

# 알루미나 세라믹스의 순도에 따른 水潤滑機構에 관한 研究

진동규 · 박흥식\* · 전태옥\*

부산전문대학 기계설계과  
\*동아대학교 기계공학과

## Effect of Purity of Alumina Ceramics on the Water Lubrication Mechanism

Dong-Kyu Jin, Heong-Sik Park and Tae-Ok Jun

Department of Machine Design, Pusan Junior College  
\*Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

**Abstract**—The present study was undertaken to investigate the purity variation of the alumina ceramics on the water lubrication mechanism. The annular surface of wear testing specimens of the alumina ceramics with different alumina purity against STB2 was rubbed in the distilled water under various sliding speed, contact pressure and sliding distance. The friction coefficient decreased lowered with formation of corrosion products due to the tribochemical reation as the sliding speed and contact load was increased. With increased sliding speed, the lower purity of 85 percent contribute largely to even degree of the friction surface, even it have about  $\mu$  of 0.3 degree by the influence of a pore and impurities  $\text{SiO}_2$ . The friction surface of ceramics protacted by oxide was transfer from STB2.

### 1. 서 론

기계에서 요구되는 정밀도는 향상되고, 기계의 사용환경의 가혹화에 수반하여 새로운 기계구조 재료로서 세라믹스가 주목을 모으고 있다[1]. 이는 세라믹스가 耐蝕性, 耐熱性, 低密度, 耐磨滅性 등의 우수한 특성을 가지고 있기 때문이며, 특히 고온 경도가 높아 마멸하기 어렵다고 하는 성질은 내마멸재료로서 최적이며, 이들 성질을 이용하여 gear, bearing, nozzles 및 mechanical seal 등의 기계의 운동부품 재료로서의 수요가 날로 증가하고 있다[2]. 그러나 세라믹스의 경우 취성이 금속에 비하여 매우 크며, 마찰시 열충격에 의한 취성파괴로 마멸이 진행되어 구조물의 수명에 직접적인 영향을 미친다. 이에 적절한 윤활제의 공급으로 문제를 해결하려는 시도가 진행되고 있으며, 그 대표적인 윤활제로서 물, 바닷물 및 水系潤滑劑의 이용이다. 물은 壓力粘度指數가 매우 낮으므로 彈性流體潤滑膜의 형성이 곤란하지만 不燃性, 우수한 冷却性

및 無公害의 특징을 가지고 있다. 세라믹스의 경우, 水의 이용은 水에 의한 직접적인 윤활제의 작용보다 水의 영향으로 마찰계면에 흡착층 및 tribochemical 반응으로 생성된 생성물의 작용[3]으로 일반의 윤활유와 같은 효과를 나타내며, 특히 우수한 냉각성으로 인하여 열충격에 의한 취성파괴를 방지하기 때문이라고 생각된다. 이와 함께 세라믹스의 水중에서의 트라이볼로지에 관한 연구도 증가되고 있지만 그 기초적연구는 금속에 비하여 훨씬 적고 마찰기구나 그 마멸특성에는 아직 불분명한 점이 많다[4]. 이것은 세라믹스가 그 종류도 많고 각각의 재질에 따라서 表面吸着層 및 기계적 특성이 다르기 때문에 마찰변형특성도 서로 다르게 되기 때문이라고 생각된다.

지금까지 분위기 환경변화에 의한 세라믹스 또는 세라믹스와 금속과의 마찰, 마멸에 대한 연구로서 Sasaki[5]는 세라믹스의 마찰, 마멸에 미치는 분위기 습도 및 수분의 영향에 대한 연구로서 마찰면에 형성된 물의 흡착층 및 수산화물이 마찰에 큰 영향을 미

친다고 보고하고 있다. Nakamura 와 Hirayama[6]는 Si-Al-O-N 세라믹스와 회주철에 대한 각종 유체윤활제의 효과에 대한 마멸실험에서 수윤활의 경우가 우수한 열분산 및 액체윤활막의 작용으로 인하여 회주철의 경우 가장 우수한 내마멸성을 가진다고 보고하고 있다. 이처럼 지금까지의 세라믹스의 마멸실험은  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , SiC 및  $Si_3N_4$  등의 각종 세라믹스의 재질을 달리한 경우의 제특성에 대한 결과이며, 그리고 알루미늄 세라믹스에 대한 연구는 純度を 달리한 알루미늄 세라믹스의 마멸특성에 대한 연구[7] 및 알루미늄 세라믹스와 鋼에 대한 연구[8]는 보고되고 있으나, 이는 건조상태에서의 실험의 결과이다. 그러나 실제적으로 사용 가능성이 있는 水潤滑中에서의 연구는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 低價格으로 가장 널리 이용될 가능성이 있는 알루미늄 세라믹스( $Al_2O_3$  ceramics)와 베어링鋼(STB2)의 蒸溜水中에서의 마찰실험을 통하여, 마찰계수 및 이들 마찰면의 현미경 관찰을 실시하여 알루미늄 순도에 따른 水潤滑機構를 조사하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1. 시험재

본 연구에 사용한 실험재료는 常壓 燒結한 알루미늄 세라믹스이며, 그 純度は 각각 85%, 95% 및 99.7%의 3종류를, 상대재는 市販의 STB2를 선택하였으며, Table 1에는 이들 3종류의 시험편 및 STB2의 물리적 및 기계적 성질을 표시하였고, Table 2에는 3종류의 알루미늄 세라믹스의 화학적 성분을 나타내었다.

