

〈논 문〉

미끄럼 환경의 변화에 따른 Si₃N₄의 마멸거동

이 영 제*

(1995년 5월 26일 접수)

Wear Behaviors of Si₃N₄ under Various Sliding Conditions

Young-Ze Lee

Key Words : Wear(마멸), Si₃N₄(질화규소), Oxidation(산화작용), Frictional Power(마찰동력), Asperity-Failure(표면돌기 파괴), Abrasion(연삭작용)

Abstract

The wear behaviors of Si₃N₄ under the different sliding conditions were investigated. The cylinder-on-disc wear tester was used. Using the servo-motor, the sliding speed did not alternate due to the frictional forces. Three kinds of loads and speeds were selected to watch the variation of the wear rates and the frictional forces. Also, three kinds of sliding conditions under a constant speed were used to see the effects of the oxidation and the abrasion. The contact pressure was more effective than the repeated cycle on the wear behavior of Si₃N₄. With the low loads, the effect of the asperity-failure was more dominant than that of oxidation and abrasion. As increasing the load, the effects of oxidation and abrasion were increased, but the asperity-failure effects were decreased. The wear particles destroyed the oxide layers formed on sliding surfaces. The wear rate could be decreased due to delaying the oxidation. The frictional power and the wear rate were very useful to describe the wear behavior, and the frictional power and the wear weight per time were useful to see the transition of wear.

1. 서 론

산업의 급속한 발달로 각종 공업 제품에 대한 고 급화 및 고성능화가 요구된다. 따라서 제품은 소형 화 경량화되고, 이에 따른 가공은 초정밀을 요구하 게 된다. 이러한 용도에 부합되는 재질이 세라믹이 다. 세라믹은 다른 재료에 비하여 경도, 고온강도, 내마멸성 및 화학 안정성이 우수한 특성을 가지고 있다. 이 중에서도 뛰어난 내마멸성으로 인해 여러 기계부품의 소재로 세라믹이 많이 사용되고 있다.

그러나, 세라믹의 우수한 내마멸성에도 불구

하고 대부분의 연구는 단편적인 관점에서 재료의 거동에만 치우쳐 있었다.^(1~3)

대기 중에서 일반적으로 세라믹의 윤활 특성에 관한 연구들에 의하면 마찰 및 마멸거동은 복잡하 여 온도의 증가와 조성변형, 미소파괴, 산화작용과 같은 여러 가지 다른 메카니즘에 영향을 받으며,^(4,5) 또한 미끄럼속도, 접촉하중, 습도와 같은 인자들이 마멸거동에 영향을 미친다.⁽⁶⁾

특히 Si₃N₄의 미끄럼운동시 날카로운 마멸입자와 전이층이 형성되고 미끄럼운동 후 산화가 일어나 며, 비마멸률이 매우 크다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 이는 두드러진 마멸거동이 연삭작용임을 보여준다. 이러 한 전이층은 마멸입자와 큰 마찰계수로 인해 형성 되며 공유결합 재료인 Si₃N₄ 쌍의 미끄럼운동시 전

*회원, 성균관대학교 기계공학과

이층 형성이 용이하지 않으며, 표면 오염물질이 마멸과정에서 전이층 형성을 저해하여 비마멸률을 크게 한다.⁽⁸⁾

또한 Si_3N_4 의 마멸거동은 습도에 영향을 받는데, 베어링 강과 Si_3N_4 의 실험⁽⁹⁾에서 비마멸률은 저습도에 비해 고습도에서 크게 나타났다. 그리고 저속 영역에서 마멸입자의 미세 연삭작용에 의해 마멸 표면은 매끈해졌다. 이것은 보호작용을 하는 전이층의 생성은 관찰되지 않았음을 보여준다.

그리고 마멸거동의 온도에 의한 영향을 종합적으로 보려는 시도가 이루어졌는데, Si_3N_4 쌍의 마멸과정은 마찰계수가 0.7 이하의 조건에서 화학작용과 산화에 영향받으며 0.8 이상의 조건에서는 미소파괴가 일어남을 마찰계수로서 구분하였다.⁽¹⁰⁾ 마찰계수를 이용한 세라믹 마멸에 관한 연구에서는 마찰계수 0.7을 기준으로 산화의 정도가 다르다는 실험 결과를 이용하여 표면파괴의 기준을 삼았는데, 이는 처음으로 공학자에게 기준을 제시했다는 의미를 갖는다. 또한 Blomberg 등은 속도의 영향이 하중에 비해 매우 작다는 실험결과를 발표하였다. 이는 세라믹의 마멸이 반복되는 사이클에 의하기보다는 접촉 압력에 의한다는 것을 보이고 있다.⁽¹¹⁾

한편 마멸지도의 등장과 함께 마멸거동은 세라믹 재료들의 특성에 따라 여러 메카니즘이 동시에 일어나며, 미끄럼 접촉면에서 마멸입자의 성분분석과 색으로 산화작용의 정도를 구분하였고 마찰계수의 증감으로 마멸거동의 천이를 정하였다. 또한 마멸입자에 의해 전이층 형성이 이루어지나 그것은 미끄럼 환경에 영향을 받는다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

그러나 전반적으로 위의 연구들은 실험 자체가 그 전의 연구들에서와 마찬가지로 국부적인 하중과 속도에서만 행해졌기 때문에 Si_3N_4 가 일반적인 영역에서는 어떤 특성을 나타내는 지를 전반적으로 설명할 수 없었다. 그리고 마멸입자와 산화의 마멸거동에 대한 관계 및 마멸입자와 전이층의 관계를 실험 분위기와 하중의 변화에 대한 연구가 부족하였다.

