

## 습도 및 미끄럼 속도에 따른 질화규소의 마찰 마모 특성에 관한 연구

이기현 · 김경웅

한국과학기술원 정밀공학과

### Effects of Humidity and Sliding Speed on the Wear Properties of $\text{Si}_3\text{N}_4$ Ceramics

Kee-Hyun Lee, Kyung-Woong Kim

Dept. of Precision Engineering and Mechatronics  
Korea Advanced Institute of Science and Technology

**Abstract**—The wear properties of two types of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ (silicon nitride) exposed to high and low humidity were examined experimentally for various sliding speed. Bearing steel was used as the disk material at pin-on-disk type sliding. Wear rates of pressureless sintered-plus-hot-isostatic pressed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  were slightly lower than those of pressureless sintered  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . It was observed that adsorbed moisture and sliding speed markedly influenced the wear properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . The highest wear rate was obtained under the high humidity and low sliding speed condition. As the sliding speed was increased, wear rates were decreased and the humidity effect on the wear rates of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  was lowered. The result that the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pin showed a high wear rate under the high humidity condition was explained by the property change due to the adsorbed moisture, plowing action by the hard particles of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  from the disk, and the corrosion effect at  $\text{Si}_3\text{N}_4$  surface. Increase in sliding speed was supposed to have reduced the humidity effect on wear rate of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  by raising the temperature of both the bearing steel disk and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pin specimen.

### 1. 서 론

파인 세라믹 재료는 금속에 비해 고온에서의 경도 및 강도 등의 물성이 뛰어나며, 우수한 내부식성, 경량성과 낮은 열팽창성을 가지고 있어 미끄럼 요소 재료로서 큰 가능성을 갖고 있다. 특히 질화규소는 파괴인성이 높고 내열충격성이 뛰어나서, 고성능 세라믹 볼베어링[1-3] 및 세라믹 엔진 부품[4] 재료로 각광받는 대표적인 파인 세라믹 재료이다.

질화규소의 마찰 마모 거동에 대해서는 많은 연구가 행해져 왔는데[5, 6], 대기로부터 흡착된 수분이 그 마찰 마모 거동에 중요한 영향을 미치는 것이 관찰되었다[7-13]. 일반적으로 세라믹 재료는 다른 재료에 비해 대기중에서 화학적으로 매우 안정한 것으로 알려져 있으나, 미끄럼 표면에서는 수분 등과 마찰 화학 반응을 일으키기 쉬우며 이러한 반응은 마찰 마모

거동에 매우 중요한 영향을 미친다. 특히 질화규소는 다른 세라믹 재료에 비해 대기중의 수분에 의한 영향을 크게 받음이 보고되고 있다[9,11]. 질화규소-질화규소 간의 마찰실험 결과를 보면 대부분 고습도에서 마찰계수와 마모율이 감소하였다[7-9, 13,14]. 고습도에서는 마찰 화학 반응에 의해 심하게 수화된 실리카가 생겨나며, 이것이 질화규소의 마모와 마찰을 감소시킨다. 이러한 수화층은 미끄럼 표면사이에서 보호막 및 낮은 전단강도를 갖는 윤활막으로 작용하는 것으로 보고되는 경우가 많다[7-10]. 또한 대기중에서 흡착된 수분이 세라믹 재료의 경도를 감소시키고 소성 변형을 증가시킴으로써 파괴에 의한 마모의 진행을 억제하여 마모량을 감소시키는 것으로 생각되어지고 있다[8, 10].

습도가 질화규소의 마찰과 마모에 미치는 영향에 대한 연구는 주로 질화규소-질화규소 간 미끄럼 접

촉에 대하여 행해져왔으며 질화규소-금속 간의 마모 거동에 대한 연구[15-17]로서 습도의 영향에 대한 연구는 많지 않다. Ishigaki[11]가 질화규소-금속 접촉에 있어서 습도가 마찰에 미치는 영향을 조사한 바에 의하면 질화규소를 몇가지 종류의 순수 금속 및 금속 산화물과 미끄럼 접촉시켰을 때, 대부분의 경우 습도가 마찰계수를 증가시키는 것이 관찰되었다.

