 stator를 아세톤 초음파 세척을 실시하고 세정 탈지하여 완전히 건조시킨 후 100mg까지 측정이 가능한 전기식 저울로 5회 측정하고 그 평균값을 실험 전 중량으로 하였다. 실험 후에도 같은 방법으로 실험 후 중량 측정하여 그 차이를 마모 량으로 하여 비교 검토하였다.

대기에서의 S45C의 모재 하부 시험편인 경우 미끄럼 속도가 0.1m/s일 때의 마모 량이 144.5mg이고 0.2m/s일 때는 623.6mg, 0.3m/s일 때 743.7mg이었다. 이것은 우선 Table. 6에 보면 고탄소 크롬 베어링 강외의 비커어스 경도가 788로서 S45C의 260보다 약 3 배 정도로 높다는 것을 말해주고 있으며 경도가 매우 높은 금속과 낮은 경도의 두 금속이 서로 상대 재로서 마찰 마모시켰을 때 경도가 높은 금속에서는 마모 량이 거의 없다시피 되고 단지 금속의 표면을 깨끗이 닦아내는, 일종의 버핑 또는 폴리싱(Buffing or polishing) 현상만 있어진다고 생각된다[15]. 따라서 고정 시험편인 stator의 마모 량은 앞에 이야기 한 것처럼 버핑과 같은 현상만 있고 거기에 반해서 경도가 상대적으로 낮은 S45C인 경우에 미끄럼 속도가 증가할수록 그 마모 량도 역시 증가하고 있다는 것을 말해주고 있다. 한편 S45C 모재를 실험을 0.3m/s로 하였을 때 윤활 도중의 회전 시험편인 rotor의 마모 량이 공기 중에서의 SUJ II인 stator의 마모 량 보다 조금 많다는 것도 동일한 이유라고 생각된다.

Fig. 17에서 TiO<sub>2</sub>를 코팅한 시험편을 대기 중에서도 윤활 도중에 미끄럼 속도를 달리해서 마찰 마모 시험을 하여 마모 량의 변화를 나타내었다. 여기에서 고정 시험편인 stator 고탄소 크롬 베어링 강을 대기 중에서 실험한 것을 보면 미끄럼 속도가 0.1m/s일 때는 14.1mg의 마모 량을 보였으나 미끄럼 속도가 0.2m/s이면 22.9mg이며 0.3m/s일 때 35.3mg이었다. 이것은 바로 앞에 말한 미끄럼 속도가 증가할 수록 마모 량도 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기에 반해서 회전

시험편인  $TiO_2$ 를 코팅한 코팅 재의 마모 량의 변화는 0.1m/s에서는 1.4mg이며, 0.2m/s에서는 5.6mg이고 0.3m/s일 때 11.3mg이다. 이것은 SUJ II의 정도 값이 Table. 6에 보면 788이고  $TiO_2$ 의 값은 768로 비슷한 값이고 SUJ II인 고정 시험편이 하부 시험편인  $TiO_2$ 를 코팅한 시험편과 두 상대 재인 금속의 미세한 마모 분말이 생기고 그것이 퇴적되다가 탈락이 되는 바로 응착이라는 현상을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 16에서 S45C의 모재에서는 너무 정도의 차이가 나기 때문에 심한 마모가 모재에서 생기는 것으로 응착과 연삭이라는 현상을 볼 수 있지만 Fig. 17의  $TiO_2$ 에서의 실험에서는 두 개의 금속중 SUJ II인 고정 시험편이 응착 마모라고 생각된다. 결국 고정 시험편의 응착되어 진행한다는 것을 알 수 있다. 그림에서 잘 나타나고 있지만 결국 공기 중에서의 실험한 것을 보면  $TiO_2$ 의 회전 시험편의 마모량이 적고 SUJ II인 고정 시험편의 마모량이 크게됨을 설명해 주고 또 0.1m/s~0.3m/s으로 미끄럼 속도가 증가 할 수록 마모량도 공기 중에서는 점점 커져감을 볼 수 있고 윤활 도중에서는 stator의 마모량이 미끄럼 속도가 0.1m/s일 때는 0.4mg, 0.2m/s일 때 0.7mg이고 0.3m/s일 때 1.4mg으로 증가의 폭이 매우 미미하다.  $TiO_2$ 의 회전 시험편  $TiO_2$ 의 마모량을 보면 0.6mg, 1.0mg, 1.1mg 정도로서 미끄럼 속도가 변화하더라도 매우 적은 양이어서 큰 변화가 없다고 고찰된다.

