

## 베어링 鋼(STB2)의 磨滅에 미치는 알루미나 세라믹스의 磨滅機構

남 준 우,\* 전 태 옥,\*\* 진 동 규\*\*\*

### A Study on the Wear Mechanism of the Alumina Ceramics for the Wear of STB2

Joon-Woo Nam,\* Tae-Ok Jun,\*\* Dong-Kyu Jin\*\*\*

#### ABSTRACT

The present study was undertaken to investigate the dry wear mechanism of the alumina ceramics in the purity variation for the wear of STB2. The wear test was carried out under different experimental condition various sliding speed, contact pressure and sliding distance. According as the alumina purity increased, wear volume of the STB2 decreased and minimum value of wear volume was over to high speed side. According as the sliding speed and sliding distance increased, friction coefficient decreased owing to drop of the shear strength, it decreased largely owing to decreased of elastic modulus and thermal conductivity with decrease in alumina purity. Indicative of minimum value of wear volume, low speed side was abrasive wear, high speed side was wear of heat softening. The friction surface of ceramics protected by oxide was transfer from STB2.

**Key words** : wear mechanism(마멸기구), heat softening(열 연화), abrasive wear(연삭마멸), wear volume(마멸체적)

#### 1. 序 論

기계에서 요구되는 精度는 향상되고, 기계의 사용환경의 가혹화에 수반하여 새로운 기계구조재료로서 세라믹스가 주목을 모으고 있다.<sup>(1)</sup> 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.<sup>(2)</sup> 이와 함께 세라믹스의 Tribology에 관한 연구도 증가되고 있지만 그 기초적연구는 금속

\* : 국민대학교 공과대학 기계설계학과

\*\* : 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* : 부산전문대학 기계설계과

에 비하여 훨씬 적고 마찰기구나 그 마멸특성에는 아직 불분명한 점이 많다.<sup>(3)</sup> 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 세라믹스 또는 세라믹스와 금속과의 마찰, 마멸에 대한 연구로서 Ajayi와 Ludema<sup>(4)</sup>는 구조용 세라믹스인 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 마멸 mode에 미치는 현미경 조직의 효과에 대하여 연구한 결과, 약한 결정입계를 가진 재료가 강한 입체를 가진 것보다 훨씬 손상의 영향이 크다고 하였다. Miyoshi<sup>(5)</sup>는 각종 금속재료에 대한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC의 진공중의 마찰실험에서 세라믹스와 금속 사이의 응착과 마찰은 양자사이의 전단강도가 증가함에 따라서 감소한다고 하였다. 또한 세라믹스의 분위기 환경에 대한 연구로서 S.Sasaki<sup>(6)</sup>는 세라믹스의 마찰마멸에 미치는 분위기 습도 및 수분의 영향에 대한 연구로서 마찰면에 형성된 물의 흡착층 및 수산화물이 마찰에 큰 영향을 미친다고 보고하고 있다.

이처럼 지금까지의 세라믹스의 마멸실험은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SiC 및 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 등의 각종 세라믹스의 재질을 달리한 경우의 제특성에 대한 결과는 많이 보고되어 있으며, 또한 純度を 달리한 동일한 알루미늄 세라믹스의 마멸특성에 대한 연구<sup>(7)</sup>는 보고되고 있으나, 실제적으로 사용 가능성이 있는 전자, 기계부품 및 자동차부품 등의 구조용세라믹스로 널리 사용되는 純度を 달리한 알루미늄 세라믹스와 鋼에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 低價格으로 가장 널리 이용될 가능성이 있는 알루미늄 세라믹스와 베어링鋼(STB2)에

대한 마찰실험을 통하여 알루미늄 순도의 영향에 따른 마찰, 마멸거동을 상세히 조사하여 각종 기계부품 및 자동차부품의 tribology 설계의 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

### 2.1 試驗材

본 연구에 사용한 실험재료는 常壓燒結한 알루미늄 세라믹스(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics)이며, 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 物理的 및 機械的性質을 표시하였다. Table 2에는 STB2의 化學的成分을 나타내었다. 세라믹스 재료는 일반적으로 가공이 곤란하므로 시험편의 형상은 단순한 것이 요망된다. 따라서 시험편은 Fig. 1과 같이 外徑 22 mm, 內徑 15 mm로 하였으며, 마찰면은 ring상이며 마찰형태는 平面과 平面의 미끄럼마찰이 되도록 하였다. Fig. 1과 같이 실린더형의 시험편으로 실험을 하는 경우, 마찰면 전체에 균일한 접선력이 작용한다고 하여도 발생하는 torque는 회전반경에 따라 다르고 추정되는 torque는 이들의 적분치가 되므로 접선력을 면밀하게 구할 수는 없다. 따라서 축하중이 마찰면에 균등하게 작용하며, 반경방향으로의 상대 미끄럼

Table 2 Chemical composition of STB2

Chemical composition(wt %)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
1.002	0.234	0.342	0.001	0.002	1.520	0.001	0.071	0.132

Table 1 Physical and mechanical properties of Alumina ceramics and STB2

Property	Alumina ceramics and STB2			STB2
	85% Ceramics	95% Ceramics	99.7% Ceramics	
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( $\times 10^4$ MPa)	2.06	3.14	3.92	1.90
Vickers hardness	1228	1400	1690	825
Thermal Conductivity (cal.cm/cm <sup>2</sup> .sec.°C)	0.04	0.06	0.08	0.13

