

〈論 文〉

습도 및 미끄럼속도가 질화규소의 마멸거동에 미치는 영향에 관한 연구

이기현* · 김경웅**

(1994년 4월 14일 접수)

Effects of Humidity and Sliding Speed on the Wear Behavior of Silicon Nitride Ceramics

Kee Hyun Lee and Kyung Woong Kim

Key Words : Silicon Nitride(질화규소), Bearing Steel(베어링강), Wear(마멸), Humidity(습도), Adsorption(흡착), Microhardness(마이크로 경도)

Abstract

The wear behavior of two types of Si_3N_4 exposed to high and low humidity was examined at various sliding speeds, using bearing steel as disk material under pin-on-disk type sliding conditions. Higher wear rates were obtained at a high humidity than at a low humidity. As the sliding speed was increased, the wear rates were decreased and the effect of humidity on the wear rates of Si_3N_4 was reduced. The result that the Si_3N_4 pin showed higher wear rate under the high humidity condition was explained by the decrease in microhardness of Si_3N_4 due to the chemisorbed moisture on the pin and plowing action by the hard particles of Fe_2O_3 from the disk. An increase in the sliding speed is supposed to reduce the effect of humidity on the wear rate of Si_3N_4 by raising the average temperature of the disk surface and the local temperature at pin-disk contact point.

1. 서 론

세라믹재료는 미끄럼 표면에서 수분과 마찰 화학 반응을 일으키기 쉬우며 이러한 반응은 마찰 마멸 거동에 매우 중요한 영향을 미친다. 대표적인 고온 구조용 세라믹재료인 질화규소 역시 대기로부터 흡착된 수분에 의해 마찰과 마멸거동이 영향을 받는다는 것이 여러 연구에서 관찰되어 왔으며, (1~7) 특히 질화규소는 대기중의 수분에 의한 영향이 다른 세

라믹재료에 비해 더욱 큰 것으로 보고되고 있다. (3,5) 고습도에서는 마찰 화학반응에 의해 수화된 실리카가 생겨나기 쉬우며, 이러한 수화층이 미끄럼 표면 사이에서 보호막 또는 낮은 전단강도를 갖는 윤활막으로 작용하는 경우 질화규소의 마멸과 마찰을 감소시키는 것으로 보고되기도 한다. 하지만 질화규소-질화규소 간의 마멸 실험결과를 보면 고습도에서 마멸률이 감소하는 경우가 많으나 (1~3,7,9) 마멸률이 증가한 경우도 있었다. (8) Gee 등 (10)은 실험을 통해 마멸률에 미치는 습도의 영향이 미끄럼속도에 의해 달라질 수 있음을 보임으로써 여러 연구에서 습도의 영향에 관한 보고의 불일치를 습도와 미끄럼속도의 상호작용에 의해 설명하였다.

*한국과학기술원 대학원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

습도가 질화규소의 마찰과 마멸에 미치는 영향에 대한 연구는 주로 질화규소-질화규소간 미끄럼 접촉에 대하여 행해져 왔으며, 질화규소-금속간의 마멸거동에 미치는 습도의 영향에 대한 연구는 그 실용상의 중요성에도 불구하고 매우 드물다. 고속회전용의 세라믹 볼베어링은 많은 경우에 질화규소 볼과 베어링강 내외륜(race)의 조합이 사용되는 것이라든가⁽²⁰⁾ 내연기관 부품에 대한 시도로써 주철 합금 캠과 질화규소 follower의 조합이 우수한 내마모 성능을 나타낸⁽²¹⁾ 것과 같이 미끄럼 요소로서 세라믹재료 특히 질화규소의 응용을 위한 시도⁽²²⁾는 실제로 질화규소-금속간의 접촉인 경우가 많다. 세라믹재료의 트라이볼로지 거동에 관한 폭넓은 실험을 수행한 제2차 VAMAS 연구⁽⁸⁾ 중 질화규소 핀과 베어링강 디스크의 마멸에 관한 결과를 살펴보면 질화규소 핀의 마멸률은 상대습도 50%인 경우가 10%인 경우에 비해 매우 높게 나타났다. 한편 Lee and Kim⁽¹¹⁾은 습도와 미끄럼속도를 조절하며 수행한 마멸실험을 통해 질화규소 핀-52100 베어링강 디스크 마멸에 있어서 습도와 미끄럼속도의 영향에 관해 조사하였다.

본 연구는 Lee and Kim⁽¹¹⁾의 연구의 계속으로서 추가의 실험과 분석을 통해 습도와 미끄럼속도가 질화규소의 마멸에 미치는 영향 및 그 메커니즘에 관해 조사한 것이다. 고습도 및 저습도의 조건에서 두 종류의 질화규소를 베어링강 디스크에 대해 마찰시키는 실험을 수행하였으며, 핀 시편으로 상압 소결(PLS) 및 소결체 열간 정수압 소결(PLS+HIP)의 두가지 방법에 의해 제조된 질화규소를 사용하였다.

