

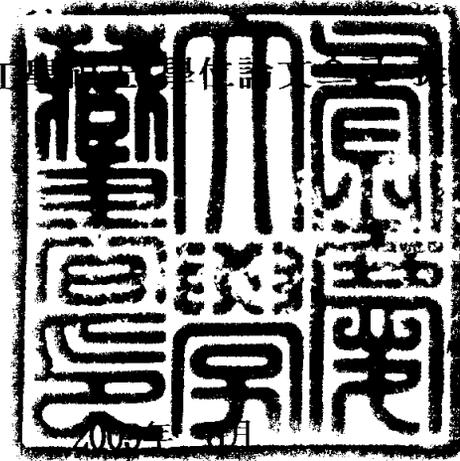
710
5/10/07

工學碩士 學位論文

水中에서 세라믹스의 摩擦 磨耗
機構 研究

指導 教授 金 亨 資

이 論文을 工學碩士學位論文으로 出함



釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

崔 熙 德

崔熙德의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2003年 6月 17日

主 審 工學博士 朴 卿 東



委 員 工學博士 具 永 必



委 員 工學博士 金 亨 資



目 次

Abstract	iii
List of tables	v
List of figures	vi
1. 서 론	1
1. 1 연구 배경	1
1. 2 세라믹의 마찰, 마모에 관한 연구 동향	3
1. 3 논문의 목적 및 구성	6
2. 마찰과 마모의 이론적 고찰	7
2. 1 마찰 현상	7
2. 2 응착 마모	11
2. 3 연삭 마모	15
3. 실험장치 및 실험방법	17
3. 1 실험장치	17
3. 2 시험편	20
3. 3 실험방법과 실험조건	21
4. 실험결과 및 고찰	24
4. 1 마찰계수에 미치는 하중과 속력의 영향	24

4. 2 대기중과 수중에 있어서 마찰계수의 비교	30
4. 3 마찰표면의 관찰	33
4.3.1 Mild wear 영역	33
4.3.2. Severe wear 영역	35
5. 결 론	39
References	40

A Study on friction and wear mechanism of ceramics in water

Hee Deuk Choi

Department of Mechanical Design
Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

Friction characteristics and wear mechanism of ceramic materials in water has been studied by using ball-on-disk type wear tester for four pairs of ceramics: ball- Al_2O_3 vs. disk- Al_2O_3 , ball- Al_2O_3 vs. disk- Si_3N_4 , ball- Si_3N_4 vs. disk- Al_2O_3 , and ball- Si_3N_4 vs. disk- Si_3N_4 .

The results of the experiment with various normal loads and sliding speeds are summarized as follows.

(1) The pair of the lowest friction coefficient was ball- Si_3N_4 vs. disk- Si_3N_4 and the one of the highest was ball- Al_2O_3 vs. disk- Al_2O_3 .

(2) Friction coefficient of Al_2O_3 and Si_3N_4 ceramics are quite dependent on

the normal load as well as sliding speed. There was critical sliding distance, transition point from severe wear to mild wear, between 150m and 250m.

(3) Friction coefficient of self-mated Si_3N_4 ceramics was lower than that of Al_2O_3 in water.

(4) Wear mechanism in this study can be classified into three;

- ① Mild wear type under the normal load of 2N, sliding speed of 0.1m/s below, and friction coefficient of 0.03 below.
- ② Abrasive wear type indicating high friction coefficient due to increased contact area with increasing speed and high normal load for Si_3N_4 ceramic specimens.
- ③ Adhesive wear type for Al_2O_3 ceramic specimens.

List of tables

Table 1. Specifications of the wear teste	18
Table 2 Physical and mechanical properties of specimens	21
Table 3 Qualities of natural water used for the experiments	23
Table 4 Combination of test conditions	23

List of figures

Fig 1	Scope of study	6
Fig 2.	Contact condition of surface	8
Fig 3.	Holm's model of direct contact	11
Fig 4.	Archard's model of direct contact	13
Fig 5.	A model of abrasive wear	15
Fig 6.	Ball-on-disk type wear tester	17
Fig 7.	Schematic diagram of ball-on-disk type wear tester	19
Fig 8.	Configuration of specimens	20
Fig 9.	Friction coefficient as a function of sliding distance and sliding speed under 2N normal load	26
Fig10.	Friction coefficient as a function of sliding distance and sliding speed under 5N normal load	27
Fig11.	Friction coefficient as a function of sliding distance and sliding speed under 10N Normal load	28
Fig12.	Friction coefficient for ceramic pairs under (a)2N, (b)5N, (c)10N normal load in water	29
Fig13.	Friction coefficient as a function of sliding distance for self - mated silicon nitride under 2N and 5N load in water and in the atmosphere	31
Fig14.	Friction coefficient as a function of sliding distance for self - mated alumina under 2N and 5N load in water and in the atmosphere	31
Fig15.	Friction coefficient for self - mated silicon nitride under	

2N and 5N load in water and in the atmosphere	32
Fig16. Friction coefficient for self - mated alumina under 2N and 5N load in water and in the atmosphere	32
Fig17. Optical micrographs of disk surface before wear test	33
Fig18. Optical micrographs of worn surface on disk specimens and ball specimens in water; normal load =2N, sliding speed=0.1m/s ,sliding distance=1000m	34
Fig19. Optical micrographs of worn surface on disk specimens and ball specimens in water; normal load =10N, sliding speed=0.25m/s ,sliding distance=1000m	36
Fig20. Optical micrographs of worn surface on disk specimens and ball specimens in water; normal load =20N, sliding speed=0.5m/s ,sliding istance=1000m	37
Fig21. Surface roughness of worn surface on disk specimens: sliding distance = 1000m	38

1.서론

1. 1 연구 배경

세라믹스는 종래 사용되어온 금속 재료와 비교해서 내식성 내열성 저밀도 내마모성 경량 고경도 등의 뛰어난 특성을 가졌기 때문에 특수 환경속의 기계 재료로서 사용되고 베어링과 실드등의 여러 가지 습동 부품의 재료로 사용되기 시작하고 있다. 특히 수중에서 부동의 섭동 부재로서 적용되는 압축 펌프용 수중 베어링^{(1) (2)}과 실드^{(3) (4)}등에 사용되고있다. 그러나 현재 이와 같은 장치의 개발은 세라믹을 실제로 응용한 경우의 마찰, 마모 실험의 결과를 비교한 것으로서 세라믹의 선정과 재료 개발을 하고 있는 것에 지나지 않고, 수중에 있어서의 마찰, 마모의 메카니즘이 불명확하기 때문에 최적재료의 결정과 최적형상 결정을 위한 기본적 설계지침이 아직까지 얻어지지 않고 있다. 그 때문에 세라믹의 수중에 있어서 마찰, 마모의 메카니즘을 명확히 하여 세라믹의 여러 가지의 물성값과 마찰조건이 마찰, 마모에 어떠한 영향을 주는가를 연구할 필요가 있다. 특히 세라믹은 일반적으로 내식 재료로서, 물에 대해서 화학적으로 안정된 재료로 생각되고 있지만, 마찰, 마모에 영향을 미치는 표면에 대해서는 반듯이 그렇지만은 않고, 세라믹도 주위의 환경에 따라서 기계적 특성이 변화되는 것으로 알려지고 있다⁽⁵⁾. 환경에 의한 표면 물성의 변화는 마찰, 마모 특성에도 영향을 미치게 되므로, 세라믹을 실용적으로 응용하기 위해서는 주위

환경의 마찰, 마모 기구로의 영향과 메카니즘을 연구할 필요가 있다.

이와 같은 상황에서 수중에 있어서 세라믹의 기본 특성을 밝히고, 마찰, 마모 기구를 명확히 하는 것이 섭동부의 설계 및 섭동 부재로서의 세라믹 개발을 위해 요구되고 있다.

1. 2 세라믹의 마찰, 마모에 관한 연구 동향

세라믹의 수중에 있어서의 마찰 마모에 관한 연구는, 세라믹의 마찰, 마모특성이 습도에 의해 큰 영향을 받는 것이 명확하게 된^{(6), (8)}, 이후에도 진행되어 왔다. Tomizawa⁽⁹⁾ 등은 핀 온 디스크 (pin-on-disk)형의 마찰시험기로, 수중에 있어서의 질화 규소와 탄화규소의 마찰 시험을 하였다. 그 결과 질화규소 끼리의 마찰시험에 있어서 0.065m/s 이상의 미끄럼 속도에 대해서 0.002이하의 매우 낮은 마찰계수가 얻어진다는 것을 밝혔다. 또, 탄화규소에서는 질화규소와 달리 그와 같은 저 마찰 계수가 얻어지지 않는다는 것을 밝혔다. 질화 규소에 있어, 이 같은 저마찰 계수의 기구로서 그들은, 마찰면 의 트라이보 케미칼 반응에 따르는 마찰면의 아주 작은 마모에 의해, 표면이 경면화 되어, 그 결과 접촉형태가 어떤 미끄럼 속도 이상에 대해서, 유체 운할 상태로 천이하는 것으로, 마찰 계수가 0.002 이하로 되는 마찰 기구를 제안하였다. 한편 S ,Sasaki⁽¹⁰⁾ 는 대표적인 엔지니어링 세라믹스인 질화규소, 탄화규소, 알루미늄 및 지르코니아에 대해서 체계를 세워 마찰, 마모특성의 실험을 하였다. 그 결과 질화규소와 탄화규소에 대해서는 0.4m/s 이상의 높은 미끄럼 속도에 대해, 0.01이상의 마찰 계수가 얻어지는 것, 알루미늄과 지르코니아에 대해서는 마찰 계수는 미끄럼 속도에 의하지 않고 일정하다는 것을 밝혔다. 이 같은 탄화규소에 대해서 저 마찰계수는 호리타⁽¹¹⁾등 에 의해서도 같은 결과가 얻어지고 있다. 동일 질화규소의 마찰에 의한 트라이보케미칼 반응의 예로서, Sugita⁽¹²⁾ 등은 수중에 있어서의 질화규소 끼리의 마찰에 대해서 표면이 규소, 수소와 산소의 이온

이 남아 있는 것으로, 수산화 아몰파스층이 생긴다는 것을 보고하고 있다. 또 최근, Gates⁽¹³⁾ 등에 의해, 알루미늄에 대해서도 트라이보케미칼 반응에 의한 생성물이 마찰 마모에 미치는 영향이 상세히 검토되고 있다. 이상과 같이 세라믹의 수중에 있어서의 마찰 마모에 대해서는 세라믹의 마찰 면에 있어 물과의 반응(트라이보케미칼 반응) 및 생성물의 영향이 큰 것으로 밝혀지고 있다.

