



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

플라즈마 용사로 제작한
세라믹 코팅 층의 마모 특성



濟州大學校 大學院

機械工學科

金 成 益

2006年 12月

플라즈마 용사로 제작한 세라믹 코팅 층의 마모 특성

指導教授 金 貴 植

金 成 益

이 論文을 工學 博士學位 請求論文으로 提出함

2006年 12月

金成益의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印

濟州大學校 大學院


2006年 12月

Wear Characteristics of Ceramics Coated by Plasma Thermal Spray

Sung-Ik Kim

(Supervised by Professor Gui-Shik Kim)

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

A large, faint watermark of the Cheju National University seal is centered on the page. The seal is circular and contains the text 'CHEJU NATIONAL UNIVERSITY' around the top and 'SINCE 1952' around the bottom. In the center of the seal is a shield with a book and a torch, flanked by laurel branches.

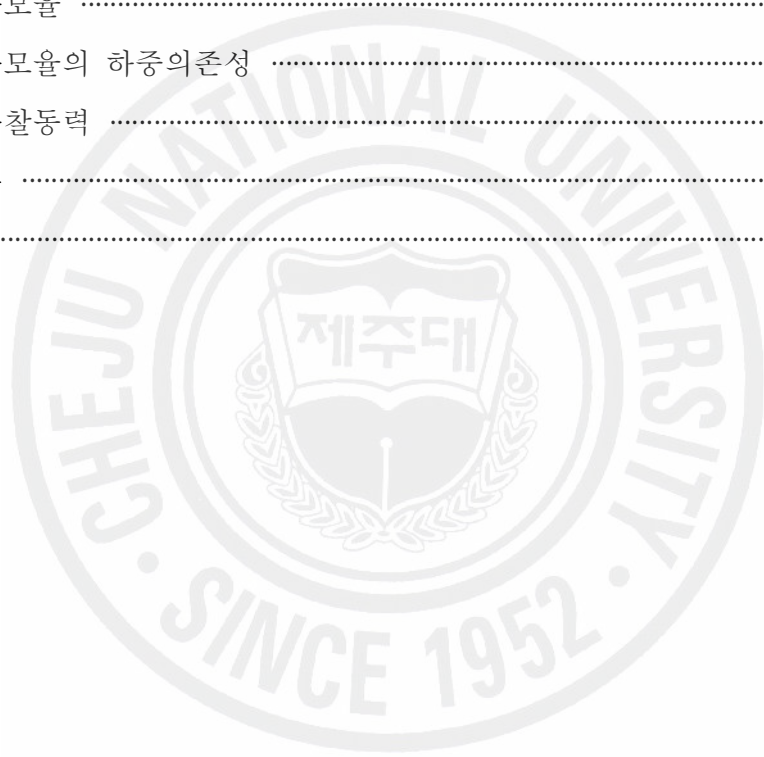
Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

DECEMBER 2006

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구목적	3
II. 실험재료 및 방법	4
1. 시험편	4
1.1 기재	4
1.2 플라즈마 용사 코팅	7
2. 시험기	13
3. 실험 방법	16
III. 실험결과 및 고찰	19
1. Al ₂ O ₃ 코팅층의 마모 특성	19
1.1 공기 중에서의 하중과 속도에 따른 마모거동	19
1.2 그리이스 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	22
1.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	25
1.4 마모면의 SEM 관찰	28
2. TiO ₂ 코팅층의 마모특성	33
2.1 공기 중에서 하중과 속도에 따른 마모거동	33
2.2 그리이스 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	36
2.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	39
2.4 마모면의 SEM 관찰	42
3. Cr ₂ O ₃ 코팅층의 마모 특성	46
3.1 공기 중에서 하중과 속도에 따른 마모거동	46
3.2 그리이스 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	49

3.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	52
3.4 마모면의 SEM 관찰	55
4. ZrO ₂ 코팅층의 마모 특성	59
4.1 공기 중에서 하중과 속도에 따른 마모거동	59
4.2 그리이스 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	62
4.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동	65
4.4 마모면의 SEM 관찰	68
5. 세라믹 코팅 층의 마모율과 마찰동력	73
5.1 마모율	73
5.2 마모율의 하중의존성	86
5.3 마찰동력	89
IV. 결 론	95
참고문헌	98



List of Tables

Table 1 The chemical composition of substrates(w.t %)	6
Table 2 The mechanical properties of substrates	7
Table 3 Blasting conditions	7
Table 4 Mechanical properties of specimens	10
Table 5 Chemical composition and production of coating powder	10
Table 6 Grain size of coating powder	10
Table 7 Test condition	17
Table 8 Physical qualities of lubrication	18
Table 9 Wear rate of ceramics(unit : $g^3/N\cdot m$, $V=0.1m/s$)	75
Table 10 Wear rate of ceramics(unit : $g^3/N\cdot m$, $V=0.2m/s$)	81
Table 11 The friction coefficient of coating specimen	89

List of Figures

Fig. 1 Shapes and dimension of specimens(unit : mm)	6
Fig. 2 Plasma thermal spray system	9
Fig. 3 SEM photograph of Al ₂ O ₃ -40%TiO ₂ coating powder	11
Fig. 4 SEM photograph of TiO ₂ coating powder	11
Fig. 5 SEM photograph of Cr ₂ O ₃ coating powder	12
Fig. 6 SEM photograph of ZrO ₂ -24%MgO coating powder	12
Fig. 7 Sectional shape of Al ₂ O ₃ -40%TiO ₂ coating specimen	13
Fig. 8 Block diagram of wear testing machine	15
Fig. 9 Schematic diagram for calibration of friction coefficient	18
Fig. 10 Al ₂ O ₃ specimen(Air, V=0.1m/s)	20
Fig. 11 Al ₂ O ₃ specimen(Air, V=0.2m/s)	21
Fig. 12 Al ₂ O ₃ specimen(Grease, V=0.1m/s)	23
Fig. 13 Al ₂ O ₃ specimen(Grease, V=0.2m/s)	24
Fig. 14 Al ₂ O ₃ specimen(Bearing oil, V=0.1m/s)	26
Fig. 15 Al ₂ O ₃ specimen(Bearing oil, V=0.2m/s)	27
Fig. 16 SEM micrograph of the worn Al ₂ O ₃ surface	32
Fig. 17 TiO ₂ specimen(Air, V=0.1m/s)	34
Fig. 18 TiO ₂ specimen(Air, V=0.2m/s)	35
Fig. 19 TiO ₂ specimen(Grease, V=0.1m/s)	37
Fig. 20 TiO ₂ specimen(Grease, V=0.2m/s)	38
Fig. 21 TiO ₂ specimen(Bearing oil, V=0.1m/s)	40
Fig. 22 TiO ₂ specimen(Bearing oil, V=0.2m/s)	41
Fig. 23 SEM micrograph of the worn TiO ₂ surface	45
Fig. 24 Cr ₂ O ₃ specimen(Air, V=0.1m/s)	47
Fig. 25 Cr ₂ O ₃ specimen(Air, V=0.2m/s)	48
Fig. 26 Cr ₂ O ₃ specimen(Grease, V=0.1m/s)	50
Fig. 27 Cr ₂ O ₃ specimen(Grease, V=0.2m/s)	51

Fig. 28 Cr ₂ O ₃ specimen(Bearing oil, V=0.1m/s)	53
Fig. 29 Cr ₂ O ₃ specimen(Bearing oil, V=0.2m/s)	54
Fig. 30 SEM micrograph of the worn Cr ₂ O ₃ surface	58
Fig. 31 ZrO ₂ specimen(Air, V=0.1m/s)	60
Fig. 32 ZrO ₂ specimen(Air, V=0.2m/s)	61
Fig. 33 ZrO ₂ specimen(Grease, V=0.1m/s)	63
Fig. 34 ZrO ₂ specimen(Grease, V=0.2m/s)	64
Fig. 35 ZrO ₂ specimen(Bearing oil, V=0.1m/s)	66
Fig. 36 ZrO ₂ specimen(Bearing oil, V=0.2m/s)	67
Fig. 37 SEM micrograph of the worn ZrO ₂ surface	72
Fig. 38 Wear rate(Air, V=0.1m/s)	76
Fig. 39 Wear rate(Grease, V=0.1m/s)	77
Fig. 40 Wear rate(Bearing oil, V=0.1m/s)	78
Fig. 41 Wear rate(Air, V=0.2m/s)	82
Fig. 42 Wear rate(Grease, V=0.2m/s)	83
Fig. 43 Wear rate(Bearing oil, V=0.2m/s)	84
Fig. 44 Wear rate(V=0.2m/s)	87
Fig. 45 Frictional power of Al ₂ O ₃	91
Fig. 46 Frictional power of TiO ₂	91
Fig. 47 Frictional power of Cr ₂ O ₃	92
Fig. 48 Frictional power of ZrO ₂	92

Abstract

This study is to investigate the wear behaviors of four types of ceramics, Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 and ZrO_2 , coated by plasma thermal spray method under lubricative environments. The lubricative environments are grease and bearing oil. The wear testing machine used a pin on disk type. Wear characteristics, which were friction force, friction coefficient, wear rate and friction power, according to the lubricative environments were obtained at the four kinds of load, and the sliding velocity, 0.1m/s and 0.2m/s. 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. On dry frictional condition in air, the friction coefficient, the sliding velocity of 0.1 m/s with low load, was the least in TiO_2 and the greatest in ZrO_2 . In this case, the coefficient ordering is $\text{TiO}_2 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < \text{ZrO}_2$, but the coefficient ordering high loads at is $\text{TiO}_2 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{ZrO}_2$. At the sliding velocity of 0.2 m/s with low load, the coefficient ordering is $\text{Cr}_2\text{O}_3 < \text{TiO}_2 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{ZrO}_2$, but coefficient ordering at high load is $\text{TiO}_2 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{ZrO}_2$. Therefore, the friction coefficient at 0.2 m/s is less than that at 0.1 m/s.

2. On wear behaviour of Al_2O_3 under lubricative environment, The friction coefficient under grease, the sliding velocity of 0.1m/s with the load of 300N, was in a range of 0.08 ~ 0.17 and 0.09 ~ 0.12 under bearing oil. And the friction coefficient, the sliding velocity of 0.2 m/s with 900N, was in a range of 0.08 ~ 1.12 under grease and 0.05 ~ 0.07 under bearing oil. Therefore, when the sliding velocity is faster and the loading gets

heavier, the bearing oil shows more tribology characteristics than that of grease.

3. On wear behaviour of TiO_2 under lubrication environment, The friction coefficient under grease, the sliding velocity of 0.1m/s with the load 300N, was in a range 0.17 ~ 0.27 and 0.12 ~ 0.21 under bearing oil. And the friction coefficients at the load 900N were approximately 0.14 and 0.11 under bearing oil. The friction coefficient, the sliding velocity of 0.2m/s with the load of 300N, was in a range of 0.07 ~ 0.18 under grease and 0.13 ~ 0.18 under bearing oil. And the friction coefficient, the sliding velocity of 0.2 m/s with 900N, was in the range of 0.12 ~ 0.14 under grease and 0.07 ~ 0.09 under bearing oil.

4. On wear behaviour of Cr_2O_3 under lubricative environment, The friction coefficient the velocity of 0.1 m/s with the load 300N, was in a range of 0.17 ~ 0.26 and under grease 0.13 ~ 0.17 under bearing oil. And the coefficient at the load 900N was in a range of 0.11 ~ 0.12 under grease and 0.11 ~ 0.13 under bearing oil. At the sliding velocity of 0.2m/s at the load of 300N, the friction coefficient was in a range of 0.06 ~ 0.14 under grease and 0.12 ~ 0.16 under bearing oil. At load 900N, the value was in a range of 0.09 ~ 0.11 under grease and 0.13 ~ 0.15 under bearing oil. Therefore, when the sliding velocity is faster, the bearing oil is better tribology characteristics than grease.

5. On wear behaviour of ZrO_2 under lubricative environment, At the velocity of 0.1 m/s and the load 300N the friction coefficient was 0.21 under grease and 0.18 under bearing oil. At sliding velocity 0.2m/s and load 500N, the friction coefficient was in a range of 0.12 ~ 0.16 under grease and 0.08 under bearing oil. The bearing oil is more suitable than

grease for lubrication.

6. On the wear rate of 4 ceramics, the rates with load 300N in air were 1.290×10^{-7} for Al_2O_3 , 1.72×10^{-8} for TiO_2 , 3.97×10^{-7} for Cr_2O_3 and 1.993×10^{-6} for ZrO_2 , respectively. The rates with 900N in grease were 2.16×10^{-9} for Al_2O_3 , 1.00×10^{-9} for TiO_2 , 3.90×10^{-9} for Cr_2O_3 and 6.91×10^{-6} for ZrO_2 . And, the rates with 900N in bearing oil were 5.22×10^{-9} for Al_2O_3 , 1.40×10^{-9} for TiO_2 , 1.00×10^{-9} for Cr_2O_3 and 9.11×10^{-8} for ZrO_2 , respectively. Therefore, the wear rate under grease is the least for TiO_2 and the greatest for ZrO_2 and the rate under bearing oil is the least for Cr_2O_3 and the greatest for ZrO_2 .

7. Frictional power of Al_2O_3 , is 9.42Nm/s when load is 100N in the dry friction and 18.27Nm/s when load is 200N. If load is increased, frictional power shapely go up. In the case of TiO_2 , although load is increased, frictional power is not increased because of adhesive effect. In case of Cr_2O_3 , friction power in the air is 13.20Nm/s with 100N, 21.27Nm/s with 200N, and 22.81Nm/s with 300N. The friction power of ZrO_2 is mild adhesive wear in low load and slowly increased because of low fracture toughness.

8. The wear mechanisms were abrasive wear for Al_2O_3 , adhesive wear for TiO_2 , adhesive wear for Cr_2O_3 and delamination wear and mild abrasive wear for ZrO_2 .

I . 서 론

1. 연구 배경

산업이 발전함에 따라 기계부품에는 고온, 고압 및 고부식성 분위기에서 견딜 수 있는 내열성, 내마모성, 내식성을 가진 재료가 요구되고 있다. 특히 기계의 수명은 파괴보다는 마모에 의해 정도 및 기능을 잃는 것에 의해 결정되는 경우가 많으므로, 기계 마찰부에 세라믹을 사용하는 경우가 많다.

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 플라즈마 용사법(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 플라즈마 제트를 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 한 가지 이상의 마모기구가 동시에 작용하므로 연구자들 사이에서도 의견이 매우 다양하다[3]. 이러한 관점에서 내마모성 세라믹 재료의 마모기구를 해명하기 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]. 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) 형태의 접촉면을 형성한다고 하였다. Iwabuchi 등은[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. 이러한 마모과정을 미시적으로 관찰하여 그 기구를 규명하기 위하여 주로 주사형 전자현미경(SEM)이 사용되고 있으며 SEM을 사용하여 마모기구의 규명을 하기 위한 두 가지 방법이 있다. 그 한 가지 방법으로는 접촉점의 마모실험을 SEM 내부에서 수행하면서 재료의 마모거동을 연속적으로 관찰하는 방법이 있고, 다른 한 가지 방법으로는 마모실험 전후의

마모면과 마모입자를 SEM으로 관찰해서 그 마모기구를 추정하는 것이다. 내마모성 세라믹에 관해서 Mehrotra[15]는 Al_2O_3 의 미끄럼 마모실험을 수행하고 Al_2O_3 의 마모면의 SEM 관찰을 실시한 결과 Al_2O_3 의 미끄럼마모는 취성과 파괴와 소성변형에 의하여 발생한다고 보고하였다. Adewoye[16]는 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 윤활유로서 그리이스, 베어링유를 사용하고 있다. 그리이스는 주로 윤활유를 주입하기 어려운 부분에 사용하는데, 운동 중에는 액체상태가 되고, 정지하면 유동성을 상실하여 반고체가 되는 것이 특징이다. 그리이스의 주성분이 되는 기유는 그리이스의 성능 중 윤활성, 내열성, 내산화성, 저온성 등의 특성을 가지며 최근 산업기계류의 고속화, 소형화가 비약적으로 발전함에 따라 다양한 그리이스가 개발되어 있다. 한편 베어링유는 고도로 정제된 기유로 제조되기 때문에 점도지수가 매우 높고 산화안정성과 마모방지 성능 가지며 수분리성과 항유화성이 매우 우수하여 저점도의 제품은 공작기계 및 방직기계 등의 스핀들 오일로 사용한다.

1.1. 2. 연구목적

본 연구는 산업현장에서 많이 이용되는 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 4종류의 내마모성 세라믹을 플라즈마 용사법에 의하여 코팅하여 기계 마찰부의 부품으로 사용하는 경우 그 마모현상에 대한 역학적 요인, 윤활 요인, 재료요인 등을 규명한 것이다. 이들 마모현상의 규명은 자체제작한 마모시험기를 이용하여 상온과 상압 하에서 공기중, 그리이스 및 베어링유의 윤활환경에서 실험을 하였다. 시험조건에 있어서는 가압하중과 미끄럼속도 등의 운동 조건들을 변화시키면서 각 조건하에서 마찰력, 마찰계수, 마모를 및 마찰동력을 조사하였다. 또한 마모기

구들을 규명하기 위하여 실험후의 마모면들은 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 정밀 관찰하였다.

본 연구는 모두 4장으로 구성되고 각 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

I 장에서는 서론으로 연구배경, 목적 및 본 논문의 구성을 기술하였다.

II 장에서는 플라즈마 용사법과 본 연구에 사용된 내마모성 세라믹들의 화학적 물리적 특성, 시험편 제작에 대해 기술하였다. 세라믹 코팅의 마모 특성을 평가하기 위한 시험편, 시험장치, 각각의 실험조건을 기술하였다.

III 장에서는 실험 결과 및 고찰을 나타내며 공기 중에서 미끄럼속도에 따른 마모거동에 대해 기술하였다. 그리이스와 베어링유의 윤활환경에서의 하중과 미끄럼속도에 따른 마모거동을 살폈으며 마모된 표면을 살펴보기 위해 SEM으로 미시적인 관찰하였다. Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 의 마모율과 마찰동력을 비교하여 각각의 마모현상을 파악하였다.

IV 장에서는 결론으로서 본 연구의 전체 내용을 요약하고 각 장에서 얻어진 결과들을 정리하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 시험편

1.1 기재

시험편은 회전시험편과 고정시험편으로 구성되어 있으며 이들 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 회전시험편의 기재는 고탄소강 SM45C를 사용했고, 고정시험편의 기재는 고탄소 크롬 베어링강 SUJ II를 사용하였다. 이들의 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 1와 Table 2에 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 제작하였으며, Fig.1 (b)의 고정시험편은 5mm ϕ 의 SUJ II편을 사용하였다. 플라즈마 용사코팅시 코팅재와 기재와의 결합력을 향상시키기 위하여 기재의 표면을 샌드 블래스팅(Sand blasting)처리를 하였으며 그 조건을 Table 3에 나타냈다. 블래스팅 입자의 크기는 15 ~ 53 μ m, 노즐 압력은 5.5kg/cm², 블래스팅 거리는 50 ~ 100mm이다.

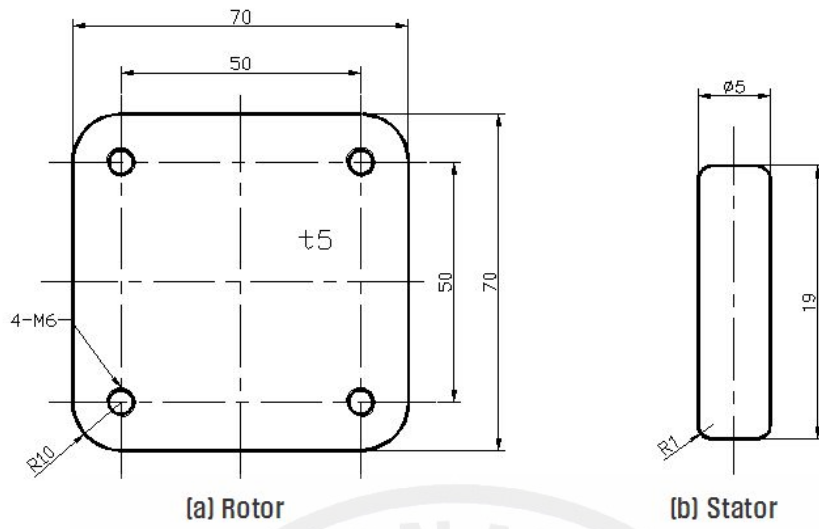


Fig. 1 Shapes and dimension of specimens(unit : mm)

Table 1 The chemical composition of substrates(w.t %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Disk (SM45C)	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			
Pin (SUJ II)	0.95	0.15	0.5	0.025	0.25	0.25	1.30	0.25
	~ 1.10	~ 0.35					~ 1.60	

Table 2 The mechanical properties of substrates

	Yield strength (MPa)	Stress (MPa)	Strain (%)	Poisson's ratio	Specific gravity g/cm ³	Young' modulus GPa
Disk (SM45C)	390	670	25	-	-	-
Pin (SUJ II)	-	1568 ~ 1960	-	0.3	7.77	208

Table 3 Blasting conditions

Material composition	Powder size (μm)	Air pressure (kg/cm ²)	Distance (mm)
White alumina	15 ~ 53	5.5	50 ~ 100

1.2 플라즈마 용사 코팅

세라믹의 코팅을 위하여 사용한 플라즈마 용사 장치는 Sulzur Metco 9 MP이다. 플라즈마 용사장치는 Power supply unit와 Plasma spray control unit, Powder feeder, Heat exchanger 및 Plasma gun 등으로 구성되어 있으며 그 계통도를 Fig. 2에 나타냈다. 이 장치의 작동은 음극과 양극사이에 전기를 흐르게 하고 수소 및 아세틸렌가스를 통과시키면 가스는 팽창되고 이온화를 일으키게 되어 고온(약 16,500℃)의 플라즈마가 발생한다. 이때 노즐 선단부에 장착된 분말상의 세라믹 입자들이 플라즈마에 의해 녹으면서 고속(650m/min)으로 분사되어 기체에 적층되는 것이다.

코팅에 사용한 세라믹은 Al₂O₃ - 40% TiO₂, TiO₂, Cr₂O₃, ZrO₂ - 24% MgO이다. 이들의 기계적성질, 화학적성질 및 입자의 크기를 Table 4에서 Table 6에 나타냈다. Fig. 3에서 Fig. 6까지에는 코팅에 사용된 분말의 SEM 사진을 나타낸 것이다. Figures에서 나타난 바와 같이 그 형상들은 구형과 편상이며 크기는 모두

약 $100\mu\text{m}$ 미만이다. 한편 기재와 탑코팅재인 세라믹의 밀착력을 향상시키기 위하여 사용된 본드 코팅재는 5% Al-Ni의 금속분말이며, 용사코팅 후의 제작된 시험편의 단면의 일례를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에서 본드코팅(Bond coating)의 두께는 약 $20\mu\text{m}$ ~ $30\mu\text{m}$ 이며 탑코팅의 두께는 약 $80\mu\text{m}$ 이다.



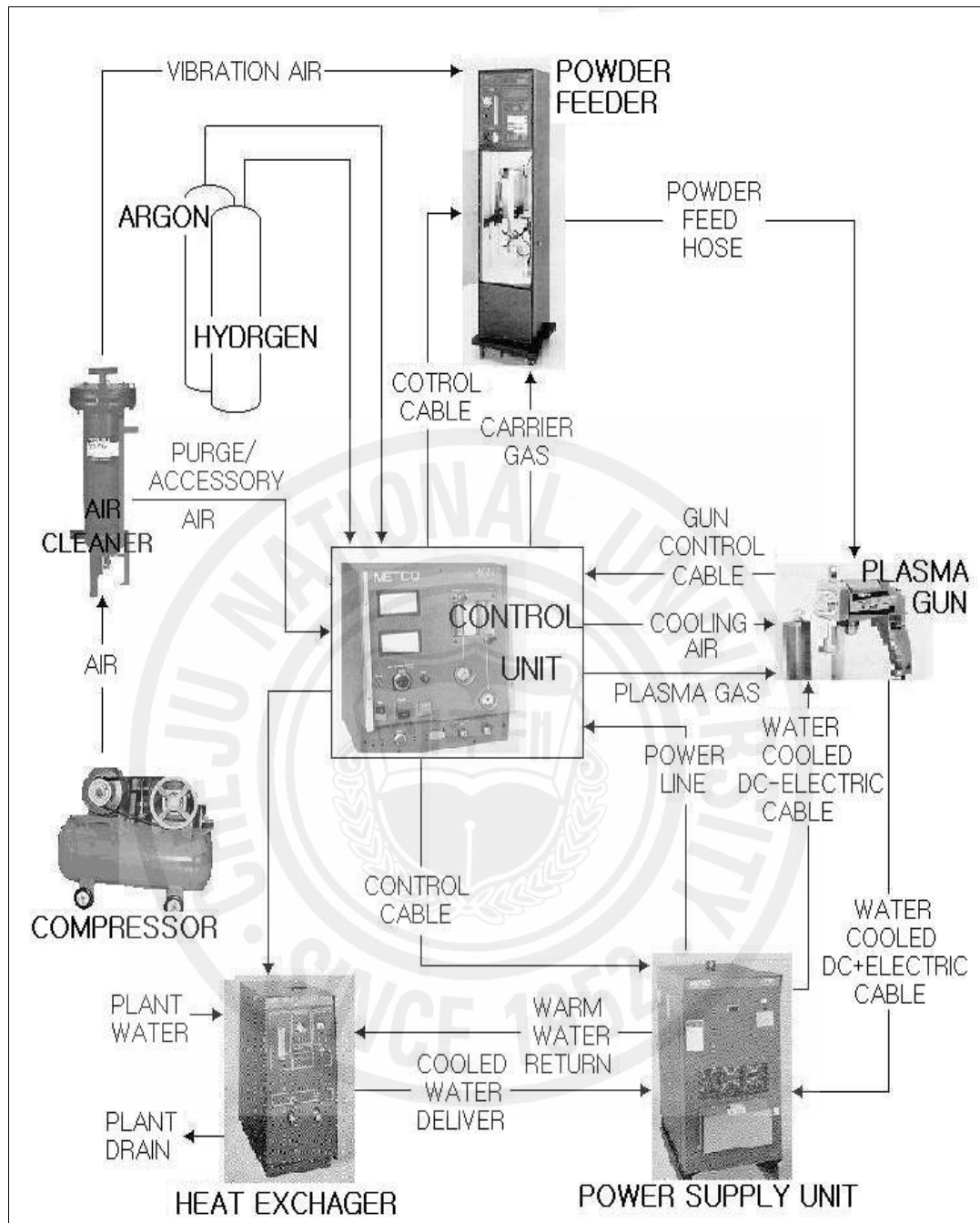


Fig. 2 Plasma thermal spray system

Table 4 Mechanical properties of specimens

Properties Specimens		Vickers hardness kg/mm ²	Thermal expansion coefficient [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	density (g/cm ³)	Bending strength (Pa)	Poisson's ratio	Elastic modules (GPa)
Substrate	SM45C	240	12.0				
Disk	Al ₂ O ₃ -40% TiO ₂	1900	7.0	3.9	2.9× 10 ⁻⁸	0.25	343
	TiO ₂	1200	8.4	3.3		0.26	167
	Cr ₂ O ₃	1050	4.0	5			
	ZrO ₂ -24% MgO	760	9.0	6.05	1.3× 10 ⁻⁹		
Pin	SUJ II	788	12.3	7.86	-	0.28	190

Table 5 Chemical composition and production of coating powder

Coating powder	Component (wt%)	Powder type
Al ₂ O ₃ -40%TiO ₂	60%Al ₂ O ₃ , 40%TiO ₂	Spheroidal
TiO ₂	99%TiO ₂	Angular/Blocky
Cr ₂ O ₃	98%Cr ₂ O ₃ , 2%TiO ₂	Angular/Blocky
ZrO ₂ -24%MgO	76%ZrO ₂ , 24%MgO	Spheroidal

Table 6. Grain size of coating powder

Coating powder	Grain size(μm)	Trade name
Al ₂ O ₃ -40%TiO ₂	-45+5μm	Metco 131VF
TiO ₂	-88+7.8μm	Metco 102
Cr ₂ O ₃	-125+11μm	Metco 106
ZrO ₂ -24%MgO	-90+11μm	Metco 200NS-1

