

Al₂O₃-TiC의 마찰 및 마모특성에 관한 연구

조구환* · 이기현 · 김경웅

윤활실험실 KAIST, *한국과학기술원 정밀공학과

A Study on the Friction and Wear Characteristics of Al₂O₃-TiC

Gu-Hwan Cho, Kee-Hyun Lee, Kyung-Woong Kim

Department of Precision Engineering and Mechatronics
Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract—Friction and wear behavior of hot isostatic pressed Al₂O₃-TiC was experimentally examined. Pin-on-disk type friction and wear apparatus was designed and manufactured for the experiment. The experiments were conducted under unlubricated sliding motion in both low and high humidity for three kinds of sliding speed. Al₂O₃-TiC and bearing steel were used as counterface materials. Friction coefficient, wear rate, and surface roughness were measured. Wear surface and wear debris were observed through optical microscope and SEM and analyzed by EDAX. The results showed that the counterface materials, the sliding speed, and the moisture at the sliding surface have significant influence on the friction coefficient and wear rate of Al₂O₃-TiC.

1. 서 론

엔지니어링 세라믹스(engineering ceramics)는 저 밀도, 고경도, 낮은 열팽창률, 내열충격성, 내식성, 내약품성, 고강도 등의 우수한 열적, 화학적, 기계적 성질을 지니고 있기 때문에 마찰 및 마모특성이 중요시되는 여러 공학적 분야에서 기존의 재료를 대체하여 사용범위가 확대되고 있으며, 앞으로 많은 분야에서 응용 잠재력이 큰 재료이다. 그러나, 세라믹스는 취성이 크다는 단점을 지니고 있어 가혹한 조건에서 사용시 tribology 성질을 저하시키는 요인이 되고 있다. 따라서, 세라믹스에 인성을 부여함으로써 tribology 성질의 향상을 기대할 수 있다.

Al₂O₃-TiC는 취성을 보완하기 위해 2상(two phase) 구조재료로 연구개발되었으며, 최근 들어 절삭공구로서 공구수명과 절삭속도의 측면에 대한 연구[1, 2]나 컴퓨터 디스크 헤드 슬라이더 재료로서 기동과 정지시(CSS : contact start stop)의 마찰 및 마모에 대한 연구[3, 4]가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 기본적인 미끄럼 마찰 및 마모 거동에 대한 연구는 거의 없는

상태이며, 실제로 다른 엔지니어링 세라믹스에 비해 물리적인 정보가 그다지 많지 않은 재료이므로 Al₂O₃-TiC에 대한 기본적인 미끄럼 마찰 및 마모특성의 파악은 중요한 의미를 가질 것이다.

따라서, 본 연구에서는 Al₂O₃-TiC와 상대면 재료로 Al₂O₃-TiC와 베어링강을 사용하여 여러 조건에서 마찰 및 마모실험을 행하고 나타난 현상의 관찰을 통해 Al₂O₃-TiC의 마찰 및 마모특성을 설명하고자 한다.

2. 실 험

2-1. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1과 Fig. 2는 마찰 마모실험을 위해 제작한 핀 온 디스크(pin-on-disk)형 실험장치의 개략도이다. DC 서어보 모터가 타이밍 벨트와 타이밍 풀리를 통해 3개의 회전축을 구동시킨다. 각 회전축 위에는 디스크 시편이 올려져 고정되며 핀과 접촉하며 회전하게 된다. 따라서 3회의 실험을 동시에 행할 수 있다.

