

碩士學位論文

Cr₂O₃와 ZrO₂ 세라믹 용사 코팅재의
마모 특성



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

李 奉 吉

2004

碩士學位論文

Cr₂O₃와 ZrO₂ 세라믹 용사 코팅재의
마모 특성

指導教授 金 貴 植



機械에너지工學科

李 奉 吉

2004

Cr₂O₃와 ZrO₂ 세라믹 용사 코팅재의 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

2004 年 月 日

濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科



李奉吉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2004 年 月 日

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

목 차

SUMMARY	1
I. 서 론	4
II. 실험재료 및 실험방법	6
2. 1 시험편	6
2. 2 시험장치	13
2. 3 실험 방법	15
III. 실험 결과 및 고찰	17
3. 1 하중 및 속도에 따른 마찰력의 변화	17
1) 공기 중 건조 마찰시 마찰력의 변화	17
2) 그리스 윤활환경에서의 마찰력의 변화	23
3) 베어링유 윤활환경에서의 마찰력의 변화	27
3. 2 하중 및 속도에 따른 마찰계수의 변화	31
1) 공기 중 건조 마찰시 마찰계수의 변화	31
2) 그리스 윤활환경에서의 마찰계수의 변화	36
3) 베어링유 윤활환경에서의 마찰계수의 변화	40
4) 그리스 윤활환경에서와 베어링유 윤활환경에서의 마찰계수의 비교	44
3. 3 마모량의 변화	48
3. 4 마멸면의 미시적 관찰	55
IV. 결 론	63
V. 참고문헌	64

Wear Characteristics of Cr_2O_3 and ZrO_2 Ceramic Spray Coating Materials

Bong-Gil Lee

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

Supervised by Professor Gui-Shik Kim

SUMMARY



This paper reports the wear characteristics of two types of coating materials, which are Cr_2O_3 and ZrO_2 , by coated plasma thermal spray method. The wear test was carried out under air, grease, and bearing fluid conditions. The wear testing machine of a pin-on disk type were used to measure friction forces, friction coefficients and the weight losses of the coating specimens on the various sliding velocity and loading condition. The wear surface of specimens were observed by scanning electron microscope (SEM)

photographs. The obtained results are as follows ;

1. On the dry friction conditions, the Cr_2O_3 specimens showed better wear characteristics in the friction force and friction coefficient than those of ZrO_2 specimens under the same test conditions of various slide velocities and loads.

2. On the grease conditions, the Cr_2O_3 coated specimens showed excellent friction and wear characteristics over the ZrO_2 coated specimens, while the ZrO_2 coated specimens did so over the Cr_2O_3 coated specimen under the bearing fluid conditions.

3. The less in loads and the slower in sliding velocity, the larger in friction coefficients of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating materials.



4. On the various loading and sliding velocity conditions, as for both the rotor and stator specimens, the weight loss of the Cr_2O_3 coated specimen was smaller than that of the ZrO_2 coated specimen.

5. At the observation of SEM photographs, the Cr_2O_3 coated specimen showed adhesive wear characteristics under the dry friction conditions regardless of slide velocities, while ZrO_2 coated

specimen had heavy abrasive wear in the slide velocity of 0.1 m/s and abrasive wear in the slide velocity of 0.2 m/s. Both specimens showed mild and adhesive wear characteristics in the circumstance of lubrication conditions.



I. 서 론

산업이 발전함에 따라 점차적으로 기계부품에는 고온, 고압 및 고부식성 분위기에서 견딜 수 있는 재료가 요구되고 있다. 따라서 종래의 기계구조용 금속 재료로 가혹한 환경 하에서의 사용은 한계가 있으므로 신소재의 개발이 절실히 요구되어지고 있으며 [1], 이러한 연구, 개발의 하나로 세라믹 재료를 이용한 단열엔진을 개발하여 디젤엔진에 적용하고자 하는 시도가 활발히 진행되어지고 있다 [2]. 하지만 세라믹 재료는 생산의 고비용과 특유한 기계적인 취성으로 인해 기계부품 재료로서의 응용은 제한된 범위에서만 이용되어져 왔다. 그러나 세라믹 재료는 일반 강에 비하여 밀도가 낮고, 경도 및 압축 강도가 높으며 고온에서도 양호한 기계적 성질을 가지고 있으며, 또한 화학 반응에 대해서 안정되고 우수한 전기적, 열적, 자기적 특성들을 가지며 열팽창률이 작고 내열충격성, 내식성, 내마멸성이 뛰어나 정밀기계분야, 섬유기계분야, 항공기분야 등의 특수한 환경 하에서 널리 사용되고 있다. 이러한 세라믹의 특성을 이용하여, 최근에는 접촉 운동을 하는 재료 표면의 내마멸성을 향상시키기 위한 방법으로 세라믹을 재료의 표면에 코팅하는 표면개질법이 많은 연구의 대상이 되고 있다.

표면개질법에는 습식법과 건식법으로 크게 나눌 수 있으며, 습식법은 액체상태에서 각종화학 반응으로 재료의 표면에 석출되는 현상을 이용한 도금법이 있으며, 건식법은 다시 화학증착(Chemical Vapor Deposition, CVD)법과 물리증착(Physical Vapor Deposition, PVD)법 및 용사법 등이 있다 [3]. 이들 중에서 용사법은 재료의 선택 범위가 다양하고 소재의 형상이나 치수의 제약을 덜 받으므로 종래의 공업 분야에는 물론 우주, 항공, 전자 기기, 원자력 발전 등 첨단 공업 분야에도 그 적용범위가 확대되고 있으며, 다른 코팅법에 비해 성분 분해 없이 플라스틱, 금속, 세라믹 등의 용융 물질 대부분을 코팅할 수 있는 장점이 있다.

이러한 장점 때문에 플라즈마 용사법을 이용한 세라믹 코팅은 많은 자동차 산

업 분야에서 널리 응용 되고 있다. 그 일례로 실린더 헤드, 밸브 페이스, 실린더 라이너 등의 자동차 엔진 요소에 적용이 검토 되어지고 있다. 내마모성 세라믹의 대표적인 재료는 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 등이 있는데 그 중 ZrO_2 는 구조용 재료로서 필요한 높은 강도 및 인성을 겸비하고 있으며, 일정수준 이상의 단열효과와 열팽창계수 차이에 의한 열응력을 최소화 시킬 수 있는 특성을 가지고 있다. 그리고 낮은 열전도도 및 약 2706 °C의 높은 용점과 높은 열팽창계수의 특성을 가지고 있어서, 적용 분야로는 발전기 가스터빈과 항공기의 제트엔진과 같은 고온에서 사용되는 재료들에 적용되는 단열 코팅 시스템의 재료로서도 많은 연구가 진행되고 있다 [4, 5]. 그러나 ZrO_2 세라믹 코팅이 자동차 엔진 요소에 응용 및 적용을 검토한 연구 자료에 의하면 내마모성은 비교적 우수하나, 마찰특성이 재래의 주철제 라이너에 비해 충분히 개선되지 않고 있다 [6]. 한편 Cr_2O_3 는 내마모성 및 내식성이 우수한 재료로 펌프, 롤러 및 프린터 롤러 등에 적용되고 있으며 [7], 마찰성능도 우수하여 내마모 및 저마찰용 코팅재료로서의 활용 가능성이 높은 것으로 보고 되고 있다 [8].

지금까지의 연구 동향을 살펴보면, Cr_2O_3 와 ZrO_2 를 사용하여 많은 실험을 통해 산업 분야에 응용 및 적용이 검토 되어져 왔다. 하지만 두 재료를 동일한 실험 조건 하에서 실험하여 Cr_2O_3 와 ZrO_2 의 상대적인 마모 특성의 비교는 지금까지 연구 되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 플라즈마 용사법에 의해 기계구조용 탄소강 (S45C)의 표면에 Ni-4.5wt%Al를 접합 코팅재로 사용하고, 두 종류의 Cr_2O_3 와 ZrO_2 로 코팅된 세라믹 코팅재를 이용하여 일반 대기, 그리스 윤활환경 및 베어링유 윤활환경에서의 마모 특성을 조사하기 위하여 Pin on disk형 마찰, 마모 시험기를 이용하였다. 실험은 부하 하중 및 미끄럼속도를 달리하여 이에 따른 마찰력과 마찰계수, 마모량을 조사·검토하였다. 그리고 마모 실험이 끝난 후 주사형 전자 현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM) 사진을 통해 마모면을 관찰하여 마모 특성을 검토 하였다.

II. 실험재료 및 실험방법

2. 1 시험편

시험편은 회전시험편(Rotor)과 고정시험편(Stator)으로 구성하였으며, 이들 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 회전시험편의 기재는 S45C를 사용했고, 고정시험편인 Stator는 5mm \varnothing 의 핀(pin)으로서 고탄소 크롬 베어링강 SUJ II를 사용하였다. 그들의 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1(a)의 회전시험편은 폭(w) 70 mm, 두께(t) 5 mm의 Disk형으로 제작하고, 90°각으로 4개의 탭을 가공하여 M6 볼트로 시험기의 회전테이블에 고정할 수 있도록 하였다. 모재와 코팅 층은 기계적인 접합이 매우 중요하므로 계면 면적을 크게 할 필요가 있으므로, 모재 표면에 white alumina를 사용하여 블라스팅(blasting)을 실시함으로써 코팅과 모재와의 기계적인 결합력을 향상시켰다. 블라스팅 조건은 Table 2에 나타내었다. 그리고 고온 분위기에서 모재와 코팅층간에 열팽창계수 차이에 의해 열 균열 등을 방지하기 위하여 시험편에 Ni-4.5wt%Al 합금분말을 사용하여 본드 코팅을 실시하였다.

상부 탭 코팅 재료는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 를 사용하였고, 용사 조건은 Table 3에 나타내었으며, Metco사의 지침에 따랐다. 본드 코팅의 두께는 약 $100\mu\text{m}$, 상부 탭 코팅은 약 $200\mu\text{m}$ 로 하였으며, 탭 코팅 분말의 조건과 특성을 Table 4에 나타내었다.

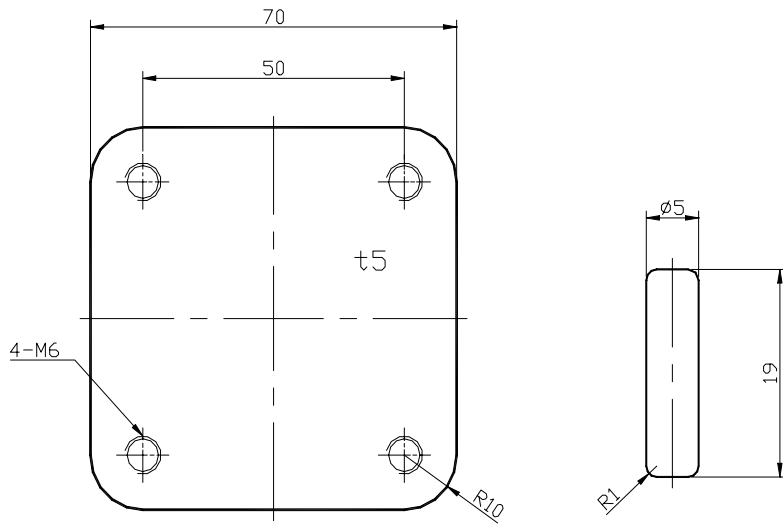
Fig. 2 (a)와 (b)는 상부 탭 코팅을 하는데 사용된 분말의 형상과 크기를 보여주고 있다. Fig. 2 (a)는 Cr_2O_3 의 불규칙한 분말 형상을 보여주고 있다. 반면에 Fig. 2 (b)는 ZrO_2 시험편을 코팅하는데 사용한 분말인데 구의 형상을 가지고 있고, 이는 용사시 모재로 분사될 때 공기의 저항력이 감소되어 코팅과 모재간의 접착력을 증가시키는 역할을 한다 [9].

용사되어진 코팅 층의 표면은 매우 거칠어 마멸 실험에 민감한 영향을 미치므

로 표면조도의 차이에서 오는 마멸량의 차이를 없애기 위해 정세 연마하여 코팅재의 표면조도를 약 $1\mu\text{m Ra}$ 이하로 가공하였다.

본 연구에서는 플라즈마 용사 세라믹 코팅 장비(Metco Inc.)를 사용하였다. 그 구성은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 power supply unit, plasma spray control unit, powder feeder, heat exchanger 및 plasma gun 등으로 구성되어 있다. 장치의 작동은 음극과 양극사이에 전기를 통하고 여기에 수소 및 아세틸렌가스를 통과시키면 가스는 가열과 분해에 의해 팽창되고 이온화를 일으켜 노즐 선단부에서 발생하는 고온 (약 $16,500^{\circ}\text{C}$)으로 인하여 분말상의 재료가 플라즈마 속에서 녹으면서 고속 (650m/min)으로 분사되어 기재에 코팅재가 적층된다.

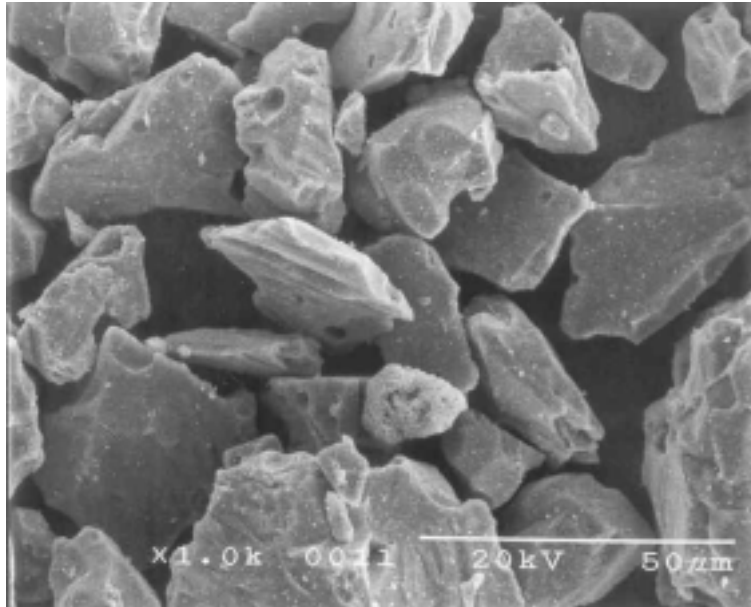




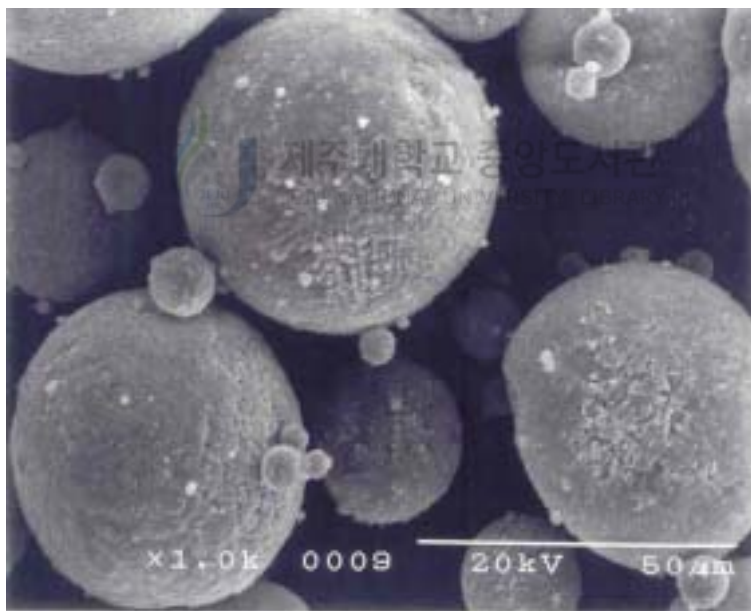
(a) Rotor

(b) Stator

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



(a) Cr₂O₃



(b) ZrO₂

Fig. 2 SEM photographs of Cr₂O₃ and ZrO₂ powders.

