

# 純度を 달리한 알루미늄 세라믹스의 磨滅特性에 관한 研究

번 상기\* · 김 형자 · 전 태욱 · 박 흥식  
(동아대원) (부산공업대) (동아대)

## 1. 序 論

세라믹스는 耐蝕性, 耐熱性, 低密度, 耐磨滅性 등의 우수한 특성을 가지고 있다. 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>(1-3)</sup> 이에 수반하여 세라믹스의 Tribology 에 관한 연구도 증가되고 있지만 그 기초적연구는 금속에 비하여 훨씬 적고 마찰기구나 그 마멸특성에는 불분명한 점이 많다.<sup>(4)</sup> 이는 세라믹스가 그 종류도 많고 각각의 재질에 따라서 表面吸着層 및 기계적 특성이 다르기 때문에 당연히 마찰변형특성도 서로 다르게 되기 때문이라고 생각된다.

지금까지 세라믹스 또는 세라믹스와 금속과의 마찰, 마멸에 대한 연구로서 Ajayi 와 Ludema<sup>(5)</sup>는 구조용 세라믹스인 SiC 와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 의 마멸 mode 에 미치는 현미경조직의 효과에 대하여 연구한 결과, 악한 결정입계를 가진 재료가 강한 입계를 가진 것보다 훨씬 손상의 영향이 크다고 하였다. Miyosh<sup>(6)</sup>는 각종 금속재료에 대한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC 의 진공중의 마찰실험에서 세라믹스와 금속사이의 응착과 마찰은 양자사이의 전단강도가 증가함에 따라서 감소한다고 하였다. 또한 세라믹스의 분위기 환경에 대한 연구로서 S.Sasaki<sup>(7)</sup>는 세라믹스의 마찰마멸에 미치는 분위기 습도 및 수분의 영향에 대한 연구로서 마찰면에 형성된 물의 흡착층 및 수산화물이 마찰에 큰 영향을 미친다고 보고하고 있다.

그러나 지금까지의 세라믹스의 마멸실험은 각종 세라믹스의 재질을 달린 경우의 제특성을 규명하여 왔지만 전자, 기계부품 및 자동차부품 등의 구조용세라믹스로 널리 사용되는 純度를 달리한 알루미늄 세라믹스의 마멸거동에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 低價格으로 가장 널리 이용될 가능성이 있는 순도를 달리한 알루미늄 세라믹스의 마찰, 마멸거동을 상세히 조사하여 각종 기계부품 및 자동차부품의 tribology 설계의 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 實驗方法

### 2.1 實驗材料

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% 로 달린 3종류를 선택하였으며 Table 1 에는 이들 3종류의 시험편의 物理的 및 機械的性質을 표시하였다. 세라믹스 재료는 일반적으로 가공이 곤란하므로 시험편의 형상은 단순한 것이 요망된다. 따라서 시험편은 Fig.1 과 같이 外徑 22mm, 內徑 15mm로 하였으며, 마찰면은 ring 상이며 마찰형태는 平面과 平面의 미끄럼마찰이 되도록 하였다. Fig.1 과 같이 실린더형의 시험편으로 실험을 하는 경우, 마찰면 전체에 균일한 접선력이 작용한다고 하여도 발생하는 torque 는 회전반경에 따라 다르고 추정되는 torque는 이들의 적분치가 되므로 접선력을 면밀하게 구할 수는 없다. 따라서 축하중이 마찰면에 균등하게 작용하며, 반경방향으로의 상대 미끄럼속도의 차의 영향도 무시하고 접선력이 마찰면 전체에 균일하게 작용한다고 하면 계속된 torque로 부터 접선력을 다음과 같이 계산할 수 있다. Fig.2 에 표시한 바와 같이 內半徑을 r<sub>1</sub>, 外半徑 r<sub>2</sub> 라 하고, 마찰계수를  $\mu$ , 접축압력을  $\sigma$ 로 하면 마찰면 전체에서 발생하는 torque T 는 式(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  $P$  는