Fig. 1은 시험편 순도 (a) 85%, (b) 95% 및 (c) 99.7%의 polishing한 시험편의 표면을 나타낸 것으로서, 알루미늄의 순도가 증가할 수록 표면에 시험편의 제조상의 결함부인 氣孔의 크기와 그 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 (d)에서는 순도 85%의 결함부를 나타낸 것으로서, 약  $2.5 \mu m$  정도 크기의 알루미늄 입자( $Al_2O_3$ ) 및 약  $40 \mu m$  정도의 공공을 볼 수 있다. 또한 Table 2에서 보는 바와 같이 알루미늄 순도중 불순물의 대부분은  $SiO_2$ 임을 알 수 있다.

세라믹스 재료는 일반적으로 가공이 곤란하므로 시험편의 형상은 단순한 것이 요망된다. 따라서 시험편은 Fig. 2와 같이 外徑 22 mm, 內徑 15 mm로 하였으

며, 마찰면은 ring 상이고 마찰형태는 平面과 平面의 미끄럼 마찰이 되도록 하였다.

Fig. 2와 같이 실린더형의 시험편으로 실험을 하는 경우, 마찰면 전체에 균일한 접선력이 작용한다고 하여도 발생하는 토오크는 회전반경에 따라 다르고 추

Table 1. Physical and mechanical properties of alumina ceramics and STB2

Properties Alumina and STB2 ceramics	85% ceramics	95% ceramics	99.7% ceramics	STB2
Specific gravity	3.5	3.7	3.9	7.8
Bending strength (MPa)	264.6	313.6	372.4	-
Compressive strength (MPa)	1568	2450	2940	2352
Young's modulus ( $\times 10^5$ MPa)	2.06	3.14	3.92	1.90
Vickers hardness	1228	1400	1690	825
Thermal conductivity (cal/cm <sup>2</sup> ·sec <sup>-1</sup> ·C)	0.04	0.06	0.08	0.13

Table 2. Chemical compositions of alumina ceramics

Alumina purities	Chemical compositions (wt.%)					
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	CaO	MgO	$Fe_2O_3$	$Na_2O$
85% ceramics	85.1	13.0	0.5	0.7	0.15	0.4
95% ceramics	95.2	3.53	0.27	0.05	0.05	0.25
99.7% ceramics	99.7	0.1	-	0.1	-	0.05

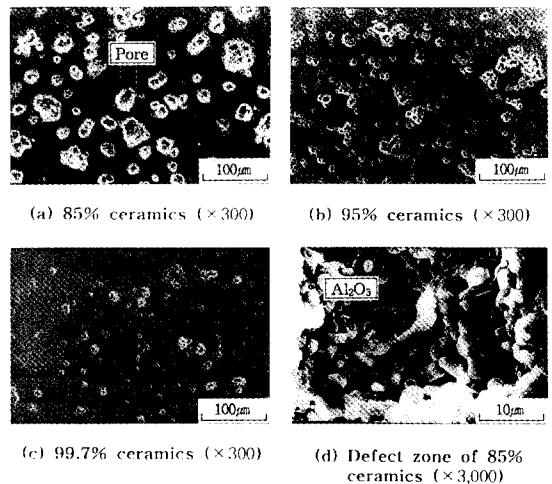


Fig. 1. Photographs of the polished specimen surface.

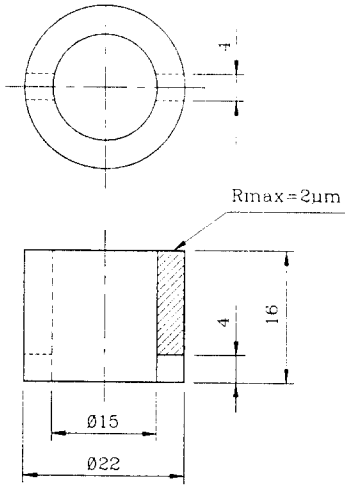


Fig. 2. Shape and dimension of specimen.

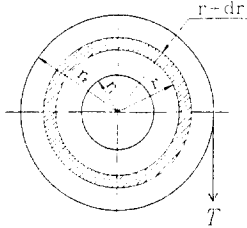


Fig. 3. Torque generated on the frictional surface.

