

碩士學位論文

플라즈마 용사 세라믹 코팅재의
유효환경에서의 마모 특성



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

金 昌 昊

2001

碩士學位論文

플라즈마 용사 세라믹 코팅재의
운할환경에서의 마모 특성

指導教授 金 貴 植



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

金 昌 昊

2001

플라즈마 용사 세라믹 코팅재의
유효환경에서의 마모 특성

指導教授 金 貴 植

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2001 年 月 日

濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科



金昌昊의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2001 年 月 日

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 재료 및 방법	4
2. 1 시험편	4
2. 2 시험기	9
2. 3 실험 방법	11
III. 실험 결과 및 고찰	15
3. 1 TiO ₂ 코팅재의 마모 특성	15
3. 2 Al ₂ O ₃ 코팅재의 마모특성	23
3. 3 세라믹 코팅재 마모의 부하하중 의존성	32
3. 4 세라믹 코팅재 마모의 윤활환경 의존성	34
3. 5 윤활환경 하에서 비마모량의 변화	36
3. 6 SEM 관찰에 의한 마모면의 미시적 관찰	40
IV. 결 론	49
V. 참고문헌	50

List of Tables

Table 1 The chemical composition and mechanical properties of test specimens.

Table 2 Blasting conditions

Table 3 Plasma spraying conditions.

Table 4 Chemical compositions of TiO_2 and Al_2O_3 ceramic powder(wt%).

Table 5 Powder composition and physical properties.

Table 6 Experimental conditions.

Table 7 Physical qualities of lubrication.

Table 8 Microhardness of specimens (Hv).



List of Figures

- Fig. 1 Shapes and dimension of specimens. (unit : mm)
- Fig. 2 Block diagram of wear testing machine.
- Fig. 3 Calibration of friction force.
- Fig. 4 The friction coefficient, friction force and load of TiO₂ coating material under grease lubrication.
- Fig. 5 The friction coefficient, friction force and load of TiO₂ coating material under a general hydraulic fluids lubrication.
- Fig. 6 The friction coefficient, friction force and load of TiO₂ coating material under bearing fluids lubrication.
- Fig. 7 The friction coefficient, friction force and load of Al₂O₃ coating material under grease lubrication.
- Fig. 8 The friction coefficient, friction force and load of Al₂O₃ coating material under a general hydraulic fluids lubrication.
- Fig. 9 The friction coefficient, friction force and load of Al₂O₃ coating material under bearing fluids lubrication.
- Fig. 10 Relationship of friction coefficient and applied load under lubricative environments. (TiO₂ coating material)
- Fig. 11 Relationship of friction coefficient and applied load under lubricative environments. (Al₂O₃ coating material)
- Fig. 12 The friction coefficients of TiO₂ coating material under the lubricative environments and in air. (Load : 300 N, $v=0.2$ m/sec)
- Fig. 13 The friction coefficients of TiO₂ and Al₂O₃ coating material under the lubricative environments. (Load : 300 N, $v=0.2$ m/sec)
- Fig. 14 Relationship of specific wear rate and applied load under the lubricative environments. (TiO₂ coating material)

Fig. 15 Relationship of specific wear rate and applied load under the lubricative environments. (Al_2O_3 coating material)

Fig. 16 Coated surface before a wear test of TiO_2 coating material.

Fig. 17 Coated surface before a wear test of Al_2O_3 coating material

Fig. 18 SEM photograph of wear surface of TiO_2 coating material under grease lubrication.

Fig. 19 SEM photograph of wear surface of TiO_2 coating material under a general hydraulic fluids lubrication.

Fig. 20 SEM photograph of wear surface of TiO_2 coating material under bearing fluids lubrication.

Fig. 21 SEM photograph of wear surface of Al_2O_3 coating material under grease lubrication.

Fig. 22 SEM photograph of wear surface of Al_2O_3 coating material under a general hydraulic fluids lubrication.

Fig. 23 SEM photograph of wear surface of Al_2O_3 coating material under bearing fluids lubrication.



Wear Characteristics of Ceramic Coating Materials by Plasma Spray under The Lubricative Environment

Chang-Ho Kim

Department of Mechanical-Energy Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

Supervised by professor Gui-Shik Kim

SUMMARY

This paper is to investigate the wear behaviors of two types of ceramics, Al_2O_3 and TiO_2 , by coated plasma thermal spray method under the lubricative environment. The lubricative environments are grease fluids, a general hydraulic fluids, and bearing fluids. The wear testing machine used a pin on disk type. Wear characteristics, which were friction force, friction coefficient and the specific wear rate, according to the lubricative environments were obtained at the four kinds of load, and the sliding velocity is 0.2m/sec. After the wear experiments, the wear surfaces of the each test specimen were observed by a scanning electronic microscope. The obtained results are as follows. : 1. The friction coefficients of TiO_2 coating materials

are 0.11 ~ 0.16 range and those of Al_2O_3 are 0.24 ~ 0.39. The friction coefficient of two coating materials is relative to the hardness of these materials. 2. The friction coefficient of TiO_2 coating materials in three lubricative environments is almost same to each other in spite of changing of applied loads. 3. The friction coefficient of Al_2O_3 coating materials is more large in low load than high load. And the friction coefficient in grease is more large than a general hydraulic and bearing fluids had almost same friction coefficient. 4. The specific wear rate in TiO_2 is greatly increasing according to change the applied loads, but that in Al_2O_3 is slightly. And the wear in grease is the least among three lubricating environments. 5. On the wear mechanism by SEM image observation, the wear of Al_2O_3 is adhesive wear and TiO_2 is abrasive wear.



I. 서 론

세라믹은 다른 금속재료에 비해 고경도, 내식성, 내열성, 고온 강도, 화학적 안정성, 내마모성이 우수한 특성을 지니고 있다. 종래의 금속재료로서 대응할 수 없었던 고온환경 및 가혹한 환경에서 가동하는 기계 및 부품 즉, 세라믹터빈, 단열디젤엔진, 제지용 롤러, 항공기 부품 등의 실용화에 거는 기대는 커지고 있다[1]. 최근에는 모재의 특성을 손상시키지 않고 모재의 표면에 내열성, 내부식성 및 내마모성 등이 탁월한 기능을 부여하는 코팅기술이 주목받고 있다. 여러 가지 코팅기법 중 플라즈마용사법(plasma spraying)은 고체, 액체, 기체 외의 제 4물질로 불리고, 극히 고온체에서 자유전자가 양이온 등으로 이루어져 있는 방전전리기체로 알려져 있는 플라즈마를 이용하여 코팅하는 기법으로, 이 특수한 고온물체를 가열원으로 하여, 고열량 플라즈마체를 이용하는 것이다. 플라즈마의 발생은 음극과 양극 사이에 전기를 통하고 여기에 가스(Ar, H₂, N₂, He)를 통과시키면 가스는 가열과 분해에 의해 팽창되고 이온화를 일으킨다. 이 과정에서 초고온(10,000~15,000℃)의 플라즈마가 되고, 노즐을 통하여 고속으로(약 900 m/sec) 분사되어 분말상태의 재료가 플라즈마 속에서 녹으면서 적층되는 기법이다[2].

플라즈마용사 세라믹 코팅기술은 분말 및 모재의 특성, 다양한 공정변수, 사용 분위기 등 수 많은 요인들을 고려한 복합적인 기술이다. 특히 분말 제조방법에 따른 분말의 특성(성분, 입도, 조직, 상 분포 등)은 코팅층의 미세조직이나 기계적 특성에 영향을 주어 궁극적으로 기계적 특성에 영향을 주고 있다. 그 중 특히 코팅된 세라믹의 내마모성은 경도, 마찰계수, 결합강도(Bond strength), 표면조도 등의 코팅 특성뿐만 아니라 코팅층의 미세구조나 상분포에도 큰 영향을 받는다. 일반적으로 코팅층의 마모는 응착마모(Adhesive wear), 연삭마모(Abrasive wear), 피로 및 박리마모(Fatigue and Delamination wear), 부식마모(Corrosive wear or Chemical wear)로 분리하고 있지만, 실제 접촉면에서는 한가지 이상의 마모기구가 동시에 작용하므로 연구자들 사이에

서도 의견이 매우 다양하다[3]. 이러한 관점에서 내마모성 세라믹 재료의 마모 기구를 설명하기 위해서 접촉하중, 미끄럼속도, 환경온도, 윤활거리, 재료의 물성치 등의 역학적인자와, 윤활환경에 관한 인자 및 마모가 되는 상대재료의 변화에 따른 재료인자의 상호관계에서 마모기구가 중첩되고 있음을 보고하고 있다[4-8]. 따라서 내마모성이 우수한 세라믹을 사용할 시 사용기준을 확립하고 내마모성에 우수한 트라이보 재료로서 세라믹의 신뢰성 향상을 위한 연구가 요구되고 있다. 역학적인자와 재료인자의 중첩에 관한 마모기구의 연구로서 재료인자의 연구로는, 합금 상태도, 파괴 형태도, 재료의 공업적 특성도 등 현상 파악의 수단으로 Mapping 개념이 유효한 것으로 보고되고 있다[9-11]. 그리고 마모시 산화막이 접촉표면에 형성되는 과정과 이들에 의해서 심한 마모가 방지되는 현상들을 이해하는 것은 매우 중요하다. Scott 등[12]은 접촉면에 마모입자들이 밀착하고 뭉침으로써 산화 보호막을 성장시키고 마모를 감소시키게 한다고 하였다. Sullivan 등[13]은 산화 보호막이 표면 위에서 마모입자들의 소결에 의한 물질전이(mass transfer)와 성장에 의해 형성되어 접촉하중을 실제로 지지하는 고원(plateau) 형상의 접촉면을 형성한다고 하였다. Iwabuchi 등[14] 최근 그들의 연구를 통해서 상호 금속접촉을 방지하는데 효과적인 표면 보호막의 형성은 접촉표면 전체에 걸친 산화현상에 의해서가 아니라, 마모입자들에 의해서 접촉 표면 위에 밀착된 산화층에 의한 현상임을 실험적으로 규명한 바 있다.

한편, 마모과정은 상호 접촉하는 두 고체의 접촉부에서 변형과 파괴로 인하여 표면에서 금속이 이탈되는 과정이다. 따라서 이러한 마모과정을 미시적으로 관찰하여 그 기구를 규명하기 위하여 주로 주사형 전자현미경(SEM)이 사용되고 있다. SEM을 사용하여 마모기구의 규명을 하기 위한 두 가지 방법이 있다. 그 한가지 방법으로는 접촉점의 마모실험을 SEM 내부에서 수행하면서 재료의 마모거동을 연속적으로 관찰하는 방법이 있고, 다른 한가지 방법으로는 마모실험 전후의 마모면과 마모입자를 SEM으로 관찰해서 그 마모기구를 추정하는 것이다. 세라믹에 관해서 Mehrotra[15]는 알루미나의 미끄럼 마모실험을 수행하고 알루미나의 마모면의 SEM 관찰을 실시한 결과 알루미나의 미끄럼마모는

취성과 피로와 소성변형에 의하여 발생한다고 보고하였다. Adewoye[16]도 질화규소와 탄화규소에 대한 미끄럼마모를 수행하고 SEM을 통한 마모면의 관찰 결과, 질화규소는 소성변형, 탄화규소는 입계파괴와 소성변형에 기인한다고 보고하였다.

실제 기계에서, 마모방지를 위하여 내마모성이 큰 재료의 사용과 더불어 그리이스(Grease), 베어링유(Bearing fluids), 유압작동유(A general hydraulic fluids)를 사용하고 있다. 그리이스의 특성을 살펴보면 주로 윤활유를 주입하기 어려운 부분에 사용하는데, 운동 중에는 액체상태를 나타내고, 정지하면 유동성을 상실하여 반고체가 되는 것이 특징이다. 근년에 이르러서는 모든 산업계의 기술혁신으로 고속화, 소형화가 비약적으로 발전되어짐에 따라서 그리이스 윤활의 요구 성상도 다종 다양화가 되었다. 그리이스의 주성분이 되는 기유는 그리이스의 성능 중 윤활성, 내열성, 내산화성, 저온성 등의 특징을 갖는다. 다음으로 베어링유는 고도로 정제된 기유로 제조되기 때문에 점도지수가 매우 높고 산화안정성과 마모방지 성능 갖고 있다. 그리고 수분리성과 항유화성이 매우 우수하여 저점도의 제품은 공작기계 및 방직기계 등의 스핀들 오일로 사용한다. 한편 유압작동유는 열안정성, 산화안정성, 내마모성, 우수한 여과성, 윤활성(마찰감소성), 기타 유압유로서 가져야 할 방기성, 소포성 및 수분리성이 우수하다.

따라서 본 연구에서는 플라즈마용사 세라믹 코팅재의 마모에 미치는 역학적 인자, 윤활환경인자, 재료인자 상호 연관관계를 규명하기 위하여 두 종류의 내마모성 세라믹 재료인 TiO_2 와 Al_2O_3 를 기계구조용 탄소강 S45C를 기재로 하여 플라즈마용사(Plasma Spray)를 실시하고, 그리이스, 베어링유, 유압작동유의 환경에서 부하하중에 따른 마찰력, 마찰계수 및 비마모율을 관찰하였다. 그리고 각 실험 후의 마모면을 SEM에 의한 정세 관찰을 통하여 마모기구를 검토하였다.