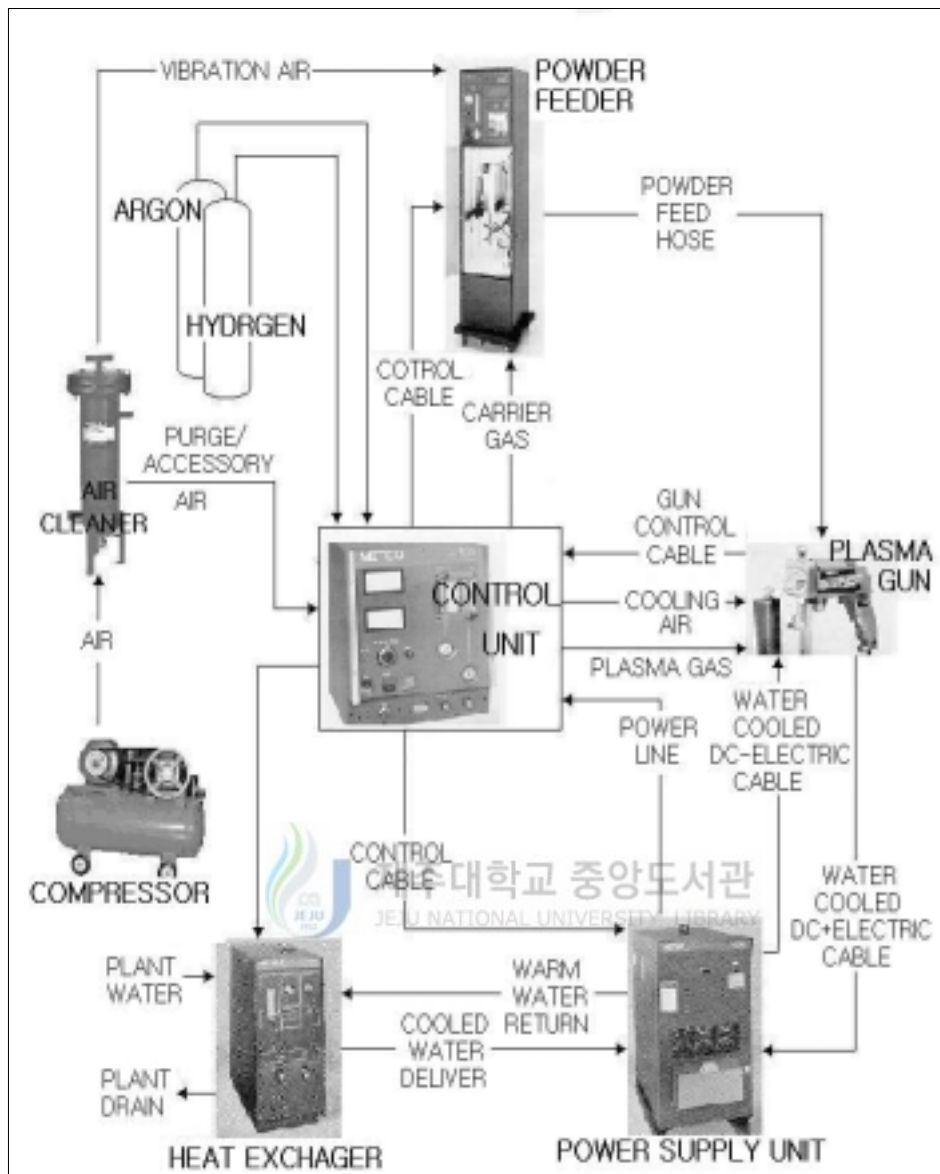


Fig. 3 Plasma spray system.

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 ~ 0.470	0.246 ~ 0.251	0.770 ~ 0.774	0.0154 ~ 0.0162	0.00693 ~ 0.00835	0.02	0.13	0.01
Stator (SUJ II)	0.95 ~ 1.10	0.15 ~ 0.35	0.5	0.025	0.25	0.25	1.30 ~ 1.60	0.25

(b) Mechanical properties.


	Yield strength (MPa)	Stress (MPa)	Strain (%)	Poisson's ratio	Specific gravity g/cm ³	Young' 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 (kg/cm ²)		DC (A)	DC (V)	Spray distance (mm)
	Flow rate (m ³ /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H ₂			
Cr ₂ O ₃	0.38	38	5.62	1.05	500	65-70	65
ZrO ₂	0.38	38	5.62	1.05	500	65-70	75
Ni-4.5wt%Al	0.38	68	5.62	1.05	500	65-70	100-175

 제주대학교 중앙도서관
Table 4 Top coating powders used.

Condition Powder	Typical composition	Grain size(μm)	Trade name
Cr ₂ O ₃	98%Cr ₂ O ₃ 2%TiO ₂	-125+11μm	Metco 106
ZrO ₂	76%ZrO ₂ 24%MgO	-90+11μm	Metco 210NS-1

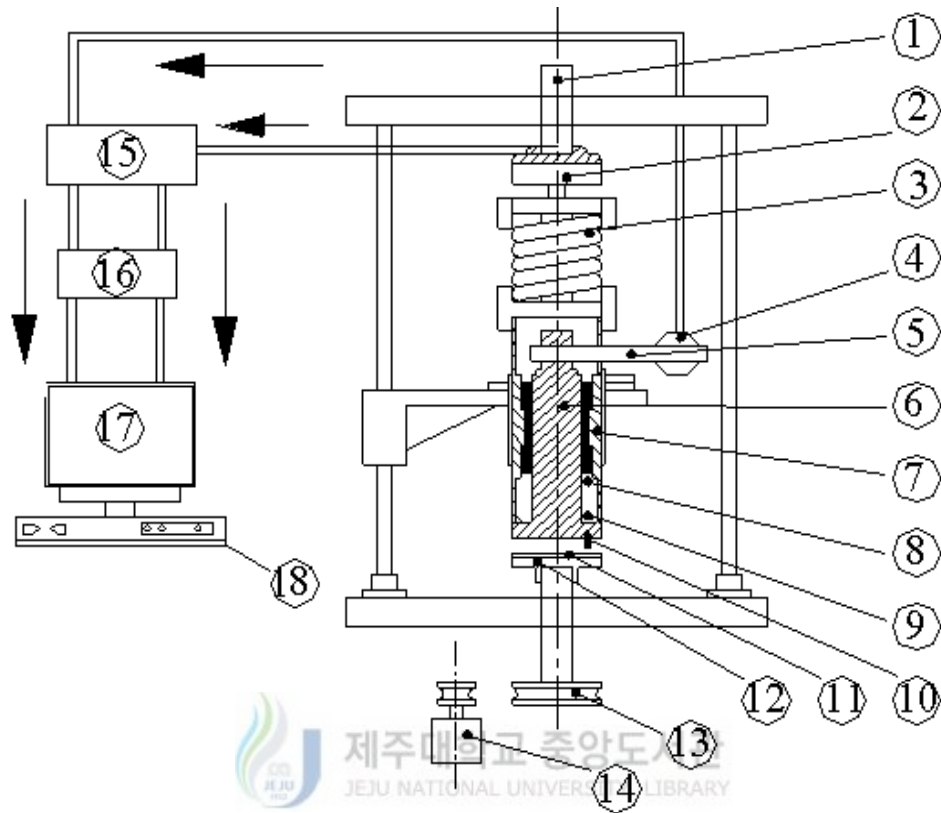
2. 2 시험장치

본 실험에 사용된 시험기는 Fig. 4에 나타낸 Pin on disk형 마모시험기이다. 시험기의 자체의 고유 진동을 줄이기 위하여 중량이 무거운 재질을 선택하였고 스프링 부분은 스프링 상수가 서로 다른 이중 스프링을 사용하였다.

본 시험에 사용한 모터는 교류 저속 동기 모터(Dkm Emps, Dae Kyung 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 슬립(Slip) 현상이 없이 정속도 운전이 가능하다

제어기로는 80486 마이크로 프로세서(micro processor)를 내장한 퍼스널 컴퓨터를 사용했다. 연속계신호와 이산계신호를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A 변환기는 12 비트의 분해 능력을 가지는 Advantech 사의 PCL-812 PG를 사용했다. 하중과 마찰력을 감지하는 로드 셀은 NTS 제품인 LCW-500 K 형으로 정격 용량이 5 KN이다. 로드셀에서 검출한 스트레인을 증폭해 주는 스트레인 증폭기는 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. 4 Block diagram of friction testing machine.

2. 3 실험 방법

마찰 형태는 고정 시험편(Stator)인 핀(Pin)과 접촉한 회전 시험편(Rotor)을 회전시키면서 소정의 하중을 가하는 면 접촉 미끄럼마찰 형식인 Pin on disk 형으로 실온 대기압 및 그리스 윤활환경, 베어링유 윤활환경에서 실험을 실시하였다. 실험 조건을 Table 5에 나타내었다. 하중 조건은 일반 공기 중에서는 100N, 200N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s와 0.2 m/s로 하였으며, 그리스 윤활환경 및 베어링유 윤활환경에서는 하중을 300N, 500N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s와 0.2 m/s로 달리 해서 실험 하였다. 미끄럼 마찰거리는 각 속도마다 2시간으로 하였다. 윤활환경에서의 실험은 회전 테이블에 챔버(Chamber)를 설치하여 회전 시험편과 고정 시험편이 완전히 침지할 수 있도록 하여 회전시켰다. 그리고 각 윤활유의 특성을 Table 6에 나타내었다.

실험과정은 초음파 세척→건조→무게 측정→마모 실험→초음파 세척→건조→무게 측정 → SEM 관찰의 순으로 수행하였다.

마모량의 측정은 시험 전후 시험편의 무게 차로 계산하였다. 이때 시험편은 초음파 세척기로 10 분간 초음파 세척, 탈지 및 건조의 과정을 거친 후, 시험편의 무게를 1×10^{-5} g까지 측정이 가능한 전자식 저울을 사용하여 5회 측정하여 그 평균값을 중량으로 이용하였다. 실험이 완료된 후 시험편의 마멸현상을 미시적으로 관찰하기 위하여 주사형 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 마찰에 의한 표면 마모특성 및 마찰면 관찰을 실시하였다.

Table 5 Experimental conditions.

Normal load (N)	in air	in lubrication
	100, 200	300, 500
Sliding speed (m/s)	0.1, 0.2	
Sliding times (hours)	2	
Test temperature (°C)	25	
Environment	air, lubrication	

Table 6 Physical qualities of lubrication oils.

Kinds of lubrication		Grease	Bearing fluids
Density (@15/4°C)		-	0.872
Kinematic Viscosity	@40°C	-	150
	@100°C	-	15.37
Viscosity index		-	104
Flash point (Open type °C)		-	276
Pour point (°C)		-	-12.5
Thickener		Li-Ca	-
Worked Penetration (@25°C)		265~295	-
Dropping point (°C)		180	-
Used temperatures (°C)		-21/+130	-

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

3. 1 하중 및 속도에 따른 마찰력의 변화

1) 공기 중 건조 마찰시 마찰력의 변화

Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편을 공기 중에서 실험을 하였다. Fig. 5 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 코팅시험편을 부하 하중을 200N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s와 0.2 m/s로 했을 때 부하 하중과 마찰력의 변화를 나타낸 그래프인데, 그래프에서 상단 선은 부하 하중(Load)을 나타내고 하단 선은 마찰력(Friction force; F.f)의 변화를 나타낸다. 그래프를 보면 동일한 부하 하중에서 미끄럼속도 0.1 m/s에서는 마찰력이 약 150N, 미끄럼속도가 0.2 m/s에서는 약 100N으로 미끄럼속도의 차이에 의하여 마찰력이 변화 한다고 보인다. 이하 Fig. 6의 그림부터는 두 종류의 코팅재를 비교하기 위하여 부하 하중을 제외하고 Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편의 마찰력의 변화만을 비교하여 나타내었다.

Fig. 6 (a)와 (b)는 공기 중에서 하중을 100N, 200N으로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때의 그래프이다. 그래프에서 Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편을 공기 중에서 미끄럼 되는 시간은 2시간으로 일정하게 하고 하중에 변화를 주면서 실험하여 마찰력을 비교하였다.

Fig. 6 (a)를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력은 150m까지는 120N정도로 높게 나타나고 150m를 지난 지점부터는 90N정도로 하강했으나, 600m를 지난 지점부터는 100N으로 안정화를 보이면서 마찰력이 일정하게 나타남을 알 수 있다. 이는 공기 중에서의 마모 실험을 행할 때 천이 점을 보이는 것으로 초기의 마모 상태를 설명해 주고 있다 [10]. 또한 ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 약 100m 지점까지는 175N까지 높게 나타나다 200m 이후부터는 약 140N으로 일정한 크기로 변하다가, 900m를 지난 지점부터는 125N 정도로 낮게 나타나고 있으나, ZrO_2

코팅시험편인 경우 Cr_2O_3 코팅시험편 보다 동일한 실험 조건에서 마찰력이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 ZrO_2 코팅시험편인 경우는 초기에 마찰력이 급격하게 높게 나타나는 현상을 확인할 수 있는데 이런 현상은 ZrO_2 코팅시험편인 경우 초기 마모가 매우 심하게 발생했음을 예측할 수 있다.

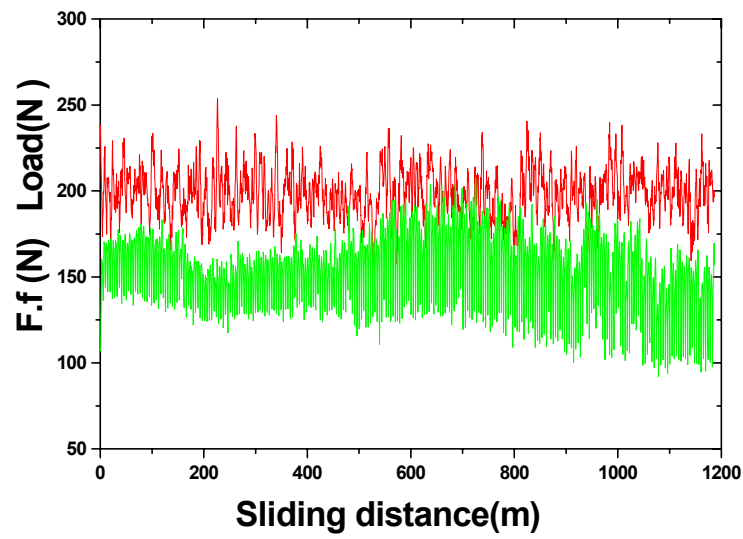
Fig. 6 (b)는 하중을 200N으로 했을 때 그래프이다. Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력은 실험 초기에는 150N에서 165N정도의 변화를 보이다 600m를 지난 지점부터는 130N에서 170N정도의 큰 진폭으로 실험이 진행 되어졌다는 것을 알 수 있다. 마찰력의 진폭이 이렇게 크고 불규칙하게 나타나는 원인은 실험이 진행되는 과정에서 마찰, 마모 실험을 행할 때 두 시험편 사이에서 마모입자들이 쉘 새 없이 생성, 응집, 탈락되는 현상에서 발생하는 현상이라 사료된다. 그리고 하중이 100N일 때와 비교하면 하중이 증가 할수록 마찰력 또한 증가한다는 것을 알 수 있다. ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 실험 초기 50m까지는 190N까지 급속하게 올라갔다가 400m를 지난 지점에서 마찰력이 서서히 낮게 나타나고 900m를 지난 지점에서는 약 100N으로 일정하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7 (a)와 (b)는 하중을 100N, 200N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때의 그래프이다. Fig. 7 (a)는 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우인데 마찰력은 80N에서 100N정도의 진폭으로 변하면서 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우에는 실험 초기에는 마찰력이 100N에서 150N까지 상승하였으나 1000m를 지난 지점부터는 100N에서 120N정도의 진폭을 보이면서 실험이 진행되었다. 하중을 100N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때와 동일하게 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우와 비교 했을 때 마찰력은 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

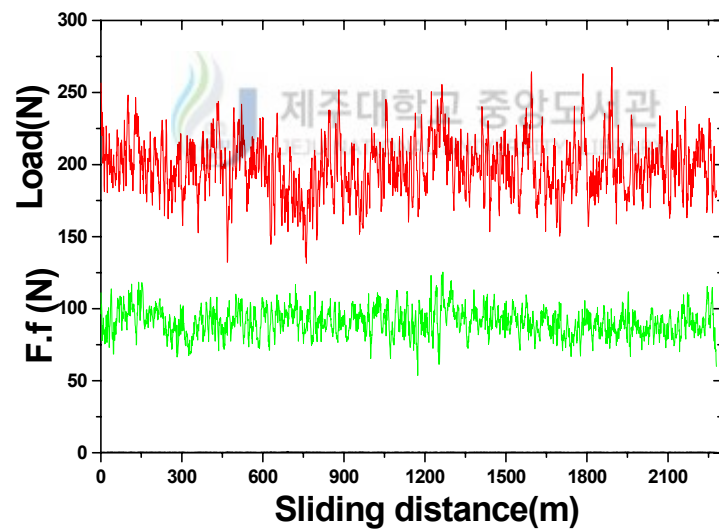
Fig. 7 (b)는 하중을 200N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때의 그래프이다. Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력은 80N에서 100N정도로 불규칙하게 변하면서 마찰력이 나타나고, ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 실험 초기에서 500m까지는 150N까지 급속하게 증가를 하다 서서히 감소하기 시작하여 1000m를 지난 지점에서는 마찰력이 100N으로 일정하게 나타났다.