2. 실험

2.1 시편

상압 소결(PLS) 및 소결체 열간 정수압 소결(PLS+HIP)에 의해 제조된 질화규소를 핀 시편 재료로 사용하였다. PLS법은 일반적으로 가장 널리 사용되는 질화규소의 소결법이며 소결조제를 이용하여 액상소결시킴으로써 상압에서 소결하는 방법이다. PLS+HIP법은 두가지 단계로 구성되는 소결법으로, 먼저 질화규소의 분말성형체(green body)를 상압 소결(PLS)한 뒤 다시 열간 정수압 소결(PLS+HIP)을 행함으로써 치밀화를 향상시키는 소결법이다. 열간 정수압 소결에 요구되는 밀봉 과정을 상압 소결과정으로 대체하는 효과를 얻는 것이 PLS+HIP법의 특징이라고 할 수 있다. 소결조제로는 입계相을 결정화시킴으로써 무정형相에 의한 고온 강도의 저하를 억제하는 $Al_2O_3-Y_2O_3(Al_2O_3, 2\text{ wt}\% \text{와 } Y_2O_3, 6\text{ wt}\%)$ 를 첨가하였다. 핀 시편은 $3 \times 4 \times 12\text{ mm}$ 크기로 절단하였으며 미끄럼 접촉면은 다이아몬드 습식 래핑처리한 뒤, 핵세인액에 넣어 초음파 세척하였다.

상대 마찰재료로는 AISI-52100 베어링강을 사용하였으며 외경 94 mm, 내경 70 mm, 두께 12 mm의 디스크 형상으로 기계가공하였다. 베어링강 디스크는 담금질-폴림 열처리한 후 미끄럼면을 600메쉬 SiC 연마포지로 연마하고 알콜과 핵세인으로 세척하였다. 연마된 표면거칠기는 rms 값이 $0.03\ \mu\text{m}$ 정도로서 이러한 낮은 표면거칠기 값이 얻어진 것은 열처리한 베어링강의 높은 경도에 기인한 것으로

Table 1 Mechanical properties of Si_3N_4 and AISI 52100 bearing steel

	PLS Si_3N_4	PLS+HIP Si_3N_4	AISI 52100 bearing steel
Density	3.24 g/cm ³	3.26 g/cm ³	7.8 g/cm ³
Vickers hardness (Hv)	13.6 GPa	14.2 GPa	7~8 GPa
Fracture toughness (K_{IC})*	5.0 MN/m ^{3/2}	5.5 MN/m ^{3/2}	
MOR (4 pt. bending)	780 MPa	860 MPa	
Young's modulus	310 GPa	310 GPa	210 GPa
Thermal expansion coefficient	$3.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$3.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$12.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

* Measured by indentation method

로 보인다.

Table 1은 PLS 질화규소 및 PLS+HIP 질화규소, 그리고 베어링강의 기계적 물성치를 나타낸 것이다. 또한 흡착수분이 질화규소의 마이크로 경도에 미치는 영향을 조사하기 위해 대기중 및 수중에서 하중 1.96 N의 마이크로 경도 측정을 실시하였다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 핀-온-디스크 마멸시험기의 개략도이다. 실험은 상온(23°C ± 5°C) 대기중에서 수행하였으며, 대기조건을 일정 습도로 유지하기 위해 실험장치를 아크릴 덩개로 싸웠다. 고습도(95% ± 3%)는 아크릴 덩개내의 용기에 담긴 물을 증발시킴으로써, 그리고 저습도(5% ± 3%)는 팬으로 덩개내의 공기를 유동시켜 제습제(실리카겔)를 지나게 함으로써 조성하였다. 습도의 측정에는 electronic capacitance type polymer film 센서식의 디지털습도계를 사용하였다.

해상도 0.01 mg의 전자저울로 실험전후 핀 시편의 무게를 측정하여 마멸량을 구하였다. 시편 홀더가 부착된 토크암의 회전운동을 로드셀로 구속함으로써 회전 디스크면과 정지 핀 시편 사이에 작용하는 마찰력을 측정했다. 마찰력에 비례하여 로드셀에서 발생하는 전기신호를 스트레인 앰프와 A/D 변환기를 거쳐 PC에 입력하였다. 이때 회전하는 상대 마찰면 디스크는 연직방향으로 수 μm의 진폭을 가지고 진동하기 때문에 디스크가 수회 회전하는 동안 수백개의 마찰계수를 샘플링한 후 이 값들을 평균하여 마찰계수로 표시했다. 한편 미끄럼속도와 수분 흡착량과의 관계를 살펴보기 위해 각 미끄럼속도에 따른 디스크 마멸트랙에서의 평균 표

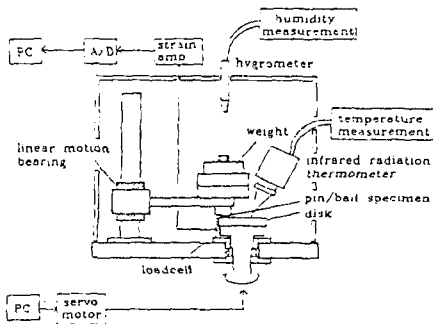


Fig. 1 Schematic diagram of test rig

면온도를 최소반경 1.2 mm의 적외선 복사온도계(infrared radiation thermometer)를 사용하여 측정하였다. 예비실험에서 측정해 본 결과 디스크상의 마멸트랙의 온도는, 핀-디스크 접촉면 부근을 제외하고는 디스크 전체에 걸쳐 비슷한 값을 나타내었다. 베어링강 디스크와 질화규소 핀과의 접촉면에서부터 디스크의 회전방향으로 90° 떨어진 위치의 마멸트랙 바깥 2 mm 지점에 적외선 온도계의 측정 스폿을 맞추어 트랙의 평균온도를 측정하였다.