II. 재료 및 방법

2. 1 시험편

시험편은 회전시험편(Rotor)과 고정시험편(Stator)으로 구성되어 있으며 이들 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 회전시험편의 기재는 S45C를 사용했고, 고정시험편의 기재는 SUJ II를 사용하였다. 그들의 화학적성분 및 기계적성질을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1 (a)의 회전시험편은 폭 70 mm, 두께(t) 5 mm의 Disk형으로 90°간격으로 4개의 탭으로 가공하여 M6 볼트로 시험기의 회전테이블에 고정할 수 있도록 하였다. 또한 진실접촉면(real contact area)을 좋게 하기 위하여 # 320 Cw, # 600 Cw, # 1000 Cw 샌드페이퍼로 연삭가공을 하였다. 그리고 전처리로 기재(S45C) 표면에 블라스팅 처리를 하였고, 블라스팅 조건은 Table 2에 나타내었다. 또한 세라믹 코팅의 접착력을 높이기 위하여 중간재인 본드 코팅으로 Ni-4.5wt%Al 합금분말을 사용하고, 탑 코팅으로 세라믹 TiO₂와 Al₂O₃를 APS(Air plasma spray) 플라즈마 용사장치(METCO Inc.)를 이용하여 코팅하였다. 본드 코팅과 탑 코팅의 플라즈마 용사조건을 Table 3에, 세라믹 TiO₂ 분말과 Al₂O₃분말의 화학적성분은 Table 4에, 본드 코팅과 탑 코팅에 사용하는 분말의 조건을 Table 5에 나타내었다. 코팅층의 두께는 본드 코팅이 약 100 μm, 탑 코팅은 약 250 μm로 하였다. Fig.1 (b)의 고정 시험편인 Stator는 ø5 mm의 핀으로서 고탄소 크롬 베어링강 SUJ II를 기재로 하여 위와 같은 방법으로 코팅하였다.

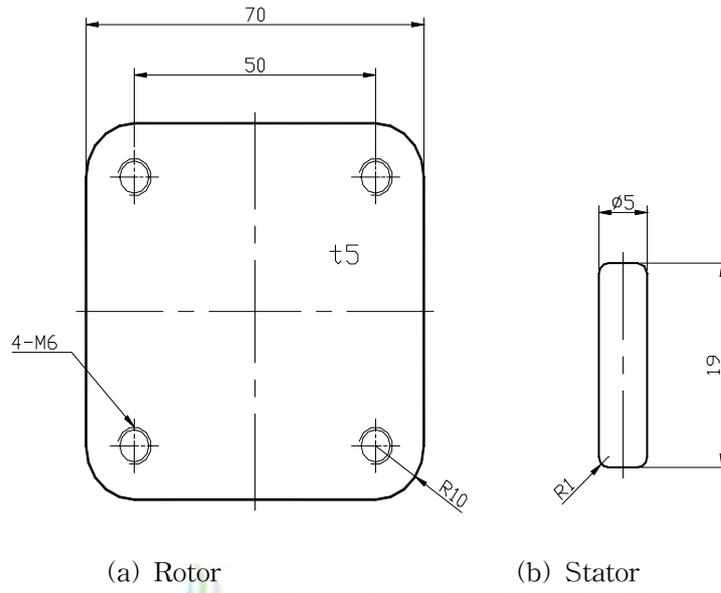


Fig. 1 Shapes and dimension of specimens. (unit : mm)

Table 1 The chemical composition and mechanical properties of test specimens.

(a) Chemical composition. (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Rotor (S45C)	0.464	0.246	0.770	0.0154	0.00693	0.02	0.13	0.01
	0.470	0.251	0.774	0.0162	0.00835			
Stator (SUJ II)	0.95	0.15	0.5	0.25	-	0.25	1.30	0.25
	1.10	0.35					1.60	

(b) Mechanical properties.

	Yield strength (MPa)	Stress (MPa)	Strain (%)	Poisson's ratio	Specific gravity g/cm ³	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 (μm)	Air pressure (kg/cm ²)	Distance (mm)
White alumina	15 ~ 53	5.5	50 ~ 100

Table 3 Plasma spraying conditions.

condition Powder	Type 9MP powder feed Unit		Plasma gas (psi)		DC (A)	DC (V)	Spray distance (mm)
	Flow rate (ft ³ /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H ₂			
TiO ₂	13.5	53	80	15	500	65 ~ 70	75 ~ 100
Al ₂ O ₃	13.5	50	50	50	500	74 ~ 80	51 ~ 102
Ni-4.5wt%Al	13.5	68	80	15	500	65 ~ 70	100 ~ 175

Table 4 Chemical compositions of
TiO₂ and Al₂O₃ ceramic powder(wt%).

TiO ₂	composition	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO
	Bal	0.4	0.2	0.12	0.05	0.03
Al ₂ O ₃	composition	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	-	-
	Bal	1.0	2.5	2.0	-	-

Table 5 Powder composition and physical properties.

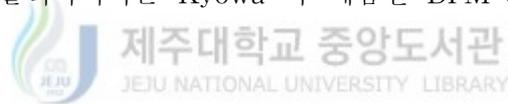
Condition Powder	Typical composition	Typical size range (μm)	Melting point
TiO ₂	Titanium dioxide 99% minimum	8 ~ 88	1920°C
Al ₂ O ₃	Aluminum dioxide 99% minimum	-45 + 11 (-325mesh + 11 μm)	2010°C
Ni-4.5wt%Al	Aluminum 4.5% Nickel balance	45 ~ 90	660°C

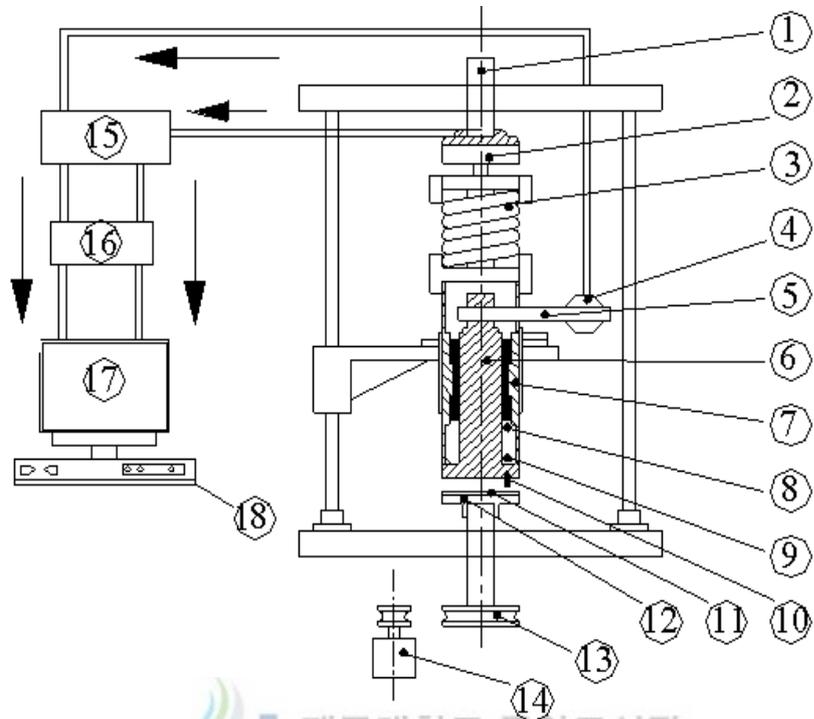
2. 2 시험기

본 실험에 사용된 시험기는 Fig. 2에 나타난 Pin on disk형 마모시험기이다. 시험기의 자체의 고유진동을 줄이기 위하여 중량이 무겁도록 재질을 선택하였고 스프링 부분은 스프링상수가 서로 다른 두개의 스프링을 사용하여 공진되는 현상을 억제하였다.

본 시험에 사용한 모터는 교류 저속 동기 모터(DKM EMPS, 대경 Mach Co.)로서 정회전, 급가속, 급감속 시에도 회전수의 변화가 발생하지 않는다. 변속운전은 주파수 변환장치에 의하여 회전수를 선택할 수 있으며, 전압의 변동하여도 회전수는 일정하다. 또 부하가 변하여도 Slip 현상이 없이 정속도 운전이 가능하다[17].

제어기로는 80486 마이크로 프로세서(micro processor)를 내장한 퍼스널 컴퓨터를 사용했다. 연속계신호(Analog) 와 이산계신호(Digital)를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A 변환기는 12 비트의 분해능력을 가지는 Advantech 사의 PCL-812 PG를 사용했다. 하중과 마찰력을 감지하는 로드셀은 NTS 제품인 LCW-500 K 형으로 정격용량이 5 KN이다. 로드셀에서 검출한 스트레인을 증폭해주는 스트레인 앰플리파이어는 Kyowa 사 제품인 DPM-612 형으로 ± 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. Rotor | 12. Turning table |
| 13. Belt pulley | 14. Motor | 15. Strain amplifier |
| 16. A/D converter | 17. Monitor | 18. Computer |

Fig. 2 Block diagram of wear testing machine.

2. 3 실험 방법

마찰형태는 고정시험편(stator)인 핀에 접촉한 회전시험편(rotor)을 회전시키면서 소정의 하중을 가하는 면접촉 미끄럼 마찰형식인 Pin on disk형으로 상온 상압하에서 실험을 실시하였다. 실험조건을 Table 6에 나타내었다. 부하하중 조건은 200 N, 300 N, 400 N, 500 N이고 미끄럼속도를 0.2 m/s이며, 미끄럼 마찰거리는 1.2 km로 하였다. 실험 환경은 그리이스윤활, 베어링유윤활, 유압작동유윤활 환경 속에서 실험하였다. 윤활유 챔버(Chamber)를 설치하여 윤활유에 완전히 침지된 상태에서 회전시험편과 고정시험편이 함께 회전할 수 있도록 하였다. 매 실험마다 윤활유를 교환하고 적정 윤활이 되도록 보충했다. 각 윤활유의 특성을 Table 7에 나타내었다.

한편 마찰력과 마찰계수의 산출을 위한 개념도를 Fig. 3에 나타내었다. 마찰력 검출을 위한 로드셀과 회전시험편 중심과의 거리 $ob = R$, b점의 힘을 F , 회전시험편의 평균반경 $oa = r$, 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 마찰계수는 다음 식에 의하여 결정할 수 있다.

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

여기서 W 는 부하하중이다.

시험편은 초음파 세척기로 30 분간 초음파 세정, 탈지 및 건조의 과정을 거친 후, 시험편의 무게를 100 mg까지 측정 가능한 전기식저울로 5회 측정하고, 그 평균값을 실험 전 중량으로 하였다. 실험 후에도 같은 방법으로 실험 후 중량을 측정하였고, 실험 전후의 시험편의 무게 차로 마모량을 측정하였다. 그리고 비마모율(Specific wear rate, WS)은 다음과 같은 식에 의해 계산되었다.

$$WS = W / (L \times S) \text{ (g/Nm)}$$

여기서 W 는 마모량 (g), L 은 부하하중 (N), S 는 미끄럼거리(Sliding distance)를 나타낸다[18].

그리고 주사형 전자 현미경(SEM)을 이용하여 마찰에 의한 마모특성 및 마

찰면 관찰을 실시하였고, 기재와 코팅층의 경도는 마이크로 비커어스 경도시험기로 10회 측정하여 평균한 경도를 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 Al_2O_3 의 경도값이 Hv 1136으로 시험편 중에서 가장 큰 경도를 가지고 있다.



Table 6 Experimental conditions.

Normal load (N)	200, 300, 400, 500
Sliding speed (m/s)	0.2
Sliding times (hours)	2
Test temperature(°C)	25
Environment	In lubrication

Table 7 Physical qualities of lubrication.

Kinds of lubrication		Grease	Bearing fluids	A general hydraulic fluids
Density (@15/4°C)		-	0.872	0.873
Kinematic Viscosity	@40°C	-	150	37
	@100°C	-	15.37	7.0
Viscosity index		-	104	150
Flash point (Open type °C)		-	276	175
Pour point (°C)		-	-12.5	-42
Thickener		Li-Ca	-	-
Worked Penetration (@25°C)		265~295	-	-
Dropping point (°C)		180	-	-
Range of using temperature (°C)		-21/+130	-	-

Table 8 Microhardness of specimens (Hv).

Substrate		Bond coating	TiO ₂ coating	Al ₂ O ₃ coating
S45C	SUJ II			
260	788	261	768	1136

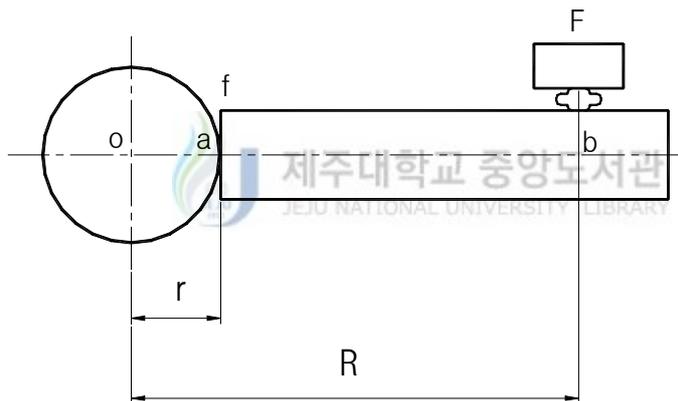


Fig. 3 Calibration of friction force.