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

가 되며,  $\mu$  는 마찰면 전체에서 一定值를 취한다고 가정하므로

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

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

$$F = T/r_{0q} \quad (4)$$

이 된다. 여기서

$$r_{0q} = [ T \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr ] / [ \int_{r_1}^{r_2} r dr ] \quad (5)$$

이다. 이것은 측정된 torque 를  $r_{0q}$  로 나누면 접선력이 얻어진다는 것을 표시하고 있다. 따라서 본 실험에서 미끄럼속도와 미끄럼거리에 따라 마찰계수  $\mu$  는 모두 반경  $r_{0q}$  에 대하여 계산한 값으로 하였다.

## 2.2 實驗裝置 및 實驗方法

Fig.3 는 본 실험에 사용한 시험기의 개요도를 나타낸 것이다. 실험전 시험편은 마찰면 edge부가 실험중 chipping으로 인한 중량감소량을 줄이기 위하여 diamond 줄로 rounding 을 준 후 emery paper #1200 으로 polishing 하여 그 표면조도를  $R_{max}=2\mu m$  로 일정하게 하였다. Fig.3 에서 처럼 고정부에 부착한 上部시험편은 상대재료인 純度 99.7% 몰, 회전부에 부착한 下部시험편에는 純度を 달리한 실험재료를 부착하여 각 실험조건에 따라 대기중 건조 마찰실험을 수행하였다. 이때의 마찰력은 strain gauge 가 부착된 板 spring 을 통하여 증폭기로 증폭하여 縹形記錄計로 그 출력파형을 검출하여 산출하였다.

그리고 회전속도변환은 motor을 이용하여 V-belt 로 구동시켜 이를 invert 로 무단구동시켜 변환하였다. 실험조건으로서 미끄럼속도를 0.1m/sec~0.7m/sec 까지 변화시켰으며 접촉하중은 중심축에 死荷重을 가하여 5kgf~10kgf 까지 2.5kgf 씩 상승시켰다. 또한 미끄럼거리는 100m 에서 2km 까지 단계적으로 변화시켰다. 여기서 미끄럼속도를 0.7m/sec 까지 한 것은 그 이상의 미끄럼속도에서는 열충격에 의한 熱點이 생겨 高荷重에서 시험편의 실험중 파손이 일어났기 때문이다.

순도를 달리한 각 시험편의 경도치는 마이크로비커스 경도계를 이용하였으며, 실험후 마멸체적( $mm^3$ )은 0.1mg 의 디지털천칭을 사용하여 실험전후의 중량감소량을 측정하고 이를 시험편의 비중을 이용하여 환산하였다. 그리고 주사전자현미경을 사용하여 각 실험조건에 따른 마찰면 및 그 수직단면의 마멸과정을 자세히 관찰하였다.

## 3. 實驗結果 및 考察

### 3.1 磨減率 및 摩擦係數에 미치는 미끄럼 速度特性

Fig.4 는 相對材料를 純度 99.7%, 實驗材料를 95% 로 한 경우, 접촉하중  $P$ 를 5kgf, 7.5kgf 및 10kgf 로 하고 미끄럼거리  $L$  을 1km 로 일정하게 하였을 때 미끄럼속도  $V$  의 변화에 따른 상대제와 실험제의 磨減量  $W(mm^3)$ 을 나

타낸 것이다. 여기서 點線은 상대재의  $W$  를, 實線은 실험재의  $W$  를 표시한다.

그림에서 처럼 미끄럼속도  $V$  의 변화에 따라 순도 95%인 실험재의 마멸량이 상대재인 99.7% 의 것보다 크게 나타나며,  $V$  의 증가함에 따라  $W$  는 서서히 증가하지만 접촉하중  $P$  가 5kgf 인 경우  $V$  가 0.5m/sec 에서, 7.5kgf 에서는 0.4m/sec, 그리고 10kgf 에는 0.3m/sec 이상의 속도역에서의  $W$  는 급격히 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