지금까지의 실험결과를 살펴보면 미끄럼속도가 0.1 m/s이고 하중이 100N인 경우에는 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰력은 높게 나타났다. 반면에 하중이 200N인 경우에는 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 Cr_2O_3 코팅 시험편인 경우 보다 마찰력이 낮게 나타났으며, 미끄럼속도가 0.2 m/s인 경우에는 하중이 100N인 경우에는 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰력이 높게 나타났고, 하중이 200N인 경우에는 실험 초기에는 ZrO_2 코팅시험 편인 경우 마찰력이 매우 높게 나타나고 있으나, 실험 말기에는 마찰력의 변화가 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우와 큰 차이점을 나타내지 않았다.

이는 하중이 적은 100N인 경우에는 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우가 우수한 마찰특 성을 지니고 있다고 볼 수 있으나, 하중이 200N인 경우에는 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 우수한 마찰특성을 가지고 있다고 말할 수 있다. 이러한 결과로 두 재료의 마찰특성을 비교하는데 어려움이 있어 더욱 가혹한 실험 조건으로 부하 하중을 300N과 500N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험을 한 결과, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우는 실험을 할 수 있었으나, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 실험을 하는 중에 코팅 면의 심한 마모로 인해 실험을 할 수 없을 정도였는데, 이런 결과로 보아 하중이 200N 보다 높은 부하 하중에서는 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편 보다 우수한 마찰, 마모 특성을 가진다고 추정할 수 있다.

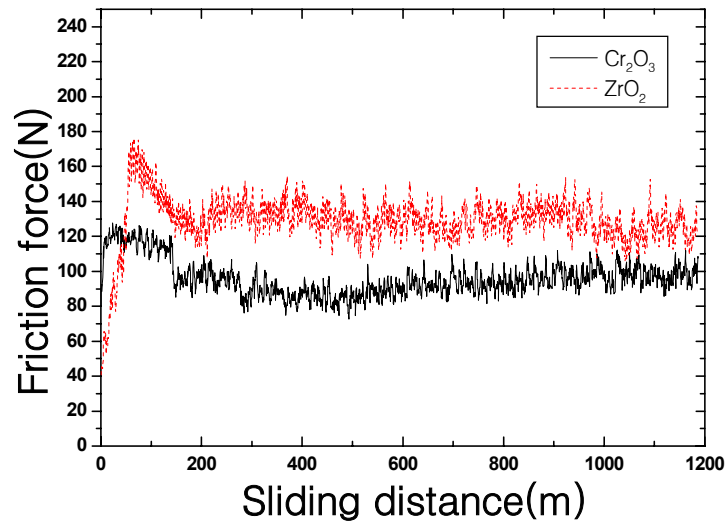


(a) $V = 0.1 \text{ m/s}$

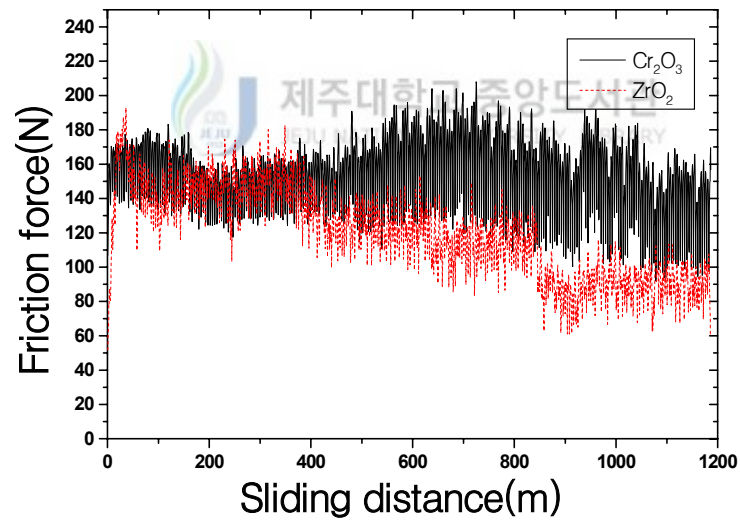


(b) $V = 0.2 \text{ m/s}$

Fig. 5 The friction force of Cr_2O_3 coating specimen.
(load = 200N, in air)

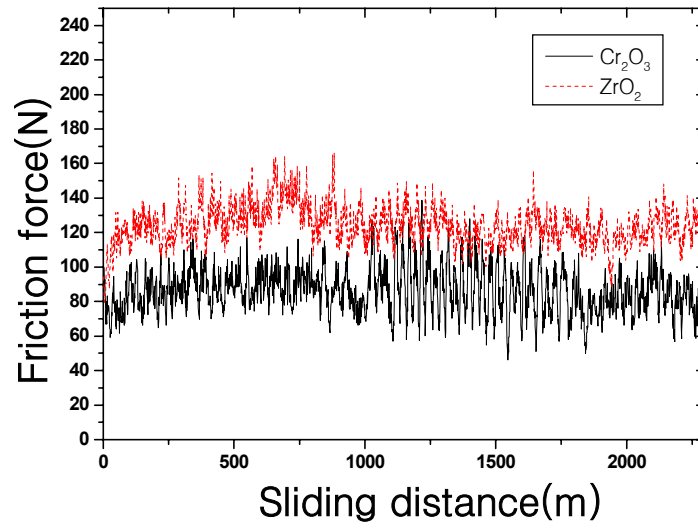


(a) load = 100N

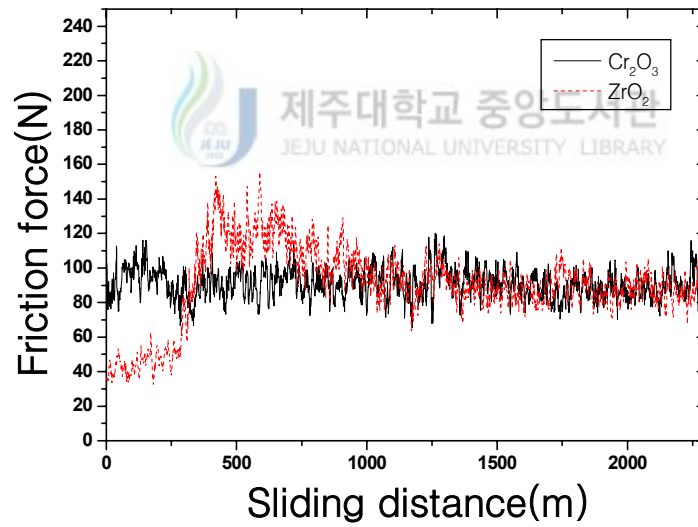


(b) load = 200N

Fig. 6 The friction force of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimens.
($V=0.1$ m/s, in air)



(a) load = 100N



(b) load = 200N

Fig. 7 The friction force of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimens.
($V=0.2$ m/s, in air)

2) 그리스 윤활환경에서의 마찰력의 변화

Fig. 8 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s로 하여 그리스 윤활환경에서 실험을 하였을 때의 그래프이다.

Fig. 8 (a)는 하중을 300N으로 했을 때 그래프인데, 그래프를 보면 Cr_2O_3 코팅 시험편인 경우 마찰력이 60N에서 80N정도로 큰 진폭을 보이면서 마찰력이 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 60N에서 70N정도로 변화 하면서 실험이 진행되었다.

공기 중에서의 실험과 비교했을 때 부하 하중이 증가하였는데도 마찰력이 낮게 나타나는 이유는 마찰, 마모 실험을 할 때 Rotor와 Stator 사이에 제 3의 물질인 그리스가 윤활 역할을 하여 실험을 하는 중에 마찰면에 발생하는 열을 흡수하고 또한 Rotor와 Stator 가 직접적으로 접촉되는 것을 막아주는 원인에서 발생하는 현상이라 생각할 수 있다.

그러나 실험을 하는 과정에서 어느 정도의 시간이 지난 후부터 그리스 색상이 검은 색으로 변하는 것을 볼 수 있는데 이는 마모입자들이 그리스의 응집력으로 인해 분산되지 못하고 그리스에 섞여 있음으로 인해 생기는 원인이라 볼 수 있다. 이렇게 그리스의 색상이 변하는 것을 보면, 그리스 윤활환경에서도 또한 아주 경미하기는 하나 마모가 일어나고 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 8 (b)는 하중을 500N으로 하였을 때 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력이 실험 초기에는 60N에서 80N정도로 높게 나타나다 400m를 지난 지점부터는 약 60N 정도로 낮게 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 약 90N 정도로 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 보다 높게 나타났다.

Fig. 9 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.2 m/s 로 하여 실험 했을 때의 그래프이다.

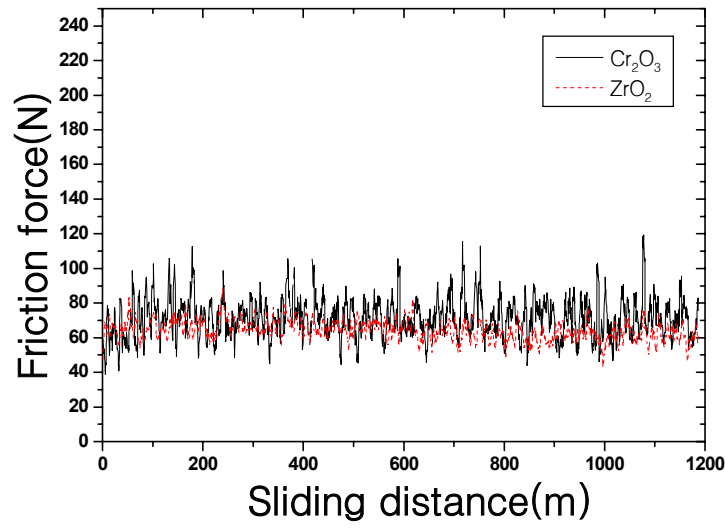
Fig. 9 (a)의 그래프를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력은 25N에서 40N정도의 진폭으로 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 마찰력이 50N에서 70N정도

의 진폭으로 마찰력이 변화 하였는데, 역시 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 Cr_2O_3 코팅 시험편인 경우 보다 높게 나타났다.

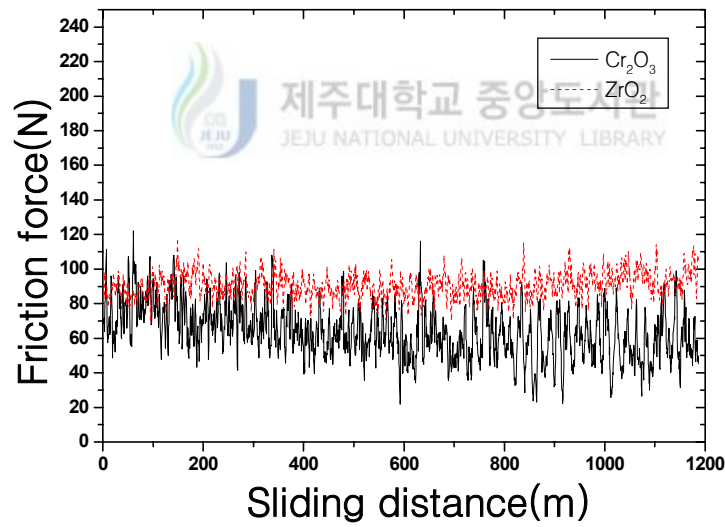
Fig. 9 (b)는 하중을 500N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 하여 실험 했을 때 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력은 약 40N에서 50N정도의 진폭으로 변화 하면서 마찰력이 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 1500m까지는 80N정도로 나타나다 다시 상승하고 하강하는 복잡한 마찰력의 변화를 보이고 있는데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰력이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

지금까지의 실험 결과를 분석해 보면 그리스 윤활환경에서 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 미끄럼속도가 0.1 m/s 일 때 하중이 증가 할수록 마찰력이 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 반면에 ZrO_2 코팅시험편인 경우는 하중이 증가할수록 마찰력이 높게 나타남을 확인할 수 있었으나, 미끄럼속도가 0.2 m/s 일 때는 두 종류의 시험편 모두 하중이 증가할수록 마찰력이 증가함을 알 수 있었다. 이는 그리스 윤활환경에서의 마찰력의 증가 원인은 하중의 증가로 인한 원인 보다는 미끄럼속도의 증가로 인한 원인이라 사료된다.



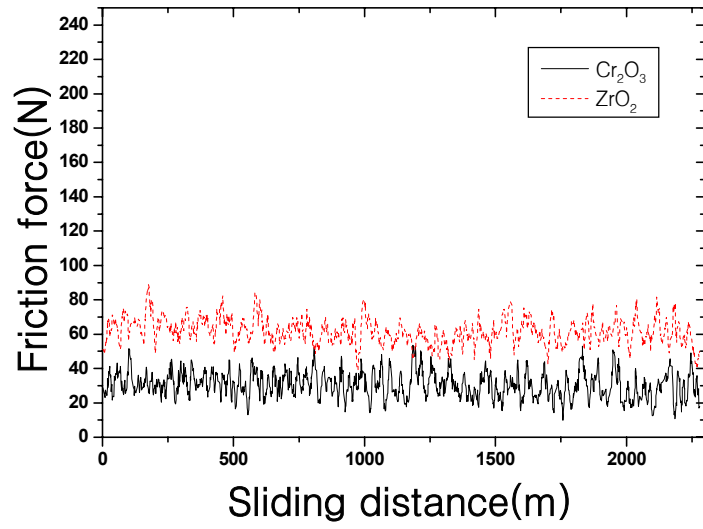


(a) load = 300N

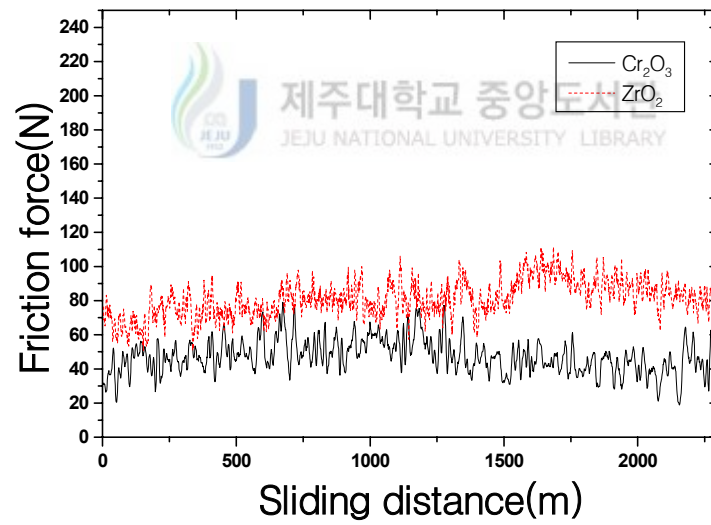


(b) load = 500N

Fig. 8 The friction force of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimens ($V=0.1$ m/s, in grease)



(a) load = 300N



(b) load = 500N

Fig. 9 The friction force of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimens.
($V=0.2$ m/s, in grease)

3) 베어링유 윤활환경에서의 마찰력의 변화

Fig. 10 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 베어링유 윤활환경에서 하중을 300N, 500N로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s 했을 때 실험한 그래프이다.

Fig. 10 (a)는 하중을 300N으로 했을 때 그래프인데, 그래프를 보면 Cr_2O_3 코팅 시험편인 경우 마찰력이 40N에서 50N정도의 진폭을 보이면서 실험이 진행되었으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 60N에서 70N 정도의 진폭으로 실험이 진행되었는데 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰력이 높게 나타났다.

Fig. 10 (b)는 하중을 500N으로 했을 때인데, 그래프를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력이 실험 초기에는 약 80N으로 높게 나타나다, 200m를 지난 지점부터는 60N에서 70N정도로 진폭을 보이면서 마찰력이 변화 하였으며, ZrO_2 코팅 시험편인 경우 마찰력은 80N에서 90N 정도의 진폭으로 실험이 진행되었는데, 역시 ZrO_2 코팅시험편인 경우 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰력이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

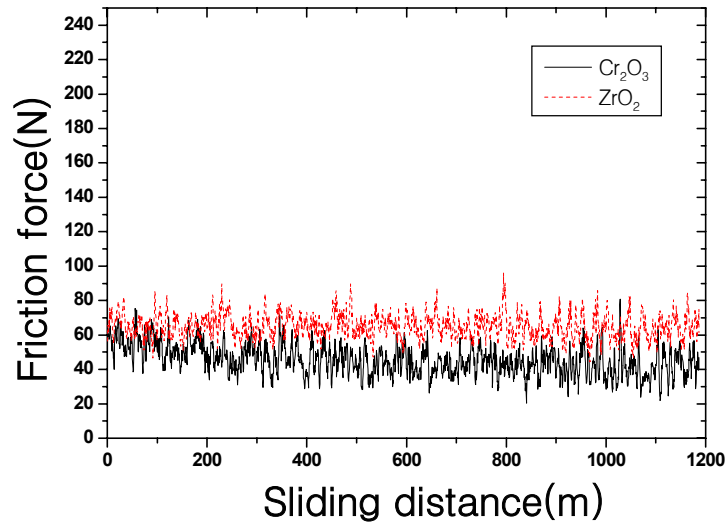
Fig. 11 (a)와 (b)는 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.2 m/s로 하여 실험을 했을 때 그래프이다. Fig. 11 (a)는 하중을 300N으로 실험 했을 때인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력이 실험 초기에는 50N으로 높게 보이다가 200m를 지난 지점부터는 40N정도로 낮게 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우 마찰력은 60N에서 70N정도의 진폭으로 실험이 진행되었는데, ZrO_2 코팅시험편인 경우 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰력이 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 11 (b)는 하중을 500N으로 했을 때 실험한 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰력이 40N에서 60N으로 나타났고, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 마찰력이 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우와 비슷한 진폭으로 실험이 진행되었음을 알 수 있다.