핀 시편은 보의 한쪽 끝에 위치한 핀 시편 홀더에 고정되며, 보의 반대쪽은 연직방향 운동과 회전운동을

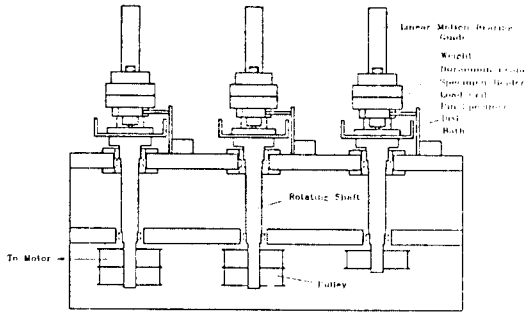


Fig. 1. Schematic diagram of the test rig

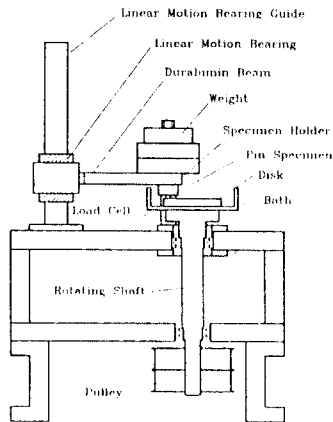


Fig. 2. Schematic diagram of the test rig

자유로이 할 수 있는 직선운동 베어링(linear motion bearing)이 부착되어 있다. 따라서, 핀과 회전디스크의 접촉 마찰면에는 직선운동 베어링, 보, 핀 시편홀더, 핀 시편, 추(dead weight)의 무게의 합이 수직하중으로 작용한다.

이 때 접촉면에서 발생하는 마찰력은 보를 직선운동 베어링 안내축을 중심으로 회전시키려고 하며 이러한 보의 운동을 구속하여 그 구속력을 측정함으로써 마찰력을 측정한다. 마찰력은 직사각형 단면의 외팔보에 스트레인 게이지를 부착시킨 로드 셀을 제작하여 측정하였으며, 측정된 값을 컴퓨터에 입력시켜 각 조건에서 시간에 따른 마찰력의 변화를 관찰하였다.

실험에 앞서 핀과 디스크는 표면 불순물을 제거하기 위하여 메탄올(Methanol)에 1시간 동안 담근후 상온 건조시키고, 다시 헥세인(Hexane)으로 닦고 건조시킨후 핀 시편의 질량을 측정하였다. 핀 시편의 질량은 해상도 0.01 mg의 전자저울로 10회씩 측정된 평균값을 사용하였다.

Table 1. Al₂O₃-TiC의 주요 물성치

밀도(g/cm ³)	4.3	굽힘강도(kg/cm ²)	8500
강도(Hv)	2050	열전도도(cal/cm·sec·°C)	0.08
인성(MN/m ^{1.5})	5.0	열팽창계수(×10 ⁻⁶ /°C)	6.3

속도 변화에 따른 수분의 영향을 살펴보기 위하여 미끄럼 속도가 1.0 m/sec, 2.0 m/sec, 4.0 m/sec인 경우에 대해 10% RH 이하 및 95% RH 이상의 두 가지 극단적인 상대습도 조건에서 실험을 행하였다. 모든 실험조건에서 마찰거리는 10 km, 수직하중은 2 kg으로 하였다.

실험장치의 상부는 아크릴 덮개로 씌웠으며, 95% 이상의 상대습도는 물그릇을 넣어 돔으로써, 10% 이하의 상대습도는 덮개 안에 실리카 겔(silica gel)을 넣어서 유지시켰다. 습도는 디지털 습도계로 측정했다.

실험 후의 마모 입자와 마찰표면의 상태를 광학현미경(optical micrograph) 또는 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, 표면거칠기를 측정하고 EDAX(energy dispersive X-ray analysis) 분석을 행하였다.

실험 후의 시편 무게는 실험 전의 불순물 제거 과정과 같은 과정을 거친 후에 역시 10회씩 측정된 평균값을 구하였다. 실험은 모든 조건에서 2회 내지 4회씩 행하였다.

2-2. 시편 재료

실험에 사용된 세라믹 시편인 Al₂O₃-TiC는 70wt.% Al₂O₃와 30 wt.% TiC이며 다음과 같은 제조방법으로 쌍용 중앙연구소에서 제조한 것이다.

1) 원료분말 상태의 70 wt.% Al₂O₃와 30 wt.% TiC를 알루미나 볼 밀(alumina ball mill)을 이용하여 메탄올(methanol)하에서 24시간 동안 혼합, 분쇄시킨다.

2) 2.0 ton/cm²의 압력으로 원료분체를 정수압 성형(hydrostatic pressing)한다.

3) 1760°C로 2시간 동안 Ar 가스분위기에서 1차로 상압소결(sintering)한다.

4) 1400°C에서 2000기압으로 2시간 동안 2차 소결한다(HIP; hot-isostatic pressing).

Table 1은 실험에 사용된 Al₂O₃-TiC의 주요 물성치이다.