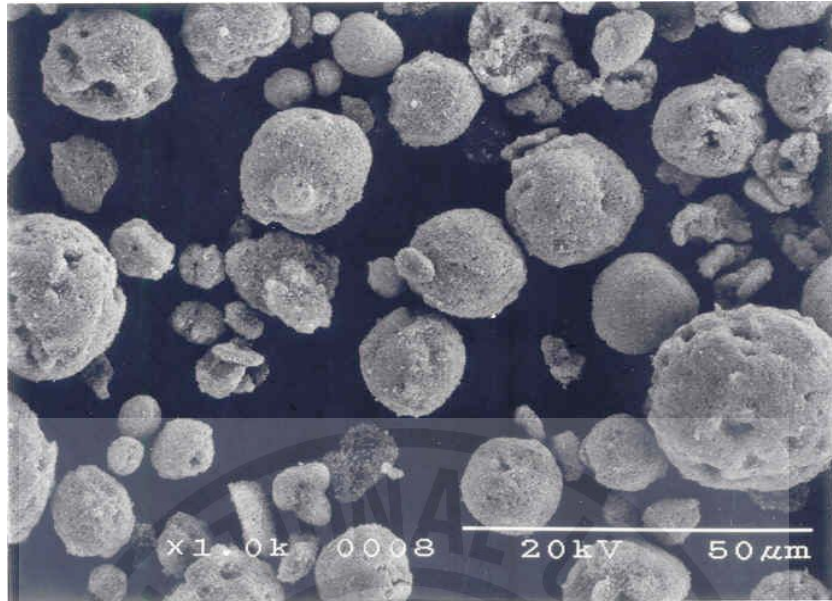


Fig. 3 SEM photograph of Al₂O₃-40%TiO₂ coating powder

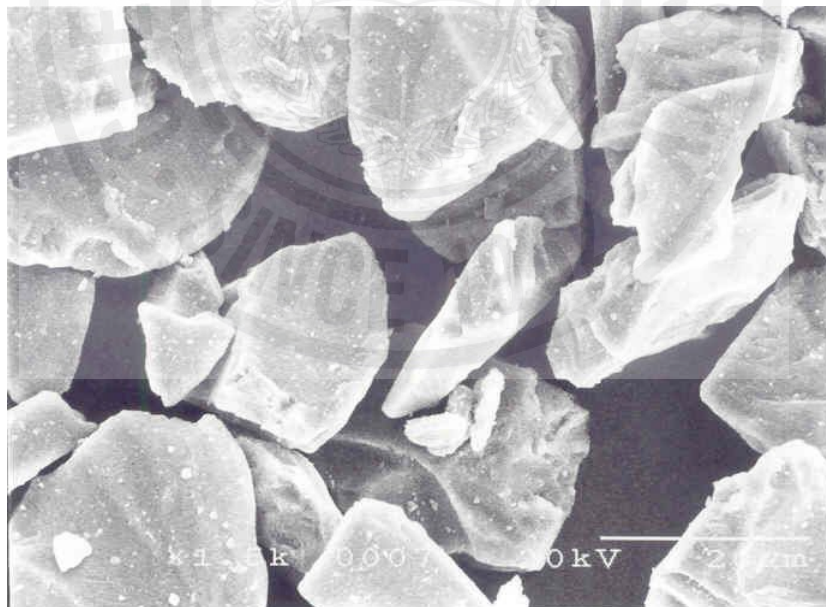


Fig. 4 SEM photograph of TiO₂ coating powder

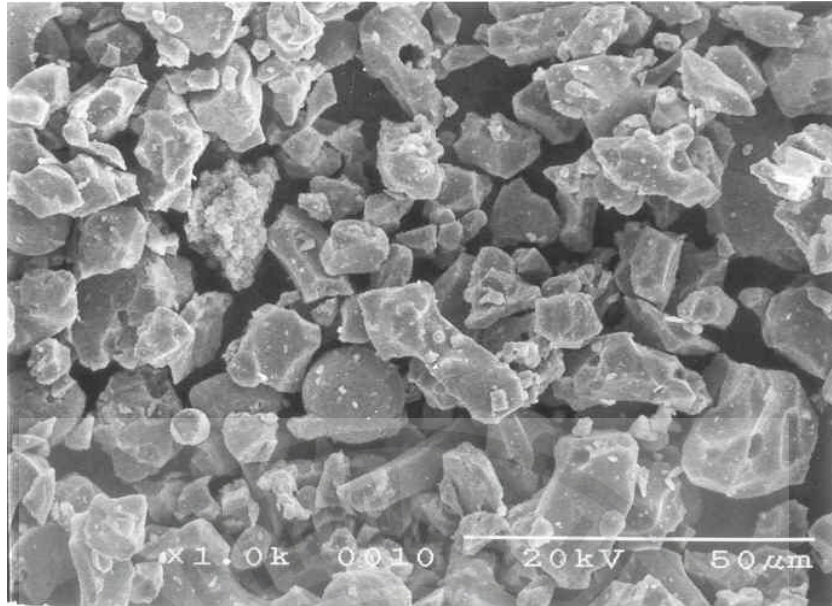


Fig. 5 SEM photograph of Cr₂O₃ coating powder

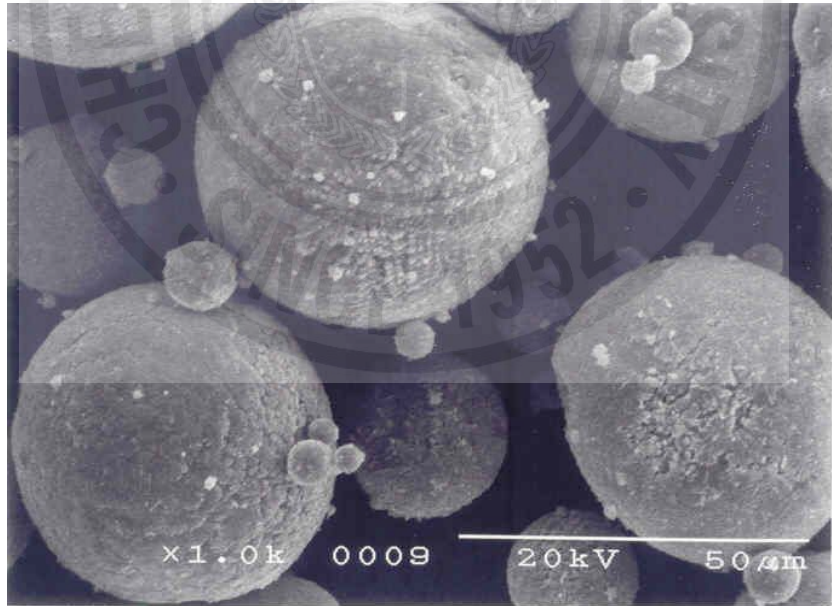


Fig. 6 SEM photograph of ZrO₂-24%MgO coating powder

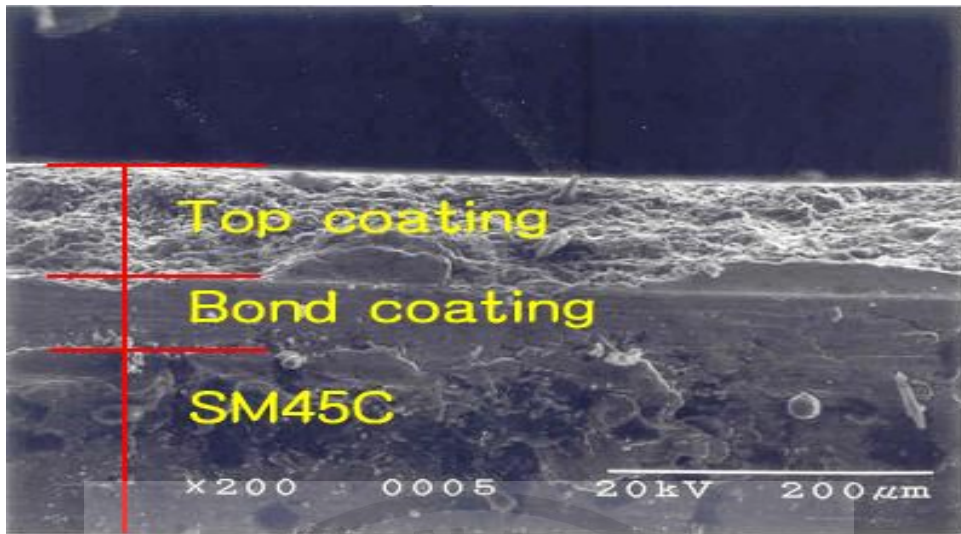


Fig. 7 Sectional shape of Al_2O_3 -40% TiO_2 coating specimen

2. 시험기

본 실험에 사용된 시험기는 Fig. 8에 나타난 자체 제작한 Pin on disk형 마모 시험기이다[17]. 시험기의 자체의 고유진동을 줄이기 위하여 중량이 큰 재질을 선택하였고 스프링 부분은 스프링상수가 서로 다른 두개의 스프링을 사용하여 공진현상이 발생하지 않도록 하였다. 시험편을 회전시키는 모터는 교류 저속 동기 모터(DKM EMPS, 대경 Mach Co.)를 사용하여 정회전, 급가속, 급감속 시에 회전수의 변화가 발생하지 않도록 고려하였다. 모터 회전수는 주파수 변환장치에 의하여 회전수를 선택할 수 있고, 전압이 변동하여도 회전수는 일정하며 부하가 변하여도 Slip 현상이 없이 정속도 운전이 가능하다.

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 분해 능력을 가지는 Advantech 사의 PCL-812 PG 를 사용하였다. 하중과 마찰력을 감지하는 로드셀은 NTS 제품인 LCW-500 K 형으로 정격용량이 5 KN이다. 로드셀에서 검출한 스트레인을 증폭해주는 스트레인

증폭기는 Kyowa 사의 DPM-612 형으로 ± 5 V의 용량을 가진다.

마찰력과 마찰계수의 산출을 위한 개념도를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 마찰력 검출을 위한 로드셀과 회전시험편 중심과의 거리 $ob = R$, b점의 가압하중을 F , 회전시험편의 평균반경 $oa = r$, a점의 마찰력을 f 라고 하면

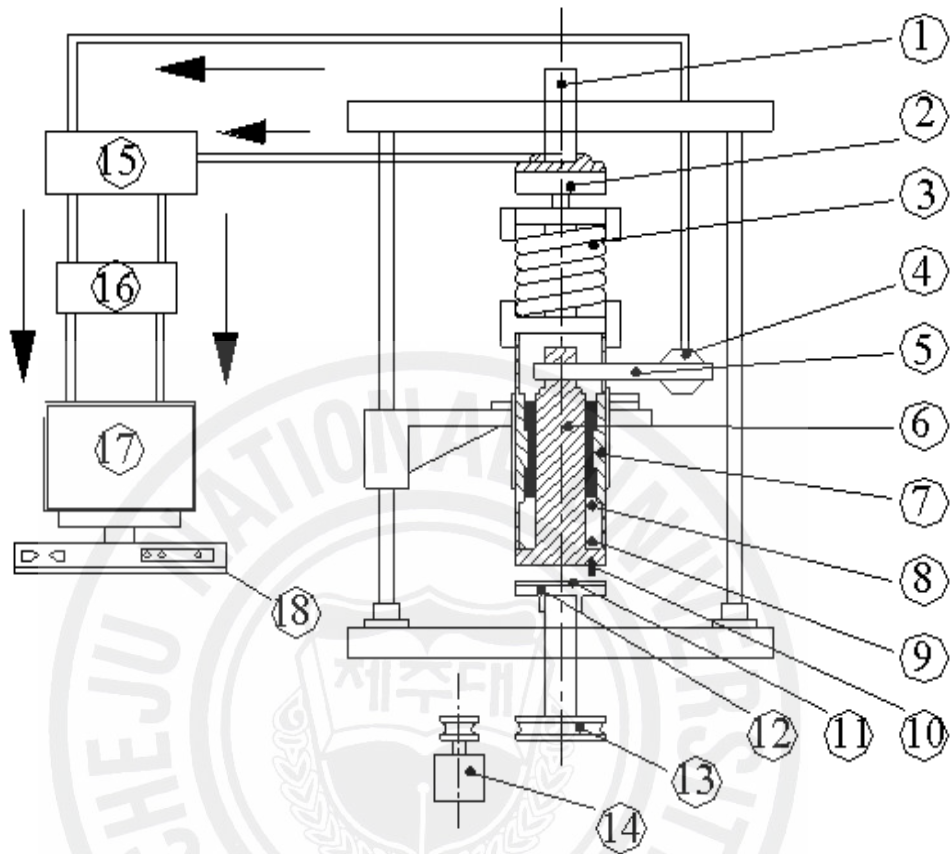
$$f = \frac{FR}{r}$$

의 관계가 성립되며 F , r 및 R 은 이미 알고 있으므로 f 가 산출된다. 이 때 f 의 마찰력은 장착된 로드셀에서 측정이 되며 마찰계수는 다음 식에 의하여 결정할 수 있다.

$$\mu = \frac{f}{W} = \frac{FR}{Wr}$$

여기에서 W 는 가압하중이다[18].

가압하중과 마찰력은 시험기에 장착된 로드셀에 의해 측정된 전압신호가 증폭기와 아날로그/디지털 변환기(Analogue/Digital converter)를 통해 컴퓨터에 입력된 후 위 식을 이용한 프로그램에 의해 마찰계수가 산출되며 산출된 마찰계수의 값은 매 4초 간격으로 컴퓨터에 저장되도록 하였다.



- | | | |
|--------------------|------------------|----------------------|
| 1. Pressure handle | 2. Load cell | 3. Coil spring |
| 4. Load cell | 5. Torque arm | 6. Torque arm holder |
| 7. Pressure rod | 8. Pressure 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. 8 Block diagram of wear testing machine

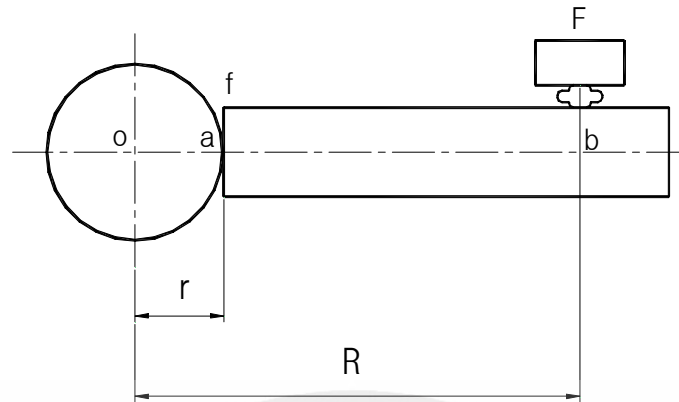


Fig. 9 Schematic diagram for calibration of friction coefficient

3. 실험 방법

Table 7에서 나타낸 바와 같이 4종류의 세라믹 코팅재의 마모 실험조건은 공기 중의 건조마찰과 그리이스 및 베어링유에서 실험하였다. 유힬환경에서의 실험은 유힬활유 챔버(Chamber)를 설치하여 시험편이 유힬활유에 완전히 침지된 상태에서 회전시험편과 고정시험편이 함께 회전할 수 있도록 하였으며 매 실험마다 유힬활유를 교환하고 적정 유힬활이 되도록 보충하였다. 이들 각 유힬활유의 특성을 Table 8에 나타내었다

마모량 측정에 있어서 실험 전에 시험편을 초음파 세척기로 30 분간 세정, 탈지 및 건조의 과정을 거친 후, 시험편의 무게를 100mg까지 측정 가능한 전기식 지시저울로 5회 측정하여 이들의 평균값을 채택하고, 실험 후에도 동일한 방법으로 중량을 측정하여 실험 전후의 시험편의 무게 차이로 마모량을 산정하였다.

실험 후 마모면의 관찰은 주사식 전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 사용하여 마모기구를 조사하였다.

Table 7 Test condition

Condition Specimen	Sliding velocity[m/s]	Load[N]	Lubrication oils
Al ₂ O ₃	0.1	100, 200, 300, 500	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease
		300, 500, 700, 900	Bearing
	0.2	100, 200, 300, 500	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease oil
		300, 500, 700, 900	Bearing oil
TiO ₂	0.1	100, 200, 300, 500	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease oil
		300, 500, 700, 900	Bearing oil
	0.2	100, 200, 300, 500	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease oil
		300, 500, 700, 900	Bearing oil
Cr ₂ O ₃	0.1	100, 200, 300, 500	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease
		300, 500, 700, 900	Bearing
	0.2	100, 200, 300, 500	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease oil
		300, 500, 700, 900	Bearing oil lubrication
ZrO ₂	0.1	100, 200, 300	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease oil
		300, 500, 700, 900	Bearing oil
	0.2	100, 200, 300	Dry
		300, 500, 700, 900	Grease oil
		300, 500, 700, 900	Bearing oil

Table 8 Physical qualities of lubrication oils

		Grease	Bearing oil
Density (@15/4℃)		-	0.872
Kinematic Viscosity	@40℃	-	150
	@100℃	-	15.37
Viscosity index		-	104
Flash point (Open type ℃)		-	276
Pour point (℃)		-	-12.5
Thickener		Li ~ Ca	-
Worked Penetration (@25℃)		265 ~ 295	-
Dropping point (℃)		180	-
Range of using temperature (℃)		-21 + 130	-

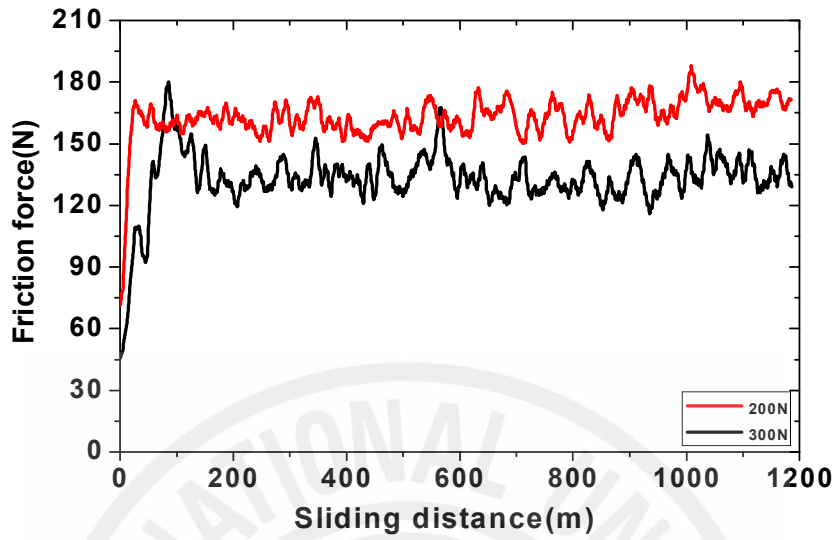
Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

1. Al_2O_3 코팅층의 마모 특성

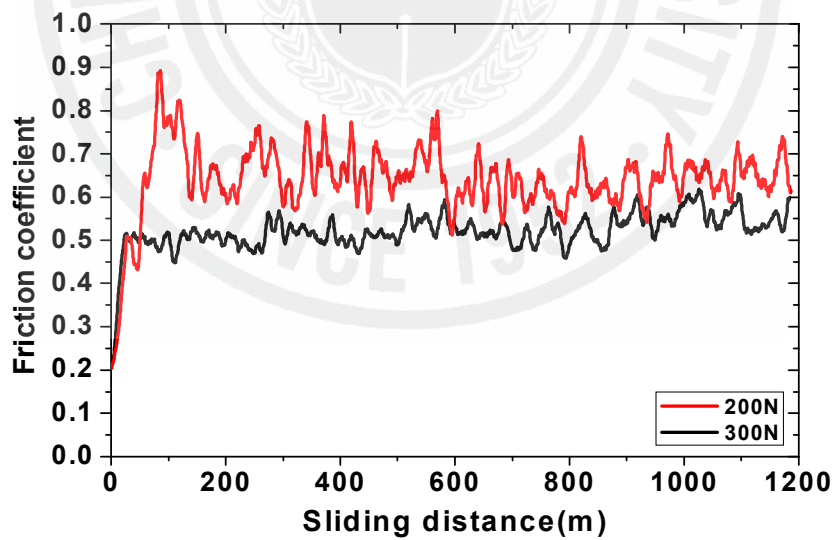
1.1 공기 중에서의 하중과 속도에 따른 마모거동

Fig.10은 공기 중에서 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때 가압하중을 200N과 300N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 200N의 마찰력은 300N에 비해 약 40N이나 높은 값인 약 130N이었다. 가압하중 300N의 마찰력은 미끄럼거리가 약 200m가 될 때까지 급상승하였다가 감소하고, 그 이후로는 점차 정상적인 마모가 계속되었다. (b)의 가압하중이 200N의 마찰계수는 0.5 ~ 0.75이며 300N의 마찰계수는 진폭이 적은 값인 약 0.5이다. 가압하중이 높으면 균일한 마모상태가 됨을 나타낸다.

Fig. 11은 공기 중에서 미끄럼속도가 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 가압하중이 200N과 300N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력의 비교에서 가압하중이 200N의 마찰력은 약 400m 될 때까지 상승과 하강이 되고 약 110N이 되었다. 가압하중 200N일 때 마찰력은 약 120N이고, 300N일 때 약 155N으로 가압하중이 높으면 마찰력도 증가 되었다. 가압하중이 300N의 마찰력은 약 120N에서 초기마모가 되면서 미끄럼거리가 약 1100m가 될 때까지 약 180N까지 점차적으로 상승하였다. (b)의 마찰계수에서는 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중 200N의 마찰계수는 0.5 ~ 0.6인데 비하여 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 300N일 때의 마찰계수는 0.45 ~ 0.55로 감소하였다. 따라서 가압하중이 높고, 미끄럼속도가 빠르면 마찰계수는 낮고 안정된다.

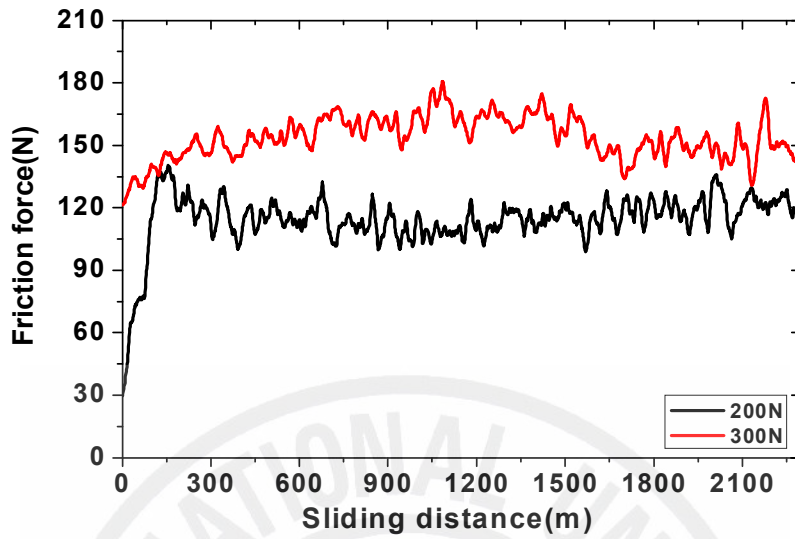


(a) Friction force

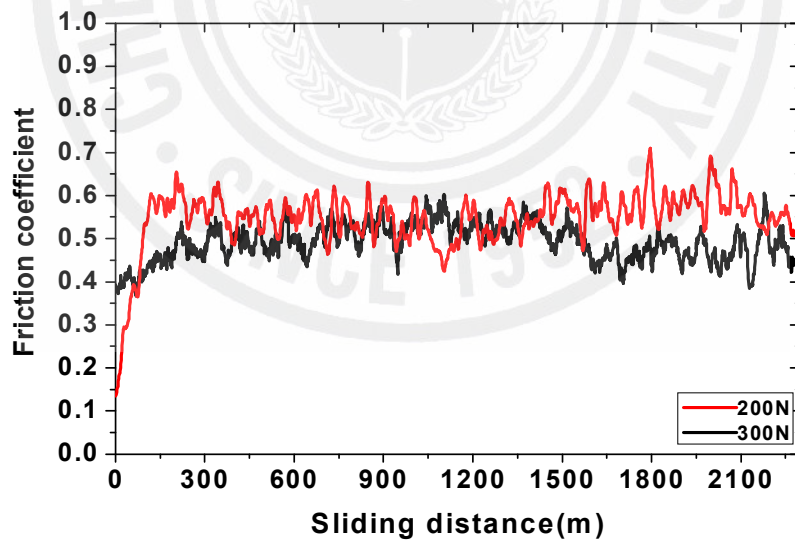


(b) Friction coefficient

Fig. 10 Al_2O_3 specimen (Air, $V=0.1\text{m/s}$)



(a) Friction force



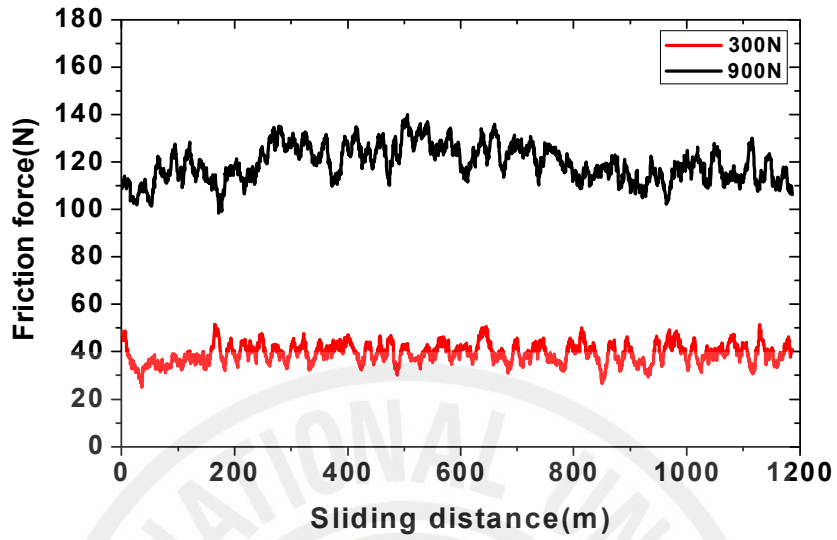
(b) Friction coefficient

Fig. 11 Al_2O_3 specimen (Air, $V=0.2\text{m/s}$)

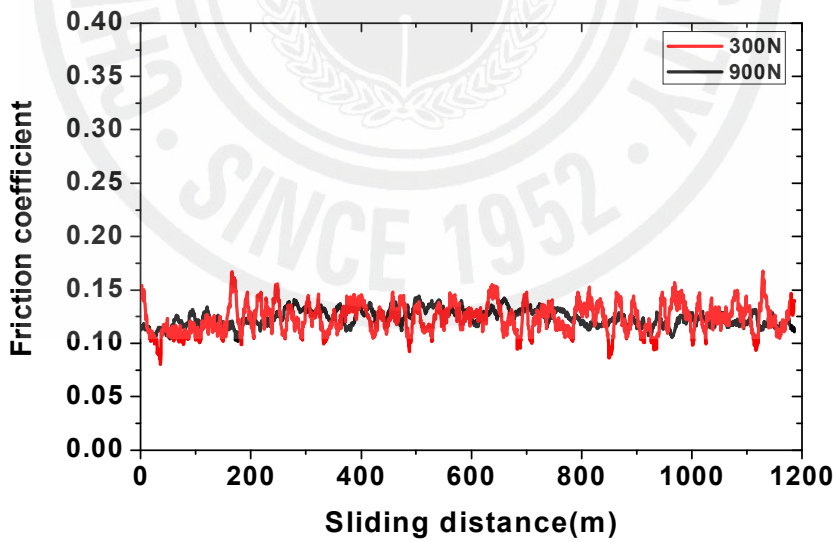
1.2. 그리이스 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동

Fig. 12는 그리이스 윤활에서 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력의 비교에서 가압하중 300N이면 마찰력은 약 40N이 되고, 가압하중이 900N일 때 약 120N으로 증가했다. 가압하중이 300N에서 900N으로 증가하면 마찰력도 약 50N에서 120N으로 증가한다. (b)의 마찰계수는 가압하중이 작은 300N에서 마찰계수는 0.08 ~ 0.17로 균일하지 않으나 900N에서는 0.12 ~ 0.14가 되어 거의 균일하다.

Fig. 13은 그리이스 윤활에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력의 비교에서 가압하중이 300N일 때는 마찰력은 60N ~ 80N이며, 가압하중이 900N이면 80N ~ 100N으로 가압하중이 높을수록 마찰력이 증가하였다. 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 가압하중 900N의 마찰력은 80N ~ 100N으로 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때 보다 작다. (b)의 마찰계수는 가압하중 300N이면 0.17 ~ 0.27이고, 900N이면 0.08 ~ 0.12으로 비교적 균일하다. 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 이며 가압하중 300N에서의 마찰계수는 $V=0.1\text{m/s}$ 의 경우 보다 크고, 900N에서의 마찰계수는 $V=0.2\text{m/s}$ 의 편이 $V=0.1\text{m/s}$ 보다 작다.

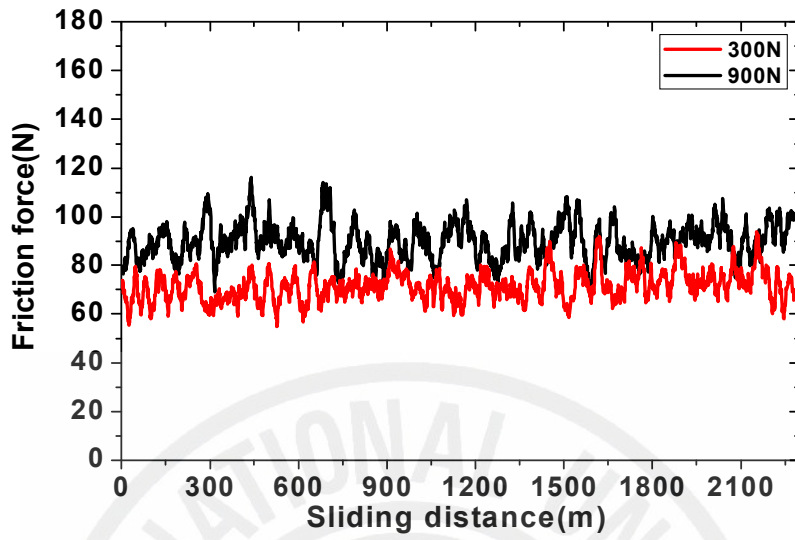


(a) Friction force

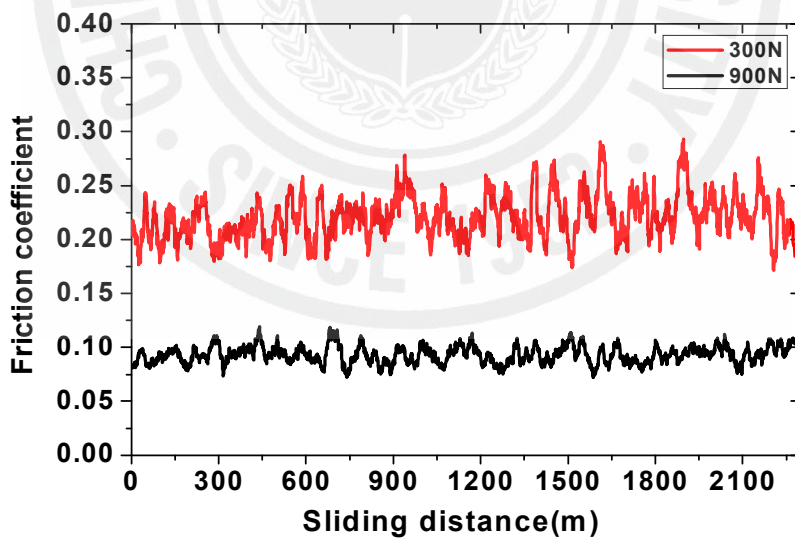


(b) Friction coefficient

Fig. 12 Al₂O₃ specimen(Grease, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

Fig. 13 Al₂O₃ specimen(Grease, V=0.2m/s)

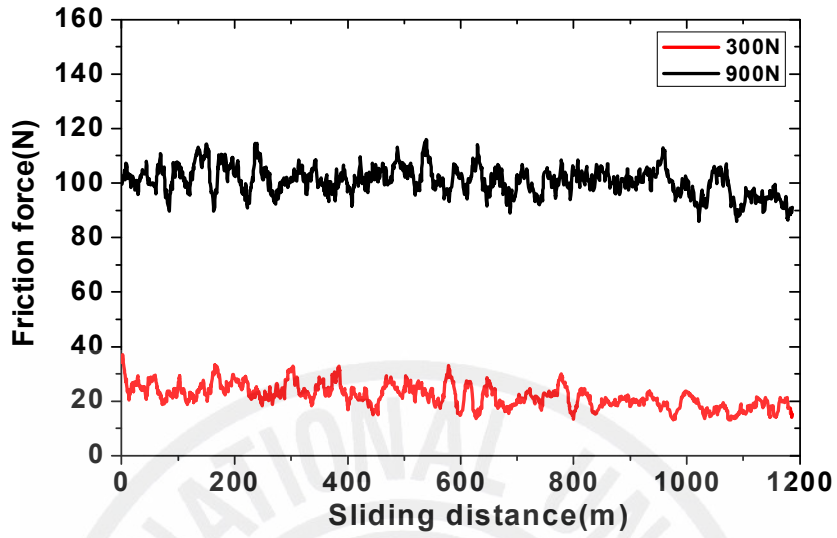
1.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동

베어링유는 고도로 정제된 기유로 제조되기 때문에 점도지수가 높고 산화안정성과 마모방지 성능을 갖고 있다. 그리고 수분리성과 항유화성이 매우 우수하여 공작기계 및 방직기계 등의 스피들 오일로 사용한다.

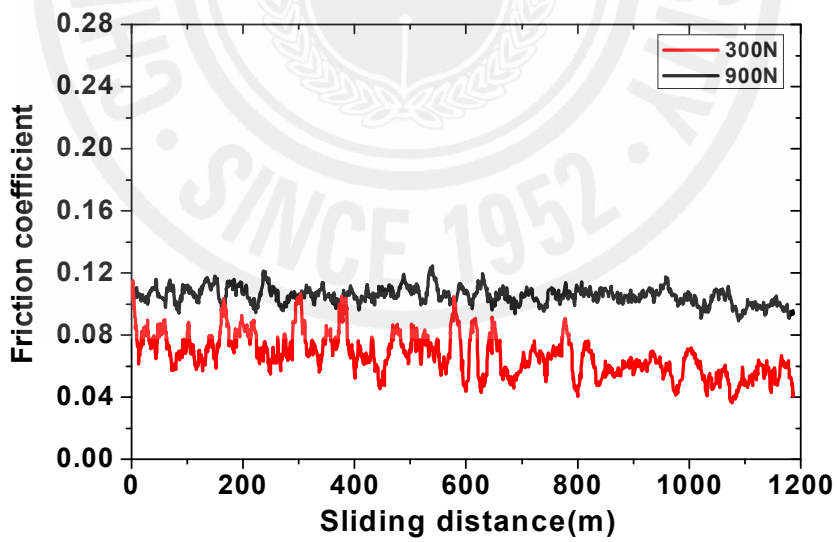
Fig. 14는 베어링유 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력의 비교에서 가압하중이 300N일 때 마찰력이 18N ~ 30N로 아주 낮은 값이며, 가압하중이 900N에서의 마찰력은 90N ~ 110N으로 증가했다. 따라서 가압하중이 증가하면 마찰력도 동시에 증가가 되었다. (b)의 마찰계수 비교에서, 가압하중 300N일 때 마찰계수는 0.04 ~ 0.11의 값이나 가압하중 900N일 때 마찰계수는 0.09 ~ 0.12로 비교적 균일한 상태다.

Fig. 15는 베어링유 중에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력은 가압하중 300N과 900N 양쪽 모두 40N ~ 70N으로 마모가 계속 진행되었다. (b)에서의 마찰계수는 가압하중 300V일 때 0.11 ~ 0.23이고, 가압하중 900N일 때 0.05 ~ 0.07의 값으로 거의 균일하다. 가압하중 300N에서 미끄럼속도에 따른 마찰계수는 0.1m/s일 때는 0.04 ~ 0.11이고, 0.2m/s에서는 0.11 ~ 0.23이다. 한편, 가압하중 900N에서 마찰계수는 0.05 ~ 0.07값으로 미끄럼속도가 빠르고 가압하중이 높을수록 균일한 마모가 진행되었다.

동일한 실험조건에서 윤활상태에 따른 마찰계수를 비교하여 보면 그리이스 윤활일 때 0.08 ~ 1.12이고 베어링유 윤활은 0.05 ~ 0.07이므로 베어링유의 윤활은 그리이스의 윤활보다 낮은 마찰계수의 값을 나타낸다.