한편 트라이보 케미칼 작용 이외에도 수중에 있어서의 세라믹의 마찰, 마모에 미치는 영향으로서는 마찰표면의 흡착현상에 따른 물의 흡착층 또는 수산화물이 수중에 있어서의 세라믹의 마찰, 마모를 감소시키는 중요한 원인이라고 생각된다.

Jahanmir⁽¹⁴⁾ 등은 질화규소와 지르코니아에 대해서, 질화규소가 헥사테칸과 스테아린산을 포함한 헥사테칸속에서 발생하는 경계 윤활 막이 마찰 마모를 감소시키는 것에 유효하다는 것을 밝혔다. 또, 호리타 등도 액체중의 관능기의 (유무)에 따라서 탄화규소의 마찰계수는 크게 달라진다는 것을 밝혔다. Hibi⁽¹⁵⁾ 등도 알콜과 아미노기를 가진 시란카플링 제가 질화규소의 물윤활성을 크게 개선한다는 것을 알렸다. 이처럼 세라믹의 수중에 있어서의 마찰 마모특성에 극 표면의 흡착물과 생성물이 강하게 영향을 미치는 것이 명확해지고 있다.

또 부분 안정화 지르코니아에 대해서는 수중의 마찰면에 있어서의 물분자와의 반응에서 유도된 응력부식 변태 반응에 의해 뚜렷한 마모증대 효과가 얻어진다는 것이 보고되고 있다.⁽¹⁶⁾

이상과 같이 세라믹의 수중에 있어서의 마찰 마모 기구에 미치는 종류는 물의 영향만이 아니라고 생각되며, 물에 영향을 받은 여러 가지 기구가 재료와

마찰조건에 의해 다른 마찰 마모특성으로서 나가게된다고 생각된다. 수중에 서의 세라믹의 마찰, 마모는 그 같은 복잡한 현상 때문에 각각의 마찰기구가 어떠한 마찰조건으로 지배적으로 나타나는 것인지가 불분명하다. 또, 이상의 연구는 결국 점접촉 선접촉의 고압력 접촉상태이며, 실제로 쓰여지는 평면접촉 상태의 데이터는 아니다.

1.3 연구의 목적 및 구성

본 논문의 목적은 수중에 있어서 세라믹의 마찰마모기구를 명확히 하는 것이다. Al_2O_3 와 Si_3N_4 가 수중에 있어서의 마찰마모의 기본특성으로서 마찰계수의 값의 변화를 일으키는 윤활 상태의 천이에 미치는 미끄럼거리, 및 대기중과 수중에서의 마찰 마모특성의 비교 및 마찰면의 표면관찰을 하였다. 그것의 결과로부터 수중에 있어서의 세라믹의 마찰마모 기구를 명확히 밝히고자 하는데 그 목적을 둔다. 논문의 구성을 Fig.1에 나타내었다.

water lubrication on ceramic surface			
tribo-test in water			
friction mechanism		wear mechanism	
relations between friction coefficient and sliding distance, normal load, sliding speed		-observation of the surface	
		-measuring the surface roughness	
		-optical microscope	
		scanning electron micrograph	
tribo-test of metals in water	low friction area of $\mu < 0.03$	friction area of $\mu > 0.03$	-micro wear
			-wear of brittle fracture type
			- wear of plastic flow type
tribo-test in the atmosphere	examination of lubrication regime	dependency of material	-mechanism of wear initiation
examination of friction and wear mechanism of self-mated ceramics in water			

Fig.1 Scope of study

2 마찰과 마모의 이론적 고찰

2.1 마찰 현상

금속의 표면은 평활 하게 보여도 실제로는 미세한 요철을 형성하고 있으며, 표면은 내부와는 물리적·화학적으로 다른 성질을 가지고 있다.

또한, 금속의 결정 입계는 입내보다 조직이 견고하므로 두 면을 압착하는 것 만으로도 표면에 요철이 생기게 된다. 따라서 서로 접촉하는 시험편을 마찰시키면 표면 돌기부가 차례로 마모되면서 미끄럼이 발생하여 평활 도가 저하하게 된다. 이처럼 요철로 인하여 마찰 부분의 접촉면적은 겉보기 면적에 비하여 극히 작고 접촉압력이 높기 때문에 실제 접촉부는 접촉 초기에는 탄성변형을 하지만 탄성한계를 넘으면 소성 유동을 일으켜 소성변형을 하게 된다. 접촉면에서 소성 변형된 실제 접촉점이 계속되는 마찰에 의하여 더욱 크게 변형하여 표면의 오염이나 얇은 산화막이 파괴되고, 양 재료 표면의 원자들이 근접하여 원자 간극만큼의 가까운 거리가 되면 원자인력이 작용하여 점차 원자의 집합체인 접촉면 계에서 응착이 일어난다.

응착된 접촉계면을 계속하여 더욱 마찰시키면 일부분은 접촉만 할 정도로 미소한 압력의 접촉점도 존재하지만 대부분의 돌기는 상대 재료와 소성 변형을 하게 되어 전단이 일어날 때까지 계속하게 된다.

이와 같은 접촉 상태를 Fig. 2 와 같이 2차원 모델로 생각할 때 양 재료가 접촉 하중 P 에 의하여 소성적으로 응착될 때의 접촉 압력을 P_0 라 하면 접촉점의 응착부가 미끄럼 운동에 의하여 전단파괴 되는 데에 필요한 접촉압력, 즉

마찰력 F가 작용하면 접촉부에는 전단응력 τ 가 나타난다.

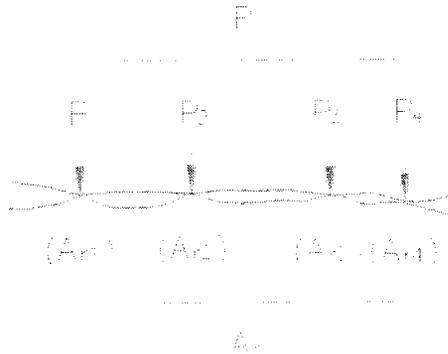


Fig 2. Contact condition of surface

이때의 최대 주응력 σ_1 및 최소 주응력 σ_3 은 식 (1)과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{(P + \sqrt{P^2 + 4\tau^2})}{2} \\ \sigma_3 &= \frac{(P - \sqrt{P^2 + 4\tau^2})}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

조합응력에 의한 탄성파괴에 대하여 Von Mises⁽¹⁷⁾의 항복조건을 이용하면
상당응력 $\bar{\sigma}$ 는 식(2), (3)과 같다.

$$\bar{\sigma} = P + \sqrt{P^2 + 3\tau^2} = Y \quad (2)$$

$$P^2 + 3\tau^2 = Y^2 \quad (3)$$

또한 탄성파괴가 Tresca⁽¹⁸⁾의 항복조건에 따르면 식 (1)에서

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \sqrt{P^2 + 4\tau^2} = Y \quad (4)$$

가 된다. 따라서

$$P^2 + 4\tau^2 = Y^2 \quad (5)$$

가 되며 소성유동이 일어나게 된다. 여기서 Y 는 압축 응력의 항복 점에 상당하며 τ 는 결합 부의 전단강도와 같다. 만일 접선력 F 가 작용하지 않는다면 식 (3) 및 식 (5)에서 $\tau=0$ 이 되어 전단 응력은 소성 유동 응력과 같게 된다. 따라서 $Y=f$ 이므로 식 (3)으로부터 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$P^2 + 3\tau^2 = f^2 \quad (6)$$

접선력이 작용하여 소성유동이 일어나면 실제 접촉면적 A_r 은 증대하여 소성유동이 멈추게 되고 τ 의 평형상태가 존재한다. 역시 탄성파괴가 Tresca에 따르면 식 (7)과 같이 된다

$$P^2 + 4\tau^2 = f^2 \quad (7)$$

이때 탄성유동압력과 전단 응력은 다음과 같다.

$$f = \frac{P}{A_r} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{F}{A_r} \quad (9)$$

따라서 마찰계수 μ 는 식 (10)과 같이 나타난다.

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{A_r \tau}{A_r f} = \frac{\tau}{f} \quad (10)$$

여기서 τ 와 f 는 재료상수로서 대체로 일정하고, 마찰계수는 약 0.2정도로 되므로 거의 일정값이 된다고 생각되지만 실제로는 재료 및 분위기 환경에 따라 크게 변화한다. 이 원인은 결합부의 전단파괴는 일반적으로 계면보다 재료 내에서 일어나며, 계면의 결합력이 재료의 강도보다 약할 때 τ 는 계면의 전단강도가 되고 이는 기체분자의 흡착 및 그 외의 오염물질에 의하여 변화하기 때문이다. 이처럼 마찰계수의 차는 환경 및 재료 자체의 흡착성 및 흡착층의 전단강도에 의존하므로 마찰계수를 감소시키기 위해서는 수직 응력에 충분히 저항할 수 있는 경면상의 전단에 대하여 용이하게 변형하는 연질박막을 생성시키면 가능하게 된다.

2.2 응착마모

응착마모의 이론으로서 중요한 것은 Holm⁽¹⁹⁾의 이론이며, 그 개요는 Fig. 3에 표시한 바와 같이 두 고체면 A와 B는 실제접촉을 하고 있는 상태로써 양 재료의 임의의 접촉점에서 두 표면원자 a_1 은 B면의 원자 b_1, b_2, \dots 와 순차적으로 만나게 되지만 그 사이에 어떤 확률로서 B면의 원자가 제거되어 진다고 가정하면 실제 접촉을 하는 B부분의 면적 A_r 과 하중 P와의 사이에는

$$P = fA_r \quad (11)$$

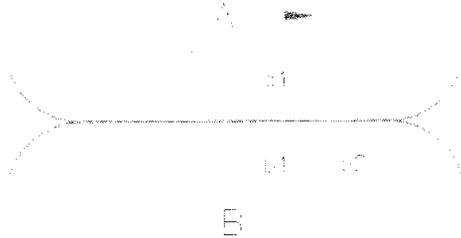


Fig 3. Holm's model of direct contact

의 관계가 성립한다.

여기서 근접 원자간 거리를 d 라고 하면 접촉 원자수는 $A_r/d^2 (= P/d^2 f)$ 가 되고 미끄럼거리 L 사이에서 만나는 원자수는 L/d 가 된다.

따라서 미끄럼거리 L 사이의 접 촉면 전체에서 만나는 원자총수 N_o 는

$$N_a = \frac{P}{d^2 f} \times \frac{L}{d} \quad (12)$$

이 되며, 서로 만나는 원자가 상대측 원자에 의하여 제거되어지는 확률을 Z 라 하고, 1개의 원자가 제거되어지는 마모체적을 d^3 으로 근사 시키면 결국 미끄럼거리 L 사이에서의 마모체적 V 는 다음과 같이 표시된다.

$$V = ZN_a d^3 = \frac{ZLP}{f} \quad (13)$$

또한 소성유동압력 f 는 연질재료 경도 H_v 와 같기 때문에 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{ZLP}{H_v} \quad (14)$$

즉 마모량은 미끄럼거리 L 과 하중 P 에 비례하고 소성유동압력 f 에 반비례한다는 것이 된다. 그러나 실제 마모분은 원자크기에 비하여 상당히 크다는 점에서 Archard는 좀 더 거시적인 마모기구를 제창하였다.