핀 시편은 마찰면이 4 mm×3 mm, 높이가 14 mm인 직육면체 바아로서 실험전에 SiC 연마지를 사용

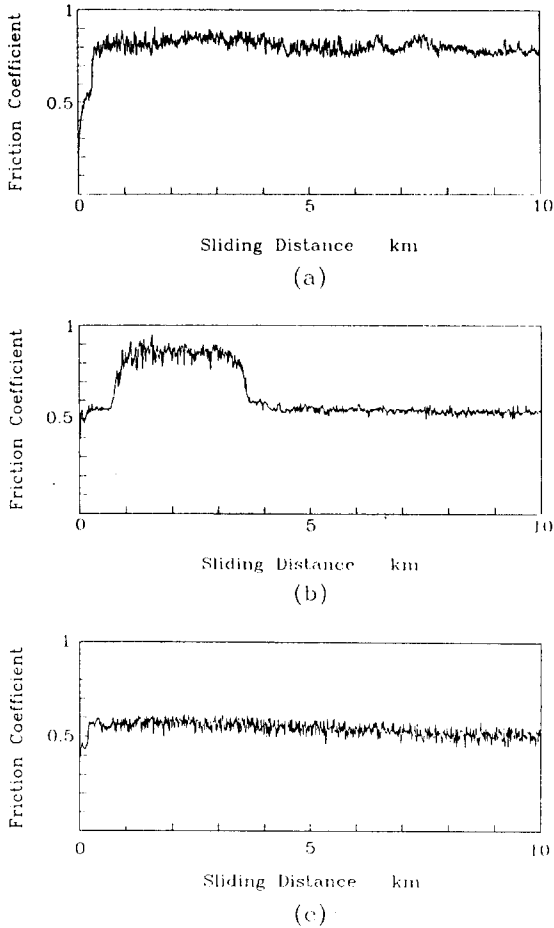


Fig. 3. Friction coefficient with sliding distance
(Speed = 1.0 m/sec, Ceramic-ceramic)
(a) Low humidity, (b) High humidity
(Speed = 1.0 m/sec, ceramic-steel)
(c) Low humidity

하여 220, 400, 600번의 순서로 방향성 없이 습식 연마하였으며, Talysurf 6 표면조도 측정기로 측정된 R_a 값은 $0.1 \mu\text{m}$ 정도였다. 핀 시편은 4 mm인 면이 마찰 트랙의 폭이 되도록 하였다.

디스크 시편의 재료로는 열처리하지 않은 베어링강 (STB2; $H_v = 220$)과 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 를 사용하였다.

베어링강 디스크는 직경 94 mm, 두께 10 mm로서 마찰표면은 핀 시편과 같은 식으로 건식 연마하였으며, R_a 값은 $0.05 \mu\text{m}$ 정도였다.

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 디스크는 직경 76 mm, 두께 3 mm이며 미끄럼 표면은 자기디스크 실험용으로서 다이아몬드 입자를 사용하여 입자 직경 20, 3, $0.5 \mu\text{m}$ 의 순서로