수직하중을 19.6 N(공칭 접촉면압 1.64 MPa), 미끄럼거리를 21.6km로 고정시키고 미끄럼속도를 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s, 4.0 m/s로 변화시켜가며 마멸실험을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

Figs. 2, 3은 두 종류의 질화규소 핀 시편에 대해 저습도 및 고습도에서의 마멸률과 마찰계수를 미끄럼속도에 따라 나타낸 것이다. 마멸률은 다음과 같이 정의되는 비마멸량 K로 표시하였다.

$$K = \frac{V}{LS} \tag{1}$$

여기서, V는 마멸체적, L은 수직하중, S는 미끄럼거리를 나타낸다. 실험은 각 조건에서 5회 내지 10회씩 행하였으며, 마찰력과 마멸량의 평균값을

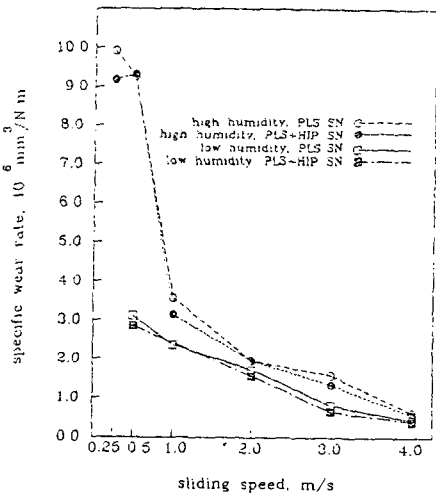


Fig. 2 Wear rate of Si₃N₄ with sliding speed

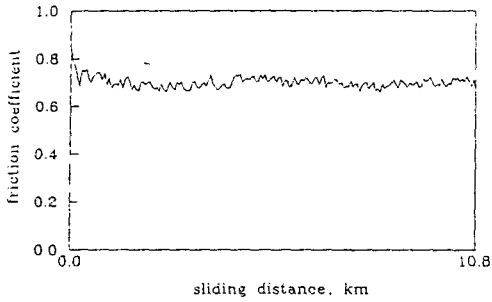


Fig. 3 Variation of friction coefficient with sliding distance (low humidity, sliding speed: 0.5 m/s)

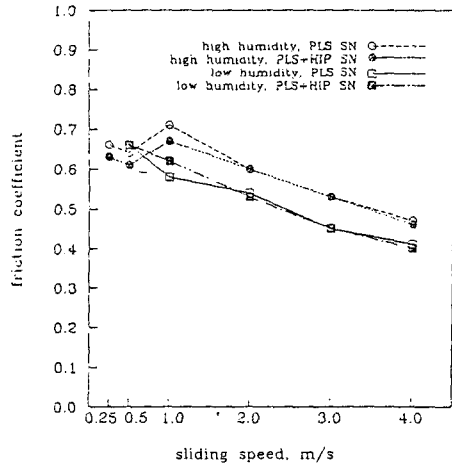
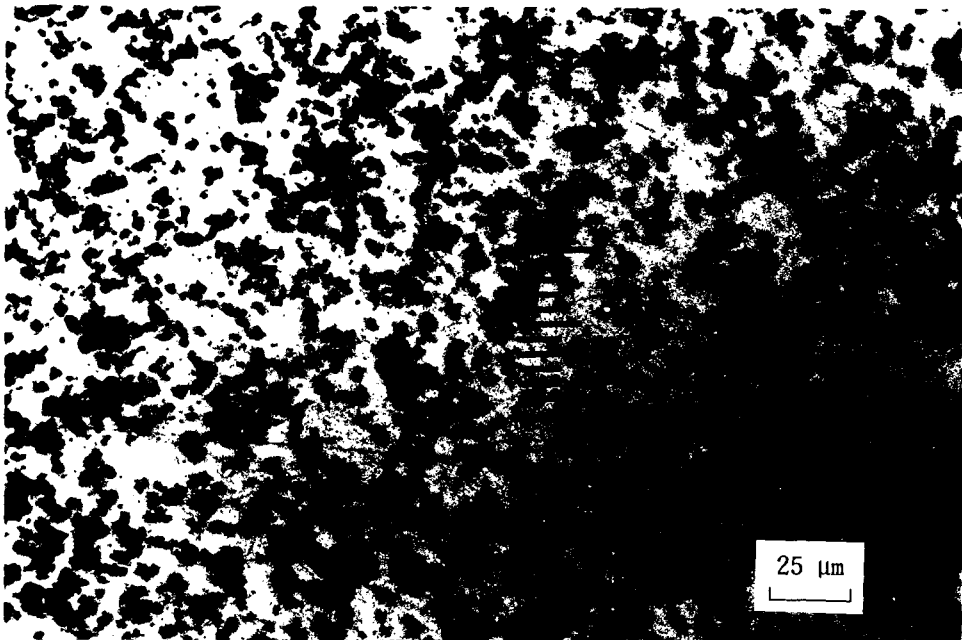