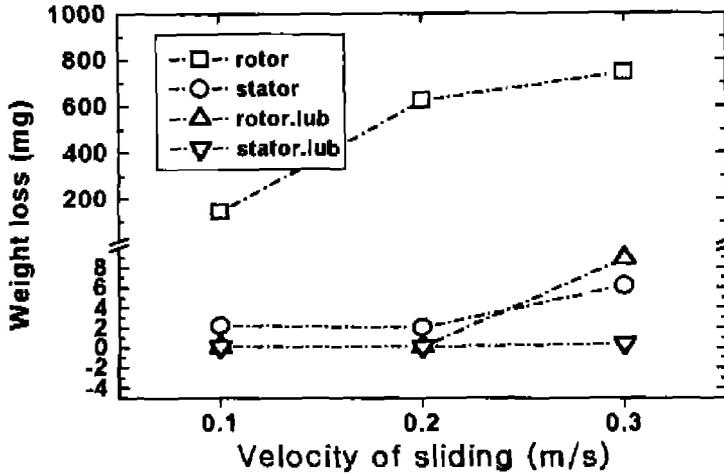


Fig. 16 Relation of weight loss and velocity of sliding(load 110N, material S45C)

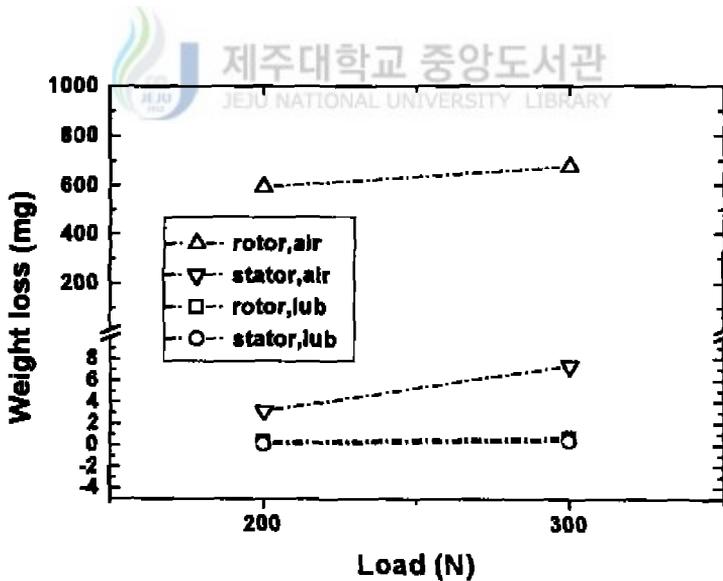


Fig. 17 Relation of weight loss and load(material TiO<sub>2</sub>)