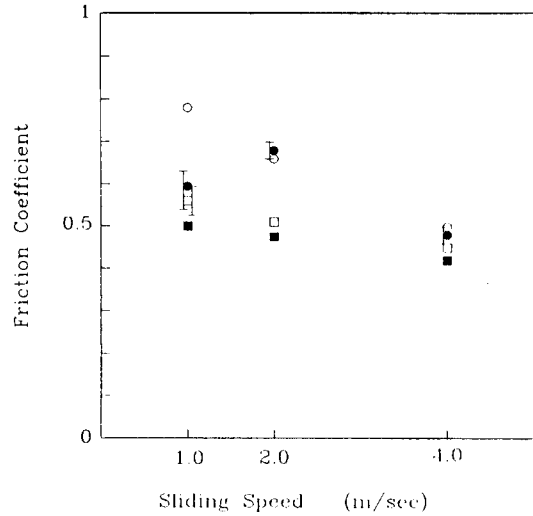


Fig. 4. Relationship between friction coefficient and sliding speed

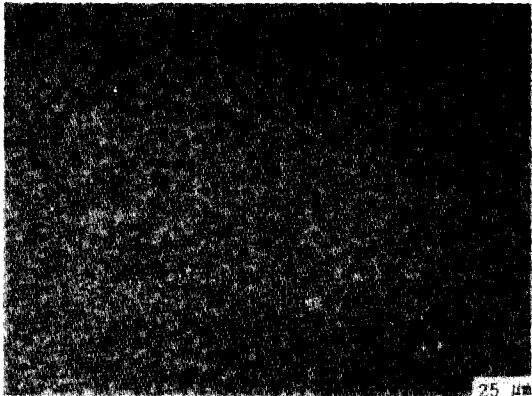
○; Low humidity, ceramic-ceramic
●; High humidity, ceramic-ceramic
□; Low humidity, ceramic-steel
■; High humidity, ceramic-steel

랩핑한 것이다. SLOAL DEKTAK 2 표면조도 측정기에 의해 측정된 R_a 값은 6.4 nm 였다.

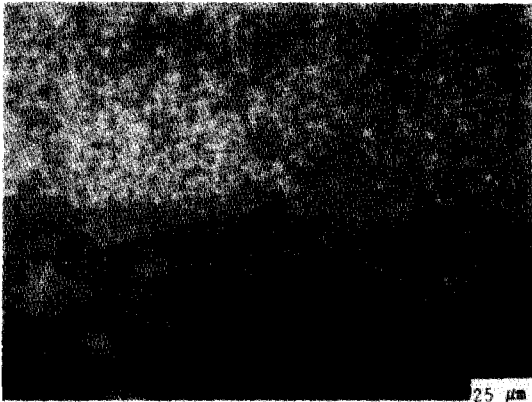
3. 결과 및 고찰

활주 거리에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 디스크 재료가 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 인 경우, 마찰계수는 정상상태에 이르기까지 그 평균값이나 변화하는 양상에 있어서 많은 차이가 있으나, 대체적으로 낮은 값에서 증가한 후에 정상상태를 유지하거나(저습도의 경우와 고습도에서 속도가 2.0 m/sec와 4.0 m/sec인 경우, Fig. 3(a)), 낮은 값에서 증가하여 다시 감소한 후에 정상상태를 유지(고습도에서 속도가 1.0 m/sec와 2.0 m/sec인 경우, Fig. 3(b))했다. 디스크 재료가 베어링강인 경우의 마찰계수는 거의 모든 실험조건에서 초기에 증가한 후에 정상상태를 유지 [Fig. 3(c)]하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4에 마찰속도에 대한 정상상태의 마찰계수를 나타내었다. 디스크 재료가 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 인 경우 정상상태 마찰계수는 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여주나, 고습도에서 속도가 1.0 m/sec인 경우에는 예외적인 결과를 나타내고 있다. 디스크 재료가 베어링강인 경우의 정상 상태 마찰계수는 상대면이 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}$



(a)



(b)

Fig. 5. Optical micrographs of ceramic surface ($\times 400$)
 (a) before experiment, (b) after experiment
 (1.0 m/sec, high RH, ceramic-ceramic)

TiC인 경우에 비해 낮게 나타났다. 또한 습도 차이의 영향을 거의 받지 않고 있으며, 속도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5는 실험전후 핀 시편의 표면형상이다. Fig. 5(a)에서 흰색 부분은 TiC이며 검게 보이는 부분은 Al₂O₃이다. Fig. 5(b)는 디스크재료가 Al₂O₃-TiC인 경우에 전자현미경(SEM)으로 관찰한 핀 시편 마모면이다. 그림에 나타나 있는 것과 같이 마모된 면은 마모입자가 떨어져 나간 흔적이 보이며 균열(crack)이 발견되고 있다.

Fig. 7은 Al₂O₃-TiC 디스크의 마찰면과 마모입자의 형상이다. Fig. 7(a)에 나타난 디스크의 마찰면은 핀 마찰면의 형상과 별다른 차이를 보여주지 않고 있다. Fig. 7(b)에 나타난 마모 입자의 형상은 부분적으로

