
碩士學位論文

Ceramic 溶射材의 磨耗特性

濟州大學校 大學院

機械工學科



1996年 12月

Ceramic 溶射材의 磨耗 特性

指導教授 金 貴 植

金 成 益

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1996年 12月

金成益의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 허정현
委 員 김귀석
委 員 임정호



濟州大學校 大學院

1996年 12月

Wear Characteristics of Ceramic-Sprayed Steel

Sung-Ik 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 ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1996. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	3
II. 마모시험기 제작	7
1. 시험기의 구성	7
2. 시험기의 운용	13
III. 티타니아(TiO_2) 코팅재의 마모특성	18
1. 시험편	18
2. 코팅재의 제작	21
3. 실험방법	26
4. 실험결과 및 고찰	29
IV. 결론	53
V. 참고문헌	55

SUMMARY

The tribological properties of TiO₂ ceramic at a carbon steel (S45C) by flame spray were investigated. Friction types were dry sliding contact and lubrication sliding contact. The friction and wear characteristics were experimentally studies using a pin on disk type wear testing machine.

The results obtained are summarized as follows ;

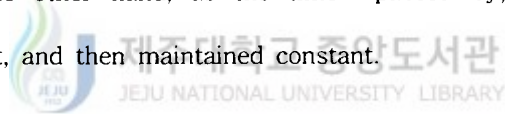
1. This new manufactured Pin-on-Disk Type wear-testing machine not only can dispose all the data through computer but also can test the Ball-on-Disk Type and experiment under the lubrication environment or erosion environment.

2. The wear amount also increased in proportion to the load in comparing and examining wear amount following the change of load. And the wear amount decreased remarkably in the air as well as in the lubrication environment, the S45C material, Bond material, and TiO₂ material orderly ; especially in the lubrication environment the wear amount was much less. The wear amount of TiO₂ material was much less than that of S45C material ; it was 0.09 mg and 0.2 mg in the lubrication environment, 1.4 mg and 135.9 mg in the S45C material.

3. The increase of load didn't have any effect on the change of the

friction coefficient at all. That is why the larger the load becomes, the stronger the friction force grows. The reason the friction co-efficient decreases a little at the contact part in the beginning is the moving of the wear-powder. And it can be learned that as the wear progresses the load has less effect on the friction co-efficient. In particular, the friction coefficient was decreased in the S45C material, Bond material and TiO₂ orderly. This shows that the effect on the improvement of the Tribo-feature ; the lowest-friction of the Ceramic-coating surface. These phenomena could be learned in the lubrication environment more clearly.

4. In accordance with the result of observation of the process of friction in the air from time to time, the wear amount in the beginning markedly increased. On the other hand, as the time passed by, the wear amount decreased at first, and then maintained constant.



I. 서론

각종 산업의 급속한 발전에 따라 금속 재료는 화학장치, 자동차, 원자로 및 항공 우주 분야 등의 구조용 재료로 사용될 뿐만 아니라 고열, 피로, 부식, 마멸과 같은 가혹한 조건하에서 사용되기 때문에 고강도, 고인성, 내마모성, 내부식성 등이 우수한 즉, 재료의 고성능화에 대한 요구가 더욱 높아지고 있다. 이러한 요구에 발맞춰 신소재의 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 종래의 신소재에 대한 연구는 새로운 합금을 개발하거나 재료가 지니는 고유한 성질을 변화시키는 데 관심을 두었지만 재료가 어떠한 조건의 사용 환경에서 직접 관계되는 부분은 결국 표면이기 때문에 최근의 연구에서는 재료의 표면에 내열, 내마모, 내식 등의 우수한 기능을 주고자하는 새로운 기술적인 방법으로서 “표면 개질 기술”이 개발되어 관심이 집중되고 있으며 여러 공업 분야에서 폭넓게 이용되고 있다(沖猛雄, 1990).

표면 개질법에는 습식법과 건식법으로 크게 나눌 수 있는데 습식법은 액체 상태에서 각종 화학 반응으로 재료의 표면에 석출되는 현상을 이용한 도금법이며 건식법은 다시 화학 증착(Chemical Vapor Deposition ; CVD)법과 물리 증착(Physical Vapor Deposition ; PVD)법 및 용사법 등이 있다. 화학 증착법은 화학 반응에 의해 발생한 금속이나 화합물을 1000℃ 이상으로 가열된 재료의 표면에 반응시켜 얇은 막을 형성시키는 것으로 기판 반응법, 열 분해법, 수소 환원법, 반응 증착법, 화학 수송법 등 다섯 가지가 있다. 물리 증착법은 코팅층의 화학적 성분을 높은 에너지를 가지는 이온이나 전자 또는 중성자들의 집합체인 플

라즈마 상태로 만들어 직접 모재의 표면에 화학 반응을 일으키면서 코팅되도록 하는 방법이다. 한편 용사법은 선상, 봉상, 또는 분말상의 용사 재료를 연소 또는 전기적인 에너지를 이용한 열원에 의해 가열, 용융시켜 액체 상태로 된 미립자를 소자 금속에 고속으로 분사하여 피막을 형성하는 것이다.

용사 기술은 1908년경 스위스의 Dr. M. U. Schchoop가 고안해서 1910년경에 관모양의 코일에 가열된 고온의 압축 공기가 용융된 아연을 금속 표면에 분사하는 용탕식 용사 장치를 개발한 후 1920년경 미국을 비롯하여 세계 각국에서 실용화 되면서 발달되었다. 용사법은 가열원에 따라 플레임 용사, 폭발 용사, 아크 용사, 플라즈마 용사법으로 분류되며 이외에 수 플라즈마 용사(Water-plasma spraying), 저압 플라즈마 용사(Low pressure spraying), 레이저 빔 용사(Laser beam spraying), 하이브리드 용사(Hybrid thermal spraying)법 등도 실용화되고 있다. 용사법은 다른 표면 개질 기술에 비해 용융할 수 있는 모든 재료의 피막을 어떤 재료에든지 형성시킬 수 있고 모재의 형상이나 치수에 큰 제약을 받지 않으며 용사에 의한 모재의 변형이 적으며 용사 설비 및 공정이 간단하고 피막의 형성 속도가 빨라서 고속화, 고온화, 경량화, 고압화, 극저온화 등이 요구되는 공업 기술 분야에 널리 적극적으로 이용될 것으로 기대된다(용사핸드북,).

용사에 이용되는 재료로서 주목되고 있는 세라믹은 일반 강에 비해 밀도가 낮고 경도 및 압축 강도가 높으며 고온에서도 양호한 기계적 성질을 유지한다. 또한 화학 반응에 대해서 안정하고 우수한 전기적, 열적, 자기적 특성들을 가지며 열팽창률이 적고 내열충격성, 내식성, 내마멸성이 뛰어나 각종 공구나 엔진, 가스 터빈, 기계부품 등의 특수한 환경 하에서의 사용과 정밀 기기, 의료 기구의 구

조 재료로서의 사용이 증가되고 있다(足立幸志 등, 1995). 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 세라믹은 그 내부에 존재하는 기공이나 입계 및 가공 과정에서 일어나는 표면 근방에서의 미세한 균열에 기인하는 취성 파괴가 큰 결점이 되어 세라믹의 특징을 최대한 발휘할 수 있는 기계요소로서는 널리 응용되지 못하고 있는 상황이다. 따라서 세라믹의 이점을 충분히 응용하기 위해서는 취성 파괴를 억제해야만 한다. 이르기 위해서는 응력 집중을 완화할 수 있는 금속과 조합하여 사용하는 것이 유효하며 그 방법의 하나로서 세라믹 피막을 금속의 표면에 코팅하는 방법이 연구되고 있다. 용사 재료로서 세라믹을 선택하거나 설계하는데 있어서 트라이볼로지적 거동에 대한 체계적이고 신뢰할 만한 데이터가 필요하게 된다.

세라믹에 대한 연구로는 1983년 미국에서 세라믹 엔진 개발을 계획하여 세라믹 재료에 관한 데이터 베이스와 수명 예측에 관한 것이 중요한 연구과제가 되었으며(김석삼, 1995), 그후 마찰 마모 조건에 있어서 세라믹과 금속의 조합에 의한 내마모성의 향상에 관한 연구보고가 있고, 저 하중, 저속도에서 각종 세라믹과 강을 조합하여 마찰 마모 실험을 하여 탄화규소(SiC), 알루미늄(Al_2O_3), 질화규소(Si_3N_4), 부분 안정화 지르코니아(PSZ)순으로 양호한 내마모성을 보이고 접촉면에 생성된 이착막이 마찰 마모 특성에 큰 영향을 미친다는 보고 등(陳寧 등, 1995)이 있다.

최근 국내에서의 이에대한 연구가 활발하다. 그 일례로서 공호성 등(1993)은

알루미늄 합금에 세라믹을 코팅하여 마찰 마모 실험을 한 결과 알루미늄 합금 표면의 기계적 성질을 개선 시킬 수 있음을 보고 하였고 김석삼(1995)은 여러 가지 세라믹 재료의 마찰 마모 특성을 비교 검토하여 세라믹의 마멸 모델을 제시한 바 있다. 또한 김석삼 등(1995)은 TiN을 코팅한 고속도강과 합금공구강의 마멸거동을 살펴서 내마멸성이 10배나 증가 하였음을 보고 하였으며, 권재도 등(1993)은 SiC 보강 Al6061 복합재료의 마멸특성에 대해 보고하여 고강도, 고속 회전에서의 내마멸성의 증가 등 전반적으로 기계적 성질이 개선됨을 밝힌 바 있다. 봉하동 등(1995)은 탄소 섬유와 SiC 휘스커를 혼합한 Al/Al203복합재료의 마멸특성을 밝힌바 있다. 그러나 세라믹 재료에 관한 체계적이고 신뢰할 만한 데이터가 확립되지 못하고 있는 현실이다.

따라서 본 연구에서는 기계 구조용 탄소강 S45C 에 세라믹 TiO_2 를 플레임 용사에 의해 코팅하고 80486계열의 CPU를 사용한 퍼스널 컴퓨터와 2MHz의 A/D 컨버터 그리고 5KN급 LCW형 로드셀 등을 장착한 Pin on disk형 마모 시험기를 자체 설계 제작하여 마찰마모 실험을 행하여 TiO_2 의 미끄럼 마찰에 의한 트라이볼로지 특성을 검토하였다.

II. 마모 시험기 제작

1. 시험기의 구성

마모시험기의 원리는 일반적으로 다음과 같은 방법이 있다.

- (1) 3개의 고정구에 1개의 회전구를 밀어 붙이는 방법.
- (2) 회전 원기둥을 밀어 붙이는 2개의 V블록에 끼우는 방법.
- (3) 블록을 회전 원판에 밀어 붙이는 방법.
- (4) 회전하는 원통끼리 밀어 붙이는 방법.
- (5) 회전하는 원판(disk)에 핀(pin)이나 볼(ball)을 밀어 붙이는 방법.

이러한 각각의 방법에 대한 시험편의 배치를 Fig. 1에 나타내었다. 이중 본 실험에 사용된 시험기는 pin on disk 형과 ball on disk 형을 모두 사용할 수 있는 마모 시험기이며 시험기 자체의 고유 진동을 줄이기 위해 중량이 무겁도록 재질을 선택 하였고 스프링 부분은 스프링 상수가 서로 다른 이중 스프링을 사용 하였다.



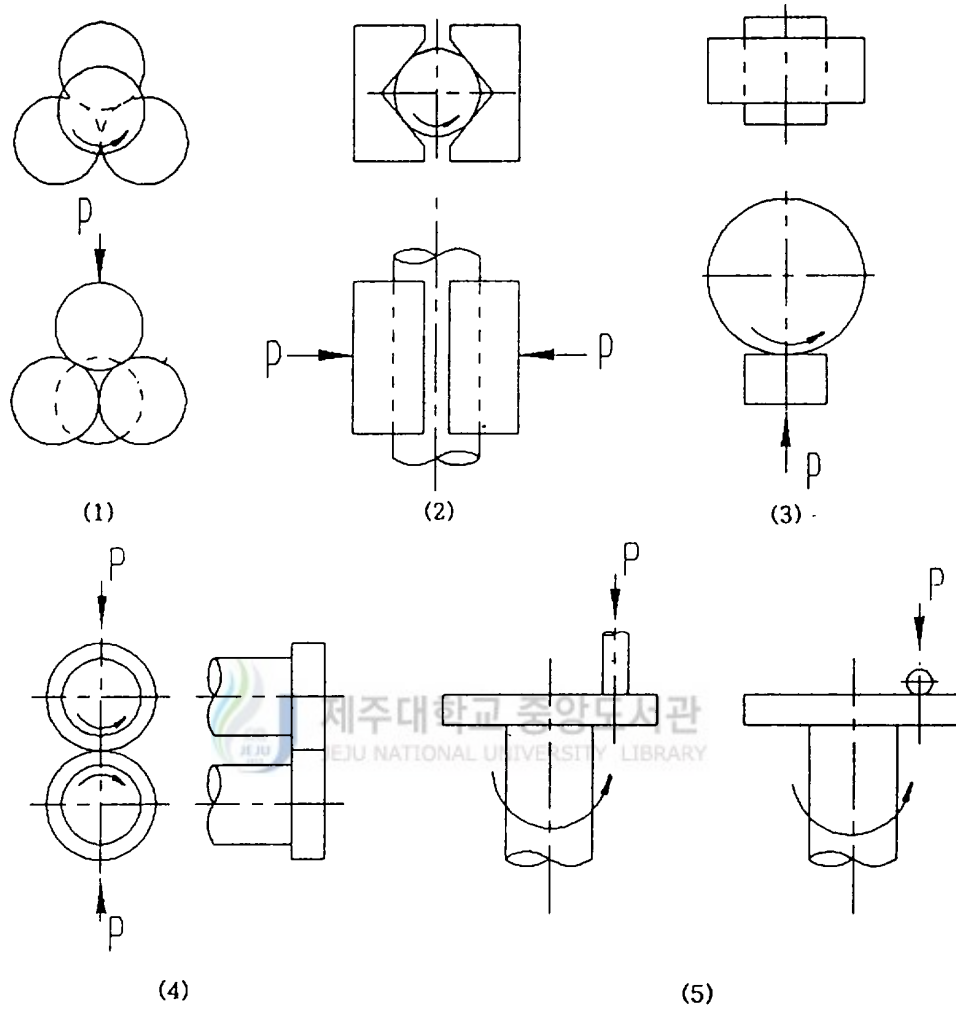


Fig. 1 Contact types of specimens in friction test

본 연구에서 제작한 마모 시험기 구성의 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 가압하중과 마찰력을 Load cell 1, 2에서 검출하면 A/D 변환기가 디지털 신호로 전환한 것을 퍼스널 컴퓨터가 프로그램에 의해 처리하고 모니터와 프린터를 통해 출력할 수 있도록 하였다.