#### 4. 마찰 면의 SEM 관찰

Fig. 18은 대기 중에서의와 윤활 환경 중에서  $TiO_2$ 를 코팅한 시험편과 S45C 모재 시험편을 미끄럼 속도 0.2m/s, 수직 하중 110N으로 실험을 실시한 후의 마찰면을 SEM 사진으로 비교한 것이고 Fig. 19는 수직 하중 110N에서 미끄럼 속도 0.3m/s로 실험한 후의 마찰면을 비교한 SEM 사진을 나타내 보였다. 여기에서 Fig. 18, Fig. 19의 (I)은  $TiO_2$ 와 S45C 모재를 대기 중에서 실험한 것이고 Fig. 18, Fig. 19의 (II)는  $TiO_2$ 와 S45C 모재를 윤활 환경 중에서 실험한 것이다. Fig. 20은 대기 중에서  $TiO_2$ 를 코팅한 시험편과 S45C 모재 시험편을 수직 하중 210N으로 누르고 미끄럼 속도를 0.2m/s로 실험한 후의 마찰면 SEM 사진을 Fig. 20의 (I)로 나타냈으며 미끄럼 속도 0.3m/s인 SEM 사진을 Fig. 20의 (II)에 나타냈다. 각 Fig의 (a), (c)는  $TiO_2$ 를 나타냈고 각 Fig의 (b), (d)는 S45C의 모재를 나타냈다. SEM 사진을 찍기 전에 각각의 모든 시험편을 초음파 세척기로 30분 동안 실시하여 완전 탈지, 탈유 시켰다.

Fig. 18 (I)의 (a)와 Fig. 19 (I)의 (a)를 보면 건조 미끄럼 마찰에 있어서 세라믹 재  $TiO_2$ 의 마찰 마모의 한 현상을 볼 수가 있다.  $TiO_2$ 를 코팅한 표면은 미소한 돌기들로 꼭 차있다. 반면에 그 상대재인 고탄소 크롬 베어링 강 SUJ II는 금속 면이며 경도는  $TiO_2$ 가 768이고 SUJ II는 788이었다. SEM 사진을 보면 알 수 있듯이  $TiO_2$ 는 코팅한 면 그대로이고 SUJ II만  $TiO_2$  코팅한 면 위에 군데 군데 붙어져 있는 현상을 볼 수 있어 약간 경도의 차가 있지만  $TiO_2$ 는 약간 마모가 있겠지만 마모가 전혀 없고 단지 SUJ II만 갈린 것을 볼 수 있다. 결국  $TiO_2$ 와 SUJ II가 서로 상대 재로서의 마찰 마모를 실시한 경우에  $TiO_2$ 는 경도 차이가 작고 10 - 53 $\mu$ m의 미소 돌기로 인하여 마찰 면이 그대로 인 반면에 상대재인 SUJ II가 많이 움푹이 되었다고 생각된다. 앞 절에서 말한바와 같이 마모량을 설명한 내용 가운데에 0.1m/s일 때 SUJ II는 14.1mg이며 0.2m/s일 때는 22.9mg이며  $TiO_2$ 는 0.1m/s일 때 1.4mg, 0.2m/s일 때 5.6mg에서도 잘 설명해 준다. 따라서 SEM 사진에 의하면 SUJ II가  $TiO_2$  표면 위에 마모분말이 발생되고 이것이 밀집화 되면서 나중에는 탈락이 되고 있다. 따라서 SUJ II의 마모분말과  $TiO_2$ 의 미세 분말이 미소하지만 서로 섞이어 더욱 SUJ II의 표면을 마모시키는 것이라

고 생각된다. 또한 SUJ II가 용착된 현상을 볼 때 검은색을 띠고있는 것은 마모 분말이 생성되고 밀집화 될 때 발생하는 마찰열 때문이라고 고찰된다. Fig. 20 (I)의 (a)와 Fig. 20 (II)의 (c)에서 수직 하중 210N이고 미끄럼 속도 0.2m/s 와 0.3m/s일 때의 SEM 사진을 보면 지금까지의 양상이 더욱 심하다는 것을 볼 수가 있다. 이것은 용착과 마찰열이 더욱 심해진다는 것을 의미한다.