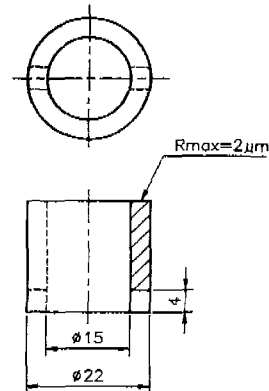


Fig. 1 Shape and dimension of wear specimen

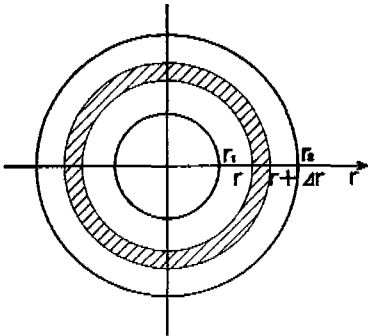


Fig. 2 Torque generated on the frictional surface

속도의 차의 영향도 무시하고 접선력이 마찰면 전체에 균일하게 작용한다고 하면 계속된 torque로 부터 접선력을 다음과 같이 계산할 수 있다. Fig. 2에 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 torque T는 식(1)과 같이 표시할 수 있다. 여기서

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

작용하중 P는

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

가 되며,  $\mu$ 는 마찰면 전체에서 一定値를 취한다고 가정

하므로

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

으로 표시할 수 있다. 이것을 일반의 摩擦係數  $\mu = F/P$ 와 비교하면 接線力

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

이 된다. 여기서

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

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

### 2.2 實驗裝置 및 實驗方法

Fig. 3은 본 실험에 사용한 시험기의 개요도를 나타낸 것이다. 실험전 시험편은 마찰면 edge부가 실험중 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. 3에서 처럼 고정부에 부착한 上部시험편은 상대재료인 STB2를, 회전부에 부착한 下部시험편에는 실험재료인 純度を 달리한 알루미늄이나 세라믹스를

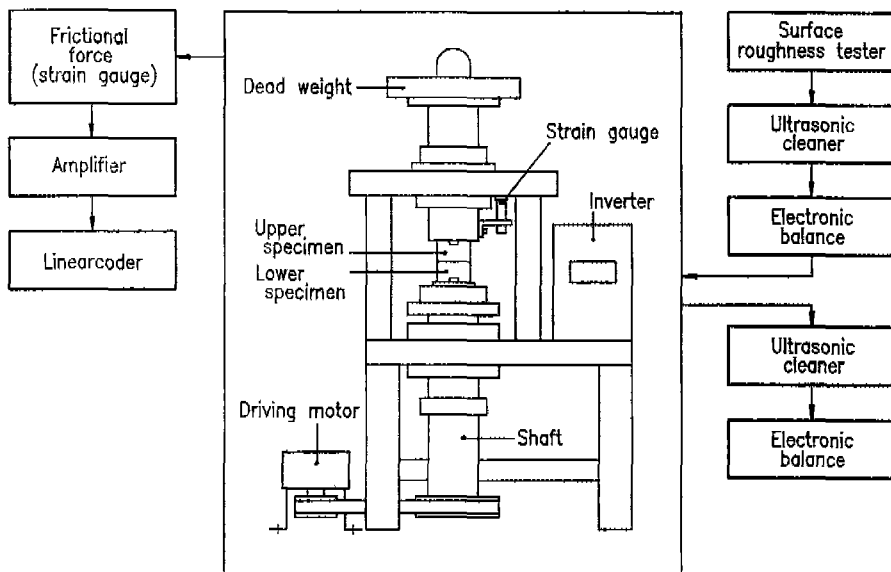


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

부착하여 각 실험조건에 따라 대기중 건조마찰실험을 수행하였다. 이때의 마찰력은 strain gauge가 부착된 板 spring을 통하여 증폭기로 증폭하여 線形記錄計로 그 출력파형을 검출하여 산출하였다. 그리고 회전속도 변환은 motor를 이용하여 V-belt로 구동시켜 이를 invert로 무단구동시켜 변환하였다. 실험조건으로서 미끄럼속도를 0.1m/sec~0.7m/sec까지 변화시켰으며, 접촉하중은 중심축에 荷重을 가하여 24.5N~73.5N까지 24.5N씩 상승시켰다. 또한 미끄럼거리는 100m에서 2,000m까지 단계적으로 변화시켰다. 여기서 미끄럼속도를 0.7m/sec까지 한 것은 그 이상의 미끄럼속도에서는 열충격에 의한 熱點이 생겨 高荷重에서 시험편의 파손이 일어났기 때문이다. 순도를 달리한 각 시험편 및 STB2의 경도치는 마이크로비커스 경도계를 이용하였으며, 실험후 마멸체적(mm<sup>3</sup>)은 0.1mg의 정도를 가진 디지털천칭을 사용하여 실험전후의 중량감소량을 측정하고 이를 시험편의 비중을 이용하여 환산하였다. 여기서 실험재인 세라믹스에는 상대재인 鋼의 전이가 발생하여<sup>(6)</sup>, 마찰표면에 유색의 산화물이 산적하여<sup>(9)</sup> 오히려 세라믹스의 중량이 증가하였기 때문에 나타내지 않았다. 그리고 주사전자현미경을 사용하여 각 실험조건에 따른 마찰면을 관찰하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 磨滅에 미치는 미끄럼 速度特性

Fig. 4는 相對材料를 STB2, 實驗材料를 95%로 한 경우, 접촉하중 P를 24.5N, 49N 및 73.5N으로 하고 미끄럼거리 L을 1 km로 일정하게 하였을 때, 미끄럼속