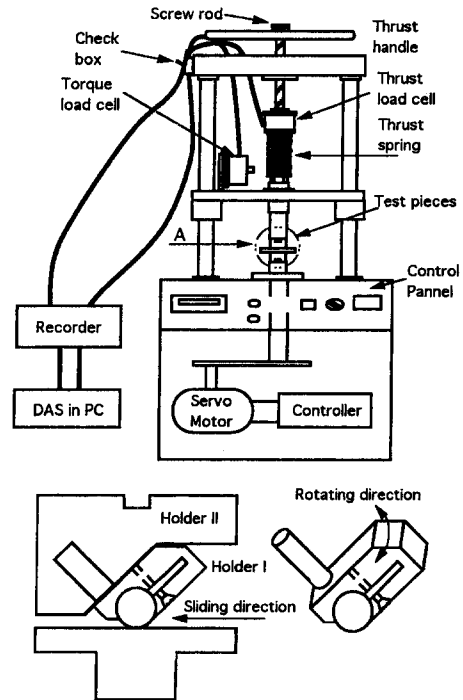
본 연구에서는 Si_3N_4 쌍의 마멸과정 천이영역을 알기위하여, 하중과 미끄럼속도를 변화시켜 일계 하중과 미끄럼속도를 정하여 경마멸(mild wear)과 중마멸(severe wear)의 영역을 구별하였다. 그리고 실험 분위기를 대기 중과 마멸입자의 영향을 보기 위해 마멸입자를 제거하며 실험하였으며 산화가 Si_3N_4 에 어느 정도 영향을 미치는가를 보기 위하여

질소 분위기 하에서 하중을 단계적으로 증가시키며 Si_3N_4 쌍을 서로 미끄럼운동시키며 실험하였다. 마지막으로 접촉면의 온도에 매우 밀접한 관련이 있는 마찰동력(하중, 속도 그리고 마찰계수)이 마멸에 미치는 영향을 보기 위해 마찰동력과 비마멸률과의 관계를 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 세라믹 실린더와 평판을 사용하였다. 이는 실린더의 옆면과 평판이 형성하는 선접촉의 경우가 보다 공학적으로 많이 사용되기 때문이다. Fig. 1에서 마찰 및 마멸 시험기의 구조를 나타내었다. 실린더는 정지해 있고 평판은 회전한다. 실린더에는 스크류 로드와 스프링에 전달된 하중이 수직으로 가해지며, 로드셀과 연결되어 수직 하중 및 마찰력을 측정할 수 있다. 특히 축방향의 진동으로 인한 변위가 0.02 mm 이하가 되도록 하였다.

실린더의 접촉을 균일하게 하기 위해 실린더를 홀더에 결합한 후 홀더를 로드와 끼워서 하중이 선



A (Holders for line contact)

Fig. 1 Friction and Wear Tester

Table 1 Material properties and surface roughness(Ra) of Si_3N_4

Density (g/cm ³)	Elastic modulus (10 ² kg/mm ²)	Hardness (kg/mm ²)	Toughness (MN/m ^{3/2})	Thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	Roughness(μm) flat cylinder	
3.24	3.0	1500	5.0	2.8	0.252	0.254

접촉 부분을 따라 균일하게 작용토록 하였다. 이 경우 하중이 가해지면 실린더는 좌우로 미세하게 움직일 수 있고, 이로 인해 실린더는 평판과 균일한 접촉이 이루어지는 위치에 자리잡게 된다. 실험은 실내에서 행해졌고, 시편은 Si_3N_4 를 사용하였다. 이 시편의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

실린더 시편의 길이는 10 mm, 직경은 9.5 mm이다. 평판은 가로 세로가 각각 37 mm이고, 두께는 6 mm이다. 시편은 모두 폴리싱하였으며, 아세톤과 증류수로 세척하여 사용하였다. 시편의 표면 거칠기는 Table 1에 표시하였고, 여기서는 Ra(산술평균) 값을 사용하였으며, wear track 중간의 거리는 25 mm이다.

실험은 크게 둘로 나누어 하중과 속도의 증가에 따른 마찰과 마멸의 거동을 보기 위한 대기 중에서의 Si_3N_4 의 마멸특성 실험, 그리고 산화와 연삭작용을 보기 위해 실험분위기를 변화시킨 분위기 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸특성 실험으로 수행되었다. 대기 중에서 Si_3N_4 의 마멸특성 실험은 하중과 미끄럼속도를 변화시키며 각각 3분간 실험하였다. 여기서 3분은 마찰계수가 안정화되기에 충분하며 마멸량도 충분히 측정 가능한 시간이었다.⁽¹³⁾ 하중은 39.24, 78.48, 117.72 N으로 증가시켰고 미끄럼속도는 0.05, 0.1, 0.2 m/s로 변화시켰다. 대기 중에서 Si_3N_4 의 마멸실험시 각각의 하중과 미끄럼속도에서 새로운 평판과 실린더로서 미끄럼운동을 시켜 마멸 천이과정을 보는데 용이하게 하였다.