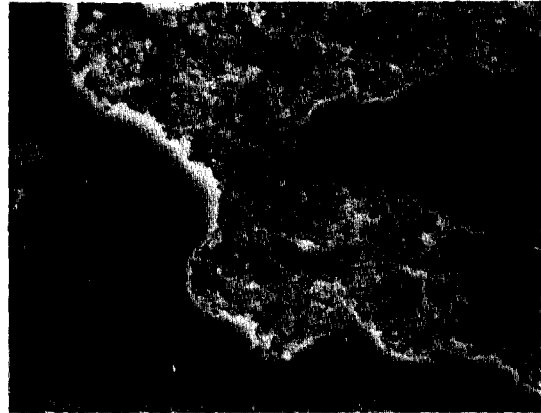
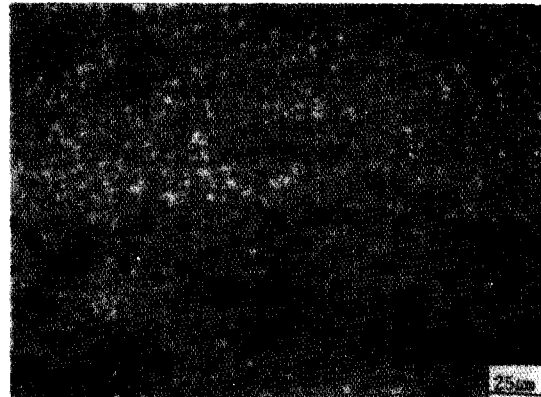
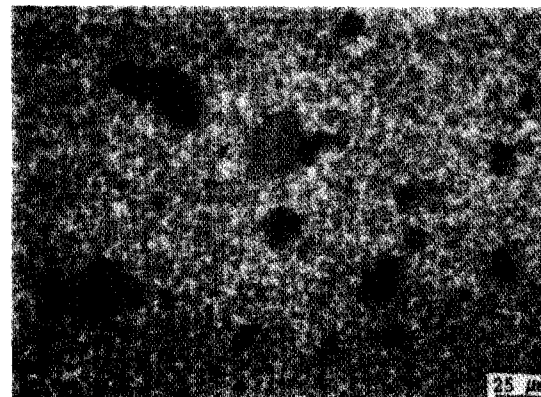


Fig. 6. Scanning electron micrograph of worn ceramic surface
 (4.0 m/sec, high RH, ceramic-ceramic)



(a)



(b)

Fig. 7. Optical micrographs ($\times 400$)
 (a) wear track of ceramic disk
 (b) wear debris
 (1.0 m/sec, high RH, ceramic-ceramic)

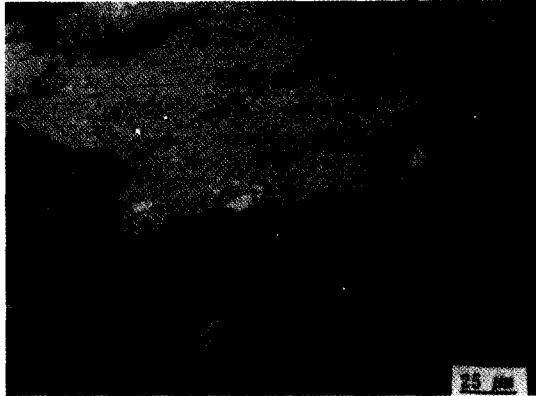


Fig. 8. Optical micrograph of ceramic surface showing transfer film ($\times 400$)
(4.0 m/sec, high RH, ceramic-steel)

얇은 박판형 입자도 관찰되나 마모 입자의 대부분은 일정한 모양을 가지고 있지 않으며, 크기에 있어서도 수십 μm 에서 1 μm 이하까지 관찰되었다.

디스크 재료가 베어링강인 경우의 실험후 핀 시편의 현미경 사진이 Fig. 8에 나타나 있다. 핀 시편의 마찰면은 어두운 부분과 밝은 부분으로 구성되어 있으며, 표면 조도측정 결과 어둡게 나타난 부분은 실험전 표면보다 매우 거칠어져 있었다.

EDAX 분석결과(Fig. 9) 밝게 나타난 부분에서는 실험전에 나타나지 않았던 Fe 에너지가 검출되었으며, 이것은 Fig. 8에서 밝게 나타난 부분이 디스크면에서 세라믹 핀으로 형성된 물질이착막(transfer film)이기 때문인 것으로 보인다. 그리고 속도가 증가함에 따라 이 물질이착막은 두꺼워지며 연속적으로 형성되어 가는 것이 관찰되었다.