즉 Fig. 4에 표시한바와 같이 반경 a 인 원형 접촉점이 n 개 존재한다고 가정하면 식 (15)가 된다.

$$A_r = n \pi a^2 \quad (15)$$

Fig. 4의 (a)와 같이 접촉상태에서 미끄럼이 일어나면 (b)와 같이 접촉면적이 감소하고 (c)에 이르러 접촉부분의 면적은 “0”으로 되어 분리되지만, 계속하여 (a)와 같은 접촉점이 다시 반복되어 식 (15)는 항상 유지된다.

1개의 돌기가 접촉할 때 미끄럼거리는 $2a$ 가 되고 전체 미끄럼거리 L 사이의 접촉점의 총수 N_p 는 $nL/2a$ 가 된다.

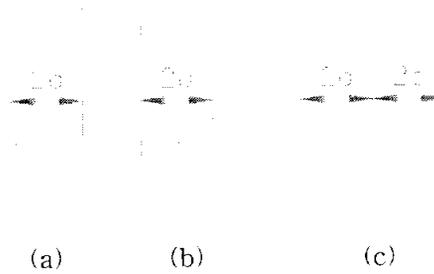


Fig4. Archard's model of direct contact

따라서, N_p 는

$$N_p = \frac{nL}{2a} = \frac{PL}{2\pi fa^3} \quad (16)$$

이 되며, 마모분은 접촉부에서 확률 Z 로서 $2a$ 가 되는 반구상으로 형성된다고

가정하면 미끄럼거리 L 사이의 마모체적 V 는 다음 식으로 주어진다.

$$V = \frac{2}{3} ZN_p \pi a^3 = \frac{ZLP}{3f} \quad (17)$$

즉 마모량은 식 (13)과 같이 LP/f 에 비례하고 이와 같은 개념이 성립하는 마모현상은 윤활제 등을 포함하지 않는 모든 건조마모의 경우이다.

많은 연구의 실험결과에서 마모체적 V 는 대체로 하중 P 에 비례하여 증가하지만 재료의 소성유동압력 f 나 미끄럼거리 L 과 마모체적 V 와의 관계는 복잡하다.

또한 Holm 및 Archard의 이론에서는 미끄럼속도의 영향이 포함되어 있지 않지만 이것은 접촉점의 온도에 크게 관련하기 때문에 중요하며 철강재료의 건조마모의 경우는 마모분 자체가 마모에 관련하기 때문에 접촉하는 두 물체의 마모기구의 이해를 혼란시킨다.

또한 마찰면의 온도와 마찰속도 구역은 하중을 독립시켜 변하게 하는 것이 실험상 무척 어렵기 때문에 이에 대한 마모현상 해명은 그다지 진행되어 있지 않다.

2.3 연삭마모

연삭 마모의 모델은 Rabinowicz⁽²⁰⁾에 의하여 Fig.5와 같이 한쪽의 선단이 모두 동일한 반정각 θ 를 가진 원추형의 단단한 돌기가 상대측 연질의 평활한 표면을 깊이 h 만큼 파고 들어간 것으로 가정하여 거리 L 만큼 이동하는 사이에 빗금 친 부분이 연삭되어 마모된 것이라 하면, 이 돌기에 가해진 하중 P 는

$$P = \pi(h \cot \theta)^2 H_v \quad (18)$$

이 되며, 마모체적 V 는 미끄럼 방향에서 볼 때 식 (19)와 같이 돌기가 파고 들어간 부분의 투영면적과 미끄럼거리 L 과의 곱으로 계산된다.

$$V = \frac{PL \tan \theta}{H_v} \quad (19)$$



Fig. 5. A model of abrasive wear

많은 연구자들이 연삭마모에 대하여서는 경도가 가장 중요한 변수라는 것을 확인하고 있다. 즉 Kruschov⁽²¹⁾는 풀림한 순금속의 경도와 연삭마모의 상대 내마모도는 직선적 관계가 있다고 하지만, 순 금속의 마찰 전 가공경화는 마모 률에 어떠한 영향도 줄 수 없다고 하였다.

또한 Richardson⁽²²⁾은 내마모를 경도비 H_R/H_a 의 함수로서 검토할 때, 이 값이 0.8 이상이 되면 내마 모력이 급증한다고 밝히고 있다. 여기서 H_R 은 금속표면의 경도이며, H_a 는 연삭 입자의 경도이다. $H_R/H_a < 0.8$ 의 영역은 연삭마모가 크고, $H_R/H_a > 0.8$ 의 영역은 연삭 마모가 작으며, 이 경우 H_R/H_a 가 1보다 훨씬 크게 될 때까지 연삭 마모가 일어난다고 하였다.

이와 같이 연삭 마모는 경질고체에 의한 연질고체의 연삭이며, 철강재료의 산화물 및 응착 마모에 의해 생성된 경질입자가 액체 중에 분산되어 있어도 역시 같은 작용을 하게 된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3. 1 실험장치

본 연구의 실험장치는 밀링 머시인을 개조하여 주축에 디스크를 고정시켜 회전 운동을 할 수 있게 하고 테이블 위에 피벗(pivot)지그를 설치하여 볼을 지지하고 추를 달아 볼이 디스크에 수직하중이 작용하도록 만든 마찰시험기이다. 장치의 중요부분의 사진을 Fig 6 에 나타냈다.



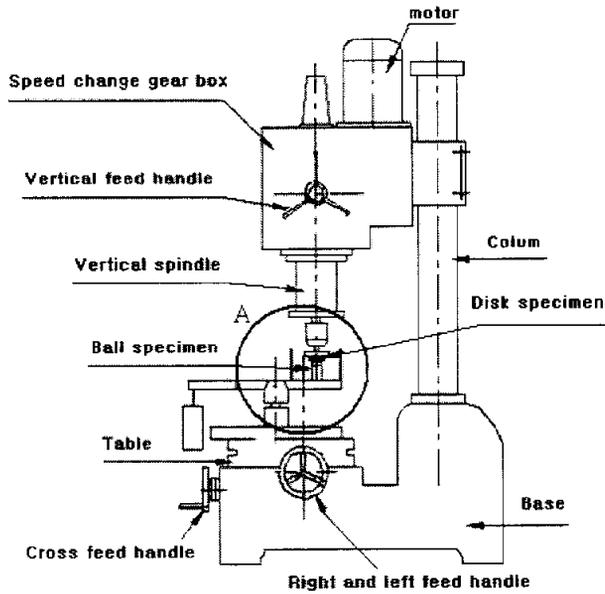
Fig.6 Ball-on-disk type wear tester

Table 1 Specifications of the wear tester

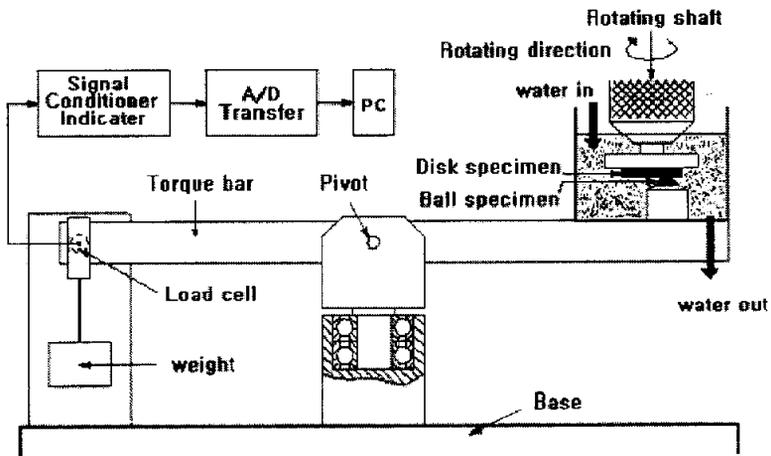
Rotational speed, N [rpm]	35 ~ 1800
Mean sliding speed, V [m/s]	0.1 ~ 1
Normal load, W [N]	2, 5, 10, 20
Flow rate, Q, [ml/min]	450

Fig. 7 (a)에 마모 시험기의 전체 모습을, Fig. 7 (b)에 시험편 장착부와 마찰력 측정부를 도시하였다. 수직 스피ن들의 척에 디스크 시편이 설치되어 회전하며 디스크 표면에 볼이 상향으로 접촉되는 구조로 되어 있다.

수직하중은 피벗(pivot)에 지지되어 있는 토크 바(torque bar)의 한 쪽 끝에 볼 시편을 고정시키고 그 반대쪽에 매달린 추(weight)의 무게에 의하여 볼 시편이 디스크 시편에 접촉함으로써 가해지도록 되어 있다. 스피인들이 회전하면 볼과 디스크의 접촉면 사이에는 마찰력이 발생하고 마찰력은 토크 바의 회전을 구속하는 로드 셀(load cell)에 의하여 전압신호로 변환된다. 이 신호는 신호처리기와 아날로그/디지털 변환기를 거쳐서 퍼스널 컴퓨터에 연속적으로 저장된다. 본 시험에서는 마찰면에 물을 공급할 필요가 있기 때문에 구동 축의 하부에 용량 600ml의 물 용기를 설치하였다.



(a) Outline of experimental apparatus



(b) Detail of A

Fig. 7 Schematic of ball-on-disk type wear tester

3. 2 시험편

사용된 세라믹 디스크와 볼 시험편은 모두 상압 소결법으로 제조되었으며 시험편의 특성을 Table 2에 나타내었다. 모두 폴리싱 가공하여 표면 거칠기가 R_{max} $0.05\mu m$ 이하가 되도록 하였다. 시험편의 치수를 Fig. 8에 나타내었다.

