

경계윤활 및 무윤활 상태에서 선접촉을 하는 세라믹과 강의 마찰과 마멸 특성

이영제 · 김영호* · 장선태**

성균관대학교 기계공학과
*이수세라믹(주)
**대우자동차(주)

Friction and Wear of Ceramic-Steel Pairs in Boundary-Lubricated and Unlubricated Line-Contact Sliding

Young-Ze Lee, Young-Ho Kim* and Sun-Tae Jang**

Department of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University
*Isu Ceramic Co., **Daewoo Motor Co.

Abstract—The friction and wear behaviors of ceramics against steels with lubricants were investigated and compared with those observed in air. Lubrications were done by a water and a commercial engine oil as received. The investigated ceramics were Al_2O_3 , SiC, and Si_3N_4 . Steels with 0.2 wt.% C were heat treated to obtain tempered structure. A cylinder-on-plate tribometer with rotated sliding motion was used to carry out the experiments. In the experiments reported here, the ranges of different testing speeds and loads were used. It was found that the friction and wear characteristics of tested pairs were significantly influenced by environments. In water and oil environments the wear of ceramics was reduced from 10^{-6} g/s down to 10^{-8} g/s in dry sliding at the same values of the frictional power which are the products of the friction coefficient, the load and the sliding speed. SiC showed excellent wear resistant behavior in water sliding, which was the lowest among tested ceramics, but it was very poor in oils. In case of Si_3N_4 , the wear rates were very low under oil environment, but the highest in water. The wear rates of Al_2O_3 were very low in both lubricating conditions at low values of the frictional power, but high at high values of the frictional power.

Key words—Wear of Ceramic, Frictional Power, Boundary Lubrication.

1. 서 론

접촉 공학적으로 많이 응용되고 있는 세라믹은 금속이나 폴리머에 비해 상대적으로 밀도가 낮고, 경도가 높으며, 열 및 부식에 대한 저항성이 좋다. 이로 인해 세라믹은 부수적인 많은 장점을 가지고 있으며, 산화, 질화, 또는 탄소 세라믹의 형태(Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC 등)로서 많은 구조용 재료로 각광을 받고 있다. 세라믹은 실링, 밸브, 압축다이, 베어링, 그리고 실린더 라이너 등과 같은 내마멸성을 요구하는 부품에 사

용되고 있다[1-3].

대기 중에서 세라믹의 윤활공학적 특성에 관한 연구들에 의하면 마찰 및 마멸 거동은 복잡하여 미끄럼 속도, 접촉하중, 습도와 같은 인자들이 마멸 거동에 영향을 미치고[3], 온도의 증가와 소성변형, 미세 파괴, 산화 작용과 같은 여러 가지 다른 메커니즘에 영향을 받는다[4,5]. 이중 주된 원인은 재료마다 차이가 있다. Al_2O_3 의 경우 주된 마멸과정은 미세 연삭작용이고[6], SiC의 경우 접촉 표면에서 마찰열로 인해 산화 작용이 주된 마멸과정이다[7]. Si_3N_4 쌍의 경우

전이층이 형성되고 미끄럼 운동 후 산화가 일어남을 보여주며, 또한 실험 중 Al_2O_3 쌍의 마멸률이 가장 작다고 보고되었다[8]. 이러한 전이층은 마멸입자와 큰 마찰계수로 인해 형성된다. 공유결합 재료인 Si_3N_4 쌍과 SiC 쌍의 미끄럼 운동 시 대기 중에서 전이층 형성이 용이하지 않으며 이온결합 재료인 Al_2O_3 쌍의 실험시 대기 중에서 전이층 형성이 우수하다고 알려져 있다[9]. 또한 세라믹의 전이층 형성은 습도에 의해서 영향을 받는데, 회주철과 Al_2O_3 의 실험에서 마멸입자의 역할은 건식 조건에서 유해하고 습식 조건에서 유용하게 나타났다[10]. 그러나 전반적으로 위의 연구들은 실험 자체가 그 전의 연구들에서와 마찬가지로 국부적인 하중과 속도에서만 행해졌기 때문에 세라믹 재료들이 다른 영역에서는 어떤 특성을 나타내는지를 설명할 수 없었다. 이러한 마멸입자와 산화의 마멸 거동에 대한 관계 및 마멸입자와 전이층의 관계를 설명하는데 있어서 실험 분위기와 하중의 영향에 대한 연구가 특히 부족하였다.

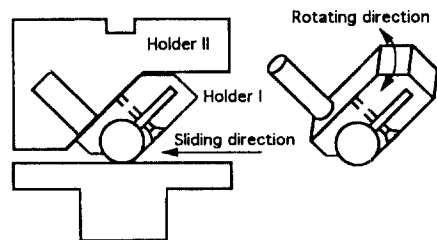
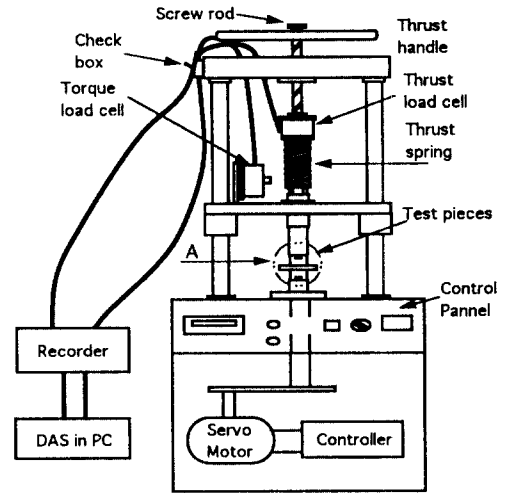
세라믹 재료를 특히 기계부품에 사용하기 위해서는 마멸특성뿐 아니라 마찰 및 윤활 특성을 알아야 하는데, 그 동안의 연구들은[4-6,8,9] 주로 무윤활 상태에서 마멸 특성을 파악하는데 집중되어 왔다. 세라믹은 주변 환경에 의해 마찰 및 마멸에 매우 강한 영향을 받는데, 특히 습도에 매우 민감한 영향을 보였다[11]. 물에서 실험을 하였을 경우 마찰계수는 감소되나 마멸률은 산화물의 세라믹 경우 매우 크게 증가하였다[12]. 반면에 Si_3N_4 의 경우는 마멸이 감소하였다[11, 13]. 이러한 현상에 영향을 미치는 원인과 인자를 설명하기 위해 수행된 연구들에서는 일정한 속도와 하중을 정하고 그때 발생하는 마찰과 마멸에 관심을 두었기 때문에 세라믹 재료의 전반적인 사용 범위 내에서 윤활특성은 밝혀지지 않고 있다.