본 연구에서는 상압 소결(PLS) 및 소결체 열간 정수압 소결(PLS+HIP)의 두가지 방법에 의해 제조된 질화규소를 핀 시편으로 사용하였다. PLS법은 일반적으로 가장 널리 사용되는 질화규소의 소결법이며, PLS+HIP법은 두가지 단계로 구성되는 소결법으로, 먼저 질화규소의 분말성형체(green body)를 상압 소결(PLS)한 뒤 다시 열간 정수압 소결(PLS+HIP)을 행하여 더 높은 치밀화를 얻는다. PLS+HIP법은 열간 정수압 소결에 요구되는 밀봉 과정을 상압 소결 과정으로 대체하는 효과를 얻는 것이 특징이다. 본 연구에서는 고습도 및 저습도인 조건에서, 두 종류의 질화규소를 회전하는 베어링강 디스크에 대해 마찰시키는 실험을 행하여 습도와 소결 방법이 질화규소의 마찰 및 마모 특성에 미치는 영향을 관찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시편

상압 소결(PLS) 및 소결체 열간 정수압 소결(PLS+HIP)에 의해 제조된 질화규소를 핀 시편 재료로 사용하였다. 소결조제로는 입계相을 결정화시킴으로써 무정형상에 의한 고온 강도의 저하를 억제하는 작용을 하는  $Al_2O_3$ - $Y_2O_3$ (2wt%  $Al_2O_3$ , 6 wt%  $Y_2O_3$ )를 첨가하였다. 핀 시편은  $3 \times 4 \times 12$ mm 크기로 절단하였으며 미끄럼 접촉면은 다이아몬드 습식 랩핑 처리한 뒤, 헥세인액에 넣어 초음파 세척하였다.

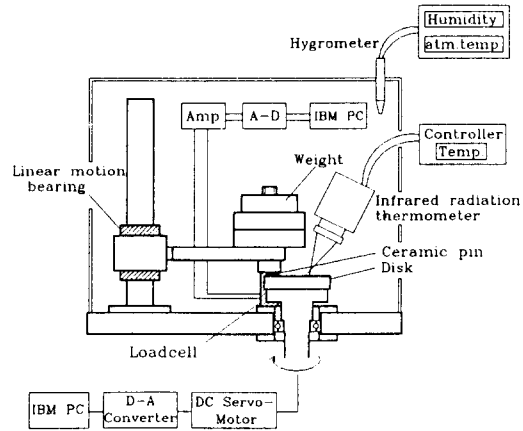
상대 마찰재료는 AISI-52100 베어링강을 사용하였으며 외경 94 mm, 내경 70mm, 두께 12mm의 디스크 형상으로 기계가공하였다. 베어링강 디스크는 담금질-풀림 열처리한 후 미끄럼면을 600메쉬 SiC 연마포 지로 연마하고 알콜과 헥세인으로 세척하였다. 연마된 면의 표면 거칠기는 RMS 값이  $0.03 \mu m$  정도인 것으로 측정되었다(이러한 낮은 표면 거칠기가 얻어진 것은 열처리한 베어링강의 높은 정도에 기인한 것으로 보인다).

Table 1은 PLS 질화규소 및 PLS+HIP 질화규소, 그리고 베어링강의 기계적 물성치를 나타낸 것이다.

**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 <sup>3</sup>	3.26 g/cm <sup>3</sup>	7.8 g/cm <sup>3</sup>
Vickers hardness (Hv)	13.6 GPa	14.2 GPa	7~8 GPa
Fracture toughness (Kic)*	5.0 MN/m <sup>2/2</sup>	5.5 MN/m <sup>3/2</sup>	-
MOR(4 pt. bending)	780 MPa	860 MPa	-
Young's modulus	310 GPa	310 GPa	210 GPa
Thermal expansion coefficient	$3.2 \times 10^{-6} ^\circ C$	$3.2 \times 10^{-6} ^\circ C$	$12.5 \times 10^{-6} ^\circ C$