정되는 토오르크는 이들의 적분치가 되므로 접선력을 면밀하게 구할 수는 없다. 따라서 축하중이 마찰면에 균등하게 작용하며, 반경방향으로의 상대 미끄럼 속도의 차의 영향도 무시하고 접선력이 마찰면 전체에 균일하게 작용한다고 하면 계속된 토오르크로부터 접선력을 다음과 같이 계산할 수 있다. Fig. 3에 표시한 바와 같이 內半徑을  $r_1$ , 外半徑  $r_2$ 라 하고, 마찰계수를  $\mu$ , 접촉압력을  $\sigma$ 로 하면 마찰면 전체에서 발생하는 토오르크 T는 식(1)과 같이 표시할 수 있다. 여기서

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \mu \cdot p \cdot r (2 \pi r) dr \quad (1)$$

작용하중 P는

$$P = \int_{r_1}^{r_2} p (2 \pi r) dr \quad (2)$$

가 되며,  $\mu$ 는 마찰면 전체에서 일정치를 취한다고 가

정하므로

$$\mu = [T \int_{r_1}^{r_2} r dr] / [P \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr] \quad (3)$$

으로 표시할 수 있다. 이것을 일반의 마찰계수  $\mu = F/P$ 와 비교하면 접선력이 된다.

$$F = T/r_{eq} \quad (4)$$

여기서

$$r_{eq} = [ \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr ] / [ \int_{r_1}^{r_2} r dr ] \quad (5)$$

이다. 이것은 측정된 토오르크를  $r_{eq}$ 로 나누면 접선력이 얻어진다는 것을 표시하고 있다. 따라서 본 실험에서 미끄럼 속도와 미끄럼 거리에 따라 마찰계수  $\mu$ 는 모두 반경  $r_{eq}$ 에 대하여 계산한 값으로 하였다.

### 2-2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 4는 본 실험에 사용한 시험기의 개요도를 나타낸 것이다. 실험전 시험편은 마찰면 edge 부가 실험 중 chipping으로 인한 중량감소량을 줄이기 위하여 diamond 줄로 rounding을 준 후 emery paper #1200으로 연마하여 그 표면조도를  $R_{max} = 2 \mu m$ 로 일정하게 하였다.

Fig. 4에서 처럼 고정부에 부착한 上部시험편은 상대재료인 STB2를, 회전부에 부착한 下部시험편에는 실험재료인 純度を 달리한 알루미나 세라믹스를 부착하여 각 실험조건에 따라 蒸溜水中에서의 마찰실험을 행하였다. 그리고 실험중 마찰면 온도의 상승을 억제하기 위하여 순환펌프를 사용하여 계속하여 蒸溜水を 순환시켰으며, 이때의 마찰력은 strain gauge가 부착된 板 spring을 통하여 증폭기로 증폭하여 線形記錄計로 그 출력과형을 검출하여 산출하였다. 그리고 미끄럼 속도변환은 motor를 이용하여 V-belt로 구동시켜 이를 inverter로 무단구동시켜 변환하였다. 실험조건으로서 미끄럼 속도를 0.1 m/sec~0.7 m/sec까지 단계적으로 변화시켰으며, 작용하중은 중심축에 荷重을 가하여 98N~196N까지 49N 씩 증가시켰으며, 미끄럼 거리는 0.1 km에서 2 km까지 단계적으로 변화시켰다. 여기서 미끄럼 속도를 0.7 m/sec까지 한 것은 그 이상의 미끄럼 속도에서는 업셋팅(upsetting)현상으로 불안정한 마찰이 진행되었기 때문이다. 순도를 달리한 각

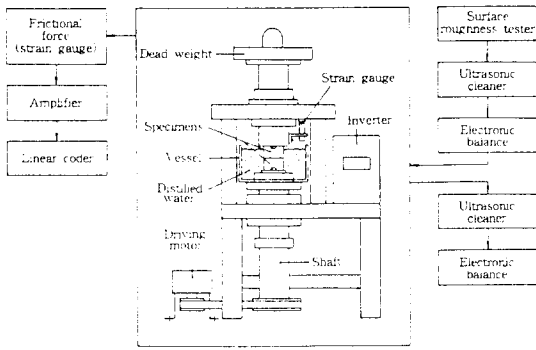


Fig. 4. Schematic diagram of experimental apparatus.

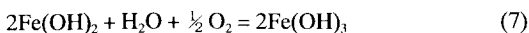
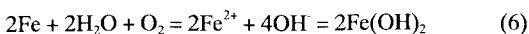
시험편 및 STB2의 경도치는 마이크로 비커스 경도계를 이용하였으며, 실험후 마멸체적( $\text{mm}^3$ )은 0.1 mg의 디지털천칭을 사용하여 실험전, 후의 중량감소량을 측정하고 이를 시험편의 비중을 이용하여 환산하였다. 그리고 주사전자현미경을 사용하여 실험 후 각 실험조건에 따른 마찰면을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 마찰에 미치는 미끄럼속도 특성

Fig. 5는 상대재료를 STB2, 실험재료를 알루미늄 순도 95%로 한 경우, 작용하중 P를 98N, 147N 및 196N으로 하고 미끄럼 거리 L을 1 km로 일정하게 하였을 때, 미끄럼 속도 V의 변화에 따른 마찰계수  $\mu$ 를 나타낸 것이다. 여기서  $\mu$ 는 실험 중 각 L에서 진폭의 최대값과 최소값이 불규칙하게 나타났지만 본 실험에서는 실험종료 직전에 측정된 값의 평균값을 찾아 식 (4)에서 구한 마찰력을 작용하중으로 나눈 값으로 하였다. 그림에서 V의 증가에 따라  $\mu$ 는 감소하는 경향을 보이고 있고, 또한 저속역에서 P의 증가에 따른  $\mu$ 의 차는 크게 나타나며, V의 증가에 따라 고하중인 196N의  $\mu$ 의 감소는 크다는 것을 알 수 있다.