윤활 도중에서의 마찰 면을 보면 용착이라는 면은 똑 같지만 용착되어진 두께가 대기 중에서 보다 좀더 얇아지고 면적은 더욱 늘어났으며 용착된 면의 색깔도 거의 변하지 않았다. 이것은 윤활작용 중에서 냉각작용이 크게 작용했다고 본다. 용착이라는 면에서 볼 때 두께가 얇아졌다는 것은 마찰과 마모를 감소시키는 작용도 크게 볼 수가 있으며 두개의 다른 면이 서로 접촉을 하는데 윤활이라는 점에서 3 개의 면이 작용되어 진다고 고찰된다. 면적이 늘어난 것은 마모 분말이 생성되어서 응집되고 탈락되는 속도가 매우 늦어짐을 의미하고 있다. 또한 SUJ II의 색깔이 거의 변하지 않았다는 것은 마찰열이 있어도 거의 미미함을 뜻하고있다.

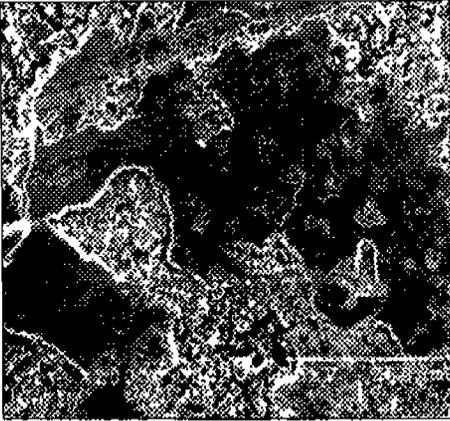
Fig. 18 (I)의 (b)와 Fig. 19 (I)의 (b)에서 회전 시편 S45C와 접촉된 고정 시편 SUJ II와의 SEM 관찰한 사진이다. Table 6에서 말한 바와 같이 S45C의 경도는 260으로  $TiO_2$ 의 768에 비해서 훨씬 낮음을 미리 말한 것과 같다. 결국 경도가 월등하게 높은 SUJ II에 의해 S45C의 모재를 크게는 연삭 마모가 진행됨을 명확하게 알 수가 있다. 앞 절에서도 말한 바와 같이 고정 시편인 SUJ II의 마찰 면은 2mg으로 거의 마모의 흔적은 없고 회전 시편 S45C의 마찰 면은 623.6mg이었다. 여기에서 미세한 마모 분말로 밀집되어 지나간 흔적을 발견할 수 있는데 이런 것이 결국은 마찰 면에 육안으로도 거친 상태나 골(ploughing)을 만들고 마찰이 계속 진행되면서 주로 S45C에서 생긴 미소한 마모 분말이 응집된 것이 굵은 줄무늬와 함께 뜯겨 나가거나 파여진 흔적을 발견할 수 있었다. Fig. 20 (II)의 (d)에서 보면 홈(groove)이나 덩어리 상태(cluster)를 만들어내고 있음도 관찰이 되었다[17]. Fig. 19 (I)의 (b)에서도 퇴적되던 마모 분말이 붙어있는 덩어리 상태를 볼 수가 있고 마모 분말이 밀집된 힘에 의해서 S45C의 표면에 파여진 부분도 발견할 수가 있었다. Fig. 18 (I)의 (b)에서는 근본적으로 연삭 마모에 의해 생겨날 수밖에 없는 마모 분말이 S45C 모재의 마모 분말이

밀집이 되었다가 탈락하는 과정에서, 탈락이 전부 일어나지 않고 경도가 월등하게 높은 상대 시편인 SUJ II에 의해 응착 되어 있는 것을 볼 수가 있다.

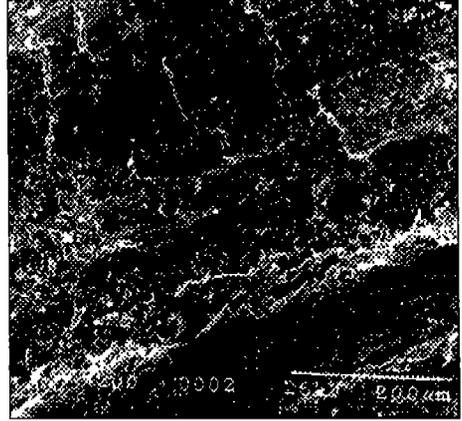
결국은 이런 대기 중에서 마찰과 마모라는 관점에서 경도가 2배 이상 차이가 있을 때는 대부분 경도가 낮은 재료의 마모 분말이라는 것이 생성되고 밀집되면서 탈락이 되는 과정에서의 마모 분말에 의한 마모 즉, 입자 마모라고 고찰된다.