본 연구에서는 세라믹과 강재를 사용하여, 실제 사용범위 내에서 하중과 속도의 변화를 주어가며 마찰과 마멸의 변화를 살펴보았다. 물이나 윤활유를 사용하는 경우는 수막이나 유막의 형성으로 두표면을 어느 정도 분리하여 직접적인 접촉을 줄일뿐 아니라, 입자의 제거 효과가 있어서 공기 중 실험에서 두드러지는 입자의 연삭작용을 차단하는 효과가 있다. 물과 윤활유는 점도의 차이로 각기 막을 형성하는 정도가 달라서, 물의 경우 어느 정도의 접촉과 이로 인한 입자의 형성이 예측된다.

실험 결과는 비마멸량(마멸량을 하중과 미끄럼거리로 나눈 값)과 마멸률(마멸량을 미끄럼 시간으로 나눈 값)에 대해 마찰동력으로 표시가 가능한데, 마찰동력은 하중과 속도, 그리고 마찰계수를 곱한 값으로 미끄럼운동시 발생하는 마찰로 인한 온도상승과 밀접한 관계가 있는 값이다[14]. 이 마멸률-마찰동력 선도는 서로 다른 세라믹 재료의 마찰, 마멸 및 윤활 특성을 종합적으로 비교할 수 있는 자료가 될 것이다. 또한, 이러한 연구를 통해 일반적으로 강재를 사용하는 부품들을 세라믹으로 대체하여 내마멸성을 향상시켜 부품의 수명을 증가시킬 수 있다.

2. 실험 장치 및 방법

실험은 세라믹 실린더와 강 의 평판을 사용한다. 이는 실린더의 원통 면과 평판이 형성하는 선접촉의 경



A (Holders for line contact)

Fig. 1. Friction and wear tester.

Table 1. Material properties of ceramics, and surface roughness (Ra) of steel (flat) and ceramics (cylinder)

Material	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (10 ³ GPa)	Hardness (GPa)	Toughness (MPa m ^{1/2})	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C)	Roughness (μm)	
						flat	cylinder
Al ₂ O ₃	3.94	3.8	18	3.0	9.5	0.252	0.254
SiC	3.20	4.0	28	2.5	4.2	0.130	0.238
Si ₃ N ₄	3.24	3.0	15	5.0	2.8	0.221	0.311

우가 공학적으로 보다 많이 사용되기 때문이다. Fig. 1에 시험기의 구조를[15] 간단히 나타내었다. 실린더는 정지해 있고 평판은 회전한다. 실린더에는 스프링에 의해 하중이 수직으로 가해지며, 로드셀과 연결되어 수직하중을 측정할 수 있다. 마찰력에 의한 속도의 감소를 방지하기 위해 본 실험에서는 서보모터를 사용하였다. 실린더의 접촉을 균일하게 하기 위해 실린더를 홀더에 Fig. 1에서와 같이 결합한 후 홀더를 로드 위에 끼워서 하중이 선접촉 부분을 따라 균일하게 작용하도록 하였다. 마멸량을 측정하기 위해서 실험 전과 후에 각각 무게를 정밀 저울로 측정하였고, 마멸량이 매우 작은 경우는 현미경으로 마멸흔의 평균 넓이를 측정하여 무게로 환산하였다.

실험은 상온, 대기중에서 행해졌고, 세라믹 시편은 Al₂O₃, SiC 그리고 Si₃N₄를 사용하였다. 이 시편들의 기계적 성질은 Table 1과 같다. 실린더 시편의 길이는 10 mm, 직경은 9.5 mm이다. 평판은 가로와 세로가 각각 37 mm이고, 두께는 6 mm이다. 시편은 모두 폴리싱하였으며, 아세톤과 증류수로 세척하여 사용하였다. 시편의 표면거칠기는 Table 1에 나타나있으며, 여기서는 중심선평균거칠기(Ra) 값을 사용하였다.

본 연구에서는 마멸특성에 미치는 윤활조건의 영향을 보기 위해 대기 중에서 실험을 하였고, 한편 시편을 물과 시판되는 5W30 엔진오일 속에서 실험을 하였다. 이는 세라믹의 마찰과 마멸 특성이 물과 매우 밀접한 관계가 있기 때문이다.

실험은 하중과 미끄럼 속도를 변화시키며 각각 3분간 실험하였다. 3분은 마찰계수가 안정화되기에 충분하며 마멸량도 충분히 측정가능한 시간이었다[16]. 하중과 속도는 다양한 범위에 걸쳐 선정되었다. 하중은 공기 중에서 39.24, 78.48, 156.96 N, 물 사용시 78.48, 156.96, 313.96 N, 엔진오일 사용시 39.24, 78.48, 156.96, 313.96, 627.84 N으로 하중의 범위를 넓혀 나갔다. 속도도 마찬가지로 대기 중에서 0.05, 0.1, 0.2 m/s, 물

사용시 0.1, 0.2, 0.4 m/s, 엔진오일 사용시 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 m/s로 범위를 확장하였다. 실험시 각각의 하중과 미끄럼 속도에 따라 새로운 평판과 실린더로서 미끄럼 운동을 시켜 마멸 천이를 보는데 용이하게 하였다.

이러한 하중과 속도의 범위는 윤활제의 영향을 뚜렷이 구분할 수 있는 영역이며, 또한 마찰과 마멸의 측정을 용이하게 할 수 있는 조건이었다. 모든 실험은 두번 이상 반복하여 평균 값을 결과로 사용하였다.

3. 실험 결과

3-1. 대기중 실험

3-1-1. Al₂O₃

Al₂O₃와 강재의 대기중 실험시 시간에 대한 마찰거동은 Fig. 2에 나타내었다. 각각 세 가지의 하중과 속도에서 마찰거동은 시간에 따라 변동이 심하나 전반적으로 증가하는 양상을 보여준다. 저속에서는 불규칙하지만 점진적으로 증가하던 마찰계수가 고속에서는 안정되어 가는 것을 볼 수 있다.