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

3. 1 TiO₂ 코팅재의 마모특성

그리스(Grease)는 일반적으로 뛰어난 기계적 안정성 혹은 전단 안정성을 가지고 있고, 내하중 능력 및 충격하중으로 인한 극심한 진동을 막아주며 윤활 조건에서도 피팅(Pitting) 및 소착(Seizure) 등의 손상을 최대한 방지할 수 있다고 알려져 있다. 그리스윤활유 중에서 TiO₂ 코팅재를 미끄럼속도 0.2 m/s 에서 마모실험을 한 결과, 미끄럼거리에 따른 부하하중, 마찰력, 마찰계수와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 상부에는 부하하중(L)을, 중앙부에는 마찰력(Ff), 그리고 하부에는 마찰계수(Fc)를 나타낸다.

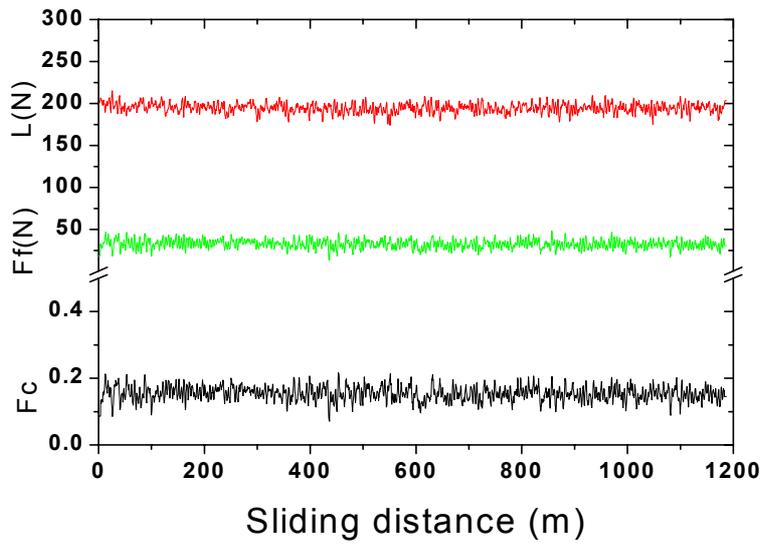
Fig. 4에서 부하하중을 200 N으로 하여 실험한 것을 (a)에 나타내고, 300 N은 (b), 400 N은 (c)에 나타내었다. Fig에서 보면, 부하하중의 증가에 따른 마찰계수는 약 0.15로 거의 일정하였다. 그리고 실험 중의 마모거동을 살펴보면, 각 부하하중하의 실험에서 실험 초기 즉, 미끄럼거리가 150 m ~ 200 m 부근에서 고정시험편(Stator)에 코팅된 세라믹 TiO₂가 탈락되었다. 그리고 그 이후부터는 회전시험편(Rotor)상의 TiO₂의 마모입자와 접촉하고 있던 고정시험편의 기재인 고탄소 크롬 베어링 강의 마모입자가 그리스의 응집력으로 인하여 분산되지 못하고 그리스윤활유 중에 서로 섞인 현상이 관찰되었다. 이러한 현상으로 인하여 서로 섞인 마모입자들에 의하여 회전시험편 세라믹 TiO₂에는 응착마모가 심하게 나타났고, 고정시험편인 고탄소 크롬 베어링 강에는 연삭마모가 일어났다. 회전시험편의 응착마모는 TiO₂의 낮은 경도로 인한 연성파괴 때문으로 생각된다.

유압작동유는 광범위한 온도조건에서 운전되는 유압작동 및 제어장치에 사용되도록 개발된 고점도 지수 타입의 윤활유이며, 점도변화율이 낮은 것이 특징이다[19]. 유압작동유 중에서 TiO₂ 코팅재를 마모실험을 한 결과, 미끄럼거리에 따른 부하하중, 마찰력, 마찰계수와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

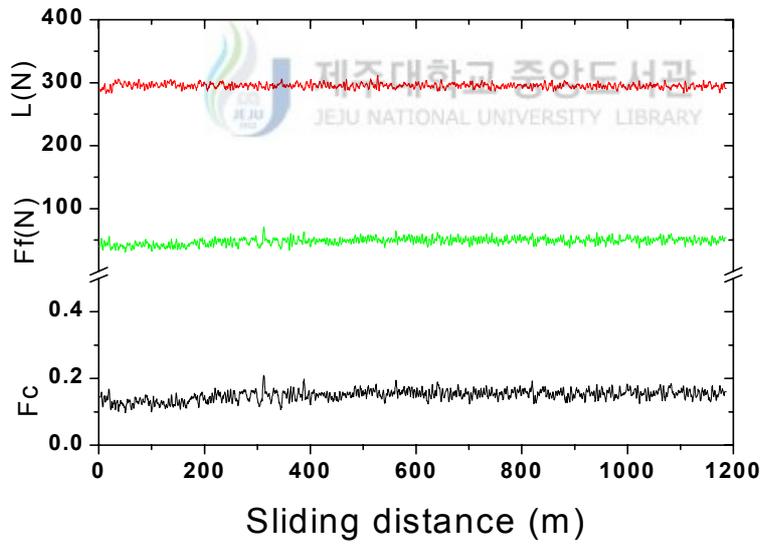
Fig. 5에서 부하하중이 300 N으로 실험한 것을 (a)에 나타내고, 400 N은 (b), 그리고 500 N은 (c)에 나타내었다. Fig에서 보면, 유압작동유윤회에서 마찰계수는 그리이스윤회유 중의 마모특성과 동일하게 나타나고 있으며, 부하하중이 증가하여도 마찰계수는 약 0.14 ~ 0.16 사이에서 변화하였다. 그리고 마모거동을 살펴보면, 각 부하하중하의 실험에서 실험 초기 즉, 미끄럼거리가 100 m 부근에서 고정시험편에 코팅된 세라믹 TiO_2 가 탈락되었다. 그 이후의 마모거동은, 마모분말이 생성되어 육성이 되고 이탈되는 과정이 유압작동유의 윤회로 인하여 자연스럽게 되고 있음을 알 수 있다.

베어링유는 마모방지성을 가진 베어링오일로서 일반적으로 극압성이 요구되지 않는 제지 및 제철산업의 오일윤회식 평베어링 및 구름베어링 등에 사용된다. 베어링유 중에서 TiO_2 코팅재를 마모실험을 한 결과, 미끄럼거리에 따른 부하하중, 마찰력, 마찰계수와와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다.

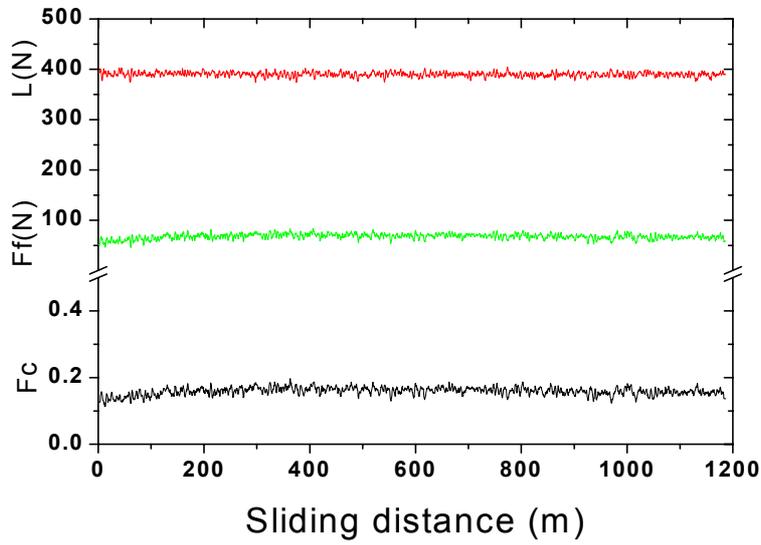
Fig. 6에서 부하하중이 300 N으로 마모실험한 것을 (a), 400 N은 (b), 그리고 500 N은 (c)에 나타내었다. Fig에서 보면, 베어링유윤회에서 마찰계수는 그리이스, 유압작동유에서의 마모특성과 동일하게 나타나고 있다. 그러나 마찰계수는 3 종류의 윤회유 중에서 제일 작은 약 0.11 ~ 0.15의 값이 나타났다. 마모거동을 살펴보면, Fig. 6의 (a)에서 중앙부 마찰력 선도를 보면 실험 초기, 즉 미끄럼거리 약 270 m까지는 고정시험편에 코팅한 세라믹 TiO_2 가 회전시험편과 소성변형을 일으키면서 탈락이 되었다. 이러한 현상은 마모방지 성능과 극압성이 있는 베어링유윤회 중에 소성변형이 진행되고 있음을 알 수 있고, 그 이후 마모거동은 회전시험편 TiO_2 와 고정시험편 기재인 고탄소 크롬 베어링강이 접촉하는 소성변형으로 전이되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6 (b)의 하부의 마찰력 선도를 보면 베어링유 윤회 과정에서 마모입자들이 철새없이 생성, 응집, 탈락되는 현상을 볼 수 있으며, 이런 현상은 Fig. 6 (c)에서 더욱 가속화되었다.



(a) Load = 200 N



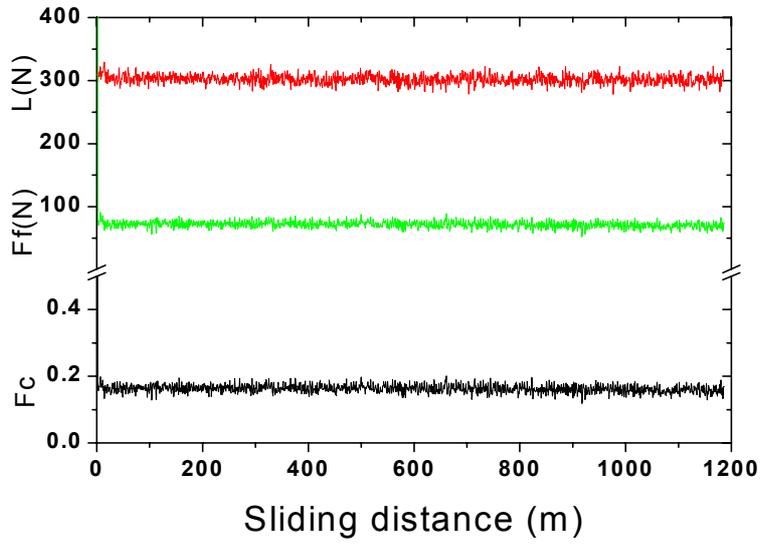
(b) Load = 300 N



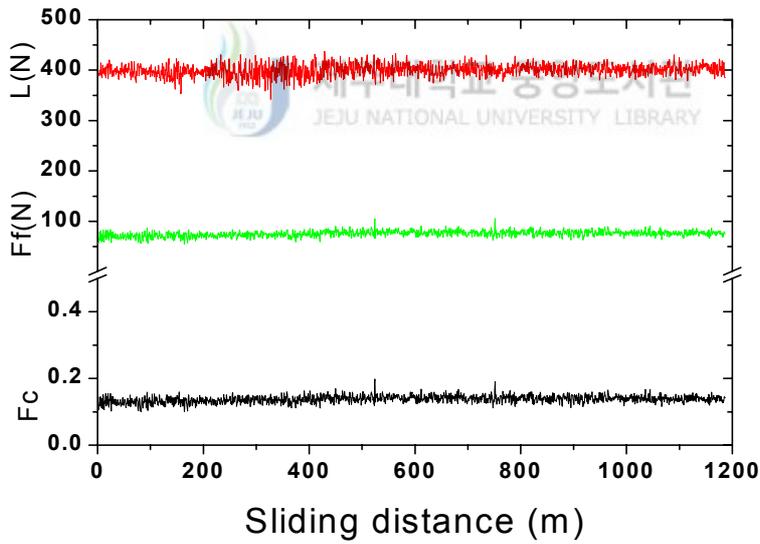
(c) Load = 400 N

Fig. 4 The friction coefficient, friction force and load of TiO₂ coating material under grease lubrication.