\*Measured by indentation method



**Fig. 1. Schematic diagram of test rig**

### 2-2. 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용된 핀-온-디스크 마찰마모시험기의 개략도이다. 실험은 상온( $23^\circ C \pm 5^\circ C$ )에서 행해졌으며, 미끄럼 시험 조건을 일정 습도로 유지하기 위해 실험장치는 아크릴 덮개로 씌웠으며, 고습도( $95\% \pm 3\%$ )는 아크릴 덮개 내의 용기에 담긴 물의 증발을 이용하여, 그리고 저습도 ( $5\% \pm 3\%$ )는 팬으로 덮개 내의 공기를 유동시켜 제습제(실리카겔)를 지나게 함

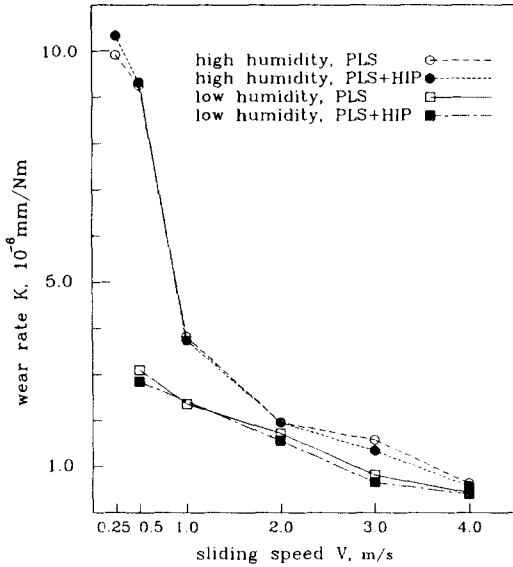


Fig. 2. Wear rates of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  with sliding speed

으로써 조성하였다. 습도의 측정에는 electronic capacitance type polymer film 센서식의 디지털 습도계를 사용하였다.

전자저울(해상도 0.01 mg)을 이용하여 실험전후 편 시편의 무게를 측정함으로써 마모량을 구하였다. 시편 홀더가 부착된 토크암에 로드셀을 접촉시켜 회전을 구속함으로써 회전 디스크면과 정지 편 시편 사이에 작용하는 마찰력을 측정했다. 마찰력에 의해 로드셀에 발생된 전기 신호는 스트레인 앰프와 A-D변환기를 거쳐 PC로 입력된다. 수분 흡착량에 중요한 영향을 미치는 각 미끄럼 속도에 따른 디스크 마모트랙에서의 평균 표면 온도를(접촉면에서의 섭광온도가 아닌 디스크의 bulk 온도), 최소반경 1.2mm의 적외선 복사 온도계(infrared radiation thermometer)를 사용하여 측정하였다. 예비 실험에서 측정해본 결과 디스크상의 마모 트랙의 온도는 편-디스크 접촉부 주위를 제외하고는 디스크 전체에 걸쳐 비슷한 값을 나타냄을 볼 수 있었다. 베어링강 디스크와 세라믹 핀과의 접촉면에서 원주방향으로 90° 떨어진 위치의 마모 트랙에 적외선 온도계의 측정 스폿을 맞추어 트랙의 평균 온도를 측정하였다.

수직하중과 마찰거리를 19.6 N(접촉면압 1.64 MPa) 과 21.6 km로 고정시키고 마찰속도를 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s, 4.0 m/s로 변화시켜 가며 마모 실험을 행하였다.