각 하중과 속도에서, Fig. 3은 비마멸량과 마찰계수의 변화를 보여준다. 마찰계수는 실험 종료 전 1분 동안의 평균 값으로 나타내었다. 39.24 N시에는 미끄럼 속도의 증가에 따라 마멸입자의 양이 증가함을 알 수 있었고, 비마멸량은 미끄럼 속도가 빨라짐에 따라 증가한다. 따라서 직접적인 접촉에 의해 발생한 마멸입자의 연삭작용이 두드러진 0.2 m/s의 비마멸량이 0.05 m/s의 비마멸량보다 2배 정도 컸다. 마찰계수는 미끄럼 속도의 증가에 따라 증가하였다. 하중을 78.48 N으로 증가시킨 경우, 0.05 m/s의 비마멸량이 39.24 N과 0.05 m/s의 비마멸량보다 3배 가량 증가하였다. 그러나 비마멸량은 같은 하중에서 미끄럼 속도의 증가에 따라 감소하고, 0.2 m/s의 비마멸량은 39.24 N과 0.2 m/s의 비마멸량의 1/2 정도였다. 78.48 N에서 미끄럼 속도의

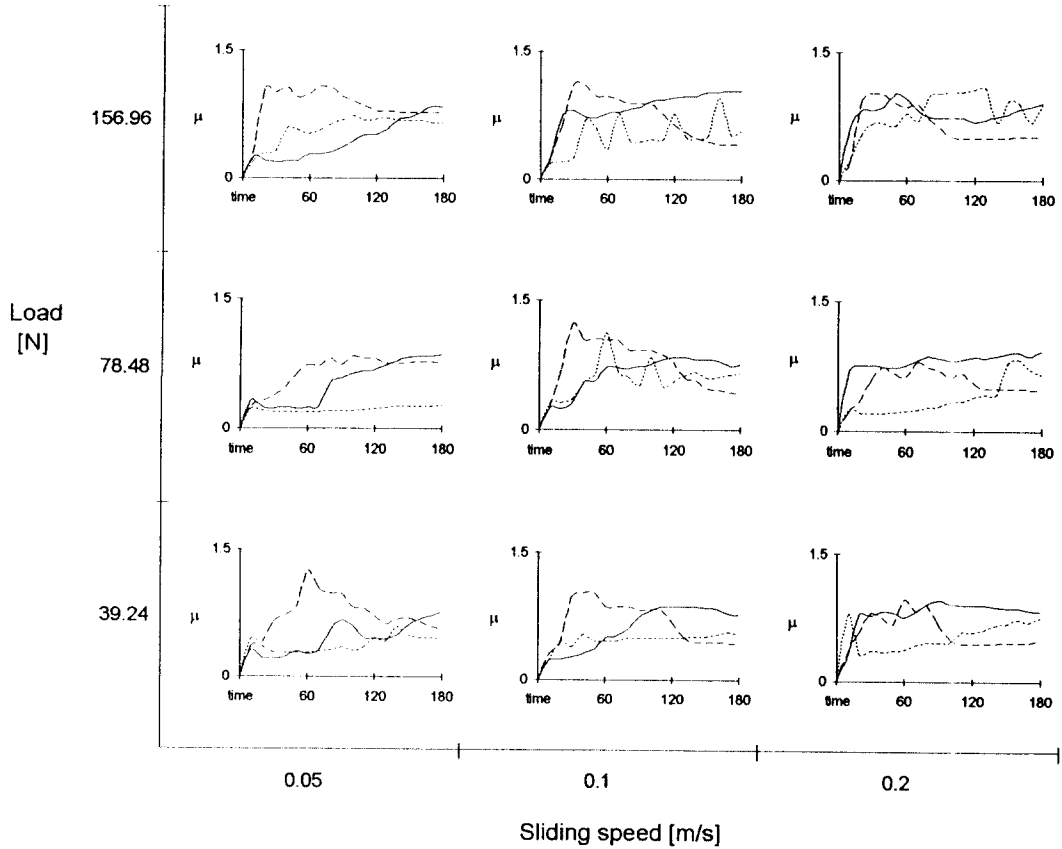


Fig. 2. Frictional behavior of ceramics and steel pair in air (— Al_2O_3 , --- SiC, ... Si_3N_4).

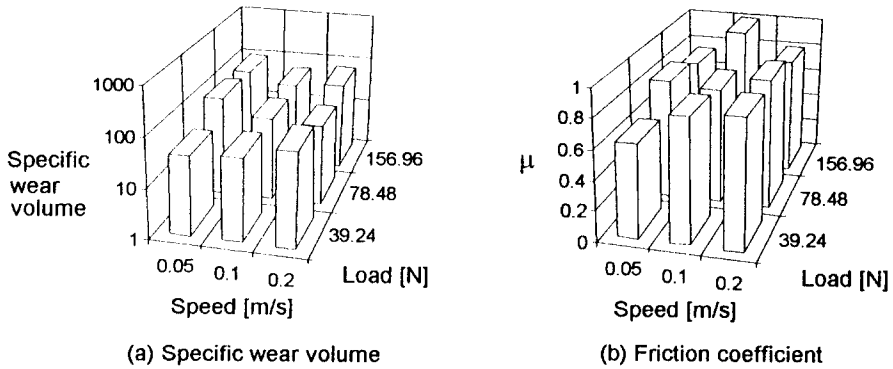


Fig. 3. Specific wear volume (10^9 g/Nm) and averaged values of friction coefficient of Al_2O_3 under various loads and sliding speeds in air.

