

# 세라믹 미끄럼 마멸기구에 관한 파괴역학적 고찰

김 석삼(경북대학교)

김 상우(경북대학교 대학원)

## 1. 서론

세라믹은 금속에 비해서 밀도가 낮고, 내마멸성이 우수하고, 열팽창계수가 작고, 높은 온도범위에 걸쳐서 안정성과 경도를 유지함으로써 기계구조용재료로서 유망시 되고 있다. 앞으로 세라믹부품에 대한 수요는 더욱 증가하리라고 예상하고 있으며, 세라믹의 응용이 시도되고 있는 부품은 더욱 다양화되어가고 있는 추세이다. 그러나, 세라믹재료에 관한 신뢰할만한 데이터베이스는 확립되지 못한 상태이고, 트라이보시스템에 관한 수명예측과 설계를 위한 기초 자료도 확립하지 못한 상태에 있다. 세라믹재료에 관한 수명예측과 설계를 위해서는 세라믹재료의 트라이보시스템(tribosystem)에서의 마멸기구의 규명과 마멸율을 평가할 수 있는 마멸식을 구하는 것이 가장 기본적인 과제라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최신 기법에 의해서 제조된 HIP제 질화규소와 지르코니아를 실험재료로 하여 무윤활하에서의 미끄럼마찰 마멸실험을 수행하여 마찰 마멸특성을 규명하고, SEM을 이용한 마멸면의 미시적 관찰을 통해서 세라믹의 마멸기구를 조사하여 세라믹마멸기구의 마멸모형을 제시하고자 한다. 제시된 마멸모형에 파괴역학을 도입하여 이론해석과 고찰을 수행하여 보다 실용적인 세라믹의 마멸율을 평가할 수 있는 새로운 무차원파라메타를 제안하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 시험기는 Toyo Baldwin사(EFM-3-E형)의 마멸시험기이고 마멸량 측정은 전자저울(Chyo BalanceCo., JL-180;Capacity 180g, Sensitivity 0.1mg)을 사용하였다. 마멸면의 형상변화는 Kosaka Laboratory LTD. 제 표면거칠기측정기를 사용하였다.

### 2.2 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험편은 기계구조용 세라믹으로서 가장 유망시 되고 있는 지르코니아( $ZrO_2$ )와 질화규소( $Si_3N_4$ )로 하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig.1에 나타낸 바와 같다. Fig.1의 (A)는 상부시험편이고, (B)는 하부시험편이다. 상하 시험편의 두께를 다르게 함은 마멸량을 측정하고, 표면형상의 변화를 측정하기위함이다. 두 종류의 시험편 공히 성형, 소결, HIP, 연마가공의 순서로 제작하여 시험편 표면의 표면거칠기를  $0.8 \mu R_{max}$ 이하로 하였다. 지르코니아의 소결조제는  $Y_2O_3$ 를 사용하였으며, 질화규소의 소결조제로는  $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$ 를 사용하였다. 제작된 지르코니아와 질화규소의 물리적, 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. Fig.1에 나타낸 상하 두개의 시험편을 무윤활 상태의 상온, 상압에서 실험을 수행하였다. 하중은 50kg, 75kg, 100kg의 세가지로 하였다. 미끄럼속도는 20mm/s로 일정하게 하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 마찰거리에 따른 마찰계수의 변화

Fig.2은 하중이 50kg일때 마찰거리변화에 따른 마찰계수의 변화관계를 나타낸 것이다. 표면

에서의 마멸진행과 함께 표면손상의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 마찰거리의 증가와 더불어 거의 안정되어 가는 것을 알 수 있으나 표면으로 부터 취성파괴에 따른 마멸입자의 탈락과 함께 마찰저항의 증가로 마찰계수가 크게 되고 있다. 지르코니아의 마찰계수가 질화규소의 마찰계수보다 전 실험범위에 걸쳐 크게 나타나고 있다. 질화규소의 마찰계수는 약 0.7이며, 지르코니아의 마찰계수는 0.8-0.9정도를 나타내고 있다.