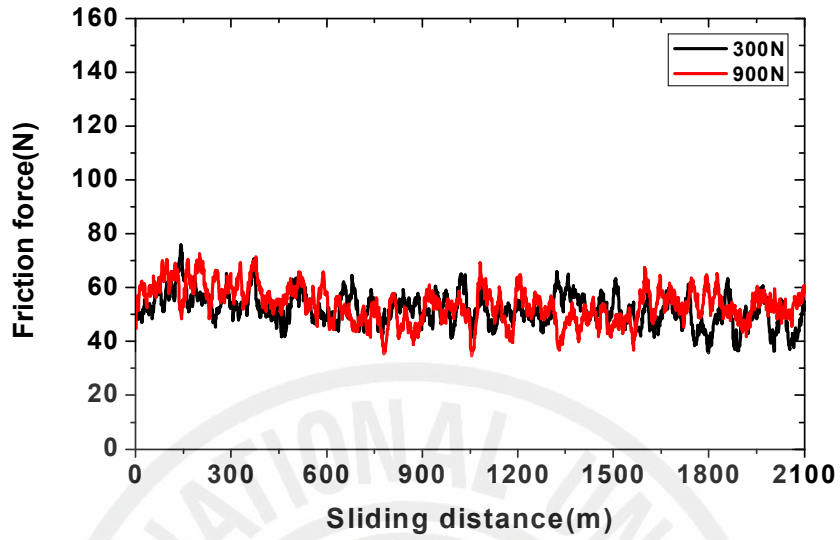


(a) Friction force

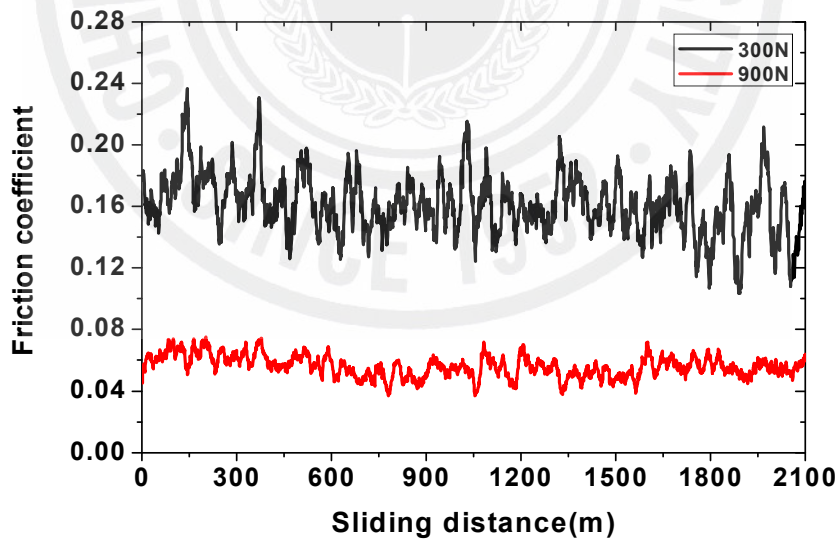


(b) Friction coefficient

Fig. 14 Al₂O₃ specimen(Bearing oil, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

Fig. 15 Al₂O₃ specimen(Bearing oil, V=0.2m/s)

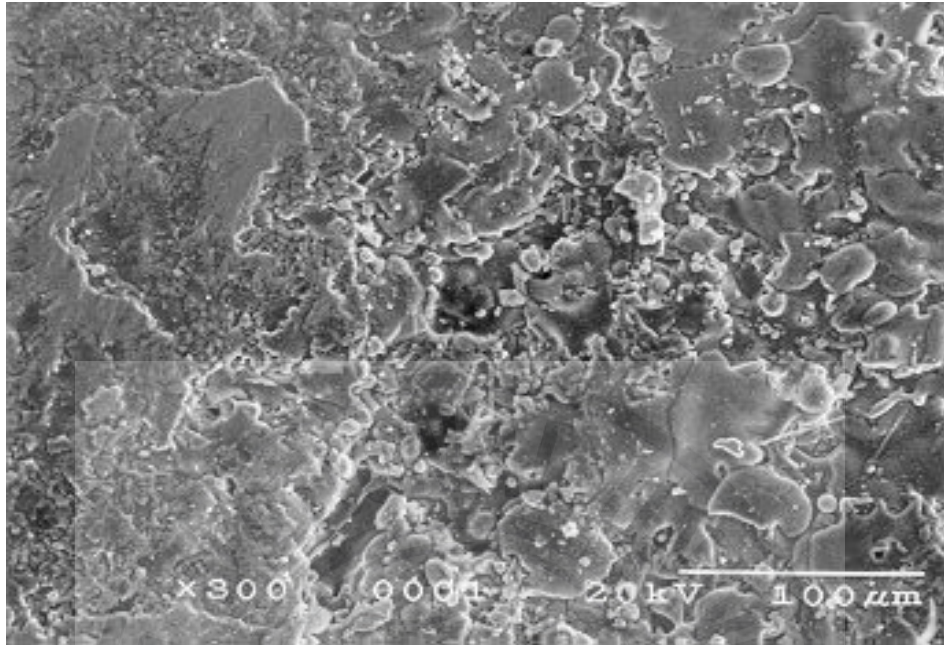
1.4 마모면의 SEM 관찰

Fig. 16은 공기 중, 그리이스 및 베어링유 중에서 실험한 후의 표면을 관찰한 것이다. (a)의 공기 중에서 $V=0.1\text{m/s}$ 로 가압하중 100N의 경우 전체적인 면에 연삭마모가 진행되고 있으며 부분적으로 응착마모의 흔적이 있으며 마모 형태는 미세한 마모분말이 눌러 붙은 상태이다. (b)의 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중이 300N의 경우 응착마모의 효과보다는 연삭마모의 흔적이 심하였다.

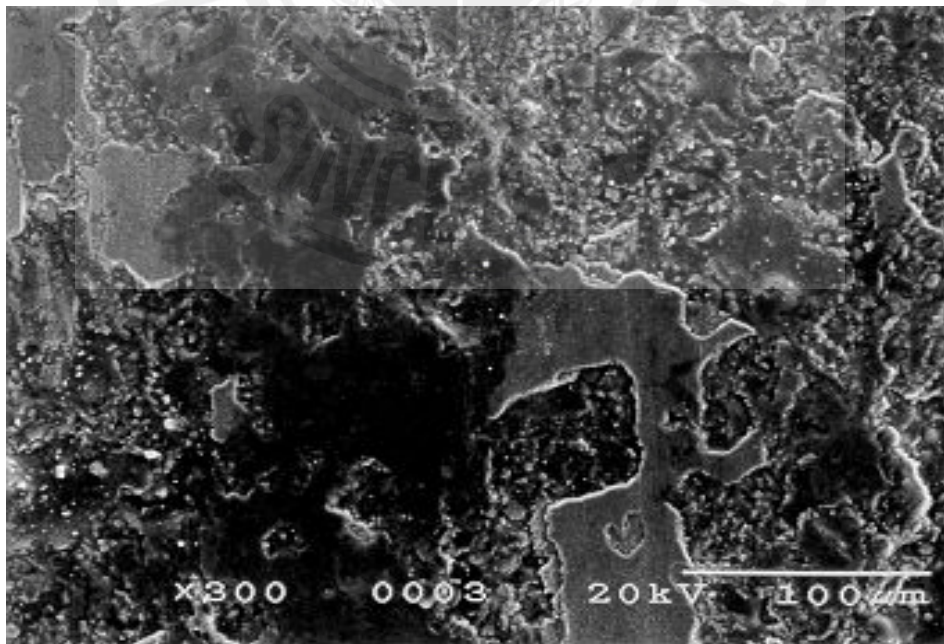
(c)는 공기 중에서 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 100N의 경우이며 (d)는 공기 중에서 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중이 300N으로 실험한 표면을 관찰한 것이다. 마모면은 연삭작용으로 인한 마모입자들을 끌고 지나간 골(ploughing) 등이 생긴 연삭마모의 형태가 나타난다. 이것은 Table 4의 Al_2O_3 의 경도는 1900으로 매우 높으므로 취성 파괴에 의해 초기에 마모입자가 탈락이 되고 새로운 마모입자가 생성되어 연삭마모가 진행된 때문으로 생각된다.

(e)는 그리이스 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중 900N의 경우이며, (f)는 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 300N의 경우이다. 이들에게서 상대하는 두 개의 면 사이에 존재하는 그리이스의 작용으로 마모입자가 발생이 되더라도 즉시 탈락이 되는 것이 아니라 그리이스의 응집력에 의해 마모입자들이 결집되어 마모면에 부착되는 응착마모가 진행됨을 알 수 있다.

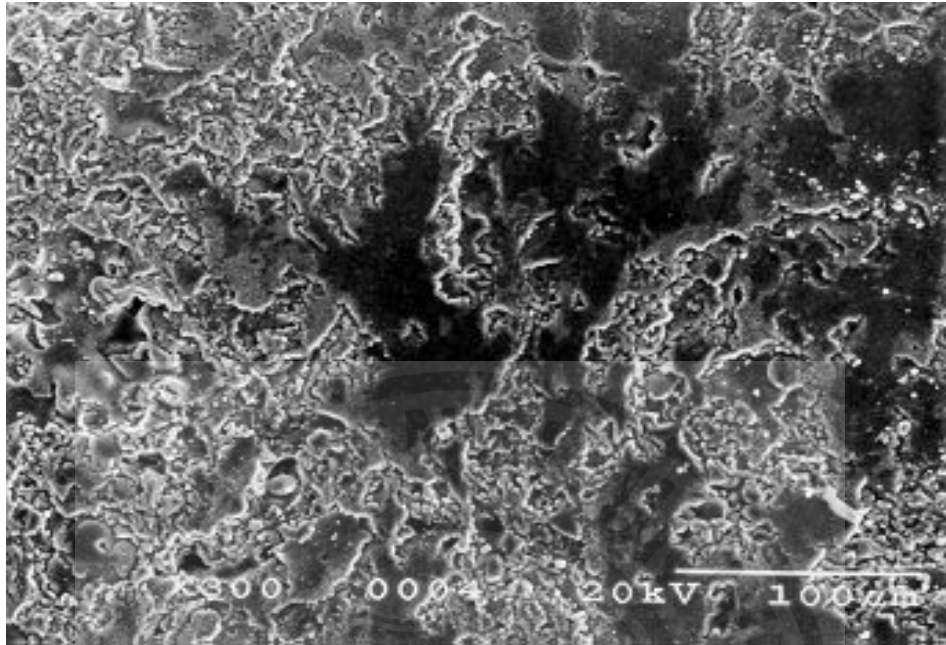
(g)는 베어링유 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중 900N의 경우이며 (h)는 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 300N의 경우이다. 이들에게서 앞에서 서술한 바와 같이 Al_2O_3 의 경도가 크기 때문에 미끄럼속도에 관계없이 깊은 골(Ploughing)이나 홈(Groove)을 형성하는 마모흔적이 나타났다.



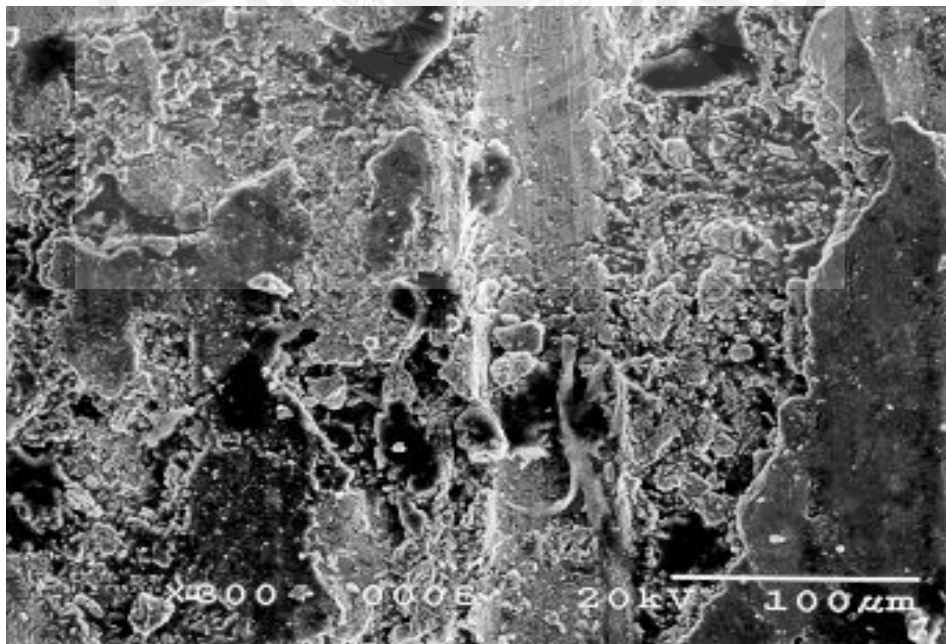
(a) ($V=0.1\text{m/s}$, in air, load=100N)



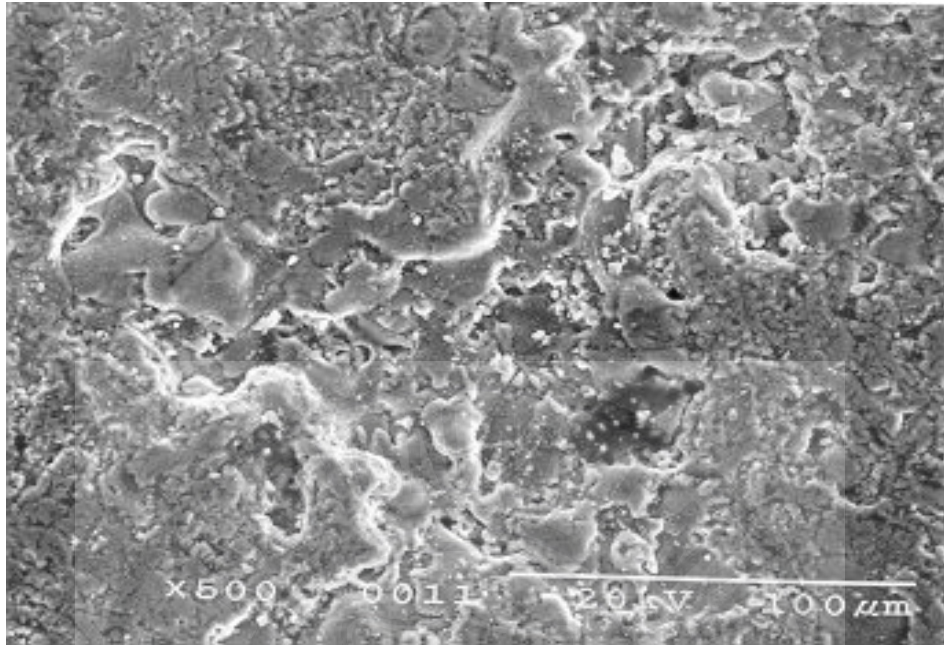
(b) ($V=0.1\text{m/s}$, in air, load=300N)



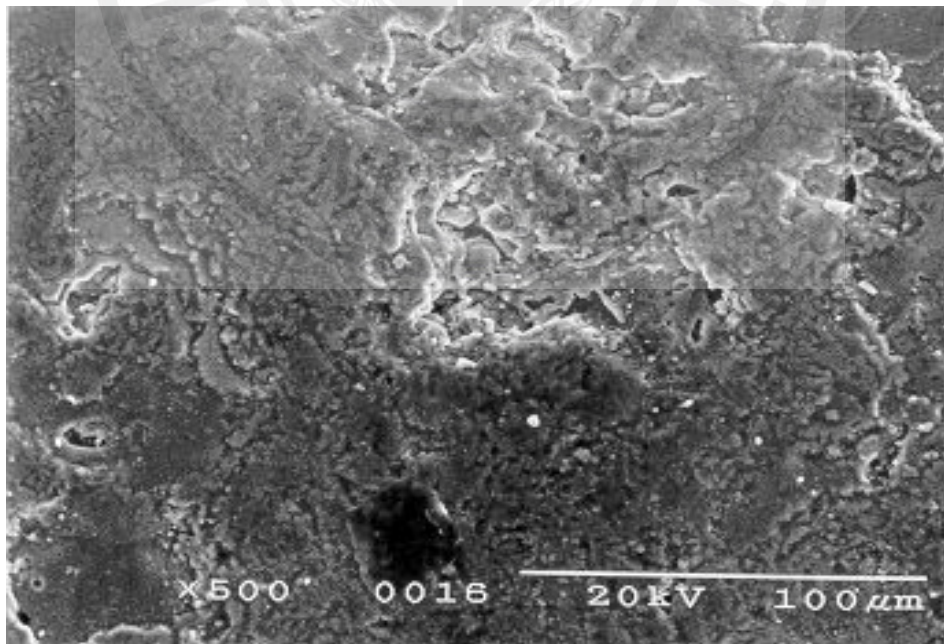
(c) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=100N)



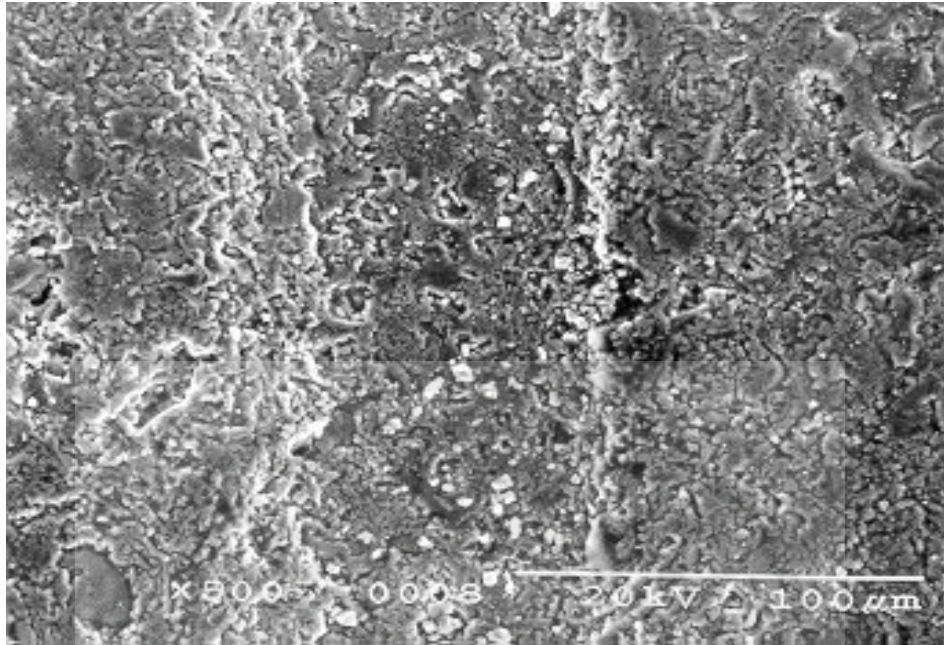
(d) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=300N)



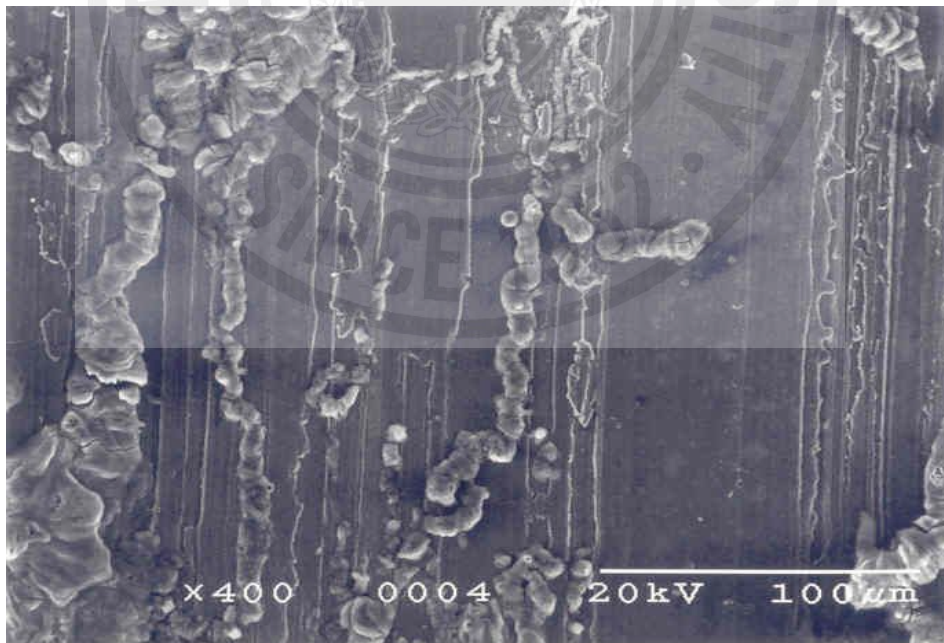
(e) ($V=0.1\text{m/s}$, in grease, load=900N)



(f) ($V=0.2\text{m/s}$, in grease, load=300N)



(g) ($V=0.1\text{m/s}$, in bearing oil, load=900N)



(h) ($V=0.2\text{m/s}$, in bearing oil, load=300N)

Fig. 16 SEM micrograph of the worn Al_2O_3 surface

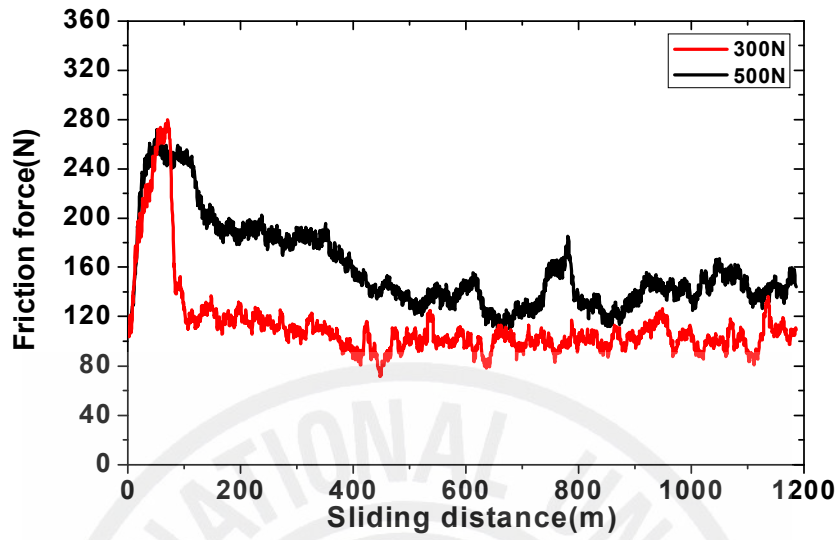
2. TiO₂ 코팅층의 마모특성

2.1 공기 중에서 하중과 속도에 따른 마모거동

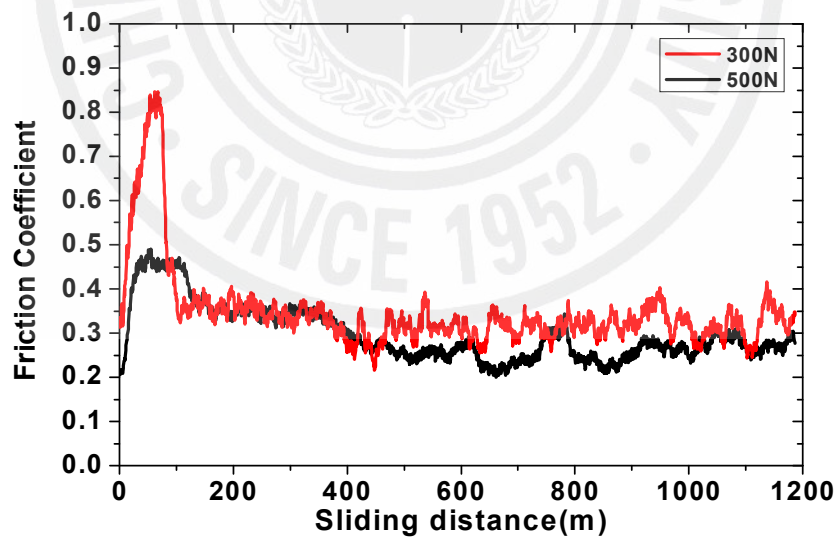
Fig. 17은 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중이 300N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 경우 가압하중이 300N에서의 마찰력은 초기마모의 영역에서 급격한 상승과 하강한다. 미끄럼거리가 약 70m일 때 마찰력이 약 280N이며, 미끄럼거리가 약 120m에서 마찰력이 약 110N으로 천이영역이 나타나며 그 이후에는 정상마모가 되었다. 가압하중이 500N에서의 마찰력은 마모초기에 미끄럼거리가 약 50m가 될 때 까지 약 270N로 급상승을 하고, 그 이후 마찰력이 약 130N이 되었다. 또, 미끄럼거리가 약 550m는 마찰력이 점차 하강하며 정상적인 마모형태가 되었다.

(b)에서 가압하중 300N에서의 마찰계수는 미끄럼거리가 약 110m구간에서 0.32 ~ 0.85의 큰 진폭을 보이고 그 이후에는 약 0.35의 비교적 균일하게 되었다. 가압하중이 500N에서의 마찰계수는 미끄럼거리가 약 200m까지의 구간에서 0.21 ~ 0.48의 진폭을 보이며 그 이후에는 0.26 ~ 0.35의 진폭을 나타낸다.

Fig. 18은 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중을 300N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. Fig (a)에서 가압하중 300N일 때의 마찰력은 전 구간에서 비교적 균일한 마찰력이 나타난다. 가압하중 500N일 때 미끄럼거리가 600m까지의 구간에서 150N ~ 250N의 진폭을 보이는 천이구역이 나타나며 그 이후에는 정상적인 마모가 진행되었다. (b)에서 마찰계수를 나타낸 것이다. 가압하중이 300N일 때의 마찰계수는 0.41 ~ 0.68이다. 가압하중이 500N에서의 마찰계수는 미끄럼거리가 약 600m의 구간에서는 0.20 ~ 0.45의 큰 진폭을 보이며 그 이후에는 정상마모가 된다.

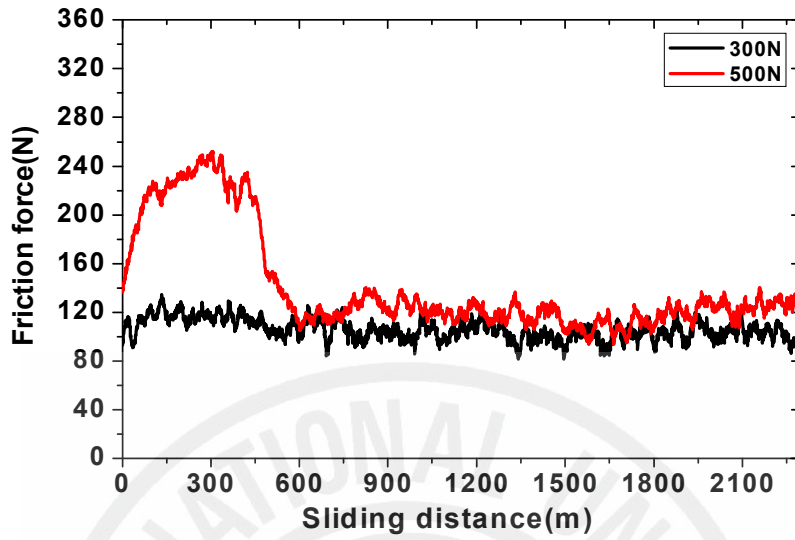


(a) Friction force

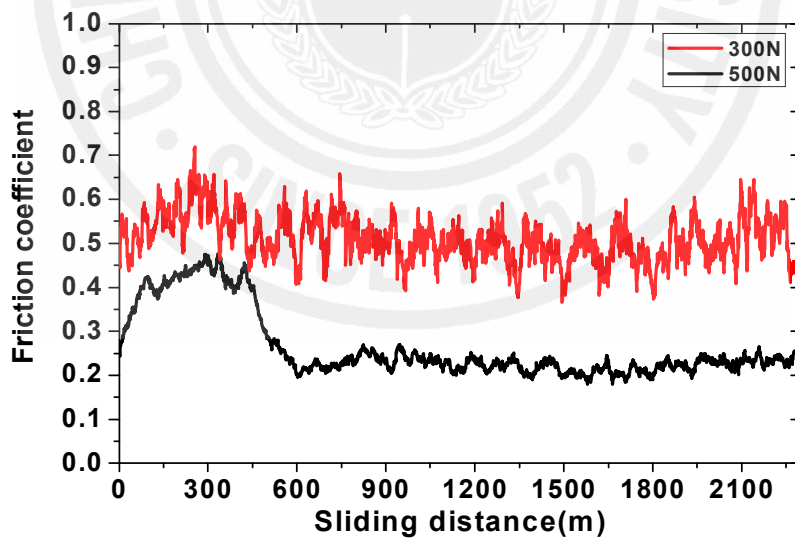


(b) Friction coefficient

Fig. 17 TiO₂ specimen (Air, V=0.1 m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

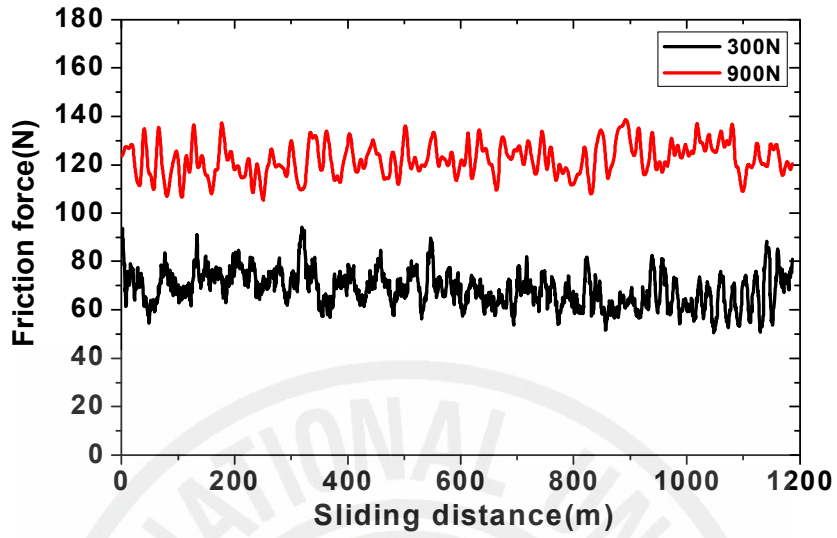
Fig. 18 TiO₂ specimen (Air, V=0.2 m/s)

2.2 그리이스 윤행에서 하중과 속도에 따른 마모거동

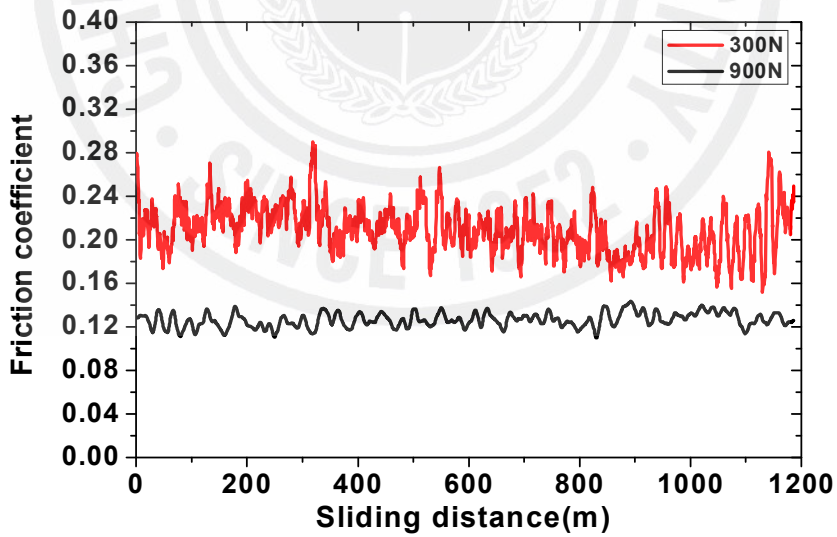
Fig. 19는 그리이스 윤행에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중이 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력은 가압하중 300N일 때 55N ~ 90N의 값이지만 가압하중 900N에서는 마찰력은 110N ~ 135N이 되었다. (b)의 마찰계수는 가압하중 300N일 때 0.17 ~ 0.27이며, 가압하중 900N에서는 약 0.14이다. 그리이스 윤행에서의 마찰계수는 높은 가압하중에서 더 균일하고 작다.