증가에 따라 비마멸량이 감소하는 경향은 마멸 특성을 우수하게 하는 전이층 형성 영역이 관찰된 선행된 연구결과[15,17]와 잘 일치한다. 156.96 N으로 하중을 증

가시켜 실험한 경우, 비마멸량은 미끄럼 속도의 증가에 따라 78.48 N의 비마멸량보다 증가하였다. 그리고 Fig. 3(b)에서 보듯이 마찰계수는 하중과 미끄럼 속도

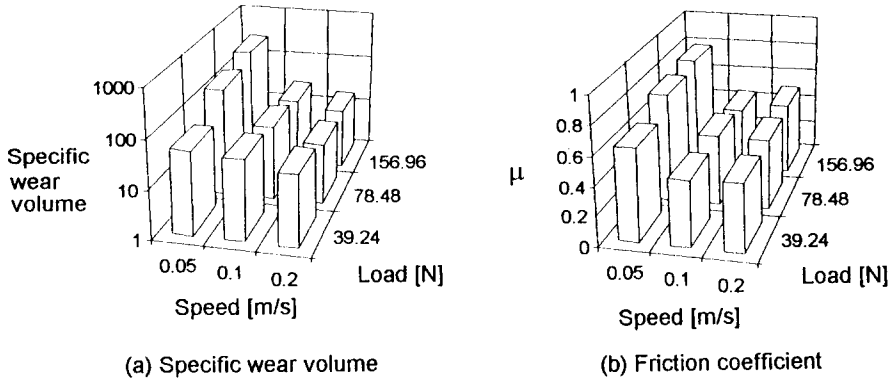


Fig. 4. Specific wear volume (10⁹ g/Nm) and averaged values of friction coefficient of SiC under various loads and sliding speeds in air.

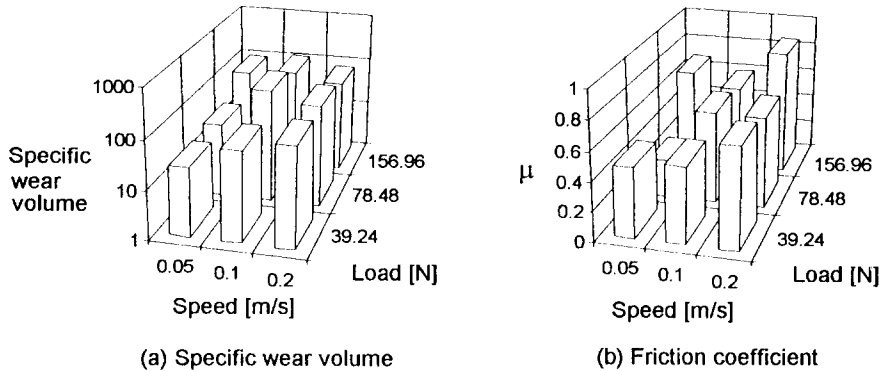


Fig. 5. Specific wear volume (10⁹ g/Nm) and averaged values of friction coefficient of Si₃N₄ under various loads and sliding speeds in air.

에 따라 크게 변하지 않았으며, 두표면간의 직접적인 접촉으로 전반적으로 매우 큰 값을 나타내었다.

3-1-2. SiC

SiC와 강재의 대기중 실험시 시간에 대한 마찰거동은 Fig. 2에서 볼 수 있는데, 마찰거동은 대체적으로 급격히 증가한 후 점차로 감소하였다.

각 하중과 속도에서, Fig. 4는 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. 39.24 N시 마찰계수는 Al₂O₃와는 다르게 속도증가에 따라 감소하는 경향이 뚜렷하였으며, 0.05 m/s시 불안정한 마찰거동으로 매우 큰 값을 보여 주었고, 0.1 m/s시 실험 초반은 0.05 m/s의 마찰거동과 유사하게 불안정하나 실험 중반 이후 빠르게 안정화된다. 또한 0.2 m/s시의 마찰거동도 실험 초반은 불안정하나 실험 중반부터 안정화되어 0.1 m/s시 보다 일찍 안정화되었다. 하중을 78.48 N으로 증가시킨 경

우 39.24 N시와 유사하게 속도의 증가에 따라 비마멸량이 감소하였으며, 39.24 N시의 비마멸량보다 78.48 N시의 비마멸량이 작았다. 특히 0.05 m/s와 39.24 N시의 비마멸량보다 0.05 m/s와 78.48 N시의 비마멸량이 3배 정도 작았다. 마찰거동 또한 39.24 N시와 유사하였다. 156.96 N으로 하중을 보다 증가시킨 경우 78.48 N시와 유사하며, 0.05 m/s에서 39.24 N시의 비마멸량보다 156.96 N시의 비마멸량이 5배 가량 작았다. Fig. 4(b)에서 보듯이 각 하중에서의 마찰거동은 속도에 따른 유사한 특성을 나타내었다. 이러한 마찰 및 마멸거동은 다른 연구결과[8]에서도 지적하였듯이, 마멸입자가 상대 표면에 응착되는 시기와 밀접한 관계가 있다고 생각된다.