Fig. 3는 하중이 75kg일때의 마찰거리 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로 전체적인 마찰계수의 변화는 Fig. 2의 경우와 동일한 양상을 보여 주고 있다.

Fig. 4는 하중이 100kg인 경우의 마찰거리의 변화에 따른 마찰계수의 변화관계를 나타낸 것이다. 하중이 100kg으로 증가한 경우 마찰계수가 약간 작게 나타나고 있다. 이것은 표면에서의 마찰열에 의한 것으로 생각된다. 하중이 크게됨에 따라 마찰로 인한 접촉표면에서 온도가 상승함에 따라 접촉부에서 재질이 다소 연화되었음을 생각할 수 있다. Fig. 4의 경우는 질화규소의 마찰계수는 0.6-0.7이며, 지르코니아의 마찰계수는 약 0.8의 값을 나타내고 있다. 본 실험에서 수행된 하중범위에서 질화규소의 마찰계수가 지르코니아의 마찰계수보다 작은 값을 나타낸다.

### 3.2 마찰거리에 따른 마멸량의 변화

Fig. 5은 하중이 50kg인 경우의 마찰거리 증가에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 것이다. 질화규소는 마멸이 거의 발생하지 않고 있다. 지르코니아의 경우는 마멸량이 마찰거리가 증가함에 따라 비례해서 증가하고 있다. 그래프에서 부터 알 수 있는 바와같이 질화규소의 마멸량이 지르코니아의 마멸량보다 적다. 하중이 50kg의 경우는 질화규소의 내마멸성이 지르코니아의 내마멸성보다 양호하다.

Fig. 6은 하중75kg인 경우의 마찰거리 변화에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 마멸곡선이다. 이 경우는 질화규소와 지르코니아가 동일하게 마멸량과 마찰거리는 서로 비례하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 하중이 100kg의 경우에 대한 마찰거리의 변화에 대한 마멸량을 나타낸 마멸곡선이다. 이 경우도 질화규소와 지르코니아 모두 마찰거리와 마멸량이 직선적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. 하중이 75kg과 100kg의 경우 동일한 마찰거리에 대한 질화규소의 마멸량이 지르코니아의 마멸량보다 많다.

Table 2는 본 실험에서 구해진 질화규소와 지르코니아의 비마멸율(specific wear rate)를 나타낸 것이고, Table 3은 마멸계수를 나타낸 것이다. 비마멸율은 단위마찰거리당, 단위중량당에 대한 마멸량으로 정의되며, 마멸계수는 진실접촉부(real contact area)가 마멸입자가 되어 탈락할 확률을 의미하는 것으로서 내마멸성 평가에 많이 적용되고 있다. Table 2 및 3 으로부터 하중이 50kg인 경우에는 질화규소의 내마멸성이 양호하지만 하중이 75kg과 100kg의 경우에는 지르코니아의 내마멸성이 양호함을 알 수 있다.

### 3.3 마멸면의 형상변화

Fig. 8, Fig. 9는 각각 하중 50kg, 100kg의 경우에 대한 마멸면의 형상변화를 알아보기 위해 구한 표면거칠기의 변화를 최대높이 거칠기( $R_{max}$ )로 나타낸 것이다. 마찰거리의 증가와 더불어 표면으로부터 마멸입자가 탈락하면서 부분적으로 표면형상의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 질화규소와 지르코니아의 마멸면의 표면거칠기는 4-12 $\mu m$ 를 나타내고 있다. Table 1로부터 마멸시험 하기 전의 시험편의 표면거칠기는 질화규소와 지르코니아 모두 0.8 $\mu m$ 인 것을 고

려하면 정상마멸 단계에서는 마멸면의 최초의 표면거칠기는 모두 제거되고 새로운 표면형상을 유지하면서 마멸이 진행되는 것으로 생각된다.