각 접촉하중에 따라 마멸량  $W$  가 서서히 상승하는 속도역에서는 兩 시험편의 접촉부가 소성유동에 의한 윤활효과가 지배적으로 작용하기 때문이며,  $W$  가 급격히 상승하는 속도역에서는 마찰속도의 증가에 따른 衝擊力의 증대 및 마찰면 온도의 상승에 따른 재료의 연화가 진행되었기 때문이라고 생각된다. 특히 세라믹스의 경우 크랙의 생성은 충격력 및 전단에너지에 의존하므로  $W$  가 급격히 상승하는 속도역에서는 마찰속도의 증가에 따라 크랙생성 속도가 증가하여 격렬한 마멸이 일어나 이로 인하여 표면 보호층이 결여된 상태하에서 마찰의 계속에 의하여 마멸이 촉진된다고 생각된다. 그리고 표면층은 항상 마멸에 의하여 제거되어 새로운 新生面이 생성되므로 대기중의 수분 등의 흡착은 일어나기 어렵게 되어 있다고 생각된다. 물론 청정한 표면에 분위기 기체의 흡착층이 형성되는데 요하는 시간은 상당히 짧고<sup>(8)</sup>, 마찰면의 표면조도로 인하여 양 시험편의 돌기부가 고체접촉을 하지 않는 시간은 흡착층을 형성하는데 충분하다고 생각되지만 disk 시험편이 大氣에 노출되어 있는 pin on disk 시험방식에 비하여는 흡착의 영향은 적다고 생각된다. 그리고 본 실험에 이용한 시험편은 마찰면이 ring 상으로 마찰시 항상 全面이 접촉하고 있고 하중도 비교적 크기 때문에 마찰면이 대기에 직접 접촉하기 어렵고, 또한 마찰시 발생하는 마찰열이 제거되기 어려워 마찰면 온도의 상승이 조속히 일어난다고 생각된다. 이처럼 마찰면 온도상승은 응착면의 전단강도를 저하시켜 마멸을 촉진시킨다고 생각된다.

Fig.5 는 실험전 순도 95%의 polishing 한 시험편표면의 주사전자현미경 사진을 나타낸 것으로서 표면에 시험편의 제조 및 표면가공에 의한 缺陷部를 볼 수 있다.

Fig.6 은 접촉하중을 7.5kgf 로 한 경우 미끄럼속도의 변화에 따른 마찰면을 나타낸 것으로서 (a)  $V$  가 0.2 m/sec 의 경우는 전 마찰면 표면에는 소성유동이 지배적으로 작용하고 있는 것을 볼 수 있지만, (b)  $V=0.5$ m/sec 인 경우 空隙이나 표면의 缺陷部로부터 균열이 발생하여 이것이 마멸분으로 탈락된 흔적 및 응착으로 인하여 미끄럼방향으로 groove 가 형성되어 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.7 은 Fig.6 의 두가지 속도변화에서 採取한 磨滅粉을 나타낸 것이다. 그림에서 (a)  $V$  가 0.2 m/sec 및 (b) 0.5 m/sec 의 경우 모두 마멸분의 형상은 粒子狀의 형태를 나타내지만  $W$  가 급격히 증가한 상태의 속도인 (b) 의 마멸분이 0.1 $\mu$ m 정도의 크기를 가진 저속인 (a) 의 경우보다 그 크기가 2~3 배 정도로 크게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이처럼 세라믹스의 마멸은  $V$  의 증가에 따라 전술한 바와같이 온도상승으로 인한 열충격의 작용에 의한 취성파괴로 마멸이 진행된다는 것을 알 수 있다. 이것은 재질을 달리한 각종의 세라믹스의 마멸시 일어나는 파괴형태와 동일한 마멸거동을 나타내고 있다고 생각된다.