3-1-3. Si₃N₄

Fig. 5는 Si₃N₄와 강재의 대기중 실험의 하중과 속

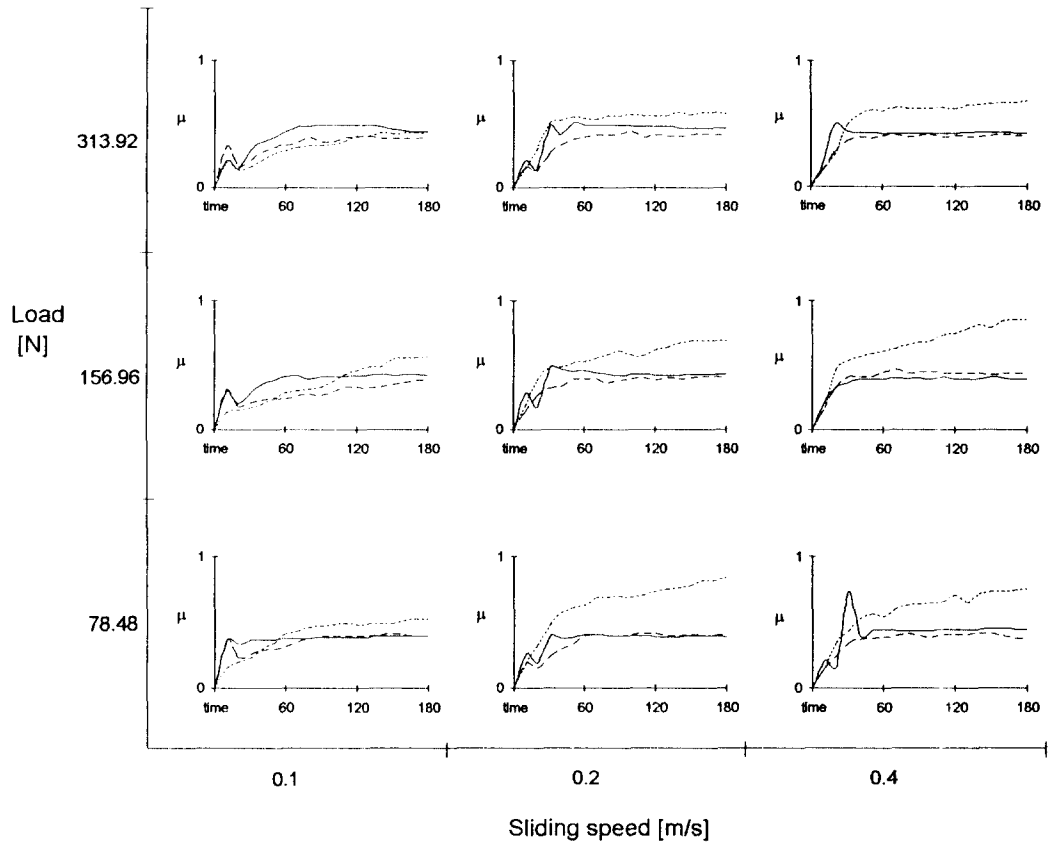


Fig. 6. Frictional behavior of ceramics and steel pair in water (— Al_2O_3 , --- SiC, ... Si_3N_4).

도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. Si_3N_4 와 강재의 대기중 실험은 0.05 m/s시 SiC와 강재의 대기중 실험의 마멸보다 작았으나 속도가 증가함에 따라 SiC와는 다르게 Si_3N_4 의 마멸이 증가하였다. 마찰거동은 Fig. 2에서 보듯이 하중과 속도가 증가함에 따라 불안정한 상태로 증가함을 알 수 있다. 이는 표면에서 많이 관찰할 수 있는 마멸입자의 연삭작용이 마찰 및 마멸 특성에 영향을 미치기 때문이라 생각할 수 있다. 39.24 N시 속도가 증가함에 따라 마멸률과 비마멸량 그리고 마찰계수가 증가하여 0.1, 0.2 m/s시의 마멸량과 비마멸량이 0.05 m/s시 보다 3~4배 정도 컸다. 그러나 Si_3N_4 의 마찰거동은 실험 중반 이후 안정화되는 SiC와 달리 시간에 따라 증가한다. 하중을 78.48 N으로 증가시킨 경우의 비마멸량은 39.24 N의 비마멸량보다 다소 증가하였다. 156.96 N의 하중에서, 비마멸량은 미끄럼 속도의 영향을 적게 받는다.

3-2. 물을 사용한 실험

3-2-1. Al_2O_3

윤활제로 물을 사용한 실험에서 Fig. 6은 각 세라믹과 강재의 미끄럼시 시간에 대한 마찰거동을 보여준다. 마찰거동은 대기중 실험에 비해 전반적으로 안정되었고, 대기중 실험시 0.618~1.015였으나, 물을 사용한 실험의 마찰계수는 0.391~0.472이었다. 이는 물을 사용한 실험시 유체윤활작용으로 표면돌기들 간의 직접적인 접촉이 대기중 실험보다 감소하였기 때문이다. 안정화되는 시기는 전 영역에서 비슷하나, 고속도로 갈수록 마찰거동은 최고점에 이른 후 빠르게 안정화되는 경향을 보여준다. 안정화된 마찰계수는 모든 영역에서 거의 유사하였다.

Fig. 7은 Al_2O_3 와 물을 사용한 실험의 하중과 속도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. Al_2O_3 의 비마멸량은 Fig. 7(a)에서 보듯이, 하중과 속도가 증가함에 따라 커짐을 보여준다. 78.48 N시 비마멸량은 속도

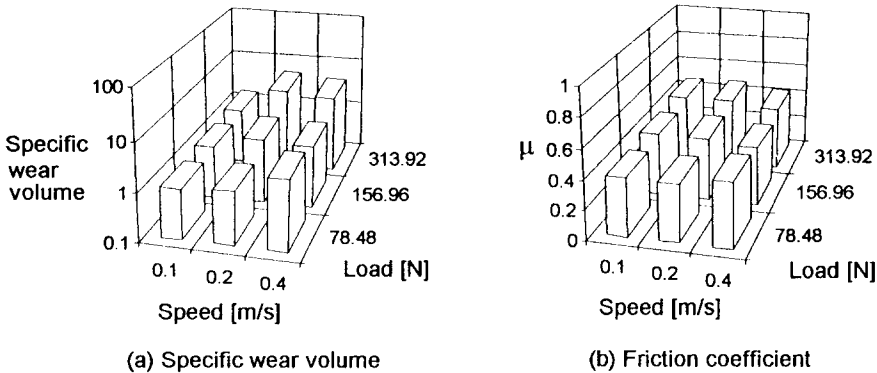


Fig. 7. Specific wear volume (10^{-9} g/Nm) and averaged values of friction coefficient of Al_2O_3 under various loads and sliding speeds in water.

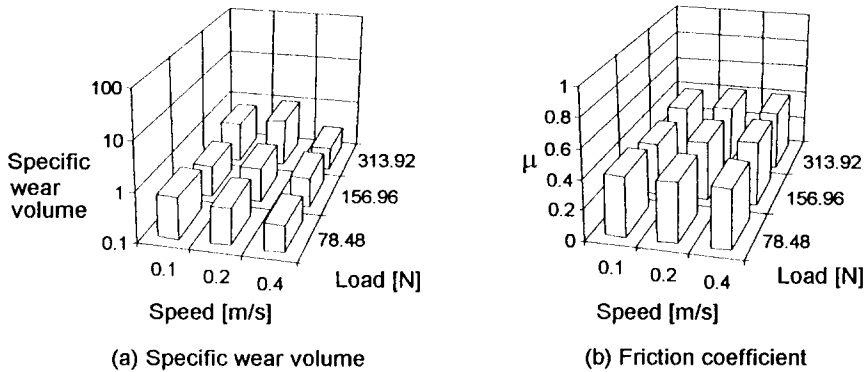


Fig. 8. Specific wear volume (10^{-9} g/Nm) and averaged values of friction coefficient of SiC under various loads and sliding speeds in water.

의 증가에 따라 점진적으로 증가하여 0.1 m/s시 보다 0.4 m/s시보다 2.5배 정도 컸다. 하중을 156.96 N으로 증가시킨 경우도 78.48 N시와 유사한 현상을 보여주며, 78.48 N시의 마멸보다 다소 증가하였다. 313.92 N으로 증가시킨 경우도 비슷한 양상을 보이며 0.1 m/s시보다 0.2 m/s시 비마멸량이 3배 가량 증가하였다.