### 3.4 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 형상변화와 마멸입자의 생성과정을 알아보기위해서 SEM 을 사용하여 마멸면의 미시적 관찰을 수행하였다.

Fig.10은 질화규소와 지르코니아 시험편의 실험하기전의 연마가공을 마친 상태에서의 표면을 나타내는 SEM사진이다. 그래프의 상단의 사진은 질화규소의 연마면을 나타내고, 하단의 사진은 지르코니아의 연마면의 사진을 나타낸다. 질화규소의 연마면은 연마과정에서 생성된 표면균열이 상당히 많이 산재하고 있음을 알 수 있다. 이것은 미끄럼운동이 일어날 경우 상호접촉부에서 수직하중과 함께 접선하중이 표면에서 동시에 작용할 경우에 표면균열로부터 마멸입자가 생길 수 있음을 생각할 수 있다. 그러나 많은 부분이 소성변형된 표면도 산재해 있음을 알 수 있다. 지르코니아의 연마가공면의 표면에는 작은 입자상의 형상을 나타내고 있다. 지르코니아의 연마면에도 상당한 연마과정에서 생성된 것으로 생각되는 표면손상이 많이 산재되어 있음을 알 수 있다.

Fig.11은 질화규소의 하중 50kg, 미끄럼거리 744m의 실험이 완료된 마멸표면을 나타내고 있다. 사진내의 화살표는 미끄럼방향을 지시하는 것이다. Fig.11 (b)는 (a)를 확대하여 나타낸 것이다. 상부 사진에서는 질화규소의 표면에서 마멸입자가 탈락된 후의 파여진 흔적을 볼 수 있다. 그 길이가 약  $70\mu\text{m}$ , 폭이  $30\mu\text{m}$ , 깊이가  $8\mu\text{m}$ 정도의 비교적 큰 것이다.

Fig.12는 지르코니아의 마멸면의 사진으로서, 하중이 50kg, 미끄럼거리가 744m의 마멸면이다. 하부의 사진은 상부의 일부분을 확대한 것이다. 마멸면의 표면에 마찰과 마멸의 진행으로 야기된 표면균열이 많이 발견되고 있다.

Fig.13은 하중 75kg, 미끄럼거리 264m까지 마멸실험이 완료된 질화규소의 마멸면의 사진이다. 사진에서의 화살표는 미끄럼방향을 나타낸다. 이 사진에서도 아주 심한 마멸이 발생한 것으로 생각되는 마멸흔적을 볼 수 있다. 표면균열의 진행에 의해서 마멸입자가 생성되어 탈락하고 남은 잔류표면균열도 여러 곳에서 발견되고 있다. 하부 사진에서는 마멸입자가 탈락하려는 순간으로서 크기가 약  $10\text{-}16\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

Fig.14는 하중 75kg, 미끄럼거리 264m의 지르코니아의 마멸면의 사진이다. 하부 사진은 상부의 일부분을 확대한 것이다. 이 사진을 Fig.12의 하중 50kg의 마멸면과 비교해 보면, 매우 심하게 마멸이 진행되었으며 많은 잔류표면균열이 많이 산재해 있음을 알 수 있다. 이것은 표면에 산재해 있는 표면균열이 미끄럼접촉으로 운동할 때 그 표면균열이 성장하여 마멸이 진전되고 잔류표면균열로서 남게 된다고 생각된다.

## 4. 고찰

### 4.1 세라믹마멸모델과 이론해석

본 실험에서 수행한 질화규소와 지르코니아의 마멸실험의 결과와 마멸면의SEM을 사용한 미시적 관찰및 고찰을 바탕으로 Fig.15와 같은 세라믹 마멸모델을 설정하였다. 그림과 같이 세라믹표면을 반무한 탄성체로 간주하여, 반무한 탄성체의 표면에 표면균열이 존재하고, 이 반무한탄성체표면상을 상대편 세라믹표면이 접촉하여 미끄럼운동하는 것으로 한다. 이 때 접촉하중으로는 수직하중  $P(x)$ 와 접선방향의 traction  $Q(x)$ 가 작용하는 것으로 한다. 이 해석모델

에 대해 파괴역학을 도입하여 표면균열 선단의 mode 1의 응력확대계수  $K_1$ 과 mode 2의 응력확대계수  $K_2$ 는 식(1)과 같은 관계가 있음을 수치해석 결과로 알 수있다<sup>(1)</sup>.