실험 후 실험재료의 마찰면상에는 유색의 반응생성물이 전 표면에 분포되어 있었으며, 이의 주성분으로 생각되는  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 에 대하여 보면



이 된다[9]. 이는 세라믹스와 강의 마찰시 마멸은 전

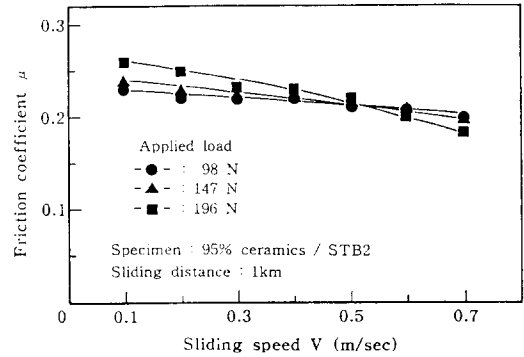


Fig. 5. Effect of sliding speed on the friction coefficient.

단강도가 작은 강측에서 마멸이 진행되기 때문에 마찰표면에 집적된 반응생성물은 강에서 탈락한 마멸분이 주성분이 되어  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 생성기구를 지배한다고 생각된다.

V 및 P의 증가에 따라  $\mu$ 가 감소하는 것은 세라믹스와 강의 마멸이 tribo 부식마멸기구에 의하여 큰 영향을 받게 된다. tribo 부식마멸은 tribochemical 반응에 의하여 마찰면에 생성한 식(7)과 같은 Fe의 수산화물과 알루미늄 수산화물 또는 물의 흡착층이 양 시험편의 진실접촉부에서 고체접촉을 방지하여 마찰을 저하시켜 양 시험편 모재표면의 전단응력이 완화됨과 함께 국부적인 응력집중이 저하되기 때문이라고 생각된다. 여기서 마찰면에 흡착된 물의 흡착층은 表面水酸化基, 化學吸着水 및 物理吸着水の 3가지 형태로 나타난다고[10] 알려져 있지만 어느 형태가 어느 만큼의 흡착분자가 마찰, 마멸에 유효하게 작용하는가 하는 것은 차후의 연구과제라고 생각된다. 그리고 저속역에서 P의 증가에 따라  $\mu$ 의 차가 크게 나타나는 것은 접촉압력의 증가에 따라 실제 접촉면적이 증가하여 접촉면에서 반응생성물은 적고 세라믹스의 공공주위에서 탈락된 입자의 미세돌기부에 의한 STB2의 연삭마멸이 지배적으로 작용하게 되고 이는 하중이 증가할 수록 더욱 가속화되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 P가 196 N에서의 L에 따른 각 미끄럼속도의  $\mu$ 의 변화과정을 나타낸 것이다. 각 V에서 마찰초기에는 양 시험편의 실제접촉점에서 직접접촉에 의한 연삭마멸이 지배적으로 작용하며 순간적으로  $\mu$ 가 크게 상승하지만, 마찰반복회수의 증가와 함께 tribo 부식반응이 활성화되어  $\mu$ 는 서서히 감소한다고 생각된다. 그림 (a) V가 0.2 m/sec의 경우 전 미끄럼 거리

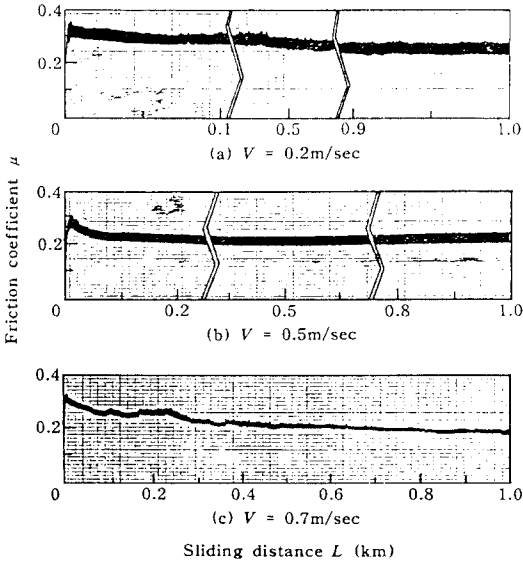
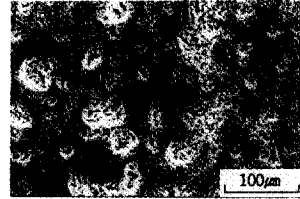


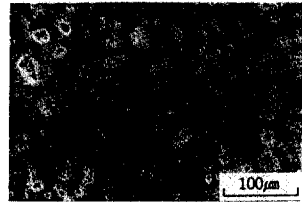
Fig. 6. Effect of sliding distance on the friction coefficient (Specimen: 95% ceramics/STB2, P=196 N).