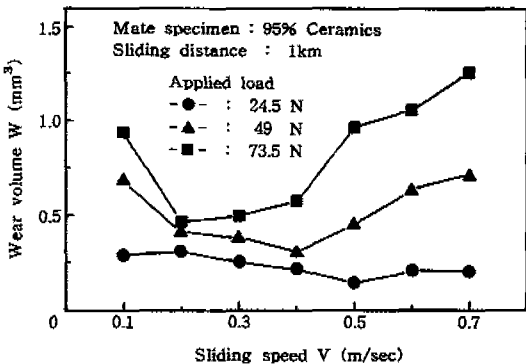


Fig. 4 Relation between wear volume and sliding speed

도 V(m/sec)의 변화에 따른 상대재의 磨滅量 W(mm<sup>3</sup>)를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 W는 접촉하중 P가 24.5 N에서는 0.5 m/sec, 49N는 0.4 m/sec, 또한 73.5 N는 0.2 m/sec까지는 감소 하지만, 그 이상의 속도영역에서는 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 P의 상승과 함께 W는 급격히 증가 하지만, W의 극소치를 나타내는 V는 低速側으로 이행하는 것을 알 수 있다. 또한 실험 후 실험재의 마찰면상에는 V 및 P의 증가에 따라서 유색의 산화물은 赤褐色에서 黑褐色으로 遷移하는 경향으로 나타났으며, 이의 주성분은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>이다.<sup>(8,10)</sup> 이는 세라믹스와 鋼의 마찰시 마멸은 전단강도가 적은 鋼쪽에서 마멸이 진행되기<sup>(11)</sup> 때문에 마찰 표면에 집적한 산화물은 鋼에서 탈락한 마멸분이 마찰면 온도의 상승으로 산화가 진행되었기 때문이다. 각 접촉하중에 따라 W의 극소치를 나타내는 미끄럼속도 이하의 速度領域에서는 상대재인 鋼의 시험편에서 탈락된 미세한 마멸분이 즉시 산화하여 이것이 세라믹스의 표면으로 移着되어 랩재(lapping powder)와 같은 역할을 하는 연삭마멸<sup>(9)</sup>을 하기 때문이며, 그 이상의 速度領域에서 W가 증가하는 것은 강의 표면에서 세라믹스의 표면으로 移着된 산화물은 마찰속도의 증가에 따라 마찰면 온도의 상승으로 서로 凝着하여 세라믹스의 표면에서 탈락하기 어렵게되고, 이후 계속적인 마찰로 인한 마찰열의 증대로 강의 표면을 연화시켜 열연화에 의한 마멸이 진행되기 때문이라 생각된다. 그리고 각 하중에서 W의 극소치를 나타내는 각 속도에서는 마찰초기 연삭마멸의 형태로 진행되지만, 그 이하의 속도영역보다 마찰면온도의 증가로 표면 응착력이 증대하고, 이에 마멸분의 배제가 어렵게 되어 마찰 표면에 생성된 산화물이 마찰표면을 분리시켜 윤활작용<sup>(12)</sup>을 하는 遷移速度라고 생각된다. 그러나 상대재 및 실험재를 鋼으로 하였을때, 朴,<sup>(13)</sup> 文<sup>(14)</sup>의 연구에서는 前述한 내용과 반대의 현상이 나타난 것을 볼 수 있는데, 이는 저속의 영역에서는 赤褐色의 산화물이, 고속의 영역에서는 黑色의 산화물이 발생하여 마찰면의 직접접촉을 방지하기 때문에 輕磨滅로 되며, 또한 중간속도의 영역에서는 마멸속도가 산화반응속도보다 빠르게 진행되어 산화물의 생성이 극히 적고, 이로인하여 윤착마멸과 기계적마멸이 지배적으로 작용하는 重磨滅이 된다고 서술하고 있다.

Fig. 5는 실험전 순도 (a)85%, (b)95%, (c)99.7%의 polishing한 시험편표면을 나타낸 것으로서, 알루미늄나

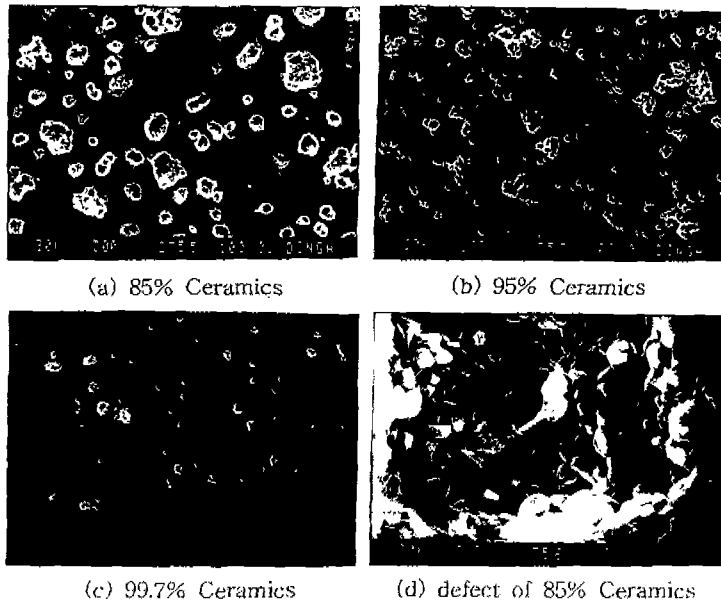


Fig. 5 Polished specimen surface on the alumina purity

의 순도가 증가할수록 표면에 시험편의 제조상의 缺陷部인 空隙의 크기와 그 數가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 (d)에서는 순도 85%의 결함부를 나타낸 것으로서, 약  $2.5 \mu\text{m}$  정도 크기의 알루미나 입자( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 및 약  $40 \mu\text{m}$  정도의 空隙을 볼 수 있다.