Fig. 4 Friction coefficient of Si₃N₄ with sliding speed

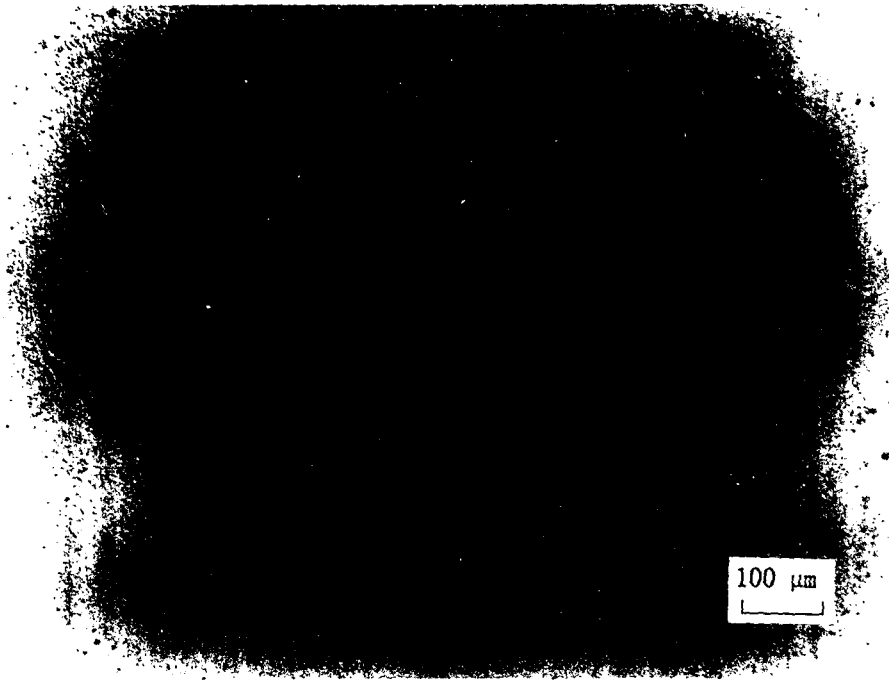
구하여 마찰계수와 마멸률을 표시하였다. 질화규소의 마멸률은 저습도에서보다 고습도에서 항상 높게 나타났으며 고습도이면서 미끄럼속도가 작을 경우 마멸률은 가장 높게 나타났다. 미끄럼속도가 증가함에 따라 마멸률은 감소하였으며, 동시에 고습도와 저습도 간의 마멸률의 차이도 줄어들었다. PLS 질화규소와 PLS+HIP 질화규소는 마멸률, 마찰계수 및 마멸면의 형상에서 큰 차이를 보이지 않았다. PLS+HIP 질화규소의 마멸률은 저습도일

때, 그리고 고습도에서는 미끄럼속도가 2.0 m/s 이상일 때는 PLS 질화규소에 비해 10% 정도 낮은 값을 나타냈으나, 이러한 내마멸성의 향상은 마멸률이 급격히 증가하는 1.0 m/s나 0.5 m/s 영역에서는 나타나지 않았다. 핀의 마멸률 측정결과가 베어링강 디스크로부터 핀 쪽으로 이착되어 간 베어링강 마멸입자의 무게

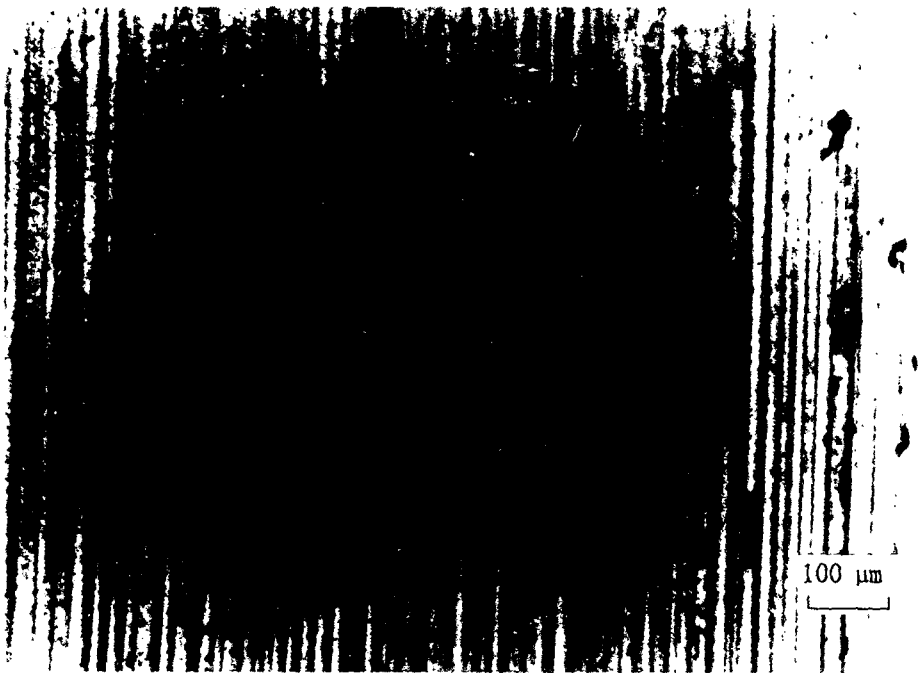


(a) Before an experiment(Si₃N₄, x400)