구간에서  $\mu$ 의 진폭이 크고 대체로 고마찰을 하고 있고,  $V$ 의 증가에 따라 (b)의 0.5 m/sec와 (c)의 0.7 m/sec에서는  $\mu$ 의 진폭은 감소하며 안정된 마찰로 이행하는 것을 볼 수 있다. 특히 고속인 (c)에서는 전술한 바와 같이 tribochemical 반응에 의한 생성물이 경계 윤활막을 형성하여 마찰면을 평탄화하므로 실제접촉점의 접촉압력이 저하되기 때문이라고 생각된다. 여기서 tribochemical 반응속도는 기계적 에너지의 입력 강도의 증가에 따라 증대하며[11], 또한 마찰면을 보호하는데 필요한 반응생성물의 양은 속도가 증가할수록 췌기막효과에 의한 유체윤활의 영향을 크게 받아 고체접촉부에 걸리는 하중을 감소시키게 된다고 생각된다.

Fig. 7은  $V$ 의 변화에 따른 알루미나 순도 95%의 마찰면을 나타낸 것이다. 그림에서 저속역인 (a)  $V$ 가 0.2 m/sec에서는 공공주위에서 탈락한 미세한 세라믹스의 마멸입자 및 상대재인 강도의 마멸분이 공공내로 부분적으로 채워져 있고, 넓은 반응생성물이 마찰면에 덮혀 있으나, (b)인 0.7 m/sec는 tribochemical 반응의 활성화로 반응생성물이 두껍게 형성되어 있고, 또한 이 생성물은 공공을 완전히 채워 표면의 孔空의 수를 감소시켜 마찰면의 평탄화가 진행되어 있는 것을 볼 수 있다.



(a)  $V = 0.2\text{m/sec}$  ( $\times 300$ )



(b)  $V = 0.7\text{m/sec}$  ( $\times 300$ )

Fig. 7. Photographs of the rubbed surface for the 95% ceramics (Mate specimen: STB2, P=196 N, L=1 km).

### 3-2. 마찰에 미치는 알루미나 순도 특성

Fig. 8은 상대재료를 STB2, 실험재료를 순도를 달리한 알루미나 세라믹스 즉, 85%, 95% 및 99.7%로 한 경우, 작용하중  $P$ 를 196 N으로 하고 미끄럼 거리  $L$ 을 1 km로 일정하게 하였을 때의 미끄럼 속도  $V$ 에 따른 마찰계수  $\mu$ 를 나타낸 것이다.  $V$ 의 증가에 따라 순도를 달리한 시험편 모두  $\mu$ 는 감소하고 있고, 알루미나 순도가 낮을 수록  $\mu$ 의 감소의 경향은 크다는 것을 알 수 있다. 특히 순도가 가장 낮은 85%의 경우에는 0.1 m/sec의 저속에서  $\mu$ 는 0.3 정도로, 순도 95% 및 99.7%보다 큰 폭으로  $\mu$ 가 상승하고 있는 것을 볼 수 있다.

$V$ 가 증가함에 따라  $\mu$ 가 감소하는 것은 전술한 바와 같지만 양 시험편의 마찰상태가 격렬하게 마찰이 진행되는 상태가 아니라면 마찰속도가 증가함에 따라 마찰면을 보호하는데 요하는 반응생성물은 보다 짧은 마찰거리에서 형성하여 tribo 부식마멸상태로 빨리 이행한다고 생각된다. 그리고 알루미나 순도가 낮을 수록  $\mu$ 의 감소경향이 크며, 특히 순도가 가장 낮은 85%의  $\mu$ 가 저속에서 가장 큰  $\mu$ 의 값을 가지는 것은 마찰로 인하여 발생된 마찰열은 탄성계수 및 열전도도가 작은 순도가 낮은 시험편일 수록 마찰시 발생하는 열이 발산되기 어려우므로 양 시험편의 국부적 및 순간적인 온도상승의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 열전도도가 작은 세라믹스일 수록 열축적이 증가되고 이

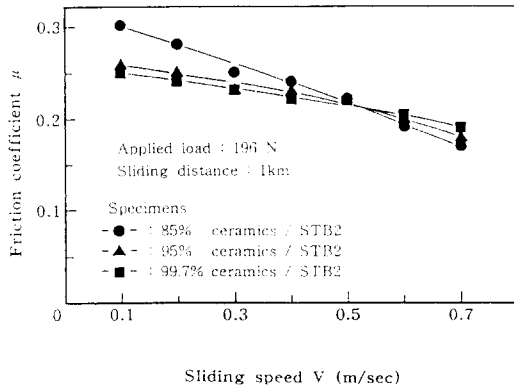


Fig. 8. Effect of sliding speed on the friction coefficient.

열은 상대재료와의 실제접촉부를 통하여 이동되므로 V의 증가에 따라 상대재료인 강의 열연화로 인하여 tribochemical 반응이 조속히 진행되기 쉽고 또한 마찰면에 이 생성물의 채유가 오래 유지된다고 생각된다. 그리고 알루미늄나 순도 85%는 전술한 바와같이 불순물의 양은 순도 95% 및 99.7% 보다 많고 그들의 대부분은  $\text{SiO}_2$ 로서 이것은 모재인 알루미늄과 비교하여 전단강도가 작아 마찰표면의 기계적 강도를 열화시키므로 저속에서는  $\mu$ 가 0.3 정도로 큰 값을 나타내지만 V의 증가와 함께  $\text{SiO}_2$ 는 tribochemical 반응의 활성화와 함께 물과 반응하여[12] 보다 유연한 수산화물 또는 수화물이 되어 마찰을 더욱 감소시키는 역할을 담당한다고 생각된다.