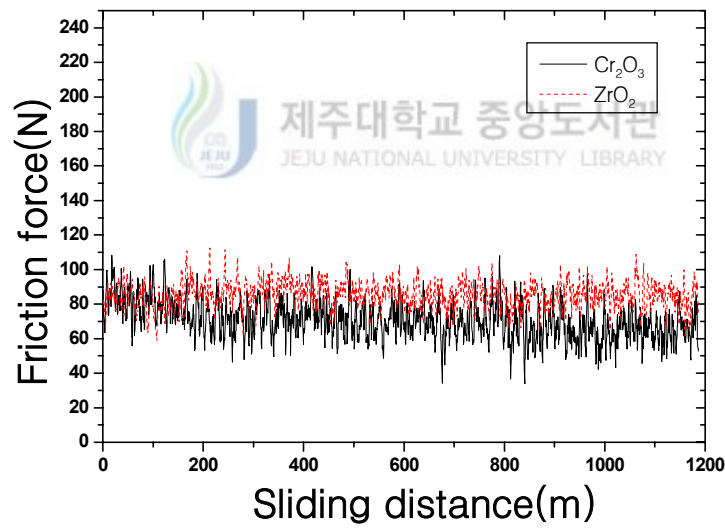
지금까지의 실험 결과를 비교해 보면, 미끄럼속도가 0.1 m/s일 때는 하중이 증가 할수록 마찰력 또한 증가 한다는 것을 알 수 있었으나, 미끄럼속도가 0.2 m/s인 경우에는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편인 경우 하중이 증가 할수록 마찰력이 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 베어링유 윤활환경에서 실험이 진행되는 과정

에서 빠른 미끄럼속도와 높은 부하 하중에 의해 마찰면에 응착(adhesive)마멸이 일어나면서 발생하는 원인으로 마멸부가 심하게 응착이 되면서 마멸면이 매끈하게 되면서 마찰력이 낮게 나타나는 원인으로 작용하고 있다고 사료된다.



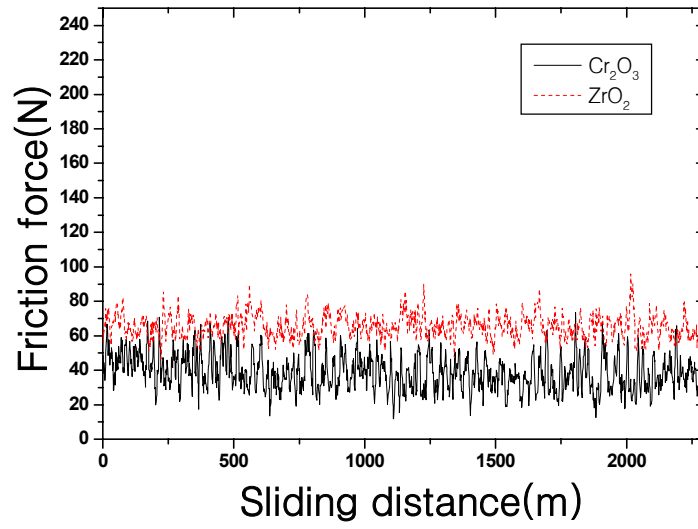


(a) load = 300N

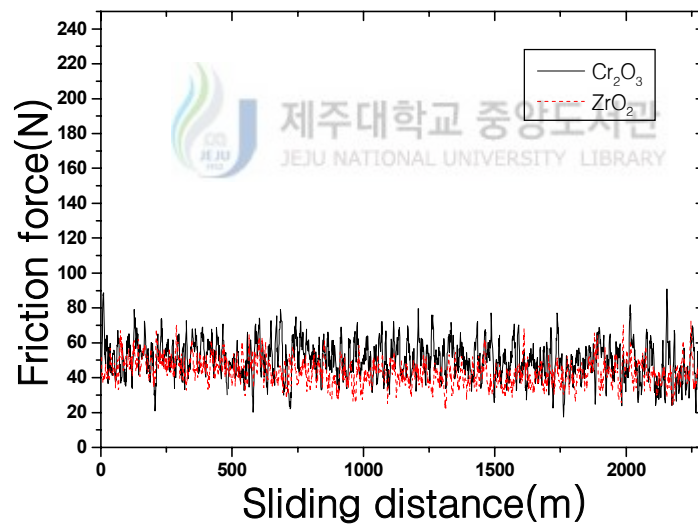


(b) load = 500N

Fig. 10 The friction force of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimen.
($V=0.1$ m/s, in bearing fluid)



(a) load = 300N



(b) load = 500N

Fig. 11 The friction force of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimens.
($V=0.2$ m/s, in bearing fluid)

3. 2 하중 및 속도에 따른 마찰계수의 변화

1) 공기 중 건조 마찰시 마찰계수의 변화

Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 공기 중에서의 실험을 하고 마찰계수의 변화를 비교하였다. Fig. 12 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 하중을 100N, 200N으로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s 로 하였을 때의 마찰계수의 변화를 나타내는 그래프이다.

Fig. 12 (a)는 하중을 100N으로 했을 때 인데, 그래프를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰계수는 150m까지는 1.1까지 상승하였다가 서서히 하강하다, 150m를 지난 지점부터는 0.75에서 0.85로 일정한 진폭을 보이면서 실험이 진행되는 데 시험 초기 1.1까지 상승하다 하강하고 일정한 진폭을 보이면서 나타나는 것은 공기 중에서의 마찰 마모 실험을 행할 때 천이 점을 보이고 있는 것으로 초기의 마모 상태를 설명해 주고 있으며, ZrO_2 코팅시험편은 실험 초기 90m 지점까지는 0.5에서 1.7까지 급상승하다. 200m를 지난 지점부터는 1에서 1.25정도의 진폭을 보이면서 실험이 진행되는 데, 실험이 진행되는 도중에 마찰계수가 일정하지 못하고 갑자기 상승했다가 하강하는 것을 볼 수 있는데 이처럼 복잡한 마모 형태나 마찰거동을 나타내는 요인으로서 접촉면에 제 3의 개재 물에 의한 영향이 고찰되었고 제3의 개재 물은 두 물체 간에 접촉된 개재 물에 의한 것이며 [11], 본 연구에서는 마모 분말을 의미한다. 이는 실험이 진행되는 과정에서 마모입자들이 쉘 새 없이 생성, 응집, 탈락되는 현상에서 발생하는 현상이라 사료된다.

Fig. 12 (b)는 부하 하중을 200N으로 하고 실험을 했을 때 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 마찰계수가 0.7정도로 500m지점 까지 진행되다가 600m지점부터는 0.6에서 0.8까지 상승하는 복잡한 마찰 거동 현상을 보이다 다시 1000m를 지난 지점에서 하강하여 0.5에서 0.7정도로 진폭을 보이면서 나타나는 것으로 하중을 100N으로 실험 했을 때 보다 마찰계수가 낮게 나타나지만 그 형태는 비슷하게 실험이 진행됨을 알 수 있다. 그리고 하중이 증가 할수록 마찰계수는 낮게

나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 마찰면 표면에서 발생하는 마찰열에 의한 것으로 생각되는데, 하중이 증가됨에 따라 마찰로 인한 접촉면 표면에서 온도가 상승함에 따라 접촉부에서 재질이 다소 연화되었을 것이라 생각할 수 있다 [12].

ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 실험 초기 50m 지점까지는 마찰계수가 1까지 급격하게 상승하였으나 100m를 지난 지점부터 400m지점까지는 다시 하강하여 0.5에서 0.65정도의 마찰계수의 변화를 나타내고, 900m를 지난 지점부터는 0.45정도의 낮은 마찰계수의 변화를 확인할 수 있는데, Cr₂O₃ 코팅시험편의 경우와 동일하게 하중이 증가 할수록 마찰계수는 낮게 나타나고 있음을 알 수 있고, 역시 공기 중에서 마찰, 마모 실험을 할 때 나타나는 초기 마모 현상인 천이점이 발생함을 알 수 있으며, ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 두 차례에 걸쳐 초기 마모 현상이 발생함을 알 수 있었다.

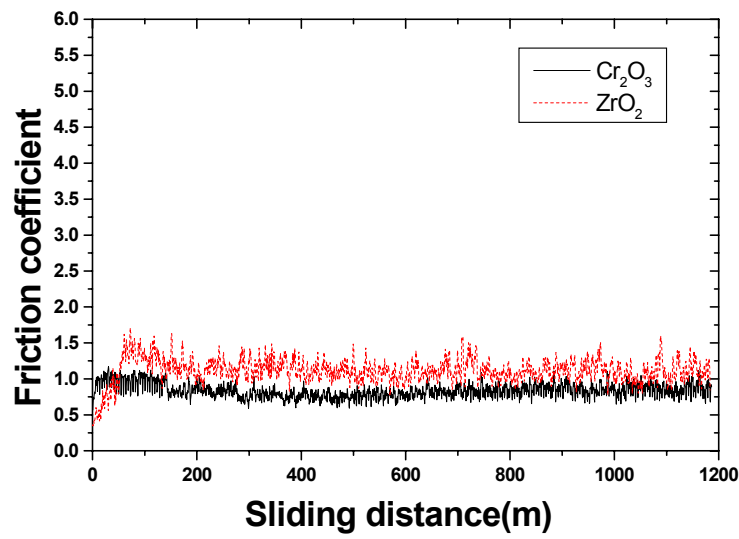
Fig. 13 (a)와 (b)는 부하 하중을 100N, 200N으로 하고 미끄럼속도를 0.2 m/s로 하였을 때의 그래프이다. Fig. 13 (a)의 그래프는 하중을 100N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때인데, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 마찰계수는 실험 초기부터 끝까지 0.5에서 1.2정도의 아주 큰 진폭을 보이면서 나타났고, 그리고 실험 도중에 마찰계수가 갑자기 상승했다가 하강되는 복잡한 마찰 거동 현상을 보이고, ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 실험 초기부터 끝까지 0.7에서 1.5정도의 큰 진폭을 보이면서 역시 복잡한 마찰 거동 현상을 보여주고 있다.

Fig. 13 (b)는 하중을 200N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때의 그래프이며, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 마찰계수의 변화는 0.4에서 0.5정도의 일정한 진폭으로 나타나고 있으나, ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 250m까지는 0.25로 진행되어지다 500m지점까지는 0.7까지 상승하고 다시 1000m를 지난 지점부터는 0.5정도의 마찰계수의 값을 나타내면서 발생하는 아주 복잡한 마찰 거동 현상을 확인할 수 있었다.

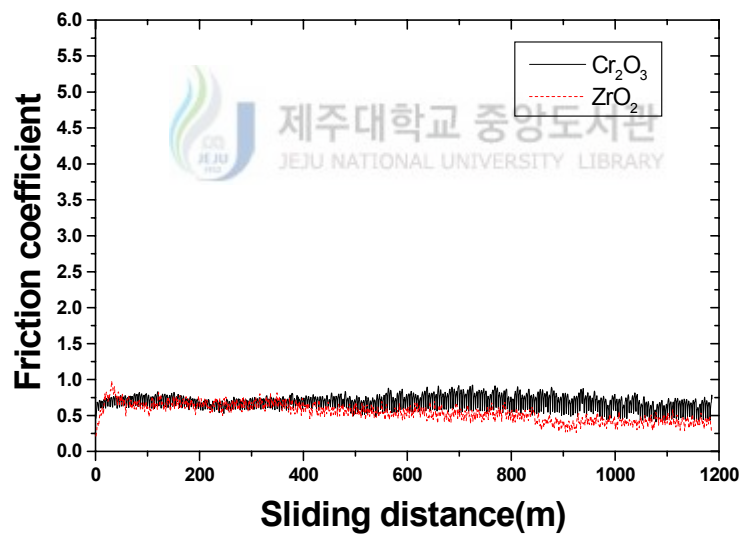
지금까지의 그림들을 비교, 분석해 보면 하중이 100N인 경우에는 Cr₂O₃ 경우

ZrO₂ 코팅시험편 보다 낮은 마찰계수의 변화를 보였으며, 하중이 200N으로 증가하였을 때는 오히려 ZrO₂ 코팅시험편인 경우가 Cr₂O₃ 코팅시험편보다 낮은 마찰계수와 진폭을 보이는 것으로 보아 하중이 100N 때와는 전혀 다른 현상을 나타냈다.

공기 중 건조 마찰시 마찰력의 변화에서도 설명했듯이 하중이 100N일 때와 200N일 때는 서로 다른 현상을 보이므로 실험조건을 더욱 가혹한 실험 조건으로 하중을 300N과 500N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우는 실험을 할 수가 있었으나, ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 실험 중에 코팅면이 모두 마모가 되어 실험을 할 수 없을 정도였는데, 이러한 결과로 보면 부하 하중이 200N 보다 높은 고 부하 하중에서는 Cr₂O₃ 코팅시험편이 ZrO₂ 코팅시험편보다 우수한 마찰, 마모 특성을 가진다고 사료된다.



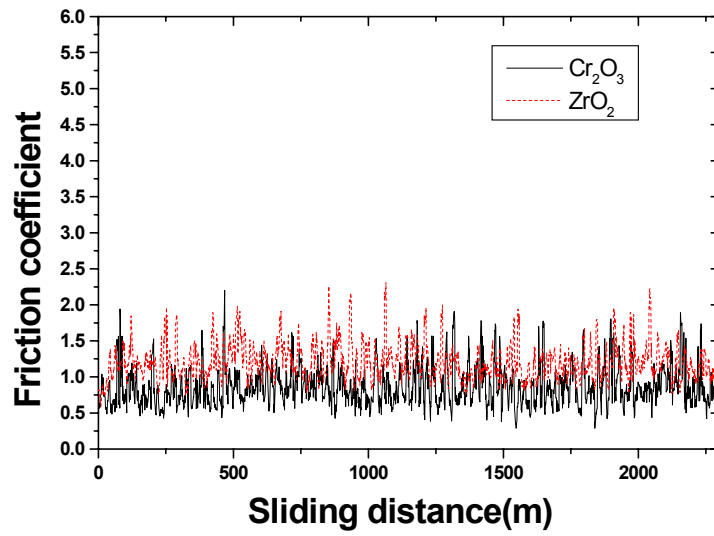
(a) load = 100N



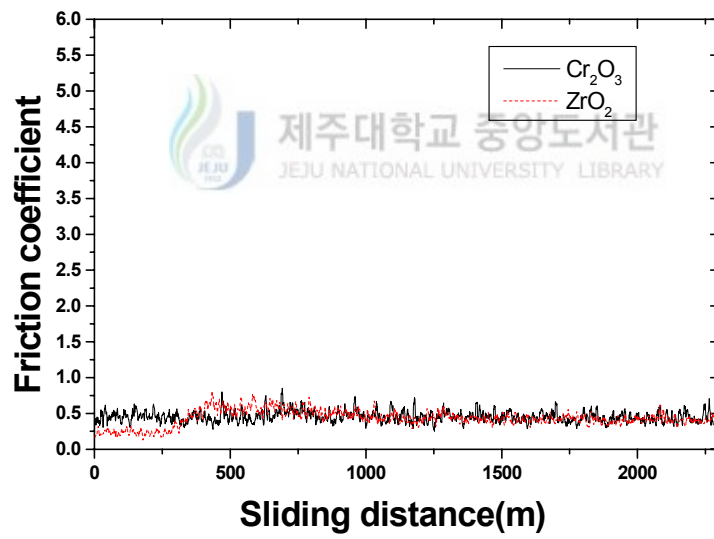
(b) load = 200N

Fig. 12 Friction coefficient of Cr_2O_3 and ZrO_2 coating specimens.

($V=0.1$ m/s, in air)



(a) load = 100N



(b) load = 200N

Fig. 13 Friction coefficient of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens.