마찰계수는 접촉면의 상태에 대응하여 결정되므로 마찰계수의 급격한 변화는 접촉면의 상태가 급격히 변하고 있다는 것을 표시하고 있다. Fig.8 은 Fig.4 의 실험조건에서의 마찰계수  $\mu$  를 나타낸 것이다. 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 접촉하중  $P$  가 5kgf 인 경우  $V$  가 0.3 m/sec 까지의 저속역에서, 7kgf 및 10kgf인 경우는  $V$  가 0.5m/sec 까지의 속도역에서는  $\mu$  가 증가하고 있지만 그 이상의 속도역에서는 조금씩 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한  $V$  가 0.2 m/sec 이상의 속도역에서 7.5kgf 및 10kgf 의  $\mu$  가 5kgf 의  $\mu$  값보다 적은 값을 나타내고 있다.  $\mu$  가 증가하고 있는 저속역에서는

고속역에서 보다  $\mu$  가 적은 값을 나타내는 것은 마찰실험전에 polishing 으로 인한 표면가공시 이미 표면에 強固한 大氣中の 吸着層 또는 水酸化合物 이 형성되어 이것이 母材間的 접촉을 방지하게 하는 윤활작용을 하기 때문 이라 생각된다. 특히  $Al_2O_3$  는 平衡水蒸氣壓이  $10^{-4}mmHg$  정도로 매우 낮아 공기중의 미세한 수분에도 흡착성이 매우 강하여(9) 마찰면에 대기중의 수 분이 쉽게 흡착되며, 또한 저속의 경우에는 兩 시험편의 미소돌기부가 접촉 에서 다음 접촉을 하는데 요하는 시간이 고속의 경우보다 길기 때문에 이러 한 현상이 계속 유지된다고 생각된다.

그리고  $P$  의 증가에 따라  $0.2m/sec$  이상의 각 속도역에서  $\mu$  가 적은 값 을 나타내는 것을  $P$  의 증가에 따라 마찰면온도의 상승으로 응착면의 전단 강도의 저하가 크기 때문이라 생각된다.

### 3.2 摩滅에 미치는 알루미늄의 純度特性

Fig.9 는 상대재료를 純度 99.7%, 실험재료의 순도를 달리한 즉 85%, 95% 및 99.7%로 한 경우, 접촉하중  $P$  를 7.5 kgf로 하고 미끄럼거리  $L$  을 1km 로 하였을 때의 미끄럼속도  $V$  의 변화에 따른 마멸량을 나타낸 것이다. 여기서 역시 접선은 상대재의  $W$  를, 실선은 실험재의  $W$  를 표시한다.

그림에서 처럼 상대재 및 실험재는 순도에 관계없이 모두  $V$  의 증가에 따 라 증가하며, 실험재의 마멸량  $W$  는 순도가 적을수록 크게 상승한다는 것을 알 수 있다. 본 실험의 경우 순도가 큰 상대재의  $W$  가 실험재의  $W$  보다 대 체로 적게 나타나지만 순도 85%의  $W$  는 상대재와 더불어 큰 상승을 보이 며, 또한 마멸량은 오히려 상대재인 순도 99.7%가 실험재보다 크게 나타나 있는 것을 볼 수 있다.

$W$  가 순도가 작을수록 크게 증가하는 것은 각 실험재료의 탄성계수 및 열 전도율의 차이에 기인한다고 생각된다. 이것은 table 1 에서 처럼 탄성계수 및 열전도율이 낮은 시험편 일수록 마찰시 발생하는 열이 방산되기 어려우 므로 국부적 및 순간적인 온도상승이 일어나 접촉점이 일정한도에 도달하는 데 필요한 단위시간당 발열량이 적게되어 마찰면의 강도가 저하하기 때문이 라고 생각된다. 이러한 현상은 재질을 달리한 각종 세라믹스 즉, SiC,  $Si_3N_4$ ,  $Al_2O_3$  및  $ZrO_2$ 에 대한 SM45C 와  $SiN_4$  와의 마찰실험(9-10)의 경우에 서도 역시 탄성계수 및 열전도율이 가장 낮은  $ZrO_2$  이 열충격으로 인한 응 력으로 높은 마멸을 나타내는 것과 일치하는 현상이다. 그리고 순도 85%의 경우, 상대재인 99.7%의  $W$  가 더 큰 값을 나타내는 것은 순도 85%의 알루미늄 세라믹스는 순도 99.7% 보다 空隙 및 제조상의 缺陷이 99.7% 보다 훨씬 크고 그 數가 많기 때문에 상부 시험편인 순도 99.7%의 미세한 마멸 분이 하부 시험편인 순도 85%의 空隙 및 缺陷部로 轉移하여 이들을 채우게 되고 또한 이들에 의하여 상대재의 마멸이 계속 진행되었기 때문이라고 생 각된다.