분위기 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸특성 실험은 미끄럼속도를 0.2 m/s로 고정하여 사용하였고, 하중은 39.24, 78.48, 117.72 N을 단계적으로 증가(step loading)시켰고, 각 하중에서 3분 동안 실험하였다. 이는 마멸의 원인을 뚜렷이 구분할 수 있는 영역이며, 또한 마찰과 마멸의 측정을 용이하게 할 수 있는 조건이었다. 모든 실험은 두번 이상 반복하여 평균 값을 결과로 사용하였다. 특히 본 연구에서는 마멸특성에 미치는 분위기의 영향을 보기 위해 대기 중과 질소분위기에서 실험하였다. 또한 마멸입자의 영향을 보기 위해 대기 중에서 실험시

마멸입자를 공기압축기를 사용하여 제거하며 실험하였고, 제거하지 않은 경우와 비교하였다. 이때는 접촉부의 반대부분에 공기를 공급하여 접촉부의 마멸에 영향을 주지 않도록 하였다. 질소분위기 실험에서는 실험장치를 비닐튜브로서 밀봉하여 질소가스를 주입하였다. 그리고 질소가스가 새어나가는 양을 계속적으로 보충하여 가급적 완전한 질소분위기가 되도록 하였다.

수직하중에 대한 마찰력은 베어링을 사용하여 실린더 시편에 연결하여 측정하였고, 이를 로드셀에 의해 레코더에 연속 기록하였다. 특히 마찰력에 의한 속도의 감소를 방지하기 위해 본 실험에서는 서보모터를 사용하였다. 마찰력은 회전하는 평판과 정지해 있는 실린더에서 발생한다. 이 마찰력을 실린더 시편에 연결되어 있는 토크바를 통하여 토크 로드 셀로 측정하였다. 또한 수직하중 역시 연속적으로 기록하였고, 회전에 따른 수직하중의 변화를 측정하여, 수직하중의 미세한 변동을 고려하여 마찰계수를 계산하였다. 그리고 마찰계수는 수직하중과 마찰력을 컴퓨터로 받아들여 계산하였다. 실린더의 마멸량을 측정하기 위해서 실험 전과 후에 각각 무게를 정밀 저울로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 대기 중에서 Si_3N_4 의 마멸특성 실험 결과로서 하중과 미끄럼속도의 증가에 따른 Si_3N_4 쌍의 마찰계수와 비마멸물을 나타낸 것이다.

여기서, 마찰계수는 실험 종료 1분전의 평균값이다. 그리고 Table 3은 분위기 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸특성 실험의 결과로서 실험 분위기 변화와 하중에 대한 Si_3N_4 쌍의 마찰계수와 비마멸물을 나타낸 것이다. 실험 분위기는 대기 중과 마멸입자의 영향을 보기 위해 공기압축기를 이용하여 마멸입자를 제거하며 실험한 경우와 질소 분위기에서 산화를 억제하며 실험하였다.

대기 중 실험은 Air로, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우는 Clean으로, 질소 분위기에서의 실험

Table 2 Specific wear rates (K_s , 10^{-7} g/N · m) and friction coefficients of Si_3N_4 for various loads and speeds

Load \ Speed	39.24 N		78.48 N		117.72 N	
	Specific wear rate	Friction coefficient	Specific wear rate	Friction coefficient	Specific wear rate	Friction coefficient
0.05 m/s	16.99	0.921	9.91	1.342	9.44	1.911
0.1 m/s	8.49	0.976	4.96	1.238	4.72	1.394
0.2 m/s	4.72	1.719	3.54	1.286	2.60	1.121

Table 3 Specific wear rates (K_s , 10^{-7} g/N · m) and friction coefficients of Si_3N_4 for various environments, step loading and sliding condition (0.2 m/s)

Load \ Environment	39.24 N		78.48 N		117.72 N	
	Specific wear rate	Friction coefficient	Specific wear rate	Friction coefficient	Specific wear rate	Friction coefficient
Air	4.72	1.719	3.54	1.257	4.25	0.982
Clean	4.25	1.577	2.83	1.027	3.07	0.886
N_2	4.25	1.250	2.12	0.996	1.42	0.857

은 N_2 로 표기하였다.

마멸률은 다음과 같이 정의되는 비마멸률 (specific wear rate, K_s)로 표시하였다.

$$K_s = W / (L \cdot S) \tag{1}$$

여기서, W 는 정밀 저울에서 측정한 마멸량(g), L 은 수직하중(N), S 는 미끄럼거리(m)를 나타낸다.