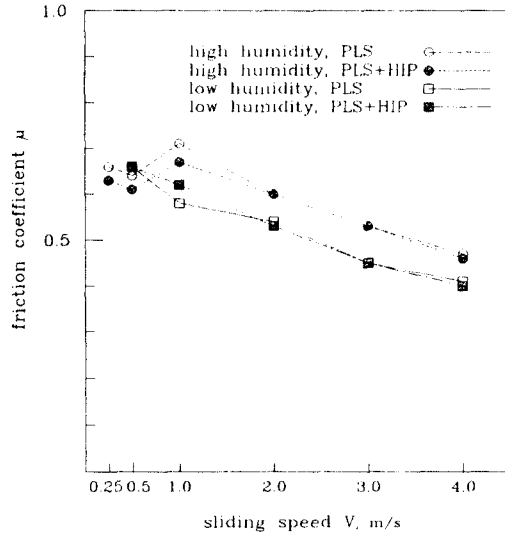


Fig. 3. Friction coefficients of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  with sliding speed

### 3. 실험 결과 및 고찰

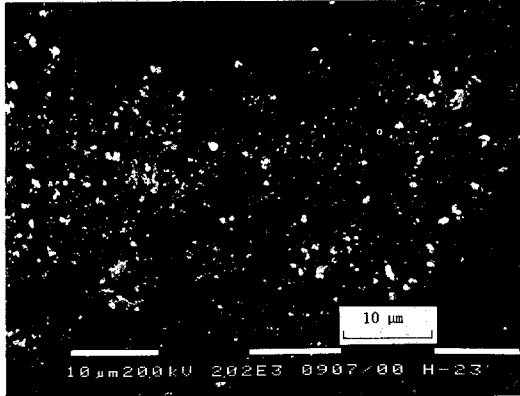
Fig. 2, Fig. 3은 두 종류(PLS, PLS+HIP)의 질화 규소 편 시편에 대해 저습 및 고습에서의 마모율과 마찰계수를 미끄럼 속도에 따라 나타낸 것이다. 마모율은 다음과 같이 정의되는 비마모량 K로 표시하였다.

$$K = V/LS$$

여기서 V는 마모체적, L은 수직하중, S는 미끄럼 거리를 나타낸다. 실험은 각각의 조건에 대하여 5회 내지 10회씩 행하였으며, 마찰력과 마모량의 평균값을 구하여 마찰계수와 마모율을 표시하였다.

질화규소의 마모율은 대부분의 속도조건에서 저습도에서보다 고습도에서 높게 나타났다. 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마모율은 감소하였으며, 또한 고습도와 저습도 간의 마모율의 차이도 감소하였다. 이것은 질화규소-질화규소 간의 마찰 실험에서, 고습도일 때 반응 수화층 생성에 의해 마모율이 감소하였던 것과는 대조적인 결과이다. 즉, 상대 마찰면이 베어링강 디스크인 경우, 질화규소에 대한 습도 및 마찰속도의 영향은 질화규소-질화규소의 마찰에서와는 매우 다르게 나타났다.

이러한 편 의 마모율 측정 결과가 베어링강 디스크로부터 핀쪽으로 이착되어간 베어링강 마모 입자의



**Fig. 4. Scanning electron micrograph of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  surface with wear (HIP+PLS  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , after sliding at 4.0 m/s at low humidity)**

무게에 영향을 받은 것은 아닌지 확인하기 위해 핀 시편의 표면을 EDAX로 분석해 보았으나 핀 표면에 존재하는 Fe 원소의 양은 습도나 마찰속도에 따른 특정한 경향을 나타내지 않았다. Fe 성분이 많은 마모입자가 마모표면의 여러 곳에서 발견되긴 했지만, 이러한 입자들에 함유된 Fe의 전체량은 극히 적었다.

Fig. 3은 각 조건에서의 마찰계수로서, 미끄럼 속도가 1.0 m/s에서 4.0 m/s로 증가함에 따라 마찰계수는 감소하며 저습도에 비해 고습도에서 높은 값을 나타냈다. 열간 가압 소결한 질화규소에 대해 몇가지 종류의 순수 금속 및 금속화물을 상대 마찰면 재료로 사용한 Ishigaki[11]의 실험에서도 이와 유사하게 고습도에서 높은 마찰계수가 나타났다.

Fig. 4는 질화규소 표면의 마모 입자의 전자현미경 사진이다. WDS(wavelength dispersive spectroscopy) 분석에 의하면 이러한 마모 입자의 성분은 산소(O)를 4%-8%, 철(Fe)을 0.1%-20% 함유하였고 소결제로 첨가한 알루미늄(Al)과 이트륨(Y) 등을 소량 함유하였다.