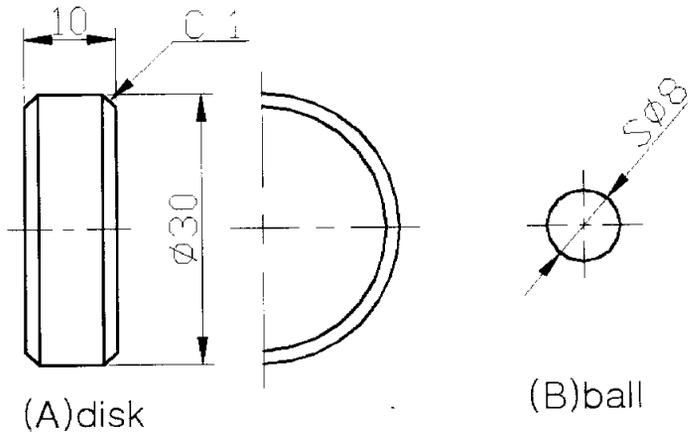


Fig. 8 Configuration of specimens

Table 2 Physical and mechanical properties of specimens

Material	Properties of specimens	
	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
Production process	Pressureless sintering	
Elastic modulus [GPa]	270	400
Density [g/cm ³]	3.2	3.7
Thermal expansion coefficient [x10 ⁻⁶ /K]	3.8	7.5
Thermal conductivity [W/m-K]	29.2	29.2
K1c [MPa cm]	4.35	1.92
Hv [GPa]	13.4	14.7
Specific heat [J/kg-K]	710	1040
Roughness R _{max} [μm]	0.05	0.05

3. 3 실험방법 및 실험조건

디스크/볼 시험편의 재질은 Al₂O₃/Al₂O₃, Al₂O₃/Si₃N₄, Si₃N₄/Al₂O₃, Si₃N₄/Si₃N₄ 의 4가지 조합을 사용하였고 실험 전에 시험편을 아세톤으로 20분 간 초음파 세정하고, 축침식 표면 조도계로 단면곡선을 측정한 후, 한번 더 20

분간 아세톤으로 세정하고 나서 홀더에 설치한다. Table 4의 실험조건에 따라 소정의 하중을 추로써 가하고 일정량의 물통 속에서 일정 미끄럼거리에 도달 할 때까지 마찰실험을 한다. 그 사이의 마찰계수를 센서에 의하여 0.1초마다 컴퓨터에 기록한다. 실험이 끝난 후 우선 광학 현미경에 의해 마찰 면을 관찰 한다. 그 후 아세톤을 사용하여 초음파 세정을 하고 촉침식 표면 조도계로 표면 거칠기를 측정한다.

물을 통속에 450ml 채워 물 속에서 1회 실험 후 교환한다. Table 3에 실험에 사용한 물의 성분을 나타내었다.

또 전형적인 마찰 면에 관해서는 표면의 미시적인 변화를 조사하기 때문에 실험전후의 표면을 주사형 전자 현미경으로 관찰한다. 마모량의 측정에 관해서는 단면곡선의 변화부터 환산하는 방법과 중량변화부터 환산하는 방법을 들 수 있다. 본 실험에 대해서 마찰계수가 0.03이하의 저 마찰계수 영역에 대한 마모량은 매우 적고, 촉침식의 거칠기 측정기에 있어서 최고 동 배율 10만배이며, 단면곡선은 측정해도 실험 전후의 표면변화를 관찰할 수 없기 때문에 단면곡선을 사용한 마모량의 측정은 불가능하였다. 또 세라믹은 다공성 재료이기 때문에, 세정 후에는 아세톤 혹은 수분이 동공(pore)속에 남기 때문에 세정후의 중량 측정오차가 크므로, 실험 전후의 중량 차를 마모량으로 환산하는 것은 불가능하였다. 그 때문에 본 연구에 관해서는 마모 특성으로서는 마모량의 측정은 하지 않고, 표면손상의 정도를 촉침식 표면 조도계, 광학 현미경 및 주사형 전자 현미경에 의하여 관찰한다.

Table 4 는 세부적인 실험 조건의 조합을 나타낸 것이다. 미끄럼거리는

1000m를 기준으로 하였으며 미끄럼속력은 0.1, 0.25, 0.5, 1.0m/s이다. 하중은 2, 5, 10, 20N의 추를 사용하였다. 모든 실험은 두 번 이상 반복하여 실시하고 평균값을 결과로 사용하였다.

Table 3 Qualities of natural water used for the test

Temperature [°C]	Specific Gravity	Oxygen [mℓ / ℓ]	P H	Chrome [PPM]	Silicon [PPM]
20	1.0231	5	7.2	10~20	5~35

Table 4 Combination of test conditions

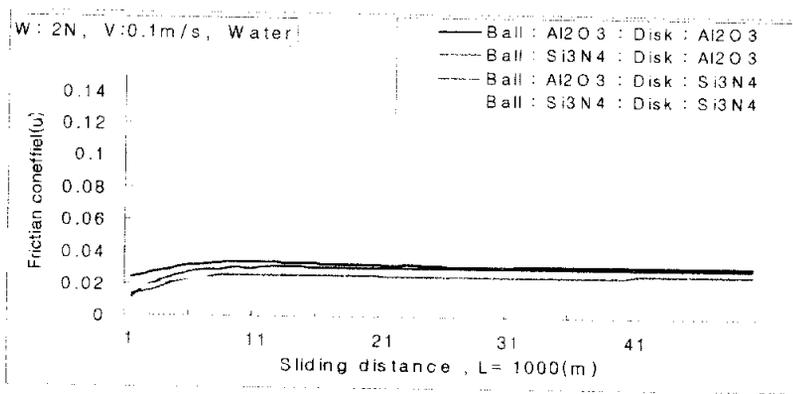
Material		Sliding speed [m/s]	Normal load [N]
Ball	Disk		
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	0.1	2
Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	0.25	5
Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	0.5	10
Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	1	20

4. 실험결과 및 고찰

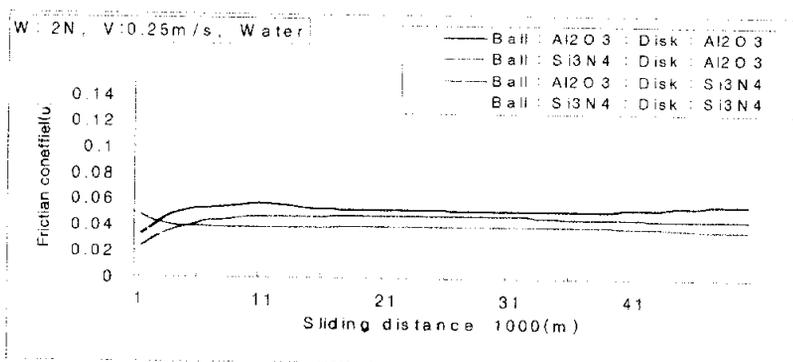
4·1 마찰계수에 미치는 하중과 속력의 영향

수중에서 볼과 디스크 시험편을 Table 4의 미끄럼 속도 0.1m/s, 0.25m/s, 0.5m/s, 와 수직 하중 2N, 5N, 10N, 의 실험 조건으로 실험한 결과를 Fig9-11에 나타내었다. 하중을 2N으로 일정하게 하고 미끄럼 속도를 변화시켰을 때 미끄럼 거리에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸 Fig.9.에서 (a)0.1m/s, (b)0.25m/s, (c)0.5m/s 로 실험한 결과를 각각 비교하여 보면 전반적으로 저 마찰계수가 형성되었으며 실험에 의하여 얻어진 4종류 세라믹 조합 시험편의 마찰계수와 미끄럼 속도의 관계를 그림 Fig.9(a)~(c)에 나타냈다. 각각의 세라믹에 대한 마찰계수와 미끄럼거리의 관계에 대해서는 마찰계수가 초기에 급증하며 이동거리가 150-200m에 도달하면 서서히 감소하고 안정되는 것을 알 수 있다. 하중이 2N, 이동속도가 0.1m/s의 실험 경우 Fig.9(a)와 같이 대부분의 실험값이 저 마찰 영역인 0.03안에 들어왔으며 한번 안정된 마찰계수는 변화가 거의 없었다. 특히 Ball-Si₃N₄ / Disk-Si₃N₄ 에 관해서는 비교적 저하중 저속에서 마찰계수가 0.02정도로 매우 적었으며, Ball-Al₂O₃/ Ball-Al₂O₃ 도 0.035정도로 Ball-Si₃N₄ / Disk-Si₃N₄ 보다는 높게 나타났으나 Ball-Si₃N₄ / Disk-Si₃N₄ 와 Ball-Al₂O₃/ Ball-Al₂O₃ 의 편차는0.015정도로 양호한 마찰계수임을 알 수 있다. 하중이 2N, 이동속도가 0.25m/s의 실험조건으로 실험한 경우에는 그림 Fig.9 (b)와 같이 나타났는데 마찰계수의 순서에는 변화가 없었으나 약간 높은 위치에서 분포하고있고 편차도 마찰계수가 0.025로 벌어지는 것을 알 수 있

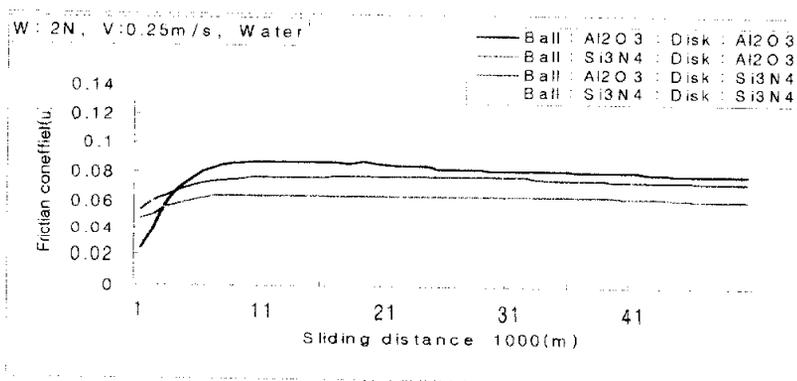
다. 하중이 2N, 이동속도가 0.5m/s의 실험조건으로 실험한 경우에는 그림 Fig.9 (c)와 같이 나타났다. 하중이 고정되고 속도가 올라갈수록 마찰계수도 증가하는 것을 알 수 있으며 마찰계수의 편차도 더 커졌다. Fig.9 (c)에서 대부분의 시험 편들이 초기에는 적게 마찰계수가 형성되었으나 급격하게 높아지고 있으며 편차도 마찰계수가 0.05정도로 확대되었고 특히 Ball-Al₂O₃/Ball-Al₂O₃ 경우 초기 값이 0.02에서 시작을 하였으나 미끄럼거리 100-200m 사이에 마찰계수가 0.09까지 급격하게 상승하여 가장 큰 변화율을 보였으며 점차로 안정되는 모습을 볼 수 있다. 이와 반대로 Ball-Si₃N₄ / Disk-Si₃N₄ 의 경우는 초기 마찰계수 0.07로 다소 크게 나왔으나 미끄럼거리 0-200m 구간에서 0.04정도로 작아져서 안정되는 모습을 볼 수 있다. 하중이 5N, 이동속도가 0.1m/s, 0.25m/s, 0.5m/s의 조건으로 실험한 경우에는 그림Fig.10 (a)(b)(c)같이 나왔으며 위 실험과 유사한 형태의 그래프가 나왔으나 마찰계수가 높아져 있음을 알 수 있다. 그림 Fig.10 (c)에서 하중이 5N, 이동속도가 0.5m/s 인 경우에 Ball-Si₃N₄/Disk-Al₂O₃ 의 세라믹 조합이 마찰계수가 가장적게 나왔나 점차로 높아짐을 알 수 있다. 그림Fig.11 (a) (b) (c) 는 하중10N 일 때의 그래프를 미끄럼 속도별로 나타냈다. 미끄럼 속도가 0.25m/s 일 때 Ball-Al₂O₃/Disk-Si₃N₄ 의 세라믹이 미끄럼거리500m에서 마찰계수가 안정적인 것을 알 수 있으며 대체적으로 하중이 많아지고 미끄럼속도가 빨라질수록 마찰계수도 비례하여 높아짐을 알 수 있다.