3.1 대기 중에서 Si_3N_4 의 마멸특성 실험

대기중에서 Si_3N_4 의 마멸특성 실험은 하중과 미끄럼속도의 변화에 대한 Si_3N_4 쌍의 마멸특성을 보기 위하여 다양한 하중과 미끄럼속도에서 실험하였다.

Si_3N_4 쌍의 마멸과정은 Fig. 2에서처럼 미끄럼속도의 증가에 따라 각각 하중에 대해 비마멸률이 감소하였다. 이것은 Si_3N_4 를 사용한 다른 결과⁽¹⁴⁾와도 일치하는데, 미끄럼속도의 증가시 비마멸률이 감소하는 것은 파괴인성이 우수한 Si_3N_4 의 접촉면에서 저속도시보다 고속도에서 전단응력이 증가하며, 따라서 접촉부에서 표면돌기들의 응력 분포가 완만해지며 이로 인해 표면돌기의 파괴가 억제되기

때문이다. 0.05 m/s의 비마멸률보다 0.1 m/s의 비마멸률이 모든 하중에서 약 2배 가량 적었고, 0.1 m/s시의 비마멸률보다 0.2 m/s시의 비마멸률이 1.6배 정도 적었다. Si_3N_4 쌍의 마멸과정은 미끄럼속도의 증가에 따라 접촉빈도가 증가하여도 초기 표면돌기의 파괴 후 새로이 형성된 표면의 하중지지 능력과 접촉부의 응력분포에 영향 받음을 알 수 있다.

하중이 39.24 N시 실린더에서 초기 미끄럼시 표면돌기의 파괴가 일어난다. 하중이 증가함에 따라 비마멸률이 감소하는 것은 초기 미끄럼시 발생한 표면돌기 파괴 후, 새로이 형성된 표면은 미끄럼

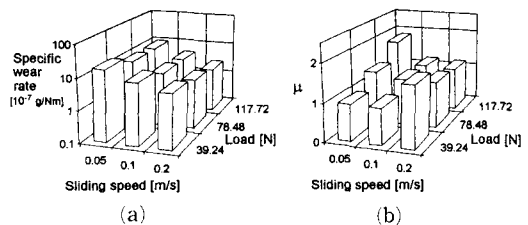


Fig. 2 Specific wear rates (a) and friction coefficients μ (b) of Si_3N_4 couple for various loads and sliding speeds

거리의 증가에도 표면돌기의 하중에 대한 상대적 저항성이 크게 영향을 미쳤기 때문이다.

이는 0.2 m/s시보다 0.05 m/s시에 두드러지게 일어난다. 그래서 Fig. 2(a)에서 보듯이, 0.05 m/s의 39.24 N시 가장 큰 비마멸률을 보여주며, 미끄럼 속도가 0.05 m/s시 모든 하중에서 다른 미끄럼 속도의 비마멸률보다 컸다.

Fig. 2(a)에서 0.05 m/s와 0.1 m/s에서 39.24 N시의 비마멸률이 78.48 N시의 비마멸률보다 1.7배 정도 크고, 0.2 m/s에서는 39.24 N시의 비마멸률이 78.48 N시의 비마멸률보다 1.4배 가량 크다는 것을 알 수 있었다. 저하중보다 고하중에 잘 견디는 특성은 특히 0.2 m/s에서 두드러져 고하중에서 마멸특성이 우수하였다. 이로서 Si₃N₄ 쌍의 미끄럼 시 초기 표면돌기 파괴 후 새로이 형성된 Si₃N₄ 실린더의 표면은 고하중에서 잘 견뎌줄 수 있다. Fig. 2(b)는 각각의 하중과 미끄럼속도에 대한 마찰계수의 변화를 보여준다. 그리고 Fig. 3은 하중과 미끄럼속도에서 시간에 대한 마찰거동을 나타내었다.

Fig. 3에서 보듯이, 하중이 증가함에 따라 접촉 압력의 증가로 마찰계수의 요동이 저하중보다 고하중에서 심하였다. 그러나, 마찰계수는 미끄럼속도의 증가에 따라 뚜렷한 추세를 보이지 않는다. 그리고 0.2 m/s시의 마찰계수는 하중의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여준다.

Si₃N₄ 쌍의 마멸거동의 천이영역을 보기 위하여 마찰동력(frictional power, μLV [Nm/s])과 비마멸률(specific wear rate, K_s [g/Nm])의 관계 그리고 마찰동력(frictional power, LV [Nm/s])과 시간에

대한 마멸량(wear weight per time, w/t [g/s])의 관계를 Fig. 4에서 보여준다. 마찰동력은 하중과 속도, 마찰계수의 함수로서 온도와 마멸에 밀접한 관계⁽¹⁵⁾를 가지고 있다.

여기서, Fig. 4(b)의 시간에 대한 마멸량은 K. Kato 등⁽¹⁵⁾이 제안한 마멸계수와 같다. 그리고 μ 는 마찰계수이고, L 은 하중(N), V 는 미끄럼속도(m/s), w 는 마멸량(g), s 는 시간(sec)이다.