Fig. 6은 P를 49N, L을 1 km 로 하였을때, 미끄럼 속도의 변화에 따른 상대재인 STB2 의 마찰면을 나타낸 것으로서 (a) V가 0.2 m/sec의 경우는 부분적으로 적갈색의 산화물층이 보이지만 대체로 마찰면에는 연삭 마멸이 지배적으로 작용하며, (c) V가 0.6m/sec 에서는 열연화에 의한 마멸로 마찰표면에는 심한 groove가 나타나 있고, (b) V가 0.4 m/sec의 경우는 마찰표면에는 연삭마멸의 흔적을 일부 관찰 할 수 있지만, 대체로 산화물이 마찰표면에 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건하에서 시험재인 순도 95% 세라믹스의 마찰면을 나타낸 것이다. 그림에서 (a) V가 0.2 m/sec, (b) 0.4 m/sec 및 (c) 0.6 m/sec의 경우 마찰면 전표면에 미세한 산화물의 입자를 볼 수 있으며, 또한 V의 증가에 따라서 산화물 입자의 응착이 증가 하는 경향을 나타내고 있다. 마멸분의 형상은 (a)의 경우에는 鋼에서 탈락한 직경 약  $0.2 \mu\text{m}$  정도의 미세한 마멸분을, (c)에서는 (a)보다 2~3 배 정도 큰 粒狀과 큰 怪狀의 마멸분을, 중간속도인 (b)에서는 (a)와

(b)의 혼합상을 볼 수 가 있다. 이처럼 세라믹스의 마멸 기구는 전술한 바와같이 W의 극소치를 나타내는 V이 전의 速度領域에서는 研削磨滅을, 이후의 速度領域에서는 열연화에 의한 마멸이 W를 지배한다고 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 4의 실험조건에서의 마찰계수  $\mu$ 를 나타낸 것이다. 마찰계수는 접촉면의 상태에 대응하여 결정되므로 마찰계수의 급격한 변화는 접촉면의 상태가 급격히 변하고 있다는 것을 표시하고 있다. 여기서 마찰계수  $\mu$ 는 실험중 각 미끄럼속도에서 진폭의 최대치와 최소치가 불규칙하게 나타났지만 본 실험에서는 실험종료 직전에 측정된 값의 평균치를 찾아 이를 이용하여 式 (4)에서 구한 마찰력을 접촉하중으로 나눈 값으로 하였다. 그림에서 V 및 P의 증가에 따라서  $\mu$ 는 감소하는 경향을 나타내고있다. V의 증가에 따라서 마찰면에 발생하는 발생열의 증가에 기인하며, P의 증가에 따라서 실제 접촉면의 증가로 마찰면온도의 상승으로 응착면의 전단강도의 저하가 크기 때문이며, 알루미나 세라믹스의 경우 온도가 증가할 수록 열전도율이 저하하여<sup>(5)</sup> 열축적에 의한 현상에도 기인된다고 생각된다. 또한  $\text{ZrO}_2$ 와 tempering 鋼의 마찰실험<sup>(6)</sup>에서도 V의 증가에 따라  $\mu$ 의 감소는 마찰면온도 상승으로 인하여 접촉면의 전단강도의 저하에 기인한다는 것과는 일치하는 현상이다.