Fig. 20은 그리이스 윤행에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우에 있어서 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)의 마찰력은 가압하중 300N에서 전 미끄럼거리 구간에서 30N ~ 50N으로 균일하다. 가압하중 900N에서 전 미끄럼거리 구간에서 100 ~ 150N의 큰 진폭을 보인다. (b)의 마찰계수는 가압하중 300N에서 0.07 ~ 0.18이며, 가압하중이 900N에서는 0.12 ~ 0.14로서 거의 비슷하다.

미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 와 $V=0.2\text{m/s}$ 에서의 마찰계수를 비교하면, 가압하중 300N, $V=0.1\text{m/s}$ 에서의 마찰계수는 0.17 ~ 0.27이며, $V=0.2\text{m/s}$ 일 때는 0.07 ~ 0.18로서 미끄럼속도가 빠르면 마찰계수의 값이 작다. 가압하중 900N일 때 $V=0.1\text{m/s}$ 에서의 마찰계수는 약 0.14이며, $V=0.2\text{m/s}$ 에서는 0.12 ~ 0.14로서 거의 같다.

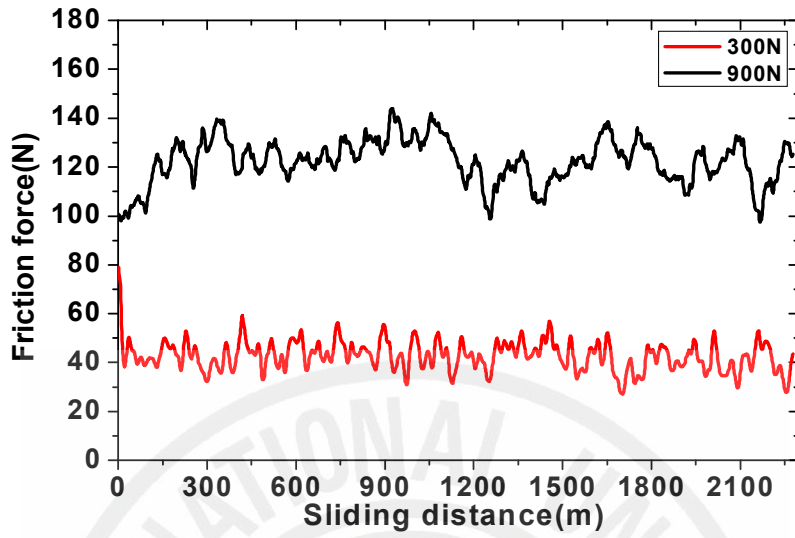


(a) Friction force

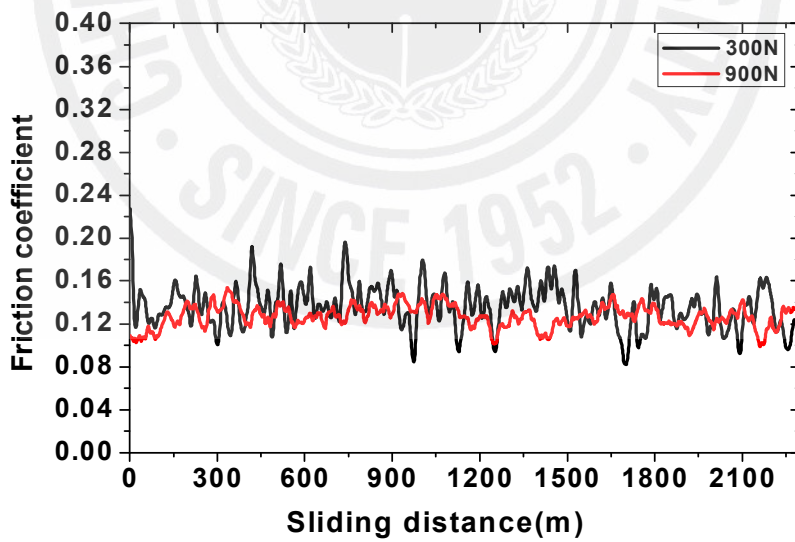


(b) Friction coefficient

Fig. 19 TiO₂ specimen(Grease, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

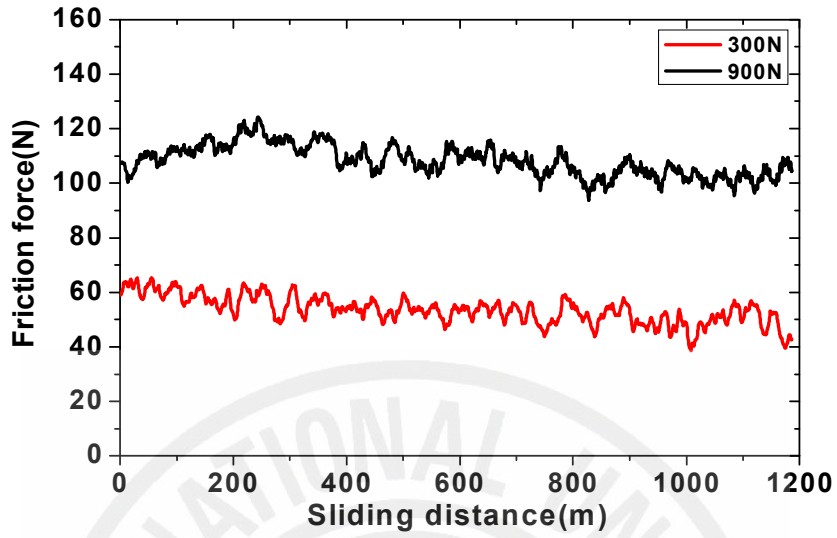
Fig. 20 TiO₂ specimen(Grease, V=0.2m/s)

2.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동

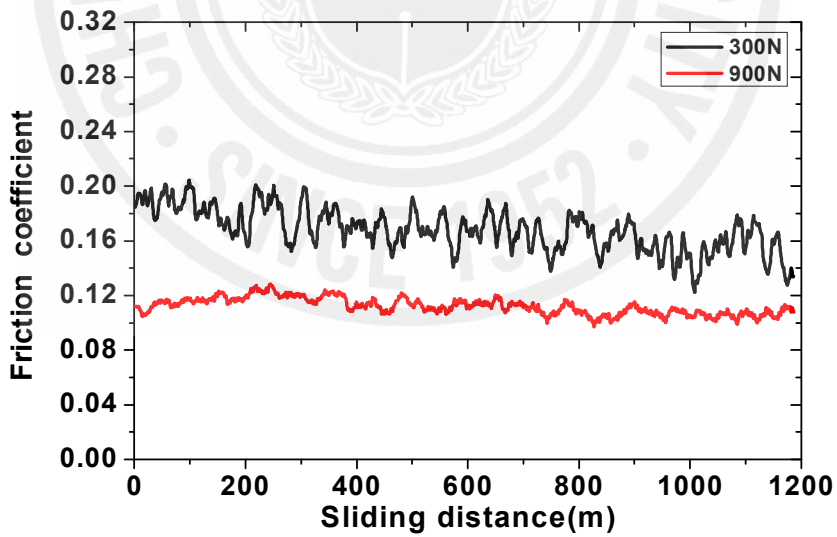
Fig. 21은 베어링유 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중을 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 300N일 때의 마찰력은 60N ~ 40N이고, 가압하중 900N일 때 마찰력은 100N ~ 120N으로 가압하중 300N의 경우보다 증가했다. (b)에서 가압하중 300N의 0.12 ~ 0.21이며, 가압하중 900N에서는 약 0.11로 균일하게 나타낸다.

Fig. 22는 베어링유 중에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중을 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 300N에서의 마찰력은 40N ~ 60N으로 시작되어 35N ~ 45N으로 종료되었으며 가압하중이 900N에서의 마찰력은 70N ~ 85N의 폭으로 시작되어 45N ~ 70N으로 종료되었다. 양쪽 모두 마찰력의 변화는 미끄럼속도가 빠르기 때문에 마모가 진행 되면서 마찰력이 점차 감소하였다. (b)에서 가압하중 300N에서의 마찰계수는 마모초기에는 0.13 ~ 0.18이고, 종료시에는 0.09 ~ 0.15로 되었다. 또 가압하중 900N일 때의 마찰계수 초기에는 0.07 ~ 0.09이고, 종료시에는 0.03 ~ 0.07로 되었다.

베어링유와 그리이스의 윤활을 비교하면 미끄럼속도 0.1m/s , 가압하중 300N에서, 베어링유의 마찰계수는 0.12 ~ 0.21이고, 그리이스에서는 0.17 ~ 0.21이다. 또, 가압하중 900N에서, 베어링유의 마찰계수는 약 0.11이고, 그리이스에서는 약 0.14이다. 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 300N에서, 베어링유의 마찰계수는 0.13 ~ 0.18이고, 그리이스에서는 0.07 ~ 0.18이고 이다. 또, 가압하중이 900N에서 베어링유의 마찰계수는 0.07 ~ 0.09이고, 그리이스에서는 0.12 ~ 0.14이다. 따라서 베어링유가 그리이스보다 내마모성이 양호하다.

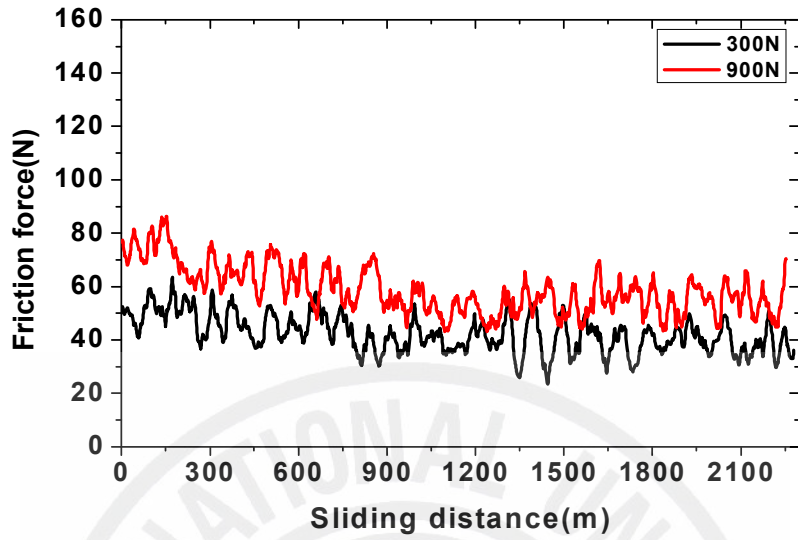


(a) Friction force

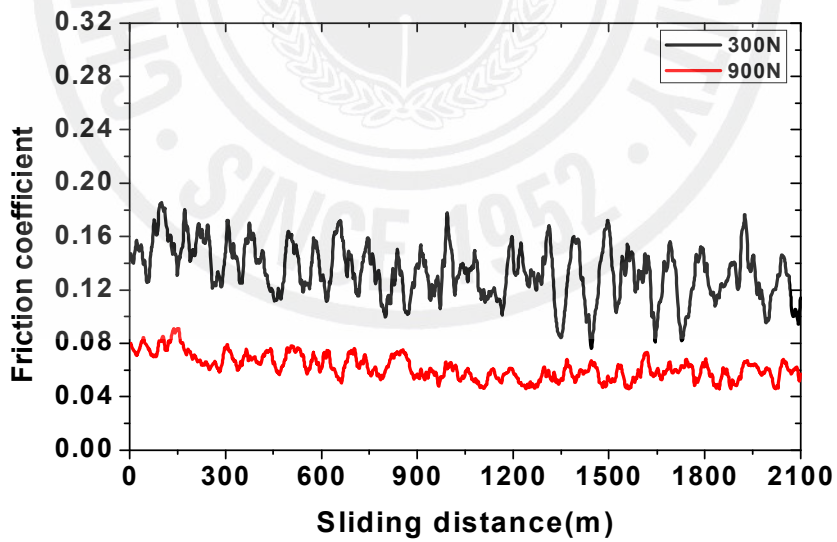


(b) Friction coefficient

Fig. 21 TiO₂ specimen (Bearing oil, V=0.1 m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

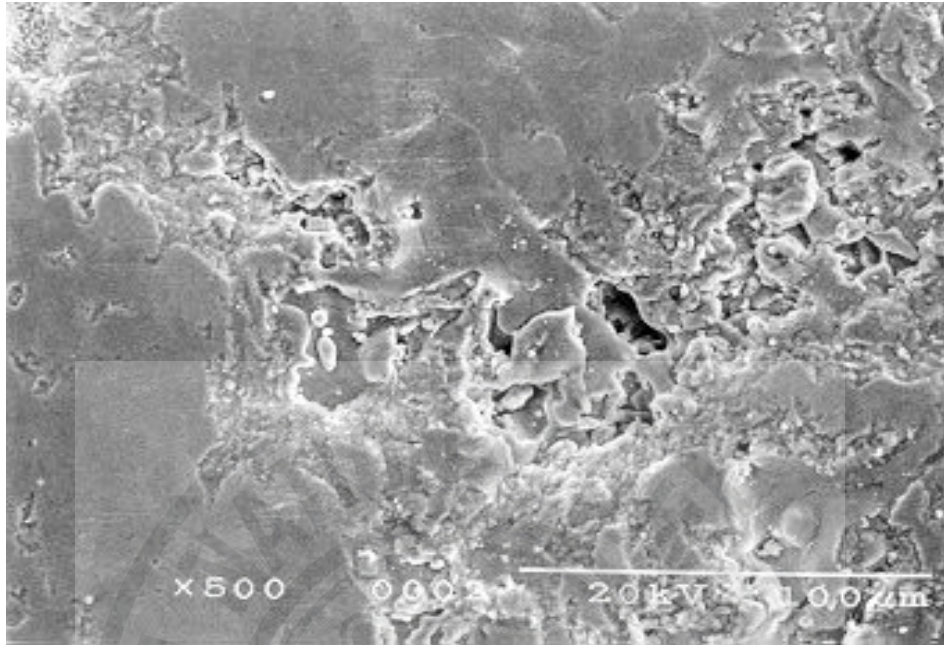
Fig. 22 TiO₂ specimen (Bearing oil, V=0.2m/s)

2.4 마모면의 SEM 관찰

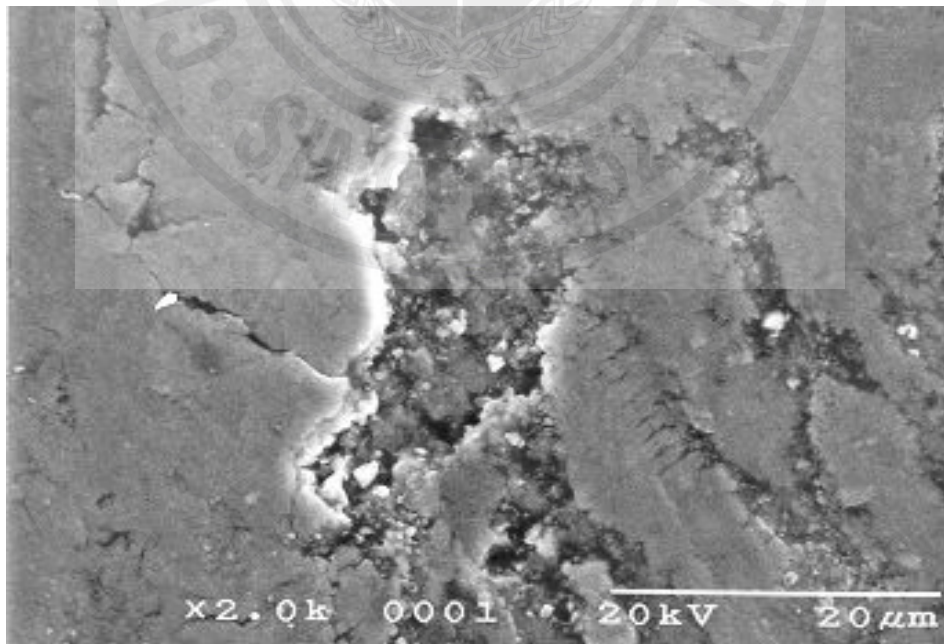
Fig. 23은 공기 중, 그리이스 및 베어링유 중에서 실험한 후의 표면을 관찰한 것이다. (a)는 TiO_2 를 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중 100N으로 실험한 후의 표면을, (b)는 공기 중에서 $V=0.2\text{m/s}$ 로 가압하중이 500N으로 실험한 후의 표면을 나타낸다. 이들에서 관찰되는 것은 부분적으로 마모입자들이 응착되었다가 탈락이 되며 그형상은 가압하중이 크고, 미끄럼속도가 빠를수록 응착면적이 넓게 된다.

(c)는 TiO_2 를 그리이스에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 로 가압하중 900N으로 실험한 후의 표면을 관찰한 것이다. 응착효과가 심화되어서 마모입자들이 미세하게 탈락이 되고 있다. (d)는 그리이스에서 $V=0.1\text{m/s}$ 로 가압하중이 700N으로 실험한 후의 표면을 관찰한 것이며, (e)는 그리이스로 윤활하여 $V=0.2\text{m/s}$ 로 가압하중이 300N으로 실험한 후의 표면을 나타낸다. 마모상태가 마일드(Mild)하게 응착되는 모습이 관찰된다. 마모입자들이 생성되고 그리이스의 응집이 되면 응착된 면이 점차 넓어졌다.

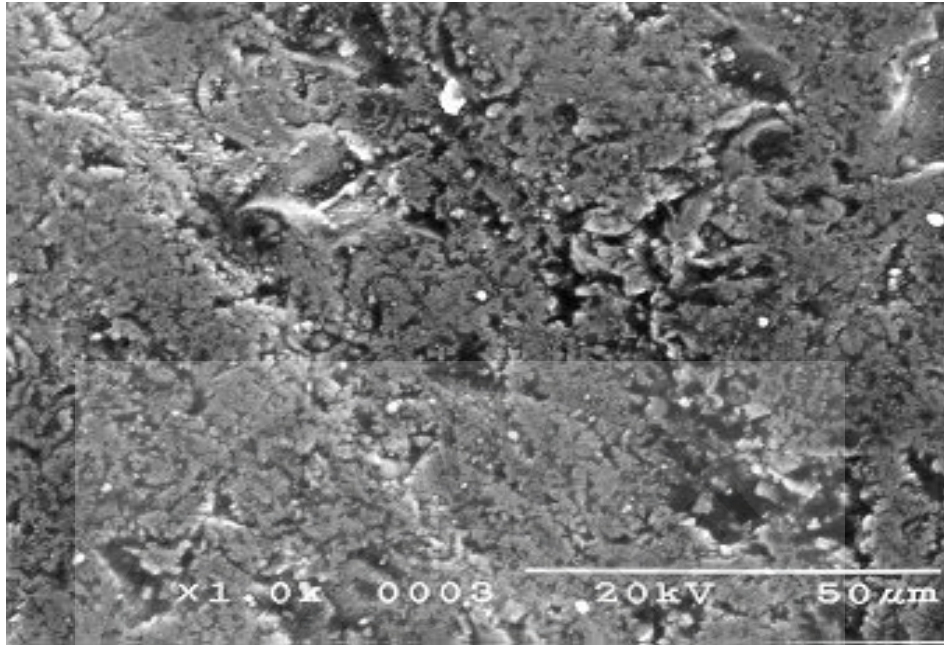
(f)는 베어링유에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 로 가압하중이 300N으로 실험한 후의 표면을 관찰한 것이다. 마모입자들이 응착이 되는 과정을 잘 보여주고 있고, 입자단위의 탈락(Grain pull out)으로 표면손상들이 산재해 있는 모습이 관찰된다. 공기 중에서의 마모기구에는 연삭의 효과보다는 응착마모의 영향이 크고, 그리이스와 베어링유에서는 마일드한 응착마모가 주로 관찰된다.



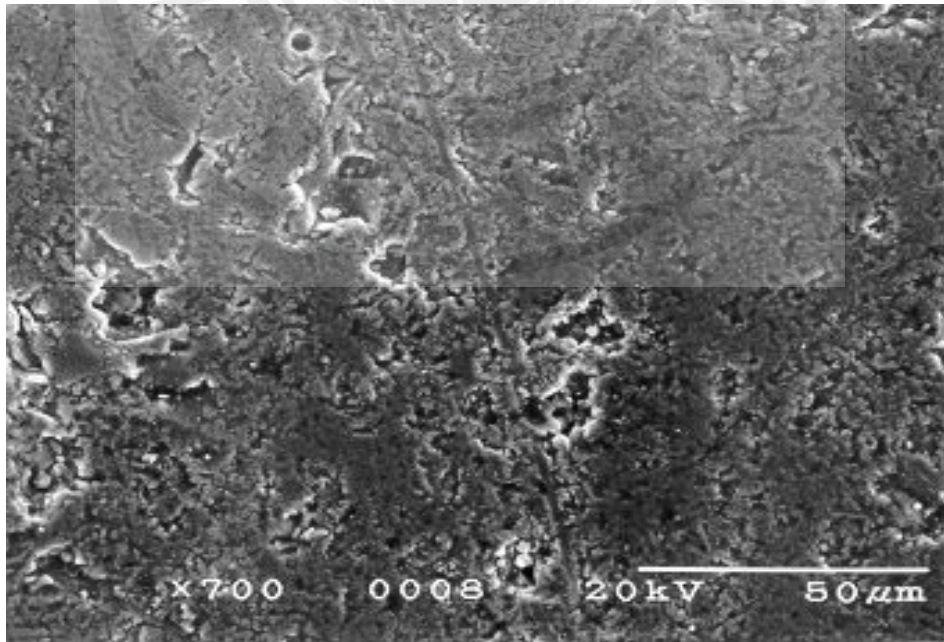
(a) ($V=0.1\text{m/s}$, in air, load=100N)



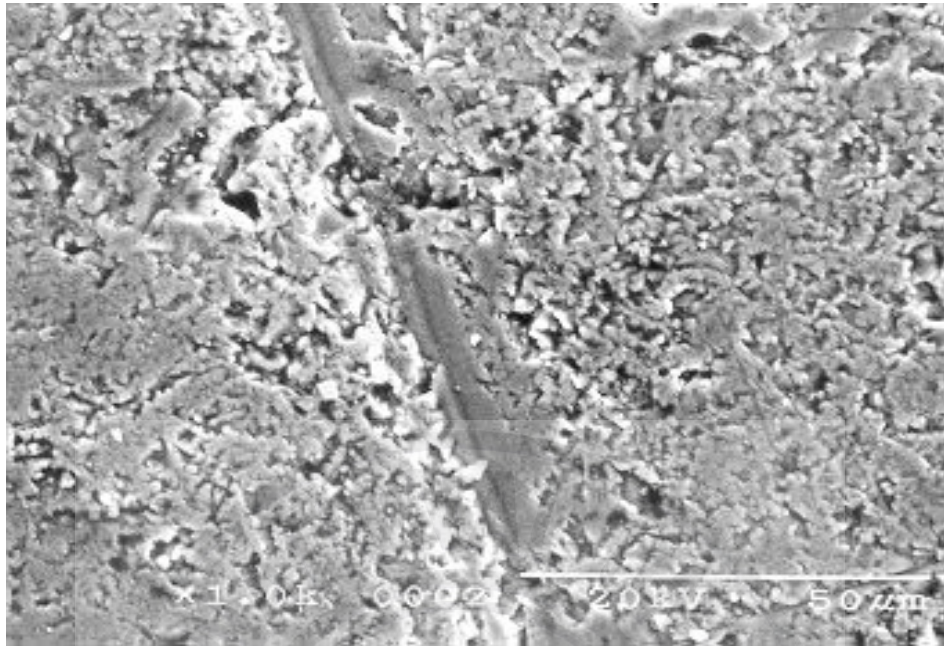
(b) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=500N)



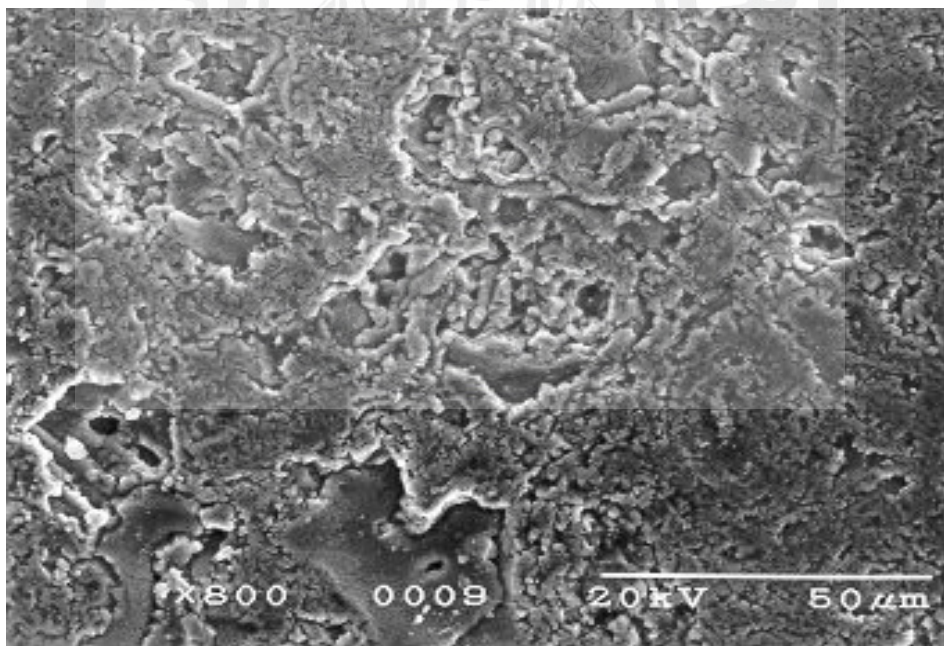
(c) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=900N)



(d) ($V=0.1\text{m/s}$, in grease, load=700N)



(e) ($V=0.2\text{m/s}$, in grease, load=300N)



(f) ($V=0.1\text{m/s}$, in bearing oil, load=300N)

Fig. 23 SEM micrograph of the worn TiO_2 surface

3. Cr₂O₃ 코팅층의 마모 특성

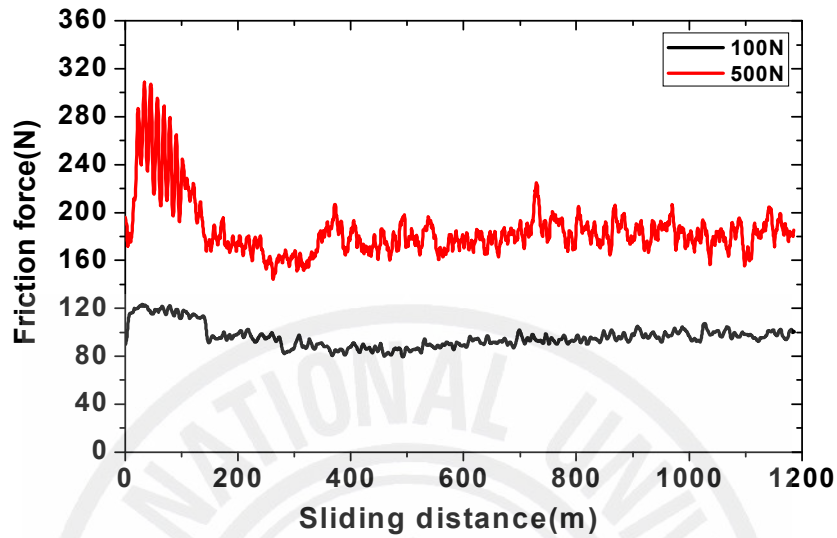
3.1 공기 중에서 하중과 속도에 따른 마모거동

Fig. 24는 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중을 100N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중이 500N일 때의 마찰력은 초기마모가 매우 짧은 미끄럼 거리 약 40m에서 급상승을 하여 약 300N이 되고, 그 이후에는 미끄럼거리 340m 구간에서는 약 150N으로 하강하는 천이영역이 나타나고 있다. 초기마모시에는 연삭의 효과가 크나 그 이후에는 정상마모로 되었다. 또 가압하중이 100N일 때의 마찰력은 약 90N에서 마모가 시작되어 미끄럼거리가 약 150m에서 약 125N로 상승하였고 그 이후에는 마찰력이 점차 상승하면서 정상적인 마모로 된다. (b)에서 가압하중이 100N일 때 마찰계수는 약 0.72에서 시작하여 약 1.05까지 상승하며 그 이후 마찰계수는 안정적이고 균일하였다. 가압하중이 500N에서의 마찰계수는 0.31 ~ 0.58까지의 진폭을 가지며 그 이후에는 0.35 ~ 0.41로 되었다.

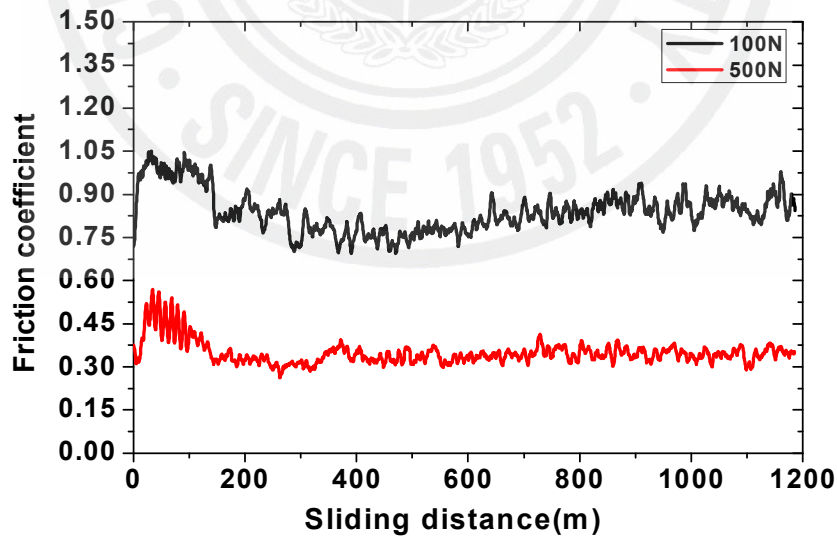
Fig. 25는 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중이 100N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중이 100N일 때의 마찰력은 미끄럼거리가 약 110m의 구간에서 급상승을 하며 그 이후에는 약 120N로 된다. 가압하중이 500N일 때 미끄럼거리가 약 400m에서의 마찰력은 160N ~ 220N으로 되며, 그 이후로는 균일하다. (b)에서 가압하중이 100N일 때의 마찰계수는 0.45 ~ 0.42이며, 가압하중 500N의 마찰계수는 0.27 ~ 0.43이다.

공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 와 $V=0.2\text{m/s}$ 의 변화에 따른 마찰력은 가압하중이 100N일 때 $V=0.1\text{m/s}$ 의 경우에 마찰력은 약 100N이며, $V=0.2\text{m/s}$ 이면 약 130N으로 미끄럼속도가 빠른 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때가 증가하였다. 그러나 가압하중이 500N일 때의 마찰력은 미끄럼속도가 빠른 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때가 오히려 감소하였다. 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 와 $V=0.2\text{m/s}$ 의 변화에서 따른 마찰계수는 가압하중이 100N일 때 $V=0.1\text{m/s}$ 이면 약 0.79이고, $V=0.2\text{m/s}$ 이면 약 0.42로 감소가 되었다. 가압

하중이 500N일 때 $V=0.1\text{m/s}$ 로 0.35 ~ 0.41이었으나, $V=0.2\text{m/s}$ 이면 약 0.28로 감소한다. 따라서 하중이 높고 미끄럼속도가 빨라지면 마찰계수는 감소한다.