시험기에 사용된 주요 부품은 Table 1에 나타내었다. 시험기의 동력원으로 사용된 전동기는 신명전자에서 제작된 감속 모터로서 기어 감속비가 1 : 30으로 회전수가 60 rpm이며 정격출력은 0.5 kw이다. 제어기로는 80486 마이크로프로세서(microprocessor)를 내장한 퍼스널 컴퓨터를 사용했으며, 연속계 신호와 이산계 신호를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A변환기는 12비트의 분해능력을 가지는 Advantch 사의 PCL-812PG 를 사용했다. 하중과 마찰력을 감지하는 로드셀은 NTS 사 제품인 LCW-500K 형으로 정격용량이 5KN 이다. 로드셀에서 검출한 스트레인을 증폭해주는 스트레인 앰플리파이어는 KOYWA 사 제품으로 DPM-612형으로 $\pm 5V$ 의 용량을 가진다.



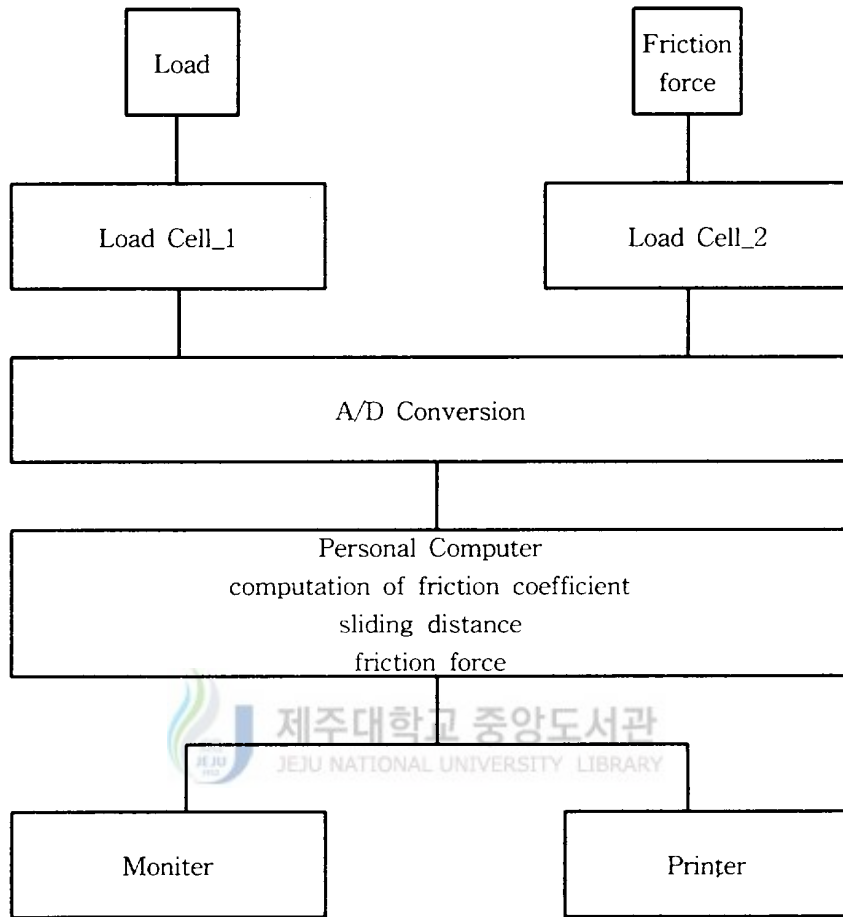


Fig. 2 Flowdiagram of friction test machine

Table 1. Principal part of wear testing machine

NAME	MODEL	MANUFACTURER	NOTE
LOAD CELL	LCW-500KGF	NTS	Cap. 5KN 2Ea
A/D. D/A CONVERTER	PCL-812PG	ADVANTCH CO.	12-bit
PERSONAL COMPUTER	80486	DAEWOO	66MHz
ELECTRIC MOTOR	GM0200	SHIN MYOUNG ELECTRIC MFG LTD	62rpm GEER RATIO:1/30
PRINTER	LASERART	SSANGYONG	
STRAIN AMPLIFIRE	DPM-612A	KYOWA	±5V

2. 시험기의 운용

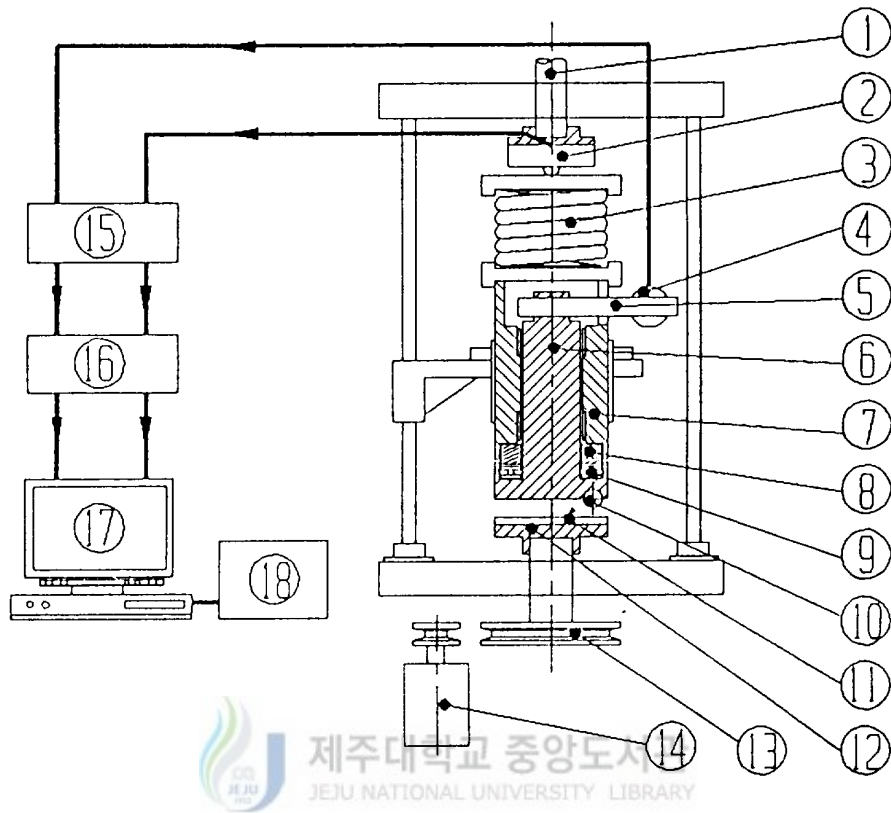
Fig. 3은 제작된 마모 시험기를 나타낸 것이다. 이 시험기의 특징은 다음과 같다.

- (1) 가압 하중은 5KN 까지 임의로 부여할 수 있고 가압하중 검출기로 가압 하중의 크기를 알수 있다.
- (2) 토크를 이용하여 마찰력을 산출하며 마찰력 검출기로 마찰력의 크기를 알 수 있다.
- (3) 시험편의 반지름과 토크암의 길이를 임의로 변화시킬 수 있다.
- (4) 실험 시간을 프로그램에 의해 임의로 지정할 수 있으며 지정한 시간에 따라 마찰거리가 자동으로 산출된다.
- (5) 데이터의 양을 임의로 조절할 수 있으며 모든 데이터는 퍼스널 컴퓨터의 하드 디스크에 자동 저장된다.
- (6) 하중과 마찰력 마찰거리 데이터의 량은 시험이 끝남과 동시에 모니터링이 된다.

시험기의 작동은 Fig. 3에서 모터 14가 회전하게 되면 V벨트 풀리에 의해 동력이 전달되어 회전 테이블 12가 회전 하게되고 회전 테이블12와 볼트로 고정된 회전 시험편인 11도 회전하게 된다. 한편 가압 핸들 1로부터 가해진 하중은 로드셀 2을 통해 상부 스프링 시트와 하중을 일정하게 하는 역할을 하는 스프링 3을 통하여 가압봉 가이드 안에서 슬라이딩 운동하는 가압봉 7로 전달된다. 하중은 최종적으로 가압링 8이 드러스트 베어링 9를 사이에 두고 토크암 홀더 6에 장착된 고정 시험편 10에 전달되어 회전시험편 11와 맞물려서 회전하려는

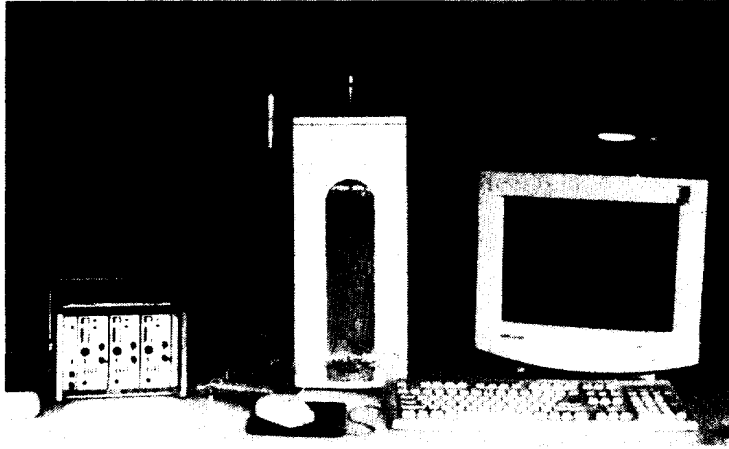
힘 즉, 토크가 발생되고 이 토크가 마찰력이 된다. 이 마찰력은 다시 토크암 홀더를 통해 토크암 5에 전달되어 마찰력 검출기 4가 감지하게 된다. 토크를 최대한 손실되지 않도록 하기 위해 토크암 홀더 상, 하부에 니들 베어링과 드리프트 베어링 9를 부착 시켰다. 가압력 검출기 2에서 감지된 가압 하중과 마찰력 검출기 4에서 감지된 마찰력 값은 스트레인 증폭기 15과 연결되어 증폭되어서 A/D변환기 16로 입력되면 퍼스널 컴퓨터 17이 데이터를 처리하여 마찰계수와 마찰거리 등을 산출하고 모니터에서 실험 종료후 실험의 전과정을 모니터링하고 프린터 18에서 출력하게 된다. 데이터는 하드 디스크에 저장할 수도 있고 직접 프린터로 출력할 수 있도록 하였다. 시험기의 제어부와 작동부를 Fig. 4에 나타내었다.



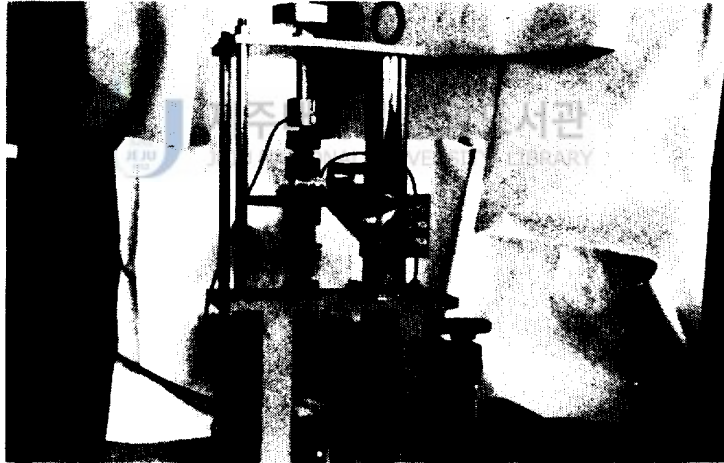


- | | | |
|--------------------|------------------|----------------------|
| 1. Pressure handle | 2. Load cell | 3. Spring |
| 4. Load cell | 5. Torque arm | 6. Torque arm holder |
| 7. Pressure rod | 8. Pressure ring | 9. Thrust bearing |
| 10. Stator | 11. Rotor | 12. Table |
| 13. Belt pulley | 14. Motor | 15. Strain amplifire |
| 16. A/D converter | 17. Computer | 18. Printer |

Fig. 3 Block diagram of friction testing machine



(a) control part



(b) hydraulic system part

Fig. 4 Photograph of friction testing machine

2. 1 시험기 운용 프로그램의 순서도

본연구에서는 시험기의 운용을 위한 응용 소프트웨어는 BORLANDC 언어를 이용하였다. 시험기 운용 프로그램은 대화 식으로 이루어져 누구나 쉽게 사용할 수 있도록 하였으며, 프로그램의 순서도는 Fig. 6에 나타내었다.