Fig. 9는 미끄럼 속도가 저속인 0.1 m/sec와 고속인 0.7 m/sec의 알루미늄나 순도에 따른 마찰면으로서 (a)와 (b)는 순도 85%의 0.1 m/sec와 0.7 m/sec를 (c)와 (d)는 순도 99.7%의 0.1 m/sec와 0.7 m/sec를 나타내었다. (a) V가 0.1 m/sec에서 알루미늄나 순도 85%는 공공주위에서 탈락한 알루미늄나 입자 및 반응생성물이 채워지고 얇은 생성물 층이 마찰면에 형성되어 있지만 (c) 순도 99.7%에서는 약  $5 \mu\text{m}$  정도되는 미세한 입상의 생성물이 전 마찰면에 고르게 분포되어 있으며 부분적으로는 이들 입상의 생성물이 부분적으로 응집해 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 (b) V가 0.7 m/sec에서는 순도 85%의 경우는 두껍게 형성된 반응생성물과 일부 생성물은 공공내로 완전히 채워져 공공의 수를 감소시켜 마찰면이 평탄화되어 있으며, 공공을 기점으로 미세한 크랙이 전파되고 있지만 (d) 순도 99.7%는 저속에서 형성된 입상의 생성물이 반복마찰에 의

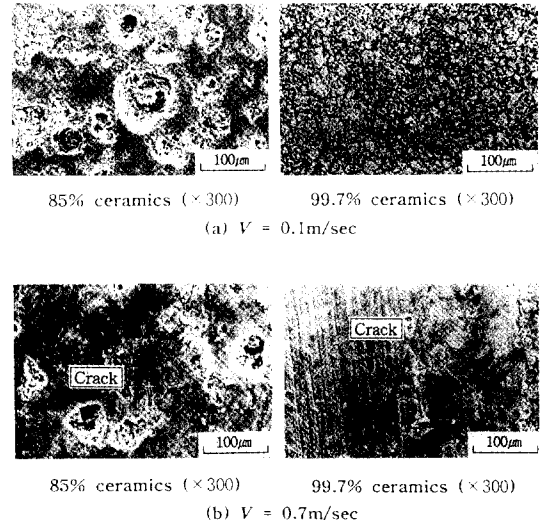


Fig. 9. Photographs of the rubbed surface for variation of alumina purity and sliding speed (Mate specimen: STB2, P=196 N, L=1 km).

한 온도상승으로 이들이 전부 응집하여 이착막을 이루고 있지만 무수히 많은 크랙이 형성되어 있는 것에서 반복 탈락이 계속 진행된 것으로 생각된다.

이상과 같이 水中에서 알루미늄나 세라믹스의 V에 따른 마찰특성은 V의 증가에 따라 tribochemical 반응으로 인한 생성물이 마찰면으로의 평탄화에 큰 역할을 하게 된다. Fig. 10은 3가지 시험편의 V에 따른 표면조도  $R_{\text{max}}$ 의 변화를 나타낸 것으로  $R_{\text{max}}$ 는 시험편의 반경방향으로 측정하였다. 순도 85% 및 95%의  $R_{\text{max}}$ 는 저속인 0.1 m/sec에서  $1.5 \mu\text{m}$  이상, 99.7%는  $1.1 \mu\text{m}$ 이지만 V의 증가에 따른  $R_{\text{max}}$ 는 생성물의 경계윤활막 효과로 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

### 3-3. 알루미늄나 세라믹스의 마찰진행곡선

Fig. 11은 작용하중 P를 196 N으로 하고 미끄럼 속도 V를 0.3 m/sec로 하였을 때 미끄럼 거리 L의 변화에 따른 마찰계수  $\mu$ 를 나타낸 것이다. 알루미늄나 순도 85%의 경우 L이 0.1 km인 마찰초기에는  $\mu$ 가 0.28 정도이지만 L의 증가와 함께 크게 감소하며, 마찰후기에는 0.22 정도의  $\mu$  값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 알루미늄나 순도 99.7%는 마찰초기에 0.22 정도의  $\mu$  값을 갖지만 L의 증가와 함께 다소 증가하며 마찰후기에는 0.24 정도로 마찰초기보다 다소  $\mu$  값이 상승하고 있다. 한편 95%의 경우에는 마찰초기

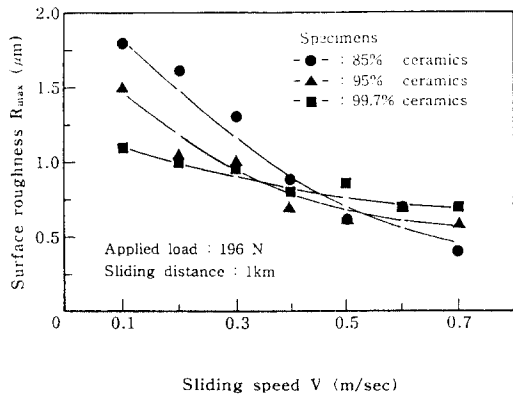


Fig. 10. Relation between surface roughness and sliding speed (Mate specimen: STB2).