Fig. 18 (II)의 (d)와 Fig. 19 (II)의 (d)에 윤활 하에서의 마찰 마모 실험을 한 뒤 마찰면을 관찰한 SEM 사진이다. 대기 중에서의 마찰 시험을 한 것과 비교해보면 연삭 마모 또는 응착의 현상은 찾아 볼 수가 없었다. 단지 가느다란 머리카락과 같은 것이 연속적으로 줄무늬가 있는 것을 관찰할 수가 있었다. 대기 중에서 비교해서 마모 분말이 매우 적게 생기고 윤활이라는 중간적 접촉점이 있어서 서로 상대하는 면에 미소한 마모 분말의 작용이 될 때 수직 하중, 미끄럼 속도가 매우 적다는 것을 의미한다. S45C의 모재에서 미소한 마모 분말이 매우 적게 생긴 것이 어느 정도는 탈락이 되고 미량만 남아 있어서 S45C의 모재를 긁는 현상을 볼 수가 있다. 따라서 윤활에 의한 저 마모라는 트라이볼로지 적 관점을 기대할 수 있었다.



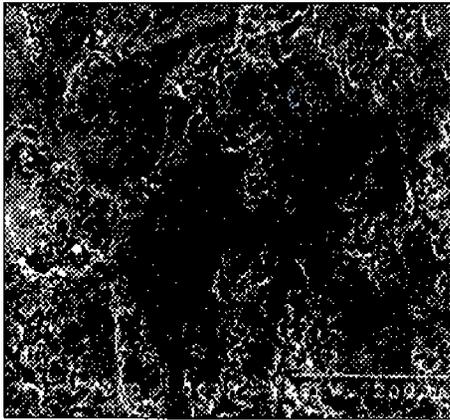


(a) TiO<sub>2</sub>, in air, 110 N, 0.2 m/s

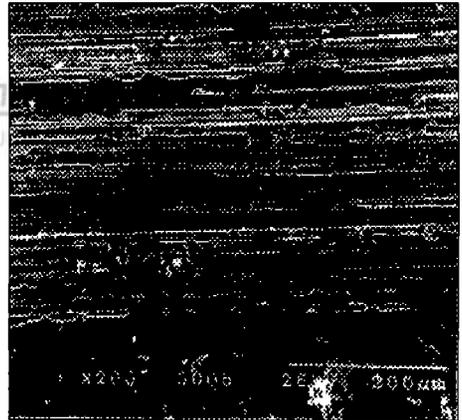


(b) S45C, in air, 110 N, 0.2 m/s

(I)



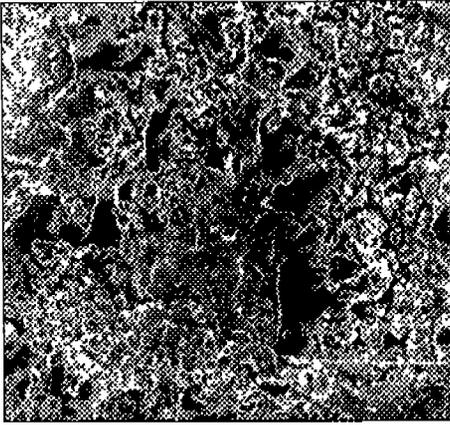
(c) TiO<sub>2</sub>, Lub, 110 N, 0.2 m/s