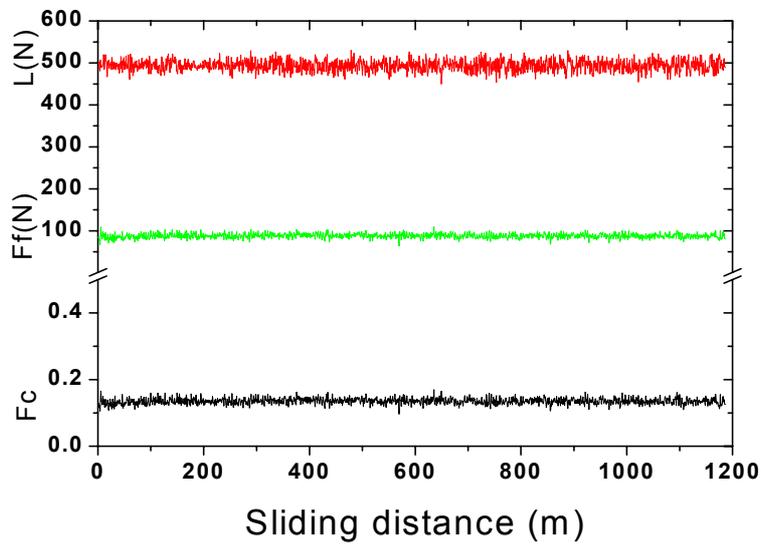
(Fc : friction coefficient, Ff : friction force, L : load)



(a) Load = 300 N



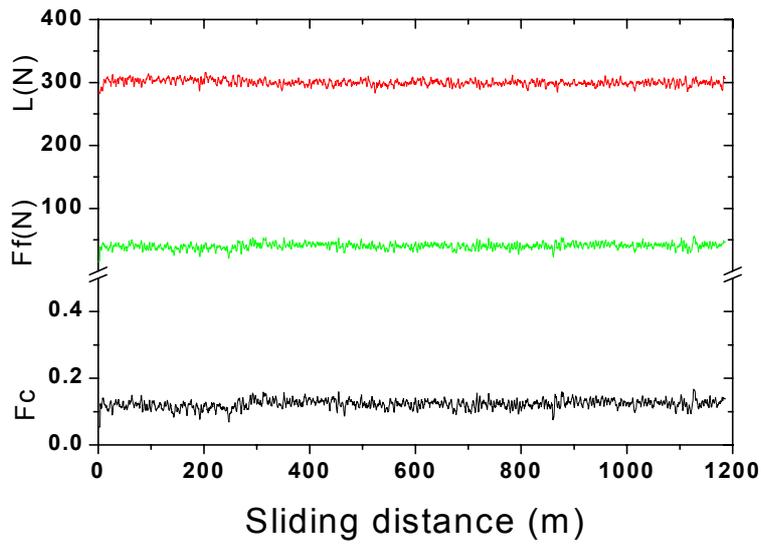
(b) Load = 400 N



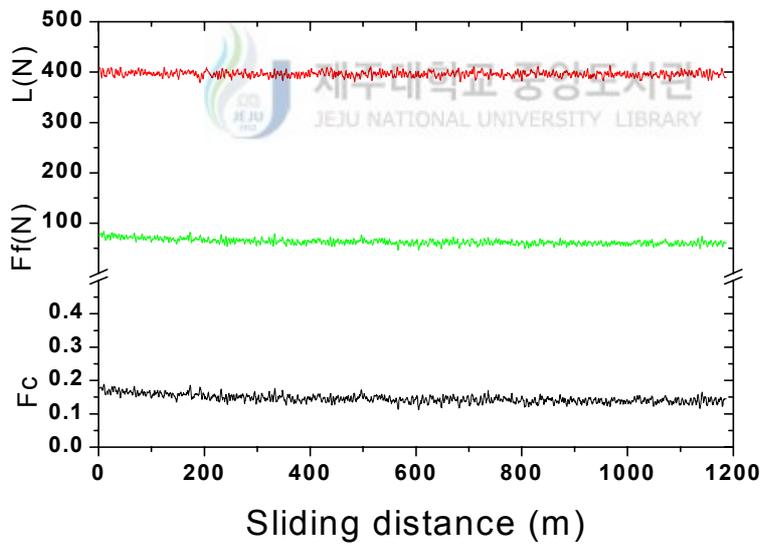
(c) Load = 500 N

Fig. 5 The friction coefficient, friction force and load of TiO_2 coating material under a general hydraulic fluids lubrication.

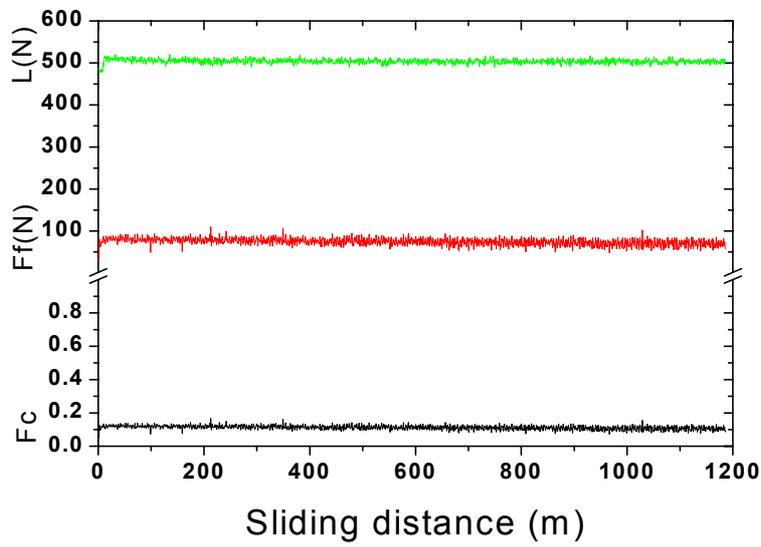
(Fc : friction coefficient, Ff : friction force, L : load)



(a) Load = 300 N



(b) Load = 400 N



(c) Load = 500 N

Fig. 6 The friction coefficient, friction force and load of TiO₂ coating material under bearing fluids lubrication.

(Fc : friction coefficient, Ff : friction force, L : load)

3. 2 Al₂O₃ 코팅재의 마모특성

그리이스는 액체윤활유 즉, 기유에 증주체라고 불리는 미세한 고체를 분산시켜 반고체상으로 한 윤활제이다. 반고체상이라는 의미는 보통의 상태에서는 느낌이 고체보다는 부드럽고 액체보다는 단단한 중간체라고 알려져 있다. 세라믹 Al₂O₃ 코팅재를 그리이스윤활유 중에서 미끄럼속도를 0.2 m/sec로 마모실험을 하였다. 그 결과 미끄럼거리에 따른 부하하중, 마찰력, 마찰계수와와의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 상부에는 부하하중(L)을, 중앙부에는 마찰력(Ff), 그리고 하부에는 마찰계수(Fc)를 나타낸다.

Fig. 7에서 부하하중을 200 N으로 하여 실험한 것을 (a)에 나타내고, 300 N은 (b), 그리고 400 N은 (c)에 나타내었다. Fig. (a)에서 부하하중 증가에 따른 마찰계수는 약 0.39 정도로, 실험 초기의 약 100 m 부근까지의 마찰계수의 값 약 0.29 이후에는 TiO₂와 같이 일정한 마찰계수의 형태를 보이고 있다. 그리고 마모거동을 살펴보면, 미끄럼거리가 약 100 m 부근에서 고정시험편에 코팅된 Al₂O₃가 탈락되었고, 그 이후는 회전시험편인 Al₂O₃ 코팅재와 고정시험편 기재인 고탄소 크롬 베어링강의 정상마모가 진행되었다. 이러한 탈락현상은 고정시험편에도 세라믹 Al₂O₃ 코팅을 하였으나, 부하하중이 증가할 때의 부착력 문제로, 경도가 높은 회전시험편의 Al₂O₃에 의해 빠르게 탈락되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7의 (b)는 부하하중 300 N을 가했을 때를 실험한 선도이다. Fig. 7 (b)에서도 마찰계수는 부하하중의 증가에도 약 0.32의 일정한 값을 가진다. 그리고 마모거동은 미끄럼거리가 약 500 m 부근에서 초기마모가 계속 진행되었고 그 이후에는 정상적인 마모형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7 (a), (b)의 정상마모를 보여주는 선도에서, 미소하지만 (a)의 480 m, 690 m, 880 m 부근에서, 그리고 (b)의 700 m, 900m 부근에서, 그리이스의 강한 응집력이 파쇄되는 이탈현상이 있었다고 생각된다[20]. 그 원인은 마모분말이 생성이 되어 육성이 되고, 육성되는 마모입자들이 어느 정도의 시간이 지나면 접촉하던 지점에서 탈락이 일어났기 때문이라고 사료된다. 이것은 그리이스 자체의 특성으로서 마모입자들을 응집하려는 힘이 생기기 때문이며, 회전시험

편과 고정시험편 사이에 접촉하고 있던 응집한 마모입자들이 미세한 소성변형이 일어나 전단하중이 생겼기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7의 (c)는 부하하중 400 N을 가했을 때의 실험한 선도이다. Fig. 7 (c)에서 부하하중 증가에 따른 마찰계수는 약 0.28 값을 가지며, 이 값은 그리이스 윤활환경에서 부하하중이 증가에 따라 마찰계수 값이 감소하는 현상이 나타났다. 그리고 마모거동을 살펴보면, 미끄럼거리가 실험 초기 약 30 m 부근에서 탈락되었다. 이러한 현상은 부하하중이 증가할수록 회전시험편의 Al_2O_3 가 고정시험편의 Al_2O_3 를 탈락시키려는 현상이 심해졌다고 생각된다. 또한 미끄럼거리를 측정하기에 어려울 정도로 짧아지면서, 경도가 높은 회전시험편의 Al_2O_3 가 고정시험편에 Al_2O_3 를 체터링하는 모습을 관찰할 수 있었다. 즉, 300 N, 400 N 고하중일수록 마모형태의 안정화가 오는 동시에 연삭마모(Abrasive friction)의 형태가 조기에 없어지고 응집마모로 된다고 말할 수 있다. 이러한 현상은 우선 하중이 높았기 때문이며, 마모현상이 가혹한 환경이라고 생각된다. 하중의 증가와 함께 경도가 높은 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편과 접촉하는 고정시험편인 고탄소 크롬 베어링강 사이에서, 그리이스는 2개의 접촉물 이외에 마모입자들과 제 3의 접촉을 하고 있음을 알 수 있다[21]. 그래서 접촉 경계면에서 하나의 물체의 양상으로 나타나며, 마모분말은 계속하여 생성응집, 밀집화, 퇴적층의 형성이 일어나는 것을 볼 수가 있다. 또한 제 3의 접촉물인 마모입자는 퇴적층에 응집한다는 것이 관찰되었다.

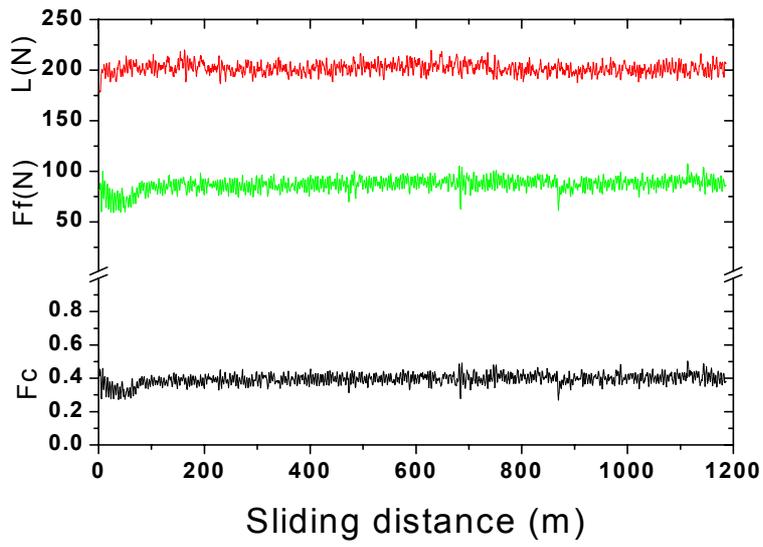
다음은 윤활환경이 유압작동유 중에서 마모실험을 한 결과, 미끄럼거리에 따른 부하하중, 마찰력, 마찰계수와 관계를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 부하하중이 200 N으로 실험한 것을 (a)에 나타내고, 300 N은 (b), 그리고 400 N은 (c)에 나타내었다.

Fig. 8 (a), (b), (c)에서 하부의 마찰계수 선도를 보면, 200 N에서는 약 0.35, 300 N에서는 약 0.28, 그리고 400 N에서는 약 0.24로, 부하하중이 증가할수록 마찰계수는 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 마모거동을 살펴보면, 실험 초기의 짧은 거리에서 탈락현상이 발생하여 안정된 마모거동이 계속되고 있다. 이러한 현상은 접촉하고 있는 상부측의 고정시험편 즉, 핀과 하부측의 회전시

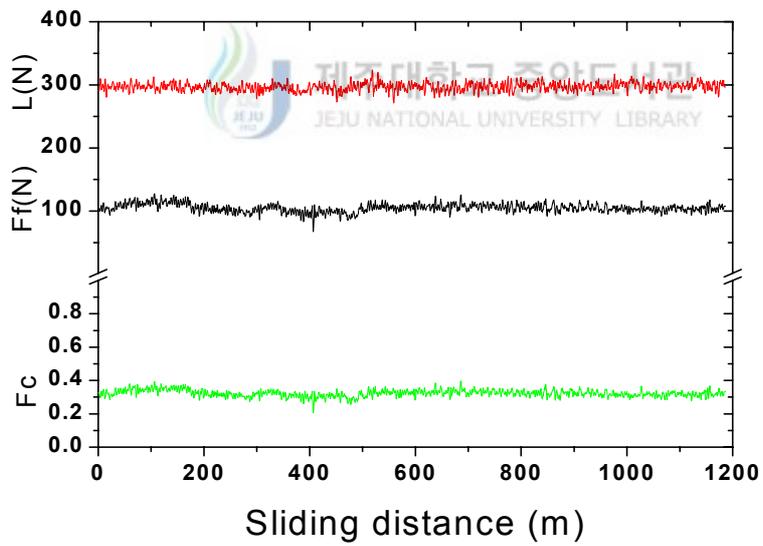
협편인 Disk 사이에서 제 3의 접촉물 마모입자들이 끊임없이 응착과 박리가 빠른 속도로 진행되고 있음이 관찰되었다. 즉, 유압작동유 유회환경에서 고정 시험편에 경도가 극히 높은 Al_2O_3 가 코팅한 것은, 내마모성과 내구성이 요구 되는 재료로서 연구할 가치가 충분히 있다고 생각한다.