(a) Sliding speed 0.1m/s

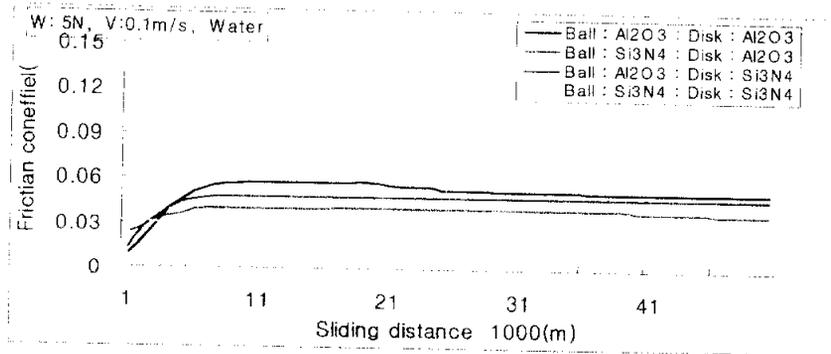


(b) Sliding speed 0.25m/s

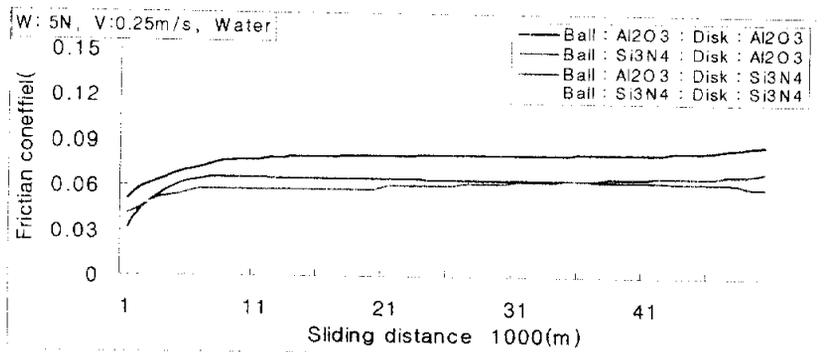


(c) Sliding speed 0.5m/s

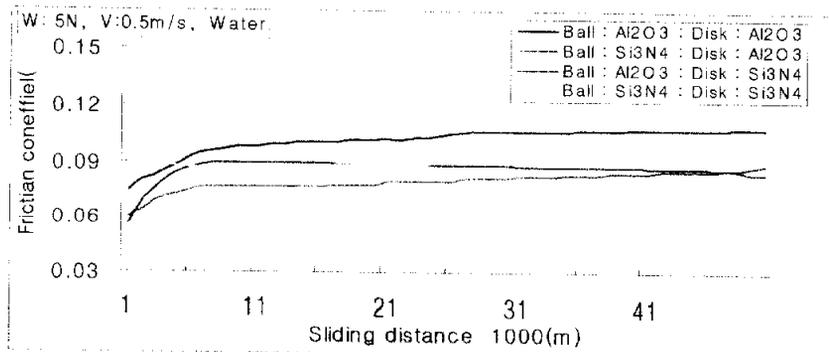
Fig. 9 Friction coefficient as a function of sliding distance and sliding speed under 2N Normal load



(a) Sliding speed 0.1 m/s

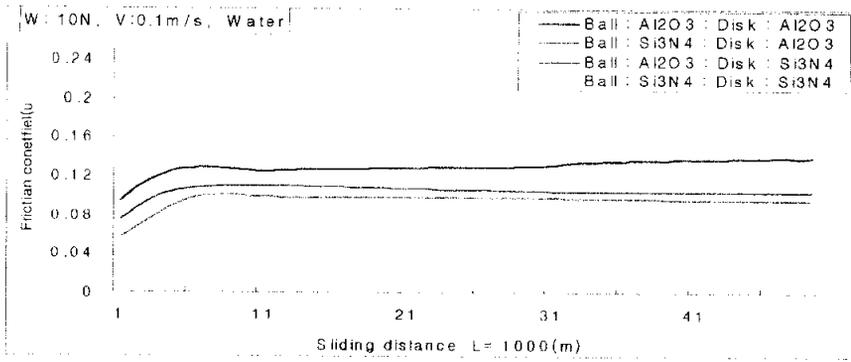


(b) Sliding speed 0.25 m/s

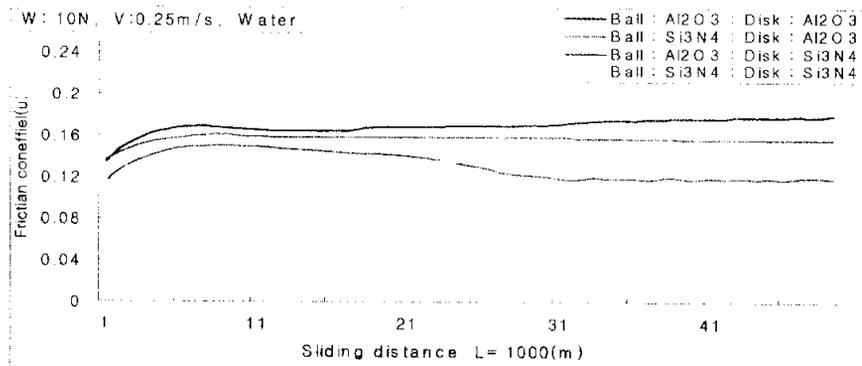


(c) Sliding speed 0.5 m/s

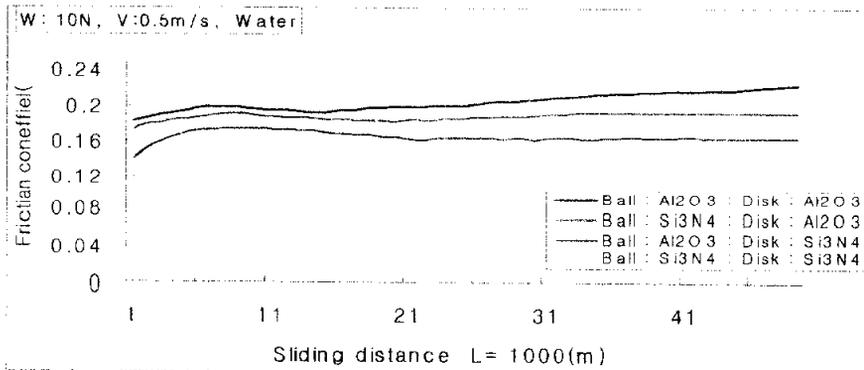
Fig. 10 Friction coefficient as a function of sliding distance and sliding speed under 5N Normal load



(a) Sliding speed 0.5 m/s



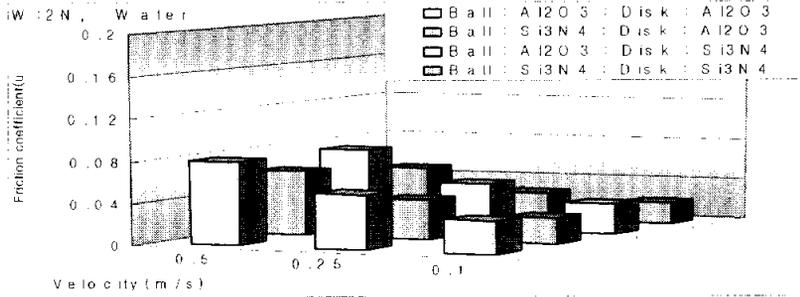
(b) Sliding speed 0.25 m/s



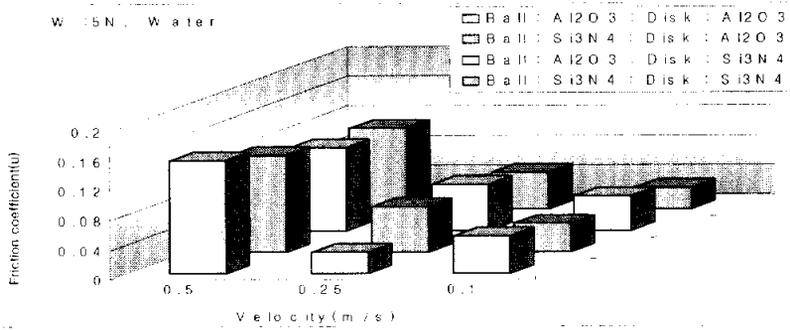
(c) Sliding speed 0.5 m/s

Fig.11 Friction coefficient as a function of sliding distance and sliding speed under 10N Normal load

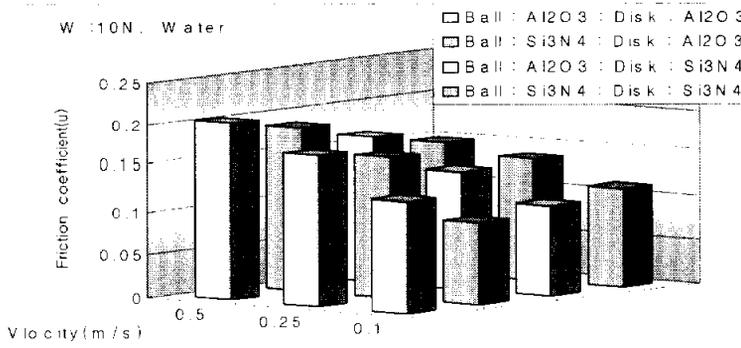
그림Fig.12 (a)(b)(c) 는 하중과 미끄럼 속도가 마찰계수에 미치는 영향을 막대 그래프로 나타내었다.