Fig. 5 (continued)



(b) After sliding at 0.5 m/s (Si_3N_4 , at high humidity, x100)



(c) After sliding at 2.0 m/s (Si_3N_4 , at high humidity, x100)

Fig. 5 Surface of Si_3N_4 pin

에 영향을 받지 않았나 확인하기 위해 핀 시편의 표면을 EDAX로 분석해 보았다. 핀 표면에 존재하는 Fe원소의 성분이 많은 마멸입자가 마멸 표면의 여러 곳에서 발견되었으나, 이러한 입자들에 함유된 Fe의 전체적인 양은 핀의 전체 마멸량에 비해 극히 작았다. 따라서 이착된 베어링강 성분이 핀의 마멸량 측정에 미치는 영향은 무시할 수 있다고 판단된다.

마찰계수는 시간(또는 미끄럼거리)에 따라 일반적으로 Fig. 3과 같은 변동하는 양상을 나타냈다. Fig. 4는 각 조건에서 마찰계수의 평균값으로서, 미끄럼속도가 1.0 m/s에서 4.0 m/s로 증가함에 따라 마찰계수는 감소하며 저습도에 비해 고습도에서 높은 값을 나타내었다. 열간 가압 소결한 질화규소에 대해 몇가지 종류의 순수 금속 및 금속 산화물을 상대 마찰면 재료로 사용한 Ishigaki⁽⁵⁾의 실험에서 역시 고습도에서 마찰계수가 높게 나타나는 경우가 많았다고 보고된다.

질화규소 표면에 분포된 마멸입자의 성분을 WDS (wavelength dispersive spectroscopy) 분석한 결과 이러한 마멸입자는 산소(O)를 4 wt%~8 wt%, 철(Fe)을 0.1 wt%~20 wt% 함유하였고 소결조제로 첨가한 알루미늄(Al)과 이트륨(Y) 등을 소량 함유한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 고습도에서 미끄럼속도 0.5 m/s와 2.0 m/s로 마멸된 핀 시편의 마멸 표면 사진이다. 미끄럼속도가 작을수록 핀 시편의 표면은 매끈해지며 미끄럼속도가 증가함에 따라 핀 시편의 표면에 미끄럼방향으로 생겨나는 그루브(groove)는 점차 넓고 깊어진다. 마멸률이 높을수록 매끈한 마멸 표면이 생성되었으며, 저습도에서도 속도에 따라 비슷한 경향이 관찰되었다. 핀과 디스크의 마멸 표면에서는 곳곳에 물질이착이 관찰되기도 했으나 보호막으로 작용할 수 있을 정도의 안정적인 물질막은 생성되지 않았다. 매끈한 표면의 생성은 질화규소, Si, Fe₂O₃ 등으로 구성된 경한 미립자 및 베어링강 디스크의 일부 표면돌기에 의한 미세 연삭작용과 연마작용의 결과인 것으로 보인다.⁽¹³⁾

3.2 습도의 영향

대기중의 수분은 세라믹스의 미끄럼 계면에서 마찰 화학반응(tribochemical reaction)을 일으킨다. 이때 생성된 계면 물질이 안정적인 계면막을 형성하여 튼튼히 부착된 상태를 유지하는 경우에는 마

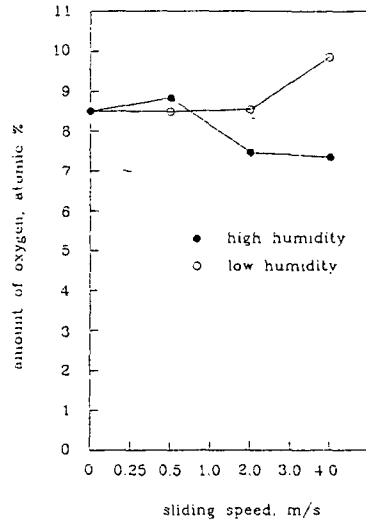


Fig. 6 Amount of oxygen at worn surface of pin by WDS analysis

멸면이 더 이상의 마멸로부터 보호되며⁽¹²⁾ 그 결과 고습도에 의해 마멸은 감소한다. 그러나 마멸 표면에 안정적인 보호막이 형성되지 않는 경우에는 마찰 화학반응에 의해 생겨난 무르고 약한 반응생물이 미끄럼 계면에서 쉽게 제거되면서 마멸률이 증가할 수 있다.^(4,6,13) Kapsa 등⁽⁴⁾의 연구에 의하면, 질화규소에 다이아몬드팁을 마멸시키는 실험에서, 고습에서는 부식효과에 의해 열간 가압 소결 질화규소의 마멸률이 증가되었다. 또한 Sasaki⁽⁶⁾는 질화규소끼리의 마멸실험에서, 상대습도 50%에서 마멸률이 최소가 되며 그 이상의 고습에서는 습도 증가에 따라 질화규소와 수분과의 마찰 화학반응이 증가하면서 마멸률이 커졌다고 보고했다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 6에서 볼수 있는 것처럼 WDS 분석결과 핀 시편의 마멸 표면에서 검출되는 산소 원소의 양이 습도나 미끄럼속도에 의존하는 경향을 보이지 않았다. 즉 부식마멸(corrosive wear)이 질화규소-질화규소를 대상으로 한 다른 실험에서와 같이 지배적인 인자로 작용하지는 않은 것으로 보인다.