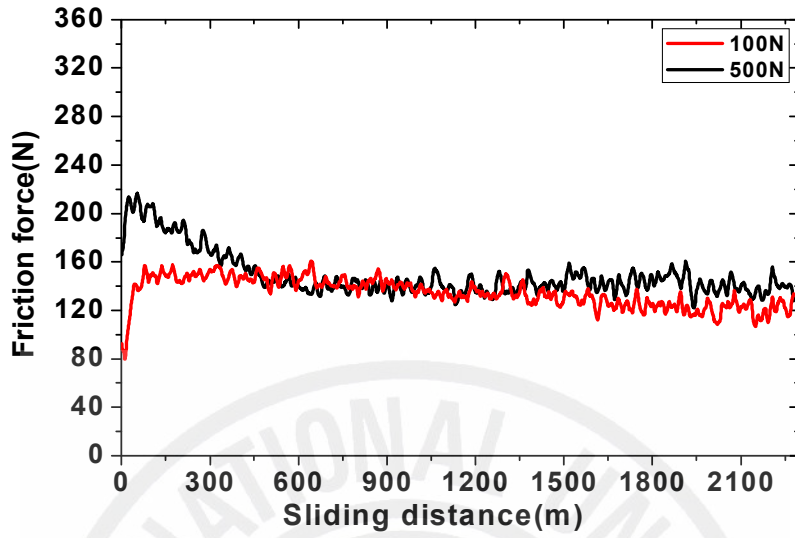


(a) Friction force

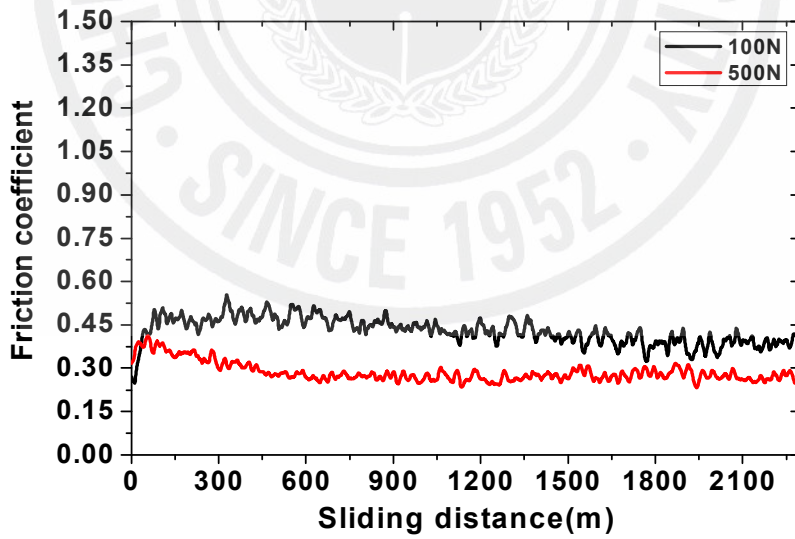


(b) Friction coefficient

Fig. 24 Cr_2O_3 specimen (Air, $V=0.1\text{m/s}$)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

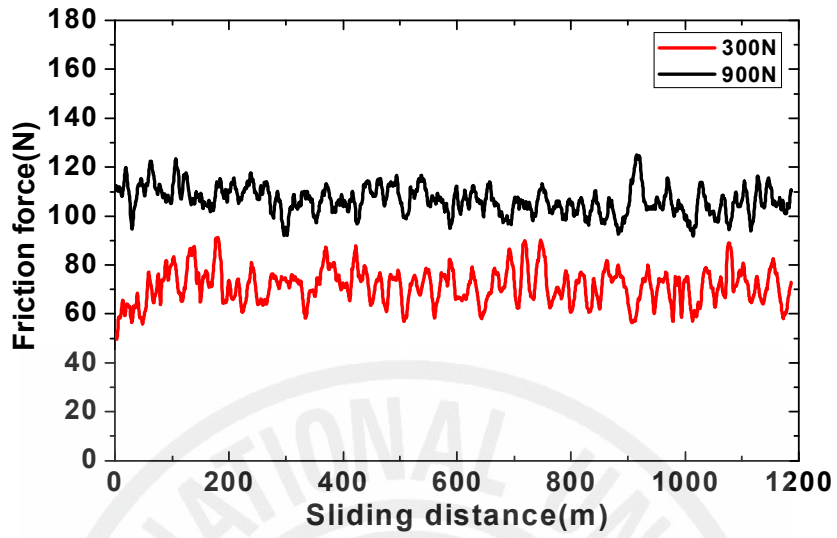
Fig. 25 Cr₂O₃ specimen (Air, V=0.2m/s)

3.2 그리이스 유힬에서 하중과 속도에 따른 마모거동

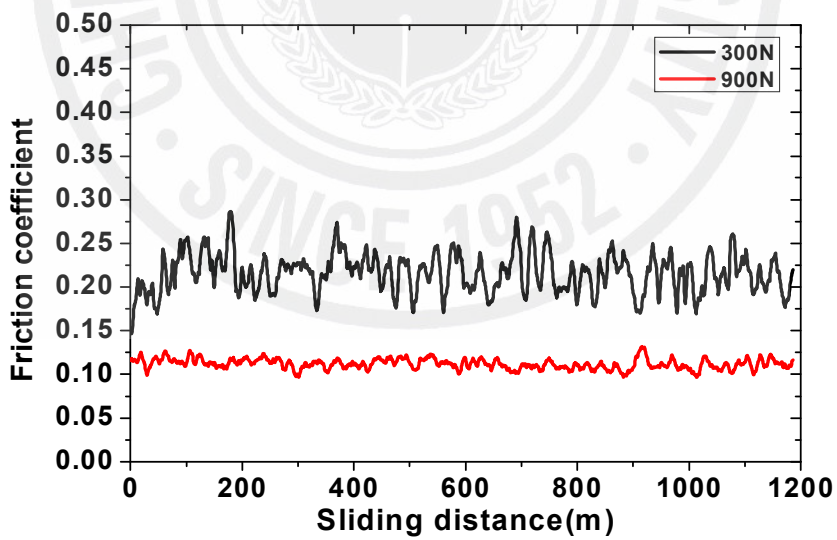
Fig. 26은 그리이스로 유힬하여 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서의 마찰력은 가압하중이 300N이면 60N ~ 90N으로 정상적인 마모거동을 보인다. 가압하중이 900N에서의 마찰력은 100N ~ 110N로 변화하였다. (b)에서의 마찰계수는 가압하중이 300N일 때 0.17 ~ 0.26으로 변화의 폭이 크고 불균일한 마모거동을 보이며, 가압하중이 900N일 때 0.11 ~ 0.12로서 균일한 마모거동을 보인다.

Fig. 27은 그리이스로 유힬에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중을 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 300N일 때의 마찰력은 20N ~ 40N으로 변화의 폭이 안정되고 균일하다. 그러나 가압하중이 900N일 때 미끄럼거리가 약 600m되는 지점에서 마찰력은 마모초기에 70N ~ 130N으로 상승하고, 이 후 마찰력은 90N ~ 110N으로 큰 마모거동을 보인다. 이것은 가압하중 900N이 크고 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 가 빠르기 때문에 나타나는 현상으로서, 900N일 때 Mild한 연삭마모이고 300N에서는 Mild한 응착마모의 형태이다. (b)에서 마찰계수는 가압하중 900N일 때 0.09 ~ 0.11이고, 가압하중 300N일 때 0.06 ~ 0.14로 가압하중이 낮은 경우 마찰계수의 변화의 폭이 크고, 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 보다 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 균일하였다.

미끄럼속도의 변화에 따른 마찰계수를 비교하면 가압하중 300N에서 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때 마찰계수는 0.17 ~ 0.26, $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 마찰계수가 0.06 ~ 0.14로 속도가 빠르면 마찰계수도 감소된다. 또 가압하중 900N이면 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때 마찰계수가 0.11 ~ 0.12, $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 마찰계수가 0.09 ~ 0.11로 속도가 빠르면 마찰계수도 감소한다.

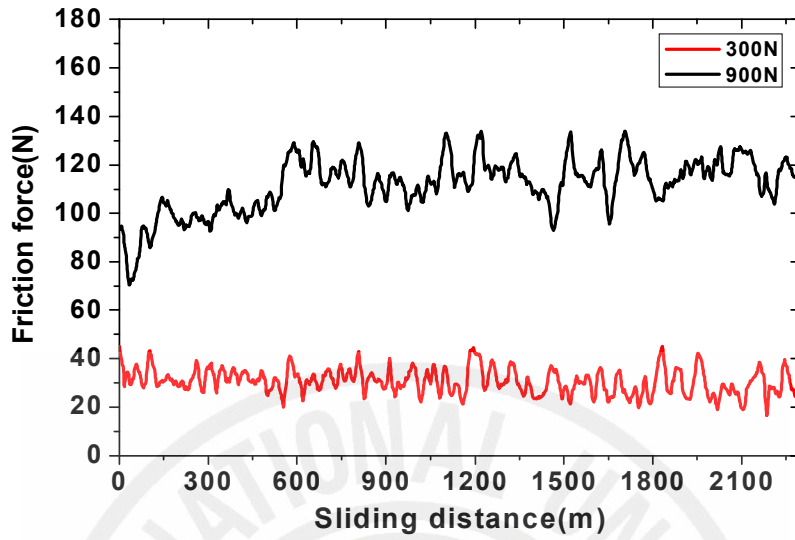


(a) Friction force

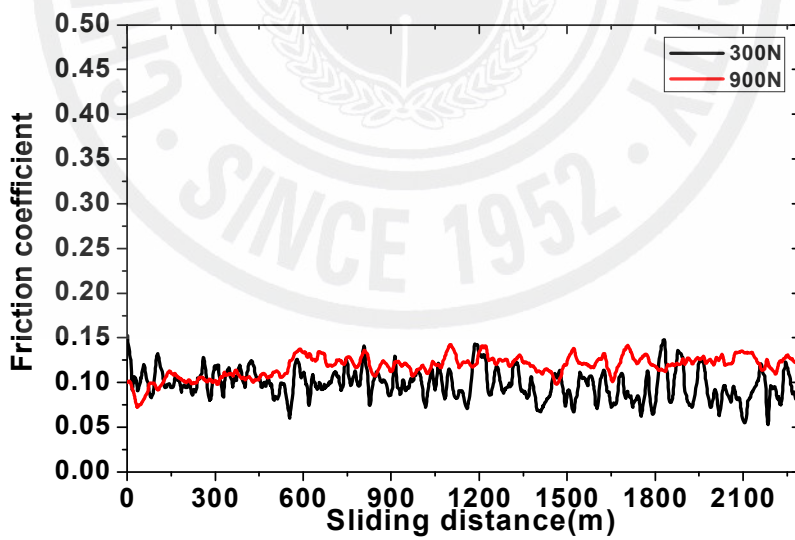


(b) Friction coefficient

Fig. 26 Cr₂O₃ specimen(Grease, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

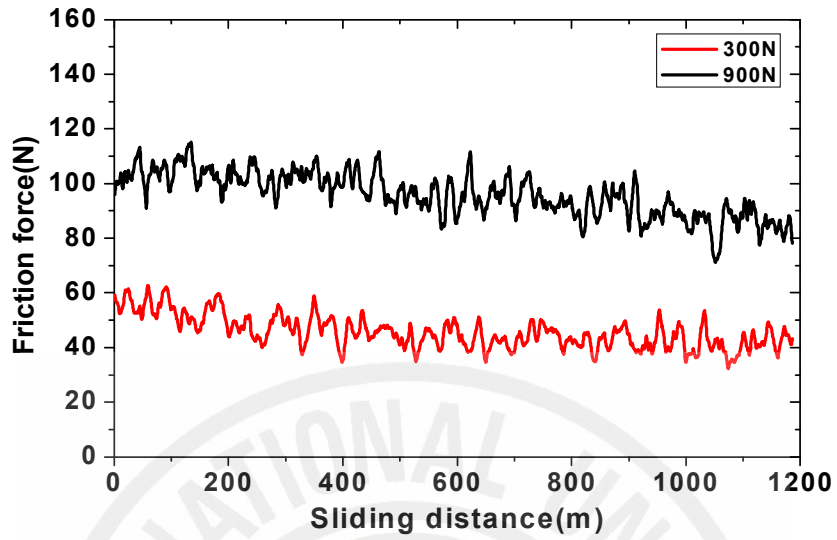
Fig. 27 Cr₂O₃ specimen(Grease, V=0.2m/s)

3.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동

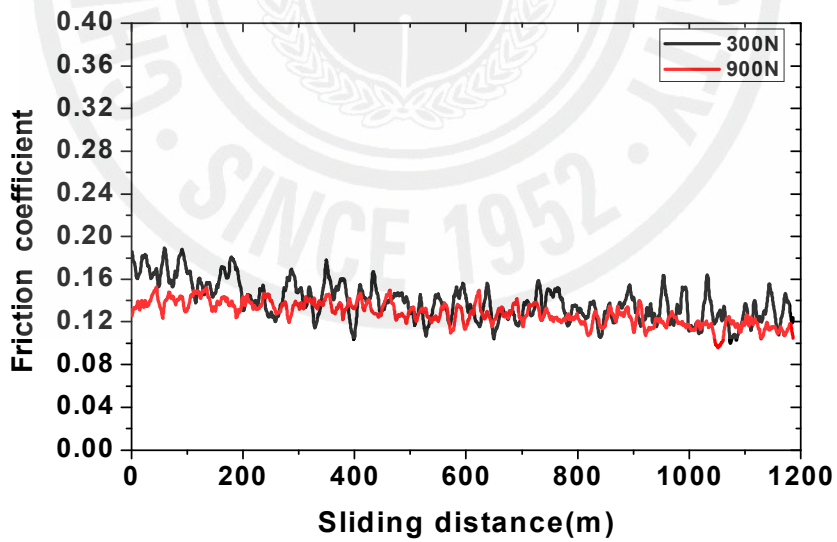
Fig. 28은 베어링유 중에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교했다. (a)에서 마찰력은 가압하중 300N일 때는 50N ~ 60N으로 변화하며 가압하중 900N일 때 90N ~ 110N이 되었다. (b)의 마찰계수는 가압하중 300N일 때 0.16 ~ 0.18로 되고 종료시에는 0.12 ~ 0.16이다. 가압하중 900N일 때는 초기에는 0.12 ~ 0.14고 종료시에는 0.10 ~ 0.12로 되어 균일한 마모형태를 보인다.

Fig. 29는 베어링유의 윤활에서 미끄럼속도가 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 900N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교했다. (a)에서의 마찰력은 가압하중이 300N일 때 마찰력은 40N ~ 50N이며 종료시에는 30N ~ 40N으로 균일한 마모형태를 보인다. 가압하중 900N에서 미끄럼거리가 약 750m되어 약 95N에서 점차 증가하여 약 125N이 되고 약 100N으로 하강하여 이후의 마모형태는 일정한 마모거동을 보였다. (b)에서 마찰계수는 가압하중 300N일 때 0.12 ~ 0.18로 되어 종료시에는 0.10 ~ 0.16이 되었고, 가압하중 900N일 때의 마찰계수는 0.13 ~ 0.15로 균일한 마모형태를 보인다.

따라서 가압하중이 클수록 마찰계수가 작고 균일한 마모형태를 보이며, 미끄럼속도가 증가하면 마찰계수는 감소한다.

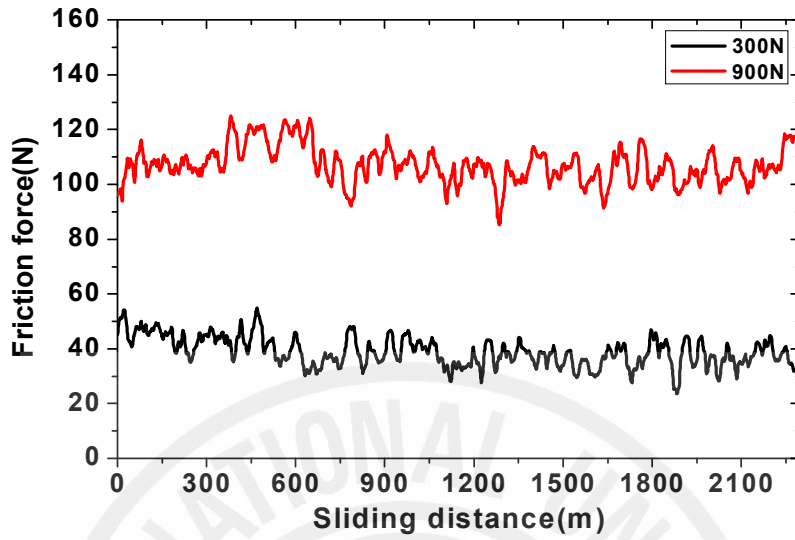


(a) Friction force

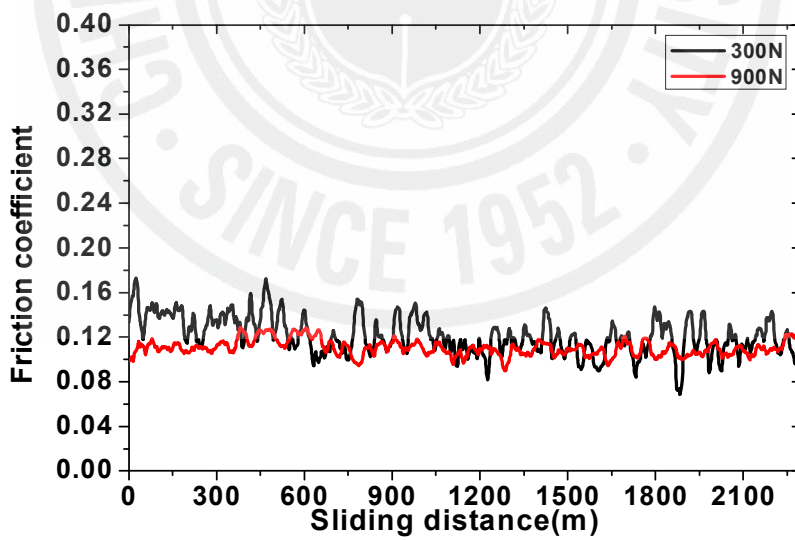


(b) Friction coefficient

Fig. 28 Cr₂O₃ specimen(Bearing oil, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

Fig. 29 Cr₂O₃ specimen(Bearing oil, V=0.2m/s)

3.4 마모면의 SEM 관찰

Fig. 30은 공기 중, 그리이스 중, 베어링유 중에서의 경우로 실험한 후의 표면을 관찰했다. (a)는 Cr_2O_3 를 공기 중에서 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 100N의 경우이다. 마모 면은 기공을 포함하는 많은 표면결함을 보인다. 이것은 마모과정에 표면균열(Surface crack)이 발생되고 전단력으로 균열이 생긴다. (b)는 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 500N의 경우이다. 표면균열이 가압하중으로 전단하중을 받아 접촉하중점이 이동함으로써 박리마모가 발생하여 압착된 마모면의 형태로 나타난다. Cr_2O_3 의 마모에서 마모입자들의 형성은 하중, 미끄럼거리, 미끄럼 속도, 재료표면의 거칠기 및 마찰특성, 윤활유 등 많은 조건에 따라 좌우되며[18, 19] 마모입자가 탈락된 부분에서 표면균열이 발생하여 이탈이 되며 미끄럼속도가 큰 조건에서 심하게 압착형태의 마모면이 된다.

(c)는 그리이스에서 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중 300N으로 부하한 경우이며, (d)는 $V=0.2\text{m/s}$ 로 가압하중이 300N으로 부하한 경우의 표면을 관찰한 것이다. 마모 면은 매끈한 표면위에 응착되거나 떨어져 나가는 미끄럼마모가 되면서 응착마모(Adhesive wear)와 박리마모(Delamination wear)형태로 나타난다.

(e)는 베어링유로 윤활하고 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중 300N으로 부하한 경우, (f)는 미끄럼 속도 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 900N으로 부하한 경우의 표면을 관찰한 것이다. 이들은 응착마모의 영향으로 마모된 면에 흡착이 되면서 마모입자의 량(면적 및 색깔의 짙은 것)이 커졌으며 베어링유의 혼입으로 자기윤활작용이 더욱 가속화 되었다.

Cr_2O_3 의 마모기구로서 소성변형, 균열형성, 피로에 의한 스폐링(Spalling), 표면파괴, 물질전이(Material transfer) 등이 있다[20, 21]. 그리이스나 베어링유의 윤활에서 고정시험편과 회전시험편에서 떨어져 나온 마모입자들과 제 3의 입자(의도적으로 계면에 직접 주입된 오일에 섞이어 이루어진 입자)사이에서 구름현상(Rolling)이 발생한다. 이것이 마찰계수를 감소시키며 접촉하는 두 물체가 상대운동을 할 때 윤활상태에서 작동하고 있다. 접촉면에서의 기계적 손실에 의한 효율저하, 마모, 소음 등의 문제를 최소화 되도록 유체윤활 상태를 유지하는 것이 필요하다[22].



(a) ($V=0.1\text{m/s}$, in air, load=100N)



(b) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=500N)



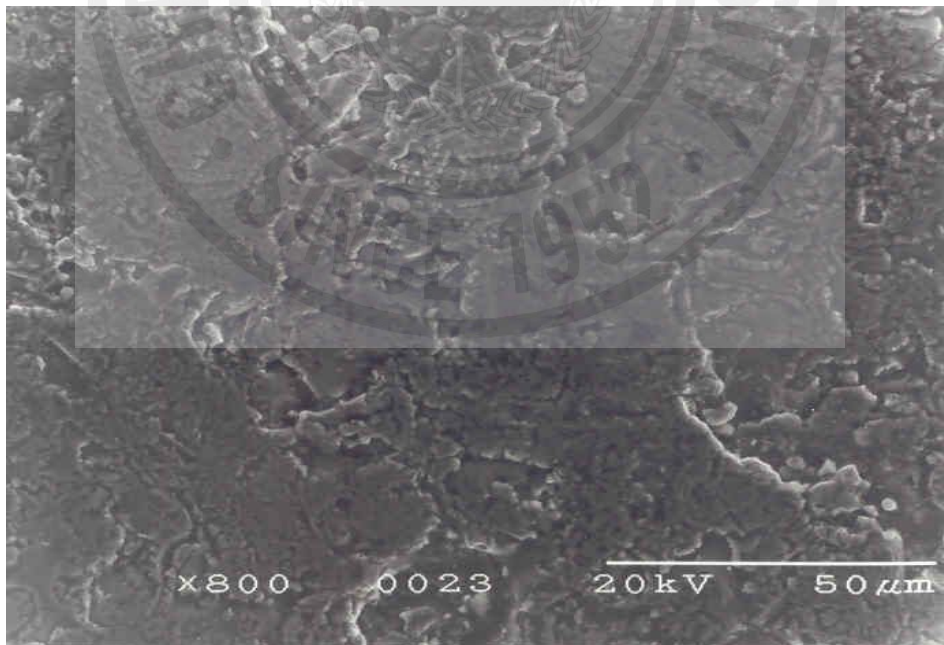
(c) ($V=0.1\text{m/s}$, in grease, load=300N)



(d) ($V=0.2\text{m/s}$, in grease, load=300N)



(e) ($V=0.1\text{m/s}$, in bearing oil, load=300N)



(e) ($V=0.2\text{m/s}$, in bearing oil, load=900N)

Fig. 30 SEM micrograph of the worn Cr_2O_3 surface

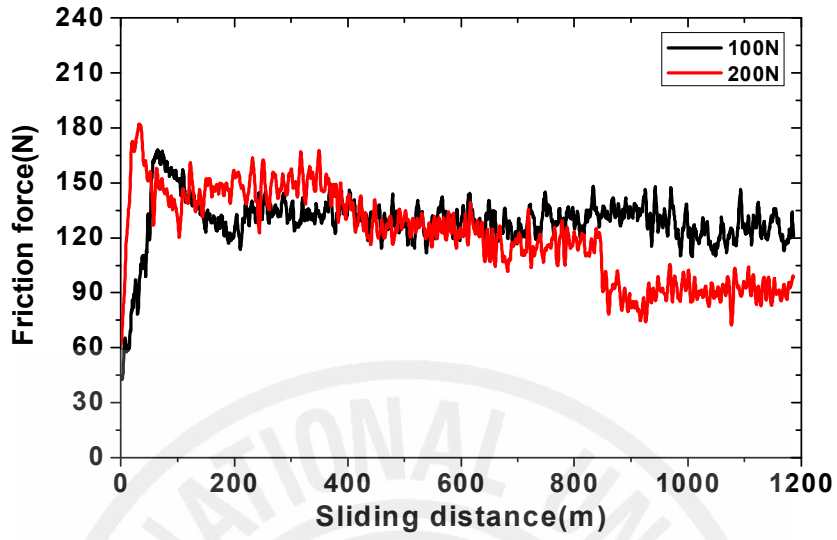
4. ZrO₂ 코팅층의 마모 특성

4.1 공기 중에서 하중과 속도에 따른 마모거동

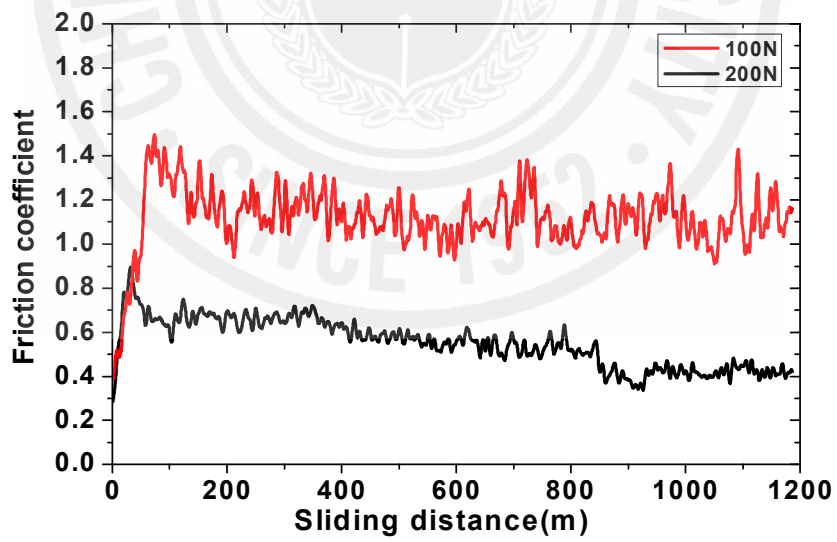
Fig. 31은 공기 중에서 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 100N과 200N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 100N일 때 마찰력은 미끄럼거리가 약 200m까지 초기에 약 45N에서 상승하여 약 160N으로 되고 다시 하강하여 약 115N이 되는 천이영역이 나타났다. 특히 가압하중이 200N일 때의 마찰력은 3개의 천이영역이 있다. 제1 천이영역은 마찰력이 약 100m인 곳에서 약 180N으로 상승하고 약 120N으로 하강할 때의 구간이며, 제2 천이영역은 마찰력이 약 450m되는 지점에서 약 160N으로 상승하고 약 130N으로 하강할 때의 구간이고, 제3 천이영역은 약 930m인 지점에서 마찰력은 약 85N으로 상승하다가 하강하는 구간이다. 그 후로 마찰력은 약 90N으로 정상마모가 되었다. 천이영역 구간이 많은 것은 건 마찰 상태에서 화학적조건과 습도의 차이, 마찰열이 발생, 기계적 성질, 합금상태도 등에 대한 조건들이 복잡하게 작용하기 때문이다.

(b)에서 가압하중 100N일 때 마찰계수는 미끄럼거리 약 230m구간에서 약 1.49에서 약 0.92로 하강하는 천이영역이 나타내고 그 이후에는 거의 균일하다. 또 가압하중 200N일 때 미끄럼거리가 약 30m구간에서 마찰계수는 약 0.92정도로 상승하며, 그 이후의 마찰계수는 0.41~ 0.62로 나타났다.

Fig. 32는 공기 중에서 미끄럼속도가 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 100N과 200N으로 부하한 경우의 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 100N일 때의 마찰력은 약 120N으로 된다. 가압하중이 200N일 때 마찰력은 약 450m의 구간에서 약 145N되고 그 이후 미끄럼거리가 약 1050m의 구간에서는 약 90N이 되었다. 미끄럼속도가 빠른 $V=0.2\text{m/s}$ 에서의 마찰력이 $V=0.1\text{m/s}$ 보다 낮은 값이 나타난다. (b)에서 가압하중 100N일 때 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 의 경우 마찰계수는 0.9 ~ 1.3이며 가압하중 200N일 때는 0.35 ~ 0.57로 가압하중 100N의 경우가 200N의 경우보다 증가하였다.

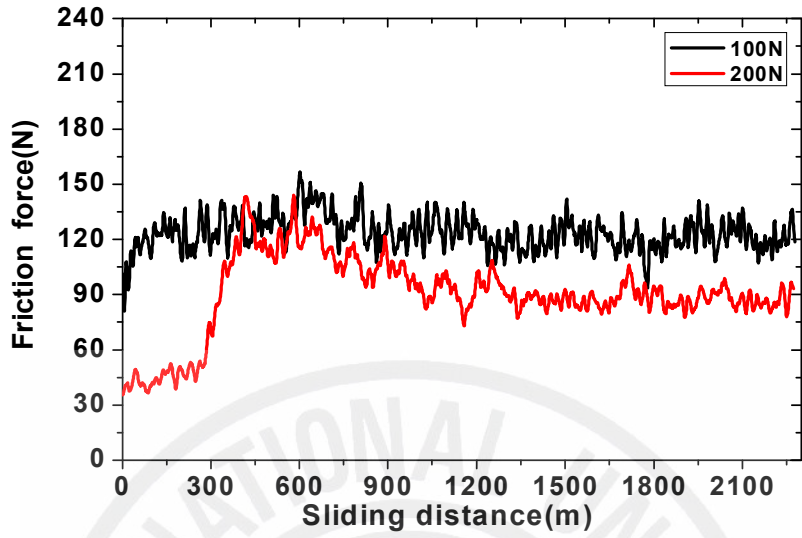


(a) Friction force

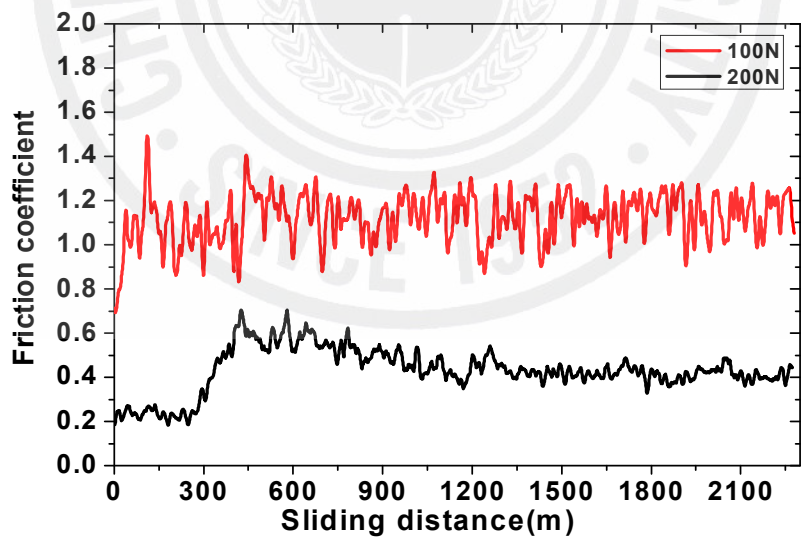


(b) Friction coefficient

Fig. 31 ZrO₂ specimen (Air, V=0.1 m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

Fig. 32 ZrO₂ specimen (Air, V=0.2m/s)

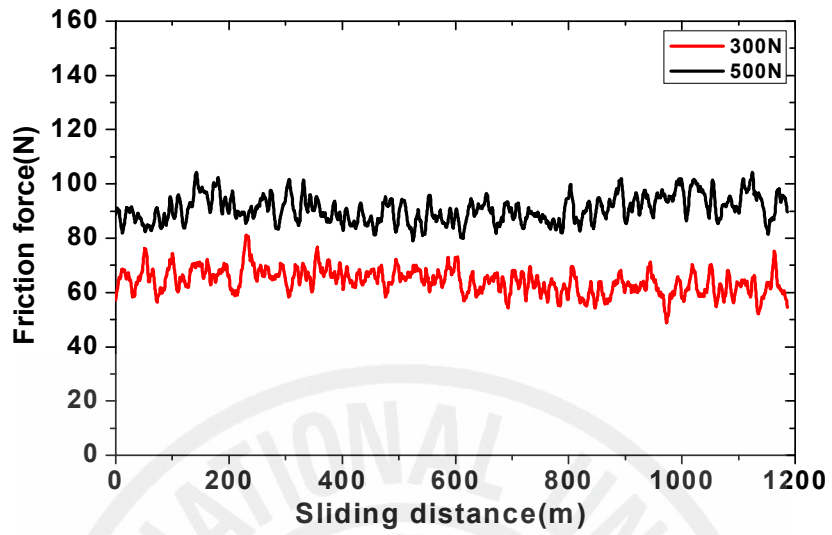
4.2 그리이스 윤회에서 하중과 속도에 따른 마모거동

Fig. 33은 그리이스 윤회에서 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중이 300N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다.