$$\begin{aligned} K_1 &\sim Q(x) \sqrt{\pi a} \\ K_2 &\sim P(x) \sqrt{\pi a} \end{aligned} = \mu P(x) \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} P(x) &= P_o \sqrt{1-x^2} \\ Q(x) &= \mu P(x) \end{aligned}$$

$a$  : 표면균열의 크기  
 $\mu$  : 접촉면의 마찰계수  
 $P_o$  : 최대 Hertz 압력

수치해석 결과로 부터 하중의 작용점과 균열간의 무차원 거리가 1 이하의 범위에서 두응력확대계수는 최대치를 가짐을 알 수있다. 분포하중  $P(x)$ 와  $Q(x)$ 를 각각 집중하중  $P$ 와  $Q$ 로 나타내고 각 최대응력확대계수를 식(2)와 같이 나타내기로 한다.

$$\begin{aligned} K_{1 \max} &\sim Q \sqrt{\pi a} = \mu P \sqrt{\pi a} \\ K_{2 \max} &\sim P \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} P &= \int_{-1}^1 P(x) dx \\ Q &= \mu P \end{aligned}$$

한편, mixed mode하에서는 유효응력확대계수  $K_e$ 는 식(3)과 같이 주어진다.

$$K_e^2 = K_1^2 + K_2^2 \quad (3)$$

따라서 최대유효응력확대계수는 식(4)와 같이 주어진다.

$$K_{e \max} \sim P \sqrt{(1+\mu^2)\pi a} \quad (4)$$

#### 4.2 세라믹의 마멸율을 지배하는 무차원 파라메타 유도

파괴역학을 마멸기구의 해석에 도입한 Suh등<sup>(2,3)</sup>은 마멸율과 균열의 전파율을 관련지어 나타내고자 하였다. Suh등이 주장한 delamination이론에서는 피로파괴에 관한 균열의 전파법칙인 Paris법칙을 적용하였다<sup>(2)</sup>. 한편 Minnear와 Bradt<sup>(4)</sup>, 그리고 Sines<sup>(5)</sup>는 취성재료에 관한 macroscopic crack-growth law로서 식(5)를 제안했다.

$$V = \frac{da}{dt} = \left( \frac{K}{K_{IC}} \right)^n \quad (5)$$

위식에서  $a$ 와  $t$ 는 각각 균열의 길이와 시간을 나타내며,  $B$ 와  $n$ 은 상수이다.  $K$ 는 재료의 균열선단에서의 응력확대계수이며,  $K_{IC}$ 는 재료의 파괴인성치를 의미한다. 임의의 순간에 있어서의 균열의 전파속도는 그 순간에 있어서의 균열선단의 유효응력확대계수( $K_{e \max}$ )와 접촉부의 파괴인성치( $K_{IC}$ )의 비로서 주어진다. 같은 논리를 세라믹의 마멸율에도 적용하면 세라믹의 마멸율  $W_s$ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_s = \frac{dw}{ds} = \alpha \left( \frac{K_{e \max}}{K_{IC}} \right)^n \quad (6)$$

여기서  $S$ 는 마찰거리를 나타내고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수이다. 식(4)와 (6)으로부터 세라믹의 마멸율  $W_s$ 는 식(7)과 같이 구하여진다.

$$W_s = \alpha \left( \frac{P\sqrt{(1+\mu^2)a}}{K_{IC}} \right)^\beta \quad (7)$$

여기서  $S_\alpha = \frac{P\sqrt{(1+\mu^2)a}}{K_{IC}}$ 로 두면, 식(7)은 식(8)과 같이 주어진다.

$$W_s = \alpha (Scf)^\beta \quad (8)$$

여기서 유도된 Scf가 세라믹의 마멸율을 평가하는데 사용될 새로운 무차원파라메타인 것이다. 이 무차원파라메타 Scf는 상호접촉하여 상대운동을 하고 있는 tribosystem을 생각하면 접촉부에 작용하는 수직하중(P)와 접촉부의 재료특성치로서 파괴인성치( $K_{IC}$ )와 재료표면의 표면결함의 정도를 나타내는 표면균열의 크기(a)및 접촉면의 윤활특성을 나타내는 마찰계수로서 구성되어 있어 세라믹재료의 설계시에 귀중한 자료로서 활용되리라고 생각된다.