3-2-2. SiC

물을 사용한 경우 마찰거동은 Fig. 6에서 보듯이, 대기중 실험과는 달리 매우 안정적인임을 알 수 있다. Fig. 8은 하중과 속도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. 비마멸량은 78.48 N시 고속으로 갈수록 감소하였다. 특히 313.92 N의 고하중에서 0.4 m/s의 비마멸량이 가장 작았다. 물을 사용한 실험에서, SiC와 Al_2O_3 의 마찰계수는 거의 유사한 거동과 크기를 나타내었지만, SiC의 비마멸량은 Al_2O_3 보다 전 영역에서 대략 1/4 정도로 작았다. 이는 물에 의한 윤활 및 청정

작용 외에 Sasaki[7]와 Ueda 등[18]이 지적하였듯이 물과 마멸입자에 의한 보호막의 형성에 의한 것으로 추정된다.

3-2-3. Si_3N_4

Fig. 6에서 보듯이, 물을 사용한 실험시 마찰거동은 대기중 실험과 같이 불안정한 거동을 보이지는 않으나 다른 재료들과는 달리 시간에 따라 점진적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 값도 매우 컸다. 대기 중에서 측정된 값이 0.259~0.860이었고, 물을 사용시 0.422~0.825정도이었다.

Fig. 9는 Si_3N_4 와 물을 사용한 실험의 하중과 속도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. 78.48 N시 0.1 m/s의 비마멸량이 0.2 m/s보다 컸으나 0.2 m/s와 0.4 m/s의 비마멸량은 유사하였다. 그리고 156.96 N으로 하중을 증가시킨 경우 78.48 N시보다 모든 속도 영역에서 마멸이 작았다. 그리고 156.96 N시 다른 하중에

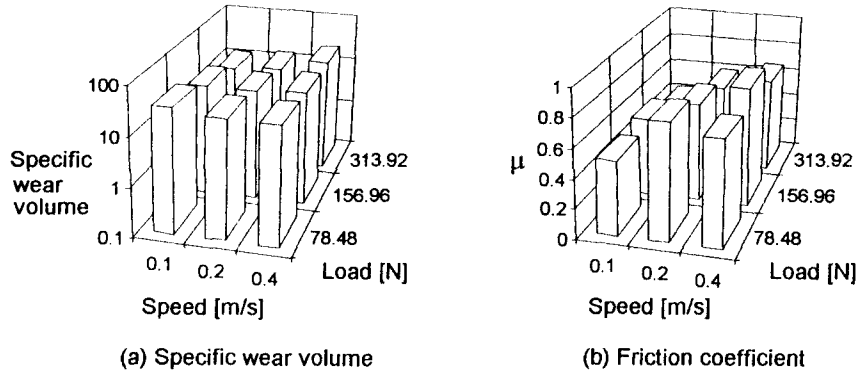


Fig. 9. Specific wear volume (10^{-9} g/Nm) and averaged values of friction coefficient of Si_3N_4 under various loads and sliding speeds in water.

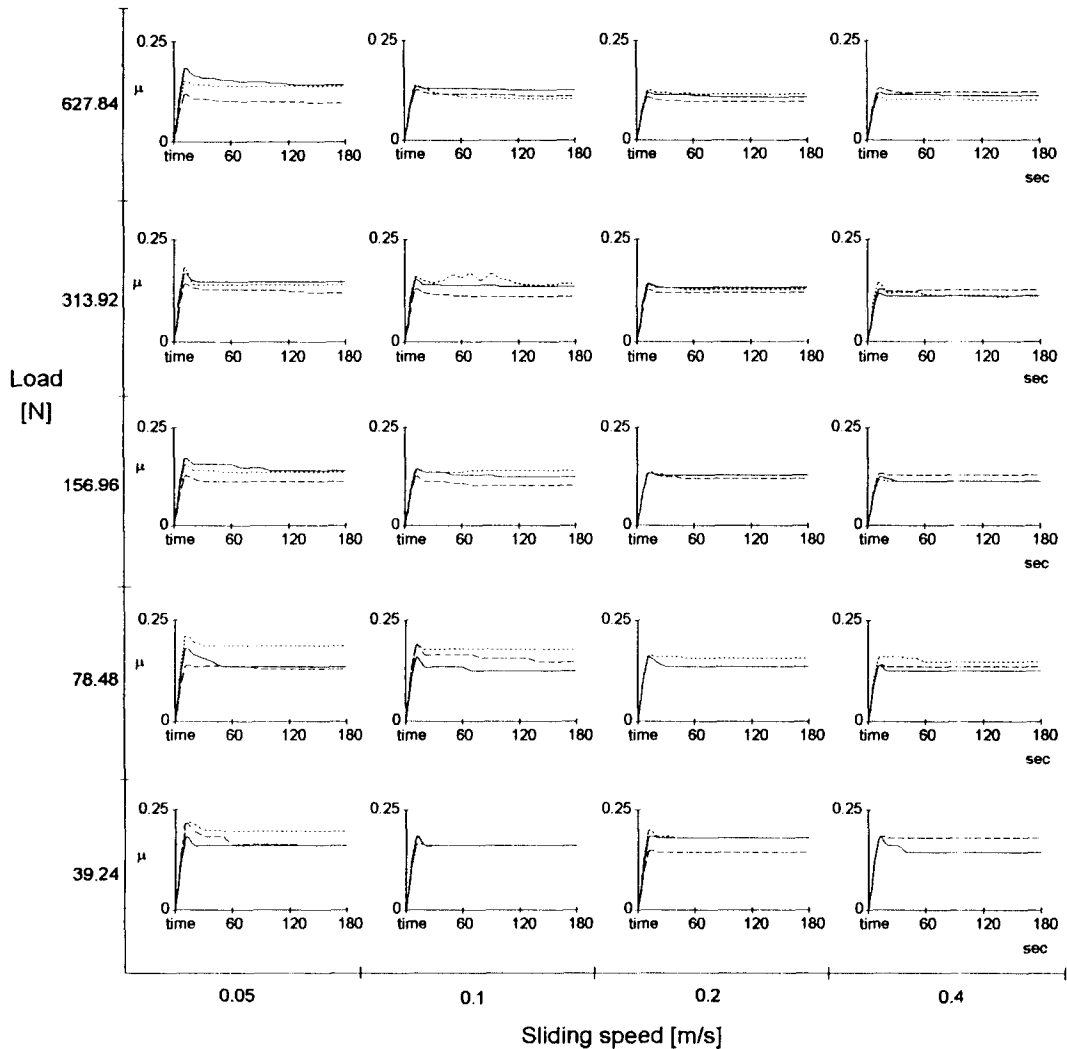


Fig. 10. Frictional behavior of ceramics and steel pair in oil (— Al_2O_3 , --- SiC , ... Si_3N_4).