(a) Normal load: 2N



(b) Normal load : 5N



(c) Normal load: 10N

Fig. 12 Friction coefficient for ceramic pairs under (a)2N, (b)5N, (c)10N Normal load in water

4.2 대기중과 수중에 있어서 마찰계수의 비교

각 세라믹의 마찰상태에 미치는 물의 영향을 명확히 하기 위해 같은 장치를 사용하고 대기 중에 마찰실험을 하였다. 큰 마찰계수와 심한 마모가 우려되기 때문에 저속(0.1m/s), 저 접촉압력(2, 5N)에 대해서 행하였다. 그 실험 결과를 수중에서의 마찰결과를 포함하여 2종류의 세라믹Ball-Al₂O₃/Disk-Al₂O₃과 Ball-Si₃N₄ / Disk- Si₃N₄ 에 대해서 Fig. 14 ,15, 16에 나타냈다. Fig.14 로부터 Ball-Si₃N₄ / Disk- Si₃N₄ 의 경우, 접촉 하중이 2N와 5N양쪽 모두, 수중에 있어서의 마찰계수는 0.04이하로 대기중의 0.07과 0.15보다 보다는 매우 작다는 것을 알 수 있다. 특히 고 접촉 압력에 대해서 마찰계수의 차가 크다는 것을 알 수 있다. 알루미나의 경우 Fig. 15로부터 접촉 하중이 5N에 대해서는 수중과 대기중의 마찰계수는 크게 다르지만, 접촉하중이 2N의 경우, 거의 같은 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 Ball-Al₂O₃/ Ball-Al₂O₃ 대기 중에서 하중 2(N) 이동속력: 0.1(m/s) 의 조건에서 마찰계수가 0.05정도였으며 하중 5(N) 의 경우 미끄럼거리 100-200m 구간에서 급격히 증가함을 알 수 있으며 대기중과 수중에서 큰 차이를 보이지 않지만 질화 규소의 마찰상태에는 대기 중에서는 마찰계수가 0.13 정도의 높은 값을 나타내지만 수중에서는 미끄럼이 원활하여 마찰계수가 0.04이하의 아주 양호한 실험결과가 나왔다. Al₂O₃의 경우 대기중과 수중에서 차이가 없었지만 Si₃N₄의 경우 수중에서 마찰계수가 대기 중보다 현저하게 낮은 실험결과를 얻을 수 있었다.

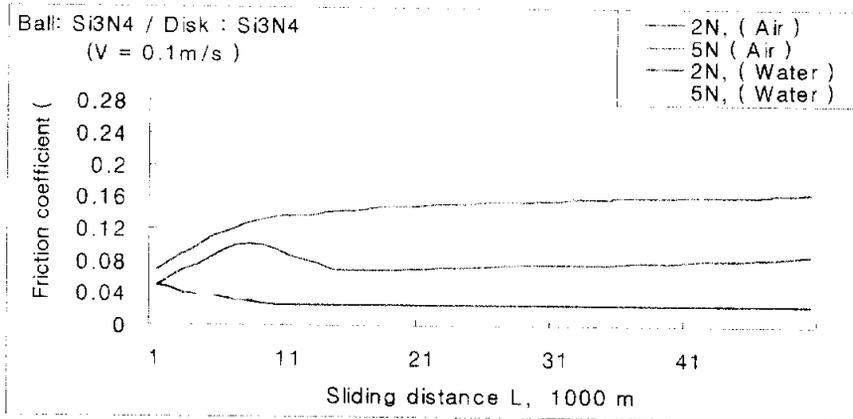


Fig. 13 Friction coefficient as a function of sliding distance for self - mated silicon nitride under 2N and 5N load in water and in the atmosphere

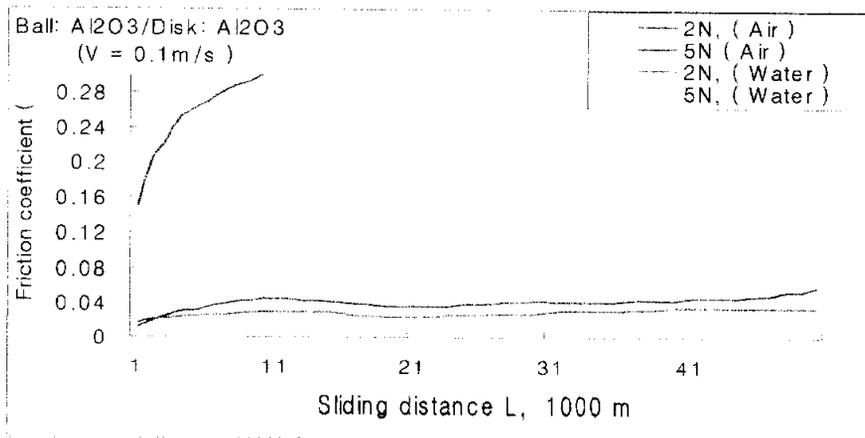


Fig. 14 Friction coefficient as a function of sliding distance for self - mated alumina under 2N and 5N load in water and in the atmosphere

Fig. 15,16은 수중과 대기 중에서 Ball-Si₃N₄/Disk-Si₃N₄, Ball-Al₂O₃/ Disk-Al₂O₃ 세라믹이 하중과 속도가 마찰계수에 미치는 영향을 막대그래프로 나타내었다. Ball-Si₃N₄/Disk-Si₃N₄세라믹은 수중에서 2N과 5N모두 매우 낮은 마찰계수가 형성되어 수중에서 물이 좋은 윤활 재임을 알 수 있으나 Fig. 16의 Ball-Al₂O₃/ Disk-Al₂O₃ 세라믹은 대기중과 수중에서 하중에 따라서 높게 나타나므로 물이 윤활재 역할을 하지 못하는 것을 알 수 있다.

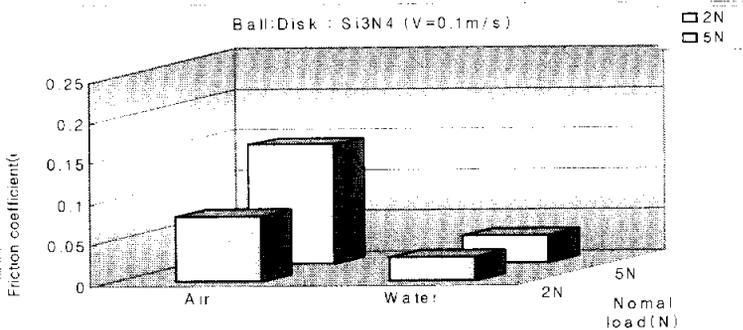


Fig. 15 Friction coefficient for self - mated silicon nitride under 2N and 5N load in water and in the atmosphere

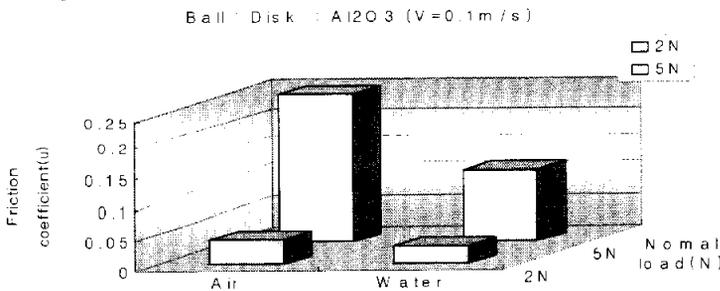


Fig. 16 Friction coefficient for self - mated alumina under 2N and 5N load in water and in the atmosphere

4.3. 마찰면의 관찰

4.3.1 Mild wear 윤회 영역에 대한 마찰 표면 관찰

수중에서 Normal Load 2[N]의 하중이 가해질 때 Sliding velocity 0.1m/s, 0.25m/s, 0.5m/s,의 조건으로 실험 한 결과 Ball-Al₂O₃/Disk-Al₂O₃, Ball-Al₂O₃/Disk-Si₃N₄, Disk-Al₂O₃/Disk-Al₂O₃, Disk-Si₃N₄/Disk-Si₃N₄ 세라믹에 대해서도 0.03이하의 저마찰 계수가 얻어졌으며 이때 표면 특성을 조사하기 위해 그같은 Mild 윤회 상태의 경우에서의 표면상태를 축침식 표면 거칠기 측정계와 광학현미경을 사용해서 관찰하였다. Fig.17 은 실험전 Al₂O₃ Disk 와 Si₃N₄-Disk의 표면사진을 나타내었고 Fig.18 (a)(b)(c)(d) 에 세라믹디스크의 마찰 후의 광학현미경 사진을 나타냈으며 Fig. 18 (a)에 표면 거칠기를 표시하였는데 실험전의 R_{max} 0.05 μ 이었는데 실험후의 거칠기는 R_{max}0.09-0.10 μ 이었다 이 같은 Mild 윤회 영역에 관해서는 표면 거칠기 표면상태는 거의 변화하고 있지 않다는 것을 알수 있다.

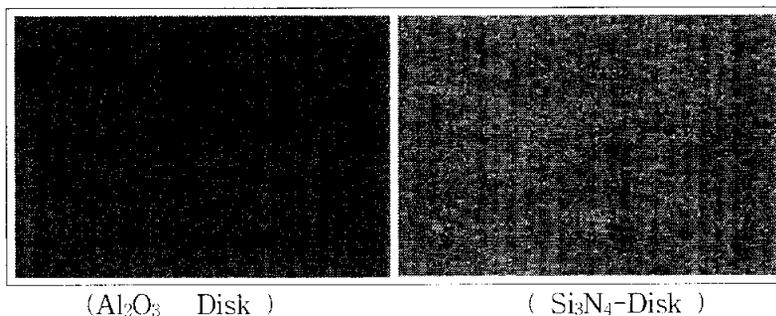


Fig. 17 Optical micrographs of disk surface before wear test

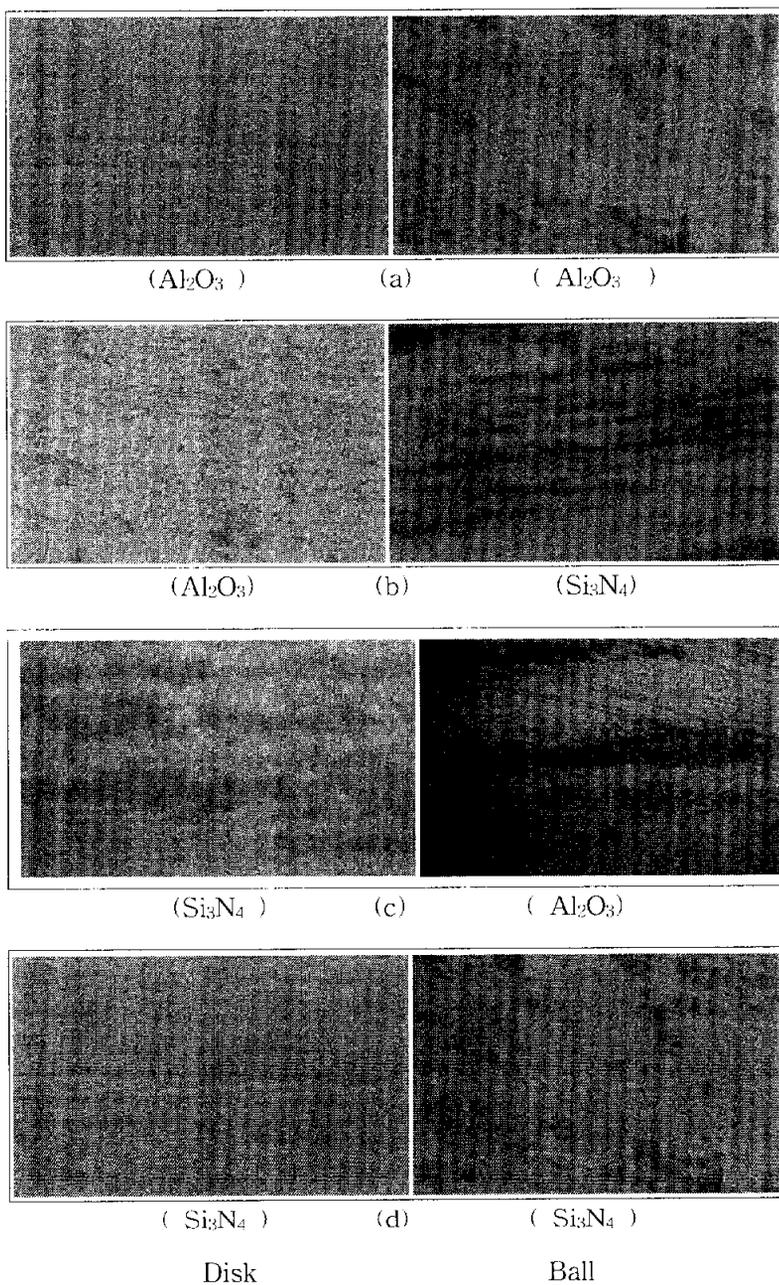


Fig. 18 Optical micrographs of worn surface on disk specimens and ball specimens in water; normal load =2N, sliding speed=0.1m/s, sliding distance=1000m