본 연구에서 질화규소 시편이 베어링강과 미끄럼 접촉을 할 때 마멸률이 고습도에서 증가한 가장 중요한 이유는 핀의 미끄럼 접촉면에 화학흡착된 수분층이 질화규소 표면에서의 마이크로경도를 저하시키기 때문인 것으로 생각된다. 비금속의 기계적 물성이 표면에 화학흡착된 수분층의 존재에 의해

뚜렷하게 영향을 받을 수 있다는 것이 지금까지 많은 연구^(14,15)에서 밝혀져 왔다. 비부식성 환경이 기계적 거동에 미치는 모든 효과를 포괄적으로 가리켜 "Rebinder 효과"라고 부르기도 한다.⁽¹⁶⁾ 이 효과는 마이크로 경도 측정을 통해 매우 뚜렷이 나타난다. 본 실험에서는 건조 공기중과 수중에서 질화규소 핀의 마이크로 경도를 측정하였다. 압자 하중 1.96 N을 가하여 측정된 결과 Knoop 경도값은 건조 공기중에서 1543, 수중에서 1313으로서 약 15%의 감소를 나타냈다. 또한 Ishigaki⁽²⁾는 열간 가압 소결한 질화규소에 대해 건조 질소 분위기에서와 실험실 대기중에서 하중 1 N을 가하여 마이크로-비커스경도를 측정하였다. 경도 값은 건조 질소에서보다 실험실 대기에서 14%나 낮은 값을 나타냈다. 이러한 효과는 본질적으로 고체의 표면(대기-고체간 계면)에서 비롯되는 현상이며 따라서 표면에 가까운 부분일수록 경도의 저하는 더욱 심해질 것이다.⁽¹⁶⁾ 반면 금속재료의 경우에는 일반적으로 흡착 수분에 의한 경도의 감소가 거의 발생하지 않는다.^(14,15) 연삭마멸에 대한 과거 몇가지 실험결과에서 관찰된 바에 따르면, 연삭 마멸 대상물(work-piece)의 경도(H_w)가 연삭재(abrasive)의 경도(H_a)에 비해 큰 경우, 연삭 대상물의 마멸은 두 물체의 경도비(H_w/H_a)에 매우 크게 영향을 받는다.⁽¹⁷⁾ 본 실험의 경우 상온에서의 비커스경도는 측정결과 질화규소가 1450 kg/mm², 베어링강은 745 kg/mm²로 나타났으며, Fe₂O₃는 1100 g/mm² 정도로 알려져있다. 따라서 질화규소의 상대 마찰면으로 금속재료를 사용한 본 실험적 경우 미끄럼면에서 질화규소 쪽이 경도 저하에 의해 미세 연삭 마멸에 의한 마멸이 크게 증가한 것으로 판단된다.

고습도가 마멸률에 미친 또다른 효과는 흡착 수분에 의해 베어링강 디스크의 산화가 가속화되고 이때 생겨난 산화철(Fe₂O₃) 입자가 일으키는 연삭 작용의 영향이다. 많은 경우에 세라믹-강의 마찰 접촉면에서는 강이 Fe₂O₃ 및 소량의 Fe₃O₄로 산화되고 이것이 마이크론 이하 크기의 매우 경한 입자를 형성하여 미끄럼 접촉하는 세라믹 핀의 표면에 연삭 마멸을 일으킨다.⁽¹⁸⁾ 본 실험에서도, 고습도에서 질화규소 핀의 마멸은 Fe₂O₃ 입자에 의한 연삭 작용으로 증대되었을 것으로 예상된다.

3.3 미끄럼속도의 영향

일반적으로 미끄럼속도는 마멸 과정에 여러가지

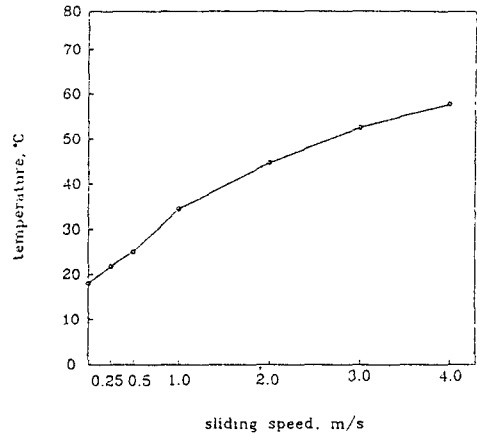


Fig. 7 Temperature of disk surface with sliding speed (PLS+HIP Si₃N₄, at high humidity)

중요한 영향을 미칠 수 있다. 본 실험의 경우 미끄럼속도에 의한 가장 큰 영향은 디스크 표면의 마멸 트랙에서의 평균온도 상승 및 핀-디스크 접촉면에서의 극부적인 온도 상승인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 실은 18°C에서 미끄럼속도의 증가에 따른 디스크 표면의 온도변화를 나타낸 것이다. 미끄럼 표면의 온도는 미끄럼속도가 0.25 m/s에서 4.0 m/s로 증가함에 따라 22°C에서 57°C까지 상승하였으며, 이러한 온도변화는 주위 대기로부터 물리 흡착되는 수분의 양을 크게 감소시키게 된다.