Fig. 16은 본 실험에서 얻어진 질화규소와 지르코니아의 마멸율과 NIST에서 얻어진 알루미늄과 탄화규소의 마멸율을 Scf 파라메타로서 나타낸 것이다. 양대수 그래프상에 하나의 직선으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 실험데이터중에서 NIST의 것은 NIST에서 세라믹의 마찰 및 마멸실험으로 개발된 세 개의 평면상에 하나의 회전하는 구형 시험편이 미끄럼접촉하면서 마멸실험을 수행하여 얻어진 것이다<sup>(6)</sup>. 각 마멸율은 동일 재료의 것들을 평균하여 나타냈다. Fig. 21의 그래프로부터 구하여진 식은 다음과 같다.

$$W_s = 4.09 \times 10^{-6} Scf^{4.48} \quad (9)$$

## 5. 결론

무윤활상태하에서 HIP법으로 제조된 질화규소와 지르코니아를 상온·상압에서 마찰·마멸실험을 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 저하중의 경우는 질화규소의 내마멸성이 지르코니아의 내마멸성보다 양호하지만, 고하중의 경우에는 지르코니아의 내마멸성이 질화규소의 내마멸성보다 양호하다.
- 2) 세라믹의 마멸율을 평가하기 위한 새로운 무차원 파라메타 Scf를 유도하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$S_\alpha = \frac{P\sqrt{(1+\mu^2)a}}{K_{IC}}$$

여기서 P는 접촉압력, a는 세라믹표면결함의 크기,  $K_{IC}$ 는 접촉부재료의 파괴인성치,  $\mu$ 는 접촉면의 마찰계수를 각각 의미한다.

- 3) 세라믹의 마멸율  $W_s$ 는 무차원파라메타 Scf를 사용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_s = \alpha (Scf)^\beta$$

## 참고 문헌

1. 김 재호, 김 석삼, 박 중한, 1990, "반무한 탄성체의 헤르쯔 접촉하의 경사진 표면균열의 전파거동", 대한기계학회논문집, 제14권, 제3호, 624-635
2. Fleming, J.R. and Suh, N.P., 1977, "The Relationship between Crack Propagation Rates and Wear Rates", Wear, Vol. 44, pp. 57-64.
3. Fleming, J.R. and Suh, N.P., 1977, "Mechanics of Crack Propagation in Delamination Wear", Wear, Vol. 44, pp. 39-56.
4. Minnear, W.P. and Bradt, R.C., 1975, "(K-V)Diagrams for Ceramic Materials", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 58, No. 7-8, pp. 345-346.
5. Sines, G., 1976, "Rationalized Crack Growth and Time-to-Failure of Brittle Materials", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 59, No. 7-8, pp. 371-371.
6. Gates, R., Hsu, S. and Klaus, E., 1988, "Ceramic Tribology : Methodology and Mechanisms of Alumina Wear", NIST Special Publication 758.