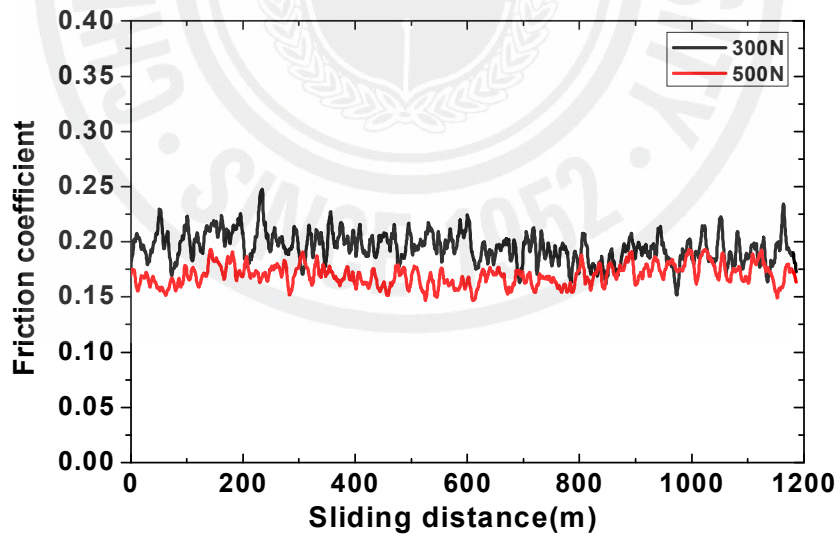
(a)에서 가압하중 300N일 때 마찰력은 65N ~ 75N으로 되어 가압하중이 높을수록 마찰력은 크다. 가압하중이 500N일 때 마찰력은 80N ~ 100N으로 안정된 마모거동을 보였다. (b)에서 가압하중 300N일 때에 마찰계수는 0.19 ~ 0.23이고, 가압하중 500N일 때 마찰계수는 0.17 ~ 0.18로 가압하중이 크면 마찰계수는 작다.

Fig. 34는 그리이스 윤회에서 미끄럼속도가 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중이 300N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다. (a)에서 가압하중 300N일 때의 마찰력은 55N ~ 65N으로 균일한 모습을 보였다. 가압하중 500N일 때 마찰력은 마모초기에 60N ~ 75N으로 시작되어 미끄럼거리가 증가할수록 커진다. 이 때 마찰력이 95N ~ 105N이었고 이 후부터는 하강하여 70N ~ 85N으로 종료된다. (b)에서 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$ 에서 가압하중 300N일 때 마찰계수는 0.15 ~ 0.24이며 가압하중 500N일 때 마찰계수는 0.13 ~ 0.18이다.

한편 미끄럼속도 증가에 따른 마찰계수의 변화는 $V=0.1\text{m/s}$ 때와 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때 마찰계수 증감은 없었다. 미끄럼속도가 빠르면 마찰계수는 감소한다.

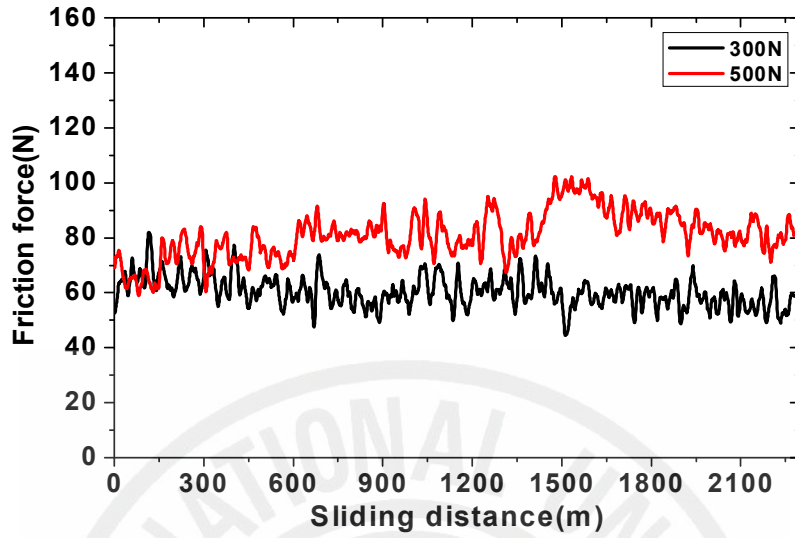


(a) Friction force

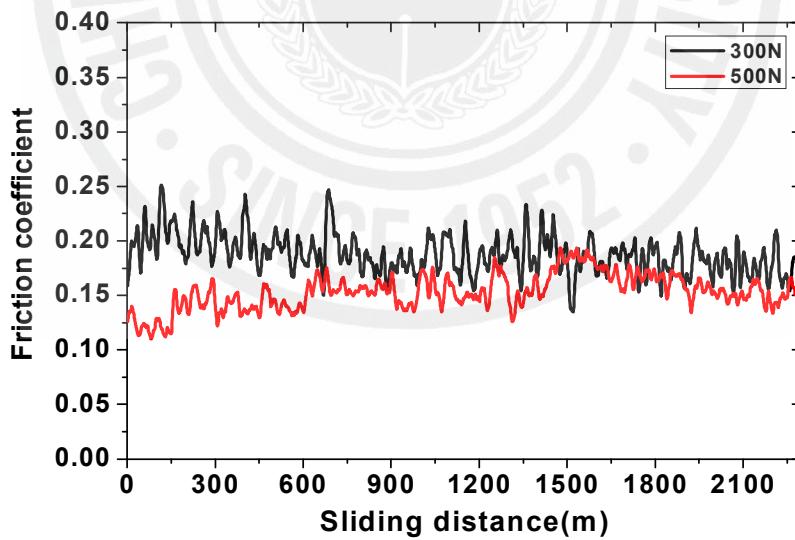


(b) Friction coefficient

Fig. 33 ZrO₂ specimen(Grease, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

Fig. 34 ZrO_2 specimen (Grease, $V=0.2\text{m/s}$)

4.3 베어링유 윤활에서 하중과 속도에 따른 마모거동

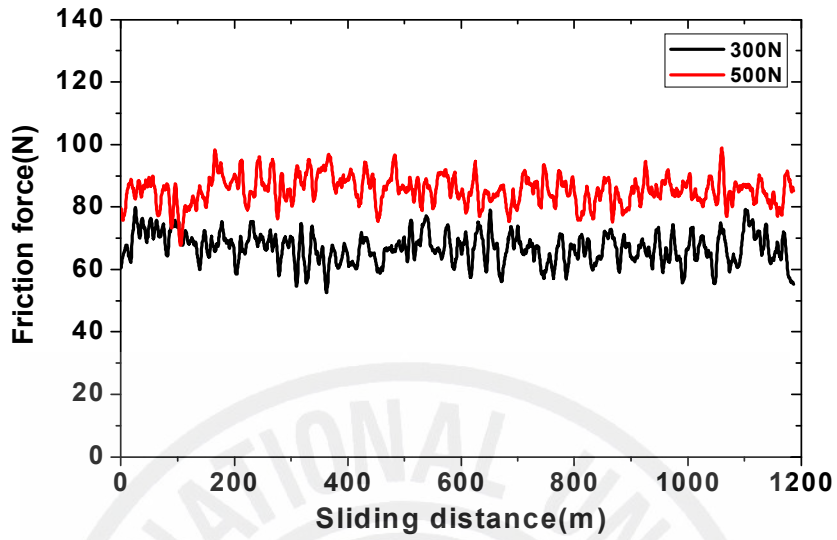
Fig. 35는 베어링유 윤활로 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다.

(a)에서 가압하중 300N일 때 마찰력은 55N ~ 70N으로 변화하며, 가압하중 500N일 때는 80N ~ 90N이 되어 양호한 마모상태를 보였다. (b)에서 가압하중이 300N일 때의 마찰계수는 0.18 ~ 0.25로 되고, 가압하중 500N일 때 0.14 ~ 0.17로 되어 균일한 마모형태를 보인다. 이는 베어링유에서는 유체윤활의 상태가 되기 때문이다[23].

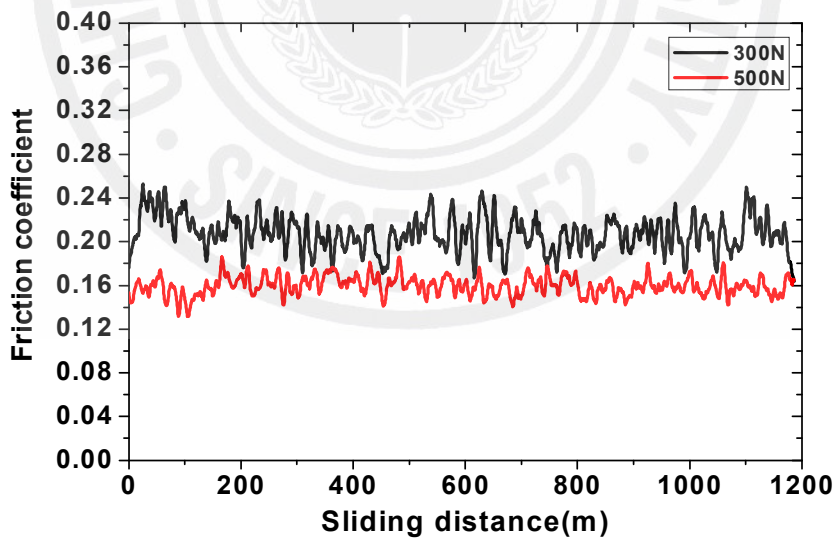
Fig. 36은 베어링유 윤활에서 미끄럼속도가 $V=0.2\text{m/s}$ 일 때, 가압하중 300N과 500N으로 부하한 경우 미끄럼거리에 따른 마찰력과 마찰계수를 비교한 것이다.

(a)에서 가압하중 300N인 경우의 마찰력은 45N ~ 50N으로 되고, 가압하중 500N일 때 마찰력은 60N ~ 75N으로 거의 일정하다. (b)에서 마찰계수는 가압하중 300N일 때 약 0.20으로 균일한 형태를 보이며, 가압하중이 500N일 때 마찰계수는 약 0.08이 되었다.

베어링유 중의 미끄럼속도의 변화에 따른 마찰계수를 비교해보면 $V=0.1\text{m/s}$ 에서 가압하중 300N의 마찰계수는 0.18 ~ 0.25, 가압하중 500N일 때 마찰계수는 0.14 ~ 0.17이다. $V=0.2\text{m/s}$ 에서 가압하중 300N일 때 마찰계수는 약 0.20, 가압하중 500N일 때 약 0.18이다. 따라서 마찰계수는 $V=0.2\text{m/s}$ 로 빨라지면 높은 가압하중 500N일 때에 감소했다. 한편, 윤활환경에서의 미끄럼속도의 변화에 따른 마찰계수를 비교하면 $V=0.1\text{m/s}$ 로 가압하중 300N일 때 그리이스 윤활이면 약 0.21, 베어링유 윤활이면 약 0.18로 되었으며, $V=0.2\text{m/s}$ 로 가압하중 500N일 때 마찰계수는 그리이스 윤활이면 0.12 ~ 0.16, 베어링유의 윤활이면 약 0.08로서 ZrO_2 의 마모거동에서 마찰계수의 감소는 베어링유 윤활이 우수한 것으로 판단했다.

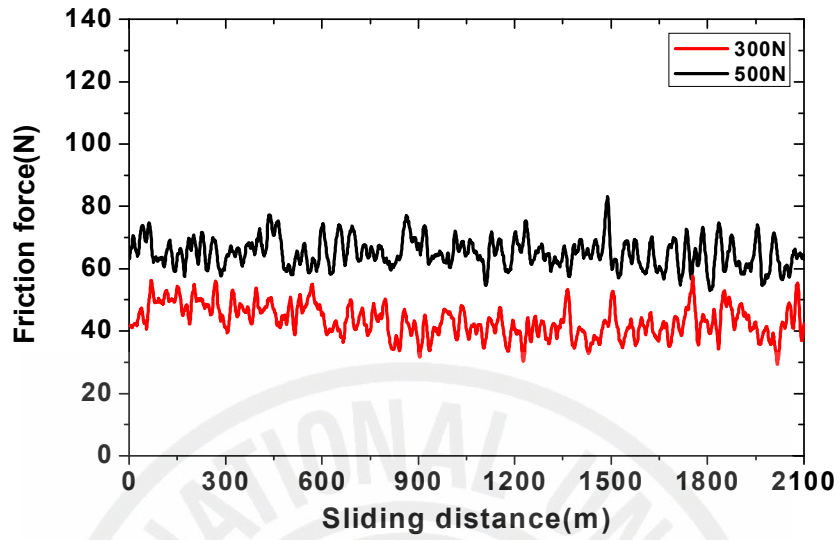


(a) Friction force

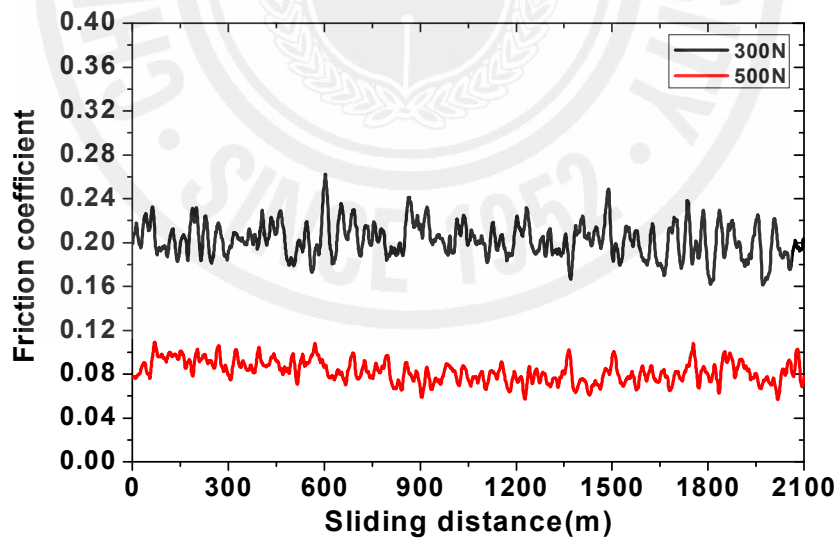


(b) Friction coefficient

Fig. 35 ZrO₂ specimen (Bearing oil, V=0.1m/s)



(a) Friction force



(b) Friction coefficient

Fig. 36 ZrO₂ specimen (Bearing oil, V=0.2m/s)

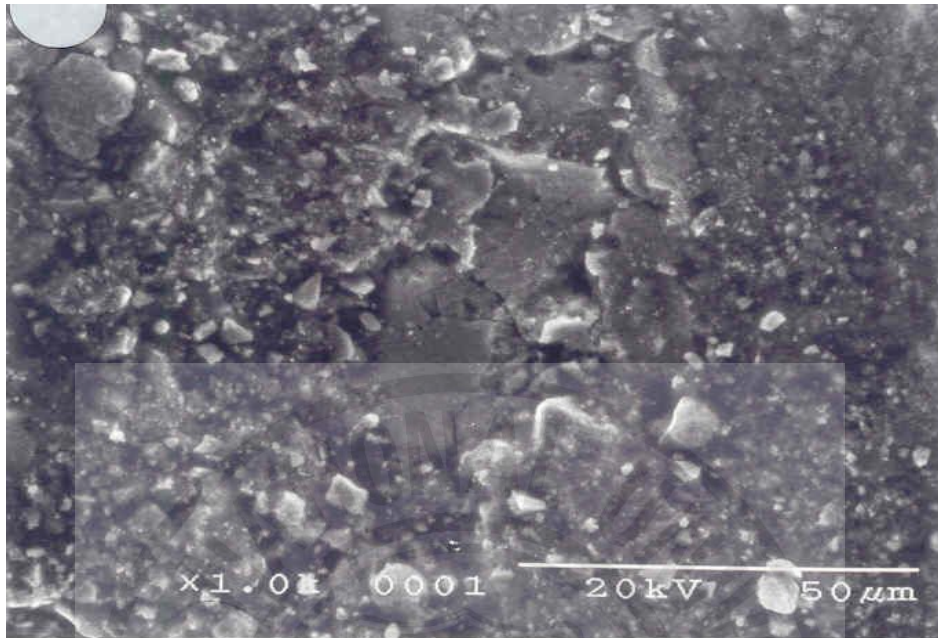
4.4 마모면의 SEM 관찰

Fig. 37은 공기 중, 그리이스 중, 베어링유 중으로 실험한 후의 면을 관찰한 것이다. (a)는 공기 중에서 $V=0.1\text{m/s}$ 로 가압하중 100N의 경우, (b)는 가압하중을 200N으로 한 경우이다. 코팅 층의 마모 면에서는 압축하중과 전단하중이 접촉된 부분에서 이탈되며 파괴된 표면균열이 나타났다. 이는 ZrO_2 를 코팅한 분말 크기가 큰 구상 형이므로 플라즈마 용사 코팅 했을 때 5% Al-Ni의 본드코팅과 탑코팅 분말인 ZrO_2 사이의 분말크기의 차이로 인하여 경계면에서 응력집중과 균열이 생성 및 진전으로 입자들이 쉽게 이탈되는 것이라고 생각된다. 따라서 가압하중이 100N인 마모입자가 면적이 작은 상태로 빠르게 이탈되어졌으나 가압하중을 200N일 때는 마모입자의 단위면적이 큰 상태로 이탈되어졌다. 마모입자들이 생성되는 즉시 이탈이 되는 것은 연삭마모로 볼 수 있고 건조마찰을 수행하는 중에 Mild한 연삭마모(Abrasive wear)라고 할 수 있다[24].

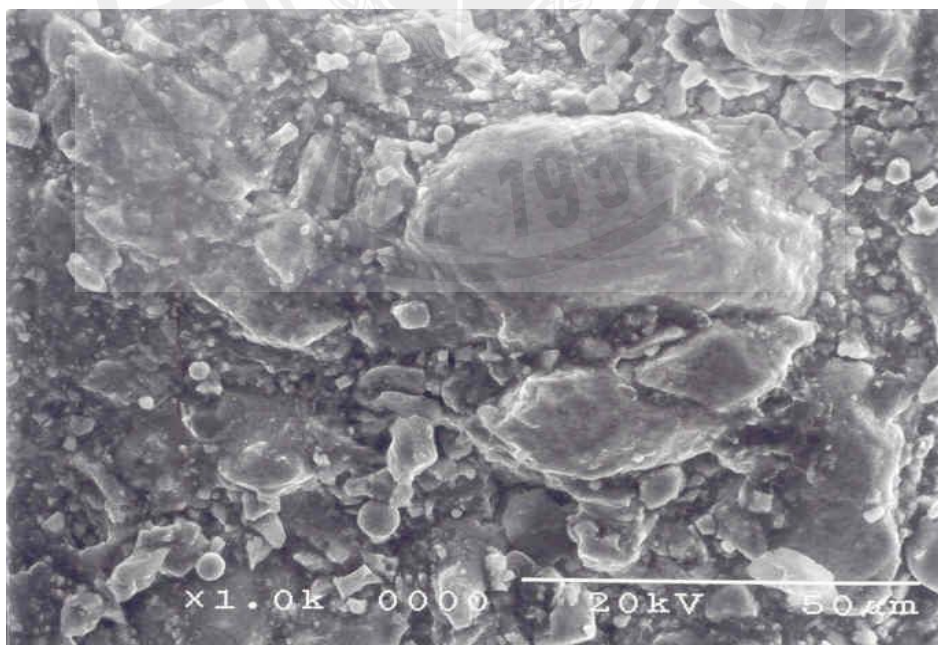
(c)와 (d)는 공기 중에서 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 100N일 때의 경우이다. 앞의 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 에서의 마모거동과는 뚜렷한 차이를 보인다. 고정시험편이 회전시험편의 표면을 긁으며 지나간 골(Groove)이 많이 관찰되고 있고 미끄럼속도가 빠르게 되어 시비어 연삭마모(Severe abrasive wear)가 관찰되었다.

(e)와 (f)는 그리이스로 윤활하여 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 에서 가압하중 300N과 500N의 경우이다. 두 종류 모두 전체적으로 균일한 상태로 마모입자들이 생성되고 탈락되며 마모입자들이 작고 불규칙하게 탈락이 되고 있다. 이것은 마모면에서 금속인 고정시험편이 계속 ZrO_2 의 입자들을 떼어내는 연삭마모이다. ZrO_2 를 코팅한 회전시험편에 금속인 고정시험편이 상대적으로 표면을 긁어주는 형태를 보여준다.

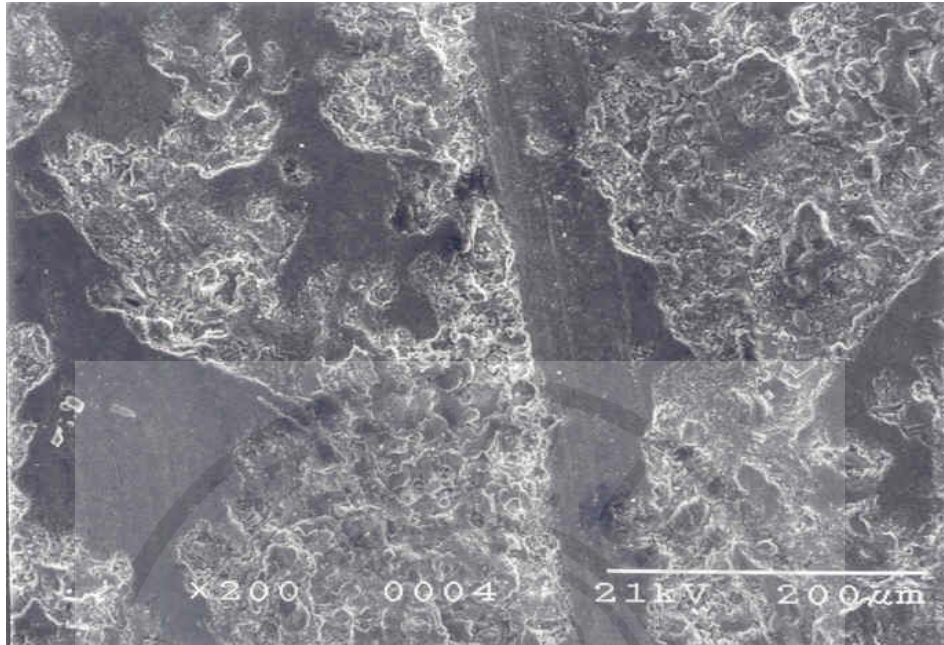
(g)는 베어링유 윤활로 $V=0.1\text{m/s}$, 가압하중이 700N인 경우, (h)는 베어링유의 윤활로 $V=0.2\text{m/s}$, 가압하중 500N의 경우이다. 이들에게서 마모입자들이 계속적으로 미소표면을 떼어내는 상태이고 따라서 탈락이 되는 현상으로 고정시험편보다 회전시험편인 ZrO_2 코팅 층에서 심하게 일어났다. 따라서 콘(cone)형상의 울퉁불퉁한(Asperity)요소들이 점차 표면파괴가 계속되고 표면으로부터 이탈된다.



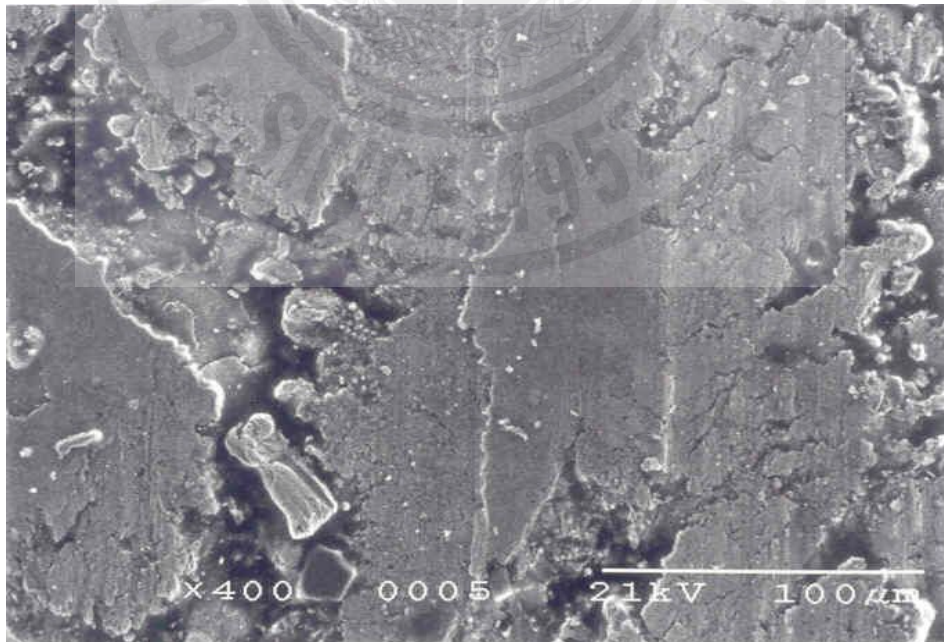
(a) ($V=0.1\text{m/s}$, in air, load=100N)



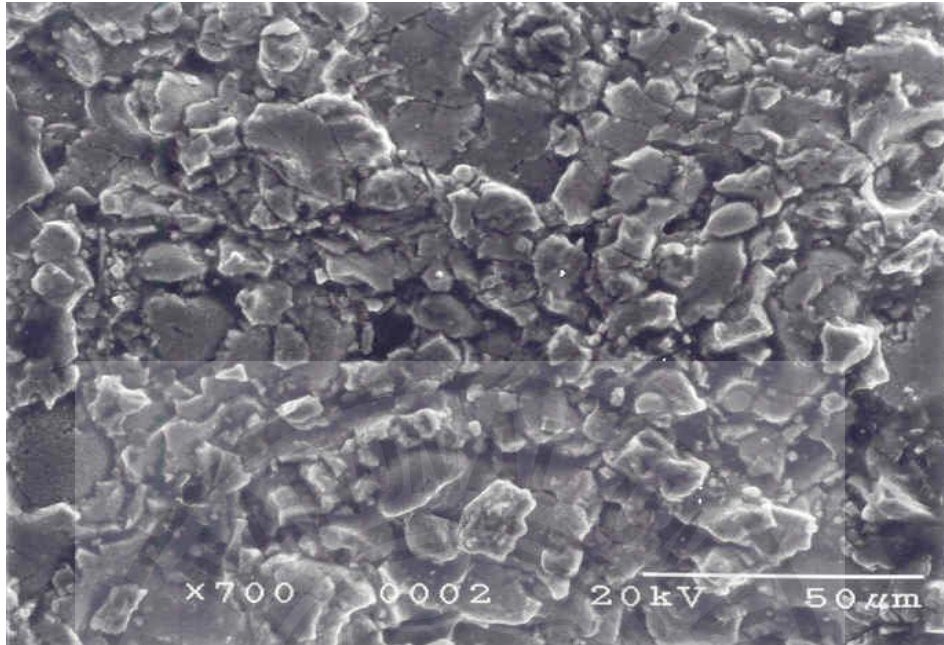
(b) ($V=0.1\text{m/s}$, in air, load=200N)



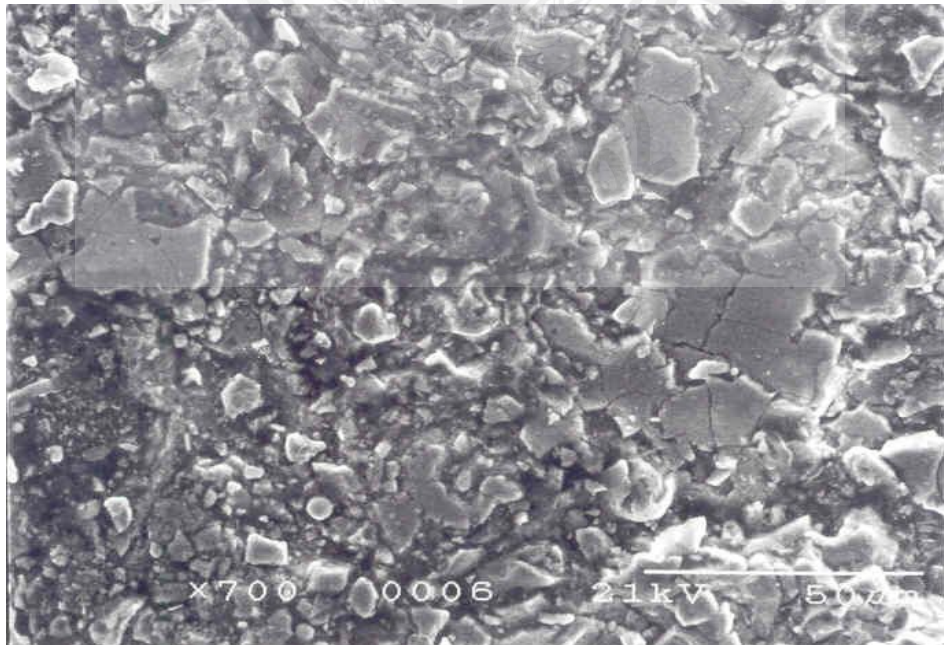
(c) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=100N)



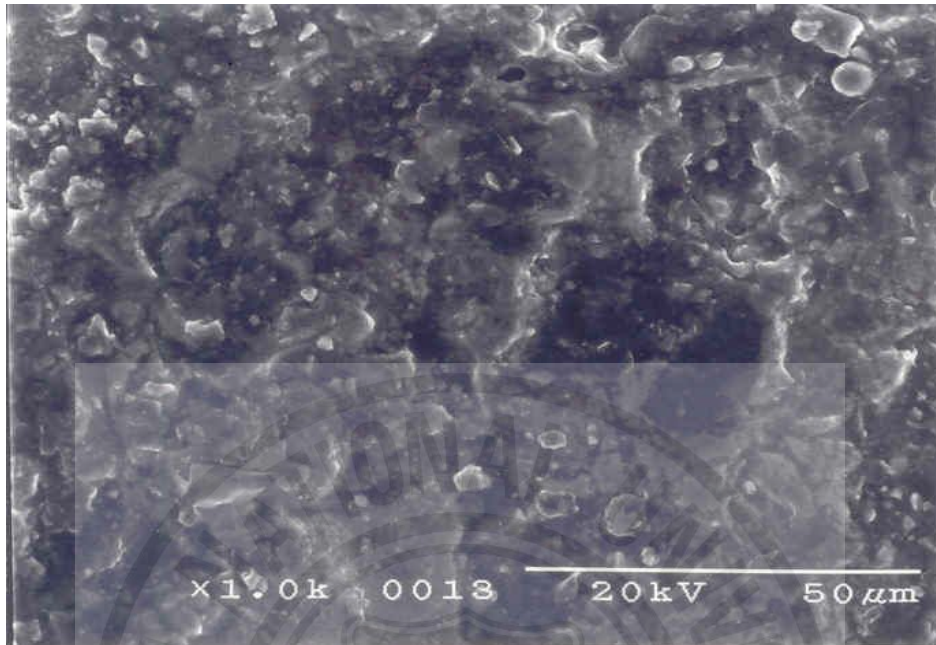
(d) ($V=0.2\text{m/s}$, in air, load=200N)



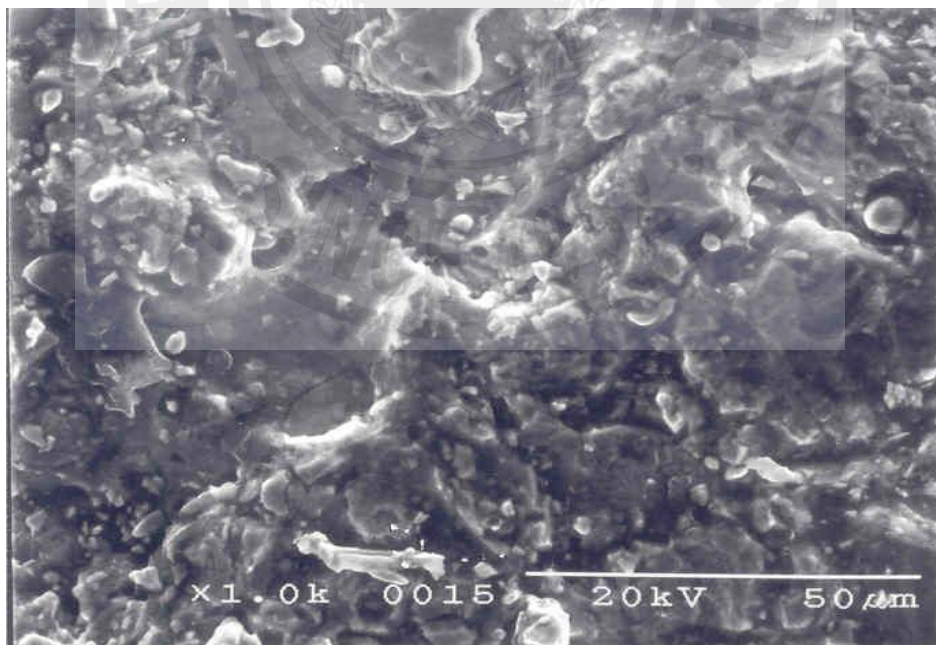
(e) ($V=0.1\text{m/s}$, grease, load=300N)



(f) ($V=0.2\text{m/s}$, grease, load=500N)



(g) ($V=0.1\text{m/s}$, in bearing oil, load=700N)



(h) ($V=0.2\text{m/s}$, in bearing oil, load=500N)

Fig. 37 SEM micrograph of the worn ZrO_2 surface

5. 세라믹 코팅 층의 마모율과 마찰동력

5.1 마모율

세라믹 재료의 마모특성을 나타내는 개념으로서 마모율을 사용한다. 마모율은 다음과 같이 정의되는 마모율 K로 표시하였다[24].

$$K = \frac{W}{LS}$$

W는 정밀저울에서 측정한 마모량(g), L은 수직으로 작용되는 가압하중(N), S(m)는 미끄럼거리를 나타낸다. Table 9에는 미끄럼속도가 $V=0.1\text{m/s}$ 인 경우 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 및 ZrO_2 의 코팅된 회전시험편과 금속인 고정시험편에 대하여 윤활환경과 하중의 변화에 따른 마모율을 나타낸다.