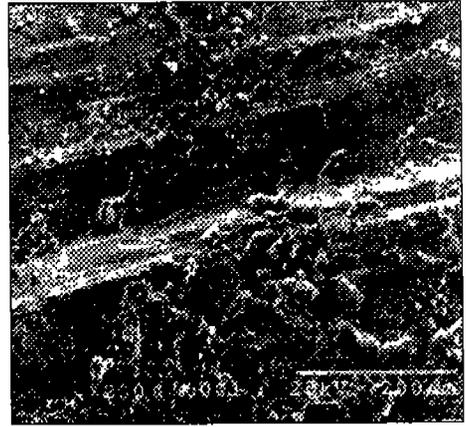
(d) S45C, Lub, 110 N, 0.2 m/s

(II)

Fig. 18 Wear surfaces of S45C and TiO<sub>2</sub> composite

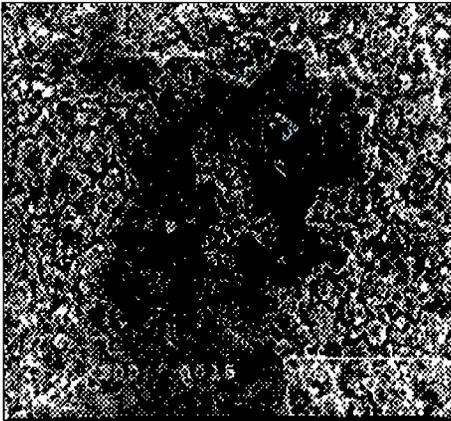


(a)  $\text{TiO}_2$ , in air, 110 N, 0.3 m/s

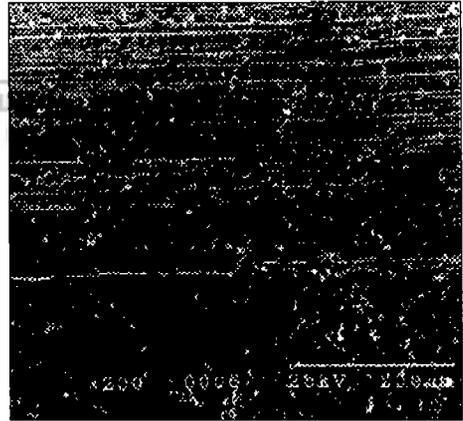


(b) S45C, in air, 110 N, 0.3 m/s

(I)



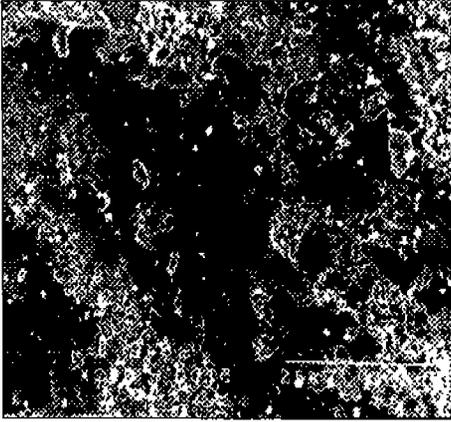
(c)  $\text{TiO}_2$ , Lub, 110 N, 0.3 m/s



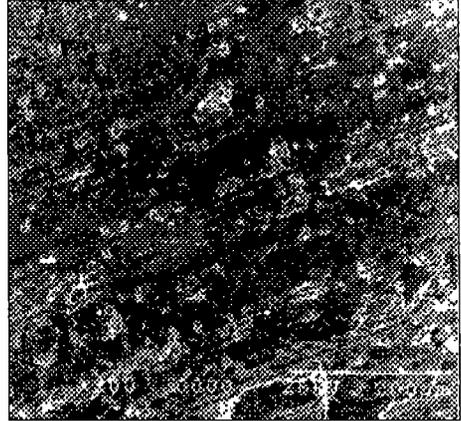
(d) S45C, Lub, 110 N, 0.3 m/s

(II)