金屬의 마찰실험에서는 마멸분이 산화되어 경도가 모재보다 높게 되므로 마멸분의 滯留가 abrasive 마멸을 가속화 한다는 마멸기구에 대한 모델이 있지만 알루미늄 세라믹스의 경우는 화학적으로 안정하며 또한 생성된 마멸 분도 역시 모재의 시험편과 동일한  $\alpha$ -알루미나이고 경도의 차는 없고 생각 된다. 그러나 마멸분의 滯留가 마멸에 큰 영향을 미친다는 것은 경험적으로 알려지고 있지만(11) 그 기구는 분명하지는 않다.

Fig.10 은 상대재료를 순도 99.7%, 실험재료의 순도를 85%로 한 경우  $P$  를 7.5kgf,  $V$  를  $0.3m/sec$  그리고  $L$  을 1km 로 한 경우 (a)마찰면 및 수직 단면의 stereo 사진과 (b)제조상의 결함부 수직단면을 나타낸 것이다. (a)의 경우 마찰면에는 空隙 및 결함부에 상대재 및 실험재의 마멸분이 충전되어 있고 미세한 균열이 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 수직단면에는 제 조상 결함부가 큰 pit 모양으로 형성되어 있지만 (b)결함부의 수직단면부는  $Al_2O_3$  의 입자를 볼 수 있고, 또한 空隙 및 결함부 표면에서 응력집중(12) 에 의하여 결정입계에서 균열이 발생, 전파하여 마멸이 진행되고 있다는 것 을 알 수 있다.

### 3.3 純度を 달리한 알루미늄 세라믹스의 磨滅進行曲線

Fig.11 는 相對材料인 上部시험편을 純度 99.7%, 試驗재료인 下部시험편은 각 純도를 달리한 率 85%, 95% 및 99.7% 로 한 경우, 接觸하중  $P$ 를 7.5 kgf로 하고 미끄럼속도  $V$  를 0.3 m/sec 로 하였을 때, 미끄럼거리  $L$  의 변화에 따른 마멸량  $W$  를 나타낸 것이다.

그림에서 처럼 마멸량  $W$  는 純도를 달리한 각 시험편 모두  $L$  의 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하며, 특히 純도 85% 의  $W$  가 95% 및 99.7% 의  $W$  보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 본 실험의 경우처럼 接觸하중과 미끄럼속도가 동일하면  $L$  의 증가에 따라 마찰면 평균온도가 상승하게 되는 것은 당연하다고 생각되며, 특히  $Al_2O_3$  에 대하여 마찰면 온도상승은 탄성계수<sup>(13)</sup> 와 경도<sup>(14)</sup>를 저하시킨다고 알려져 있다. 따라서 純도를 달리한 각 시험편의  $W$  가  $L$  에 따라서 증가하는 것은  $L$  의 증가에 따라 접촉부의 온도가 상승하고 이로 인하여 彈性係數와 硬度的 저하로 재료의 연화가 진행되었기 때문이라고 생각된다. 그리고 純도 85% 의  $W$  가  $L$  에 따라 크게 증가하는 것은 전술한 바와 같이 탄성계수 및 열전도율이 적으므로 열축적에 의한 마멸저항이 감소되어 마멸을 증대시켜 준것으로 생각된다.