Fig. 5는 고습도에서 여러가지 미끄럼 속도에 대한 핀 시편의 마모 표면이다. 미끄럼 속도가 작을수록 핀 시편의 표면은 매끈해지며 미끄럼 속도가 증가함에 따라, 핀 시편의 표면에 미끄럼 방향으로 균일하게 생겨나는 골(groove)은 점차 넓고 깊어진다. 마모율이 높을수록 대체로 마모면은 매끈했다. 저습도에서도 속도에 따라 비슷한 경향이 관찰되었으며 고습도에 비해 골은 좀더 깊어졌다. 이러한 매끈한 표면은 수분과 세라믹 마모 입자간의 기계적 또는 기계화학적

작용에 의한 미세 연삭 작용과 연마 작용의 결과인 것으로 생각된다.

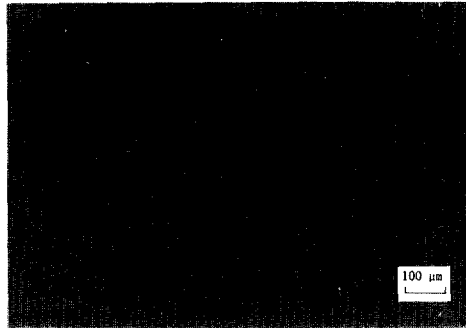
PLS 질화규소와 PLS+HIP 질화규소는 마모율, 마찰계수 및 마모면의 형상에서 큰 차이를 보이지 않았다. PLS+HIP 질화규소의 마모율은 미끄럼속도가 2.0 m/s, 3.0 m/s, 그리고 4.0 m/s 일때는 PLS 질화규소에 비해 10% 정도 낮은 값을 나타냈으나, 이러한 내마모성의 증가는 마모율이 급격히 증가하는 1.0 m/s 나 0.5 m/s 영역에서는 나타나지 않았다.

본 연구에서 질화규소 시편이 베어링강과 미끄럼 접촉을 할 때 마모율이 고습도에서 커지는 것은, 다음과 같은 세가지 효과에 의한 것으로 생각된다.

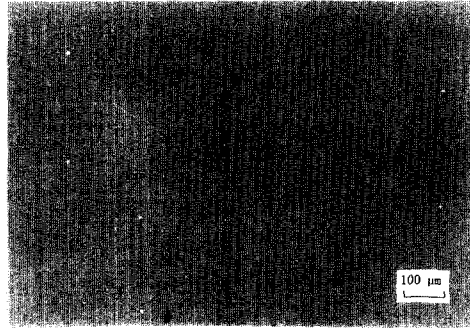
첫째로, 표면에 흡착된 수분이 미끄럼면의 기계적 물성이 표면에 화학 흡착된 수분층의 존재에 의해 뚜렷하게 영향을 받을 수 있다는 것이 많은 연구[18, 19]에서 밝혀져 왔다. 이러한 효과는 마이크로 정도 측정을 통해 잘 나타난다. Ishigaki [8]는 열간 가압 소결한 질화규소에 대해 건조 질소 분위기에서와 실험실 대기중에서 하중 1 N을 가하면서 마이크로-비커스 경도를 측정하였다. 경도 값은 건조 질소에서 보다 실험실 대기에서 14%나 낮은 값을 나타냈다. 지금까지의 여러 연구결과는 질화규소-질화규소 간 마찰에서는 흡착 수분에 의한 이러한 정도의 감소가 미소 파괴에 의한 마모의 진행을 억제함으로써 마모율을 낮추는 것으로 보고되어 왔다. 그러나 금속재료의 경우에는 일반적으로 흡착 수분에 의한 정도의 감소가 매우 작다[18, 19]. 따라서 질화규소의 상대 마찰면이 금속인 경우에는 마찰면에서 질화규소 쪽이 경도 저하에 의해 미세 연삭 마모에 의한 마모가 가속화될 수 있다.