Fig. 19 Wear surfaces of S45C and  $\text{TiO}_2$  composite

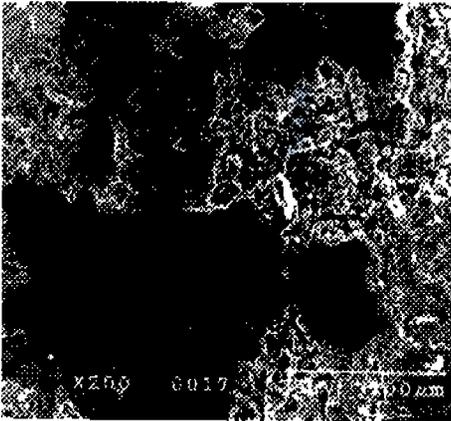


(a) TiO<sub>2</sub>, in air, 210 N, 0.2 m/s

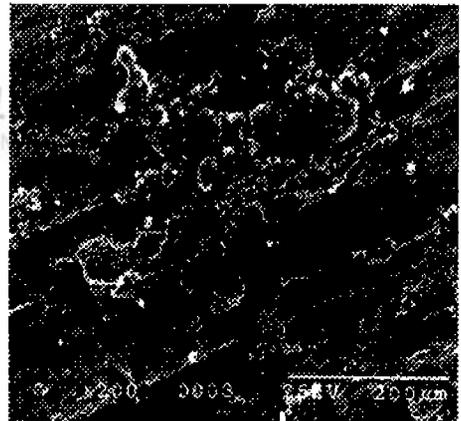


(b) S45C, in air, 210 N, 0.2 m/s

(I)



(c) TiO<sub>2</sub>, in air, 210 N, 0.3 m/s



(d) S45C, in air, 210 N, 0.3 m/s

(II)

Fig. 20 Wear surfaces of S45C and TiO<sub>2</sub> composite

## V. 결 론

본 연구는 Pin on disk형 마모 시험기에서 대기 중에서의와 윤활 환경 하에서 미끄럼 마찰 마모실험을 실시하였다. S45C 탄소강 표면에  $TiO_2$ 를 플라즈마 용사에 의하여 코팅한 후 미끄럼 속도 및 하중의 변화에 의해 마찰력, 마찰계수, 스테이터 및 로터의 마모량을 조사하였으며 마모면을 관찰한 SEM 사진을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. S45C와  $TiO_2$  시편을 건조 미끄럼 마찰 및 윤활 중에서 실험일 때 수직 하중이 증가할수록 마찰력과 마찰계수는 소폭 감소하였다.
2. 대기 중에서 미끄럼 속도를 0.1m/s - 0.3m/s로 증가시키고, 하중은 210N, 310N일때 S45C 및  $TiO_2$ 를 실험한 결과 마찰 속도 및 하중이 증가할 수록 마모 량도 증가하였다. 윤활 도중에서는 마찰마모가 거의 일어나지 않았다.
3. S45C 나재 시편이나  $TiO_2$ 를 코팅한 시편의 대기 중 건조 미끄럼 마찰에서 보면 S45C의 실험에서는 핀의 마모가 매우 적었지만  $TiO_2$ 의 실험에서는 핀의 마모량이 큰 것은 경도의 차이에 의한 것으로 판단된다.
4.  $TiO_2$ 를 코팅한 시편을 윤활 상태에서 실험한 것의 마찰면을 관찰한 SEM 사진에서 보면 응착의 형태인 마찰면이 대기 중에서의 마찰면 보다 훨씬 넓었다.
5. 마찰면을 관찰한 SEM 사진에서 윤활 상태의 실험에서는 핀의 미세한 마모 분말만이 응착되고 있고 마찰면의 색깔은 대기중에서 산화되어 검은색으로 된 것보다 오히려 금속면 상태의 색깔을 보여주고 있다.