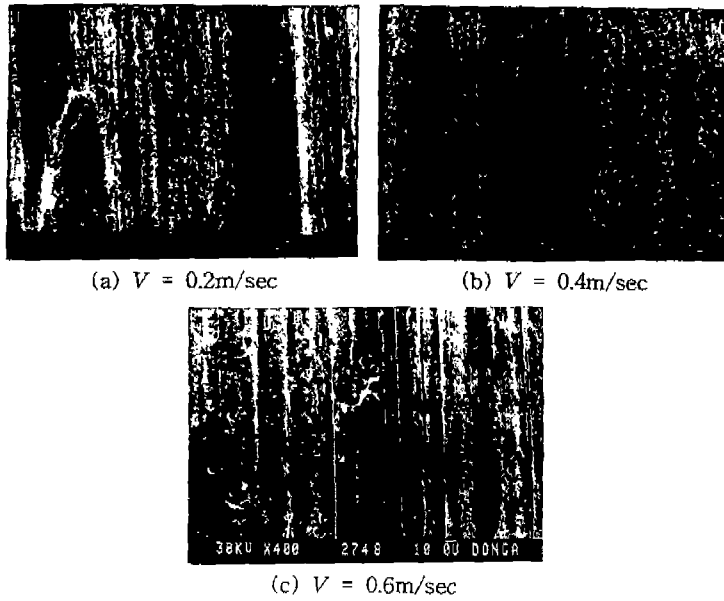


Fig. 6 Photographs of the rubbed surface for the STB2:P = 49 N, L = 1 km

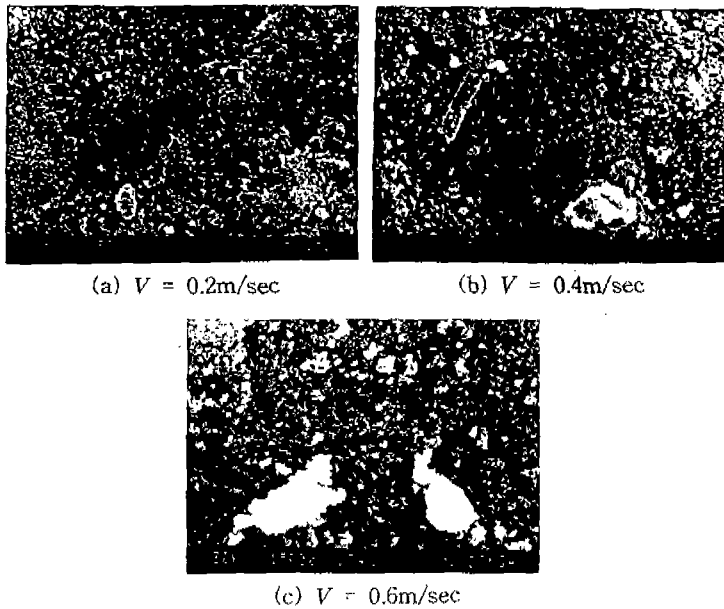


Fig. 7 Photographs of the rubbed surface for the 95% ceramics:P = 49 N, L = 1 km

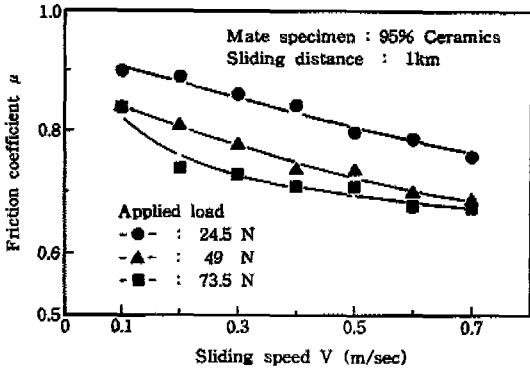


Fig. 8 Effect of sliding speed on the friction coefficient

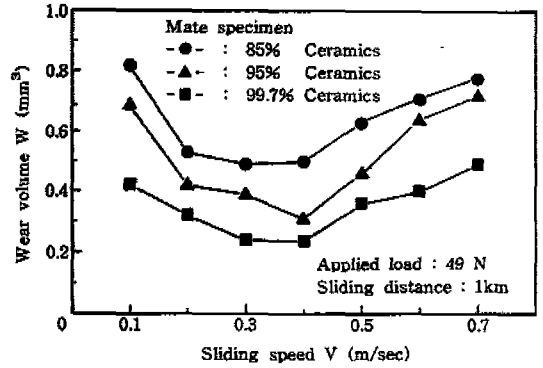


Fig. 9 Relation between wear volume and sliding speed

### 3.2 磨滅에 미치는 알루미늄의 純度特性

Fig. 9는 상대재료를 STB2, 실험재료의 순도를 달리한 즉 85%, 95% 및 99.7%로 한 경우, 접촉하중 P를 49N으로 하고 미끄럼거리 L을 1 km로 하였을 때의 미끄럼속도 V의 변화에 따른 상대재인 STB2의 磨滅量 W를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 W는 실험재의 순도가 85%에서는 0.3 m/sec, 95% 및 99.7%에서는 0.4 m/sec까지는 감소 하지만, 이상의 속도영역에서는 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 실험재 순도의 감소와 함께 W는 급격히 증가하며, W의 극소치를 나타내는 V도 低速側으로 이행하는 경향을 관찰할 수 있다. 각 순도에 따라 W의 극소치를 나타내는 미끄럼속도 이하의 速度領域에서는 前述한 바와같이 강의 표면에서 세라믹스의 표면으로 移着된 정도가 모재보다 높은 마멸분의 滯留가 연삭마멸을 하기 때문이며, 그 이상의 速度領域에서 W가 증가하는 것은 열연화에 의한 마멸이 진행되기 때문이라 생각된다. 그리고 W의 극소치를 나타내는 각 속도에서는 마찰초기 연삭마멸의 형태로 진행되지만, 이하의 속도영역보다 마찰면온도의 증가로 표면응착력이 증대하고, 이에 마멸분의 배제가 어렵게 되어 응착작용이 지배적으로 작용하기 때문이라 생각된다.

W는 실험재의 순도가 감소할수록 급격히 증가하며, W의 극소치를 나타내는 V는 低速側으로 이행하는 경향을 볼 수 있는데, 이것은 알루미늄 순도에 따른 탄성계수 및 열전도율의 차이에 기인한다고 생각된다. 즉 강의 W는 알루미늄 순도가 감소 할수록 증가하는 것은 Table 1에서 처럼 탄성계수 및 열전도율이 적은 순도

가 낮은 시험편일수록 마찰시 발생하는 열이 방산되기 어려우므로 국부적 및 순간적인 온도상승이 일어나 알루미늄의 粒子가 쉽게 탈락되어 이 粒子가 鋼의 표면을 연삭 및 응착마멸을 촉진시키기 때문이라 생각된다. 이것은 재질을 달리한 각종 세라믹스 즉, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 ZrO<sub>2</sub>에 대한 SM45C 와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와의 마찰실험<sup>(15)</sup>의 경우에서도 열전도율이 적은 재질일 수록 세라믹스측의 마찰온도 상승은 적은데, 이는 마찰을 동일하게 실시 하였을 때 열전도율이 적으므로 마찰열이 적게 전도 되었기 때문에 마찰온도 상승은 적다. 그러므로 열전도율이 적을수록 상대재 쪽으로 많은 마찰열을 이동 시킴으로서 저속에서 강의 응착에 달한다. 또한 S.C.Kang<sup>(17)</sup>의 연구에서도 열전도가 가장 낮은 ZrO<sub>2</sub>가 열축적에 의한 마멸저항이 감소되어 마멸을 증대시킨다는 것과 일치하는 현상이다.