Fig.12 은 Fig.11 과 동일한 조건에서의  $L$  에 따른 磨滅係數  $K$  를 나타낸 것이며  $K$  는 다음식으로 구하였다.

$$K = (W \cdot H_v) / (P \cdot L) \quad (6)$$

여기서  $W$  는 마멸체적( $mm^3$ ),  $H_v$  는 각 실험재료의 경도,  $P$ 는 接觸하중(kgf) 그리고  $L$  은 미끄럼거리(m)를 나타낸다. 그림에서  $K$  는  $L$  의 증가와 함께 감소하소 있지만 純도 99.7% 가 그 경향이 크다는 것을 볼 수 있다. 이것은 실험접촉점에서의 온도상승으로 인하여 국부적인 용융을 포함한 滯留磨滅分의 再燒結의 가능성으로 생각되지만 확실하지는 않다.

Fig.13 은  $L$  에 따른 마찰계수  $\mu$  를 나타낸 것이다.  $\mu$  는 각 알루미늄 純도에 따라  $L$  의 초기단계에서는 0.87~0.66 정도의 큰 값을 나타내지만  $L$  의 증가와 함께 서서히 감소하며, 실험이 종료되는 미끄럼 거리에서는 0.5~0.61 정도의 값을 나타내고 있다. 그리고 純도 85% 의 시험편의  $\mu$  가 대체로 큰 값을 나타내며,  $L$  이 700m 이상에서의  $\mu$  는 純도 85% 의 시험편이 오히려 純도 95% 및 99.7% 보다 작다는 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 이 단계에서는 실험접촉면적도 작아 실험접촉부의 接觸압력이 극히 높아 이로 인하여 응착면에 작용하는 전단응력이 크기 때문이라고 생각된다. 그리고  $L$  의 증가와 함께  $\mu$  가 감소하는 것은  $L$  의 증가와 더불어 마찰면 온도가 상승하여 응착면의 전단강도를 저하시켜 마찰면 근방의 유동층의 영향이 작용했기 때문이라 생각된다. 이러한 현상은 금속재료에서도 마찰면의 軟化에 의하여 전단응력이 緩和되어 마찰계수가 저하하게 되며<sup>(15)</sup>, 또한 Semenov 와 Katsura 들<sup>(11)</sup>은 진공 중에서  $Al_2O_3$  의 마찰계수를 측정하고 온도의 상승과 더불어 마찰계수의 감소는 경도의 저하와 관련한다고 서술하고 있다.

그리고 미끄럼거리 초기단계에서 純도 85% 의  $\mu$  가 큰 값을 나타내는 것은 마찰 초기단계에서는 마찰면의 크기에 의존하지만,  $L$  이 700m 이상에서 純도 85% 의  $\mu$  가 純도 95% 및 99.7% 의  $\mu$  보다 작게 나타나는 것은  $L$  의 증가에 따른 마찰면 온도상승으로 탄성계수 및 열전도율이 작은 純도 85% 의 시험편의 마찰면 온도상승으로 인한 전단강도 저하가 훨씬 크기 때문이라고 생각된다.

### 4. 結論

純도를 달리한 알루미늄 세라믹스( $Al_2O_3$  ceramics)의 미끄럼 마멸특성을 알기 위하여 미끄럼속도, 接觸하중 및 미끄럼거리를 변화시켜 각 純도에 따른 마멸량, 마찰계수 및 마멸계수 등을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄 純도 95% 의 경우 미끄럼속도가 증가 할 수록 마멸량  $W$  는 증

가하며, 열충격력의 증대 및 마찰면 온도상승으로 인하여 W가 급속히 증가하는 속도구역이 존재한다.

2. 미끄럼속도의 변화에 따라 알루미늄이나 순도가 증가 할 수록 W는 감소하지만 순도 85%의 경우 空隙 및 결합부의 증대로 상대제인 순도 99.7%보다 W는 적다.
3. 순도를 달리한 3 종류의 세라믹스에 있어서 W는 미끄럼 회전수에 거의 비례하여 증가하지만, 순도 85%의 경우가 탄성계수 및 열전도율의 저하로 W가 가장 크다.
4. 마멸진행곡선에서 미끄럼 초기단계의 마찰계수는 큰 값을 가지지만 미끄럼거리가 증가함에 따라 응착면의 전단강도 저하로 그 값은 감소한다