Fig. 4(a)에서 마찰동력과 비마멸률의 관계는 작은 마찰동력시 비마멸률이 높으나, Fig. 4(b)에서 마찰동력과 시간에 대한 마멸량은 큰 마찰동력시 시간에 대한 마멸량이 크게 나타난다.

Fig. 4(b)에서 천이영역인 마찰동력 10 부근의 실험조건은 0.05 m/s, 117.72 N과 0.1 m/s, 78.48 N이다. 이 천이영역에서 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계를 보여주는 기울기가 0.059에서 0.486으로 변화한다. 그리고 이러한 변화는 마

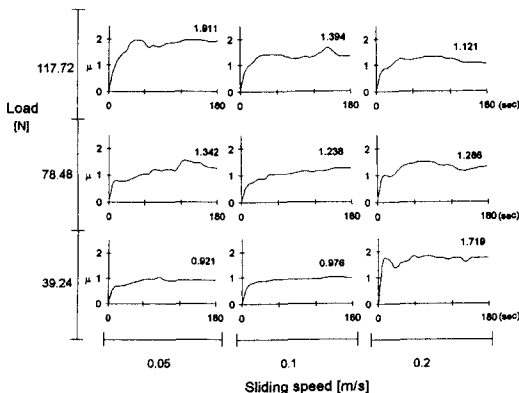


Fig. 3 Friction coefficients(μ) map of Si₃N₄ couple for various loads and sliding speeds

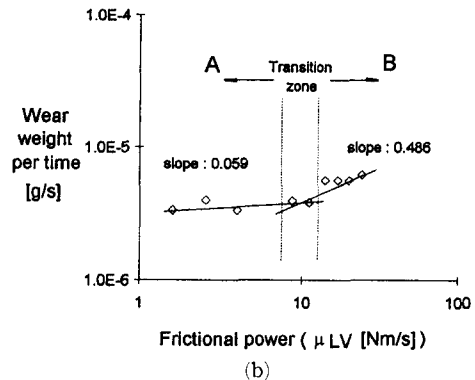
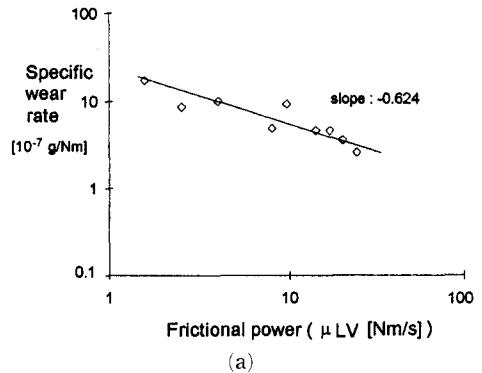


Fig. 4 Specific wear rates (a) and wear weights per time (b) of Si₃N₄ couple as function of μLV for various loads and sliding speeds (L : Load, V : sliding speed, μ : friction coefficient, w : wear weight, t : second)

찰거동의 천이와 밀접한 관계가 있다.⁽¹⁵⁾ Fig. 4(a)에서 마찰동력과 비마멸률의 관계를 보여주는 기울기는 -0.624 이며, 선형성이 좋다. Fig. 4(b)에서 천이가 일어난 후인 B 영역은 0.2 m/s 시의 모든 하중과 0.1 m/s 시의 117.72 N 이다. 그리고 이러한 영역에서 비마멸률과 시간에 대한 마멸량이 대응하는 마찰동력의 증가폭이 다른 구간에서 보다 작음을 보여준다. 그리고 Fig. 4(a)에서 보듯이 작은 마찰동력 값에 대응하는 구간인 $0.05, 0.1 \text{ m/s}$ 시의 비마멸률보다 큰 마찰동력 값에 대응하는 구간인 0.2 m/s 에서 비마멸률이 감소한다. 마멸거동의 추세를 보는 데는 마찰동력과 비마멸률의 관계를 보여주는 Fig. 4(a)가 유용하고, 마멸거동의 천이를 나타내는 데는 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계를 보여주는 Fig. 4(b)가 유용하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 5에서 보듯이, Si_3N_4 쌍은 과도 마멸(high wear)은 0.05 m/s 에서 두드러진다. 그리고 Si_3N_4 쌍의 마멸과정은 표면돌기 파괴가 우세하며, 미끄럼속도에 영향을 받는다. 그래서 Si_3N_4 쌍의 미끄럼시 경마멸(low wear)과 과도마멸(high wear)의 천이를 미끄럼조건에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 이러한 마멸영역의 천이는 표면돌기 파괴와 Si_3N_4 의 파괴인성에 영향을 받는다. 초기 미끄럼시 표면돌기의 파괴 후, 새로이 형성된 표면은 고하중에 의해 소성변형함으로써 효율적으로 저항한다. 마찰계수의 안정과 불안정한 거동을 Fig. 5에 함께 보여준다.

3.2 분위기 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸특성 실험

분위기 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸특성 실험은 실험 분위기를 변화시키며 수행되었다. 대기 중과 마멸입자의 영향을 보기 위해 공기압축기를 이용하여 마멸입자를 제거하며 실험한 경우와 질소 분위기에서 산화를 억제하며 실험하였다.