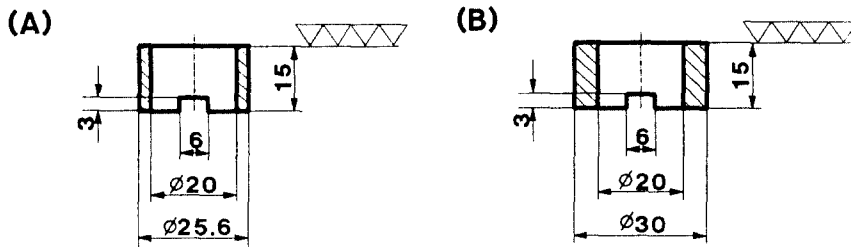


Fig. 1 Shape and size of specimens

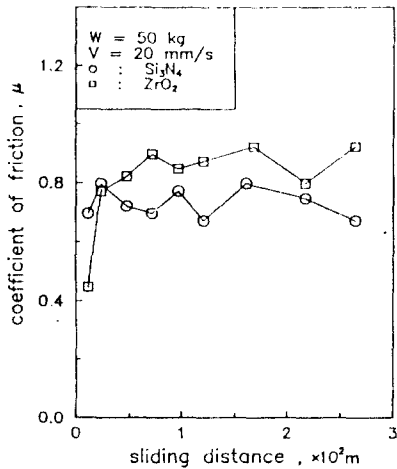


Fig. 2 Coefficient of friction vs sliding distance at the load of 50 kg

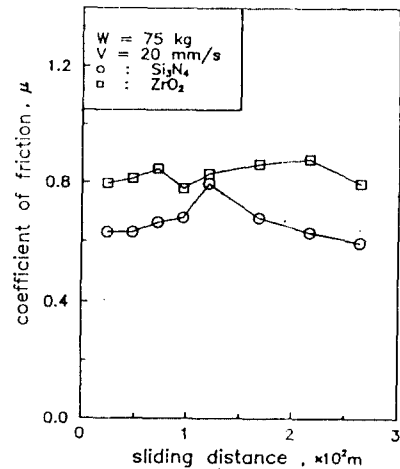


Fig. 3 Coefficient of friction vs sliding distance at the load of 75 kg

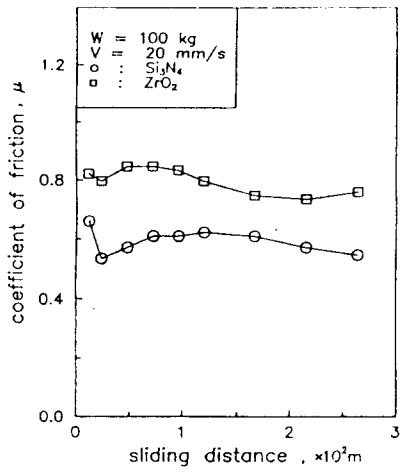


Fig. 4 Coefficient of friction vs sliding distance at the load of 100 kg

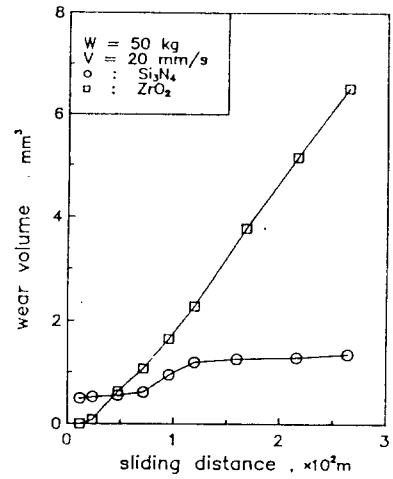


Fig. 5 Wear volume vs sliding distance at the load of 50 kg

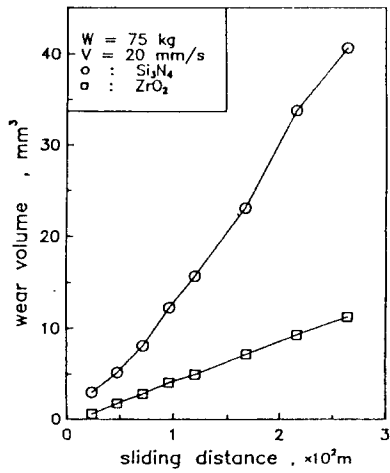


Fig. 6 Wear volume vs sliding distance at the load of 75 kg

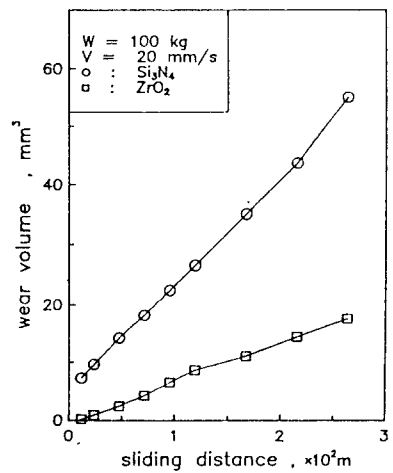


Fig. 7 Wear volume vs sliding distance at the load of 100 kg