참고문헌 생략

Table 1. Physical and mechanical properties of Alumina ceramice

properties	Alumina purity		
	85%	95%	99.7%
Specific gravity	3.5	3.7	3.8
Bending strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	27	32	30
compressive strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	130~170	> 200	> 200
Young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	2.1	3.2	4.0
Vickers hardness (kgf/mm <sup>2</sup> )	1228	1400	1690
Thermal Conductivity (cal·cm/cm <sup>2</sup> ·sec·°C)	0.04	0.06	0.08

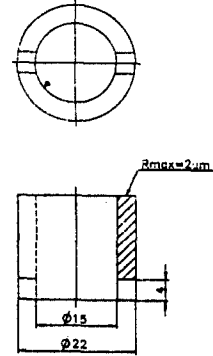


Fig. 1 Shape and dimension of wear specimen

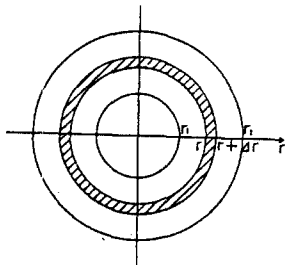


Fig. 2 Torque generated on the frictional surface

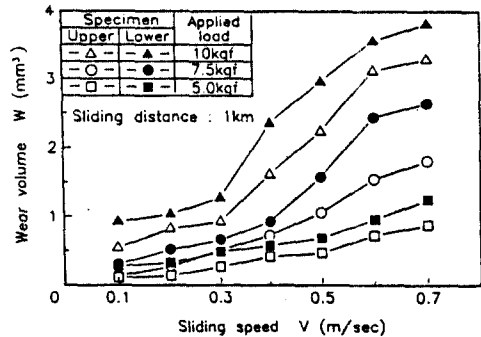


Fig. 4 Relation between wear volume and sliding speed

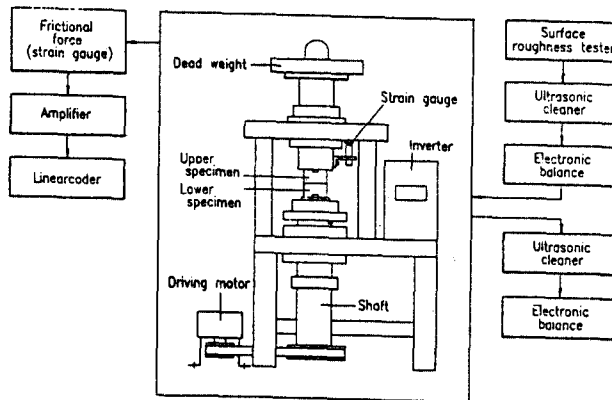


Fig. 3 Diagram of experimental apparatus

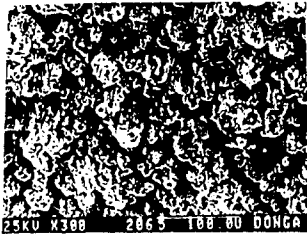
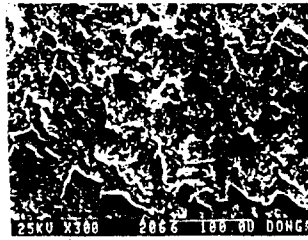
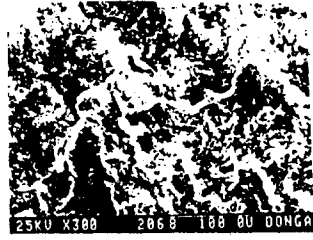


Fig.5 Polished specimen surface of the alumina purity 95%

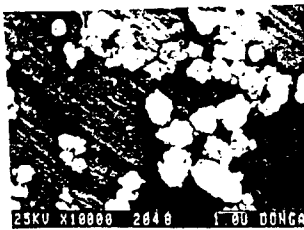


(a)  $V = 0.2\text{m/sec}$

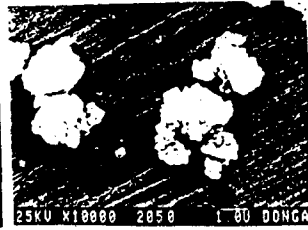


(b)  $V = 0.5\text{m/sec}$

Fig.6 Photographs of the rubbed surface ;  
 $P = 7.5\text{kgf}, L = 1\text{km}$



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



(b)  $V = 0.5\text{m/sec}$

Fig.7 Photographs of separated wear debris ;  
 $P = 7.5\text{kgf}, L = 1\text{km}$