Fig. 10은 P를 49N, V를 0.6 m/sec 및 L을 1 km로 하였을때, 실험재인 (a) 순도 85%와 상대재인 (c) STB2 및 (b) 순도 99.7%의 상대재인 (d) STB2의 마찰면을 나타낸 것이다. 실험재의 순도를 달리한 (a)와 (b)의 경우, 전이된 鋼의 산화물이 형성되어 전 마찰면 표면을 덮고 있으며, 순도가 낮은 (a)의 경우가 (b)보다 심하게 산화물이 응착이 된 현상을 볼 수 있다. 이 현상은 결함인 空隙이 많은 순도 85%의 경우가 결함부 및 탈락된 알루미늄 입자 부분에 산화된 鋼의 마멸분이 피상으로 응집되기 쉽기 때문이라 생각된다. 그리고 순도 85%에 대한 상대재인 (c)에서는 열연화에 의하여 마찰표면이 부분적으로 연삭마멸과 전반적으로 응착마멸의 형상을 나타내고 있으며, 순도 99.7%의 상대재인 (d)에서는 마찰표면에는 전반적으로 산화물층으로 형성

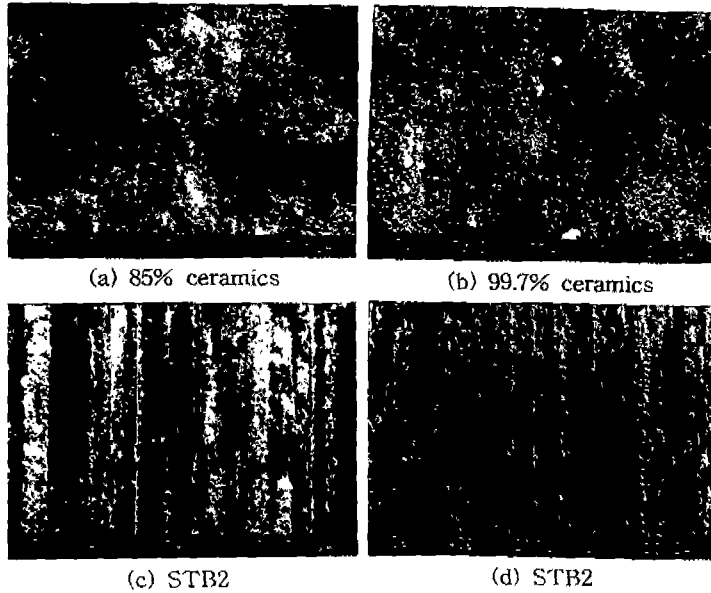


Fig. 10 Photographs of the rubbed surface for the alumina purity; P = 49 N, V = 0.6 m/sec, L = 1 km

되어 있으며, 부분적인 연삭마멸의 흔적도 볼 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 9와 동일한 조건하에서 V에 따른 마찰계수  $\mu$ 를 나타낸 것이다.  $\mu$ 는 각 알루미늄나 순도에 따라 V의 증가와 함께 서서히 감소하며, 알루미늄나 순도가 적을수록  $\mu$ 의 감소 경향이 큰 것을 볼 수 있다. 각 시험편에 있어서 저속의 영역에서  $\mu$ 가 큰 값을 나타내는 것은 마찰면 온도가 낮기 때문에 실접촉면적이 작아 실접촉부의 접촉압력이 극히 높아 이로 인하여 마찰면에 작용하는 전단응력이 크기 때문이라고 생각된다. 그리고 V의 증가와 함께  $\mu$ 가 감소하는 것은 V의 증가와

더불어 마찰면 온도가 상승하여 마찰면의 전단강도를 저하시키기 때문이라고 생각된다. 이러한 현상은 금속 재료에서도 마찰면의 軟化에 의하여 전단응력이 緩和되어 마찰계수가 저하하게 된다고<sup>(18)</sup> 서술하고 있다. V의 증가에 따라 알루미늄나 순도 85%의  $\mu$ 가 감소의 경향이 크게 나타나는 것은 V의 증가에 따른 마찰면 온도상승으로 열분산능력이 적은 순도 85%의 시험편이 마찰로 인하여 발생한 열을 鋼쪽으로 보다 많이 이동시킴으로, 이에 鋼의 전단강도 저하가 크기 때문이라고 생각된다.

### 3.3 純度を 달리한 알루미늄나 세라믹스의 摩擦距離特性

Fig. 12는 相對材料인 上部시험편을 STB2, 실험재료인 下部시험편은 각 순도를 달리한 즉 85%, 95% 및 99.7%로 한 경우, 접촉하중 P를 49 N로 하고 미끄럼 속도 V를 0.3 m/sec로 하였을 때, 미끄럼거리 L의 변화에 따른 상대체의 마멸진행 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 처럼 마멸량 W는 순도를 달리한 각 시험편 모두 L이 약 0.5 km 까지는 거의 직선적으로 증가하지만, 그 이상의 L에서는 거의 완만하게 상승하고 있으며, 또한 실험체의 순도가 감소할수록 W도 증가한다는 것을 알 수 있다. 각 순도에 따라 W가 직선적으로 증가하는 重磨減 상태에서 완만하게 상승하는 輕磨減 상태로 遷移하는 臨界미끄럼距離 Lcr 이하의 初期磨減領