## VI. 참고문헌

- [1] 沖猛雄. 1990. "表面改質による材料の高性能化 技術" Boshoku Gijutsu 39, 4. pp. 201-210.
- [2] 채영훈, 박영희, 1999. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiCr 코팅의 미끄럼 마멸 특성. 大韓機械學會 論文集 A권 제23호 제7호
- [3] Eiji Nishioka and Masahiro kukumoto, 1997. Splat-Quench Solidification of Freely Falling Molten Droplet by impinging on A Flat Substrate, Toyohashi, Japan, JSPS AEM 156 Committee
- [4] Vijande-Díaz R, Belzunce j, and Fernandez E, Rincan A, 1991, Perez M c, "Wear and Microstrue in Fine Ceranic Coating " Wear, 148, PP. 331-233
- [5] 김성익. 1996. Ceramic 溶射材의 磨耗特性. pp. 7-15
- [6] DKM Emgs motor
- [7] 久野正人, 出水 敬, 石神逸男, 三浦健一, 網 二. 1993, ホウ 素イオン 注入處理を施した SUS304, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, WC-9%Coの摩擦磨耗特性評価. 「材料」 Vol. 42. No. 473, pp. 202-208.
- [8] 遠藤吉郎. 1976, 表面工學(金屬の表面損傷とその防止法). 養賢堂發行. pp. 63-101.
- [9] 정성모, 윤활공학 이론과 실제. pp. 77-85, 105-124.
- [10] 봉하동, 송정일, 양유창, 한경석. 1995. 탄소 섬유와 SiC 휘스커를 혼합한 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 마멸특성. 大韓機械學會論文集 19, 7. pp. 1619-1629.
- [11] 권재도, 안정주. 1995. SiC 보강 A16061 복합재료의 마멸 및 마찰특성에 관한 연구. 大韓機械學會論文集 19, 9. pp. 2122-2132.
- [12] 임홍준, 김영한, 한경석. 1993. Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 기계적 성질 및 마멸특성. 大韓機械學會論文集 17, 10. pp. 2498-2508

- [13] 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温度の影響(磨耗特性とトベイボフィルム形成の  
關係). 日本機械學會論文集(C編) 61, 586. pp. 2553-2558.
- [14] 채영훈, 박병희, 김석삼. 1999. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiCr 코팅의 미끄럼 마멸 특성. 大  
韓機械學會論文集 A권, 제 23권 제 7호, pp. 1245 - 1252
- [15] 이기철, 백남주, 신봉석, 안상욱, 남궁석. 1980. 신편공작기계, 文運堂.  
pp. 305-310.
- [16] 오맹중. 1998. TiO<sub>2</sub> 세라믹 용사 코팅재의 강도 및 마멸 특성. pp. 89-93



## 감사의 글

1999년도 천년이 교차되는 한해를 보내면서 아득히 멀고 험하게만 보였던 논문이 완성되기까지 직장과 학업을 병행해야하면서 항상 시간 때문에 쫓기는 저에게 여기까지 올 수 있도록 성심 어린 조언과 지도로 삶은 표정한번 안 하시고 이해심으로 이끌어 주신 김귀식 교수님의 은혜에 깊은 감사를 드립니다.

또한 옆에서 항상 관심을 가지고 지도와 격려를 아끼지 않으신 고장권 교수님, 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현경택 교수님, 임종환 교수님께 감사를 드립니다

또한 본 연구기간 항상 옆에서 많은 어려움 속에서도 묵묵히 실의에 빠져있는 나에게 방향을 제시하며 우리한테는 미래가 있다고 외치면서 용기와 희망을 불어넣어 주면서 자신감을 심어주던 김성의 선생님 그리고 많은 밤을 저의 부족한 부분을 채워준 박경석 선생님과 현창해, 이성철 선생님 또한 오명범, 홍용의 학우에게 감사를 드리며 실험에 적극적으로 도와주신 기계공학과 실험실 학우들에게도 감사드립니다. 그리고 IMF의 환경 속에서 밤10시 이후 직장이 끝난 후에 무거운 발걸음을 재촉하며 실험실로 와야하는 어려움을 옆에서 묵묵히 바라보면서 내조하던 사랑하는 아내, 마음을 조리면서 항상 근심 어린 눈길로 바라보던 어머니 가족들 친구들에게 감사를 드립니다.

1999 . 12

金 熹 坤 拜上