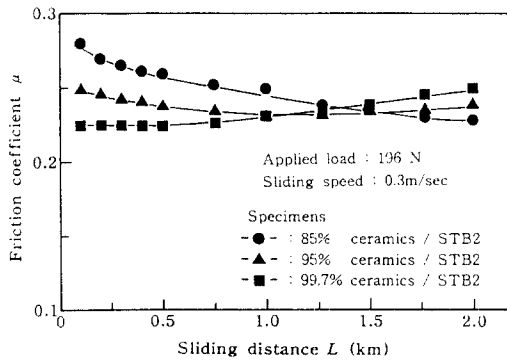


Fig. 11. Effect of sliding distance on the friction coefficient.

에서 마찰후기까지의  $\mu$ 는 그다지 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 알루미나 순도 85%의 경우 마찰초기에 tribochemical 반응에 의한 생성물의 생성 및 탈락의 과정이 반복되며 또한 계속되는 마찰에 의하여 공공 주위의 알루미나 결정입계에서 취성 파괴된 미세한 알루미나의 마멸 입자 및 상대재인 강에서 탈락한 마멸 분이 공공내로 채워져 이것이 다시 강의 마찰면을 abrasive적으로 마멸시키므로  $\mu$ 가 대체로 큰 값을 가지게 된다고 생각 된다. 계속하여  $L$ 의 증가에 따라 증류수에 의한 tribochemical 반응이 활성화가 촉진되고 이로 인하여 생성된 생성물이 양 시험편의 마찰면을 덮어 마찰면의 평탄화가 서서히 진행된다. 그리고 이 평탄화 되는 미끄럼 거리  $L$ 은 마찰후기 까지 계속되지만 알루미나 순도 85%는 열전도도가 Table 1에서 보는 바와 같이 순도 95% 및 99.7% 보다 낮기 때문에 열분산작용의 저하로 생성물은 접촉면에 강고히 유지

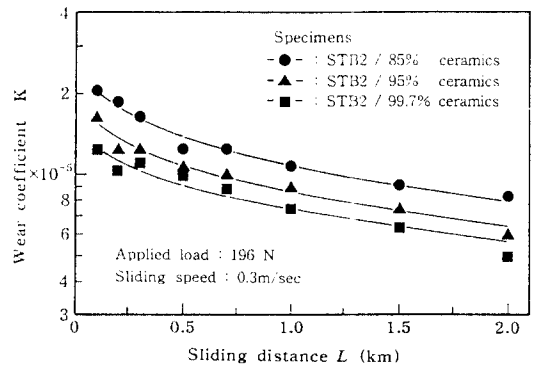


Fig. 12. Relation between wear coefficient of STB2 and sliding distance.

되어 마찰후기의  $\mu$ 가 작다고 생각된다.

알루미나 순도가 증가할 수록 마찰초기의  $\mu$ 는 낮은 값을 가지며, 특히 순도 99.7%는 순도 85% 보다 마찰초기 0.1 km에서는 0.06 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 알루미나의 평형수증기압이  $10^4$  mmHg 정도로 매우 낮다[13]는 사실에서도 알 수 있는 바와 같이 알루미나는 수분의 흡착성이 매우 뛰어나므로 마찰 시험직전 polishing 등의 표면가공시에 이미 표면에 강고한 수분의 흡착층 또는 수산화물이 형성되어 이것이 알루미나 순도증가에 따라 비례하여 그 영향이 작용하기 때문이라고 생각된다. 따라서 알루미나 순도가 증가함에 따라 접촉면적이 증대되고 또한 고순도일 수록 탄성계수 및 경도가 상승하므로 이로 인한 알루미나 입자의 탈락이 적어 접촉부에 생성물이 형성되는 과정이 조속히 진행되기 때문이라고 생각된다. 그리고 계속되는 마찰에 의하여 마찰면은도는 상승하지만 순도가 증가 할 수록 알루미나는 열전도도가 커지기 때문에 이로 인하여 형성된 생성물의 파단 및 회복이 반복하여  $\mu$ 의 미소한 상승에 영향을 미친다고 생각된다.

Fig. 12는 Fig. 11과 동일한 조건에서 각 순도를 달리한 시험편에 대한 상대재료 STB2의 마멸계수  $K$ 를 나타내었다.  $K$ 는 알루미나 순도와 미끄럼 거리가 증가할 수록 감소하고 있다. STB2의  $K$ 는 알루미나 세라믹스의 접촉면적의 차이에 크게 의존되고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 13은  $L$ 이 (a) 0.2 km와 (b) 1.5 km에 대한 알루미나 순도 85% 및 상대재인 STB2의 마찰면을 나타낸 것이다. 초기 마찰상태를 나타내는  $L$ 이 0.2 km인 (a)