4.3.2. Sevre wear 대한 마찰 표면 관찰

수중에서 Normal Load 5N, 10N일때 Sliding speed 0.1m/s, 0.25m/s, 0.5m/s 마찰 실험후의 표면손상 상태를 광학 현미경으로 마모면의 대표적인 예를 Fig. 19, 20, 의 (a)(b)(c)(d) 에 나타냈으며, 실험후 측정계로 측정한 표면 거칠기를 Fig. 21 (b)(c)(d) 에 나타냈다. 하중W: 10N 속도 V: 0.25m/s 이동거리 L: 1000m 일 때 Fig.19 (a) 처럼 Disk- Al_2O_3 에 길게 뜯겨나간 흔적을 발견 할수 있으며 그 움푹 파진 홈들이 이 진진하는 쪽으로 마모했다 라고 생각되는 손상이 보였다. 질화규소의 전형적인 마모 면의 광학현미경 사진을 Fig. 19 (d) 나타내었다. 표면에는 굽힌 자국이 여러 개 보이고, 소성 유동을 하고 있다고 생각된다. 알루미나의 전형적인 마모면의 광학현미경 사진을 그림 Fig. 19 (a) 에 나타 내었다. 표면의 소성유동을 볼 수 없고, 취성 파괴형 마모가 발생하고 있다고 생각된다. 이상의 결과로부터 Al_2O_3 와 Si_3N_4 2종류의 세라믹의 마모는 알루미나에 대한 취성파괴형 마모와 질화규소에 대한 소성유동형 마모이다. 이상부 것들의 마모기구를 명확히 하기 위해 질화규소의 초기 마모면을 상세히 관찰하였다. 이상의 것들의 표면의 광학 현미경사진을 Fig.20 (a)(b)(c)(d) 나타냈다. 마모면의 관찰을 명확히 하기 위하여 하중과 이송속도를 높여 실험조건: 하중W:20N, 이송속도 V: 0.5m/s, 이동거리 L:1000m 실험한 마모면은 2N, 0.1m/s 로 실험하였을때 보다 명확히 나타난다. Fig.20 (a)에서 Al_2O_3 의 뜯기는 취성 마모가 확연히 관찰 할 수 있으며 Si_3N_4 의 경우는Fig.20 (C) 처럼 표면이 반대로 부풀어오르고 있고 산화물 혹은 응착물이 생성하고 있으며 생성된 응착물이 밀리는 소성 마모가 일어난다고 생각된다.

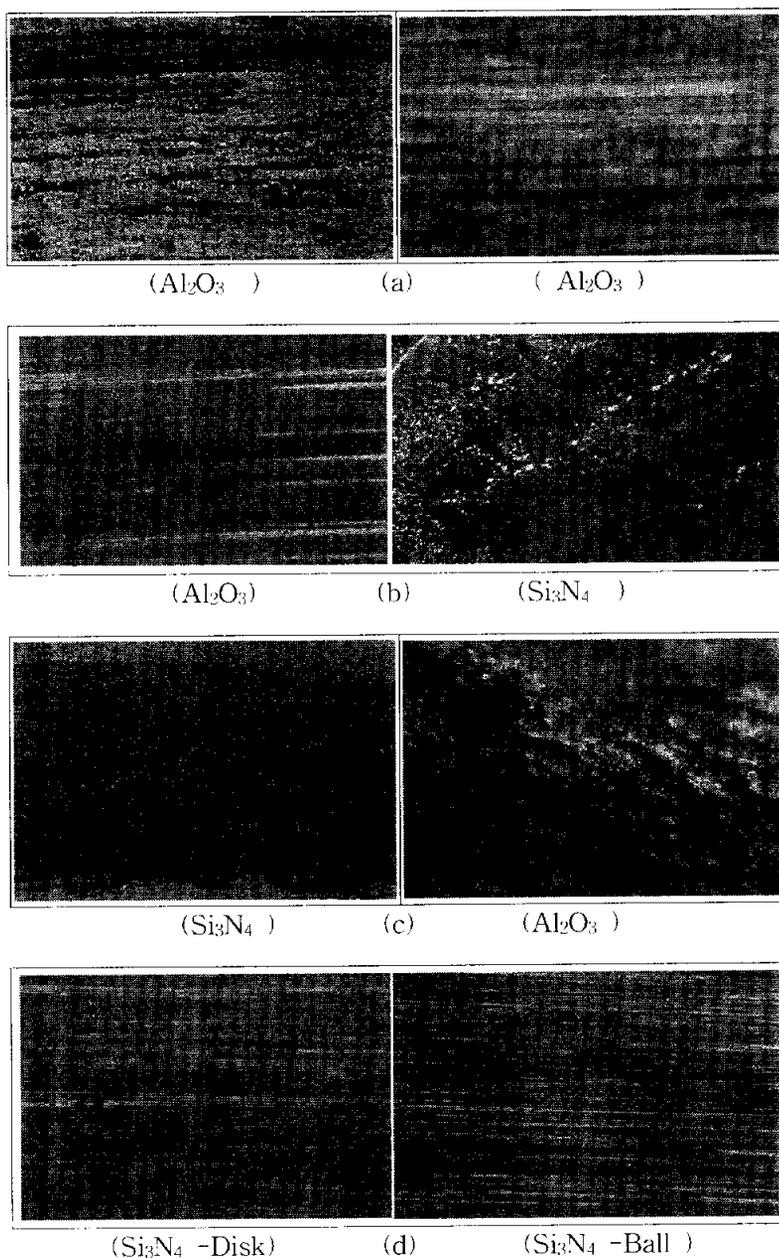


Fig. 19 Optical micrographs of worn surface on disk specimens and ball specimens in water; normal load =10N, sliding speed=0.25m/s ,sliding distance=1000m

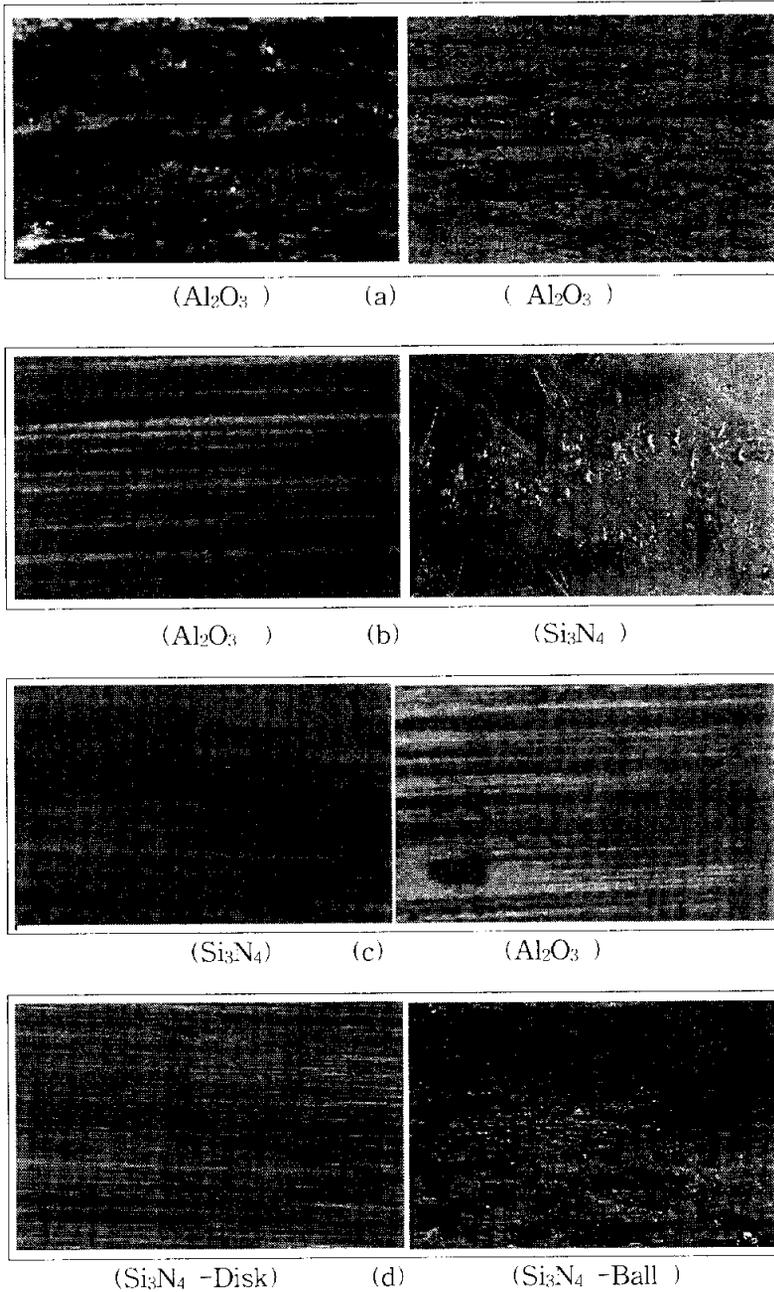


Fig. 20 Optical micrographs of worn surface on disk specimens and ball specimens in water; normal load =20N, sliding speed=0.5m/s ,sliding distance=1000m