마찰면 표면돌기 접촉점에서 극부적으로 순간적으로 발생하는 극히 높은 온도를 섬광온도(flash temperature)라 부르기도 하는데, 본 연구에서는 Lim and Ashby⁽¹⁹⁾의 모델을 기초로 하여 유도한 다음과 같은 수정식을 이용하여 핀-디스크 접촉 돌기에서 발생하는 최대 순간온도인 섬광온도의 상승을 계산하였다.

$$T_f = T_0' + \frac{1}{k_{pin} + k_{disk}} \mu \gamma_a \frac{\pi^{1/2}}{2} H_0 v \quad (2)$$

여기서, T_f 는 섬광온도, T_0' 는 표면돌기로부터 흘러나가는 sink부의 온도, k_{pin} 은 핀의 열전도도, k_{disk} 는 디스크의 열전도도, μ 는 마찰계수, r_a 는 표면돌기들의 평균 접촉반경, H_0 는 디스크의 경도, v 는 미끄럼속도이다. 질화규소의 열전도도 30 J/m·s·K, 베어링강의 열전도도 43 J/m·s·K, 베어링강의 경도 745 kg/mm², 표면 미세 돌기의 평균 반경 10 μm, 마찰계수 0.5를 사용하였을 때의 결과물 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 베어링강의 용점인

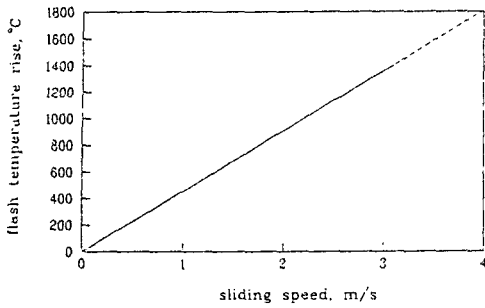


Fig. 8 Flash temperature rise at pin-disk interface with sliding speed

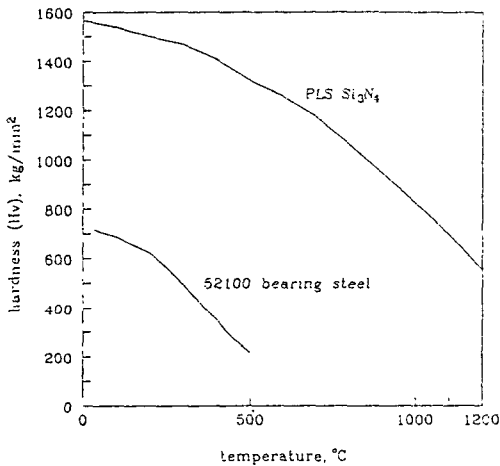


Fig. 9 Hardness of Si_3N_4 and 52100 bearing steel with temperature

1400°C 이상의 영역에서는 본 모델은 유효하지 않으며 따라서 이 부분은 점선으로 표시하였다. 섭광온도는 미끄럼속도에 비례하며 3.0m/s에서 이미 1000°C 이상의 매우 높은 온도상승이 발생함을 볼 수 있다.

디스크 마멸트랙에서의 온도증가는 핀의 마멸면에서 마이크로경도의 감소와 硬한 산화철(Fe_2O_3)의 입자의 생성을 위해 필요한 물분자의 흡착량을 감소시킨다. 한편 디스크-핀 접촉계면에서의 국부적인 온도 증가는 먼저 핀 표면에 화학 흡착된 물분자를 desorption시킴으로써 핀의 경도 저하를 감소시킨다. 또한 미끄럼속도가 커지면서 마찰면의 온도 증가에 의해 핀과 디스크의 경도가 변화하게 된다. 이때 고온에 의한 경도 저하는, 질화규소와 베어링강의 온도에 따른 경도 값^(23,24)을 나타낸 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 질화규소에 비해 베어링강에서 상대적으로 매우 크게 나타나며 그 결과 H_{disk}

/ H_{pin} 값이 크게 감소한다. 이러한 효과는 모두 미끄럼속도의 증가에 따라 질화규소 핀의 마멸을 감소시키는 작용을 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 습도 및 미끄럼속도에 따른 상압 소결(PLS) 질화규소 및 소결체 열간 가압 소결(PLS+HIP) 질화규소의 마찰 및 마멸거동을 조사하였다.

(1) 마멸률은 저습도에 비해 고습도에서 항상 크게 나타났다. 미끄럼속도가 증가함에 따라 마멸률은 감소하였으며 동시에 고습도와 저습도 간의 마멸률의 차이도 줄어들었다.

(2) 미끄럼속도가 작을수록 핀의 마멸 표면은 매끈해졌으며 안정적인 보호막의 생성은 관찰되지 않았다. 저속영역에서 매끈한 표면이 얻어진 것은 미세한 세라믹 마멸입자와 Fe_2O_3 입자, 그리고 베어링강 디스크 표면의 미세돌기에 의한 미세연삭 및 연마작용의 결과로 보인다.

(3) 고습도에서 질화규소의 마멸률이 높은 것은 첫째, 흡착된 물분자에 의한 질화규소 표면에서의 마이크로 경도의 저하, 재료물성의 변화, 둘째, 베어링강의 산화에 의해 생성된 경한 Fe_2O_3 미립자가 일으키는 연삭작용에 의한 것으로 판단된다.