또한, 마모 입자의 대부분은 베어링강 디스크의 심한 마모로 인해 생성된 것이며 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 의 마모 입자는 잘 발견되지 않았다. 마모 입자는 마찰열에 의해서 심하게 산화되어 있는 미세한 분말 형태와 산화되지 않은 마모 입자로 구성되어 있으며 저속에서 고속으로 갈수록 마모 입자의 색깔이 갈색에서 검은 색으로 변화하였다. 이는 Fe_2O_3 에서 FeO 또는 Fe_3O_4 로 변화[5-7]하였기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 10에 디스크 재료가 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 인 경우와 베어링강인 경우의 핀시편의 마모율을 속도에 대해 나타내었다. Fig. 10에 나타나 있는 바와 같이 디스크 재료가 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 인 경우는 속도가 증가함에 따라 마모율이 증가되고 습도차이에 의한 마모율의 차이가

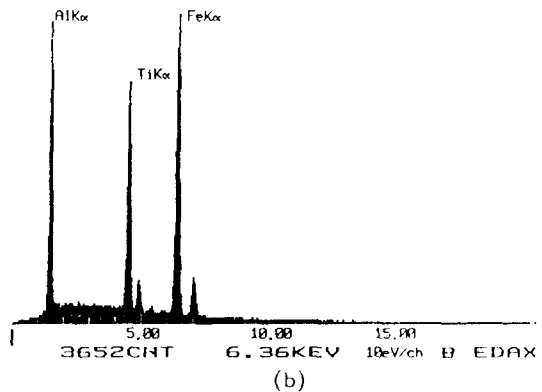
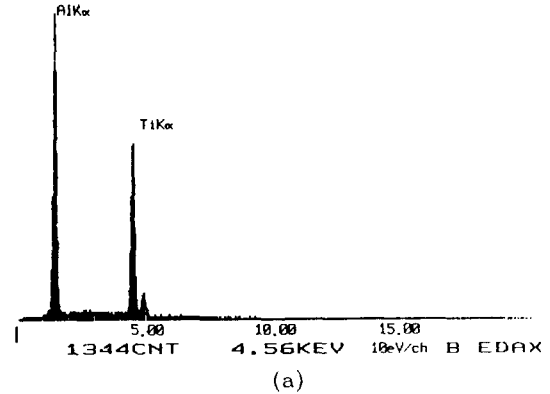


Fig. 9. EDAX
(a) before experiment
(b) after experiment
(4.0 m/sec, high RH, ceramic-steel)

줄어드는 경향을 나타내고 있다. 상대면이 베어링강인 경우의 마모율은 상대면이 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 인 경우보다 매우 낮게 나타났으며, 속도나 습도변화에 따른 마모율의 차이가 거의 나타나지 않고 있다.

이와 같이 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 의 마모는 마찰계수의 경우에서와 마찬가지로 실험조건에 따라 속도와 수분의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

미끄럼 속도가 증가함에 따라 마찰면에서 마찰온도가 상승하며 따라서 마찰표면이 연화되어 낮은 마찰계수와 높은 마모율을 나타낸 것으로 판단된다. 고습도, 저속에서는 표면에 존재하고 있는 수분흡착막이나 지속적인 마찰 및 마모에 의해 표면에서 생성되는 반응 수화물질이 윤활 작용을 하여 저습도, 저속의 경우보다 마찰계수와 마모율이 낮게 나타난 반면, 고속에서는 마찰온도의 상승으로 수분흡착막이나 반응 수화물질의 형성이 억제되어 습도 차이에