Fig. 38은 Table 9의 마모율에 대하여 세라믹의 종류에 따른 가압하중과 마모율의 관계를 도시한 것이다. (a)에서 ZrO_2 의 마모율은 100N일 때 $1.35 \times 10^{-7} \text{g}^3/\text{Nm}$ 에서 300N일 때는 $5.33 \times 10^{-8} \text{g}^3/\text{Nm}$ 로 큰 폭으로 증가했다. 한편 Al_2O_3 는 가압하중 100N일 때 마모율이 $4.0 \times 10^{-7} \text{g}^3/\text{Nm}$ 이고 가압하중 300N일 때는 $3.25 \times 10^{-8} \text{g}^3/\text{Nm}$ 으로 감소하고 있다. 세라믹 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 의 마모율의 변화는 10^{-8} 승의 오더(Order)로 매우 작았다. (b)는 고정시험편을 공기 중에서 $V=0.1\text{m/s}$ 로 실험한 것이다. ZrO_2 는 고정시험편이 100N에서 200N 및 300N으로 증가하면 마모율이 큰 폭으로 증가되었다. Cr_2O_3 는 100N에서 200N으로 변하게 되면 마모율도 하강하여 300N일 때도 역시 하강하였다. Al_2O_3 와 TiO_2 도 200N으로 변할 때는 감소했으나 300N일 때는 마모율의 변화가 없었다.

Fig. 39는 Table 9에서의 미끄럼속도 $V=0.1\text{m/s}$ 로 그리이스 중의 마모율을 도시한 것으로 (a)는 ZrO_2 는 하중의 변화에 따라 큰 폭으로 증가했다. Cr_2O_3 는 가압하중 300N일 때 약 $9.0 \times 10^{-8} \text{g}^3/\text{Nm}$ 이지만 가압하중 900N으로 증가되면 약 $4.5 \times 10^{-8} \text{g}^3/\text{Nm}$ 으로 감소했다. 그러나 Al_2O_3 와 TiO_2 는 가압하중 300N에서 500N으로 될 때까지는 마모율이 증가를 하다가 가압하중 700N과 900N에서는 감소를 하

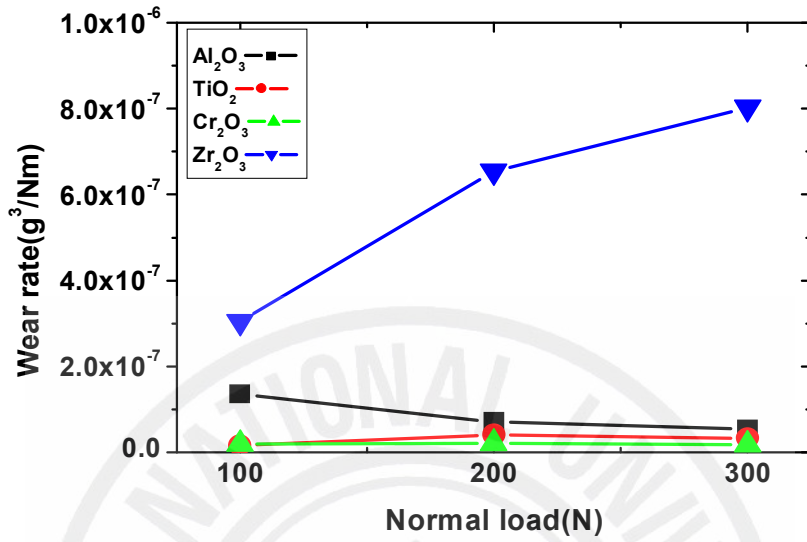
였다. (b)의 고정시험편의 경우 하중에 따른 마모율은 약간씩 증가되었다.

Fig. 40은 베어링유의 윤활상태에서 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 및 ZrO_2 에 대한 가압하중에 따른 마모율에 대하여 나타낸 것이다. (a)는 회전시험편의 마모율로서 ZrO_2 의 마모율은 하중의 변화가 높은 폭으로 증가가 되었다. Al_2O_3 와 TiO_2 는 마모율이 하중의 변화에 따라 감소하였으며 그 감소의 폭이 가장 적은 것은 TiO_2 였다. (b)에서 고정시험편의 마모율은 하중의 변화에 따라 모두 증가되었다.

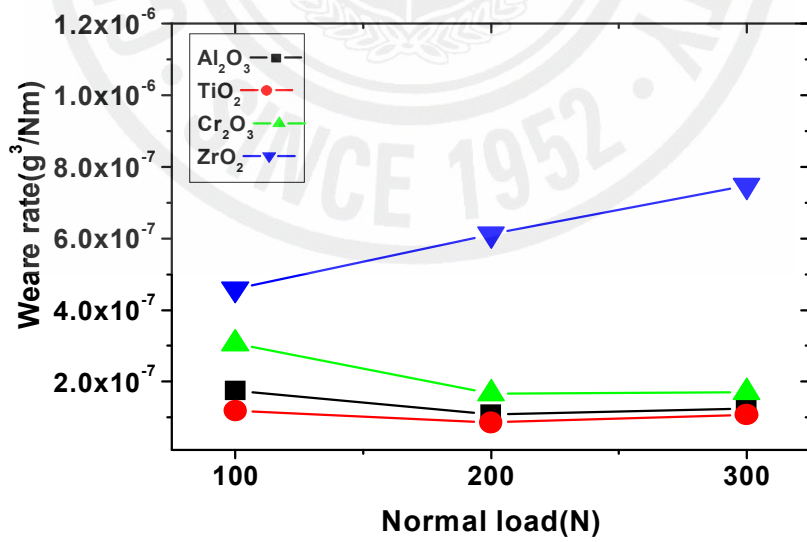


Table 9 Wear rate of ceramics(unit : $\text{g}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, $V=0.1 \text{ m/s}$)

Environment	Pin & Disk	Normal load	Al_2O_3	TiO_2	Cr_2O_3	ZrO_2
In air	Pin	100N	1.75×10^{-7}	1.183×10^{-7}	3.067×10^{-7}	4.592×10^{-7}
		200N	1.092×10^{-7}	8.54×10^{-8}	1.658×10^{-7}	6.117×10^{-7}
		300N	1.247×10^{-7}	1.072×10^{-7}	1.697×10^{-7}	7.485×10^{-7}
	Disk	100N	1.35×10^{-7}	1.58×10^{-8}	1.92×10^{-8}	3.033×10^{-7}
		200N	7.083×10^{-8}	4×10^{-8}	2.13×10^{-8}	6.542×10^{-7}
		300N	5.333×10^{-8}	3.25×10^{-8}	1.75×10^{-8}	8.031×10^{-7}
Grease	Disk	300N	3.611×10^{-9}	6.9×10^{-9}	9.2×10^{-9}	6.58×10^{-8}
		500N	7.5×10^{-9}	1.12×10^{-8}	5.8×10^{-9}	1.717×10^{-7}
		700N	6.071×10^{-9}	8.6×10^{-9}	4.6×10^{-9}	8.642×10^{-7}
		900N	6.093×10^{-9}	8.1×10^{-9}	4.5×10^{-9}	1.285×10^{-6}
	Pin	300N	5.278×10^{-9}	1.1×10^{-9}	2.33×10^{-9}	6.58×10^{-8}
		500N	1.317×10^{-8}	3.8×10^{-9}	8.2×10^{-9}	5.217×10^{-7}
		700N	2.081×10^{-8}	2.9×10^{-9}	1.24×10^{-8}	1.246×10^{-6}
		900N	2.278×10^{-8}	8.7×10^{-9}	1.46×10^{-8}	1.936×10^{-6}
Bearing Oil	Disk	300N	1.194×10^{-8}	6.9×10^{-9}	2.5×10^{-9}	2.15×10^{-8}
		500N	8.33×10^{-9}	5.5×10^{-9}	7.3×10^{-9}	4.5×10^{-8}
		700N	6.786×10^{-9}	5.4×10^{-9}	7.7×10^{-9}	1×10^{-7}
		900N	5.778×10^{-9}	4.93×10^{-9}	8.21×10^{-9}	
	Pin	300N	1.667×10^{-9}	1.1×10^{-10}	8×10^{-10}	1.25×10^{-8}
		500N	1.167×10^{-9}	7×10^{-10}	1×10^{-9}	1.3×10^{-7}
		700N	3.095×10^{-9}	1×10^{-9}	2.68×10^{-9}	1.883×10^{-7}
		900N	3.895×10^{-9}	1.781×10^{-9}	3.096×10^{-9}	

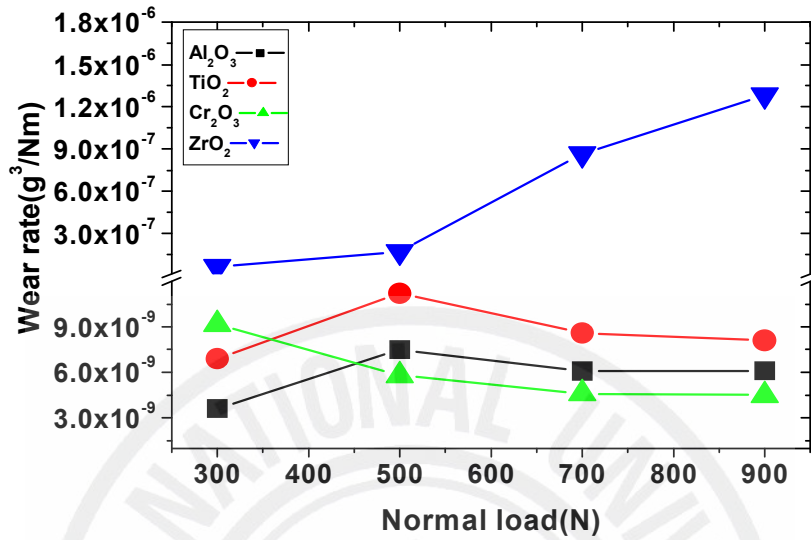


(a) Disk

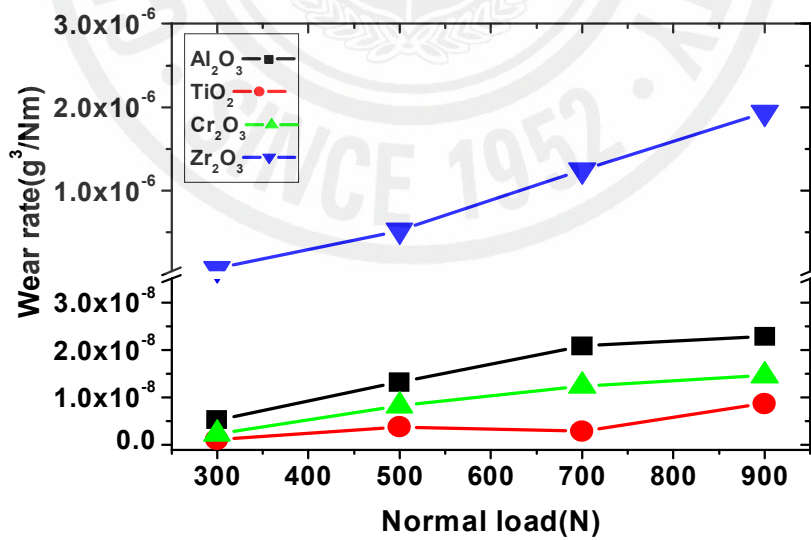


(b) Pin

Fig. 38 Wear rate(Air, V=0.1m/s)

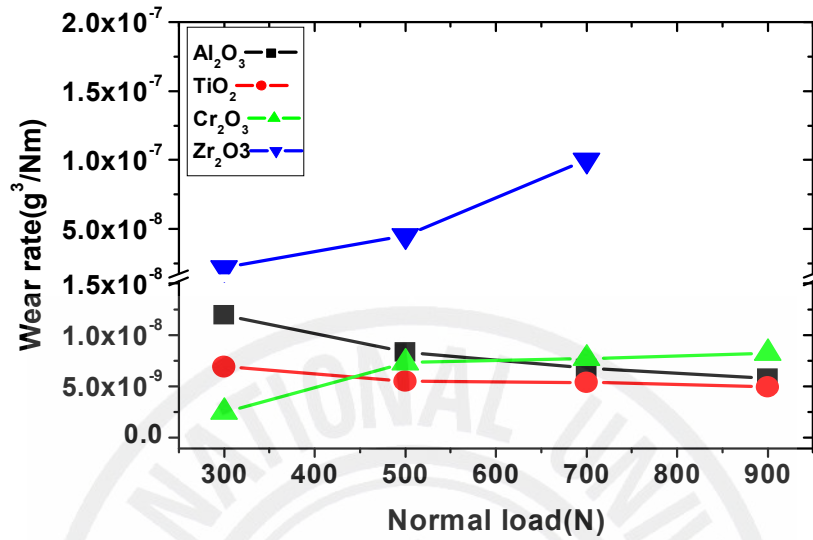


(a) disk

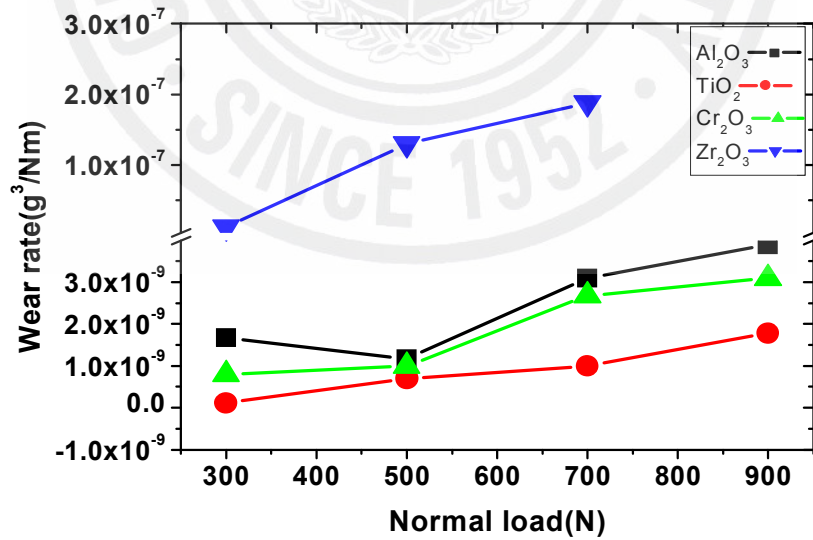


(b) Pin

Fig. 39 Wear rate(Grease, V=0.1m/s)



(a) Disk



(b) Pin

Fig. 40 Wear rate(Bearing oil, V=0.1m/s)

Table 10에는 미끄럼속도가 $V=0.2\text{m/s}$ 인 경우 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 및 ZrO_2 의 코팅된 회전시험편과 금속인 고정시험편에 대하여 윤활환경과 하중의 변화에 따른 마모율을 나타낸다. Fig. 41은 Table 10의 마모율에 대하여 세라믹의 종류에 따른 가압하중과 마모율의 관계를 도시한 것이다. (a)에서 마모율은 100N일 때 $1.46 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, 300N일 때는 $1.99 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 로 매우 높아진다. 따라서 하중이 증가하면 마모율도 증가하고 있다. 이것은 ZrO_2 의 분말구조가 $\text{ZrO}_2 + 24\% \text{ MgO}$ 로서 산화마그네슘의 성분이 연한 성질이 있기 때문에 마모과정을 거치는 동안 마모율의 큰 폭으로 증가되었다.

Al_2O_3 의 마모율은 100N에서 $5.91 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, 300N일 때는 $1.29 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 로 증가 되었다. 한편, TiO_2 의 마모율은 가압하중이 100N일 때 $1.57 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 로서 이것은 TiO_2 가 소성변형에 의한 응착마모(Adhesive wear)때문으로 접촉된 표면돌기부들이 강한 결합력을 가질 때 마찰력으로 인한 쪽 표면의 돌기 부위가 떨어지면서 탈락된다.

(b)는 고정시험편의 마모율을 나타낸다. 공기 중에서 ZrO_2 는 하중의 증가에 따라 $1.55 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 $1.89 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 으로 증가한다. 이것은 앞의 회전 시험편에서의 경우와 거의 비슷하다. 가압하중 100N일 때 회전시험편인 TiO_2 의 마모율은 $1.07 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이다. 가압하중이 200N, 300N일 때 고정시험편의 마모율은 Cr_2O_3 및 Al_2O_3 와 TiO_2 의 경우 거의 같은 값으로 그 변화의 폭이 아주 작다.

Fig. 42는 그리이스로 윤활 중의 마모율을 나타낸 것이다. (a)는 그리이스 윤활 중의 회전시험편에 대한 마모율을 나타낸 것이다. ZrO_2 의 마모율은 경도가 작은 관계로 가압하중이 높을수록 그 값이 증가되었다. Al_2O_3 의 마모율은 가압하중이 300N에서 $1.36 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, 900N에서 $7.05 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 으로 감소했다. Cr_2O_3 의 마모율은 300N에서 $5.50 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, 900N에서 $3.10 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 로 역시 감소했다. TiO_2 는 가압하중 300N일 때 마모율이 $3.50 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 였고, 900N일 때 $1.72 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 로서 매우 작다. 따라서 Cr_2O_3 , TiO_2 의 순서로 하중이 증가가 될 수록 마모율이 감소했다.

(b)에서 그리이스 윤활 중의 고정시험편에 대한 마모율을 나타낸 것이다. ZrO_2 의 경우 가압하중이 300N일 때 $1.88 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이고 가압하중이 900N일 때

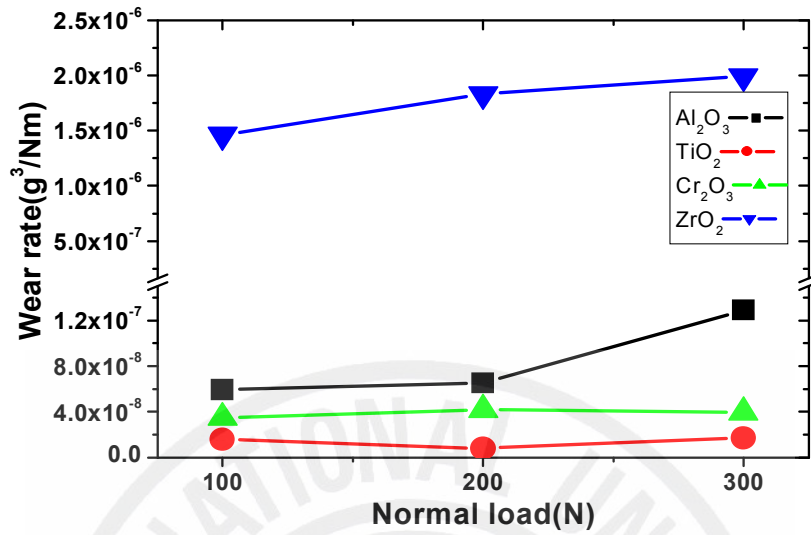
$6.91 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이다. 가압하중이 높으면 마모율도 증가되었다. 이것은 금속과 세라믹이 그리이스로 윤활하였을 때 세라믹인 ZrO_2 의 마모가 고정시험편의 마모보다 훨씬 크기 때문이다. 한편, Al_2O_3 의 고정시험편의 마모율은 가압하중이 300N에서 500N까지는 $5.51 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 $5.22 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 으로 약간 감소했다. 그러나 700N일 때의 마모율이 $9.94 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, 900N일 때 $2.16 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 으로 크게 증가했다. 이것은 Al_2O_3 의 경우 Table 4에서 나타낸 바와 같이 788이고 회전시험편 Al_2O_3 의 경도는 1900으로 경도가 낮은 고정시험편의 마모율이 파괴인성 치에 근접하게 되고, 이 하중영역인 700N이상에서 마모율이 높아지고 있기 때문이며 또 경마모(Low wear)에서 과도마모(High wear)로 마모변이를 일으키는 영역이 되고 고하중에서의 Al_2O_3 와 상대한 고정시험편의 영향을 받기 때문이다.

지속적인 전단하중과 압축하중, 인장하중이 높아지는 영역에서 고정시험편의 마모율이 높다는 것은 Al_2O_3 에게도 많은 영향을 준다. Al_2O_3 는 취성이 높아 계속되는 하중에 의해 마모면에 수직방향으로 균열발생을 유도하며 이 균열이 코팅층까지 전달된다. Cr_2O_3 와 TiO_2 의 마모율은 가압하중의 증가에 따라 아주 미세하게 감소가 되고 있다[26].

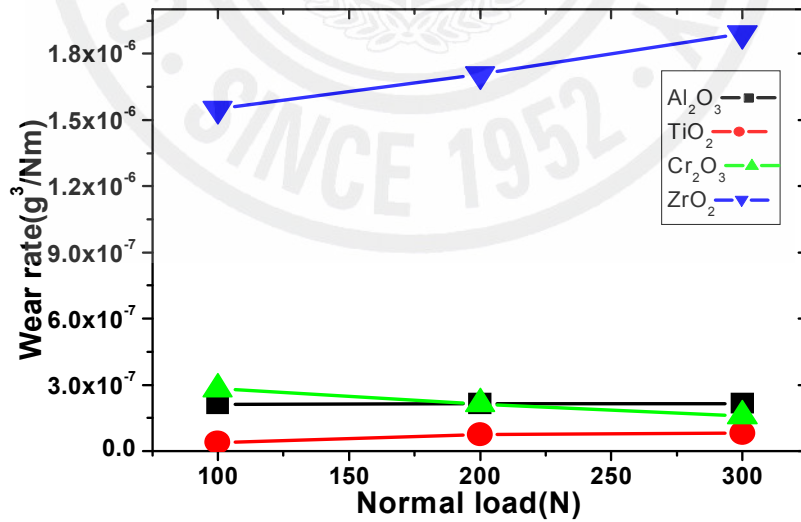
Fig. 43은 베어링유의 윤활에서의 회전시험편과 고정시험편을 마모율로 나타낸 것이다. (a)와 (b)에서 베어링유에서의 마모율은 그리이스의 경우와 비슷하였다. 그리이스로 윤활할 때와 같이 고정시험편이 가압하중이 500N에서 가압하중이 700N될 때 $3.11 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 가 되고 그 후 900N에서의 마모율이 그 값을 계속 유지하거나, 약간 감소했다.

Table 10 Wear rate of ceramics(unit : $\text{g}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, $V=0.2\text{m/s}$)

Environment	Pin & Disk	Normal load	Al_2O_3	TiO_2	Cr_2O_3	ZrO_2
In air	Pin	100N	2.130×10^{-7}	3.96×10^{-8}	2.826×10^{-7}	1.551×10^{-6}
		200N	2.15×10^{-7}	7.48×10^{-8}	2.143×10^{-7}	1.707×10^{-6}
		300N	2.160×10^{-7}	8.07×10^{-8}	1.594×10^{-7}	1.892×10^{-6}
	Disk	100N	5.913×10^{-8}	1.57×10^{-8}	3.48×10^{-8}	1.461×10^{-6}
		200N	6.522×10^{-8}	7.8×10^{-9}	4.2×10^{-8}	1.831×10^{-6}
		300N	1.290×10^{-7}	1.72×10^{-8}	3.97×10^{-8}	1.993×10^{-6}
Grease	Disk	300N	1.36×10^{-8}	3.50×10^{-9}	5.50×10^{-9}	4.67×10^{-8}
		500N	9.57×10^{-9}	2.90×10^{-9}	5.70×10^{-9}	6.15×10^{-7}
		700N	7.45×10^{-9}	2.40×10^{-9}	4.00×10^{-9}	9.03×10^{-7}
		900N	7.05×10^{-9}	2.20×10^{-9}	3.10×10^{-9}	1.49×10^{-6}
	Pin	300N	5.51×10^{-9}	1.30×10^{-9}	8.10×10^{-9}	1.88×10^{-7}
		500N	5.22×10^{-9}	1.00×10^{-9}	5.20×10^{-9}	1.76×10^{-6}
		700N	9.94×10^{-9}	9.00×10^{-10}	4.80×10^{-9}	4.75×10^{-6}
		900N	2.16×10^{-8}	1.00×10^{-9}	3.90×10^{-9}	6.91×10^{-6}
Bearing Oil	Disk	300N	8.70×10^{-9}	1.00×10^{-9}	1.70×10^{-9}	2.50×10^{-8}
		500N	6.09×10^{-9}	1.90×10^{-9}	1.30×10^{-9}	4.58×10^{-8}
		700N	5.65×10^{-9}	1.50×10^{-9}	1.00×10^{-9}	5.92×10^{-8}
		900N	5.22×10^{-9}	1.40×10^{-9}	1.00×10^{-9}	9.11×10^{-8}
	Pin	300N	1.45×10^{-9}	4.00×10^{-10}	1.20×10^{-9}	2.42×10^{-8}
		500N	1.74×10^{-9}	6.00×10^{-10}	1.70×10^{-9}	2.85×10^{-7}
		700N	3.11×10^{-9}	6.00×10^{-10}	1.40×10^{-9}	5.50×10^{-7}
		900N	3.04×10^{-9}	6.00×10^{-10}	1.30×10^{-9}	

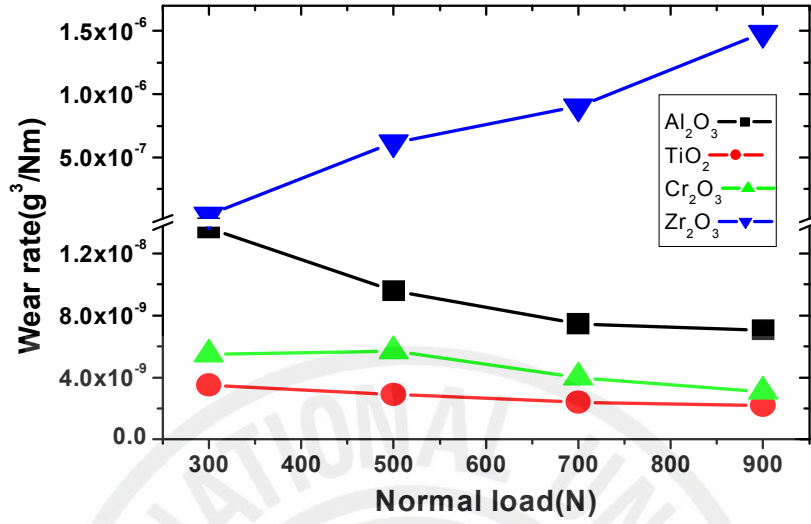


(a) Disk

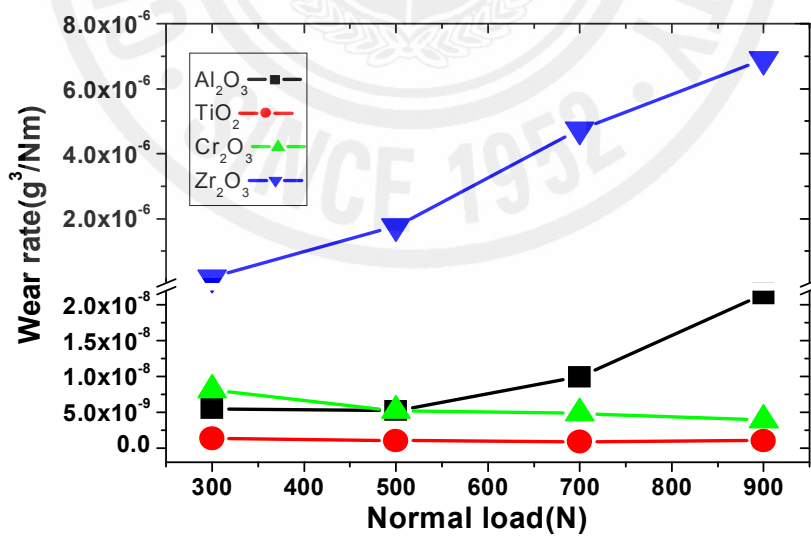


(b) Pin

Fig. 41 Wear rate(Air, V=0.2m/s)

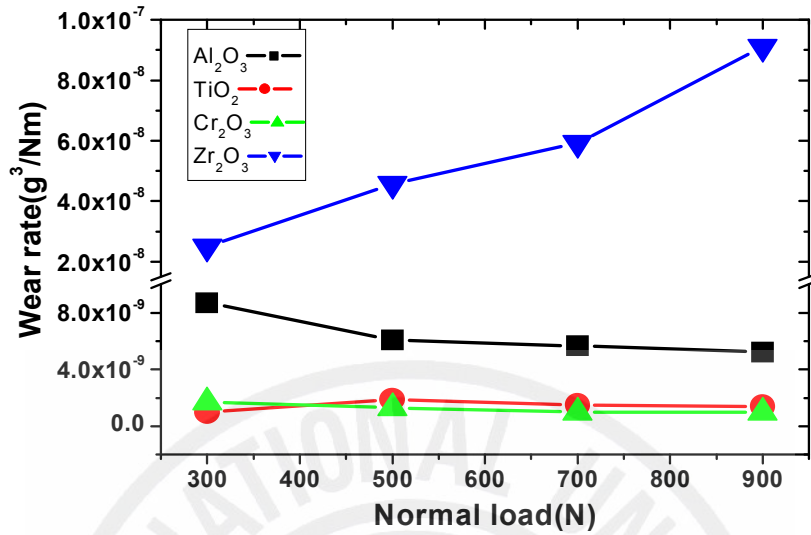


(a) Disk

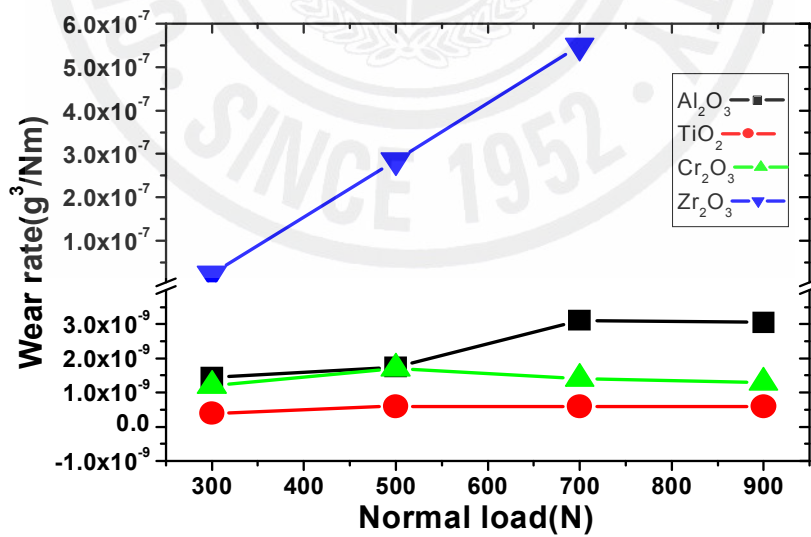


(b) Pin

Fig. 42 Wear rate(Grease, V=0.2m/s)



(a) Disk



(b) Pin

Fig. 43 Wear rate(Bearing oil, V=0.2m/s)

5.2 마모율의 하중의존성

Fig. 44는 미끄럼속도 $V=0.2\text{m/s}$, 윤활환경에서 가압하중에 따른 4종류의 세라믹 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 의 마모율(Wear rate)을 나타낸 것이다. (a)는 공기 중에서의 마모율은 가압하중이 200N일 때 Al_2O_3 , TiO_2 및 Cr_2O_3 는 $10^{-8}\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 오더를 가지고 있으나 ZrO_2 는 약 $2.1 \times 10^{-7}\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이었다. 공기 중에서의 마모율은 TiO_2 회전시험편이 가장 적었다.