다음은 베어링유유회환 중에서 마모실험을 한 결과, 미끄럼거리에 따른 부하하중, 마찰력, 마찰계수와 관계를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 부하하중이 200 N에서 실험한 것은 (a), 300 N은 (b), 그리고 400 N은 (c)에 나타내었다.

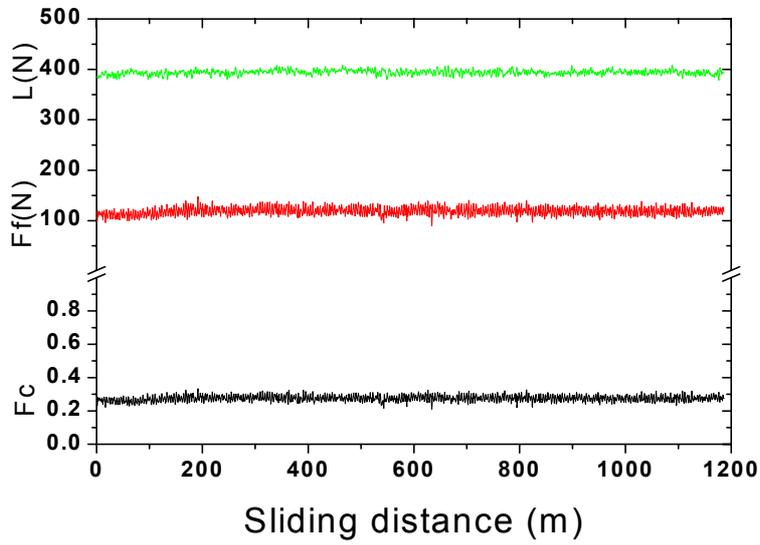
Fig. 9에서 마찰계수는, 부하하중이 200 N에서 약 0.33, 300 N과 400 N에서 약 0.25로, 유압작동유의 마찰계수와 비교하면 작거나 비슷한 값을 가지고 있다. 이런 결과는 그리이스, 유압작동유, 베어링유 유회환경에서 보면, 같은 재료라도 유회환경이 어떤 물질이나에 따라서 달라지고 있는데, 이것은 점성계수가 다르기 때문으로 고찰된다. 즉, 점성계수가 가장 낮은 베어링유 유회환경 마모실험에서 가장 낮은 마찰계수 값이 나타났고, 다음은 유압작동유, 그리이스 유회환경 순서로 마찰계수가 커졌다. 그리고 마모거동을 살펴보면, 부하하중 200 N에서는 약 80 m 부근에서, 300 N에서는 약 50 m 부근, 그리고 400 N에서는 약 30 m 부근에서 탈락이 되었다. 그 이후부터는 두 시험편은 작지만 전단하중을 계속 받으면서 마모가 진행되었음을 알 수 있다. 또한 실험 유회환유 중에서 점도가 가장 낮은 베어링유의 유회환 중의 마모입자는 제 3의 접촉물이 되어서, 마모분말이 끊임없이 생성되어 육성이 되고, 그 육성된 마모입자가 이탈이 되는 과정들이 구별이 거의 없다는 점이 실험한 것 중 특이하다고 볼 수가 있다.



(a) 200 N



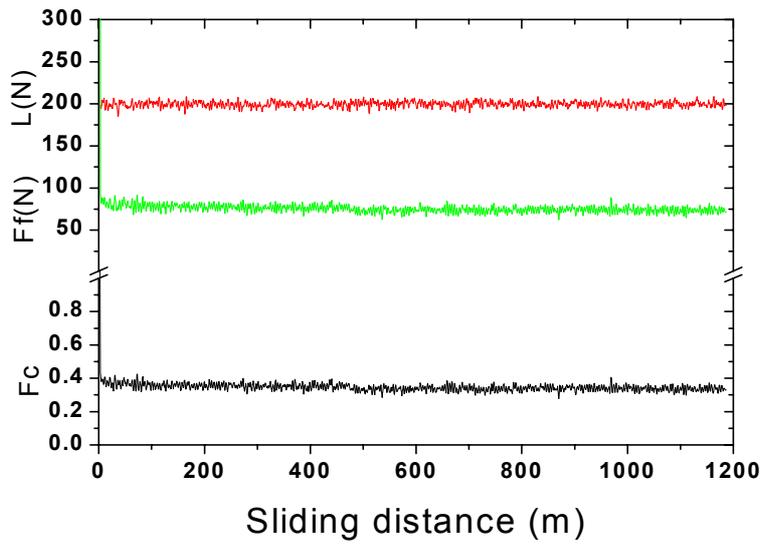
(b) 300 N



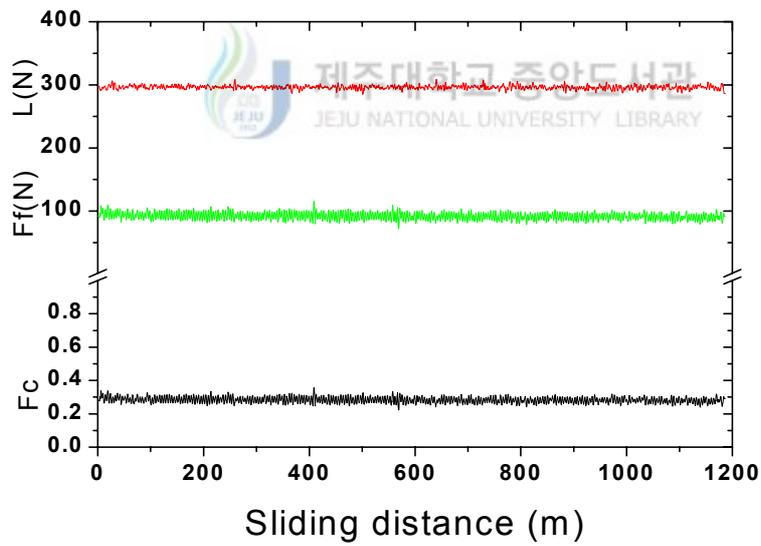
(c) load = 400 N

Fig. 7 The friction coefficient, friction force and load of Al_2O_3 coating material under grease lubrication.

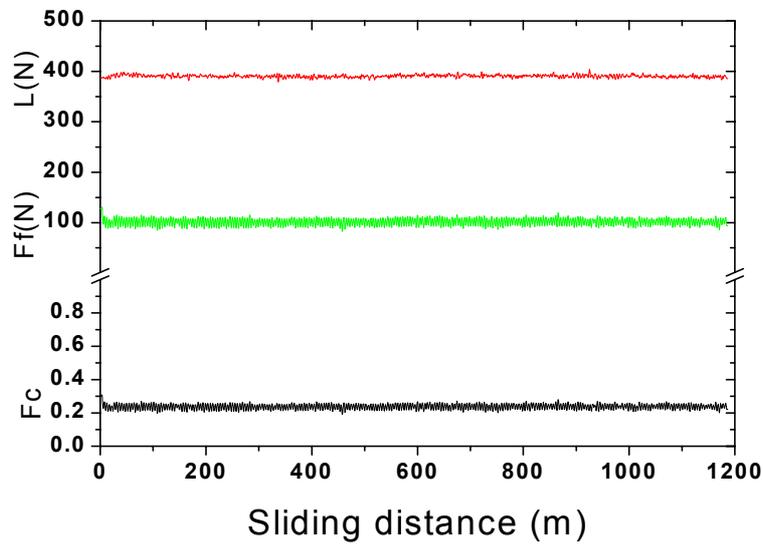
(Fc : friction coefficient, Ff : friction force, L : load)



(a) Load = 200 N



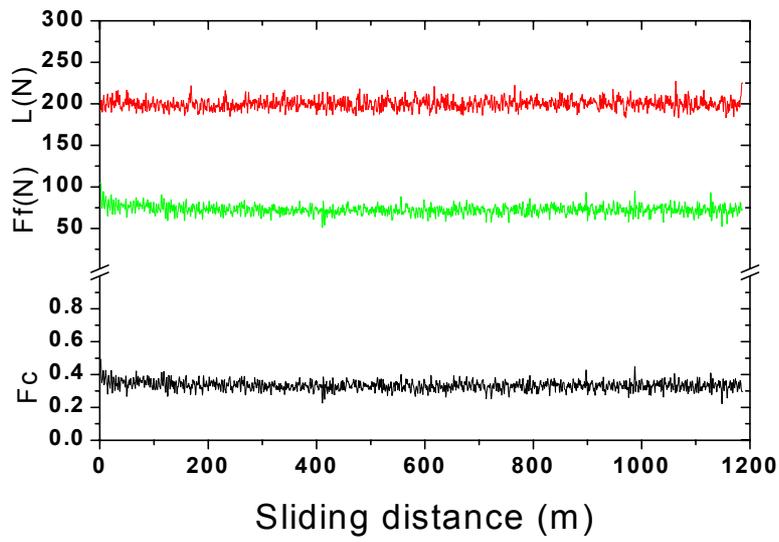
(b) Load = 300 N



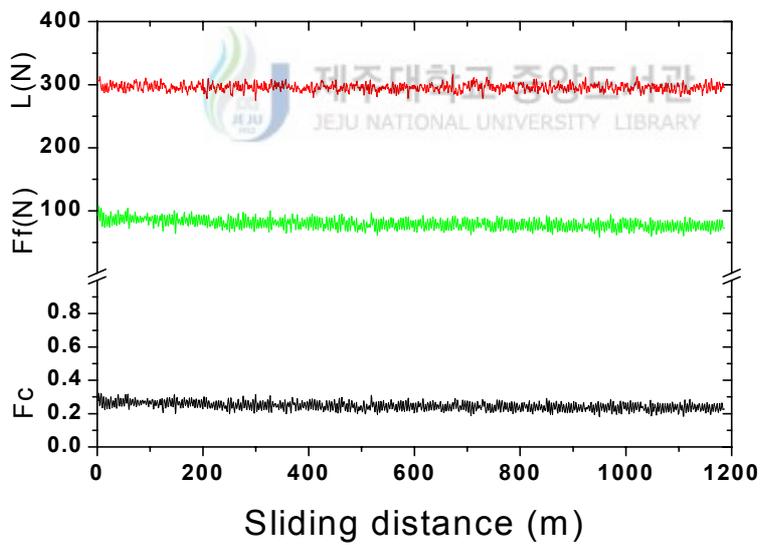
(c) Load = 400 N

Fig. 8 The friction coefficient, friction force and load of Al_2O_3 coating material under a general hydraulic fluids lubrication.

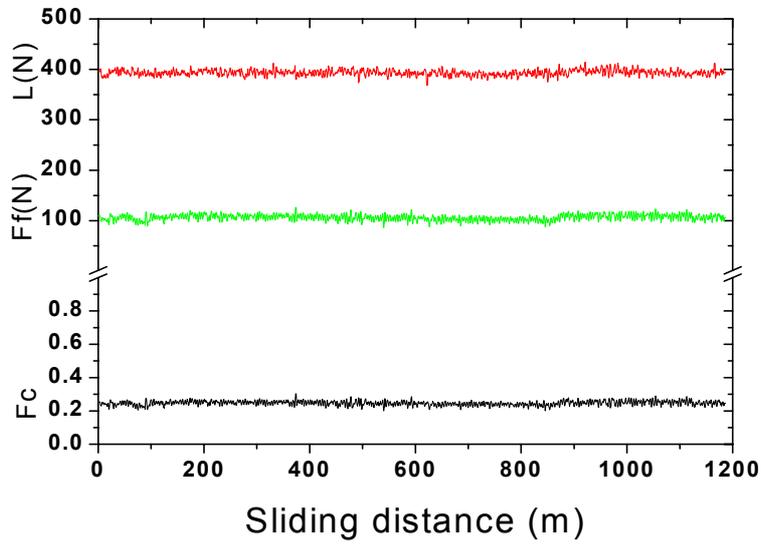
(Fc : friction coefficient, Ff : friction force, L : load)



(a) Load = 200 N



(b) Load = 300 N



(c) Load = 400 N

Fig. 9 The friction coefficient, friction force and load of Al_2O_3 coating material under bearing fluids lubrication.

(Fc : friction coefficient, Ff : friction force, L : load)

3. 3 세라믹 코팅재 마모의 부하하중 의존성

Fig. 10은 세라믹 TiO_2 코팅재를 마모실험을 한 결과, 부하하중과 마찰계수의 관계를 나타낸 것이다. 그리이스윤활유 중에서의 마찰계수가 조금 높은 것은, 비교적 낮은 온도에서는 점도의 변화가 없는 특징을 가지고 있기 때문이다. 그러나 TiO_2 의 마모실험 중에 가혹한 온도의 변화가 있으므로, 윤활환경을 유지할 수 없었기 때문이라고 사료된다. 따라서 마모가 진행될 때의 마찰력도 큰 변화를 일으키고 있음이 육안으로 확인이 되었다. 그리고 그리이스 윤활환경은 그리이스 특성 상, 낮은 용점을 가지고 있기 때문에 마찰계수는 보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 유압작동유, 베어링유의 윤활환경에서 부하하중이 300 N에서 500 N로 증가할수록 마찰계수가 감소하고 있음이 관찰되었다.