두번째로, 고습도에 의한 또다른 효과로서 흡착수분에 의해 베어링강 디스크의 산화가 가속화되고 이때 생겨난 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )입자가 일으키는 연삭 작용이 영향을 미쳤을 것이다. 많은 경우에 세라믹-강 간의 마찰 접촉면에서는 강 입자가  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  및 소량의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 로 산화되고 이것이 미크론 이하 크기의 매우 경한 입자를 형성하여 미끄럼 접촉하는 세라믹 핀의 표면에 연삭 마모를 일으킨다[20].

세번째로, 수분에 질화규소 표면에서의 실리카 생성 반응과 같은 부식효과의 증가를 생각할 수 있다. Kapsa 등[10]의 연구에 의하면, 열간 가압 소결한 질화규소에 다이아몬드 팁을 마모시키는 실험에서, 저습도에서 파괴에 의한 마모가 심하게 발생하지 않는 경우에는 고습도에서 마모량이 증가하는 결과가 나



(a) sliding speed 0.25 m/s  
(PLS Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, at high humidity)



(b) sliding speed 0.5 m/s  
(PLS Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, at high humidity)



(c) sliding speed 1.0 m/s  
(PLS Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, at high humidity)



(d) sliding speed 2.0 m/s  
(PLS Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, at high humidity)

Fig. 5. Surfaces of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> after experiment

타났다. 또한 Sasaki[12]는 질화규소끼리의 마모 실험에서, 상대습도 50%에서 최소 마모가 얻어지고 그 이상의 고습에서는 습도 증가에 따라 질화규소와 수분과의 마찰 화학 반응이 증가하면서 마모율이 다시 커졌다고 보고했다. 그러나 본 실험에서는 WDS 분석결과 핀 시편의 마모표면에서 검출되는 산소 원소의 양이 습도나 미끄럼 속도에 따라 특정한 경향을 보이지 않았으며 따라서 질화규소와 베어링강 간의 마찰에서는 부식 마모가 질화규소를 대상으로 한 다른 실험에서처럼 지배적인 인자로 작용하지는 않은 것으로 생각된다.

한편 미끄럼 속도는 일반적으로 여러가지 면에서 마모 과정에 영향을 미칠수 있다. 본 실험의 경우 미끄럼 속도에 의해 가장 큰 영향을 받는 인자의 하나는 회전하는 디스크표면의 마모트랙에서의 온도 상승 및 핀 디스크 접촉면에서의 온도 상승일 것이다.

Fig. 6은 실온 18°C에서 미끄럼 속도의 증가에 따른 디스크 표면이 온도변화를 나타낸 것이다. 미끄럼

표면의 온도는 미끄럼 속도가 0.25 m/s에서 4.0 m/s로 증가함에 따라 22°C에서 57°C까지 상승하였다. 이러한 온도변화는 주위 대기로부터 물리 흡착되는 수분의 양을 크게 감소시킨다.

미끄럼 마찰시 핀-디스크 접촉면에서의 온도 상승은 그 직접적인 측정이 매우 곤란하다. 마찰면 표면돌기 접촉점에서 순간적으로 발생하는 극히 높은 온도를 섬광온도(flash temperature)라 부르기도 하는데, 많은 연구에서 이 섬광온도를 여러가지 방법으로 계산 또는 실험을 통해 측정하려는 시도가 있어왔다. 이러한 섬광 온도는 보통의 미끄럼 조건에서도 수백 °C까지 상승하며, 상당한 고온까지 미끄럼 속도에 비례하여 상승하는 것으로 알려져 있다[21]. Shim과 Youn[22]은 회전하는 금속 디스크에 대한 복합 재료 핀의 마찰 실험에서 열전쌍을 이용하여 핀의 마찰면 바로 아래의 온도를 측정하였는데, 이때 미끄럼 속도가 0.5 m/s에서 5 m/s로 증가하면서 그 온도가 크게 증가했음을 확인했다.