Al_2O_3 의 마모율은 가압하중이 클수록 증가하였다. 저하중 영역에서의 마모율은 증가하는 폭이 작고 고하중 영역에서는 증가 폭이 크다. 또, 미끄럼속도에 따른 마모율은 미끄럼속도가 저속인 경우 저하중에서는 거의 비슷하고 고하중에서는 급격하게 증가했다. TiO_2 와 Cr_2O_3 의 경우, 가압하중이 증가를 하여도 그 마모율은 거의 일정하다. 이것은 마모입자들이 응착되었기 때문이다[27, 28].

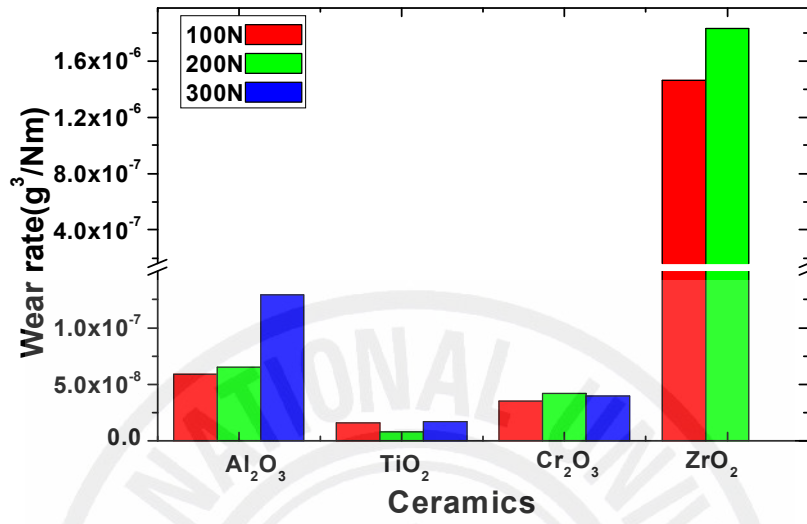
ZrO_2 의 마모율은 미끄럼속도와 가압하중이 전 영역에서 증가하였다. 저하중인 100N일 때 과도한 접촉압력이 작용되어 표면돌기의 파괴가 발생하며 마모율이 급격히 증가하며 표면에서의 파괴가 발생하였다. 이는 마모입자에 의한 연삭작용과 표면파괴가 일어나며 과도한 접촉압력으로 인해 연삭작용이 심하게 되기 때문이다.

(b)는 그리이스 중에서 가압하중의 변화에 따른 마모율을 나타낸 것이다. 고하중영역으로 갈수록 마모율이 감소하는 것은 그리이스의 응집력 때문이다.

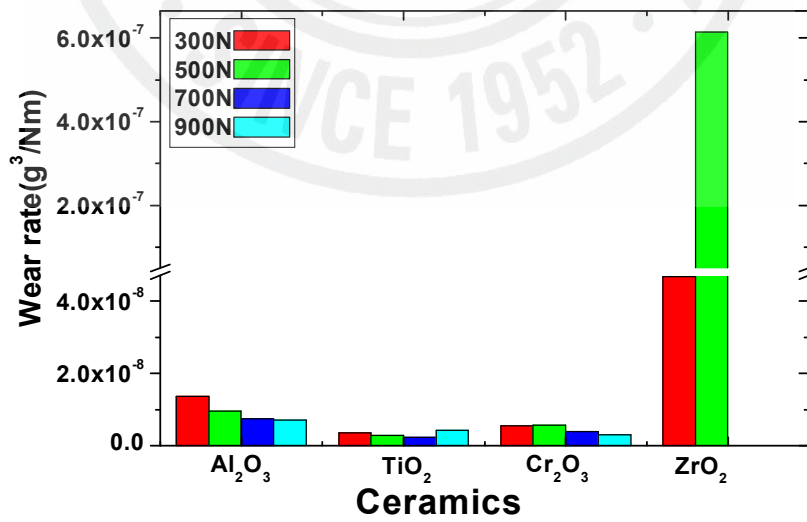
(c)는 베어링유 중에서 가압하중의 변화에 따른 마모율을 나타낸 것이다. 마모율은 그리이스로 윤활한 것이 가장 낮고, TiO_2 가 약 $0.3 \times 10^{-8}\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 이하로서 가장 작다.

세라믹의 마모율, 가압하중 및 미끄럼속도에 대한 관계를 경마모(Low wear)와 과도마모(High wear)의 마모변이 영역과 마찰이 안정화되지 못하고 요동하는 영역으로 구분한다[29].

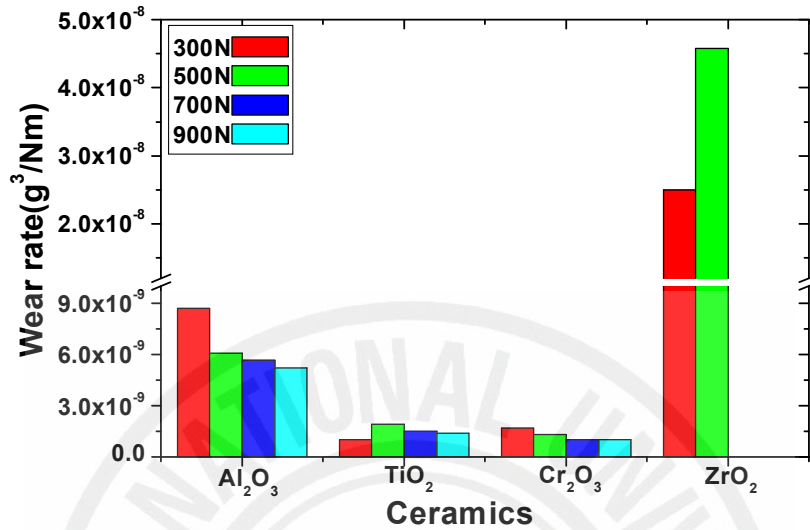
본 연구의 경우에서의 마모거동은 미끄럼속도에 의해 경마모(Low wear)와 과도마모(High wear)로 변이해가는 영역이 있으며, 마모거동이 요동하는 영역(과도마모)이 나타난다. 그리고 마모과정의 초기에 세라믹의 표면돌기가 파괴된 후, 새롭게 형성된 표면은 고하중에 효율적으로 저항하게 되며 미끄럼속도가 커지면 과도한 마모에 의해 표면파괴가 일어나게 된다[30].



(a) In air



(b) In grease



(c) In bearing oil
 Fig. 44 Wear rate(V=0.2m/s)

5.3 마찰동력

마모의 정도를 나타내는 척도로서 많이 사용되는 마찰동력은 가압하중(W)과 미끄럼속도(V), 그리고 마찰계수(μ)를 곱으로 나타내며 그 단위는 [Nm/s]로 표시된다[31]. 마찰동력을 산출하기 위해서 전 시험조건에서의 마찰계수의 평균치를 Table 11에 나타내며, 이들을 이용하여 산출한 마찰동력을 Fig. 45 ~ Fig. 48에 나타냈다.

Fig. 45는 Al₂O₃의 가압하중에 따른 마찰동력을 나타낸 것이다. Al₂O₃의 공기 중의 마찰동력은 가압하중의 증가에 따라 급격히 증가한다. 가압하중이 100N일 때 마찰동력은 약 9.42 Nm/s이며, 가압하중이 200N에서는 18.27 Nm/s, 가압하중이 300N에서는 22.40 Nm/s가 되었다. 공기 중에서 가압하중의 증가에 따라 마찰동력이 증가하는 것은 미세한 표면돌기의 파괴와 마모입자의 연삭작용 및 산

화에 의해서 마모가 발생한다. 또한, 산화에 의한 형성된 막(Film)은 윤착성이 좋지 않아 마모입자의 연삭작용에 의해 쉽게 파괴된다.

한편, 그리이스와 베어링유의 윤활 중의 마찰동력은 가압하중의 증가하여도 완만하게 증가한다. 이는 산화막이 형성되어 미세마모입자들의 연삭작용이 감소되었기 때문이다[32].

Fig. 46은 TiO_2 의 가압하중에 따른 마찰동력을 나타냈다. 공기 중에서 가압하중이 100N일 때 마찰동력이 14.85 Nm/s이고 가압하중이 200N일 때 마찰동력은 15.47 Nm/s으로 가압하중이 증가하여도 마찰동력은 거의 같다. 이것은 TiO_2 가 가지는 파괴인성 때문이다. 특히, 가압하중 300N일 때 마찰동력은 23.04 Nm/s으로 마찰동력이 갑자기 증가 된 것은 윤착의 효과 때문이며 TiO_2 의 임계파괴 영역에서 표면파괴가 일어났기 때문이다. 한편, 그리이스와 베어링유의 윤활에서의 마찰동력은 가압하중이 300N일 때 베어링유의 경우가 7.37 Nm/s, 그리이스일 때 9.42 Nm/s였다. 가압하중이 900N일 때 베어링유에서의 마찰동력은 14.83 Nm/s이고, 그리이스의 경우는 16.78 Nm/s이다. 가압하중이 증가를 하면 마찰동력도 증가하였다.

Fig. 47은 Cr_2O_3 의 가압하중에 따른 마찰동력을 나타낸다. 공기 중에서 가압하중 100N일 때 마찰동력은 13.20 Nm/s, 가압하중 200N일 때 마찰동력이 21.27 Nm/s 및 가압하중 300N일 때 22.81 Nm/s로, 가압하중이 증가하면 마찰동력도 급격히 증가한다. 이것은 과도마모(High wear)에 의한 연삭작용으로 표면파괴가 일어나기 때문이다. 가압하중이 300N의 경우, 베어링유의 마찰동력은 6.27 Nm/s, 그리이스는 6.79 Nm/s이다. 또 가압하중이 500N의 경우, 베어링유가 9.73 Nm/s, 그리이스가 8.80 Nm/s이다. 가압하중 700N의 경우 베어링유의 마찰동력은 12.67 Nm/s이고, 그리이스는 14.39 Nm/s이다. 가압하중을 더욱 증가시켜 900N이 되면 베어링유의 마찰동력이 13.12 Nm/s였고 그리이스가 15.60 Nm/s였다.

Cr_2O_3 의 마모현상에서 가압하중이 300N ~ 500N에서는 경마모(Low wear)영역의 윤착마모, 가압하중이 500N ~ 700N에서는 과도마모(High wear)영역으로 연삭마모, 700N 이상에는 윤착마모의 결과라고 사료된다. Archard[33] 등과 Welsh[34]는 비 윤활 상태에서 재료의 마모형태가 하중, 속도 그리고 미끄럼 거리에 따라

연마모(mild wear)와 경마모(severe wear)로 대별됨을 보고하였다.

Fig. 48은 ZrO_2 의 가압하중에 따른 마찰동력을 나타낸 것이다. 공기 중에서 가압하중 100N일 때의 마찰동력은 16.62N·m/s, 200N일 때는 17.72N·m/s이다. 한편, 그리이스에서 가압하중 300N일 때 마찰동력이 8.81N·m/s, 가압하중 700N일 때 14.91N·m/s이다. 베어링유에서 가압하중 300N의 경우 마찰동력은 9.19N·m/s, 가압하중 900N의 경우 마찰동력은 18.51N·m/s이다. ZrO_2 의 경우 다른 세라믹과는 달리 코팅층이 연하기 때문에 공기 중에서 200N이하, 윤활 중에서는 700N이하의 실험을 하였다. 이 경우, 베어링유의 윤활에서는 다른 세라믹하고 동일한 마모 거동을 보였다. 따라서 ZrO_2 는 저하중에서 우수한 내마모 성능을 가지며, 마일드한 연삭마모 거동을 나타낸다.

Table 11 The friction coefficients

Specimen	Environment	Sliding velocity[m/s]	Load[N]	Friction coefficient
Al_2O_3	Air	0.1	200N	0.643
			300N	0.527
		0.2	200N	0.547
			300N	0.492
	Grease	0.1	300N	0.124
			900N	0.123
		0.2	300N	0.221
			900N	0.093
	Bearing oil	0.1	300N	0.068
			900N	0.105
		0.2	300N	0.161
			900N	0.056

Specimen	Environment	Sliding velocity[m/s]	Load[N]	Friction coefficient
TiO ₂	Air	0.1	300N	0.348
			500N	0.298
		0.2	300N	0.512
			500N	0.265
	Grease	0.1	300N	0.209
			900N	0.126
		0.2	300N	0.136
			900N	0.127
	Bearing oil	0.1	300N	0.168
			900N	0.112
		0.2	300N	0.133
			900N	0.062

Specimen	Environment	Sliding velocity[m/s]	Load[N]	Friction coefficient
Cr ₂ O ₃	Air	0.1	100N	0.839
			500N	0.348
		0.2	100N	0.429
			500N	0.286
	Grease	0.1	300N	0.216
			900N	0.112
		0.2	300N	0.098
			900N	0.118
	Bearing oil	0.1	300N	0.139
			900N	0.128
		0.2	300N	0.121
			900N	0.110

Specimen	Environment	Sliding velocity[m/s]	Load[N]	Friction coefficient
ZrO ₂	Air	0.1	100N	1.119
			200N	0.551
		0.2	100N	1.123
			200N	0.432
	Grease	0.1	300N	0.195
			500N	0.170
		0.2	300N	0.188
			500N	0.153
	Bearing oil	0.1	300N	0.207
			500N	0.159
		0.2	300N	0.203
			500N	0.082

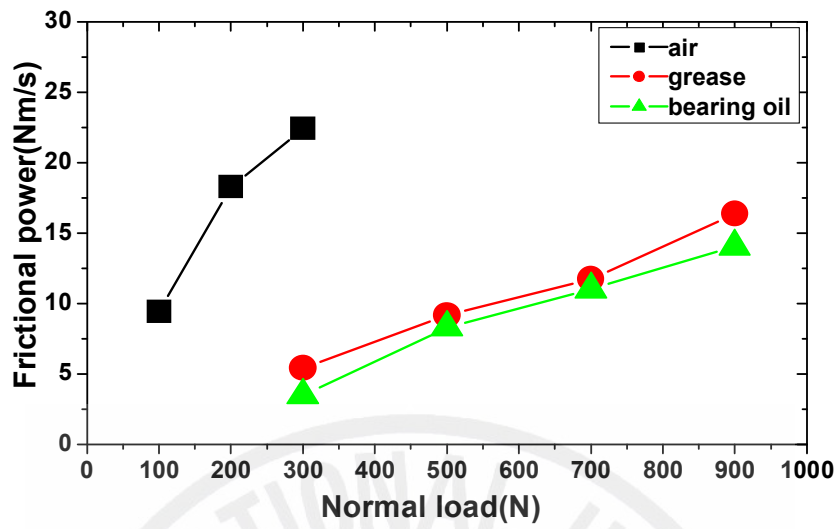


Fig. 45 Frictional power of Al₂O₃

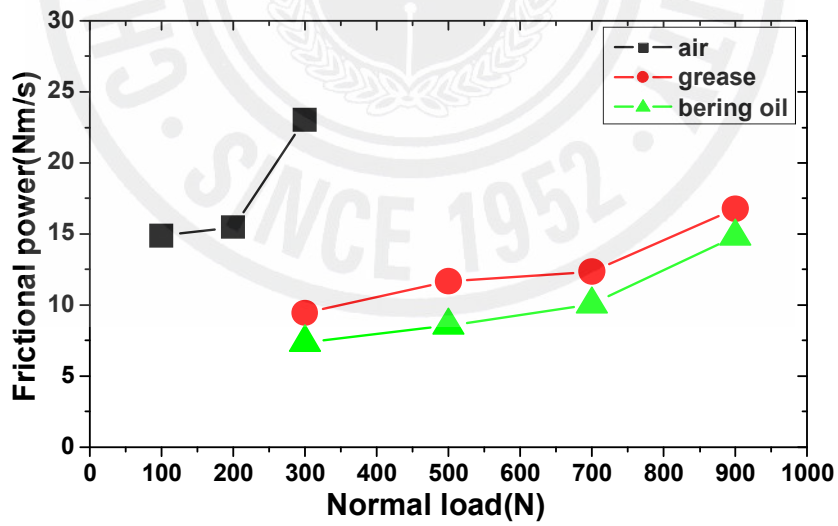


Fig. 46 Frictional power of TiO₂

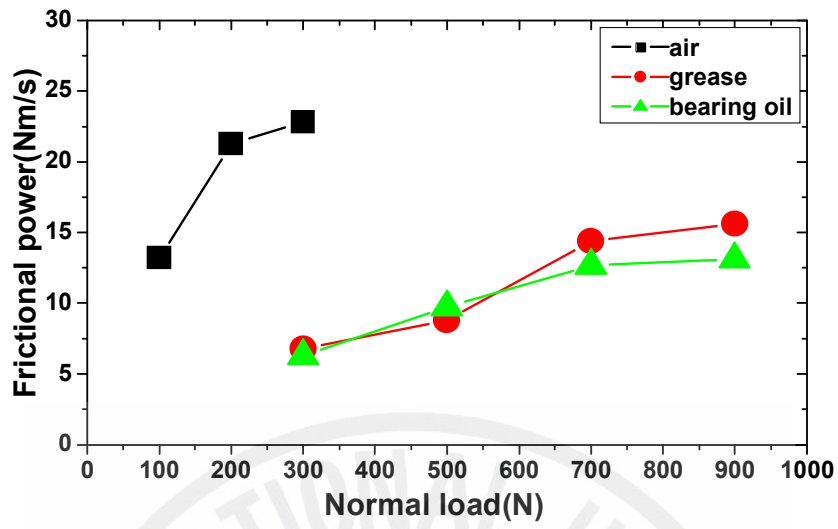


Fig. 47 Frictional power of Cr_2O_3

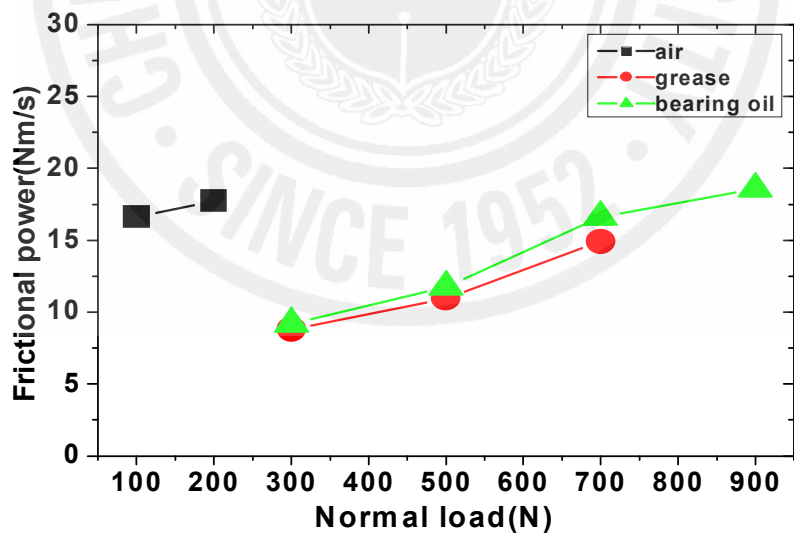


Fig. 48 Frictional power of ZrO_2

IV. 결 론

본 연구는 산업현장에서 많이 이용되는 Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 4종류의 내마모성 세라믹을 플라즈마 용사법으로 코팅하여 기계 마찰부의 부품으로 사용하는 경우 그 마모현상에 대한 역학적 요인, 윤활 요인 및 재료요인 등을 규명한 것이다. 이들 마모현상의 규명은 자체 제작한 마모시험기를 이용하여 상온과 상압 하에서 공기중, 그리이스 및 베어링유의 윤활환경에서 실험을 수행하였다. 시험 조건에 있어서는 가압하중과 미끄럼속도 등의 운동 조건들을 변화시키면서 각 조건하에서 마찰력, 마찰계수, 마모를 및 마찰동력을 조사하였다. 또한 마모기구들을 규명하기 위하여 실험후의 마모면들은 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 정밀 관찰하였다. 이상의 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 공기 중의 건마찰 상태에서 4종류의 세라믹들을 미끄럼속도 $V=0.1m/s$ 에서 낮은 가압하중의 마찰계수는 $TiO_2 < Al_2O_3 < Cr_2O_3 < ZrO_2$ 이고, 높은 가압하중의 경우 $TiO_2 < Cr_2O_3 < Al_2O_3 < ZrO_2$ 의 순서다. 또 $V=0.2m/s$ 에서 낮은 가압하중의 마찰계수는 $Cr_2O_3 < TiO_2 < Al_2O_3 < ZrO_2$ 이고 높은 가압하중의 경우 $TiO_2 < Cr_2O_3 < Al_2O_3 < ZrO_2$ 의 순서이다. 또 공기 중에서 미끄럼속도 $V=0.2m/s$ 의 마찰계수는 $V=0.1m/s$ 보다 낮게 되어 미끄럼속도가 빠르면 마찰계수는 감소한다.

2. 윤활환경에서 Al_2O_3 의 마찰계수는 미끄럼속도 $V=0.1m/s$ 은 가압하중 300N의 경우 그리이스 중에서 0.08 ~ 0.17이며 베어링유 중에서 0.09 ~ 0.12이고, 미끄럼속도 $V=0.2m/s$ 에서 0.11 ~ 0.23이다. 또한 미끄럼속도가 $V=0.2m/s$ 에서 마찰계수는 가압하중 900N인 경우 그리이스일 때 0.08 ~ 1.12이고 베어링유일 때 0.05 ~ 0.07이다. 따라서 미끄럼속도가 빠르고 가압하중이 높을수록 베어링유가 마찰계수의 저감효과가 우수하다.

3. 유희환경에서 TiO_2 의 마찰계수는 미끄럼속도 $V=0.1m/s$, 가압하중 300N일 때의 그리이스에서 0.17 ~ 0.27이고, 베어링유에서 0.12 ~ 0.21이다. 또 가압하중 900N일 때는 그리이스에서 약 0.14이며 베어링유에서 약 0.11이다. 한편 미끄럼속도 $V=0.2m/s$, 가압하중 300N일 때 그리이스에서 0.07 ~ 0.18이고 베어링유에서 0.13 ~ 0.18이다. 또 가압하중이 900N일 때 그리이스에서 0.12 ~ 0.14이고 베어링유일 때 0.07 ~ 0.09이어서 베어링유의 마찰계수가 작고 내마모 성능이 우수하다.

4. 유희환경에서 Cr_2O_3 의 마찰계수는 미끄럼속도 $V=0.1m/s$ 이고 가압하중 300N일 때의 그리이스에서 0.17 ~ 0.26이고 베어링유에서 0.13 ~ 0.17이다. 가압하중 900N의 경우 그리이스에서 0.11 ~ 0.12이고 베어링유에서 0.11 ~ 0.13이다. 또 미끄럼속도 $V=0.2m/s$ 이고 가압하중 300N의 경우 그리이스에서 0.06 ~ 0.14이고 베어링유에서 0.12 ~ 0.16이다. 가압하중 900N의 경우 그리이스이에서 0.09 ~ 0.11이고 베어링유에서 0.13 ~ 0.15이다. Cr_2O_3 의 마찰계수는 미끄럼속도 $V=0.1m/s$ 보다 $V=0.2m/s$ 일 때 내마모성능이 우수하고 그리이스보다 베어링유의 유희일 때 마찰계수가 작고 감소한다.

5. 유희환경에서 ZrO_2 의 마찰계수는 미끄럼속도 $V=0.1m/s$, 가압하중 300N일 때 그리이스에서 약 0.21, 베어링유에서 약 0.18이다. 미끄럼속도 $V=0.2m/s$, 가압하중 500N일 때 마찰계수는 그리이스일 때가 약 0.12 ~ 0.16, 베어링유일 때는 0.08로서 ZrO_2 의 마찰계수는 베어링유의 유희이 더 작고 감소한다.

6. 4종류의 세라믹의 마모환경에 따른 마모율은, 공기 중에서 가압하중 300N일 때 Al_2O_3 는 1.290×10^{-7} , TiO_2 가 1.72×10^{-8} , Cr_2O_3 는 3.97×10^{-7} 및 ZrO_3 가 1.993×10^{-6} 이다. 그리이스에서는 가압하중 900N일 때 Al_2O_3 는 2.16×10^{-9} , TiO_2 는 1.00×10^{-9} , Cr_2O_3 는 3.90×10^{-9} , ZrO_3 는 6.91×10^{-6} 이다. 그리고, 베어링유에서 가압하중이 900N일 때 Al_2O_3 는 5.22×10^{-9} , TiO_2 는 1.40×10^{-9} , Cr_2O_3 는 1.00×10^{-9} , ZrO_3 는 9.11×10^{-8} 이다. 따라서 그리이스의 유희에서 TiO_2 의 마모율이 가장 작고 ZrO_3 의 마모율이 가장 크다. 베어링유의 유희에서 Cr_2O_3 가 가장 작고 ZrO_3 의 마모율

이 가장 크다.

7. 4종류의 세라믹을 마찰동력은 Al_2O_3 의 경우 공기 중에서 가압하중이 100N일 때 마찰동력은 약 9.42 Nm/s였고, 200N일 때 18.27 Nm/s로 약 2배가 크다. 공기 중에서 마찰동력은 하중이 커지면 급격히 상승한다. TiO_2 의 경우 공기 중에서 가압하중이 크게 증가하여도 마찰동력이 증가되지 않는 것은 응착효과 때문이다. Cr_2O_3 의 공기 중에서 가압하중 100N이면 마찰동력이 13.20Nm/s, 200N이면 21.27Nm/s이고, 300N이면 22.81Nm/s였다. 이 경우 마찰동력이 크게 되는 연삭마모영역과 마찰동력이 작아지는 응착마모영역이 나타났다. ZrO_2 의 마찰동력은 공기와 윤활 중에서 다른 세라믹보다 완만하게 증가하는 데, 이것은 저하중에서 Mild한 연삭마모가 발생하고 파괴인성이 작기 때문이다.

8. 4종류 세라믹들의 마모기구는 Al_2O_3 의 경우 건마찰에서 연삭마모, 윤활 중에서는 시비어 연삭마모이다. TiO_2 의 경우 건마찰에서는 시비어 응착마모, 윤활 중에서는 마일드 응착마모이다. Cr_2O_3 의 건마찰에서 마일드 연삭마모나 박리마모이고, 윤활 중에서는 응착마모이다. ZrO_2 의 경우 공기 중에서도나 윤활에서 동일한 마일드 연삭마모이다.

참 고 문 헌

- [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. Matthewes., 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] 김성익, 1996, "Ceramic 溶射材의 磨耗特性", 제주대학교석사학원논문, pp. 7-28..
- [18] 오맹종, 1998, TiO₂ 세라믹 용사 코팅재의 강도 및 마멸 특성, 제주대학교 박사학위논문, pp. 89-93

- [19] 김석삼, 서창민, 류춘무, 박준목, 1995, "TiN 코팅된 고속도강과 합금공구강의 마멸거동", 大韓機械學會論文集, 제19권, 제3호, pp. 705-712.
- [20] Cuetos J. M., Fernandez E., Vijande R., Rincon A. and Perez M. C, 1993, "Plasma-sprayed coatings treated with lasers : tribological behaviour of Cr_2O_3 ", Wear, Vol. 169, pp. 173-179.
- [21] Wang Y., Jin Y. and Wen S, 1988, "The analysis of the friction and wear mechanisms of plasma-sprayed ceramic coatings at $450^{\circ}C$ ", Wear, Vol. 128, pp. 265-276
- [22]. T. Libsch, P. Becker and S. Rhee, 1986, "Dry Friction and Wear of Toughened Zirconias and Toughened Aluminas against Steel" Wear, 110, pp. 263-283.
- [23] Cuetos J. M., Fernandez E., Vijande R., Rincon A. and Perez M. C, 1993, "Plasma-sprayed coatings treated with lasers : tribological behaviour of Cr_2O_3 ", Wear, Vol. 169, pp. 173-179.
- [24] E. S. Herold and D. Christopher, 1994, "The friction and wear of ceramic/ceramic and ceramic/metal combinations in sliding contact", STLE, Vol. 50, pp. 571-576
- [25] 정종인, 1995, "Graphite 복합 Ceramics의 마찰마모 특성에 관한 연구", 전남대학교 박사학위논문,
- [26] 이순기, 안효석, 한석영, 1999. "건조마찰 하에서의 플라즈마 용사 산화크롬 코팅의 마찰 마모", 大韓機械學會 論文集 A권, 제23권 제4호, pp. 535-544.

- [27] P. Gautier and K. Kato, 1993, "Wear mechanisms of silicon nitride, partially stabilized zirconia and alumina in un-lubricated sliding against steel", *Wear*, 162 - 164, pp.305-313.
- [28] P. Andersson and Holmberg, 1994, "Limitation on the use of ceramics in unlubricated sliding applications transfer layer formation", *Wear*, 175, pp.1-8.
- [29] S. Jahanmir and X. Dong, 1992, "Mechanism of mild to severe wearTransition in alpha-alumina", *J. of Tribology*, Vol. 114, pp. 403-411.
- [30] O. O. Ajayi and K. C. Ludema, 1989, "Formation of transfer film during ceramics repeat pass sliding", *Proc. Wear of material*, pp. 349-359.
- [31] 김영호, 이영제, 1995, "선접촉시 세라믹의 마찰 및 마멸 특성에 미치는 속도와 하중의 영향", *한국윤활학회 제 11권 제 4호*, pp. 35-44.
- [32] H. Ishigaki, R. Nagata and M. Iwasa. 1988, "Effect of adsorbed water on friction of hot-pressed silicon nitride and silicon carbide at slow speed sliding", *Wear*, 121, pp. 107-116.
- [33] J.F. Archard and W. Hirst, 1956. *Proc. R. Soc. London, Ser A*, 236, 397.
- [34] N.C. Welsh, 1964. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser, A*, 257, 51.

감사의 글.

참으로 졸작인 이 한편의 논문이 만들어지기까지 그 수고를 아끼지 않으신 김귀식 교수님께 진심, 또 진심으로 감사를 드립니다. 또한 항상 지도와 격려를 아끼지 않으신 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님, 정동원 교수님, 박윤철 교수님, 조경호 교수님, 김상재 교수님, 강철웅 교수님, 김영식 교수님의 은혜에 감사드립니다. Pin on disk형 마모시험기를 설계할 때 온 밤을 지새우며 고민을 같이해온 현창해 교수님의 진심에 대해서 고맙게 생각합니다. 그 시험기를 돌리는데 필요한 프로그램을 위해서 언제나 부르면 와서 걱정을 함께 했던 이성철 선생님 깊이 감사를 드립니다. 시험기를 직접 만드신 인천 우림기계의 사장님인 김학림님, 모터를 구입하는데 같이 걱정을 한 오영석님, 창원에서 시편을 만들어 공급해주신 김경택님의 깊은 마음 씀에 감사를 드립니다. 바쁘신 가운데도 많은 도움을 주신 한국기계 연구소 윤소남 박사님께도 감사드립니다. 플라즈마 용사를 위해 신경을 써주시던 오맹중 선생님, 박경석님의 걱정에 대해서 감사를 드리며, 홍용의, 오명범에게 감사를 드리며 실험에 적극적으로 도와주신 기계공학과 학우들에게도 감사를 드립니다. 대해서도 감사를 드리며 립니다. 항상 약해지려는 나 자신을 격려하며 용기를 북돋아 주신 친구 임유근님의 가슴에 감사의 마음을 항상 가지고 있습니다. 나의 아들과 딸, 항상 같이하며 사랑해야할 김서정님, 김기훈님의 건강과 꿈과 희망을 가슴에 품고서 있기를 바랍니다. 이 논문이 있기까지 걱정스런 눈으로 쳐다보시던 어머님과 형제들, 누이들에게 기쁨을 같이 나누고자 합니다. 항상 웃으시던 부친의 영전에 이 논문을 바칩니다.

제가 보려고 해도 보질 못하거나, 보아도 그냥 지나치든가, 잊어버렸거나, 알지 못하는 흐름들이거나, 알지 못하는 지역에서 정말 모르는 사람들에게도 감사를 드리며, 밤과 낮, 아침과 저녁, 어제와 오늘, 모든 생명들과 현상들에게도 정성과 깊은 마음을 드립니다.

밖에 새벽이 밝아 온다. 이 몸 안에서든 밖의 움직임이 있다.

一微塵中含十方 一切塵中亦如是 無量遠劫即一念 一念即是無量劫

2007년 1월 16일 새벽

金成益 拜上