Fig. 11은 Al_2O_3 를 실험한 것으로 하중과 마찰계수를 나타낸 것이다. 역시 그리이스의 마찰계수가 가장 높고 다음으로 유압작동유이며 베어링유가 가장 낮은 마찰계수를 보이고 있다. Al_2O_3 의 높은 경도값을 가지고 있기 때문에 마찰계수의 값이 200 N일 때 0.33 ~ 0.39였으나 400 N에서는 0.24 ~ 0.28로 하중이 증가할수록 마찰계수는 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다.



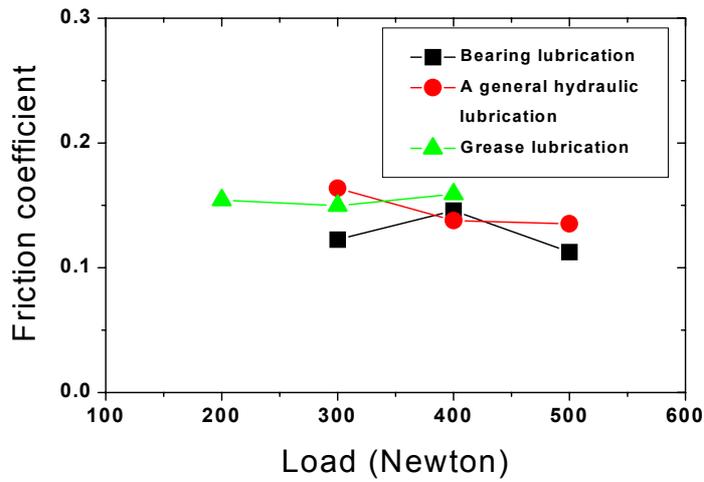


Fig. 10 Relationship of friction coefficient and applied load under lubricative environments. (TiO₂ coating material)

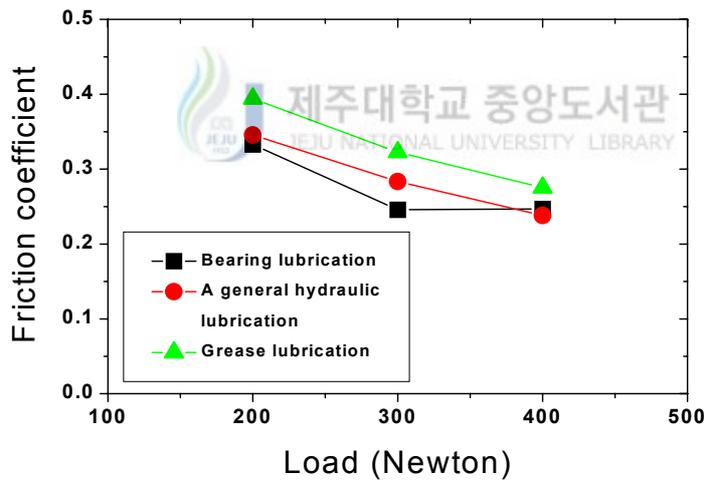


Fig. 11 Relationship of friction coefficient and applied load under lubricative environments. (Al₂O₃ coating material)

3. 4 세라믹 코팅재 마모의 유희환경 의존성

Fig. 12는 S45C의 기재에 세라믹 TiO_2 를 플라즈마용사 코팅한 회전시험편을 부하하중 300 N에서 공기 중과 그리이스 유희, 베어링유 유희, 유압작동유 유희환경에서의 마찰계수만을 비교 검토한 것이다. 여기에서 공기 중에서 마모시험한 마찰계수의 평균값이 0.54로 높은 값을 나타냈고, 유희환경 중에서의 마찰계수는 베어링유 유희에서 0.12, 그리이스 유희에서 0.15, 그리고 유압작동유 유희에서는 0.16이다. 공기 중에서 마찰계수의 값이 0.54인 것은, 높은 정도의 TiO_2 가 상대 마모면과의 사이에 생긴 마모입자(Split)들이 서로 엉킨 것 때문이다. 그래서 서로 뒤엉킨 마모입자들이 또 다른 마모입자와 밀어붙이는 힘(전단력) 때문에 마찰계수가 높게 나타난 것이라고 사료된다. 이런 마모입자들의 힘과 상대하는 마모면인 SUJ II의 부하하중으로 인하여 밖으로 탈락할 때에 작용되는 전단력이 높기 때문이라고 사료된다. TiO_2 의 유희환경 중에서 마찰계수 값은 0.12에서 0.16 사이이고, 그 값의 차이는 0.04 정도로 미소하다. 이것은 TiO_2 와 상대의 마모면 사이에 마모입자들이 있고, 엉켜있는 마모입자들 사이에 마모를 감소시키는 유희유가 존재했기 때문이다. 그래서 마찰계수의 값이 낮아지고 그 차이도 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 부하하중 300 N, 서로 다른 유희환경에서 세라믹 TiO_2 와 Al_2O_3 를 플라즈마용사 코팅한 시험편을 마모 실험한 것 중 마찰계수만을 비교 검토한 것이다. 여기에서 유희환경이 서로 다른 Al_2O_3 를 플라즈마용사 코팅한 시험편의 마찰계수의 평균값이 베어링유 유희에서 0.24, 유압작동유 유희에서 0.28, 그리고 그리이스 유희에서는 0.32이다. TiO_2 의 마찰계수보다 Al_2O_3 의 마찰계수가 높은 것은 전술한 것 외에도, Table 8에서 보면 비커어스 경도가 1136으로 매우 높은 값을 가지고 있다. 마모입자들이 표면에서 떨어질 때, 전단력이 상대적으로 경도가 낮은 TiO_2 의 768보다 훨씬 강하다는 결론이 나온다. 따라서 Al_2O_3 의 시험편에서 마모실험이 진행되는 동안 탈락이 일어나는 시간이 길어지며, 마모입자들이 뜯겨 나가듯 발생하는 취성과파괴가 일어남을 볼 수 있다. Fig. 12와 Fig. 13에서 TiO_2 와 Al_2O_3 의 마찰계수를 낮추는 유희유로서 베어링유가 됨을 알 수가 있다.

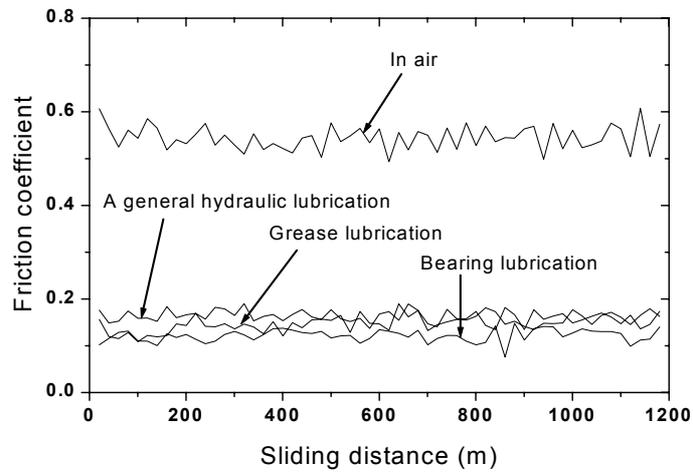


Fig. 12 The friction coefficients of TiO_2 coating material under the lubricative environments and in air.
(Load : 300 N, $v=0.2$ m/sec)

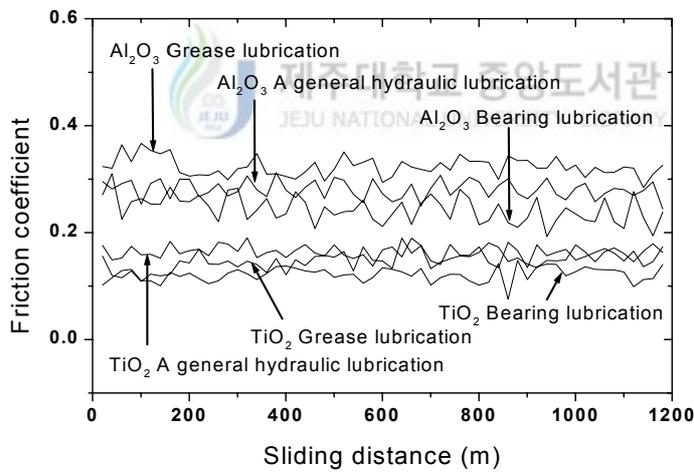


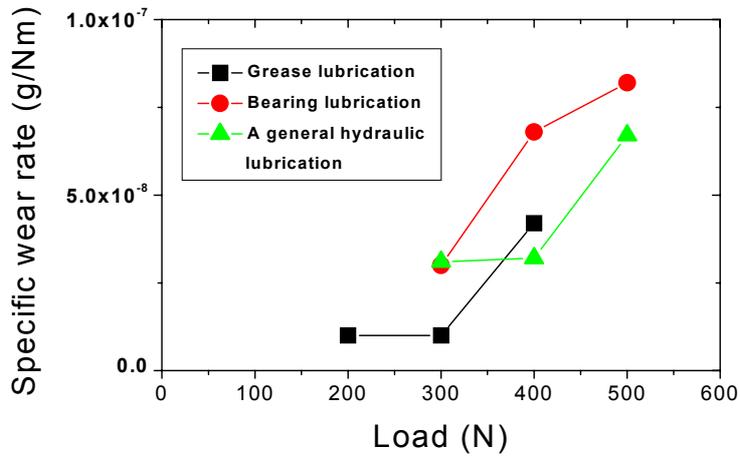
Fig. 13 The friction coefficients of TiO_2 and Al_2O_3 coating material under the lubricative environments.
(Load : 300 N, $v=0.2$ m/sec)

3. 5 윤활환경 하에서 비마모율의 변화

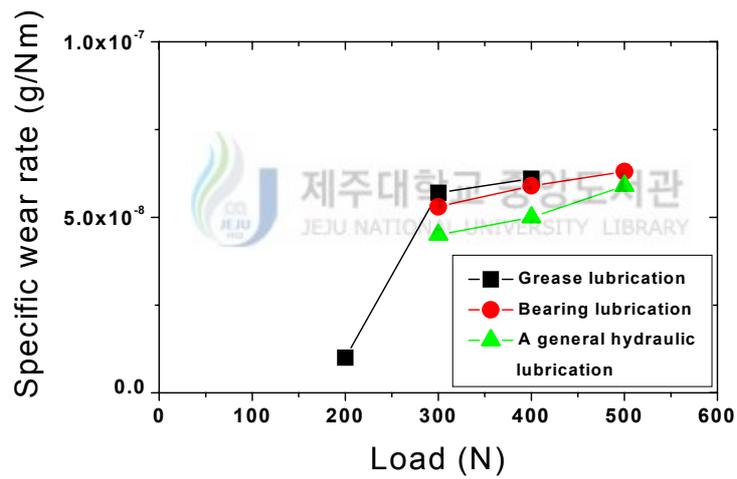
Fig. 14는 회전시험편과 고정시험편인 핀에 세라믹 TiO_2 코팅재의 마모시험 후, 그리이스 윤활환경, 유압작동유 윤활환경, 베어링유 윤활환경에서 미끄럼거리에 따른 비마모율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 14에서 (a)는 회전시험편의 비마모율의 변화를 말하며, (b)는 고정시험편의 비마모율의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 14 (a) 회전시험편에서 그리이스윤활유 중에서 부하하중이 200 N일 때 1.0×10^{-8} 이고, 300 N일 때 1.0×10^{-8} 이며, 그리고 400 N일 때 4.2×10^{-8} 이다. 베어링유의 윤활환경 속에서 부하하중이 300 N일 때 3.0×10^{-8} 이고, 400 N일 때 6.8×10^{-8} 이며, 그리고 500 N일 때는 8.2×10^{-8} 이다. 따라서 그리이스 윤활환경에서 회전시험편의 비마모율이 베어링유 윤활환경보다 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 회전시험편인 Al_2O_3 와 비교할 때, 비슷한 현상을 보여 주고 있다. 부하하중이 300 N에서 400 N으로 전이될 때 베어링유와 그리이스유 윤활환경에서의 비마모율이 훨씬 커지고 있다. 그리고 유압작동유 윤활환경에서는 400 N에서 500 N으로 될 때, 비마모율이 변화되는 폭이 커지고 있다.

Fig.14 (b)는 고탄소 크롬 베어링 강인 고정시험편의 비마모율의 변화를 나타낸 것이다. 유압작동유 윤활환경에서의 비마모율을 보면 부하하중이 300 N일 때 4.5×10^{-8} 이고, 400 N일 때는 5.0×10^{-8} 이며, 그리고 500 N일 때는 5.9×10^{-8} 이다. 그리이스 윤활환경 속에서는 200 N일 때 1.0×10^{-8} 이고, 300 N일 때는 5.7×10^{-8} 이며, 그리고 400 N일 때는 6.1×10^{-8} 로 나타났다. 이것은 그리이스 윤활유 중에서는 금속 자체인 고탄소 크롬 베어링강인 금속인 고정시험편이 상대하는 회전시험편에 의해서 급속하게 마모가 되어 비마모율이 높게 나타났다고 볼 수 있다. 따라서 유압작동유, 베어링유의 윤활환경 속에서 낮은 비마모율을 볼 수 있다. 또 부하하중 200 N에서 300 N으로 전이될 때 비마모율이 변화되는 폭이 급증했으나, 300 N에서 400 N까지는 베어링유와 유압작동유의 윤활과 같이 비마모율이 직선상태로 변화되었다.