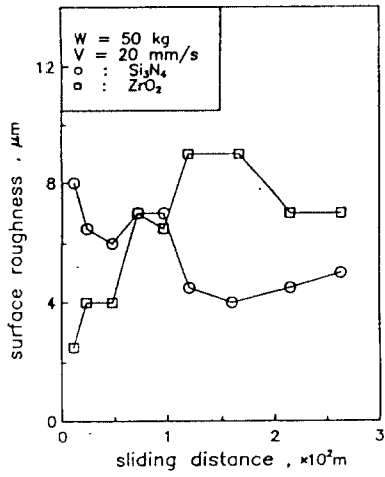


Fig. 8 Surface roughness vs sliding distance at the load of 50 kg

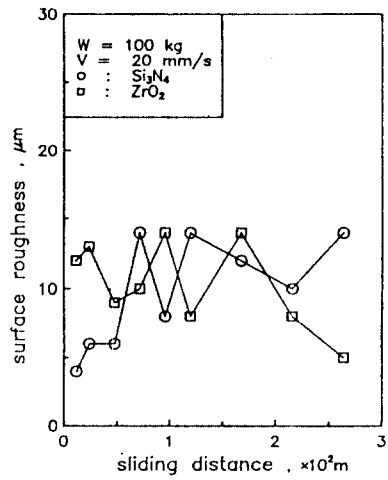
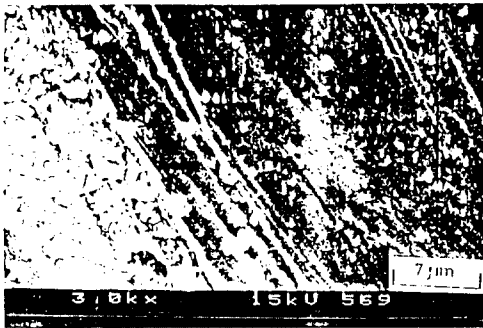
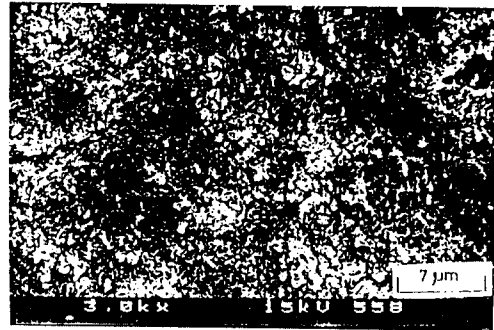


Fig. 9 Surface roughness vs sliding distance at the load of 100 kg



(a) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



(b) ZrO<sub>2</sub>

Fig. 10 As-received surface of (a) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and (b) ZrO<sub>2</sub>



(a)



(b)

Fig. 11 Worn surface of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (load: 50 kg, sliding distance: 744 m) the arrows indicate sliding direction



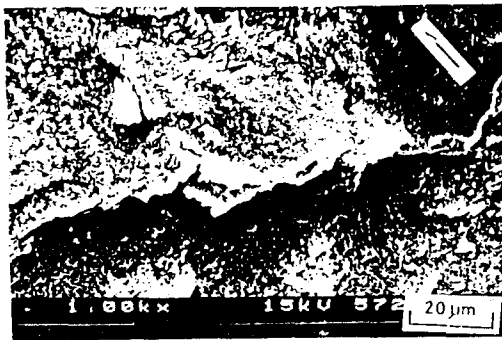


(a)

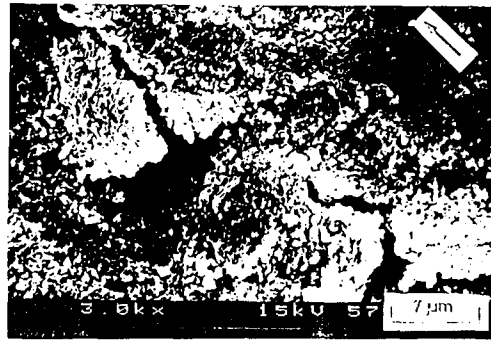


(b)