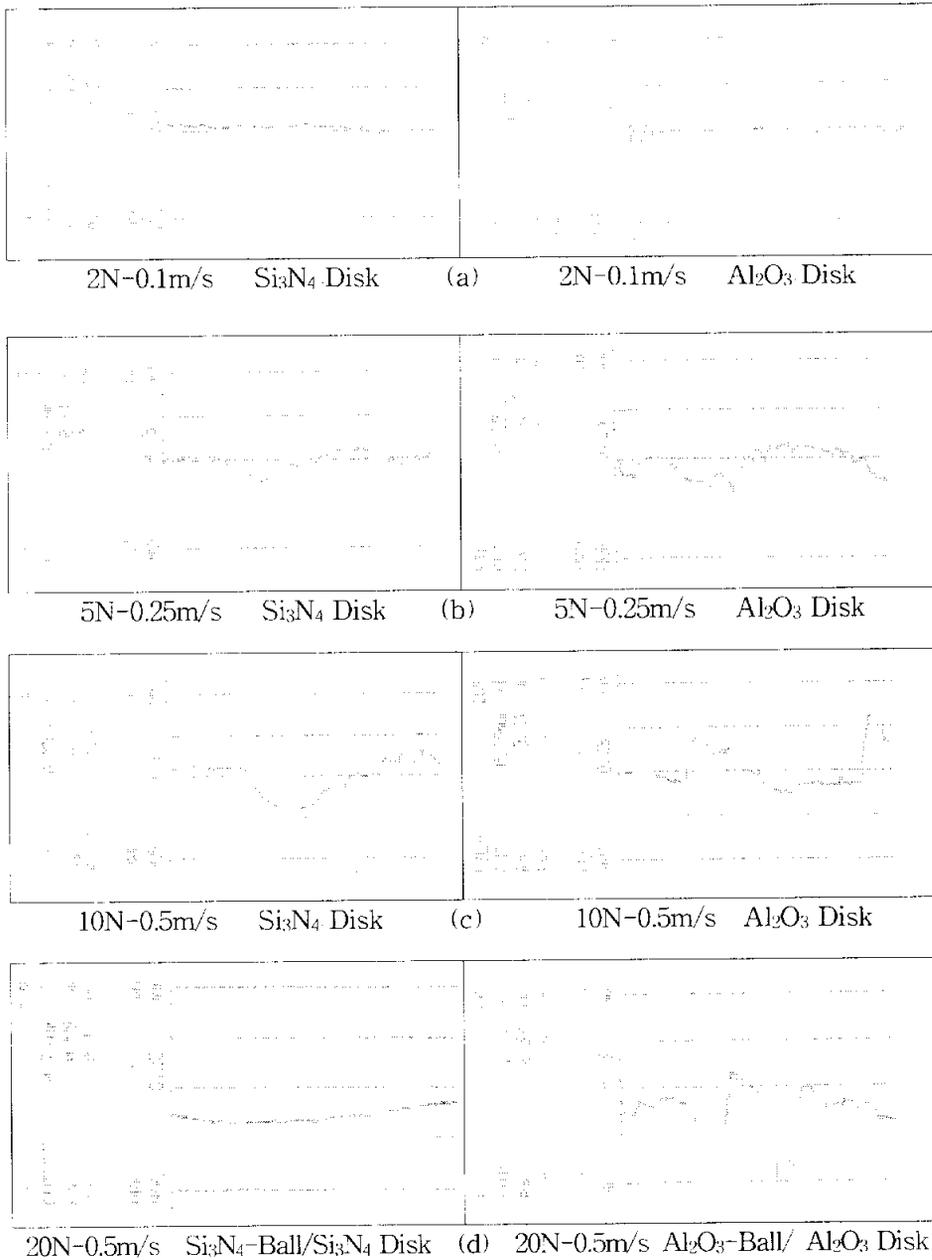


Fig. 21 Surface roughness of worn surface on disk specimens: sliding distance = 1000m

5. 결 론

수중에서 하중과 속도가 변화될 때 마찰계수와 마모 특성을 명확히 하기 위하여 4종류의 세라믹 (Ball- Al_2O_3 /Disk- Al_2O_3 , Ball- Al_2O_3 /Disk- Si_3N_4 , Ball- Si_3N_4 /Disk- Al_2O_3 , Ball- Si_3N_4 /Disk- Si_3N_4)을 수중에서 마찰시험을 하였다. 얻어진 주요 결과를 아래에 나타내었다.

- (1) 마찰계수가 가장 적은 조합은 Ball- Si_3N_4 /Disk- Si_3N_4 이었으며 마찰계수가 가장 크게 나온 조합은 Ball- Al_2O_3 /Disk- Al_2O_3 이었다.
- (2) Al_2O_3 과 Si_3N_4 마찰계수는 접촉 하중과 미끄럼 속도의 변화에 의해 크게 변화하고 미끄럼 거리가 150~250m 사이에 마찰계수가 증가하다 안정되는 임계접촉거리가 존재한다.
- (3) 대기중과 수중의 비교에서 알루미나는 수중에서 영향을 적게 받지만 질화규소는 수중 윤활이 좋음을 알 수 있다
- (4) 본 논문에 대한 마모기구는 아래와 같이 3종류로 분류할 수 있다.
 - ① 질화규소와 알루미나가 수중에서 저속 저하중(2N,0.1m/s이하)시에 $\mu < 0.03$ 의 경우의 아주 작은 Mild wear.
 - ② 질화규소가 속도와 하중이 증가하여 마모에 의한 접촉 면적의 증가로 인하여 높은 마찰계수가 높아지는 연삭마모.
 - ③ 알루미나의 마모 표면이 뜯기는 응착마모

References

- (1) 相吉, 紺野 : 세라믹의 펌프 접동 부재료의 適用, 기계의연구,Vol.41
.No5(1998)
- (2) 湧川, 相吉, 高木, 紺野 : 압축펌프용 세라믹 베어링에 관한 연구 제 2보 공
기중 및 수중에서의 마찰계수에 관해서 일본 기계학회 논문집(B편)
Vol.53, No.509(1989-1)176
- (3) 平林, 中山 : 고속용 메타니칼실의 현상 일본기계학회지
Vol.76, No.650(1973)238
- (4) 藤田 : 最近의 메카니칼실의 동향, 潤滑 Vol.32, No.12(1987)850
- (5) 石垣 : 세라믹 마찰에 대해서, 潤滑 Vol.30, No.9(1985)627
- (6) V.R.Howes : "The interfacial transfer of aluminium to steel and ceramic
materials under loaded contact at high temperature.", Wear, Vol.72,
(1981)105
- (7) E.W Roberts, N.Wallbridge and D. Dowson : "the wear characteristics
of sliding pairs of high density polycrystalline aluminum oxide under
both dry and wet conditions."
Wear of Materials 1983, ASME New York 1983, p202-211
- (8) T.E.Fischer and H Tomizawa : " Interaction and wear of silicon
nitride." Wear, Vol.105(1985)29
- (9) H. Tomizawa and T.E.Fischer : " Friction and wear of silicon nitride
and silicon carbide in water : hydrodynamic lubrication at low sliding

- speed obtained by tribochemical wear ." ASLE, Trans
Vol.30,No.4(1987)481
- (10) S. Sasaki: " The effects of the surrounding atmosphere on the friction
and wear of alumina, zirconia, silicon carbide and silicon nitride."Wear,
Vol.134(1989)185
- (11) 齋田 水谷 : Sic의 마찰에 미치는 물 및 有機溶媒의 영향 일본 윤활학회
제32기춘기 연구 발표회 예고집 (1988)A-1, 1
- (12) T.Sugita,K.Ueda and Y.Kanemura:"Material removal mechanism of
silicon nitride during rubbing in water."Wear Vol.97(1984)1
- (13) R.S.Gates,S.M.Hsu and E.E.Klaus : " Tribochemical mechanism of
alumina with water." Tribology Trans. Vol.32(1989)No.3.357
- (14) S.Jahanmir and T.E.Fischer : " Friction and wear of silicon nitride by
humid air, water, hexadecane and hexadecane +0.5 percent stearic acid.
" STLE Trans Vol.31, No.1(1987)32
- (15) Y.Hibi and Y.Enomoto : " Tribochemical wear of silicon nitride in
water, n-alcohols and their mixture."Wear Vol.133(1989)133
- (16) T.E.Fischer, M.P.Anderson, S.Jahanmir and R.Salher: "Friction and
wear of tough and brittle zirconia in nitrogen, air, water, hexadecane
and hexadecane containing stearic acid." Wear.Vol.124(1988)133
- 17) Von Mises, R., "Mechanik der Festen Körper im Plastisch-Deformablen

- Zustand," Nachr. Ges, Wiss Gottingen, pp. 582, 1913.
- 18) Tresca, H., "Sur l'écoulement des Corps Solides Soumis a Defortes Pressions," C.R.Acad. Sci. Paris, 59, pp. 754, 1864.
 - 19) Holm, R., "Electric Contacts," Hugo, Gerbers Fellas, pp. 214, 1946.
 - 20) Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," J. Appl. Phys., 24, pp. 981~988, 1953.
 - 21) M. M. Kruschov, "Resistance of Metals to Wear by Abrasion : Related to Hardness", Insten Mech, Engrs Conf., Lubrication and Wear, London, pp.655-659, 1957.
 - 22) R.C. D. Richardson, "The Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives", Wear, 11, pp.245-275,1968.

감사의 글

여러 가지로 부족한 저에게 격려와 용기를 주시고 이 논문이 결실을 맺도록 지도하여 주신 많은 분들의 은혜에 감사드립니다. 이 논문이 완성되기까지 높은 식견으로 따뜻하게 지도해 주신 金亨資 지도교수님께 깊은 감사를 드리며 항상 건강하시고 가정의 행복을 기원합니다. 그리고 논문 작성에 충고와 지도를 해 주신 朴卿東 교수님, 具永必 교수님 학업 정진을 위하여 아낌없이 학업 지도를 해주신 기계설계학과 교수님들께 감사드리며 기계설계학과 원생들을 비롯한 모든 분께 고마운 마음을 전합니다. 또한 바쁜 가운데서도 늘 용기와 격려를 해 주신 부산인력개발원 황원익 원장님, 능력개발 허 본 처장님 그리고 여러 선생님들께 감사드리며 기술교육의 후학을 육성하는 교육자로서 항상 배우고 노력하는 계기로 삼아 더욱 정진 할 것을 다짐합니다. 자주 찾아 뵙지 못해도 멀리서 자식의 학업을 부모님을 대신해서 대견해 하시던 장모님의 크신 은혜에 한없는 고마움을 느끼며 이 작은 결실을 올립니다. 그리고 어려운 여건에서도 언제나 곁에서 인내하며 헌신적으로 내조해 준 사랑하는 아내와 아들 재영, 딸 여경이, 그리고 나의 형제·자매들과 이 기쁨과 영광을 함께 하고 싶습니다.

2003년 8월

최희덕 올림