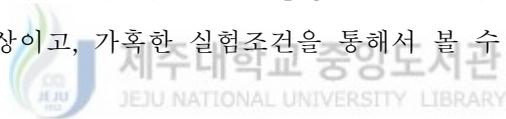
(a) Rotor (TiO₂)

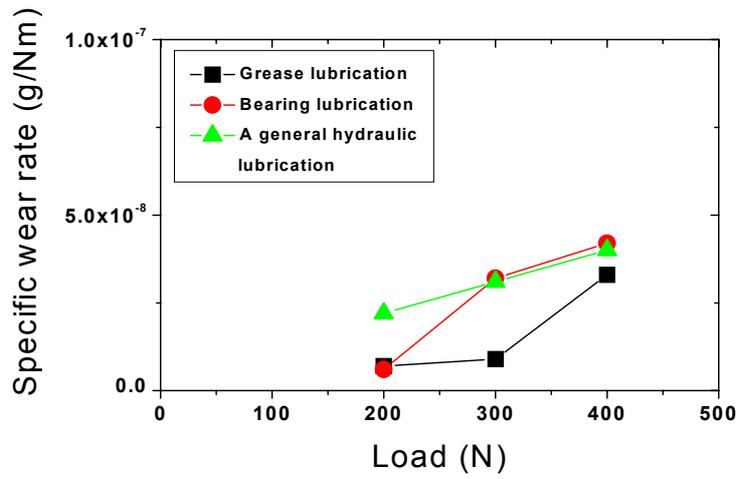


(b) Stator (TiO₂)

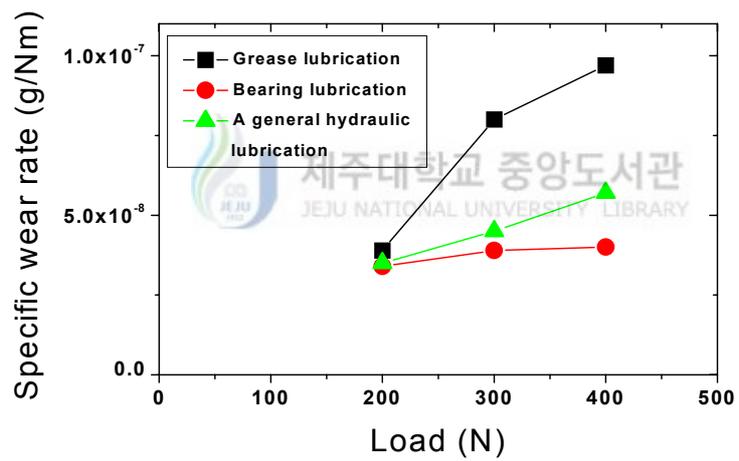
Fig. 14 Relationship of specific wear rate and applied load under the lubricative environments. (TiO₂ coating material)

Fig. 15는 Al_2O_3 코팅재에서 미끄럼거리에 따른 비마모율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 15의 (a)에서 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편의 비마모율을 보면 그리이스 윤활환경 속에서 부하하중 200 N일 때 7.0×10^{-9} 이고, 300 N일 때 9.0×10^{-9} 이며, 그리고 400 N일 때 3.3×10^{-8} 이다. 그리고 베어링유의 윤활환경 속에서 200 N일 때 6.0×10^{-9} 이고, 300 N일 때 3.2×10^{-8} 이며, 그리고 400 N일 때는 4.2×10^{-8} 이다. 이것은 경도가 매우 높은 회전시험편인 Al_2O_3 가 그리이스 윤활환경일 때 고정시험편과 접촉하는 과정에서 세라믹을 코팅한 회전시험편이 취성파괴의 전형을 보여주고 있다. 따라서 그리이스 윤활환경일 때 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편의 비마모율이 가장 작다는 것을 보여주고 있다. 다음에 Fig. 15의 (b)는 고정시험편의 비마모율을 나타낸 것이다. 베어링유 윤활환경 속에서 200 N일 때 3.4×10^{-8} 이고, 300 N일 때는 3.9×10^{-8} 이며, 그리고 400 N일 때는 4.0×10^{-8} 이다. 그리이스 윤활환경 속에서는 200 N일 때 3.9×10^{-8} 이고, 300 N일 때는 8.0×10^{-8} 이며, 그리고 400 N일 때는 9.7×10^{-8} 이다. 이것은 고정 시험편인 고탄소 크롬 베어링강이 소성변형을 일으키면서 그리이스윤활에서 높은 마모량을 나타내고 있다. 그리이스윤활유의 저 하중, 저 유동성의 윤활환경이 금속 자체인 고정시험편이 세라믹인 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편과의 접촉에서 볼 수 있는 현상이고, 가혹한 실험조건을 통해서 볼 수 있는 마모현상이다.





(a) Rotor (Al₂O₃)



(b) Stator (Al₂O₃)

Fig. 15 Relationship of specific wear rate and applied load under the lubricative environments. (Al₂O₃ coating material)

3. 6 SEM 관찰에 의한 마모면의 미시적 관찰

마모과정은 상호 접촉하는 두 고체의 접촉부에서 변형과 파괴로 인해서 재료가 제거되는 과정이다. 이러한 마모과정을 미시적으로 관찰하여 그 기구를 규명하기 위해서 주로 주사형전자현미경(SEM)이 사용되고 있다. 이에 따라서 플라즈마용사기로 세라믹 Al_2O_3 와 TiO_2 를 코팅하고 마모실험을 하여 마모된 표면을 SEM에 의해 미시적관찰을 수행하였다. 본 실험에서는 윤활환경을 주안점으로 해서 그리이스유, 유압작동유, 베어링유를 사용했고, 부하하중은 200 N, 300 N, 400 N, 500 N으로 하였다. 미끄럼속도는 0.2 m/sec이고, 미끄럼거리는 1.2 km이다. Fig. 16은 TiO_2 를 코팅한 회전시험편의 마모실험 전의 모습이고, Fig. 17은 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편의 마모실험 전의 모습이다.

Fig. 18은 TiO_2 코팅재에 대하여 그리이스 윤활환경 속에서 부하하중을 300 N으로 한 회전시험편을 (a), 400 N으로 한 것을 (b)에 나타내었다. (a)에서 마모입자들이 상대하는 두 재료에 의해 생성, 육성이 되어 이동하면서, 홈(groove)과 끌(ploughing)에 마모된 파편들이 누적되어 있음을 알 수 있다. 이것은 덩어리 상태(cluster)의 입자들과 개개의 마모입자들이 활발히 이동하면서 홈이나 끌을 형성하며 시험편의 마모를 촉진한 결과로 볼 수 있다. 그러나 (b)에서 보면 하중이 증가와 함께 마모된 표면에 연삭에 의한 줄무늬가 발생되어 있으며, 위에서 누르는 압축응력과 전단력에 의해서 생기는 소성변형이 결국 소성파괴로 이어졌음을 알 수 있다.

Fig. 19는 유압작동유 윤활환경 속에서 부하하중이 300 N은 (a), 부하하중 400 N은 (b)로 나타내었다. 이에 (a)와 (b)를 보면 고탄소 크롬 베어링강에서 생성되어 육성된 마모입자들이 회전시험편의 TiO_2 를 코팅한 마모면에 응착되어 성장하다가 마모입자들이 연삭상태로 되는 줄무늬 면이 관찰된다.

Fig. 20은 베어링유 윤활환경 속에서 부하하중이 300 N인 것은 (a), 부하하중이 400 N인 것은 (b)에 나타내었다. 베어링유는 고도로 정제된 기유로 제조되기 때문에 점도지수가 매우 높고 산화안정성과 마모방지 성능을 갖고 있으므로, 마모시 작지만 끊임없이 마모입자가 생성되고 성장된 마모입자가 탈락되는 것이 관찰된다. 따라서 베어링유에서의 마모형태는 마일드(mild)한 응착마

모이다. 이는 김성익[22]의 연구 결과와 동일하다. 3 종류의 윤활환경 중 TiO_2 코팅재의 마모형태를 비교하면 베어링유 윤활환경 속에서의 마모형태가 가장 마일드한 응착마모임을 알 수가 있었다.

Fig. 21은 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편에 그리이스 윤활환경 속에서 부하하중 300 N은 (a)이고, (b)는 부하하중이 400 N에서 마모면의 SEM 사진이다. Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편의 마모면은 코팅부 일부의 탈락과 연삭마모면을 보인다. 이것은 Al_2O_3 의 비커어스 경도값이 1136으로 매우 높으므로 마모시 코팅층의 취성과파괴에 의해 탈락되고, 이 탈락된 마모입자는 Al_2O_3 와 고정시험편인 고탄소 크롬 베어링강의 접촉면 사이에서 연삭마모를 진행시킨다고 생각된다. 따라서 Al_2O_3 의 마모기구는, 마모에 의한 고경도 세라믹의 표면균열이 형성되어 입계를 따라서 전파하며, 취성과파괴에 의해 마모입자가 탈락되고, 이 탈락된 마모입자는 접촉면 사이에서 연삭마모로 발생한다. 이에 대하여 김석삼 등[23]도 동일한 결과를 보고하였다.

Fig. 22는 Al_2O_3 를 코팅한 회전시험편에 유압작동유 윤활환경 속에서 부하하중 300 N은 (a)이고, (b)는 부하하중이 400 N에서의 응착마모(adhesive wear)가 발생되어 연삭마모로 진행된 것을 나타낸다. 이것은 윤활환경이 유동성을 가진 유압작동유를 사용했기 때문이며, 그리이스 윤활환경과 비교를 해 보면 유동성이 적은 그리이스가 더욱 응착마모가 심하고, 시비어마모(severe wear) 쪽으로 연삭마모가 진행되었음을 알 수 있다.

Fig. 23은 베어링유 윤활환경 속에서 부하하중이 300 N인 것은 (a), 400 N인 것은 (b)에 나타내었다. 유동성이 가장 양호한 베어링유에서 역시, 초기에 응착마모가 진행되나 그 이후에는 마일드(Mild wear)한 연삭마모로 진행되었음을 알 수 있다.

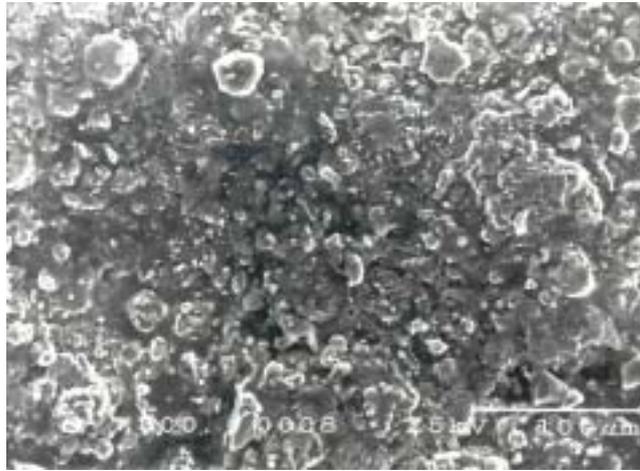


Fig. 16 Coated surface before a wear test of TiO₂ coating material.

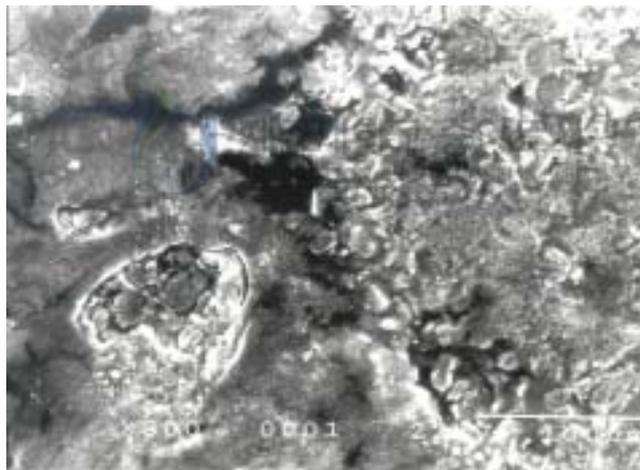
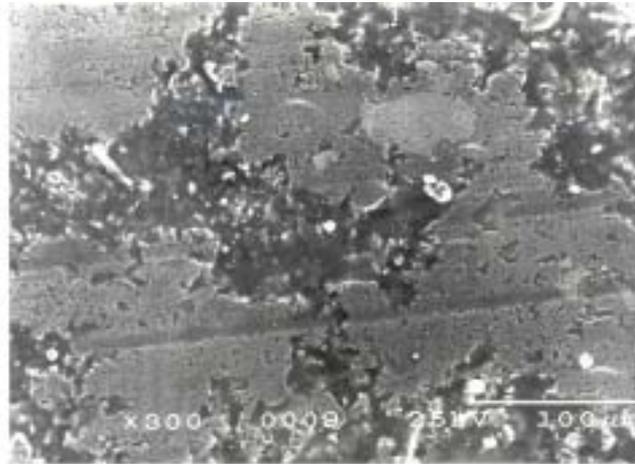
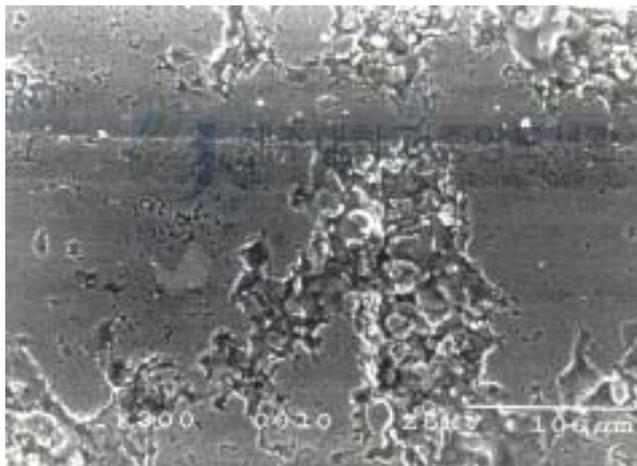


Fig. 17 Coated surface before a wear test of Al₂O₃ coating material

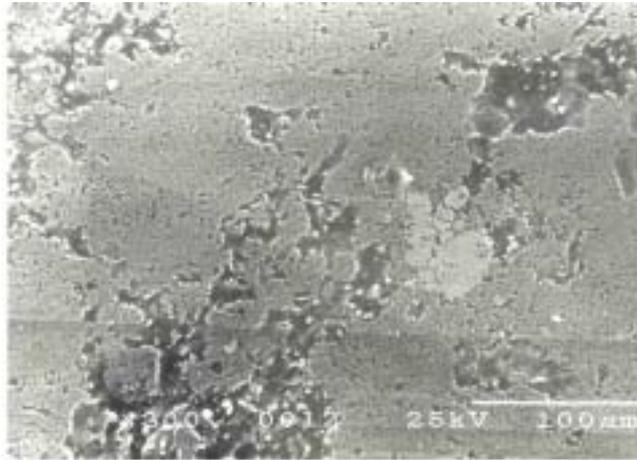


(a) Load = 300 N



(b) Load = 400 N

Fig. 18 SEM photograph of wear surface of TiO₂ coating material under grease lubrication.