(V=0.2 m/s, in air)

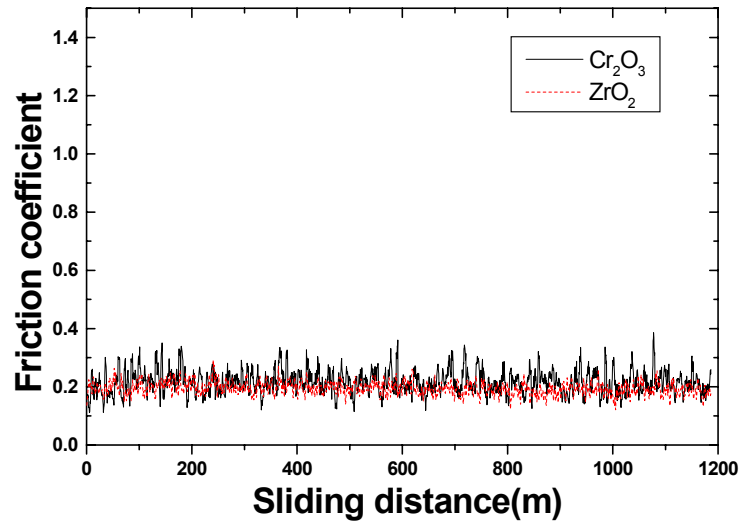
2) 그리스 윤활환경에서의 마찰계수의 변화

Fig. 14 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s로 그리스 윤활환경에서 실험을 했을 때의 그래프이다. Fig. 14 (a)는 하중을 300N으로 하고 실험을 했을 때 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰계수가 0.18에서 0.23정도의 진폭을 보이면서 실험이 진행되어졌고, ZrO_2 코팅시험편인 경우에도 0.18에서 0.21정도의 진폭을 보이면서 실험이 진행되어졌는데, 공기 중에서 실험을 했을 때와는 다르게 마찰계수가 낮게 나타나는데, 마찰력의 변화에서도 설명 했듯이 공기 중에서 실험보다 마찰계수가 낮게 나타나는 이유는 하중의 증가에도 불구하고 역시 마찰, 마모 실험을 할 때 Rotor와 Stator 사이에 그리스가 존재함으로 인해 두 금속이 직접적으로 접촉되는 것을 막아주는 원인이라고 생각할 수 있다. 조금 더 가혹한 실험 조건에서의 마찰, 마모 현상을 비교하기 위해 부하 하중을 500N으로 증가 시키고 실험한 그래프를 Fig. 14 (b)에 나타냈는데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우는 마찰계수가 0.1에서 0.15정도의 일정한 진폭으로 마찰계수의 변화를 보이고 있으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우에는 마찰계수의 변화가 0.15에서 0.2정도의 진폭으로 나타나는데, 하중을 500N으로 증가 하였을 때 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 ZrO_2 코팅시험편인 경우 보다 낮은 마찰계수의 변화를 보이는 것을 확인할 수 있다.

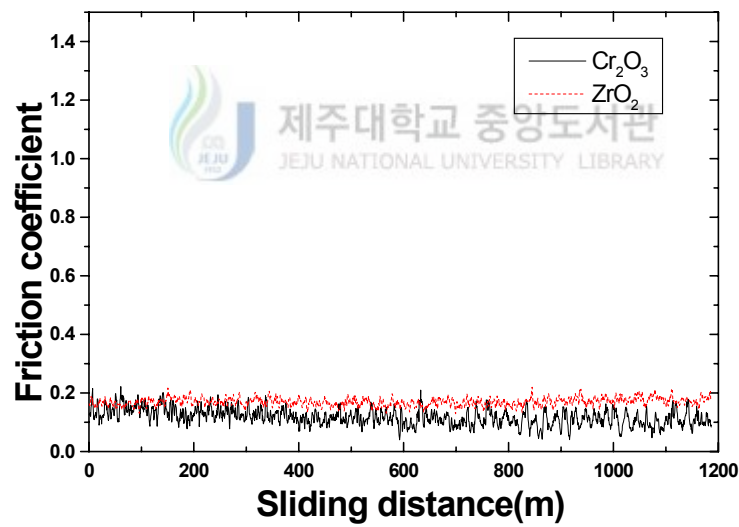
Fig. 15 (a)와 (b)는 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.2 m/s로 하여 실험을 했을 때의 그래프이다. Fig. 15 (a)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편을 하중을 300N으로 하고 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험을 하였을 때의 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우는 0.08에서 0.12정도의 값으로 마찰계수가 나타났으며, ZrO_2 코팅시험편을 경우는 0.18에서 0.22정도의 진폭으로 높은 마찰계수의 변화를 나타내고 있는데, 역시 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편 보다 낮은 마찰계수의 변화를 나타내고 있음을 확인할 수가 있다. 하중을 500N으로 실험을 했을 때의 그래프는 Fig. 15 (b)에 나타내고 있는데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우는 마찰계수가 0.05 정도로 나타나고 있으며, ZrO_2 코팅시험편의 경우는 0.15정도의 값으로 높게 나타

나는데, 부하 하중이 증가하고 미끄럼속도가 증가할수록 그리스 윤활환경에서도 역시 동일한 조건에서의 실험은 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편 보다 낮은 마찰계수의 변화를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 하중이 증가할수록 미끄럼속도가 증가할수록 작은 폭이지만 마찰계수가 낮게 나타나는 원인은 역시 윤활환경에서 발생하는 원인으로 빠른 미끄럼 속도와 높은 하중에 의해 심한 응착마멸에 의한 원인으로 마멸부가 응착이 되면서 마멸면이 매끈하게 되면서 마찰계수가 낮게 나타나는 원인으로 작용하고 있다고 사료된다.





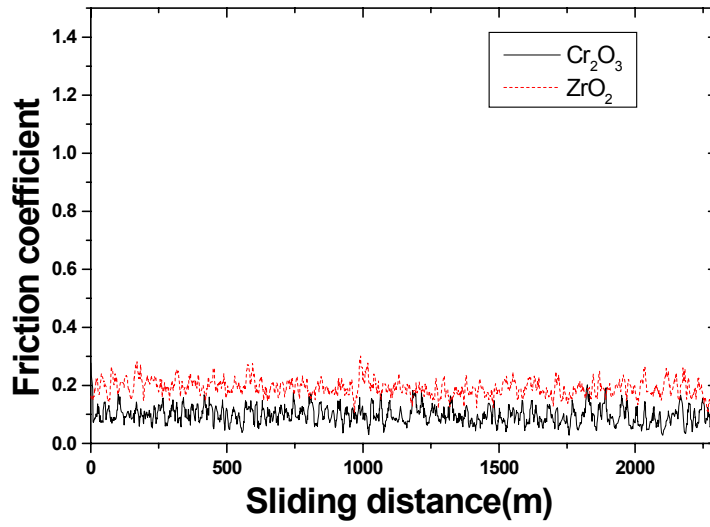
(a) load = 300N



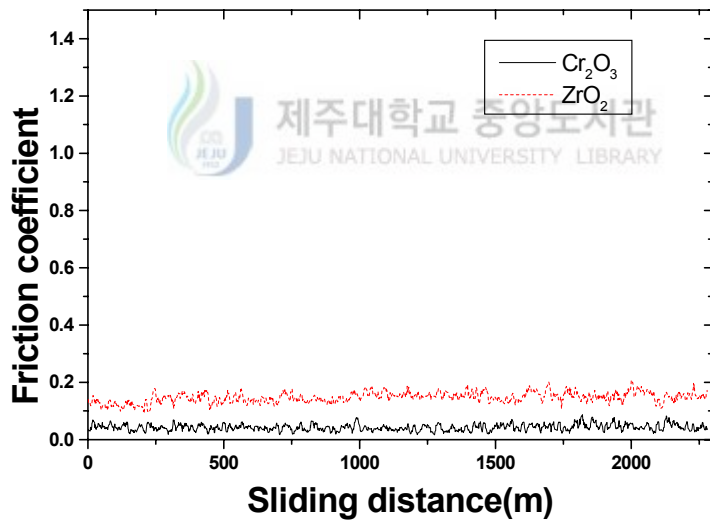
(b) load = 500N

Fig. 14 Friction coefficient of Cr₂O₃ and ZrO₂ coatings specimens.

(V=0.1 m/s, in grease)



(a) load = 300N



(b) load = 500N

Fig. 15 Friction coefficient of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens.

(V=0.2 m/s, in grease)

3) 베어링유 윤활환경에서의 마찰계수의 변화

Fig. 16 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 베어링유 윤활환경에서 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때 실험한 그래프이다. Fig. 16 (a)는 하중을 300N으로 실험을 했을 때 인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 마찰계수는 0.15에서 0.2정도로 불규칙하게 변하면서 실험이 진행되었으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 0.2에서 0.25정도로 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 보다 마찰계수가 높게 변화하고 있음을 알 수 있다.

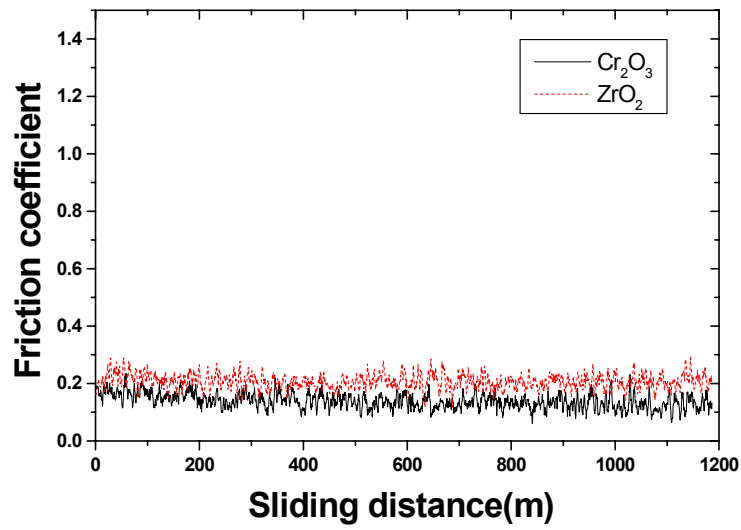
Fig. 16 (b)는 하중을 500N으로 했을 때 인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 시험초기 200m지점까지는 마찰계수가 0.14에서 0.16정도의 값을 나타내며 200m를 지난 지점부터는 0.12에서 0.14정도의 진폭으로 마찰계수의 값이 나타나고 있으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 0.14에서 0.17정도로 역시 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 아주 작은 차이지만 마찰계수가 높게 나타나고 있음을 알 수 있고, 하중이 증가할수록 역시 마찰계수가 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 17 (a)와 (b)는 부하 하중을 300N, 500N으로 하고 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험을 했을 때 그래프이다. Fig. 17 (a)는 하중을 300N, 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험을 했을 때인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우는 마찰계수의 값이 0.1에서 0.15정도로 나타나고 있으며, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 마찰계수가 0.17에서 0.22로, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우보다 마찰계수가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 하중을 500N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험을 했을 때의 그래프는 Fig. 17 (b)에 나타냈는데, Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편인 경우 0.08에서 0.11정도로 거의 비슷한 마찰계수의 변화 값을 보여주고 있는데, 이전 실험과는 조금 다른 결과를 얻을 수가 있었는데 두 시험편을 하중 500N에서 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때 마찰계수의 변화 차이를 비교하는데 어려움이 있어 실험 조건을 더욱 가혹한 조건인 하중을 700N으로 증가시키고 실험을 했는데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 실험이 가능했으나, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 2시간 동안 실험을 하는 중에 코팅된 부분이 전부 마모가 일어나는 관계로 실험을 할 수가 없었다. 이는 역

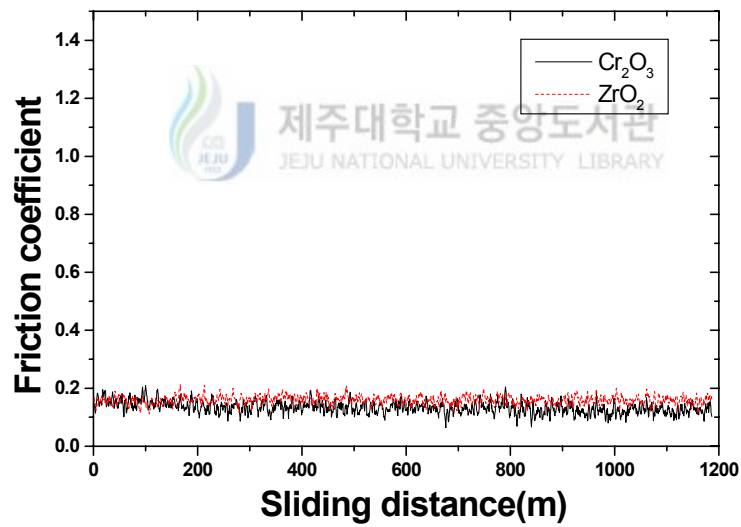
시 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편인 경우 보다 고 부하 하중에서 우수한 마찰, 마모 특성을 가진다고 볼 수 있다.

그리고 공기 중에서 실험과 그리스 윤활환경에서 또는 베어링유 윤활환경에서 실험을 할 때 확인 할 수 있었던 또 다른 사실은 부하 하중이 증가할수록 마찰계수의 변화 폭이 작아지는데 이는 높은 하중에서는 마찰, 마모 실험을 했을 때 높은 하중으로 인해 Rotor 와 Stator 사이에 가해지는 압력이 증가하므로 마찰계수의 변화 폭이 크게 나타나지 않은 반면에 낮은 하중에서는 마찰, 마모 실험을 했을 때 Rotor 와 Stator 사이에 가해지는 압력이 낮게 작용함으로 인해 마찰계수의 변화 폭이 크게 나타나는 현상이라 사료된다.



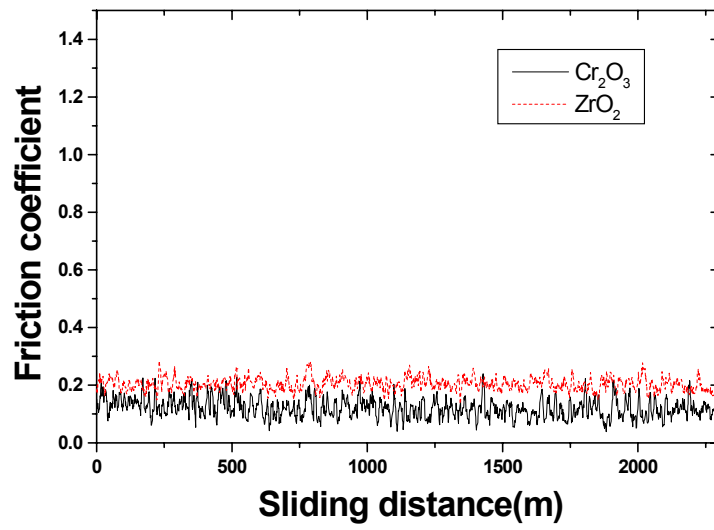


(a) load = 300N

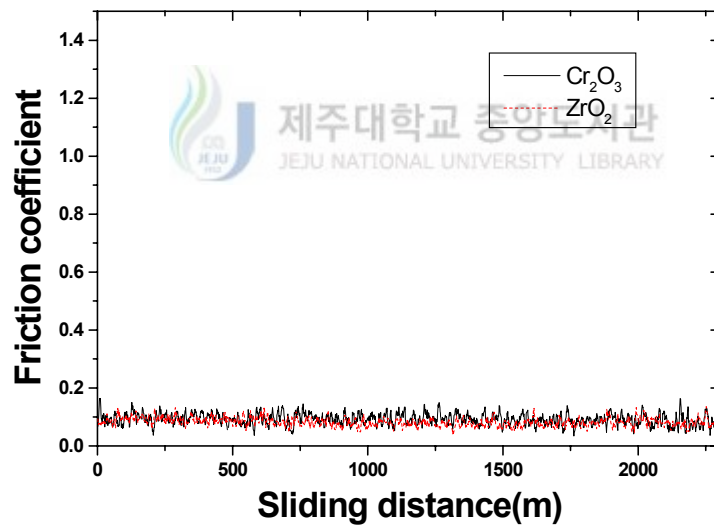


(b) load = 500N

Fig. 16 Friction coefficient of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens.
(V=0.1 m/s, in bearing fluid)



(a) load = 300N



(b) load = 500N

Fig. 17 Friction coefficient of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens.
(V=0.2 m/s, in bearing fluid)

4) 그리스 윤활환경에서와 베어링유 윤활환경에서의 마찰계수의 비교

Fig. 18 (a)와 (b)는 그리스 윤활환경에서와 베어링유 윤활환경에서 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편의 마찰, 마모 특성을 비교하기 위해 하중을 300N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때 마찰계수의 변화를 비교해 보기 위한 그래프이다. Fig. 18 (a)를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 실험을 했을 때의 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우는 그리스 윤활환경에서 마찰계수가 0.07에서 0.12정도의 진폭으로 실험이 진행되었으며, 베어링유 윤활환경에서는 0.1에서 0.17정도의 진폭으로 마찰계수가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과에 의해 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 베어링유 윤활환경에서 보다 그리스 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 보이고 있음을 예측할 수 있다.