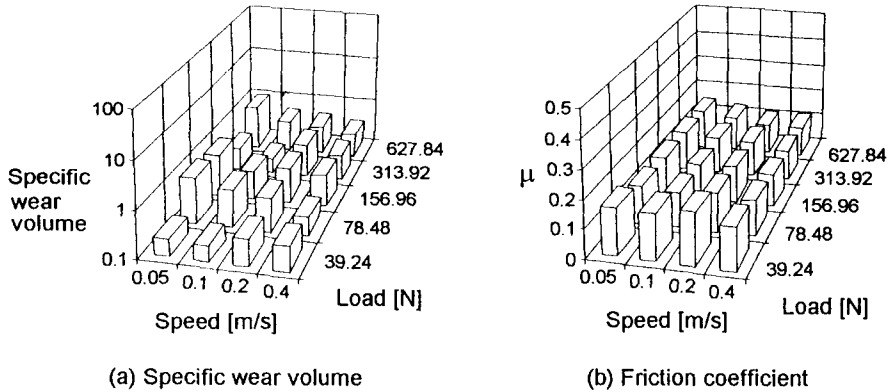


Fig. 11. Specific wear volume (10^9 g/Nm) and averaged values of friction coefficient of Al_2O_3 under various loads and sliding speeds in oil.

서 보다 미끄럼 속도의 영향이 작아 모든 속도에서 비마멸량이 비슷하였다. 313.92 N으로 실험한 경우 0.1 m/s시 156.96 N과 0.1 m/s의 비마멸량의 1/2배 정도로 작았으며, 78.48 N과 0.1 m/s시의 비마멸량의 1/3배 정도로 작았다. 그러나 고하중에서 속도가 증가함에 따라 비마멸량은 증가한다. 따라서 비마멸량은 0.1과 0.2 m/s시에는 하중에 큰 영향을 받으나, 0.4 m/s시는 하중의 영향이 감소하여 하중에 대한 비마멸량은 거의 유사하였다. 따라서 속도의 증가에 따른 하중의 영향이 작아짐을 알 수 있다. 물을 사용한 실험에서 Si_3N_4 의 비마멸량은 다른 세라믹들보다 매우 컸으며, Al_2O_3 의 비마멸량보다 10~30배 정도 컸고, SiC 보다 15~45배 정도 컸다. 이는 Si_3N_4 의 경우 물의 윤활작용이 다른 재료에 비해서 마멸특성에 큰 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다.

3-3. 윤활유를 사용한 실험

3-3-1. Al_2O_3

Fig. 10은 윤활유 실험시 각 세라믹과 강재의 시간에 대한 마찰거동을 보여준다. 마찰거동은 모든 영역에서 빠르게 안정된다. 그리고 마찰계수는 대기중 실험의 1/9 정도이고, 물을 사용한 실험의 1/3 가량으로 그 값들이 매우 작았다.

Fig. 11은 윤활유 실험에서 Al_2O_3 의 하중과 속도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. 윤활유 실험시 39.24 N의 비마멸량은 유막의 형성으로 대기중의 39.24 N의 비마멸량에 비해서 1/14 정도로 작았다. 하중을 증가시켜 78.48 N으로 실험한 경우 유막의 감소로 39.24 N의 비마멸량보다 증가하였다. 그리고 78.48

N과 0.05 m/s의 비마멸량이 39.24 N과 0.05 m/s의 비마멸량보다 4배 정도 증가하였으나, 0.4 m/s에서 78.48 N의 비마멸량이 39.24 N의 비마멸량보다 증가한다. 비마멸량은 유막의 형성과 관계가 있어 저하중, 그리고 고속일수록 비마멸량은 감소함을 알 수 있다.

그리고 Fig. 11(b)에서 보듯이, 39.24 N의 마찰계수가 78.48 N의 마찰계수보다 크고, 39.24, 78.48 N시 마찰계수는 미끄럼 속도에 영향을 적게 받는다. 156.96 N의 하중에서 비마멸량은 미끄럼속도의 증가에 따라 감소한다. 이런 미끄럼속도의 영향은 강재입자의 응착과 밀접한 관계가 있다[14]. 그리고 0.05 m/s를 제외하고, 하중이 증가할수록 미끄럼 속도의 증가에 따라 비마멸량이 감소하는 현상은 두드러진다. 마찰계수는 미끄럼속도의 증가에 따라 감소한다.

Al_2O_3 의 윤활유 실험시, 물을 사용한 실험과 동일한 영역에서 비마멸량은 물을 사용한 경우 미끄럼 속도의 증가에 따라 증가하는 반면, 윤활유 실험시 미끄럼 속도의 증가에 따라 감소한다. 이러한 미끄럼 속도의 영향은 강재 입자의 응착성[14]과 점도변화에 따른 윤활막 형성에 밀접한 관계가 있다.