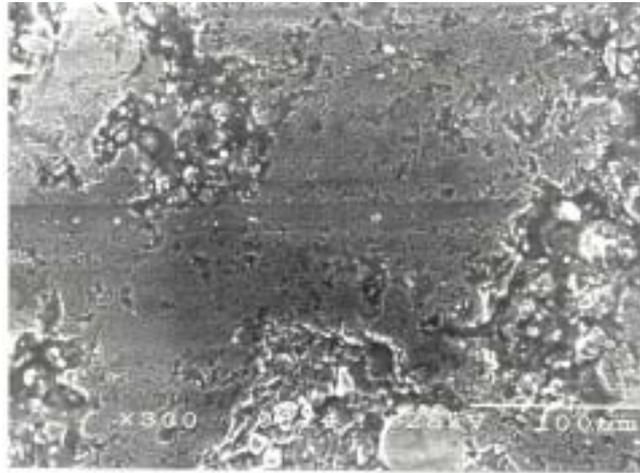


(a) Load = 300 N



(b) Load = 400 N

Fig. 19 SEM photograph of wear surface of TiO_2 coating material under a general hydraulic fluids lubrication.

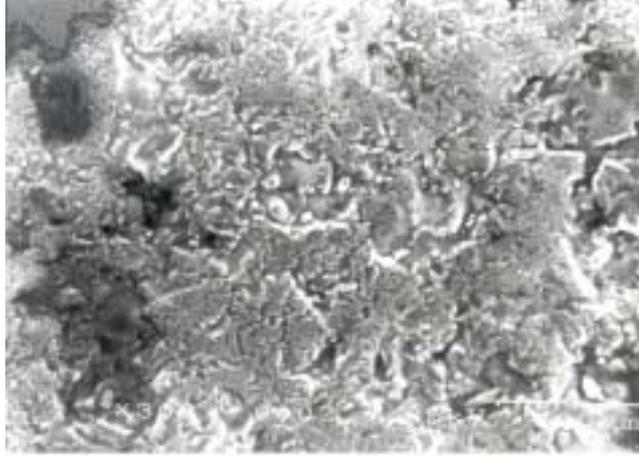


(a) Load = 300 N



(b) Load = 400 N

Fig. 20 SEM photograph of wear surface of TiO_2 coating material under bearing fluids lubrication.

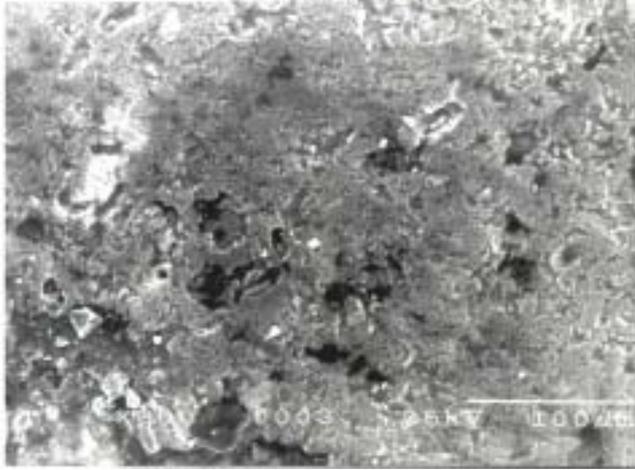


(a) Load = 300 N

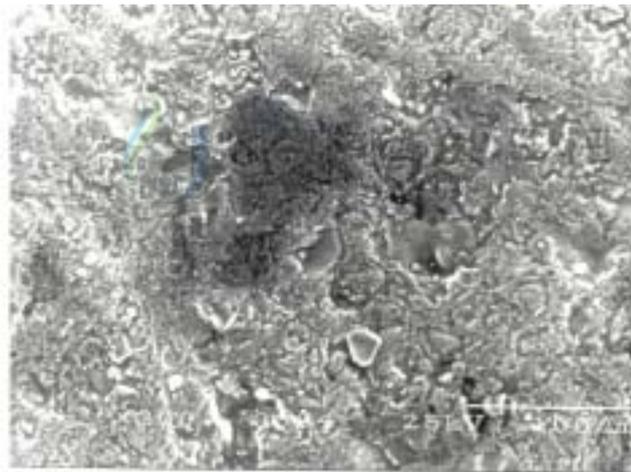


(b) Load = 400 N

Fig. 21 SEM photograph of wear surface of Al_2O_3 coating material under grease lubrication.

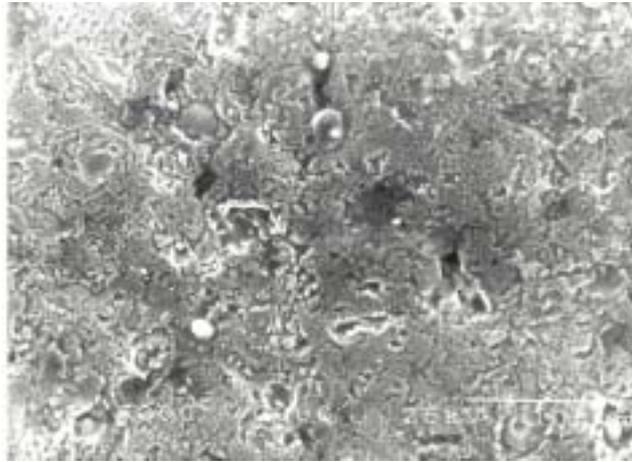


(a) Load = 300 N



(b) Load = 400 N

Fig. 22 SEM photograph of wear surface of Al_2O_3 coating material under a general hydraulic fluids lubrication.



(a) Load = 300 N



(b) Load = 400 N

Fig. 23 SEM photograph of wear surface of Al_2O_3 coating material under bearing fluids lubrication.

IV. 결 론

본 연구는 플라즈마용사에 의한 내마모성 세라믹 TiO_2 와 Al_2O_3 코팅재의 각종 윤활환경 중의 마모특성을 조사하기 위하여, 그리이스(Grease), 유압작동유(A general hydraulic fluids), 베어링유(Bearing fluids) 3 종류의 윤활환경에서 마모실험을 하였다. 마모시험기는 Pin on disk형으로, 미끄럼속도 0.2 m/sec에서 부하하중 200 N, 300 N, 400 N, 그리고 500 N에서의 마찰력, 마찰계수, 비마모율을 조사하여, 윤활환경과 부하하중의 변화에 따른 마모특성과 마모면의 정밀 관찰에 의한 마모기구를 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 윤활환경과 부하하중의 변화에 따라 마찰계수의 차이는 있으나, TiO_2 코팅재의 마찰계수는 0.11 ~ 0.16 범위이고, Al_2O_3 코팅재는 0.24 ~ 0.39 범위로 코팅 종류에 따른 마찰계수는 정도가 큰 Al_2O_3 가 TiO_2 보다 크다.
2. TiO_2 세라믹 코팅재의 부하하중 변화에 따른 마찰계수의 변화는 3 종류의 윤활환경에서, 부하하중의 변화에 관계없이 거의 유사한 값을 가진다.
3. 3 종류의 윤활환경에서 Al_2O_3 의 부하하중에 따른 마찰계수는, 저하중에서 마찰계수가 크고 고하중에서 작다. 그리고 윤활환경에 따른 마찰계수는, 그리이스가 가장 크고 베어링유와 유압작동유는 유사하다.
4. 부하하중과 비마모율의 관계에서 TiO_2 는 하중이 크면 비마모율이 크게 증가하나, Al_2O_3 는 그 증가가 크지 않다. 그리고 3 종류의 윤활유 중에서의 비마모율은 그리이스에서 가장 적다.
5. 플라즈마용사를 한 TiO_2 의 코팅재의 마모면은 응착마모이고, Al_2O_3 의 마모면은 연삭마모이다.

V. 참고문헌

- [1] 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トボロジ-特性に及ぼす温度の影響(摩擦特性とトライボフィルム形成の関係), 日本機械學會論文集(C編), Vol. 61, No. 586, pp. 2553-2558.
- [2] 小林 明, 1989, 材料, 第38卷 426号, pp. 118-119.
- [3] K. Holmberg. and A. Matthews., 1994, Coating Tribology, Elsevier Publication.
- [4] Hsu, S. M., Wang, Y. S. and Munro, R. G., 1989, Quantitative wear maps as a visualization of wear mechanism transitions in ceramic materials, Wear, Vol. 134, pp. 1-11.
- [5] Woydt, M. and Habig, K. H., 1989, High temperature tribology of ceramics, TRIBOLOGY int., Vol. 222, pp. 75-88.
- [6] Gee, M. G., Matharu, C. S., Almond, F. A. and Eyre, T. S., 1990, The measurement of sliding friction and wear of ceramics at high temperature, Wear, Vol. 138, pp. 169-187.
- [7] Kim, H., Shin, D. and Fischer, T., 1990, Mechanical and chemical aspects in the wear of alumina, Proc, Int, Tribol, Conf., Nagoya, JAST, pp. 1437-1442.
- [8] Zum Gaha, K. H., Bundschuh, W. and Zimmerlin, B., 1993, Effect of grain size on friction and sliding wear of oxide ceramics, Wear, Vol. 162, No. 164, pp. 269-279.
- [9] 小原嗣朗, 金屬組織學概論, 1981, pp. 203-221, 朝倉書店.
- [10] Ashby, M. F., 1985, On the engineering properties of material, Actametall, Vol. 37-5, pp. 1273-1293.
- [11] Gandhi, C. and Ashby, M. F., 1979, Fracture mechanism maps for materials which cleave :F.C.C., B.C.C. and H.C.P. metals and ceramics, Acta metall., Vol. 27, pp. 1565-1602.
- [12] F. H. Scott. and G. C. Wood., 1978, The influence of oxides on the

- friction and wear of alloys, *Tribology*, 11(4) August, pp. 211-262.
- [13] J. L. Sullivan. and S. G. Hodgson., 1988, A study of mild oxidational wear for conditions of low load and speed, *Wear*, Vol. 121, pp. 95-106.
- [14] A. Iwabuchi., H. Kubosawa. and K. Hori., 1990, The dependence of the transition from severe to mild wear on load and surface roughness when the oxide particles are supplied before sliding, *Wear*, Vol. 139, pp. 319-333.
- [15] Mehrotra, P. K., 1983, Mechanisms of wear in Ceramic Materials, *Wear of Materials*, ASM, pp. 194-201.
- [16] Adewoye, O. O., 1981, Frictional Deformation and Fracture in Polycrystalline SiC and Si₃N₄, *Wear*, Vol. 70, pp. 37-51.
- [17] 金喜坤, 1999, 플라즈마용사 세라믹코팅 강재의 마찰속도와 하중의 변화에 의한 마모특성, 제주대학원 대학원석사학위논문.
- [18] 吳孟鐘, 1998, TiO₂ 세라믹 용사 코팅재의 강도 및 마멸특성, 제주대학교 대학원박사학위논문.
- [19] 장복기, 김윤주, 1997, 탄화규소강 미끄럼에서의 마모특성, *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 34, No. 1, pp. 7-12.
- [20] 정성모, 윤환 공학 이론과 실제, pp. 202-208.
- [21] 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, Si₃N₄, WC-9%Coの摩擦磨耗特性評價, *材料*, Vol. 42, No. 473, pp. 202-208.
- [22] 金成益, 1996, Ceramic 溶射材의 磨耗特性, 제주대학교 대학원석사학위논문.
- [23] 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, 1989, SEM 관찰에 의한 세라믹의 구름마모기구, *Journal of the KSLE*, Vol. 5, No. 1. pp. 35-43.