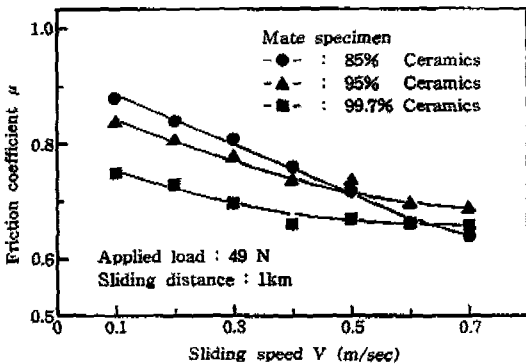


Fig. 11 Effect of sliding speed on the friction coefficient



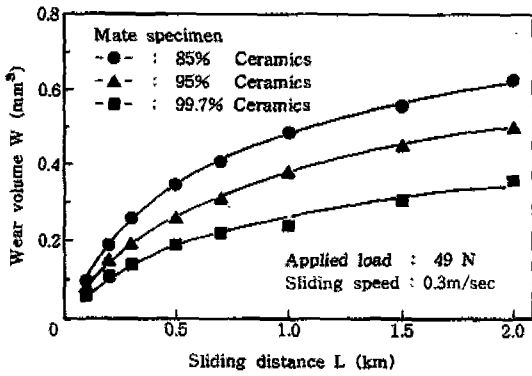


Fig. 12 Wear curve in wear volume with sliding distance

域에서는 마찰초기에 알루미나의 입자에 의한 강의 접촉계면에서 전단 및 연삭마멸을 일으키기<sup>(10)</sup> 때문이며, Lcr 이상의 영역에서는 마찰초기에 발생한 鋼의 마멸분이 산화물이 되어 알루미나에 부착하고, 이의 작용으로 실험재와 상대재의 직접접촉을 방지하는 작용을 하기 때문이라 생각된다. Enomoto와 Mizuhara<sup>(9)</sup>의 실험에서는 그 산화물의 두께가 약 7 μm 정도가 된다고 보고하고 있다. 그리고 순도가 적은 상대재일 수록 W가 큰 값을 가지는 것은 P와 V 및 L가 동일할 경우, 열전

도율이 적은 재료일 수록 열분산작용의 저하로 마찰면 온도가 상승하게 되는 것은 당연하다고 생각되며, 이로 인하여 열축적된 알루미나 세라믹스가 상대재인 STB2의 마찰면의 연화를 조속히 진행시키기 때문이라 생각된다.

Fig. 13은 P를 49N, V를 0.3 m/sec로 하였을때의 L변화에 따른 알루미나 순도 95% 및 99.7%의 마찰면을 나타낸 것이다. 그림에서 초기마멸상태를 나타내는 L이 200m인 (a) 순도 85%는 부분적으로 제조상의 缺陷部로 산화물이 충전되고 있으며, 마찰면의 표면에는 산화물이 응집되어 있지만, (b) 순도 99.7%의 경우 마찰면 표면에 산화물이 산재하여 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이처럼 초기마멸상태에서는 鋼에서 탈락된 마멸분이 세라믹 표면의 活性化反應에 의하여 移着되어 이것이 鋼의 표면을 abrasive 的인 損傷을 주기 때문이라 생각된다. 그리고 정상마멸상태를 나타내는 L이 1.5km 인 (c) 순도 85% 및 (d) 순도 99.7%의 경우, 前述한 바와같이 표면온도의 상승으로 마찰면 전표면에 溶着된 산화물이 두껍게 덮혀 있으며, (c)는 (d)보다 심한 응착상태 및 크랙 등을 관찰 할 수가 있다.

Fig. 14는 Fig. 11과 동일한 조건하에서 L에 따른 마찰계수 μ를 나타낸 것이다. μ는 각 알루미나 순도에

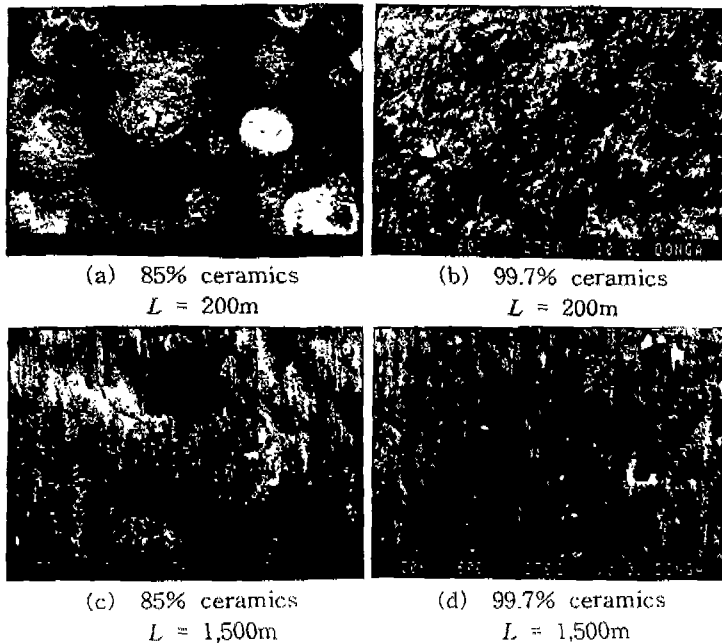


Fig. 13 Photographs of the rubbed surface for the alumina purity and sliding distance; P = 49 N, V = 0.3 m/sec