Fig. 6은 시간에 대한 Si_3N_4 쌍의 마찰계수의 변화를 실험 분위기와 하중에 따라 나타낸 것이다. 저하중에서는 마찰계수의 변화가 심하였고, 고하중에서는 안정된 거동을 나타내었다. 그리고 마찰계수의 평균값은 하중이 증가함에 따라 감소하였다. 감소되는 주된 원인은 Ajayi 등⁽⁸⁾이 주장하였듯이 고하중에서 표면돌기가 떨어져 표면이 완만해졌기 때문이라고 생각한다.

Si_3N_4 쌍의 마멸거동은 Fig. 7에서 보듯이,

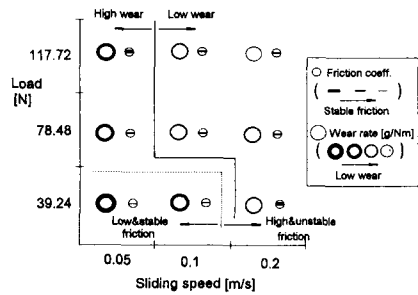


Fig. 5 Wear and Friction transition diagram of Si_3N_4 couple for various loads and sliding speeds

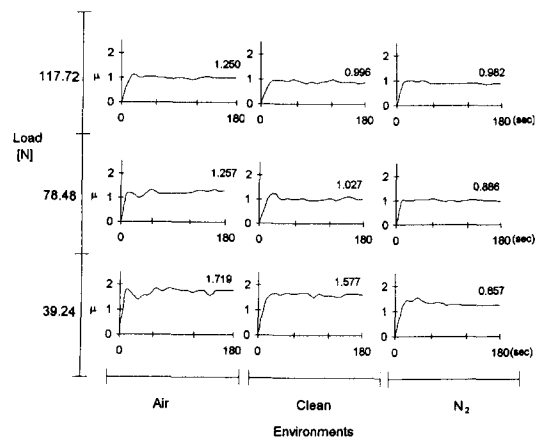


Fig. 6 Friction coefficients map of Si_3N_4 couple for various environments and step loading

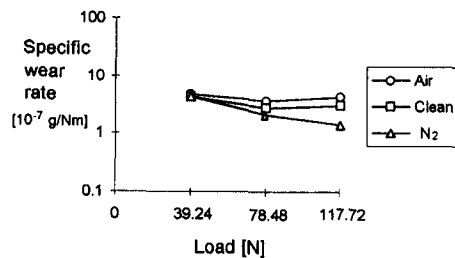


Fig. 7 Wear rates of Si_3N_4 couple for various environments and step loading

39.24 N 시 Si_3N_4 의 표면돌기 파괴로 인해 질소 분위기의 실험시 산화를 억제하며 실험하였는데도 비마멸률이 대기 중의 실험과 비마멸률의 차이가 별로 없었다. 또한 마멸입자가 전이층을 형성하는데 도움을 주지 못하였고, 입자에 의한 연삭작용의 영향도 적어 대기 중 실험의 비마멸률과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 비마멸률도 비슷하였

다. 전이층 형성에 대한 이전의 연구⁽⁸⁾에서 Si_3N_4 쌍의 미끄럼시 어떠한 전이층도 발견되지 않았으며 초기 마멸은 표면층의 손상과정에 의해 가속화된 파괴 과정임을 보여준다.

Fig. 6에서 39.24 N 실험의 대기 중에서의 마찰 거동은 표면돌기의 파괴와 접촉에 의해 시간이 지남에 따라 안정화되지 않음을 알 수 있다. 질소분위기의 실험에서 마찰거동이 중반부에서 안정적이다. 산화작용이 마찰거동에 유해하게 작용함을 보여준다. 마찰거동은 모든 실험 하중에서 질소분위기의 실험의 경우가 다른 실험들 보다 안정적이고, 마찰계수도 작았다. 39.24 N 시 Si_3N_4 쌍의 마멸의 주된 원인은 표면돌기의 접촉에 의한 파괴이다.

하중을 78.48 N으로 증가시켰을 때 비마멸률은 표면돌기의 파괴가 여전히 일어남과 동시에 산화가 발생하였고, 마멸입자의 영향도 나타나 대기 중 실험의 비마멸률이 마멸입자를 제거하여 연삭작용을 억제하며 실험한 경우의 비마멸률보다 다소 컸다. 마멸입자의 연삭작용은 두드러지게 나타나지 않았다. 그리고 산화작용으로 실리콘 산화막의 형성과 소멸로 마멸입자가 형성되고, 이러한 산화막은 소멸 후 빠르게 재형성되며 이 현상이 비마멸률을 증가시킨다.⁽¹⁰⁾

본 실험에서도 산화가 발생하나 표면을 보호할 수 있을 정도의 하중지지 능력을 갖춘 산화막이나 전이층이 형성되지 않아 마멸을 이끈다. 또한 하중에 의한 접촉압력의 증가로 표면돌기의 파괴가 일어나며 산화막의 형성과 파괴가 마멸을 이끈다. 그래서 산화막의 형성을 억제하며 실험한 질소 분위기의 비마멸률이 대기 중과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 비마멸률보다 작았다. 그러나, 78.48 N의 실험에서도 39.24 N의 실험처럼 표면돌기 파괴가 산화작용보다 두드러지며 이러한 현상이 마멸을 이끈다.