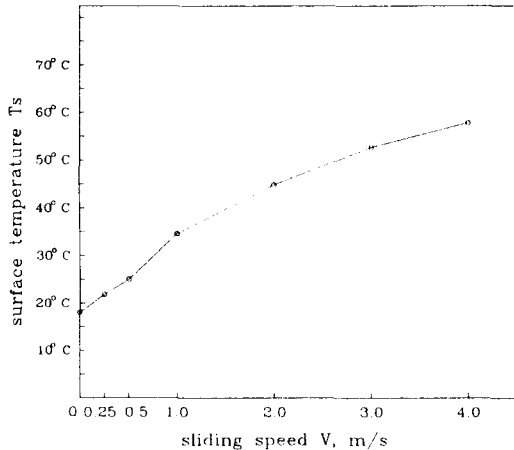


Fig. 6. Surface temperature of bearing steel disk measured by radiation thermometer (PLS+HIP  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , at high humidity)

디스크 표면에서의 온도 증가는 硬한 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 입자의 생성과 질화규소 핀의 마찰면에서 부식 반응이 진행되기 위해 필요한 물분자의 흡착량을 감소시킨다. 한편 디스크-핀 접촉면에서의 온도 증가는 핀 표면에 화학 흡착된 물 분자를 desorption 시킴으로써 핀의 경도 증가를 감소시킨다. 즉 미끄럼 속도의 증가에 따라 고습도의 영향이 줄어들어 효과가 생겨난다. 또한 미끄럼 속도가 커지면서 마찰면의 온도 증가에 의한 고온 경도의 저하는 질화규소에 비해 베어링강에서 훨씬 크게 나타나기 때문에 질화규소 핀은 연삭 작용에 의한 마모가 감소하게 될 것이다. 그 결과 미끄럼 속도가 증가함에 따라 핀의 마모율은 감소한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상압 소결(PLS) 질화규소 및 소결체 열간 가압 소결(PLS+HIP) 질화규소의 마찰 및 마모 특성을 고습도와 저습도에서 또 여러가지 미끄럼 속도에 대하여 실험을 통해 조사하였으며 그 결과를 수분 흡착과 표면 온도의 측면에서 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마모율은 대부분의 미끄럼 속도 조건에서 저습도보다 고습도일 때 뚜렷이 큰 값이 나타났다. 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마모율은 감소하였으며, 고습도와 저습도 간의 마모율의 차이도 줄어들었다. 질화규소 핀은 고습도에서 미끄럼 속도가 낮을 때

가장 높은 마모율을 나타냈다.

(2) PLS 질화규소와 PLS+HIP 질화규소는 마찰 및 마모 특성에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 단, 1.0 m/s 이상의 미끄럼 속도영역에서 PLS+HIP 질화규소쪽이 약간 작은 마모율을 보였다.

(3) 미끄럼 속도가 작을수록 핀의 마모 표면은 매끈해졌다. 미끄럼 속도가 증가함에 따라 핀 표면에는 균일한 폭을 갖는 골이 미끄럼 방향으로 생겨났다. 저속 영역에서 매끈한 표면이 얻어진 것은 미세한 세라믹 마모입자,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  입자 등에 의한 기계화학적 미세 연삭 및 연마 작용의 결과로 보인다.

(4) 고습도에서 질화규소의 마모율이 높은 것을 다음 3가지 효과에 의해 설명했다. 첫째는 흡착된 물분자에 의한 재료 물성의 변화이다. 둘째는 베어링강의 산화에 의해 생성된, 주로  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 로 구성된 경한 입자가 일으키는 연삭 작용이다. 세번째는 수분에 의한 질화규소 표면에서의 부식 효과이다.