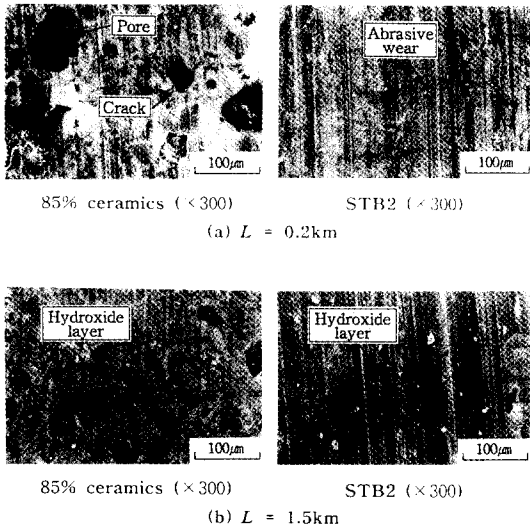


Fig. 13. Photographs of the rubbed surface for the 85% ceramics and sliding distance ( $P=196\text{ N}$ ,  $V=0.3\text{ m/sec}$ ).

의 경우 세라믹에는 공공에 tribochemical 반응에 의한 생성된 생성물 및 미세한 마멸분이 부분적으로 충전되어 있으며 표면에 생성된 생성물은 공공주위에서 미세한 크랙이 발생되어 이것이 진전하고 있는 것을 볼 수 있다. 상대재인 STB2에는 부분적으로는 생성물이 마찰면을 덮고 있지만 대체로 미세한 알루미늄 입자의 연삭작용에 의한 groove가 발생되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 L이 1.5 km 인 (b)의 경우, 양 시험편 모두 tribochemical 반응에 의한 생성물이 마찰면 전체 표면에 두껍게 형성하여 마찰면의 평탄화가 진행되어 있으며, 이로 인하여 접촉면적의 증대가 이루어진 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

순도를 달리한 알루미늄 세라믹( $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics)와 상대재인 베어링강(STB2)의 蒸溜水中에서 水潤滑機構를 알기 위하여 미끄럼 속도, 작용하중 및 미끄럼 거리를 변화시켜 마찰계수 및 이들 마찰면의 현미경 관찰을 통하여 미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄 세라믹과 STB2의 마찰에서 미끄럼 속도와 접촉하중의 증가에 따라 tribochemical 반응으로 인한 부식생성물의 영향으로 마찰계수  $\mu$ 는 감소한다.

(2) 알루미늄 순도가 낮은 85%는 공공 및 불순물인

$\text{SiO}_2$ 의 영향으로 저속에서는 0.3 정도의  $\mu$ 를 갖지만, 속도의 증가에 따라 이들은 마찰면의 평탄화에 큰 기여를 한다.

(3) 알루미늄 순도가 증가할 수록 tribochemical 반응속도가 상승하여 초기에 경계윤활막을 형성하여 미끄럼 거리에 따른  $\mu$ 의 변화는 적다.

(4) 세라믹의 마찰표면은 STB2에서 이착된 수산화물의 영향으로 보호된다.

#### 참고문헌

1. 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, "アルミナ セラミック스의焼付きと摩耗特性," 潤滑, 第31卷, 第5號, pp.329-335, 1986.
2. M.Kano and I.Tanimoto, "Wear Resistance Properties of Ceramic Rocker Arm Pad," Wear, 145, pp.153-165, 1991
3. 佐佐木信也, "セラミックスと環境(水)," トライボロジスト, 第34卷, 第2號, pp.103-106, 1989.
4. 石恒博行, "セラミックの摩擦について," 潤滑, 第30卷, 第9號, pp.627-632, 1985.
5. Shinya Sasaki, "The Effects of Water on Friction and Wear of Ceramics," JSLE, 33, 8, pp.620-628, 1978.
6. Yoshikazu Nakamura and Shigekazu Hirayama, "Effect of Liquid Lubricants on the Wear of Gray Cast Iron against Si-Al-O-N Ceramics," Wear, 37, pp.91-97, 1990.
7. 全泰玉, 陳東圭, "순도를 달리한 알루미늄 세라믹스의 마멸과정 및 이의 기구에 관한 연구," 大韓機械學會論文集, 第18卷, 第12號, pp.3404-3412, 1994.
8. 남준우, 전태욱, 진동규, "베어링강(STB2)의 磨滅에 미치는 알루미늄 세라믹스의 磨滅機構," 韓國精密工學會, 第12卷, 第3號(通卷47號), pp.62-72, 1995.
9. Fontana. M. G, "Corrosion Engineering," 3th, McGraw-Hill, New York, p.17, 1986.
10. 宇佐美初彦, 般橋鉦一, 中村 隆, 馬淵英二, "セラミック스의摩擦實驗(第1報)," トライボロジスト, 第34卷, 第6號, pp.458-464, 1989.
11. 佐佐木信也, "セラミック스의摩擦 摩耗に及ぼす水の影響について," 潤滑, 第35卷, 第8號, pp.620-628, 1988
12. 久門輝正, 久米原宏之, "セラミック同士の摩擦 摩耗機構の研究," トライボロジスト, 第34卷, 第11號, pp.807-814, 1989.
13. 久門輝正, 猿谷信之, "高速摩擦におけるセラミック스의摩耗特性," トライボロジスト, 第37卷, 第5號, pp.397-404, 1992.