프로그램의 주요구성을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 정수와 변수의 정의
- (2) A/D Converter의 초기화
- (3) 실행과 함께 아날로그 신호를 디지털 신호로 전환
- (4) 하중과 마찰력 감지
- (5) 마찰계수와 마찰거리 계산
- (6) 데이터 저장
- (7) 모니터링 및 프린터 출력



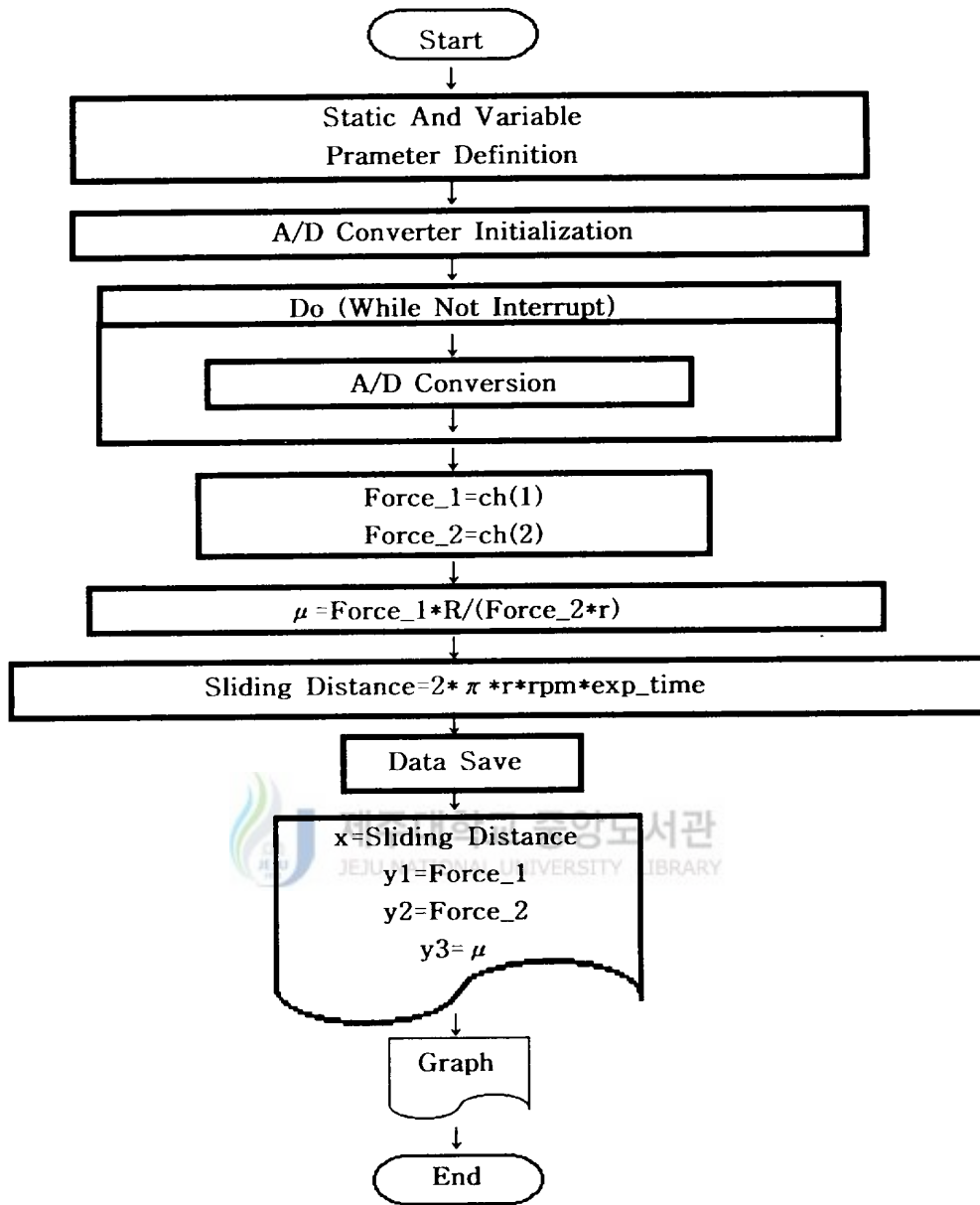


Fig. 6 Flow chart of control system

III. 티타니아(TiO_2) 코팅재의 마모특성

1. 시험편

코팅재의 마모 특성을 조사하기 위한 시험편은 상부측 시험편 (이하 고정 시험편(stator))과 하부측 시험편 (이하 회전 시험편(rotor))으로 구성되어 있다. 이들 시험편의 형상과 치수를 Fig. 7에 나타내었다. 고정 시험편은 직경 5 mm의 핀(pin)으로서 고탄소 크롬 몰리브덴강 SUJ II를 사용하였고 회전 시험편의 코팅층 표면과 면접촉 할수 있도록 하였다. 회전 시험편의 기재는 기계 구조용 탄소강 S45C이며 직경 90 mm, 두께 5 mm의 원판형으로 M10 텀볼트 구멍을 내 군데에 설치하여 시험기의 회전 테이블에 고정되어 회전할 수 있도록 하였다. 회전 시험편의 경우 접촉면을 연삭 가공하여 진실 접촉면(real contact area)을 좋게 하였다. 기재인 S45C와 SUJ II의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.



Table 2. The chemical composition and mechanical properties of specimens

(a) Chemical composition (wt %)

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Cu	Fe
rotor (S45C)	0.45	0.21	0.75	0.026	0.02	0.13	0.01	Bal
stator (SUJ II)	0.95 - 1.10	0.15 - 0.35	0.5	0.25	0.25	1.3 - 1.60	0.25	

(b) Mechanical properties

	yield strength σ_y (MPa)	tensile strength σ_t (MPa)	Elongation δ (%)	poisson's ratio	specific gravity g/cm^3	young's modulus GPa	specific heat j/kgK
rotor (S45C)	675	760	12.1	-	-	-	-
stator (SUJ II)	-	1568-1960	-	0.3	7.77	208	485

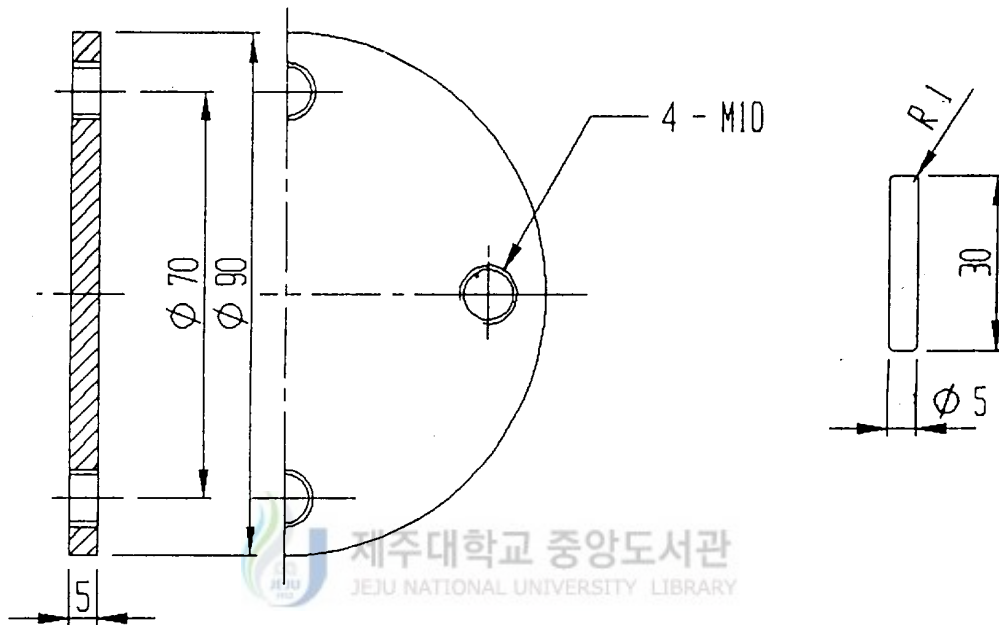


Fig. 7 Dimension of specimen

2. 코팅재의 제작

세라믹 코팅재는 S45C의 회전 시험편에 본드 코팅재 Ni-4.5% Al과 톱코팅재 TiO₂를 용사하여 제작 하였다. 피막 제작을 위한 용사는 화염 용사법(flame spraying)으로서 용사기는 METCO INC 사 제품인 TYPE 5P-II Thermo spray 를 사용하여 용사 하였다. 화염 용사는 산소와 연료 가스를 열원으로 하여 분말 형태의 용사 재료를 코팅하는 기법으로 연료 가스는 주로 아세틸렌이 사용되며 장비에 따라 수소 프로필렌, 또는 프로판이 사용되는데 화염 온도는 약 3100℃ 이며 용융 입자의 비산 속도는 50~60%이다(일본용사학회). 본실험에서는 아세틸렌을 연료 가스로 사용하였다.

용사하기 전에 세척한 시험편을 전 처리로서 알루미나 블라스트(alumina blast)에 의해 공기 압력 3atm으로 표면을 조면화 하였다. 블라스팅(blasting)에 사용한 그릿은 알루미눔으로 그릿의 크기는 15~53 μ m 이다. 용사시의 산소 압력은 본드 코팅일 때 1.4atm고 TiO₂용사일 때는 1atm이다. 아세틸렌 압력은 본드 코팅이나 TiO₂코팅 모두 1atm이다. 용사 거리는 가장 접촉력이 좋은 150mm이며 용사한 후 평면 연삭기로 정밀 표면 가공을한 뒤 에머리 페이퍼로 연마하여 표면 조도가 0.05 μ m Rmax가 되도록 하였다. 용사 장치의 개념도를 Fig. 8에 나타냈고 본 실험에 있어서의 용사 조건을 Table 3에 나타내었다.

탄소강인 S45C나재 시험편(이하 S45C라고 한다.)과 S45C나재에 본드 코팅한 시험편(이하 BOND라고 한다.), BOND에 TiO₂를 코팅한 시험편(이하 TiO₂라고 한다.)을 준비하였다. 나재의 경도 값과 코팅 층의 경도 값을 마이크로 비커어스 경도기로 10회 측정하여 평균한 경도 값을 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 고

정 시편의 경도값이 Hv 788로서 시편들 중 가장 큰 경도값을 가지고 있다. 본드 코팅 시험편의 용사 피막 두께는 약 $400\mu\text{m}$ 정도로 하여 마찰 시험을 행하였고 본 코팅한 시편의 용사피막 두께는 $200\mu\text{m}\pm 30\mu\text{m}$ 이다. 본드 코팅재로서는 Ni 4.5% Al_2O_3 분말을 사용하였고 본코팅에 사용한 세라믹은 TiO_2 분말로서 분말의 화학적 성분을 Table 6에 나타내었다.



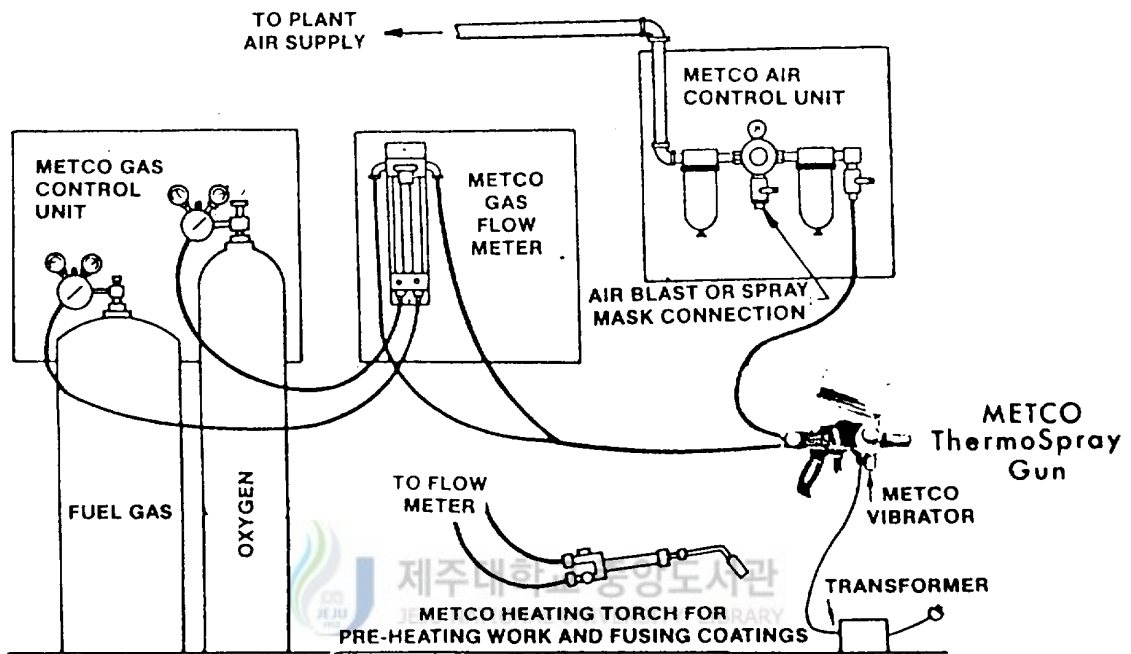


Fig. 8 thermospray system

Table 4. Spraying conditions.