하중을 증가시켜 117.72 N으로 실험한 경우 표면돌기 파괴가 계속 진행되기는 하나 산화가 보다 가속화되어 산화막의 형성과 파괴가 마멸을 크게 한다. Fig. 6에서 보듯이, 질소 분위기의 실험시 마멸입자는 마찰거동을 불안정하게 하지 않으며 연삭작용을 이끌지 않고, 마멸입자가 접촉 경계층에서 간섭작용을 하지 않는다. 대기 중 실험시 형성되는 산화막 대신 마멸입자가 전이층을 형성하여 비마멸률을 감소시켜 Fig. 7에서 보듯이, 비마멸률이 78.48 N시보다 대기 중의 실험에서 다소 증가

하였으며 마멸입자를 제거하며 실험한 경우도 약간 증가하였다. 질소 분위기의 실험의 비마멸률은 78.48 N시의 비마멸률보다 1/2배 정도 감소하였다. 산화를 억제하면 마멸입자가 하중지지능력이 작은 산화막을 파괴하는 작용을 하지 않고, 전이층을 형성하여 마멸특성을 좋게 한다. 따라서 117.72 N시 Si_3N_4 쌍의 마멸은 산화막의 형성과 파괴가 진행되어 대기 중의 실험시 비마멸률을 크게 하며, 이러한 산화막의 파괴는 표면돌기의 접촉압력 증가와 마멸입자의 연삭작용 때문이다.

Fig. 8에서 Si_3N_4 쌍의 마멸은 39.24 N시 주로 표면돌기 파괴의 영향으로 마멸입자와 산화에 영향을 적게 받아 실험 분위기가 변하여도 유사한 비마멸률을 보여준다. 산화의 영향과 마멸입자의 연삭작용을 나타내는 점선부분이 매우 작다. Si_3N_4 쌍의 초기 마멸은 실험 분위기의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다.

78.48 N시 실험 분위기의 영향을 받기 시작하여 표면돌기 파괴와 함께 산화작용이 일어나며, 산화작용이 일어난 대기 중 실험과의 비마멸률 차이를 질소 분위기 실험의 점선표시 부분으로서 산화작용의 정도를 보여준다. 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 점선표시 부분은 마멸입자의 영향을 대기 중 실험과의 비마멸률 차이로써 보여준다.

117.72 N시 산화작용이 78.48 N시 보다 활발히 진행되어 질소 분위기 실험에서 비마멸률이 대기 중의 실험보다 적었으며, 이 차이를 점선으로 나타내어 산화작용으로 인한 산화막의 형성과 파괴의 영향을 보여주고 있다. 117.72 N시 39.24, 78.48

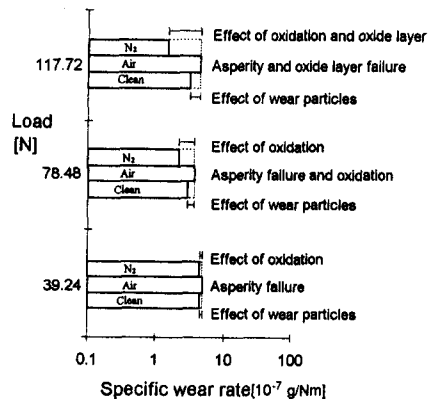


Fig. 8 Wear rates of Si_3N_4 couple of dominant wear behavior for various environments and step loading

Table 4 Dominant wear mechanism and specific wear rate (Ks, 10^{-7} g/N · m) due to step loading

Ceramics	Load	39.24 N	78.48 N	117.72 N
	Si ₃ N ₄		Asperity failure	Asperity failure and oxidation

N시 보다 산화의 영향을 크게 받아 산화작용의 정도를 나타내주는 점선표시 부분이 가장 크다. 하중이 증가할 수록 산화작용이 활발히 일어남을 알 수 있다.

Fig. 8에서 Si₃N₄ 쌍의 초기 마멸은 마멸입자의 연삭작용과 산화에 영향을 적게 받으며 표면돌기 파괴에 의한 마멸이 두드러지게 일어남을 알 수 있다. 이전의 연구에서 다른 재료에 비해 Si₃N₄는 파괴인성이 우수하다고 보고하고 있다.⁽⁸⁾ 마멸입자의 연삭작용에 의한 마멸은 억제되었으나, 접촉압력 때문에 표면돌기가 파괴되었기 때문이다. 미끄럼 거리와 하중의 증가에 따라 표면돌기 파괴와 산화가 발생하며, 산화막의 파괴가 마멸을 발생시킨다. 미끄럼 거리와 하중이 증가할수록 산화가 보다 많이 일어나 산화막의 형성과 파괴가 주된 마멸과정이다. 질소 분위기의 실험시 산화가 방지되어 산화막의 형성과 파괴가 일어나지 않는다. Fig. 6에서 78.48, 117.72 N의 실험시 질소분위기에서 마찰거동이 안정적이고, 산화를 방지해 하중지지 능력이 작은 산화막 대신 마멸입자가 하중지지 능력이 우수한 전이층을 형성하여 비마멸률을 감소시킨다. 그 밖의 실험에서 마멸입자는 접촉부에서 연삭작용을 하여 산화막의 파괴를 이끈다.