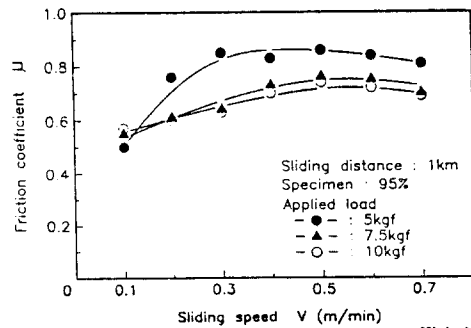


Fig.8 Effect of sliding speed on the friction coefficient

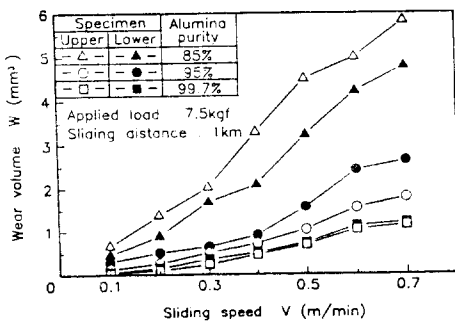
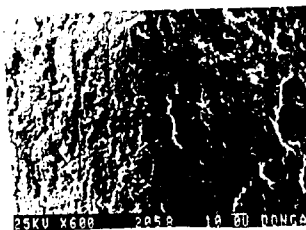
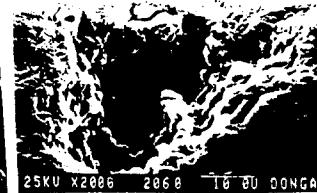


Fig.9 Relation between wear volume and sliding speed



(a) stereo photograph



(b) cross section

Fig.10 Stereo photograph and cross section of the rubbed surface for the alumina purity 85% specimen ;  
 $P = 7.5\text{kgf}, V = 0.3\text{m/sec}, L = 1\text{km}$

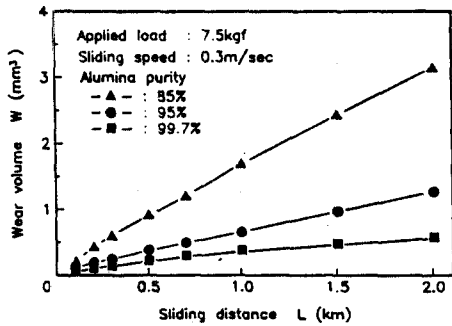


Fig. 11 Wear curve in wear volume with sliding distance

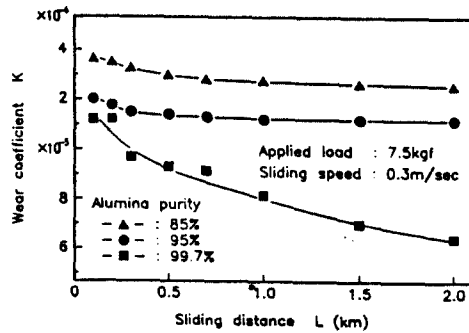


Fig. 12 Effect of sliding distance on the wear coefficient

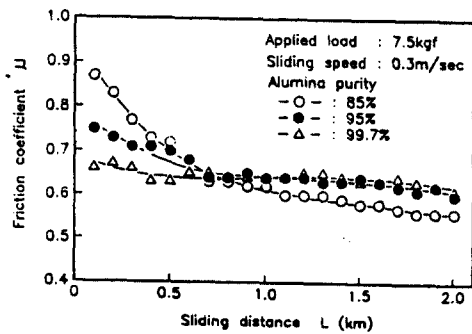


Fig. 13 Effect of sliding distance on the friction coefficient