	Blasting process	Under-coating	Top-coating
material composition	W A	Ni-4.5%Al	TiO ₂
powder size(μm)	15~53	45~90	10~53
Air pressure (atm)	3	-	3.7
Spraying distance (mm)	50~100	150	60~70
Oxy.gas pressure (atm)	-	1.4	1
Ace.gas pressure (atm)	-	1	1

Table 5. Microhardness of specimens (Hv).

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

Table 6. Chemical compositions of TiO₂ ceramic powder.(wt %)

TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO
Bal	0.4	0.2	0.12	0.05	0.03

3. 실험방법

마찰 형태는 고정 시험편인 핀(pin)에 접촉한 회전 시험편을 회전 시키면서 소정의 하중을 가하는 면접촉 미끄럼 마찰 형식인 pin on disk형으로 상온 상압 하에서 실험을 실시 하였으며 실험 조건을 Table 7에 나타낸다. 하중조건은 50N, 100N, 150N, 200N, 300N이며 미끄럼 속도(v)는 0.1830 m/s로 항상 일정하게 하였고 마찰 거리(L)는 1350 m(120분)으로 하였다. 실험 환경은 공기중과 윤활 환경에서 실험하였다. 윤활중 실험을 위하여 회전 테이블 주변에 회전 테이블과 같이 회전할 수 있는 윤활 챔버를 부착하여 윤활유중에 회전 시험편과 고정 시험편이 완전히 침지 될 수 있도록 하였다. 사용한 윤활유는 API SG, SAE 10W/40으로 양질의 윤활유를 사용하였고 매 실험마다 윤활유를 교체하고 적정 윤활이 되도록 보충했다.

한편 마찰력과 마찰계수의 산출을 위한 개념도를 Fig. 9에 나타내었다. 마찰력 검출을 위한 로드셀과 회전 시험편 중심간의 거리 $ob = R$, b점의 힘을 F , 회전 시험편의 평균 반경 $oa = r$, a점의 마찰력을 f 라고 하면

$$f = F \times R / r$$

의 관계가 성립되며 F , r 및 R 은 이미 알고 있으므로 f 가 산출된다. 따라서 마찰 계수는 다음 식에 의해서 결정할 수 있다.

$$\mu = f / W = F \times R / W \times r$$

여기에서 W 는 가압하중이다.

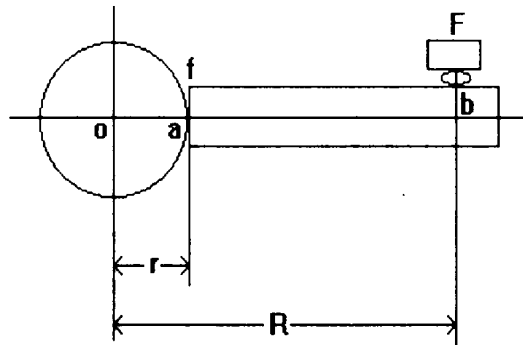


Fig. 9 Calibration of friction force

Table 7. Experimental conditions.

Normal load (N)	50, 100, 150, 200, 300.
Sliding speed (m/s)	0.183
Sliding distance (m)	1350
Test temperature(°C)	25
Environment	in air, in lubricating,

마모량의 측정은 코팅 피막을 제작하기 전과 실험 실시후 시험편을 아세톤으로 30분동안 초음파 세정, 탈지를 행하고 드라이어로 완전 건조 시켜 10mg까지 측정할 수 있는 정밀 천칭으로 5회 중량을 달아 그 평균값으로 하여 시험편의 실험전 중량과 실험후의 중량에서 중량 차를 산출하여 마모량으로 하였다. 실험 후 주사형 전자 현미경(SEM)으로 마찰면을 관찰 하였다.

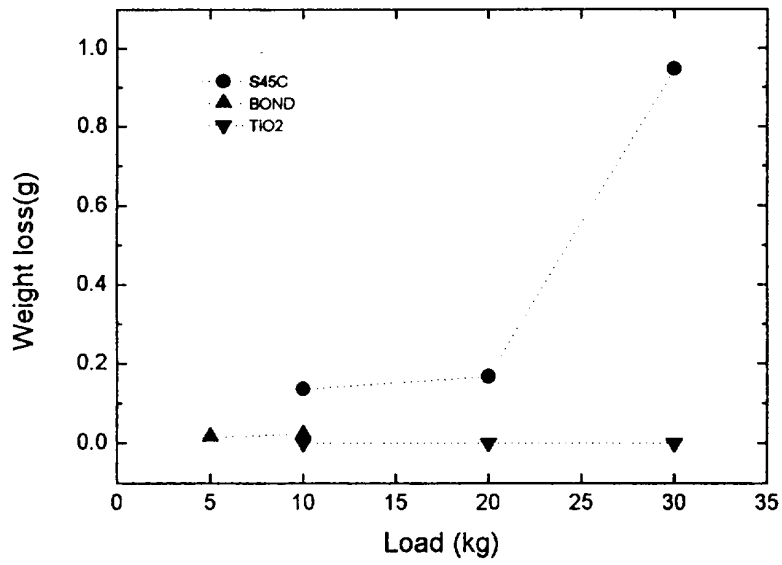


4. 실험 결과 및 고찰

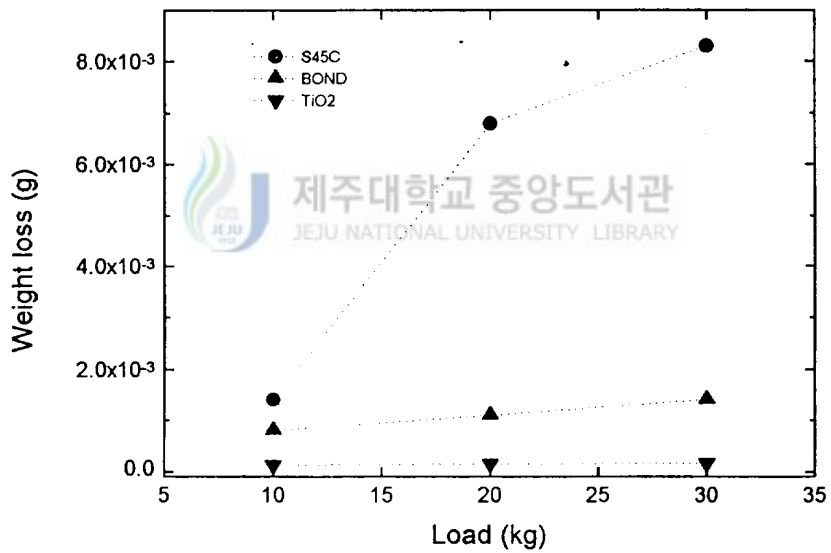
1) 하중에 따른 마모량의 변화

Fig. 10은 각각의 시편에 있어서 하중과 마모량과의 관계를 보인 것이다. (a)는 공기중에서의 실험 결과인데 마찰 거리 1350m에서의 하중조건은 S45C재와 TiO₂재는 100N, 200N, 300N의 하중에서 실험하였고 BOND재는 50N과 100N, 200N, 300N의 하중에서 실험하였다. 실험전 중량과 실험후의 중량차를 마모량으로 하였다. 100N의 하중에서 S45C재는 135.9mg이고 BOND재는 21.4mg, TiO₂재는 0.99mg의 마모량을 나타내주고 있어서 TiO₂ 톱코팅 표면층이 S45C재에 비해 극히 양호한 트라이볼로지(Tribology) 특성중의 하나인 저마모의 현상을 보여주고 있어서 표면개질 효과가 있음을 알 수 있다. 300N의 하중에서 마모량을 보면 S45C재는 947.4mg인 반면 TiO₂재는 1.4mg으로 세라믹 코팅층의 저마모 현상을 확연히 관찰할 수 있었다. 200N의 하중을 기점으로하여 S45C재의 마멸 곡선이 급격히 상승하는 천이점이 되고 있으므로 볼 때 마모 특성에서의 하중 의존성이 매우 크다는 것을 알 수 있어서 棚木敏幸(1995)의 보고와도 일치하고 있음이 확인되었다. 즉, 저하중에서는 마모량도 작지만 고하중이 작용할수록 마모량이 커짐을 의미하고 있다.

Fig. 10 (b)는 윤활중에서의 마모 실험으로 공기중에서의 실험 결과와 비교해 보면 300N의 하중에서의 S45C재는 8.3mg으로 공기중에서의 147.1mg보다 마모량이 극히 적은 저마모 현상을 보이고 있다. TiO₂피복층의 마모는 0.16mg으로 극히 적어서 마찰 마모에 있어서의 적절한 윤활로 인하여 양호한 트라이볼로지의 특성으로 개선할 수 있음을 보여주고 있다.



(a) in air



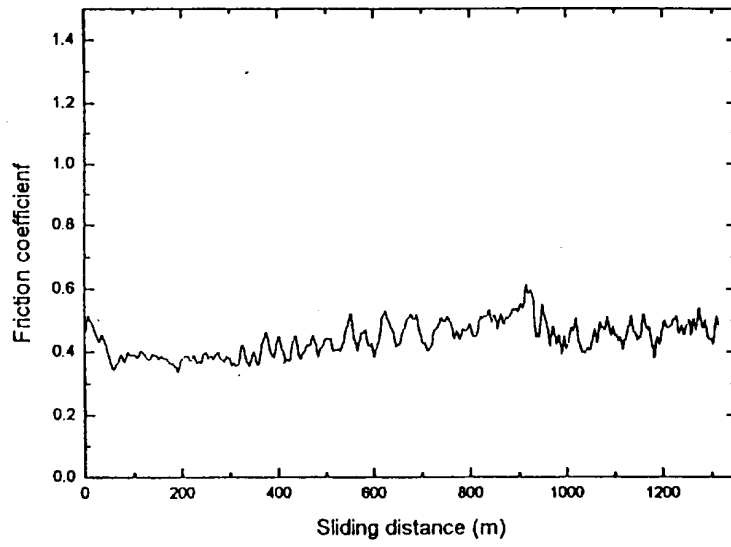
(b) in lubrication

Fig. 10 Relation between load and weight loss for S45C, BOND, TiO₂. (Sliding distance 1350m, Sliding velocity : 0.183 m/s)

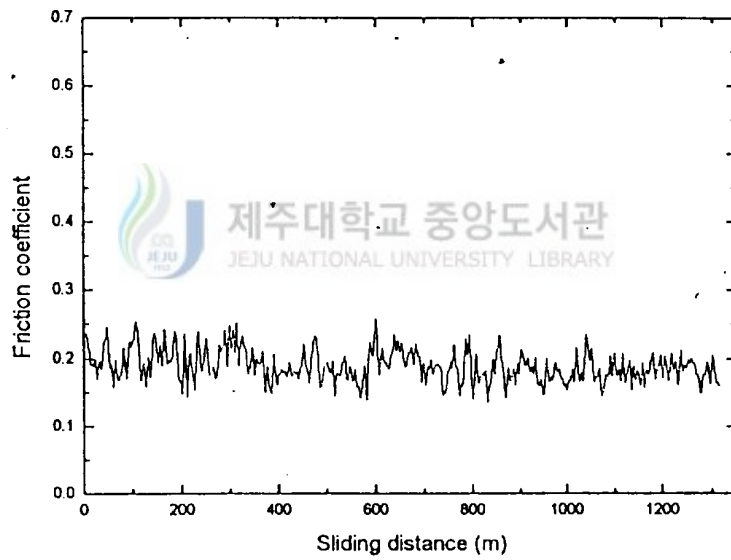
2) 하중에 따른 마찰계수의 변화

하중의 증가에 따라 마찰계수의 변화를 살펴본 것을 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. S45C재를 윤활 환경에서와 공기중에서 마모 실험을 실시하여 비교하였다. Fig. 11은 200N, Fig. 12는 200N의 하중에서 실험한 마찰계수를 보인 것이다. Fig. 11과 Fig. 12에서 마찰계수는 하중의 증가에 관계없이 공기중에서는 약 0.4의 값을 보이고 있고 윤활 환경에서는 0.18정도의 값을 보이고 있다. 윤활 환경에서 200N의 하중에서 보다 300N의 하중에서 0.03정도로 마찰계수가 감소하는 것은 윤활 환경에서 미끄럼 마찰일 때 고하중에서 보다 안정된 값을 보이고 있는 것으로 하중의 증가에 의해 마찰계수가 크게 변화하고 있는 것은 아니라고 사료된다. 이것은 하중의 증가와 함께 마찰력도 증가한다는 쿨롱의 법칙(トライボロジ, 1993)에 적용되는 것이다. 하중이 증가한 만큼 마찰력도 같이 증가 함으로서 마찰계수의 값에는 거의 영향을 끼치지 못하고 있다는 것을 설명해주고 있는 것이다. 한편 그림에서 보는바와 같이 공기중에서보다 윤활 환경에서의 마찰계수는 1/2정도로 저하되고 있어서 윤활 효과에 의한 마찰계수의 저하 현상을 명확히 알수 있다.

Fig.13은 하중과 마찰력의 관계를 나타낸 것이다. (a)는 S45C재를 200N의 하중에서 실험한 것이고 (b)는 같은 시료를 300N의 하중에서 실험한 것이다. Fig. 13에서 보는바와 같이 하중이 증가하면서 마찰력도 증가하고 있음을 알수있다.