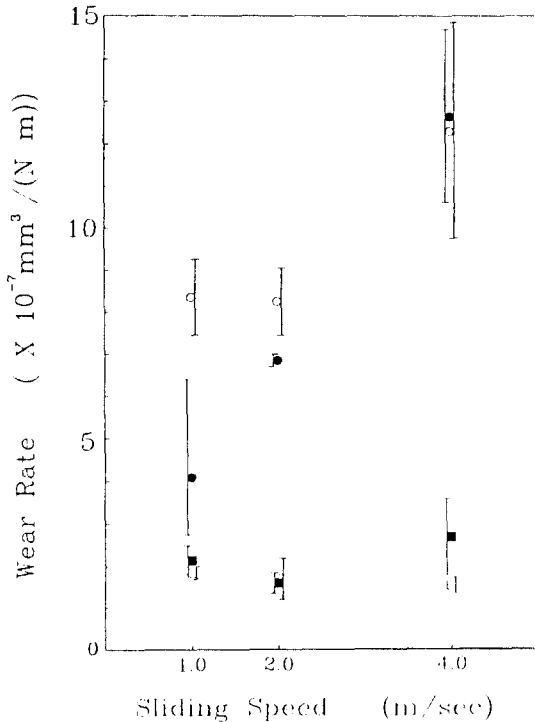


Fig. 10. Relationship between wear rate and sliding speed

- ; Low humidity, ceramic-ceramic
- ; High humidity, ceramic-ceramic
- ; Low humidity, ceramic-steel
- ; High humidity, ceramic-steel

의한 영향이 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다.

디스크 재료가 베어링강인 경우에는 디스크면의 경도가 상대적으로 낮고 핀에 형성된 물질이착막에 의해 하중의 많은 부분이 지지되므로 핀 시편에 작용하는 응력 집중이 낮아져서 균열의 발생과 진전이 줄어들어 핀 시편의 마모율에 매우 낮게 나타난 것으로 판단된다. 앞에서 언급된 것과 같이 핀 표면에서 물질이착막이 형성되어 접촉의 많은 부분이 물질이착막과 디스크면간의 접촉이 될 것이다. 따라서 마찰 및 마모에 대한 습도의 영향이 비교적 적은 것으로 알려져 있는 급속간 접촉상태에 접근하게 되어 습도가 마찰 및 마모에 미치는 영향이 적어진 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al₂O₃-TiC의 마찰 및 마모거동을

Al₂O₃-TiC와 베어링강을 상대 재료로서 사용하여 실험적으로 고찰하였다. Al₂O₃-TiC의 마찰 및 마모에 있어 속도나 수분의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다.

1. 상대면이 Al₂O₃-TiC인 경우

1) 속도가 증가함에 따라 마찰 계수는 감소하며, 마모율은 증가하는 경향을 나타내었다.

2) 습도가 높아지면 마찰계수와 마모율이 감소되나, 고속에서는 마찰계수 및 마모율에 미치는 습도의 효과가 나타나지 않았다.

2. 상대면이 베어링강인 경우

1) 속도가 증가함에 따라 마찰계수는 감소하나, 마모율의 차이는 거의 발생하지 않았다. 또한 마찰계수와 마모율은 상대면이 Al₂O₃-TiC인 경우에 비해 낮게 나타났다.

2) Al₂O₃-TiC로의 물질이착막이 마찰면에서 주된 역할을 하며 마찰계수 및 마모율에 미치는 수분의 영향이 거의 나타나지 않았다.

참 고 문 헌

1. Yuji Katsumura, "Special Issue on Tribology of Ceramics; Application Examples - Tools", *J. of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 34, No. 2, pp. 136-139 (1989).
2. S.K. Bhattacharyya, E.O. Ezugwu and A. Jawaid, "The Performance of Ceramic Tool Materials for the Machining of Cast Iron", *Wear*, 135, pp. 147-159, 1989.
3. S. Chandrasekar and Bharat Bhushan, "Friction and Wear of Ceramics for Magnetic Recording Applications- PART I; A Review", *ASME, Journal of Tribology*, Vol. 112, pp. 1-16, 1990.
4. S. Chandrasekar and Bharat Bhushan, "Friction and Wear of Ceramics for Magnetic Recording Applications- PART II; Friction Measurements", *ASME, Journal of Tribology*, Vol. 113, pp. 313-317, 1991.
5. T.A. Libsch, P.C. Becker and S.K. Rhee, "Dry Friction and Wear of Toughened Zirconias and Toughened Aluminas against Steel", *Wear*, 110, pp. 263-283, 1986.
6. G.W. Stachowiak, G.B. Stachowiak and A.W. Batchelor, "Metallic Film Transfer during Metall-Ceramic Unlubricated Sliding", *Wear*, 132, pp. 361-381, 1989.
7. T.F. J. Quina, "Review of Oxidational Wear-Part 1: The Origins of Oxidational Wear", *Tribology Int.*, Vol. 16, No. 5, pp. 257-271, 1983.