(5) 미끄럼 속도의 증가는 디스크의 표면 온도 및 핀-디스크 접촉면의 섭광 온도를 상승시킴으로써 질화규소의 마모율에 미치는 습도의 영향을 감소시키고 또한 질화규소 핀에 비해 베어링강 디스크의 경도를 월등히 심하게 저하시킴으로써 핀 시편의 마모율을 감소시키는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. S.S. Kim, K. Kato, K. Hokkirigawa, H. Abe, "Wear mechanism of ceramic materials in dry rolling friction," ASME J. of Tribology, Vol. 108, pp. 522-526, 1986.
2. H. Aramaki, Y. Shoda, Y. Morishita, T. Sawamoto, "The performance of ball bearings with silicon nitride ceramic balls in high speed spindles for machine tools," ASME J. of Tribology, Vol. 110, pp. 693-698, 1988.
3. "progress with ceramic ball bearings," Ceramic Industry International, Vol. 41, pp. 41-44, 1990.
4. D.W. Richerson, P.M. Stephan, "Evolution of applications of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -based materials," Materials Science Forum, Vol. 47, pp. 282-307, 1989.
5. J.F. Braza, H.S. Cheng, M.E. Fine, "Silicon nitride wear mechanics: Rolling and sliding contact," STLE TRANS., Vol. 32, pp. 439-446, 1989.
7. M.K. Kato, "Tribology of ceramics," Wear, Vol. 136, pp. 117-133, 1990.
8. H. Ishigaki, I. Kawaguchi, M. Iwasa, Y. Toibana, "Friction and wear of hot pressed silicon nitride and other ceramics," ASME J. of Tribology, Vol. 108, pp. 514-521, 1986.

9. H. Ishigaki, R. Nagata, M. Iwasa, "Effect of adsorbed water on friction of hot-pressed silicon nitride and silicon carbide at slow speed sliding," *Wear*, Vol. 121, pp. 107-116, 1988.
10. P. Kapsa, Y. Enomoto, "Sliding damage on hot-pressed and sintered silicon nitride caused by a diamond tip under controlled humidity," *Wear*, Vol. 127, pp. 65-83, 1988.
11. K. Demizu, H. Ishigaki, R. Wadabayashi, "Dry friction of silicon carbide and silicon nitride against metals : The effect of humidity and oxide films," *ASME J. of Tribology*, Vol. 11, pp. 401-405, 1980.
12. S. Sasaki, "The effects of the surrounding atmosphere on the friction and wear of alumina, zirconia, silicon carbide and silicon nitride," *Wear*, Vol. 134, pp. 185-200, 1989.
13. Y. Imada, K. Kamamura, F. Honda, K. Nakajima, "The tribological reaction accompanying friction and wear of silicon nitride containing titanium nitride," *ASME J. of Tribology*, Vol. 114, pp. 230-235, 1992.
14. K. Komvopoulos, H. Li, "The effect of tribofilm formation and humidity on friction and wear properties of ceramic materials," *ASME J. of Tribology*, Vol. 114, pp. 131-140, 1992.
15. C.V. Cooper, C.L. Rollend, D.H. Krouse, "The unlubricated sliding wear behavior of a wrought cobalt-chromium alloy against monolithic ceramic counterfaces," *ASME J. of Tribology*, Vol. 111, pp. 668-674, 1989.
16. K. Miyoshi, "Fundamental considerations in adhesion, friction, and wear for ceramic-metal contacts," *Wear*, Vol. 141, pp. 35-44, 1990.
17. J. Denape, A. Marinotto, J.A. Petit, "Roughness effect on silicon nitride sliding on steel under boundary lubrication," *Wear*, Vol. 159, pp. 173-184, 1992.
18. Y. Tsuya, "Tribology of ceramics," *Proc. JSLE int. tribology conf.*, pp. 641-646, 1985.
19. H. Shimura and Y. Tsuya, "Effects of atmosphere on the wear rate of some ceramics and cermets," *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, pp. 452-461, 1977.
20. R.L. Mehan, S.C. Hayden, "Friction and wear of diamond materials and other ceramics against metal," *Wear*, Vol. 74, pp. 195-212, 1981-1982.
21. N.P. Suh, *Tribophysics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New jersey, pp. 395-412, 1986.
22. H.H. Shim, O.K. Kwon, J.R. Youn, "Effects of fiber orientation and humidity on friction and wear properties of graphite fiber composites," *Wear*, Vol. 157, pp. 141-149, 1992.