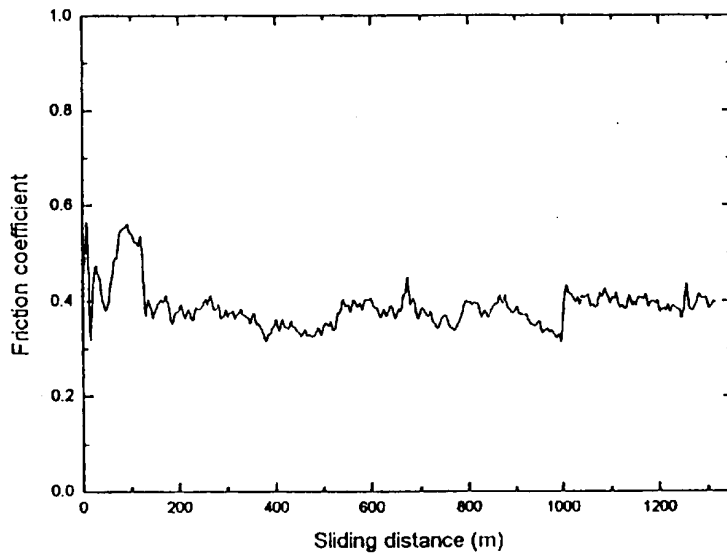


(a) in air

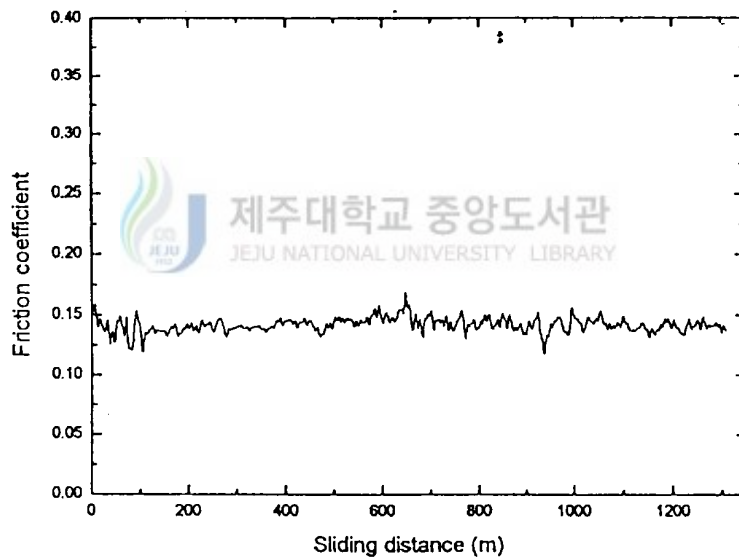


(b) in lubrication

Fig. 11 Effect of load on friction coefficient (Sliding distance 1350m, load 200N, sliding velocity 0.183m/s, material S45C)

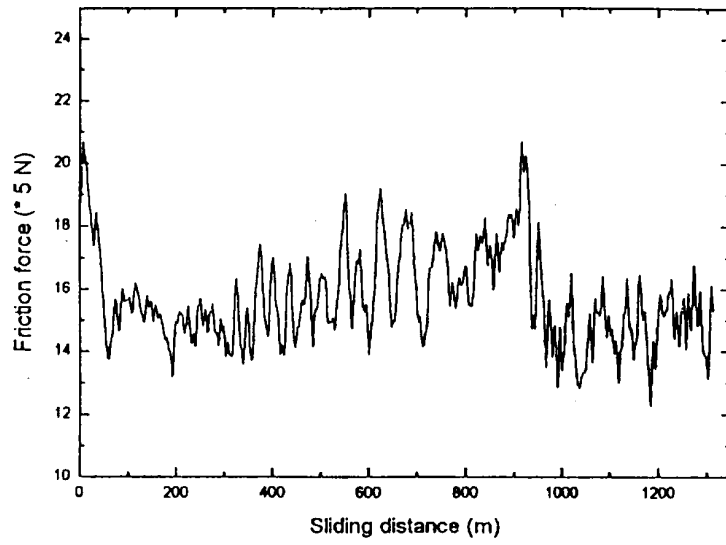


(a) in air

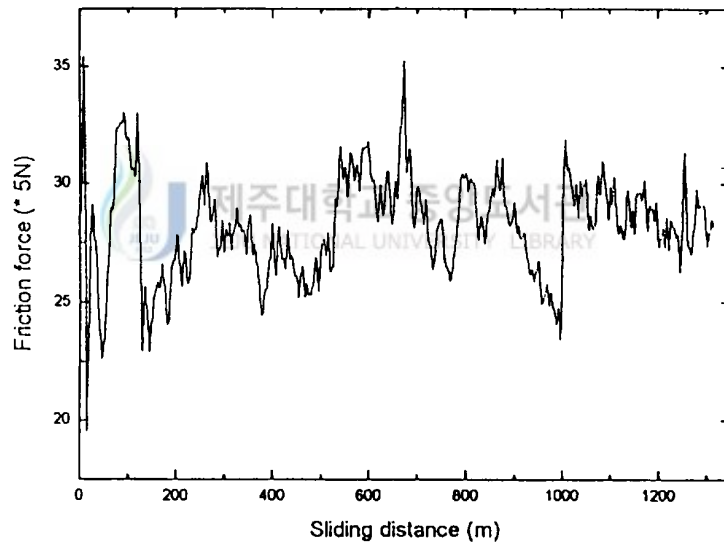


(b) in lubrication

Fig. 12 Effect of load on friction coefficient (Sliding distance 1350m, load 300N, sliding velocity 0.183m/s, material S45C)



(a) load 200N

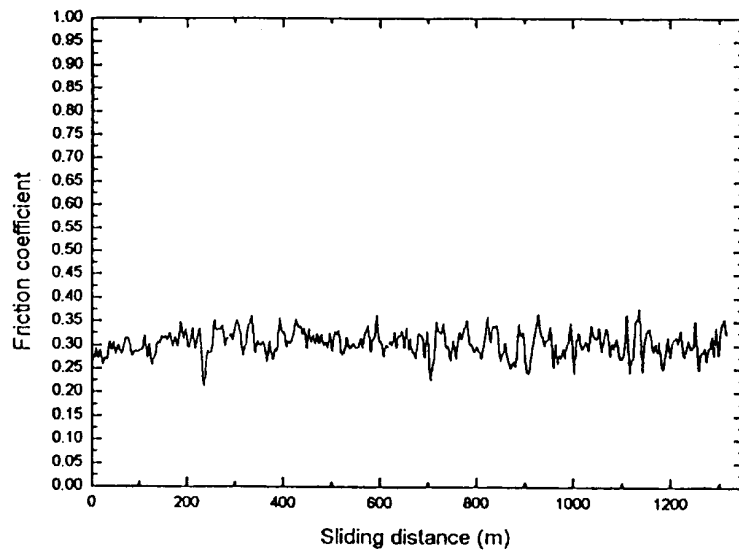


(b) load 300N

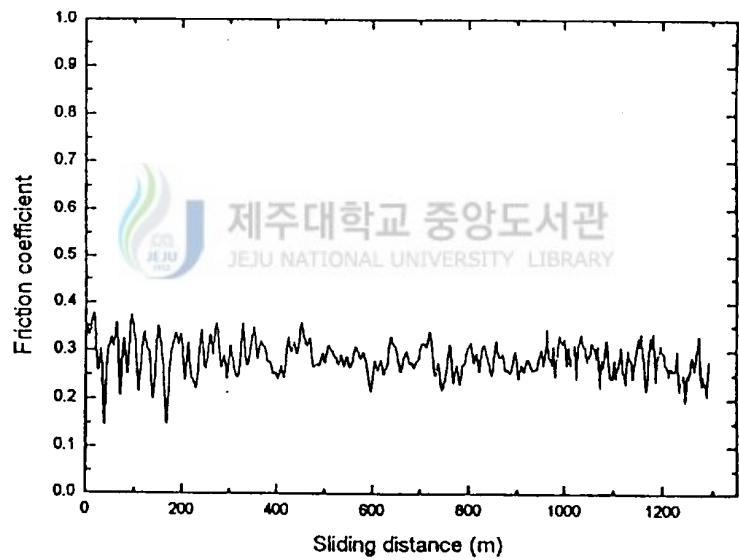
Fig. 13 Effect of load on friction force (Sliding distance 1350m, sliding velocity 0.183m/s, material S45C)

Fig. 14는 BOND재를 하중에 따른 마찰계수의 변화를 보인 것이다. 100N, 200N, 300N의 하중에서 실험한 것을 각각 (I), (II), (III)에 나타내었다. 또한 각각의 하중 조건에서 공기중과 윤활 환경에서 실험을 행하여 비교하였다. 공기중은 (a), 윤활 환경에서는 (b)에 나타내었다. BOND재를 공기중에서 마모 실험한 결과 마찰계수는 약 0.29 정도의 값을 보이고 있고 윤활 환경중에서는 0.24 정도의 값을 보이고 있어서 윤활 환경 중에서의 저마찰 현상은 앞에서 밝힌바와 같다. 윤활 환경에서 하중의 증가와 함께 마찰계수가 점차 감소하여 300N의 하중에서는 약 0.035정도로 감소하는 것은 고하중에 있어서 안정된 값을 보이고 있는 것으로 생각된다. 한편 공기중에서와 윤활 환경에서의 마찰계수의 값이 현격한 차이가 없는 것은 Ni4.5%-Al재의 특성으로 인한 것으로서 강에 비해 알루미늄이 재질적으로 부드럽고 연한 성질에 기인한다고 본다.

Fig. 14 (II) (a)에서 보면 마찰거리가 약 200m정도 경과하면서 마찰계수가 급격히 상승한 것은 표면 코팅층이 완전히 박리되면서 기재인 S45C재가 노출되고 Ni4.5%-Al의 마모분말과 S45C의 마모 분말이 섞인 상태로 마찰 상대면 사이에 존재하여 마모 현상을 더욱 가중시키는 어브레시브(abrasive)마모 형태로 변하고 있음을 보여주고 있는 것이다. 300N의 하중, 공기중에서의 실험에서는 Fig. 14 (III) (a)에서와 같이 마찰거리 약 50m이내에서 본드 코팅층이 완전히 박리되어 기재가 노출됨과 동시에 급격히 마찰계수가 증가하여 어브레시브 마모 형태로 변하였다가 다시 마찰거리 1000m정도에서 다시한번 마찰계수가 급격하게 증가하고 있음을 볼 수 있고 마찰의 전 과정동안 마찰계수의 급증과 저하가 반복되고 있음을 알수있다.