Fig.12 Worn surface of  $ZrO_2$  (load:50kg, sliding distance:744m)  
the arrows indicate sliding direction

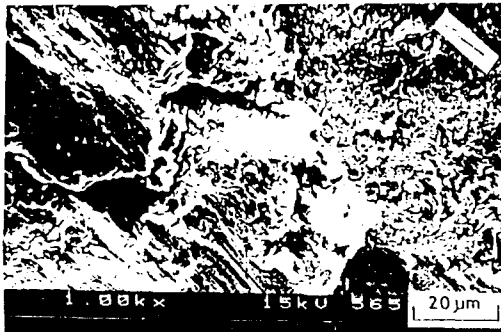


(a)



(b)

Fig.13 Worn surface of  $Si_3N_4$  (load:75kg, sliding distance:264m)  
the arrows indicate sliding direction



(a)



(b)

Fig.14 Worn surface of  $ZrO_2$  (load:75kg, sliding distance:264m)  
the arrows indicate sliding direction

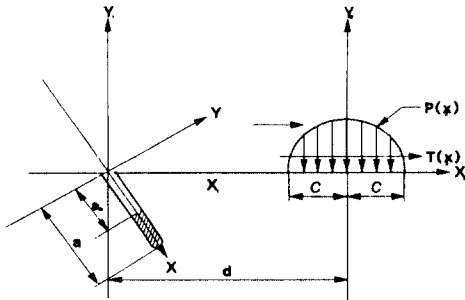


Fig.15 Analytic model and coordinate systems

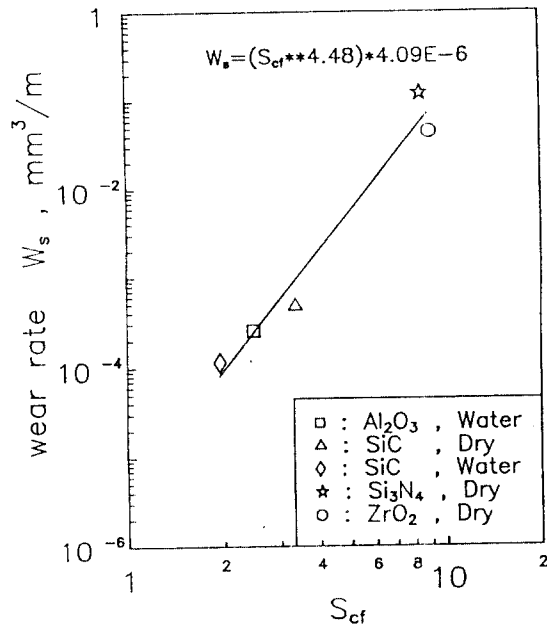


Fig.16 Relationship between wear rate and  $S_{cf}$  in ceramic materials

Table 1 Wear rate  $\bar{W}_s$  ( $\times 10^{-7} mm^3 / kg mm$ )

	50 kg	75 kg	100 kg
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.02	20.54	20.87
ZrO <sub>2</sub>	4.93	5.68	6.66

Table 2 Wear coefficient ( $\times 10^{-4}$ )

	50 kg	75 kg	100 kg
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.53	30.81	31.30
ZrO <sub>2</sub>	6.16	7.10	8.32

Table 3 Mechanical and physical properties of specimen

Properties	ZrO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Surface roughness, $\mu R_{max}$	0.8	0.8
Vickers hardness, $kg/mm^2$	1250	1500
Bending strength, $kg/mm^2$	110	80
Elastic modulus, $kg/mm^2$	$2.0 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$
Poisson's ratio	0.3	0.27
Density, $g/cm^3$	6.05	3.26
Coefficient of thermal expansion, $10^{-6} / ^\circ C$ (100-1000°C)	10.5	3.2
Fracture toughness, $MNm^{-3/2}$	5.0	5.5
Thermal conductivity (20 °C), $Cal/cm sec ^\circ C$	0.007	0.07