(4) 미끄럼속도의 증가는 디스크의 표면 온도 및 핀-디스크 접촉면의 섭광온도를 상승시킴으로써 질화규소의 마멸률에 미치는 습도의 영향을 감소시키고 또한 질화규소 핀에 비해 베어링강 디스크의 경도를 심하게 저하시킴으로써 핀 시편의 마멸률을 감소시킨 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Fischer, T. E. and Tomizawa, H., 1984, "Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride," *Wear*, 105, pp. 29~45.
- (2) Ishigaki, H., Kawaguchi, I., Iwasa, M. and Yoibana, Y., 1986, "Friction and Wear of Hot Pressed Silicon Nitride and Other Ceramics," *ASME J. of Tribology*, 108, pp. 514~521.
- (3) Ishigaki, H., Nagata, R. and Iwasa, M., 1988, "Effect of Adsorbed Water on Friction of Hot-

- Pressed Silicon Nitride and Silicon Carbide at Slow Speed Sliding," *Wear*, 121, pp. 107~116.
- (4) Kapasa, P. and Enomoto, Y., 1988, "Sliding Damage on Hot-Pressed and Sintered Silicon Nitride Caused by a Diamond Tip under Controlled Humidity," *Wear*, 127, pp. 65~83.
- (5) Demizu, K., Ishigaki, H., Wadabayashi, R., 1989, "Dry Friction of Silicon Carbide and Silicon Nitride Against Metals: The Effect of Humidity and Oxide Films," *ASME J. of Tribology*, 111, pp. 401~405.
- (6) Sasaki, S., 1989, "The Effects of the Surrounding Atmosphere on the Friction and Wear of Alumina, Zirconia, Silicon Carbide and Silicon Nitride," *Wear*, 134, pp. 185~200.
- (7) Imada, Y., Kamamura, K., Honda, K., and Nakajima, K., 1992, "The Tribological Reaction Accompanying Friction and Wear of Silicon Nitride Containing Titanium Nitride," *ASME J. of Tribology*, 114, pp. 230~235.
- (8) Czichos, H., Becker, S., Lexow, J., 1989, "International Multiaboratory Sliding Wear Tests with Ceramics and Steel," *Wear*, 135, pp. 171~191.
- (9) Komvopoulos, K. and Li, H., 1992, "The Effect of Tribofilm Formation and Humidity on Friction and Wear Properties of Ceramic Materials," *ASME J. of Tribology*, 114, pp. 131~140.
- (10) Gee, M. G. and Butterfield, D., 1993, "The Combined Effect of Speed and Humidity on the Wear and Friction of Silicon Nitride," *Wear*, 162~164, pp. 234~245.
- (11) Lee, K. H. and Kim, K. W., 1994, "Effects of Humidity and Sliding Speed on the Wear Properties of Si_3N_4 Ceramics," *Materials Science and Engineering A*, in print.
- (12) Ajayi, O. O. and Ludema, K. C., "Mechanism of Transfer Film Formation During Repeat Pass Sliding of Ceramic Materials," *Wear*, 140, pp. 191~206.
- (13) GAutier, P. and Kato, K., 1993, "Wear Mechanism of Silicon Nitride, Partially Stabilized Zirconia and Alumina in Unlubricated Sliding Against Steel," *Wear*, 162~164, pp. 305~313.
- (14) Tsuya, Y., 1985, "Tribology of Ceramics," *Proc. JSLE Int. Tribology Conf.*, pp. 641~646.
- (15) Shimura, H. and Tsuya, Y., 1977, "Effects of Atmosphere on the Wear Rate of Some Ceramics and Cermets," *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, pp. 452~461.
- (16) Westbrook, J. H. and Conrad, H., 1971, "The Science of Hardness Testing and Its Research Applications," *American Society of Metals*, Ohio.
- (17) Mehan, R. L. and Hayden, S. C., 1981, 1982, "Friction and Wear of Diamond Materials and Other Ceramics Against Metal," *Wear*, 74, pp. 195~212.
- (18) Rabinowicz, E., "The Wear of Hard Surfaces by Soft Abrasives," *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, pp. 12~18.
- (19) Lim, S. C. and Ashby, M. F., 1987, "Overview No. 55, Wear Mechanism Maps," *Acta Metall.*, 35 pp. 1~24.
- (20) "セラミツク 先端材料-強度と 微構造," 1991, セラミツクス 協會.
- (21) Miyoshi, K., 1990, "Fundamental Considerations in Adhesion, Friction, and Wear for Ceramic-Metal Contacts," *Wear*, 141, pp. 35~44.
- (22) Richerson, D. W. and Stephan, P. M., 1989, "Evolution of Applications of Si_3N_4 Based Materials," *Materials Science Forum*, 47, pp. 282~307.
- (23) 山口 喬, 柳田博明, 阿部 弘, 川合實, 菅野隆志, 鈴木惠一朗 著, 이홍립 譯, 1984, "엔지니어링 세라믹스," 반도출판사, p. 188.
- (24) 구름베어링 공학 편집위원회, 1987, "구름 베어링 工學," 한국종합기계주식회사, p. 68.