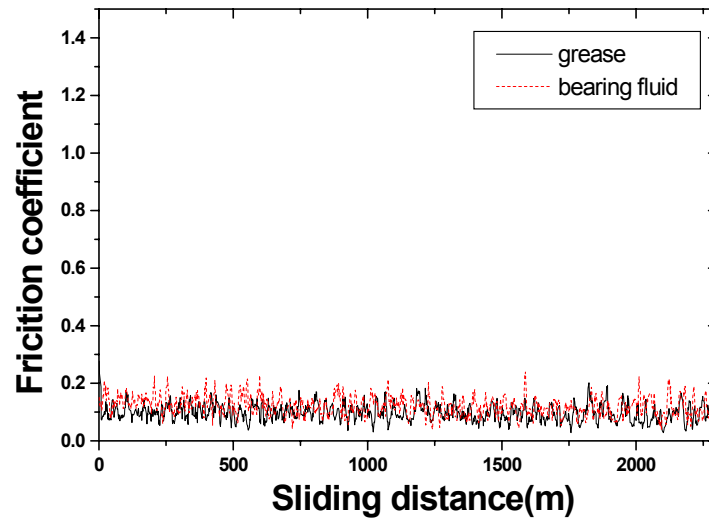
Fig. 18 (b)는 ZrO_2 코팅시험편의 경우 마찰계수의 변화를 비교하기 위해 실험을 했을 때의 그래프인데, 그리스 윤활환경에서는 0.18에서 0.23정도의 진폭으로 마찰계수가 나타났으며, 베어링유 윤활환경에서는 0.18에서 0.22정도로 비슷한 마찰계수의 변화를 보이고 있음을 알 수 있었다. ZrO_2 코팅시험편의 경우는 마찰계수의 변화 차이를 비교 하는데 어려움이 있어 실험 조건을 더욱 가혹한 조건으로 실험을 하여 서로 다른 환경에서의 마찰, 마모 특성을 비교하기 위해 부하 하중을 500N으로, 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때 실험한 결과를 Fig. 19 (a)와 (b)에 나타냈는데, Fig. 19 (a)는 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우인데, 그리스 윤활환경인 경우 마찰계수가 0.05정도로 나타나고 있으며, 베어링유 윤활환경에서는 0.1정도로, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 역시 베어링유 윤활환경에서 보다는 그리스 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 19 (b)는 ZrO_2 코팅시험편을 하중 500N에 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험했을 때 그리스 윤활환경에서와 베어링유 윤활환경에서의 마찰계수의 변화를 비교한 그래프인데, 그리스 윤활환경에서는 마찰계수가 0.12에서 0.15정도로 나타나고 있으며, 베어링유 윤활환경에서는 0.08에서 0.1정도의 값으로 실험이 진행되는 것을 보면, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우와 반대로 그리스 윤

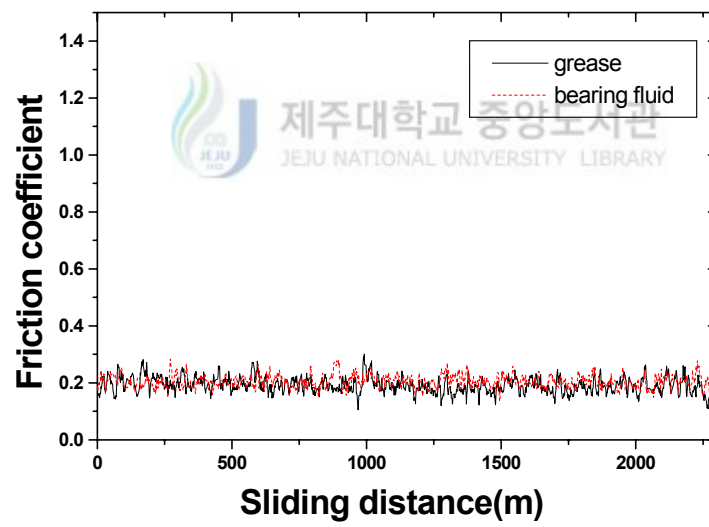
활환경에서 보다는 베어링유 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 가지고 있음을 예측할 수 있다.

이런 실험 결과를 보면, 두 세라믹 재료는 서로 다른 윤활유환경에서 다른 마찰, 마모 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.



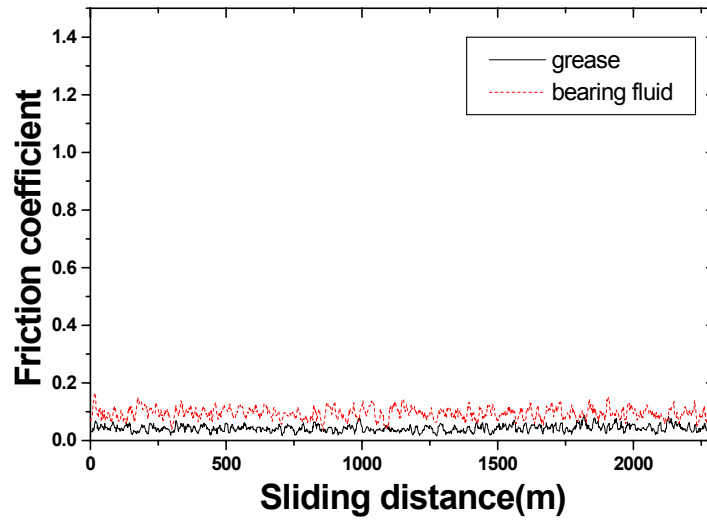


(a) Cr_2O_3

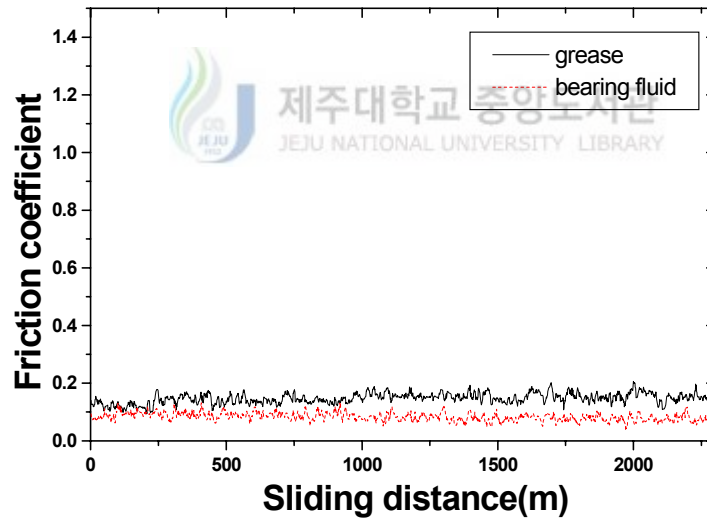


(b) ZrO_2

Fig. 18 Friction coefficient vs. sliding distance.
(load 300N , Velocity 0.2 m/s)



(a) Cr_2O_3



(b) ZrO_2

Fig. 19 Friction coefficient vs. sliding distance.
(load 500N, Velocity 0.2 m/s)

3. 3 마모량의 변화

Fig. 20 (a)와 (b)는 공기 중에서 실험한 것으로 하중과 미끄럼속도 변화에 따른 마모량의 변화를 나타낸 그래프이다. Cr_2O_3 와 ZrO_2 로 코팅된 하부 시험편 Rotor와 상부 시험편 Stator인 고 탄소 크롬강 SUJ II에 하중을 100N과 200N을 가했다. 그리고 미끄럼속도를 0.1 m/s와 0.2 m/s로 마찰을 시켜 마모량을 측정하여 비교 검토하였다. 실험 전에 시험편인 Rotor와 Stator를 아세톤 초음파 세척을 실시하고 세정, 탈지하여 완전히 건조시킨 후 $1 \times 10^{-5}\text{g}$ 까지 측정이 가능한 전자식 저시율로 5회 측정하고 그 평균값을 실험 전 중량으로 하였다. 실험 후에도 같은 방법으로 중량을 측정하여 그 차이를 마모량으로 하여 비교·검토하였다.

Fig. 20 (a)는 공기 중에서 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때 하중을 100N과 200N으로 했을 때 그래프인데, ZrO_2 코팅시험편은 하중 100N일 때 0.036g에서 하중이 200N으로 증가했을 때 마모량은 0.078g으로 마모량이 많이 증가하였다. 그러나 Cr_2O_3 코팅시험편은 하중이 100N일 때는 0.002g에서 하중이 200N으로 증가 했을 때 마모량은 0.005g으로 많은 마모량의 차이가 없었다. 이는 건조 마찰시 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편보다 우수한 내마모 특성을 가지고 있다고 예측이 가능하다. 고정 시험편인 Stator인 고 탄소 크롬강 SUJ II의 마모량 역시 상대재료가 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 부하 하중이 100N일 때는 0.037g에서 하중이 200N으로 증가했을 때 0.039g 정도로 많은 마모량의 증가를 확인 할 수 없었으나, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 부하 하중이 100N일 때는 0.055g에서 하중이 200N으로 증가했을 때 0.073g으로 마모량이 많이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 20 (b)는 미끄럼속도를 0.2 m/s로 증가시킨 후 실험 했을 때의 Rotor와 Stator의 마모량을 나타내는 그래프인데, Rotor인 경우 역시 많은 차이로 ZrO_2 코팅시험편이 Cr_2O_3 코팅시험편 보다 많은 마모량이 증가했음을 확인 할 수 있었고, Stator 역시 상대 재료가 ZrO_2 코팅시험편인 경우가 Cr_2O_3 코팅시험편일 때 보다 마모량이 많이 증가했음을 알 수 있다.

지금까지에 실험 결과를 분석하면, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 Rotor와 상대재료

인 Stator의 마모량의 차이를 비교 분석한 결과 Rotor의 마모량 보다 Stator의 마모량이 많이 증가하는 이유는 고탄소 크롬강인 Stator 보다 상대 재료인 세라믹 재료가 내마모성이 뛰어나므로 인해 발생하는 원인이라 사료된다. 그리고 ZrO_2 코팅시험편인 경우 실험에서는 SEM을 통한 마찰면의 관찰에서도 알 수 있지만 마찰, 마모 실험을 할 때 심한 마찰열의 발생과 응착 및 연삭 마모에 의해 세라믹 코팅 층이 벗겨지면서 상대 재료인 고탄소 크롬강인 Stator 역시 연삭이 되면서 마모량이 많이 증가하는 원인이라 사료된다.

그리스 윤활환경에서 실험한 결과 마모량의 증가를 비교하기 위해 Fig. 21에 나타내었는데 Fig. 21 (a)는 미끄럼속도를 0.1 m/s로 하고 하중을 300N, 500N, 700N으로 했을 때 Rotor와 Stator의 마모량을 비교한 그래프이다. 마모량 측정 요령은 공기 중에서도 동일하게 실시하였다.

Fig. 21 (a)를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편은 300N일 때는 0.0033g, 500N일 때는 0.0035g, 700N일 때는 0.0039g으로 많은 마모량의 증가를 보이지 않는 반면에, ZrO_2 코팅시험편인 경우는 300N일 때는 0.007g, 500N일 때는 0.020g, 700N일 때는 0.103g으로 부하 하중이 증가할수록 마모량이 많이 증가한다는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 역시 그리스 윤활환경에서도 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 ZrO_2 코팅시험편일 때 보다 우수한 내마모 특성을 가지고 있음을 예측할 수 있다.

고정 시험편인 Stator의 마모량 역시 상대재료가 Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 많은 마모량의 증가를 보이지 않는 반면에, ZrO_2 코팅시험편인 경우에는 하중 증가에 따라 마모량이 많이 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 21 (b)는 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때 하중을 300N과 500N으로 했을 때의 마모량을 비교한 그래프이다. Fig. 21 (b)의 그래프에서 부하 하중을 700N까지 증가 시키고 실험을 하지 못한 이유는 ZrO_2 코팅시험편을 가지고 700N의 하중에서 실험을 할 때 Rotor에서 너무 심한 마모가 발생하여 2시간 동안 실험을 완료 할 수 없는 이유로 인해 수직하중을 500N 까지만 증가시키고 실험하였다.

Cr_2O_3 코팅시험편인 Rotor의 경우에는 하중이 300N일 때 0.0063g, 하중이 500N

일 때는 0.0065g로 아주 작은 마모량의 증가를 보이고 있다. 반면에 ZrO_2 코팅시
험편인 경우에는 하중이 300N일 때는 0.0056g에서 하중이 500N일 때는 0.0738g
으로 많은 마모량 증가를 보여, 역시 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편보다
우수한 내마모 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

그리고 고정시험편인 고탄소 크롬강인 Stator의 마모량 역시 상대재료가 Cr_2O_3
코팅시험편인 경우에는 많은 마모량의 증가가 없는데 반해 ZrO_2 코팅시험편인 경
우에는 하중 증가에 따라 많은 차이로 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 22는 베어링유 윤활환경에서 실험한 결과 마모량을 비교하기 위해 나타낸
그래프인데, Fig. 22 (a)는 미끄럼속도를 0.1 m/s로 하고 하중을 300N, 500N,
700N으로 했을 때 Rotor와 Stator의 마모량을 비교한 그래프이다. 마모량 측정
요령은 공기 중에서도 동일하게 실시하였다.

Fig. 22 (a)를 보면 Cr_2O_3 코팅시험편인 Rotor의 경우에는 마모량이 300N일 때
는 0.001g이고, 500N일 때는 0.005g이고, 700N일 때는 0.007g으로 높은 하중으로
실험을 하더라도 많은 마모량의 증가가 나타나지 않았다. 하지만 ZrO_2 코팅시험
편인 경우는 300N일 때는 0.0003g이고, 500N일 때는 0.005g, 700N일 때는 0.012g
으로 하중이 증가할수록 많은 마모량의 증가를 확인할 수 있었다. 이는 역시 베
어링 윤활환경에서도 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편보다 뛰어난 내마모 특
성을 가지고 있다고 사료된다.

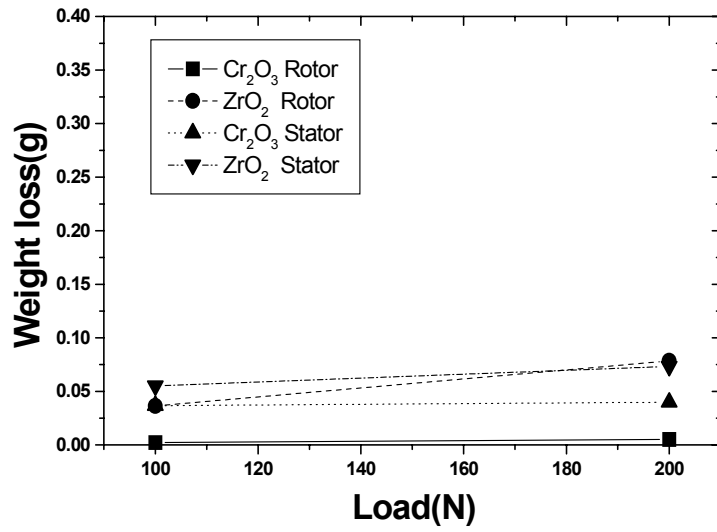
그리고 고정시험편인 고탄소 크롬강인 Stator의 마모량 역시 상대재료가 Cr_2O_3
코팅시험편인 경우에는 많은 마모량의 증가가 없는데, 반해 ZrO_2 코팅시험편인
경우에는 하중 증가에 따라 마모량이 많이 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 22 (b)는 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때 하중을 300N과 500N으로 했을
때의 마모량을 비교한 그래프인데, Cr_2O_3 코팅시험편인 Rotor의 경우는 300N일
때는 0.0012g이고, 500N일 때는 0.0015g으로 많은 마모량의 증가가 없는 반면에,
 ZrO_2 코팅시험편인 경우는 300N일 때는 0.003g이고, 500N일 때는 0.006g으로 하
중이 증가하고 미끄럼속도가 증가할수록 많은 마모량의 증가를 확인할 수 있었

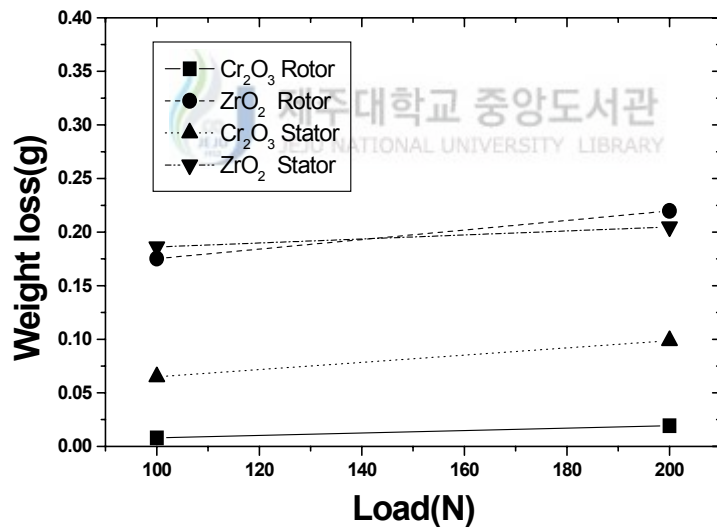
다. 그리고 고정시험편인 고탄소 크롬강인 Stator의 마모량을 역시 상대재료가 Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우에는 많은 증가가 없는데 반해 ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 부하 하중 증가 및 미끄럼속도 증가에 따라 많은 차이로 증가했음을 알 수 있다.