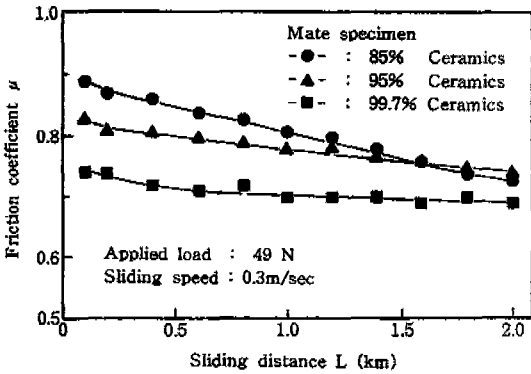


Fig. 14 Effect of sliding distance on the friction coefficient

따라 L의 초기단계에서는 0.74~0.89 정도의 큰 값을 나타내지만 L의 증가와 함께 서서히 감소하며, 실험이 종료되는 미끄럼 거리에서는 0.69~0.74 정도의 안정된 값을 나타내고 있다. 그리고 알루미늄나 순도가 감소할수록  $\mu$ 의 감소 경향이 크며, 대체로  $\mu$ 도 큰 값을 나타내고 있다는 것을 볼 수 있다. 각 시험편에 있어서 마찰 초기단계에서  $\mu$ 가 큰 값을 나타내는 것은 이 단계에서는 마찰면 온도가 낮기 때문에 마찰면의 強度低下는 적다고 추정된다. 이 결과 응착면의 전단강도가 크며, 또한 실접촉면적도 작아 실접촉부의 접촉압력이 극히 높아 이로 인하여 마찰면에 작용하는 전단응력이 크기 때문이라고 생각된다. 그리고 L의 증가와 함께  $\mu$ 가 감소하는 것은 L의 증가와 더불어 마찰면 온도가 상승하여 마찰면의 전단강도를 저하 및 마찰면에 형성된 산화물의 영향이라고 생각된다. 이러한 현상은 금속재료에서도 마찰면의 軟化에 의하여 전단응력이 緩和되어 마찰계수가 저하하게 되며,<sup>(18)</sup> 또한 Semenov와 Katsura들<sup>(19)</sup>은 진공중에서  $Al_2O_3$ 의 마찰계수를 측정하고 온도의 상승과 더불어 마찰계수의 감소는 정도의 저하와 관련한다고 서술하고 있다. L의 증가에 따라 알루미늄나 순도 85%의  $\mu$ 가 감소의 경향이 크게 나타나는 것은 L의 증가에 따른 마찰면 온도상승으로 탄성계수 및 열전도율이 작은 순도 85%의 시험편의 마찰면 온도상승으로 인한 열축적으로 鋼의 전단강도 저하를 보다 촉진시키기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 結 論

순도를 달리한 알루미늄나 세라믹스( $Al_2O_3$  ceramics)와 상대제인 베어링鋼(STB2)의 摩擦特性을 알기 위하여 미끄럼속도, 접촉하중 및 미끄럼거리를 변화시켜 마찰계수 및 마멸량을 조사하여 미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄나 순도가 증가할 수록 베어링鋼의 마멸량은 감소하며, 마멸량의 극소치는 고속측으로 이행한다.
2. 미끄럼속도 및 미끄럼거리의 증가와 함께 마찰계수는 전단강도의 저하로 감소하며, 알루미늄나 순도가 격을 수록 탄성계수 및 열전도율의 저하로 마찰계수 감소의 경향은 크다.
3. 마멸량의 극소치를 나타내는 미끄럼속도 이하의 저속역에서는 연삭마멸을, 그 이상의 고속역에서는 열연화에 의한 마멸이 지배적으로 작용한다.
4. 세라믹스의 마찰표면은 鋼에서 이착된 산화물의 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. Kano, M. and Tanimoto, I., "Wear Resistance Properties of Ceramic Rocker Arm Pad", Wear, 145, pp.153-165, 1991
3. 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
4. Ajayi, O. O. and Ludema, K. C., "The Effect of Microstructure on Wear Modes of Ceramic Materials", Wear, 154, pp.371-385, 1992
5. Kazuhisa Miyoshi, "Fundamental Considerations in Adhesion Friction and Wear for Ceramic-Metal Contacts", Wear, 144, pp.35-44, 1990
6. Shinya Sasaki, "The Effects of Water on Friction and Wear of Ceramics", JSLE, 33, 8, pp.620-628, 1978
7. Byun, S. K., "A Study on the Wear Charac-

- teristic of the Alumina Ceramics”, Mechanical Engineering Graduate School, Dong-A University, Pusan, Korea, 1993
8. A. Ravikiran and B.N.Pramila Bai, “High Speed Sliding of  $Al_2O_3$  Pins against an EN-24 Steel Disc”, *Wear*, 162-164, pp.296-301, 1993
  9. Y.Enomoto and K.Mizuhara, “Characterization of Wear Behavior of Steel and Ceramics in the AMAS Round Robin Tests”, *Wear*, 162-164, pp.162-164, 1993
  10. 宇佐美初彦, 般橋鉀一, 中村 隆, 馬淵英二, “セラミックスの摩擦實驗(第2報)”, *トライボロジスト*, 第35卷, 第3號, pp.195-201, 1990
  11. 復本明弘, 平塚健一, 笹田直, “アルミナ對金屬の摩擦・摩耗に對する金屬の酸化活性の影響と雰圍氣酸素の效果”, *トライボロジスト*, 第36卷, 第1號, pp.51-56, 1990
  12. M.G.Gee, C.S. Mathuaru, T.S. Eyre, “The Measurement of Sliding Friction and Wear of Ceramics at High Temperature”, *Wear*, 138, pp.169-187, 1990
  13. 朴興植, “오스텝퍼링 한 低合金球狀黑鉛鑄鐵의 機械的性質 및 磨滅特性에 관한 研究”, 漢陽大學校 大學院 博士學位論文, 1989
  14. 文炳柱, “플라스틱成形用 金型鋼의 磨滅特性 및 이의 機構에 관한 研究”, 東亞大學校 大學院 碩士學位論文, 1991
  15. 宇佐美初彦, 般橋鉀一, 中村 隆, 馬淵英二, “セラミックスの摩擦實驗(第1報)”, *トライボロジスト*, 第34卷, 第6號, pp.458-464, 1989
  16. 宇佐美初彦, 般橋鉀一, 中村 隆, 馬淵英二, “セラミックスの摩擦實驗(第3報)”, *トライボロジスト*, 第36卷, 第4號, pp.327-334, 1991
  17. 강석춘, “세라믹  $ZrO_2$ ,  $Si_3N_4$  및  $SiC$ , AISI 4340 및 청동으로 윤활 및 건조조건에서 미끄럼시험하였을 때의 마찰 및 마멸 거동” 大韓機械學會論文集, 第13卷, 第3號, pp.404-410, 1989
  18. 田部浩三, 清水哲明, 笹木和夫, “金屬氧化物と複合化物”, 講談社, pp.75-76, 1986
  19. Semenov, A.P. and Katsura, A.A., “Investigation of Friction and Wear of Corundum Ceramics at Temperatures to 1500 °C”, *proc., 2nd Int., Conf., Wear of Mater., ASME*, pp.551-555, 1979