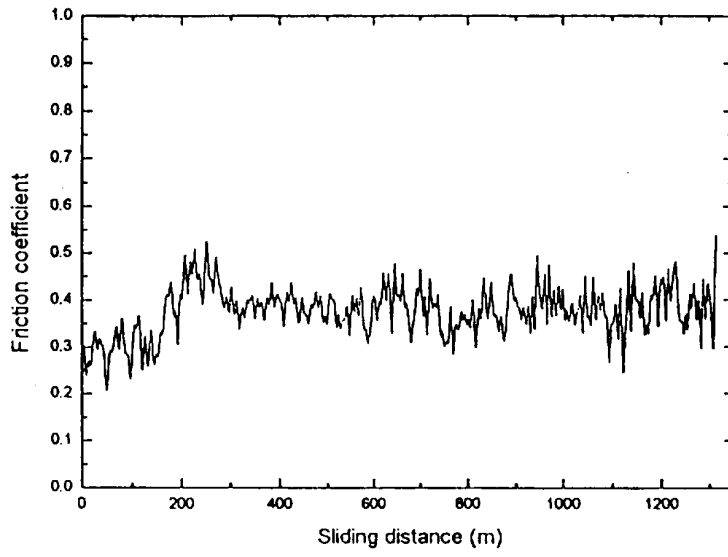


(a) in air

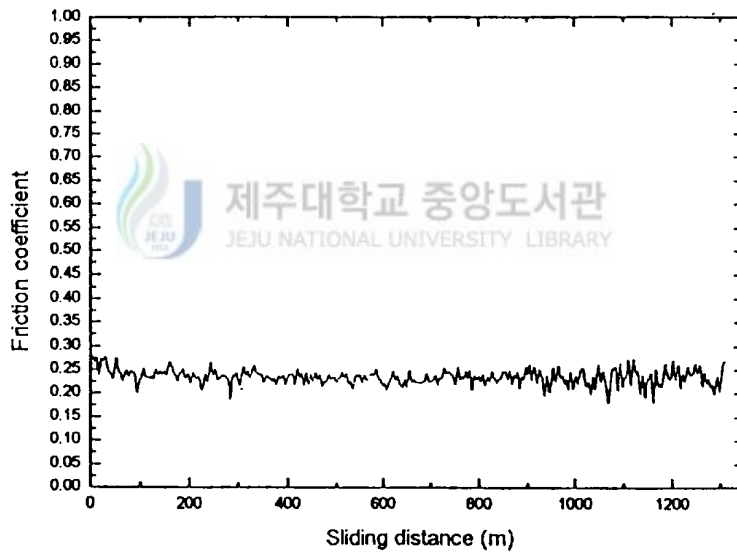


(b) in lubrication

(I) load 100N

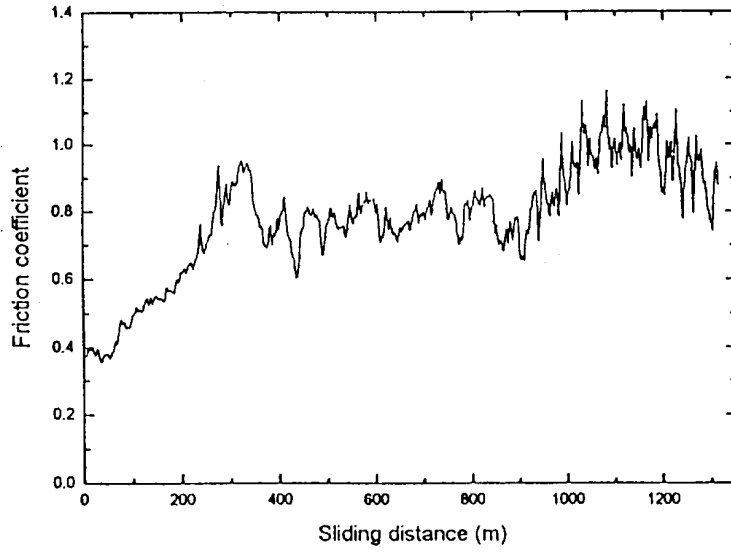


(a) in air

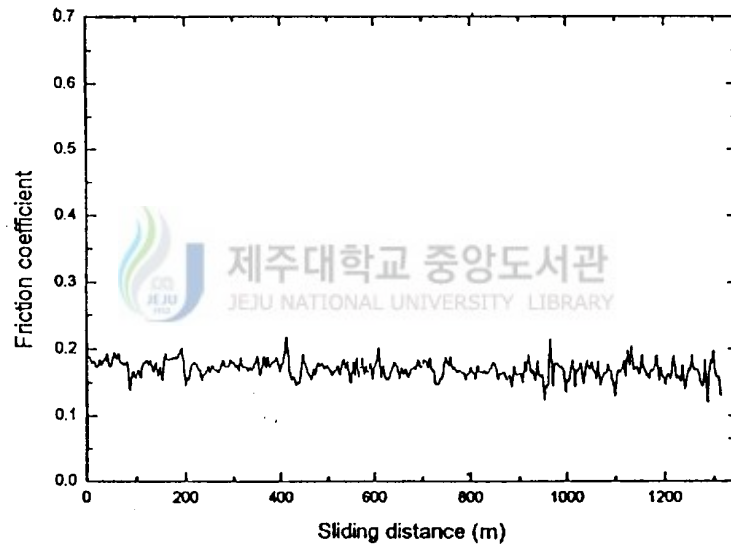


(b) in lubrication

(II) load 200N



(a) in air



(b) in lubrication

(III) load 300N

Fig. 14 Effect of load on friction coefficient (Sliding distance 1350m, sliding velocity 0.183m/s, material BOND)

한편 Fig. 15는 S45C시편, BOND시편, TiO₂시편을 공기중에서 100N의 하중으로 건조 미끄럼 마찰 실험을 행하여 미끄럼 거리 100m에서 10m경과된 110m까지의 마찰계수를 비교한 것을 보인 것이다.

여기에서 마찰계수는 S45C재가 0.37, BOND재가 0.29, TiO₂재가 0.15정도의 값을 나타내고 있어서 모재보다는 TiO₂를 코팅한 시편의 마찰계수가 훨씬 감소하고 있음을 나타내주고 있는 것으로 보아 세라믹 코팅층의 저마찰계수 특성을 보여주고 있다. 이것은 세라믹이 재료로서 취성파괴에 약하다는 결점(陳寧, 1995)을 지양하여 금속의 표면에 세라믹 피막을 제작함으로써 세라믹이 가지는 결점을 극복하고 내마모성을 개선할 수 있다는 것을 의미하고 있다.

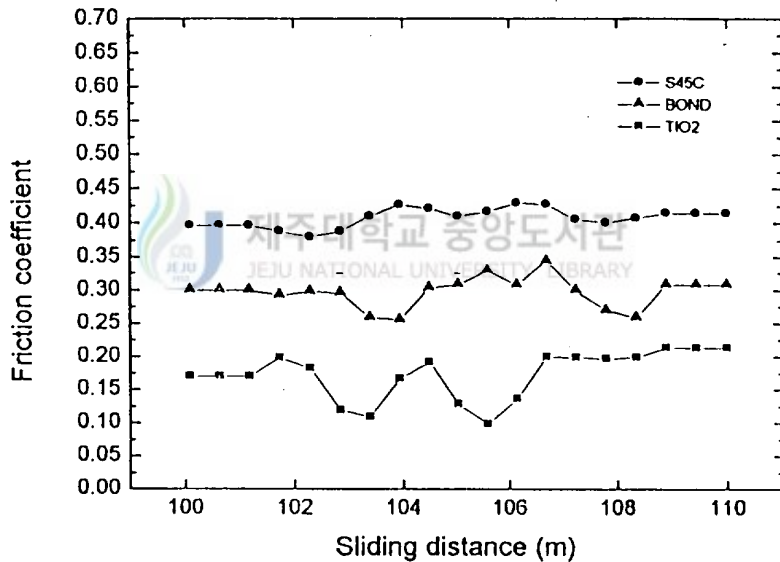
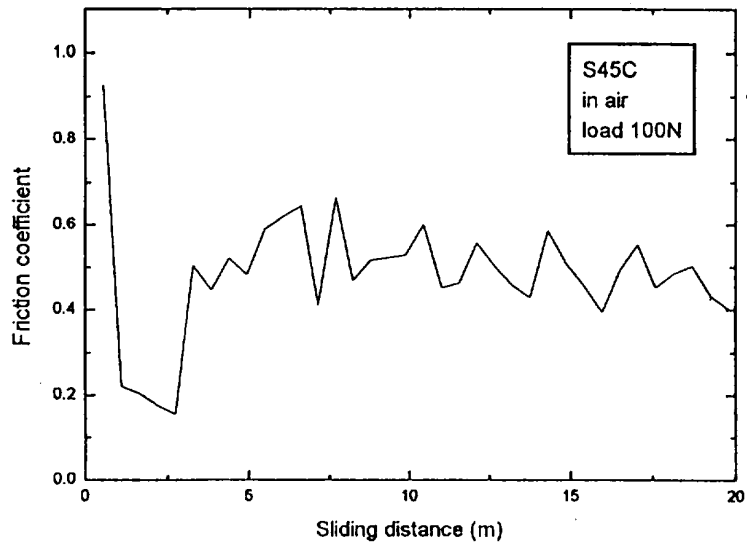


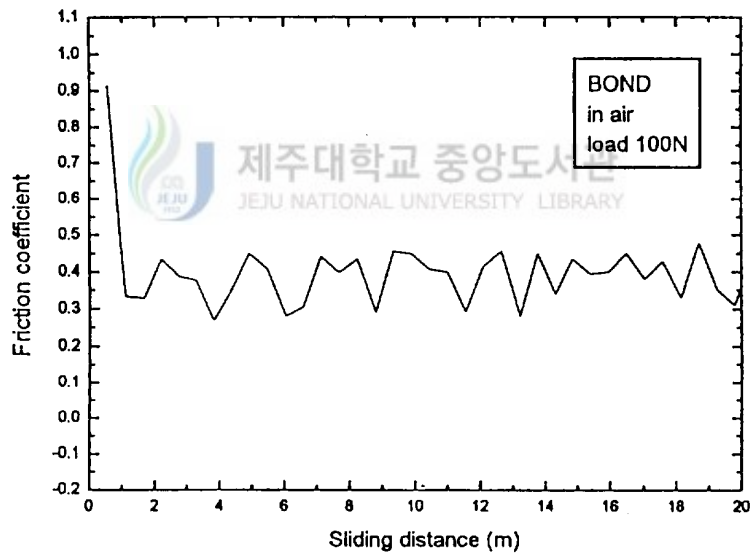
Fig. 15 Relation between friction coefficient and sliding distance. (in air, load 100N, sliding velocity 0.183m/s)

Fig. 16은 마찰계수가 마찰거리에 따라 변화하는 상태를 관찰한 일례로서 가한하중 100N, 미끄럼속도가 0.183 m/s일 때 모재인 S45C재, 본드코팅한 BOND재, TiO₂를 코팅한 TiO₂재를 미끄럼 거리 20m동안에 측정된 마찰계수를 나타낸 것이다. Fig. 13 (a)의 S45C재인 경우에서 미끄럼 거리가 증가할수록 마찰계수가 조금씩 감소하는 경향을 보이는 것은 마모가 진행되면서 미끄럼 거리가 증가되고 이로 인해 회전 시편과 고정 시편 사이에서 유동층이 형성되기 때문인 것으로 예상된다. 이러한 유동층은 고체 윤활제로서 어느 일정 시간동안 자기 윤활 작용을 하는 경우가 있다.

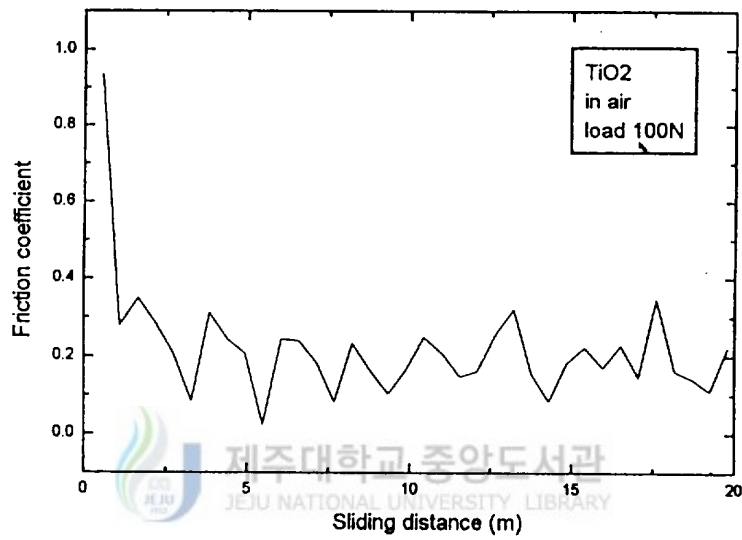
그러나 Fig. 16 (b)에서와 같이 Ni-4.5%Al을 언더코팅한 BOND재나 Fig. 16 (c)의 TiO₂를 코팅한 TiO₂재에 있어서는 모재와 같은 마찰계수가 감소하는 경향은 나타나고 있지않다. BOND재의 경우 시험시작때의 마찰계수의 값이 계속 유지 되고 있고, TiO₂재의 경우 또한 마찰계수의 값이 유지되고 있음을 알수 있다. 하지만 마모가 진행되어 미끄럼 거리가 늘어날수록 덩어리진 마모분말 또는 마모분말이 밀집되어져 있는 곳에서는 마찰계수의 변화가 발생하고 있음을 알수 있었다.



(a) S45C재



(b) BOND재



(c) TiO₂재

Fig. 16 Comparisons of friction coefficient in test time (sliding distance).

3) 마찰거리에 따른 마모량의 변화

Fig. 17은 마찰거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다. S45C시편을 150N의 하중을 가한 상태에서 미끄럼 마찰을 시켜 마찰거리 220m마다의 마모량을 측정하였다. 공기중과 윤활 환경하에서 실험하여 그 마모량을 비교 검토하였다. 실험전에 시편을 30분동안 아세톤 초음파 세척을 실시, 세정 탈지하여 완전히 건조시킨후 100mg까지 측정 가능한 정밀 천칭으로 5회측정하고 그 평균값을 실험전 중량으로 하였다. 실험후에도 같은 방법으로 실험후 중량 측정하여 그 차이를 마모량으로 하여 비교 검토 하였다.

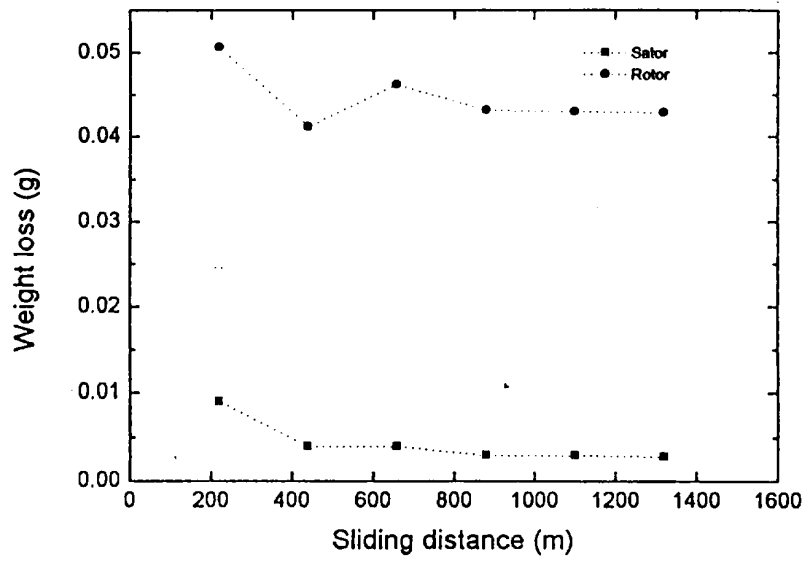
Fig. 17 (a)는 공기중에서의 실험 결과에서 마찰 초기 220m동안의 rotor 마모량은 50.6mg이고 stator 마모량은 0.9mg으로 다른 구간에서 보다 그 마모량이 가장 많았다. 440m 지나면 마모량은 최저로 낮아 졌다가 660m 경과하면서 일정한 마모량값을 나타내고 있다. 마찰면상의 미소 돌기가 상호 작용하여 응착되고 이 응착부가 탈락하고 전이되는 것으로 인해 생기는 마모를 응착마모라고 하는데 이때의 마모량은 하중에 비례하고 경도에 반비례 한다는 것은 일찍이 Holm에 의해서 보고된바 있다. 마모 초기에 있어서 마모량이 급증하는 것은 상대 마찰면 사이에 친화력이 없는 상태였다가 마모가 진행되면서 발생된 마모 분말에 의한 것으로 생각되며 또 상대 마모면의 미소 돌기가 절삭 작용을 하는 것 때문이라고 생각된다.