지금까지의 실험 결과에 의하면 Rotor 및 Stator의 마모량은 Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우에는 많은 마모량의 증가가 없는 반면에 ZrO₂ 코팅시험편인 경우에는 하중 증가 및 미끄럼속도의 증가에 따라 마모량이 많이 증가하는 것으로 보아 Cr₂O₃ 코팅시험편이 ZrO₂ 코팅시험편보다 우수한 내마멸, 마모 특성을 가지고 있다고 사료된다.



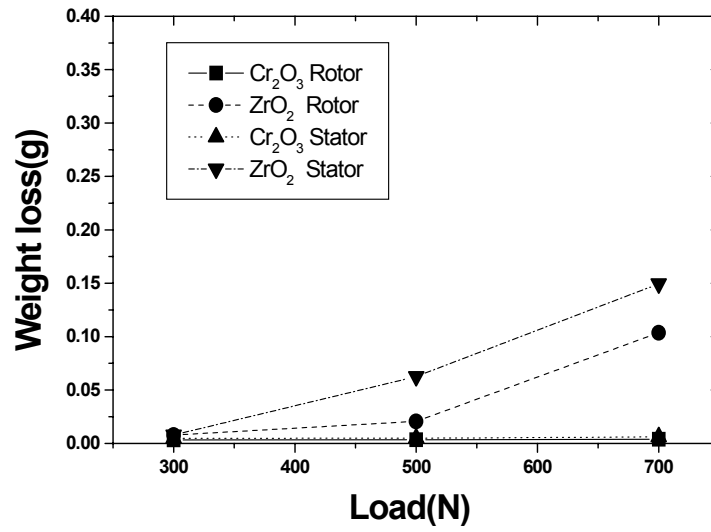


(a) friction velocity 0.1 m/s

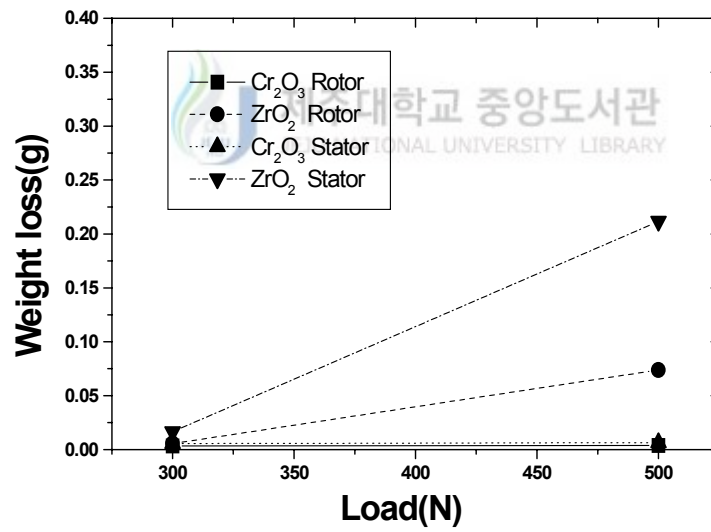


(b) friction velocity 0.2 m/s

Fig. 20 Relation of weight loss and load (in air)

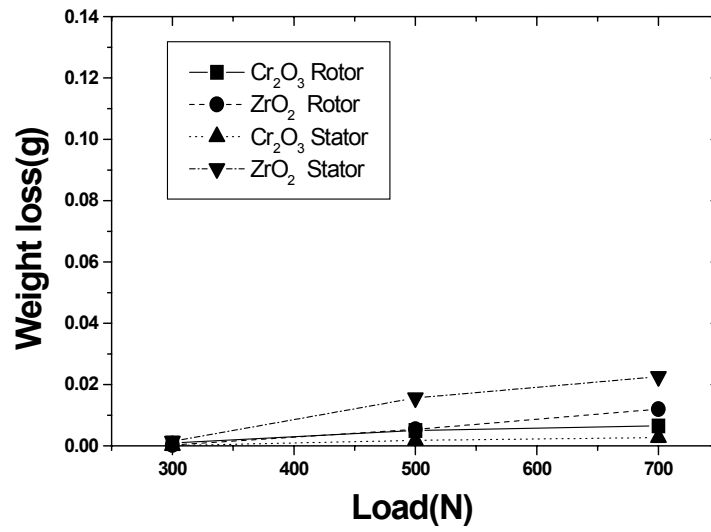


(a) friction velocity 0.1 m/s

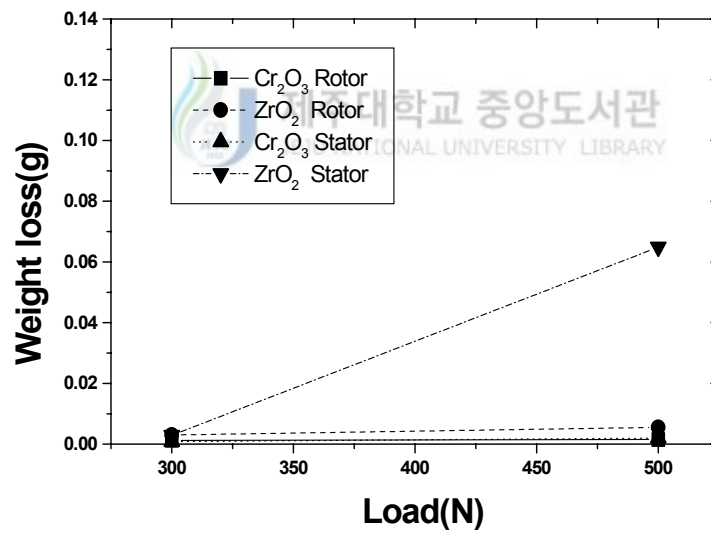


(b) friction velocity 0.2 m/s

Fig. 21 Relation of weight loss and load (in grease)



(a) friction velocity 0.1 m/s



(b) friction velocity 0.2 m/s

Fig. 22 Relation of weight loss and load (in bearing fluid)

3. 4 마멸면의 미시적 관찰

마모과정은 상호 접촉하는 두 고체의 접촉부에서 변형과 파괴로 인해서 재료가 제거되는 과정이다. 이러한 마모과정을 미시적으로 관찰하여 그 기구를 규명하기 위하여 SEM을 사용하였다.

Fig. 23 (a)와 (b)는 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅시험편에 대하여 공기 중에서 하중을 100N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s로 실험을 하였을 때 마멸면의 SEM 사진이다.

Fig. 23 (a)를 보면 공기 중에서 하중을 100N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때, Cr_2O_3 코팅시험편 마멸면의 사진이다. 마멸면을 보면 공기 중에서 Rotor 와 Stator가 서로 밀착되어 마모가 되면서 마찰열에 의해 마멸면이 응착(adhesive)이 되면서 마모가 되었음을 확인할 수 있다. 또한 마멸면의 중앙 부분에서 마모입자들이 부분적으로 탈락되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 23 (b)는 ZrO_2 코팅시험편을 하중 100N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때 사진인데, Cr_2O_3 코팅시험편의 사진과 비교했을 때 스플레이트가 더 많은 넓이로 탈락된 것을 확인할 수 있다. 또한 코팅 층이 심하게 패이면서 마모가 일어남을 알 수 있다. 이는 ZrO_2 코팅의 마멸 특성인 취성파괴를 잘 나타내는 것으로 볼 수 있다 [13].

Fig. 24 (a)는 Cr_2O_3 코팅시험편을 하중을 100N으로 공기 중에서 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을 때 SEM 사진인데, 마멸면을 살펴보면 빠른 미끄럼 속도에 의해 발생하는 마찰열로 인해 심하게 응착되면서 마멸되었음을 알 수 있다. 이는 모재에 탄성 및 소성변형이 발생하면서 소성변형에 의해 매끈한 면이 형성된 모습을 보여주고 있다 [14]. 이러한 면이 형성되면 마찰계수의 비교에서 알 수 있듯이 마찰계수를 떨어뜨리는 요인으로 작용하며, 또한 이런 층은 소성변형과 마멸입자에 의해 압착 층으로 생성되어 마멸을 줄여 주는 원인으로 작용할 것이라고 사료된다. 그리고 미끄럼 속도가 빨라질수록 응착되는 부분이 더욱 넓어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 24 (b)는 ZrO_2 코팅시험편을 하중 100N으로 미끄럼속도를 0.2 m/s로 했을

때 사진인데, 사진을 보면 마멸면의 중심부에 심한 연삭(abrasive) 마멸이 진행되었음을 알 수가 있는데 그 이유는 사진에서 마멸면의 중앙에 스크래치 흔적이 있는 것을 보면 알 수 있는데 코팅 층이 마멸로 스플레이트가 벗겨지고 새로운 스플레이트 면이 나타나는 것을 사진으로 확인 할 수 있다.

위 사진들을 비교해 보면 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편 보다 우수한 내마멸 특성을 지니고 있음을 예측할 수 있으며 이는 지금까지 마찰계수의 비교 및 마모량의 변화 비교에서도 확인할 수 있었던 사실이다.

그리고, 부하 하중을 일정하게 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s에서 0.2 m/s로 변화를 주어 실험을 더욱 가혹한 실험 조건에서 실험을 했을 때에는 심한 응착 및 마모 현상이 발생함을 알 수가 있었다.

Fig. 25 (a)와 (b)의 SEM 사진은 Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편을 하중을 300N으로 하고 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때 그리스 윤활환경에서 실험한 마멸면의 사진인데, 전체적으로 마일드(mild)한 응착마멸을 확인 할 수 있었다,

이는 서로 상대하는 Rotor와 Stator 사이에 그리스 윤활유가 존재함으로 인해 두 마찰면 사이에서 직접 접촉하여 마모가 일어남을 막고 마찰면 사이에 발생하는 열을 흡수함으로 인해 심한 연삭 마모현상은 발생하지 않았음을 알 수 있다.

이러한 현상은 마모량 변화를 비교했을 때에도 확인할 수 있는데 공기 중에서 실험보다 그리스 윤활환경에서 Rotor 와 Stator의 마모량이 적게 발생함을 보고 알 수 있었다.

Fig. 25 (a)는 그리스 윤활환경에서 하중을 300N으로 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때 Cr_2O_3 코팅시험편의 마멸면 사진인데, 전체적으로 마일드한 응착마멸이 발생함을 알 수 있으며, 일부분에서는 스플레이트들이 미소한 범위이지만 탈락된 것을 확인할 수 있다.

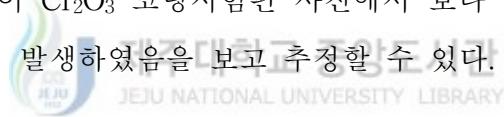
Fig. 25 (b)는 동일한 조건에서 ZrO_2 코팅시험편을 가지고 실험한 사진인데 스플레이트 사이사이에 기공이 산재해 있음을 알 수 있고, 스플레이트들이 하중에 의해 눌러져 응착되면서 마멸됨을 알 수 있다.

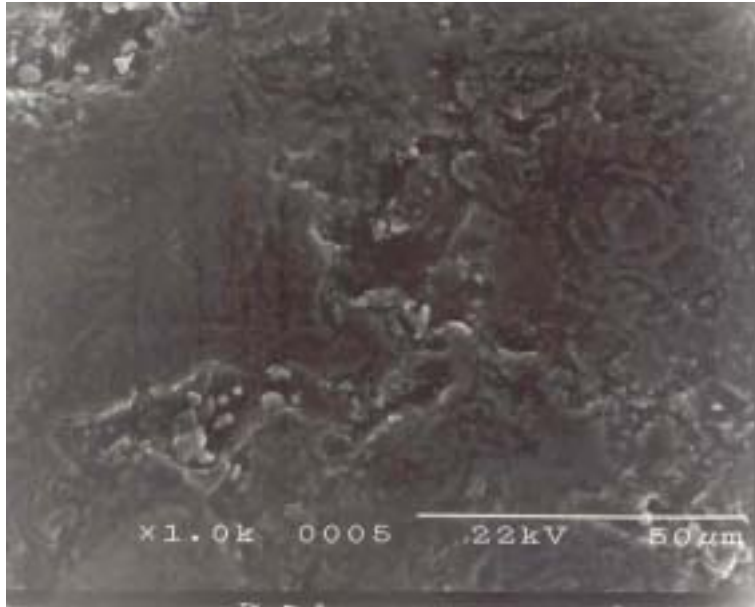
Fig. 26 (a)와 (b) 그리고 Fig. 27(a)와 (b)는 Cr_2O_3 코팅시험편과 ZrO_2 코팅시험편을 베어링유 윤활환경에서 하중을 300N으로 미끄럼 속도를 0.1 m/s와 0.2 m/s로 했을 때 실험한 마멸면의 사진이다.

두 시험편 모두 미끄럼속도가 증가 할수록 응착 마멸 면이 넓게 분포되어지고 있음을 알 수 있다. 그리고 또한 스플레이트들이 탈락되는 부분이 넓게 분포됨을 알 수 가 있다. 이는 미끄럼속도의 증가로 인해 스플레이트들이 밀리다가 결국 탈락되는 소성변형에 의한 것이라고 사료된다.

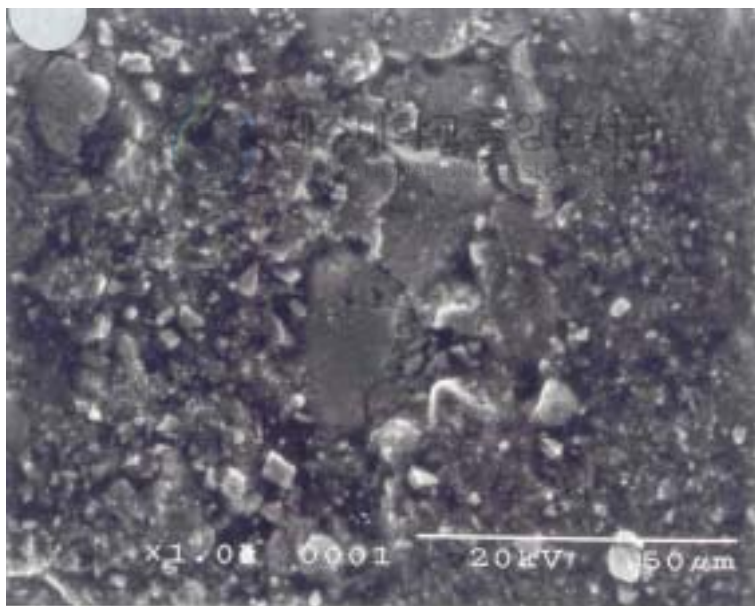
그리고 그리스 윤활환경에서와 베어링유 윤활환경에서의 사진을 비교해 보면, 동일한 하중과 미끄럼속도 조건 하에서는 베어링유 윤활 환경에서보다 그리스 윤활환경에서 조금 더 스플레이트들이 탈락이 심하게 발생하였음을 알 수 가 있다. 이는 마모량의 비교에서도 알 수 있는데 베어링유 윤활 환경에서 보다 그리스 윤활환경에서 실험편의 마모량이 많은 것을 보면 예측할 수 있다. 그리고 윤활환경에서의 마멸면의 사진들을 전체적으로 비교해 보면 역시 Cr_2O_3 코팅시험편이 ZrO_2 코팅시험편 보다 우수한 내마멸, 마모 특성을 지니고 있다고 사료된다.

이는 ZrO_2 코팅시험편이 Cr_2O_3 코팅시험편 사진에서 보다 넓고, 많은 부분에서 스플레이트들의 탈락면이 발생하였음을 보고 추정할 수 있다.