위에서 고찰한 마멸현상을 종합하여 Table 4에서 Si₃N₄ 쌍의 실험 분위기와 하중의 변화에 대한 대기 중 실험을 기준으로 하여 대표적인 마멸과정의 전이와 비마멸률을 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 Si₃N₄ 쌍의 마멸거동에 하중과 미끄럼속도의 영향과 실험 분위기가 미치는 영향을 조사하여 하중에 따른 마찰 및 두드러진 마멸 거동을 연구하였다. 따라서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 마찰동력과 비마멸률을 사용하면 마멸거동의 추세를 보는데 유용하고, 마멸거동의 전이를 보는

데는 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계가 유용하다.

(2) Si₃N₄ 쌍의 마멸입자는 초기 마멸거동에 큰 영향을 미치지 않으나, 접촉 경계층에서 간섭작용을 하여 미끄럼거리와 하중이 증가함에 따라 발생하는 산화막을 파괴한다.

그리고 대기 중에서 마멸입자에 의한 전이층 형성이 어려우며, 전이층 형성은 미끄럼 환경에 영향 받는다.

(3) Si₃N₄ 쌍의 마멸은 초기에 표면돌기 파괴가 우세하며, 미끄럼거리와 하중의 증가에 따라 표면돌기 파괴와 산화작용이 일어난다. 그리고 산화에 의한 산화막의 형성과 파괴가 마멸을 촉진시킨다.

참고문헌

- (1) Holmberg, K., Andersson, P. and Valli, J., 1987, "Three Body Interaction in Metal-Ceramic and Ceramic-Ceramic Contacts," *Proc. 14th Leeds-Lyon Symp. on Tribology*, pp. 227~235.
- (2) Andersson, P., 1992, "Water Lubricated Pin on Disc Tests with Ceramics," *Wear*, 154, pp. 37~47.
- (3) Hisakado, T., Suda, H. and Watanabe, H., 1992, "The Friction and Wear Mechanisms Between Ceramics and Metals," *Wear*, 155, pp. 251~268.
- (4) Gee, M. G., Matharu, C. S., Almond E. A. and Eyre, T. S., 1990, "The Measurement of Sliding Friction and Wear of Ceramics at High Temperature," *Wear*, 138, pp. 169~187.
- (5) Fisher, T. E. and Tomizawa, H., 1985, "Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride," *Wear*, 105, pp. 29~45.
- (6) Papaphilippou, C., Vardavoulias, M. and Jean-din, M., 1994, "The Influence of Humidity and

- the Role of Debris in the Unlubricated Wear of Ductile Cast Iron Against Alumina," *Wear*, 177, pp. 151~157.
- (7) Andersson, P. and Holmberg, K., 1994, "Limitation on the Use of Ceramics in Unlubricated Sliding Applications Due to Transfer Layer Formation," *Wear*, 175, pp. 1~8.
- (8) Ajayi, O. O. and Ludema, K. C., 1989, "Formation of Transfer Film During Ceramics and Ceramics Repeat Pass Sliding," *Proc. Wear of Material*, pp. 349~359.
- (9) Lee, K. H. and Kim, K. W., 1994, "Effects of Humidity and Sliding Speed on Wear Properties of Si_3N_4 Ceramics," *Materials Science and Engineering*, A186, pp. 185~191.
- (10) Dong, X. and Jahanmir, S., 1993, "Wear Transition Diagram for Silicon Nitride," *Wear*, 165, pp. 169~180.
- (11) Blomberg, Olsson, A., M. and Hogmark, S., 1994, "Wear Mechanisms and Tribo Mapping of Al_2O_3 and SiC in dry Sliding," *Wear*, 171, pp. 77~89.
- (12) Libsch, T. A., Becker, P. C. and Rhee, S. K., 1986, "Dry Friction and Wear of Toughened Zirconias and Toughened Aluminas Against Steel," *Wear*, 110, pp. 263~283.
- (13) Kapelski, G., Platon, F. and Boch, P., 1988, "Unlubricated Wear and Friction Behaviour of Alumina and Silicon Carbide Ceramics," *Proc. 15th Leeds-Lyon Symp. on Tribology*, pp. 349~354.
- (14) Sliney, Herold E. and Dellacorte, Christopher, 1994, "The Friction and Wear of Ceramic/Ceramic and Ceramic/Metal Combinations in Sliding Contact," *STLE*, Vol. 50, pp. 571~576.
- (15) Gautier, P. and Kato, K., 1993, "Wear Mechanisms of Silicon Nitride, Partially Stabilized Zirconia and Alumina in Unlubricated Sliding Against Steel," *Wear*, 162~164, pp. 305~313