마찰거리가 길어지면서 마모량이 다소 작아지고 어느정도 그 마모되는 정도가 일정하게 유지되는 것은 마찰면 사이에 발생된 마모 분말의 자기 윤활 작용 및 산화에 의한 것이라고 생각된다. 마찰거리가 300m정도 지날때의 마모 분말의 색

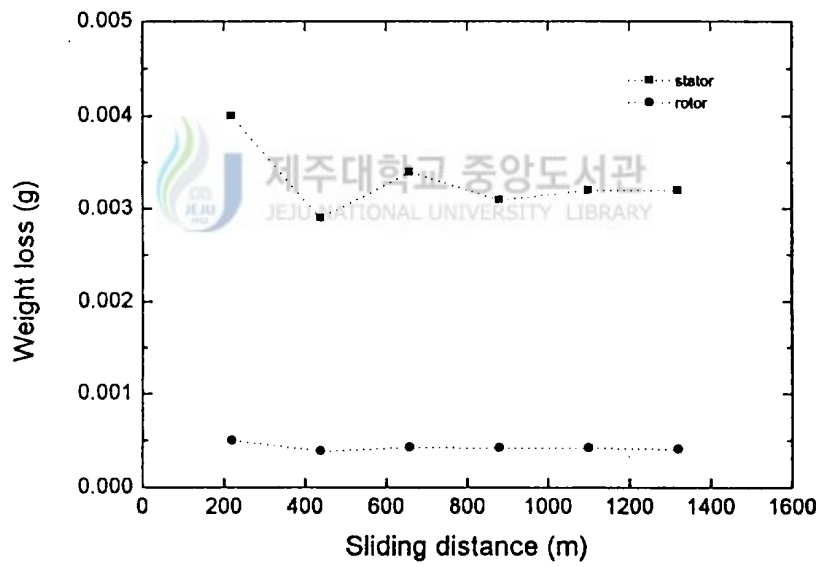
갈도 검정색으로 변해 산화가 진행되었음을 알수 있었다. 이것은 마모가 진행되면서 마찰면 사이에서의 온도가 점점 상승하게되고 따라서 마모 분말이 고온 산화되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 17 (b)는 윤활 환경에서의 실험 결과를 나타낸 것으로 stator이나 rotor의 마모량은 공기중에서 보다 훨씬 적은 양을 보이고 있다. 마찰면 사이의 윤활유에 의해 마찰면끼리의 직접 접촉이 아닌 간접 접촉으로 인해 마모량이 적어졌다고 생각된다.





(a). in air.



(b). in lubrication.

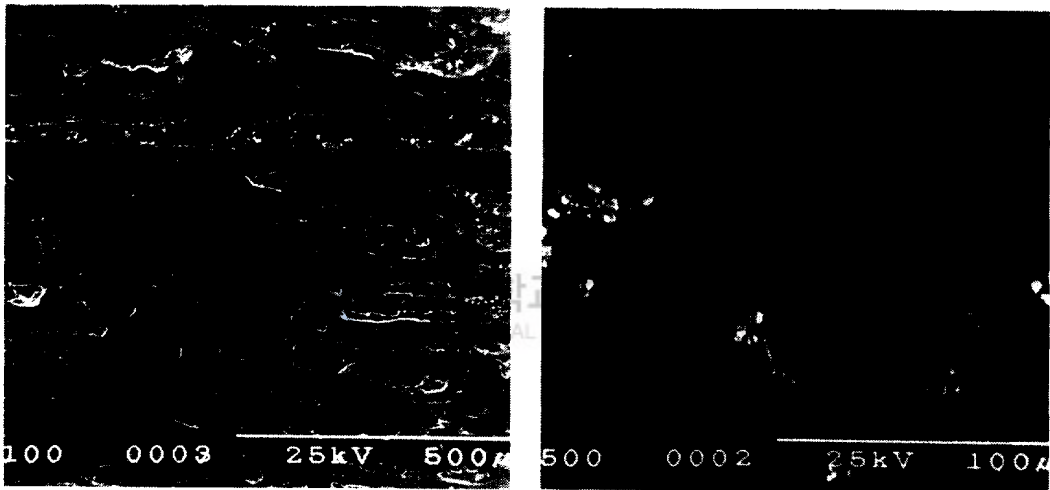
Fig. 17 Relation of weight loss and sliding distance (load 150N, material S45C)

4) 마모면의 SEM 관찰

Fig. 18은 하중의 변화에 따른 마모면의 형상 변화를 주사형 전자 현미경으로 관찰한 것이다. S45C재를 공기중에서 미끄럼 마찰시험을 행한 것으로 (I)는 100N, (II)는 200N, (III)는 300N의 하중에서 마모면의 모양을 나타낸 것이다. 또 (a)는 회전 시험편의 마모면 모양이고 (b)는 고정 시험편의 마모면 모양을 나타낸 것이다. (I)의 100N의 하중에서 (a)를 보면 마멸면은 연삭마모 작용에 의한 가는 줄무늬가 발생되고 있음을 볼수 있다. 하중이 증가하면서 연삭 작용이 심화되고 굵은 줄무늬가 발생되면서 응착마모에 의한 부분들이 관찰되고 있다.

응착마모는 상대 마모재와의 접촉부에서 마모열 및 하중 등으로 인하여 미소 부분이 접착 즉 응착이 되고 이 응착부가 밀려나가는 전단 작용에 의해 마모가 일어나는 마모기구의 중요한 영역이다. Fig. 18 (II)에서 응착부에 의해 굵은 자국을 선명하게 볼수가 있다. Fig. 18 (III)에서는 이 응착부가 고하중에 의해 떨어져 나가면서 뜯긴 자국이 보이며 마모면상에 미세한 박막 형태의 이착막도 관찰되고 있다. 이와같이 응착부가 떨어져 나가거나 뜯긴 부분은 또다시 상대 마모재에 연삭 작용을 일으키는 돌기로 작용하기 때문에 마모량이 급증하게되는 원인이 되고 있다고 사료된다. 따라서 고하중으로 갈수록 굵은 줄무늬가 전체적으로 발생되고 응착부의 생성 탈락이라는 과정을 거치면서 마모는 급격히 진행되고 있음을 알수 있다. 한편 S45C의 마이크로비커어스 경도는 260인대 비해 고정 시험편인 SUJ II는 788(Table 5)로서 고정 시험편의 경도가 훨씬크다. 따라서 고정 시험편의 마모면 모양인 (b)에서 보는바와 같이 하중이 증가하여도 마모면에서의 특이점은 볼수가 없고 다만 몇개의 선모양 무늬가 길게 보이고 있을

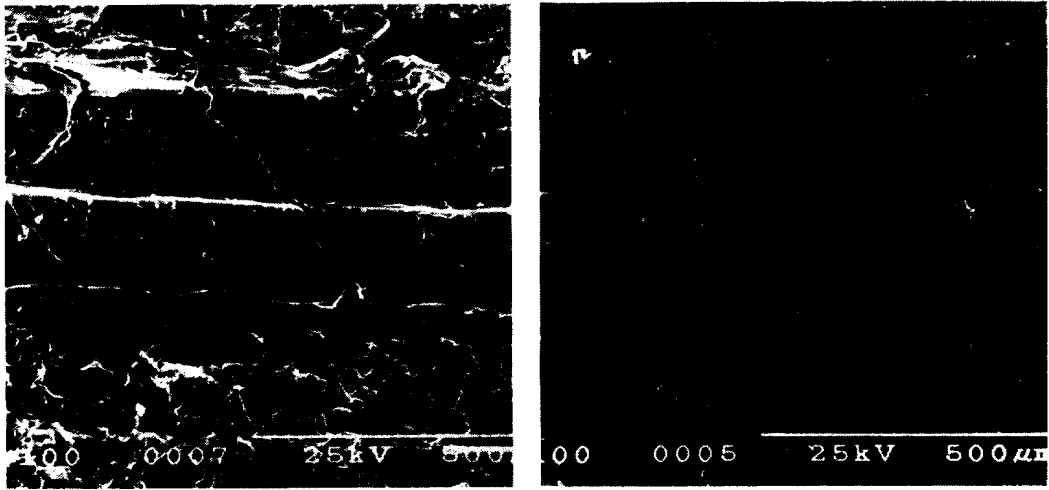
뿐이어서 마모 특성에서의 경도의 영향도 크다는 것을 알수 있다. 즉 상대 재료보다 경도가 작은쪽에서 심한 마모가 일어나고 있어서 앞절에서 밝힌바와 같이 고정 시험편의 마모량도 회전 시험편보다 훨씬 적은양을 나타내고 있는데서 이 점을 명확하게 설명해주고 있는 것이다.



(a)

(b)

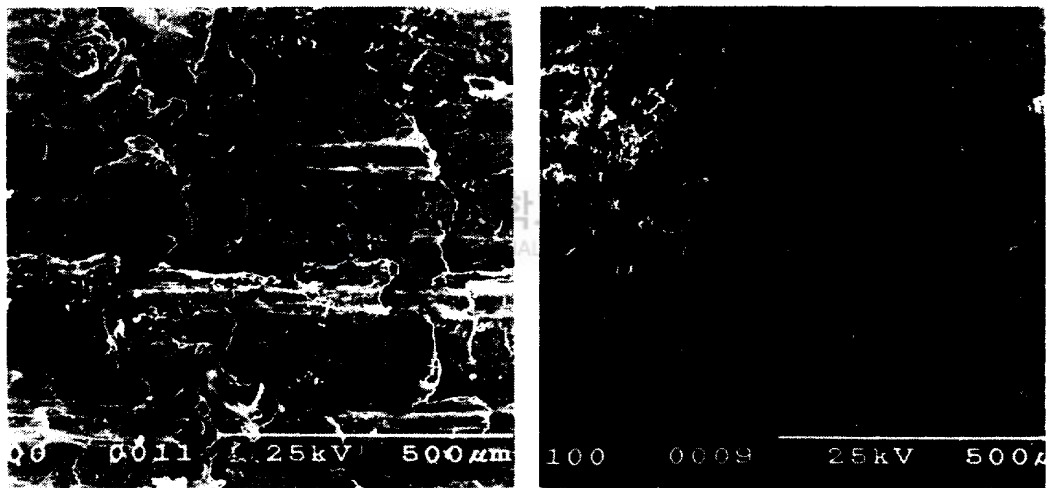
(I)



(a)

(b)

(II)



(a)

(b)

(III)

Fig. 18 Wear surfaces of S45C composite with various loads :(I) 100N, (II) 200N, (III) 300N, (a) rotor, (b) stator, material : S45C

Fig. 19에 공기중에서와 윤활 환경에서의 시료별 마모면의 모양을 나타내었다. Fig. 19 (I)는 S45C재를 300N의 하중에서 실험한 마모면의 모양이고 Fig. 19 (II) (a)는 BOND재를 공기중에서 100N의 하중으로 실험한 마모면의 모양이며 Fig. 19 (II) (b)는 윤활 환경에서 300N의 하중으로 실험한 마모면의 모양이다. Fig. 19 (III) (a)는 TiO₂재를 공기중에서 100N의 하중으로 (b)는 윤활 환경하에서 100N의 하중으로 실험한 마모면의 모양이다.

Fig. 19 (I)의 (a)인 S45C 재에 있어서 공기중에서의 마모면의 형상은 육안으로도 매우 거칠었다. 마모가 진행되면서 상대재와의 응착과 탈락으로 마모 입자들이 생성되고 이 입자들에 의한 입자 마모로 굵은 줄무늬와 함께 뜯겨나가거나 파여진 흔적이 여기저기 산재하여 있고 홈(groove)이나 골(ploughing)에 마모된 파편들이 누적되어 있음을 확인할 수 있다. 이것은 덩어리 상태(cluster)의 입자들과 개개의 입자들이 활발히 이동하면서 홈이나 골을 형성하는 것으로 사료된다. 이러한 마모면의 형상은 경도가 약한 기재쪽의 마모를 촉진 시키는 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 19 (I) (b)의 윤활 환경에서는 머리칼 같은 가늘고도 연속적인 줄무늬만 관찰되고 있다. 마모 초기에서 부터 접촉면의 윤활 환경으로 인하여 응착이 일어나기 어렵고 따라서 마모입자의 생성이 어려웠기 때문이라고 생각된다. 기재에서의 입자 탈락이라는 현상도 없기 때문에 상대적으로 경도가 높은 고성 시험편과의 접촉에서 의해서만 마찰이 이루어지고 있으므로 입자에 의한 연삭 작용이 전혀 없을 것으로 사료된다.