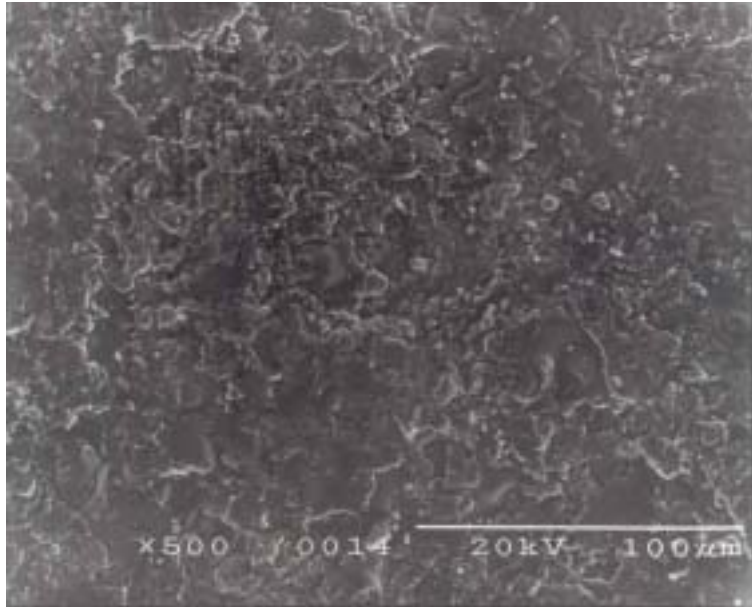


(a) Cr₂O₃

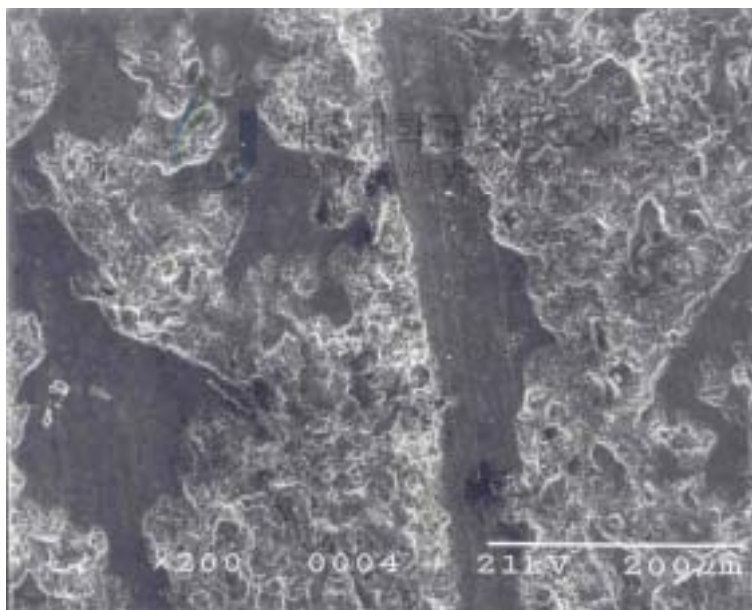


(b) ZrO₂

Fig. 23 Wear surfaces (load=100N, V=0.1 m/s, in air)

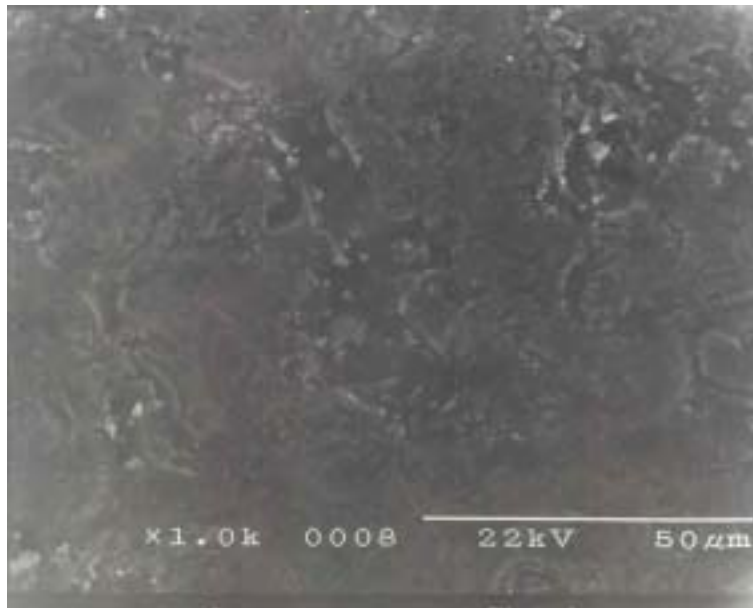


(a) Cr₂O₃

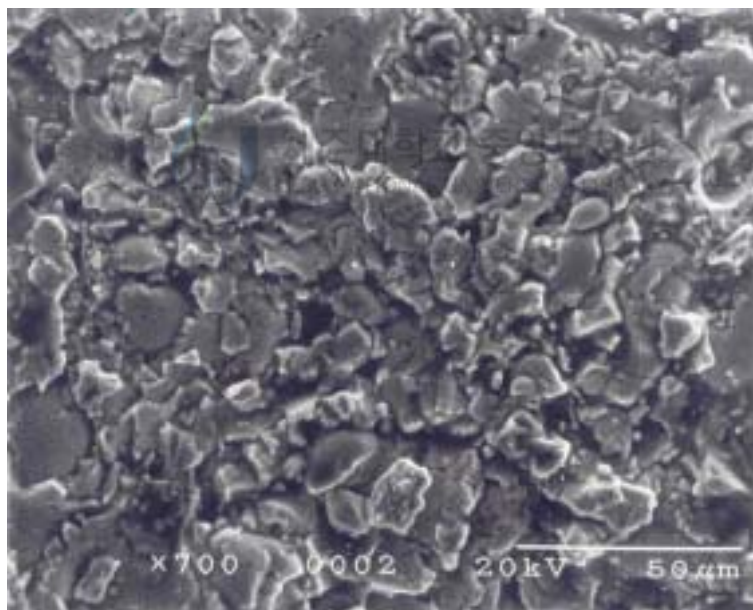


(b) ZrO₂

Fig. 24 Wear surfaces (load=100N, V= 0.2 m/s, in air)

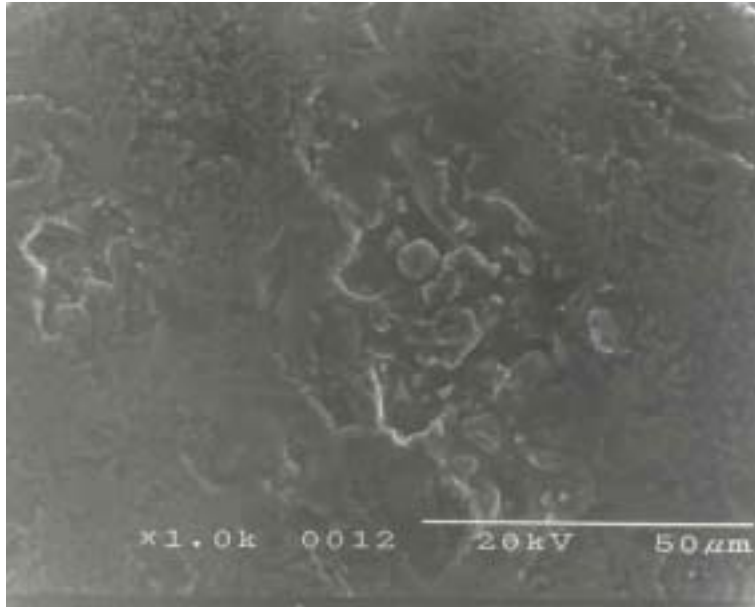


(a) Cr₂O₃

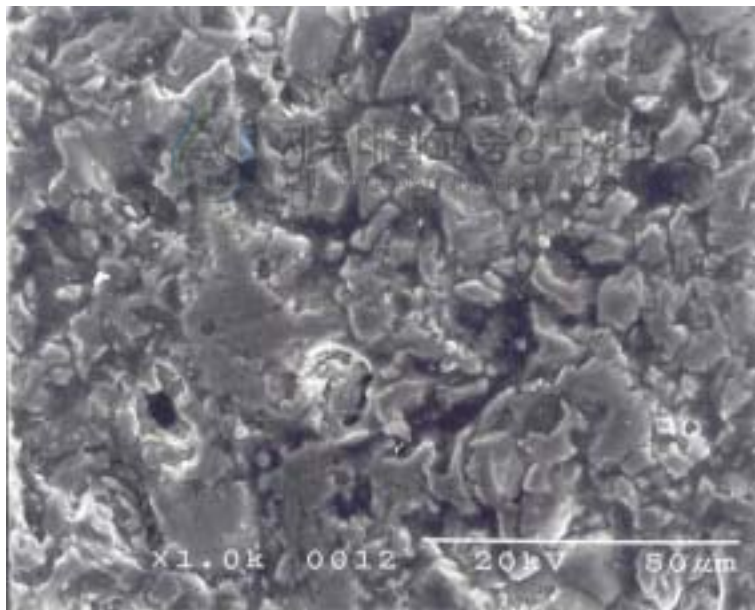


(b) ZrO₂

Fig. 25 Wear surfaces (load=300N, V=0.1 m/s, in grease)

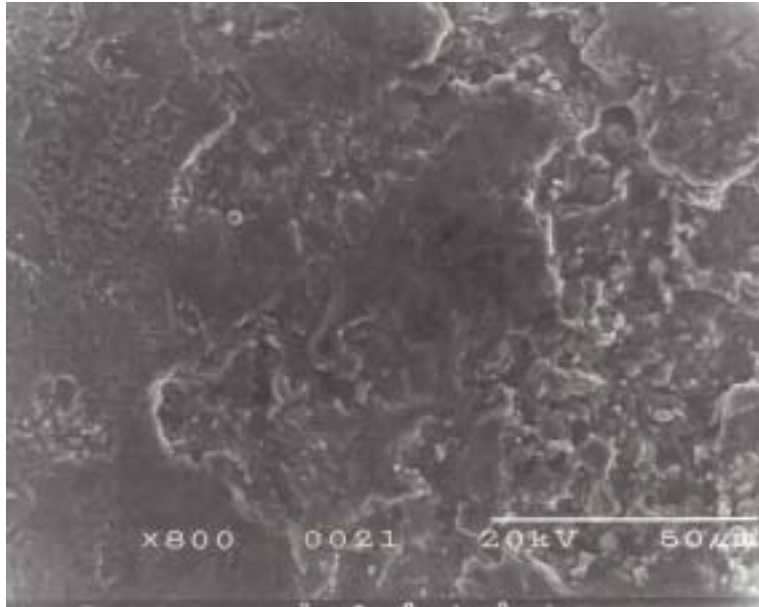


(a) Cr₂O₃

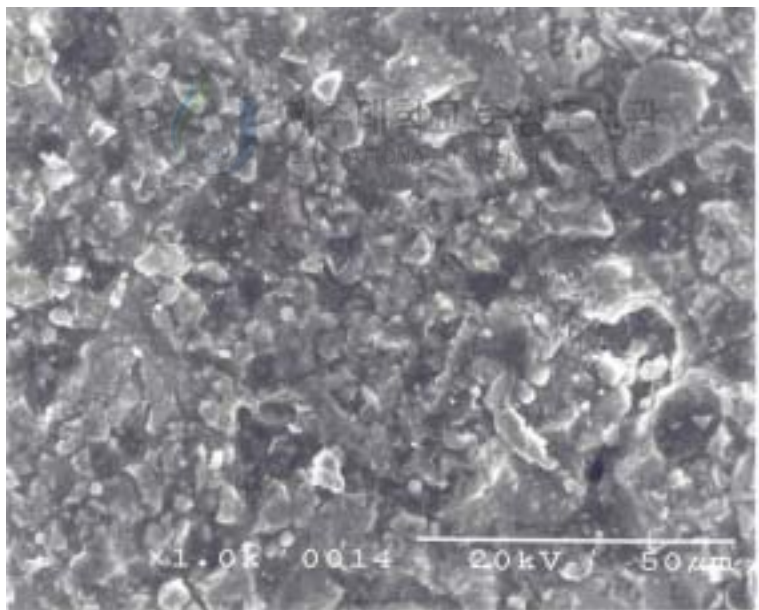


(b) ZrO₂

Fig. 26 Wear surfaces (load=300N, V=0.1 m/s, in bearing fluid)



(a) Cr₂O₃



(b) ZrO₂

Fig. 27 Wear surfaces (load=300N, V=0.2 m/s, in bearing fluid)

VI. 결 론

본 연구는 플라즈마 용사에 의한 내마모성 세라믹 Cr_2O_3 와 ZrO_2 코팅재의 마모 특성을 조사하기 위하여, 일반 대기 중에서도 그리스 윤활환경 및 베어링유 윤활 환경에서 마모실험을 하였다. 마모시험기는 Pin on disk형 마모 시험기를 이용하여, 미끄럼속도 및 부하 하중의 변화에 따른 마찰력, 마찰계수, Stator 및 Rotor의 마모량을 조사하였다. 그리고 SEM 사진에 의한 마멸면을 정밀 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. 건조 마찰시 하중 및 속도 증가에 따른 마찰력 및 마찰계수의 변화를 살펴 본 결과, 동일한 실험조건에서는 Cr_2O_3 코팅시험편의 마모 특성이 ZrO_2 코팅시험편 보다 우수하다.
2. Cr_2O_3 코팅시험편인 경우에는 그리스 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 보이고 있으며, 반면에 ZrO_2 코팅시험편인 경우는 베어링유 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 가진다.
3. 마찰계수는 저 하중과 저 미끄럼속도에서는 마찰계수가 크고, 고 하중과 고 미끄럼속도에서는 마찰계수가 작다.
4. 부하 하중과 미끄럼속도 변화에 따른 회전시험편과 고정시험편의 마모량은 Cr_2O_3 코팅재가 ZrO_2 코팅재 보다 작다.
5. 마모면 관찰결과 건조 마찰의 경우, Cr_2O_3 코팅시험편인 경우 미끄럼속도에 관계없이 응착마모를 나타내며, ZrO_2 코팅시험편은 미끄럼속도가 0.1m/s 에서는 응착마모를 나타내며, 미끄럼속도가 0.2 m/s에서는 연삭마모로 나타난다. 윤활 환경에서는 두 종류의 코팅재 모두 응착마모로 나타나며, 마모입자들은 소성변형에 의해 탈락된다.

V. 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] Brizik W. and Kamo R., 1983. “TACOM/Cummins Adiabatic Engine Program”, SAE Paper 830314
- [3] 채영훈, 박영희. 1999. Al₂O₃/NiCr 코팅의 미끄럼 마멸 특성. 大韓機械學會論文集 A권 제23호 제7호
- [4] V. Aronov. 1987. “Friction induced strengthening mechanisms of magnesia partially stabilized zirconia”. Journal of Tribology.109. pp.531-536
- [5] R. H. Hannink, M. J. Murray, H.G. Scott. 1993. “friction and wear of partially stabilized zirconia”, wear,100. pp. 355-366
- [6] 여인웅, 안효석, 김충현. 1999. 플라즈마 용사용 산화크롬/몰리브덴 복합분말 제조와 용사 코팅의 마찰, 마멸 특성. Journal of KSTLE Vol.15, No 2, pp. 184-192
- [7] 채영동. 2000. 플라즈마 세라믹 코팅의 미끄럼 마멸 기구 . pp.22-74
- [8] 이순기, 안효석, 한석영. 1999. 건조마찰 하에서의 플라즈마 용사 산화크롬 코팅의 마찰 마멸. 大韓機械學會 論文集 A권, 제23권 제4호, pp.535-544.
- [9] Pawlowski L. 1995. The science and engineering of thermal spray coatings, JOHN WILEY & SONS
- [10] 김희곤. 1999. 플라즈마용사 세라믹코팅 강재의 마찰속도와 하중의 변화에 의한 마모 특성. pp.11-42
- [11] 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の摩擦摩耗特性評価. [材料] Vol. 42.

No. 473, pp. 202-208.

- [12] 김석삼, 김상우, S.M. Hsu. 세라믹 마멸에 있어서의 새로운 파라미터 제안(1).
大韓機械學會 論文集 제17권,6호. pp-1441-1455
- [13] 박찬, 채영훈, 김석삼. 지르코니아 용사코팅의 상변화에 따른 마멸특성. 한국
윤활학회 추계학술대회. pp.322-330.
- [14] 서보현, 김태형, 김석삼. 2001. SiO₂와 TiO₂가 첨가된 Cr₂O₃ 용사 코팅의 마
찰 · 마멸 특성. 한국 윤활학회 추계학술대회. pp.69-77