Fig. 19 (II) BOND재의 마모면의 모양을 보면 (a)는 공기중 100N의 하중에서 실험한 것이고 (b)는 윤활 환경 300N의 하중에서 실험한 마모면의 모양이다. 공

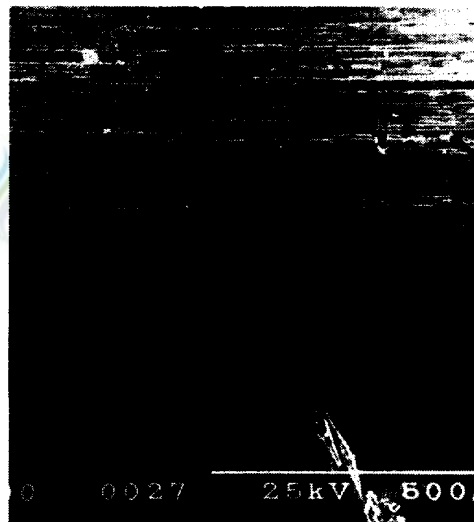
기중에서와 윤활 환경에서의 마모면의 모양을 비교해 보면 공기중에서의 하중이 윤활 환경에서의 하중보다 1/3로 적은데도 공기중에서의 마모가 오히려 심하게 일어나고 있음을 알수가 있다. 공기중에서의 마모는 Ni4.5%-Al의 분말을 표면에 코팅한 시료의 연한 성질로 인하여 강보다는 마모의 정도가 작지만 표면에 찢긴 듯한 흔적이 연속적으로 보이고 있다. 그러나 윤활 환경에서는 오히려 하중이 کم에도 불구하고 연마 효과를 보이고 있음을 알수 있다. 이것은 윤활에 의해 마모가 일어나지 않거나 마모의 효과가 미미함을 설명해주고 있는 것이다.

Fig. 19 (III) 은 100N의 하중에서 TiO₂재의 마모면 모양이다. (a)는 공기중에서의 마모면 모양이고 (b)는 윤활 환경에서의 마모면 모양이다. 시료의 표면에 세라믹인 TiO₂를 코팅한 것으로 관찰된 표면 전체가 세라믹의 특성인 기공으로 이루어져 있음이 관찰되었다. 고정 시험편의 경도는 788, 회전 시험편인 TiO₂재의 경도는 768로서 S45C재나 BOND재에 비해 매우 높다(Table 5). 따라서 (a)의 공기중에서의 마모면 모양을 보면 마모의 흔적을 알아보기가 어렵다. 다만 상대 마모재와의 접촉 부분에서 눌린 자국이 한두군데 연속적으로 확인할 수 있다. (b)의 윤활 환경에서는 그러한 눌린 자국도 확인하기가 어려울 정도로 마모의 흔적이 발견되지 않고 있다.

이와같은 마모면의 관찰을 통하여 세라믹 코팅층의 내마모성은 크게 향상되었음을 단적으로 확인이 되었으며 윤활에 의한 저마모라는 트라이보 특성을 기대할 수 있게 되었다. Fig. 19 (I)의 (a)와 (II) (a), (III) (a)의 비교에서 세라믹 코팅층의 내마모성이 크게 증가 되었음을 확연하게 알수 있다.

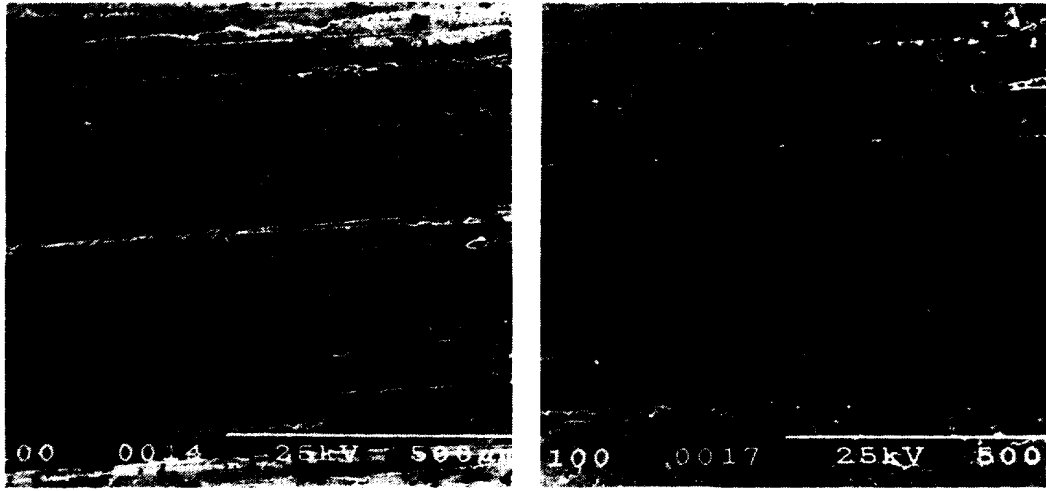


(a) in air, load ; 300N



(b) in lubrication, load ; 300N

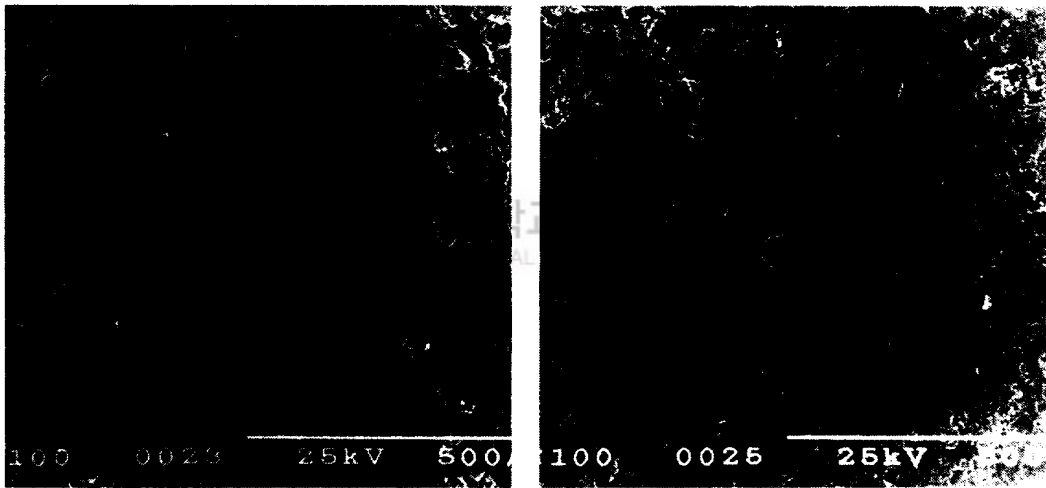
(I) S45C재



(a) in air, load ; 100N

(b) in lubrication, load ; 300N

(II) BOND재



(a) in air, load ; 100N

(b) in lubrication, load ; 100N

(III) TiO₂재

Fig. 19 Wear surfaces of specimens composite

X. 결 론

퍼스널 컴퓨터와 A/D 컨버터 및 스트레인 증폭기를 제어부로하여 제작한 Pin on disk형 마모 시험기에서의 공기중에서와 윤활 환경하에서 미끄럼 마찰형식으로 마모 실험을 실시하여 그 기본적인 마모 특성을 조사하였다. S45C 탄소강 표면에 TiO_2 를 화염 용사에 의해 코팅하여 트라이보(Tribo) 특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 제작한 Pin on disk형 마모시험기는 모든 데이터를 컴퓨터에 의해 처리하고 Ball on disk형 시험 및 윤활 환경이나 부식 환경에서의 실험도 가능하다.

2. 하중의 변화에 따른 마모량의 비교 검토에서 하중에 비례하여 마모량도 증가 하였다. 마모량은 공기중, 윤활 환경중 모두 S45C재, BOND재, TiO_2 재 순으로 현저하게 낮아졌고 윤활 환경에서는 마모량이 매우 적었다. 윤활 환경에서나 공기중에서의 TiO_2 재의 하중 손실량은 각각 0.09mg과 0.2mg으로 S45C 재의 1.4mg 및 135.9mg 보다 훨씬 적었다.

3. 하중의 증가는 마찰계수의 변화에 거의 영향을 주고 있지 않았다. 이것은 하중이 증가하면 마찰력도 증가하기 때문이다. S45C재에서 마모진행 초기에 마찰계수가 약간 감소되는 것은 접촉부분에서 마모분말이 유동하고 있기 때문이며 마모가 더욱 진행되면 하중은 마찰계수에 영향을 덜주고 있음을 알 수 있었다. 마찰계수에 있어서도 S45C재, BOND재, TiO_2 재 순으로 감소하여 세라믹 코팅층

의 저마찰이라는 트라이보 특성의 개선 효과를 볼수 있었다. 이런 현상은 윤활 환경에서 더욱 명확하게 알수 있었다.

4. 공기중에서와 윤활환경에서 마찰이 진행되는 과정을 마찰거리에 따라 조사한 바 마모초기의 마모량이 현저하게 증가하였다. 다시 시간이 점점 경과되면 마모량은 감소하다가 일정하게 유지되었다.

5. 마모면의 모양을 주사형 전자 현미경(SEM)으로 관찰한 결과 공기중에서는 응착에 의한 마모 입자의 연삭 작용에 의해 급격한 마모가 진행되고 있음이 관찰되었고 윤활 환경에서는 윤활에 의한 응착의 저하로 인하여 접촉 마모 현상만 관찰되었다. 또한 세라믹 코팅층의 마모는 거의 일어나지 않아 세라믹 코팅층의 내마모성이 크게 개선되었음을 관찰할 수 있었다.



V. 참고문헌

- 공호성, 권오관, 김형선. 1993. "알루미늄 합금표면에 코팅된 세라믹재의 마찰마멸 특성". 大韓機械學會論文集 17, 12. 3083-3093.
- 駒井謙治郎. 1989. "腐食磨耗". 材料36, 402. 303-306
- 권재도, 안정주. 1995. "SiC 보강 A16061 복합재료의 마멸 및 마찰특성에 관한 연구". 大韓機械學會論文集 19, 9. 2122-2132.
- 김석삼, 서창민, 류춘무, 박준목. 1995. "TiN 코팅된 고속도강과 합금공구강의 마멸거동". 大韓機械學會論文集19, 3. 705-712.
- 金永植. 1992. "티타니아 세라믹 溶射皮膜의 機械的 特性에 關한 研究"
- 尾崎義治. 1991. "セラミックス改質". 材料 40, 457.1253-1263.
- 木村好次, 岡部平八郎. "TRIBOLOGY 概論". 동명사
- METCO : THERMAL SPRAY COATINGS
- 봉하동, 송정일, 양유창, 한경석. 1995. "탄소 섬유와 SiC 휘스커를 혼합한 Al/Al₂O₃복합재료의 마멸특성". 大韓機械學會論文集 19, 7. 1619-1629.
- 山本雄二, 楊 林, 橋本正明, 門田光央. "炭化けい素の摩擦磨耗にぼす雰圍氣および介在磨耗粉の影響". 日本機械學會論文集 (C編) 61, 584. 1599-1604.
- 棚木敏幸, 湯淺 眞, 關根 功. 1995. "TiNで皮覆した合金工具鋼(SKD 11)食塩水中ので腐食磨耗". Zairyo to Kankyo 44, 72-79.
- 松 原 清. 1993. "トライボロジ(摩擦, 磨耗, 潤滑の 科學と技術)". 産業圖書株式會社.

日本溶射學會. “溶射ヘンドブック”

林 和宏, 平佐多 敬二, 村松英明, 杉田和彦. 1995. “高速, 高面壓しゅう動下の鑄鐵の摩擦, 磨耗特性(第1報, 熱的磨耗状態における摩擦係數と磨耗速度)”. 日本機械學會論文集(C編) 61, 585. 2044-2050.

임홍준, 김영한, 한경석. 1993. “Al/SiC/Al₂O₃복합재료의 기계적 성질 및 마멸특성”. 大韓機械學會論文集17, 10. 2498-2508

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ー特性に及ぼす温度の影響(磨耗特性とトベイフィルム形成の關係)”. 日本機械學會論文集(C編) 61, 586. 2553-2558.

陳 寧, 足立幸志, 加藤康司. 1995. “アルミナと軸受鋼の滑り磨耗機構および磨耗形態圖”. 日本機械學會論文集(C編) 61, 584. 1605-1612.

沖猛雄. 1990. “表面改質による材料の高性能化 技術” Boshoku Gijutsu 39, 4. 201-210.

W.E.Ballard : Metal Spraying and the Flame Deposition of Ceramics and Plastics, 2, 1963.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 성심으로 지도하여 주신 김귀식 교수님께 감사를 드리오며, 세심한 지적과 조언으로 항상 관심을 갖고 지도와 격려를 아끼지 않으신 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님께 감사를 드립니다.

아울러 본 연구 기간중 항상 옆에서 많은 어려움을 같이 해결하여 주시고, 많은 도움을 주신 오맹종 선생님을 비롯한 대학원생 여러분께 감사 드립니다.

한편, 바쁘신 가운데도 많은 도움을 주신 우림정밀 김학림 사장님과 한국기계연구소 윤소남 박사님 그리고 해양연구소의 강태연 연구사님께도 감사 드립니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 성심으로 뒷바라지를 하여주신 어머님과 사랑하는 아내 영자에게 감사드리며 오늘이 있기까지 정성과 사랑으로 보살펴 주신 모든 분들께 이 작은 결실을 드립니다.