3-3-2. SiC

SiC와 강재의 미끄럼시 윤활유 실험의 마찰거동은 모든 영역에서 빠르게 안정된다. 대기중 실험의 마찰계수는 0.445~0.786이었고 물을 사용한 실험의 마찰계수는 0.360~0.438이었고, 윤활유를 사용한 실험의 마찰계수는 0.099~0.179였다. 비마멸량은 같은 조건의 대기중 실험의 비마멸량보다 매우 작았으나, 물을 사용한 실험의 비마멸량보다 3배 정도 컸다. 이는 앞에서 언급하였듯이 SiC의 경우 유체윤활효과 외에

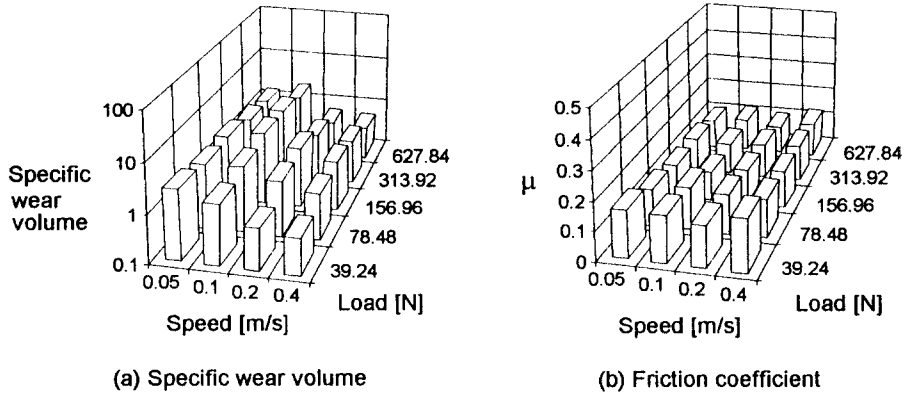


Fig. 12. Specific wear volume (10^{-9} g/Nm) and averaged values of friction coefficient of SiC under various loads and sliding speeds in Oil.

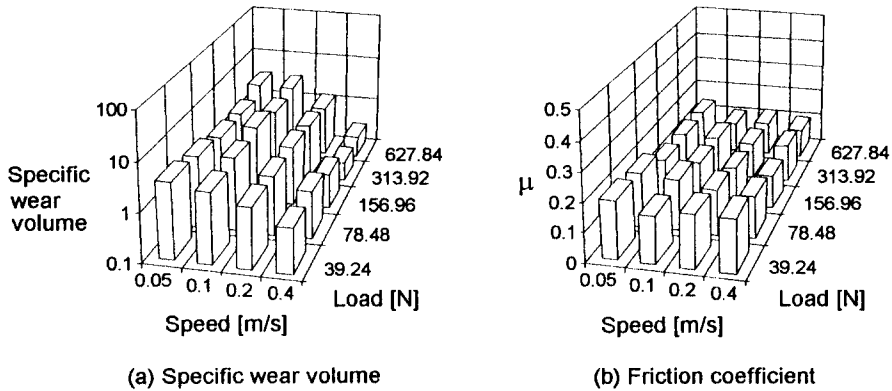


Fig. 13. Specific wear volume (10^{-9} g/Nm) and averaged values of friction coefficient of Si_3N_4 under various loads and sliding speeds in oil.

표면에 형성되는 산화막의 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

Fig. 12는 윤활유 실험에서 SiC의 하중과 속도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. SiC와 윤활유 실험의 비마멸량은 미끄럼 속도의 증가에 따라 감소한다. 하중이 39.24, 78.48, 156.96 N으로 증가함에 따라 비마멸량이 증가한다. 그리고 156.96 N에서 가장 큰 마멸이 일어난 후 313.92, 629.84 N으로 하중을 증가시켜 실험한 경우 비마멸량이 감소한다. 마찰계수는 윤활유 실험에서 가장 작았고, 같은 조건 하의 물을 사용한 실험의 1/3 정도였다. 그리고 Fig. 12(b)에서 보듯이, 마찰계수는 하중이 증가함에 따라 감소한다.

3-3-3. Si_3N_4

윤활유 실험의 마찰거동은 모든 영역에서 빠르게 안

정된다. Fig. 13은 윤활유 실험에서 Si_3N_4 의 하중과 속도에 대한 비마멸량과 마찰계수를 보여준다. Si_3N_4 의 미끄럼시 윤활유 실험의 비마멸량은 동일 조건 하의 대기중 실험과 물을 사용한 실험의 비마멸량보다 작았다. 그리고 미끄럼 속도의 영향이 작아, 모든 속도 영역에서 비슷한 비마멸량이 나타난 물을 사용한 실험과는 대조적으로 Fig. 13(a)에서 보듯이 윤활유 실험시 미끄럼 속도의 증가에 따라 비마멸량이 감소한다. Si_3N_4 와 윤활유 실험의 마멸특성은 하중의 영향보다 미끄럼 속도의 영향이 두드러져 대체적으로 0.4 m/s의 비마멸량이 0.05 m/s의 비마멸량의 1/5~1/2 정도로 작았다.

이러한 하중의 영향보다 미끄럼 속도의 영향이 두드러지는 것은 유막과 표면돌기의 하중지지능력과 밀접한 관계가 있다. 그리고 윤활유 실험시 0.05 m/s에

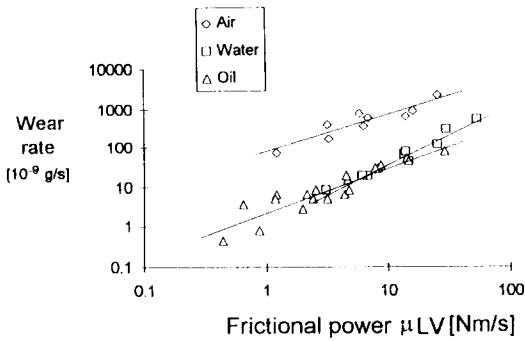


Fig. 14. Wear rates of Al_2O_3 as the function of μLV (L : load, V : sliding speed, μ : friction coefficient).

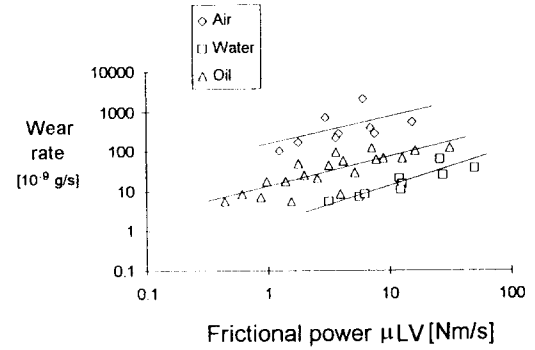


Fig. 15. Wear rates of SiC as the function of μLV (L : load, V : sliding speed, μ : friction coefficient).

서 Si_3N_4 의 비마멸량은 Al_2O_3 의 비마멸량보다 3~15배 정도 컸다. 그러나 미끄럼 속도가 증가함에 따라 두 세라믹의 비마멸량의 차이는 줄어들어 0.4 m/s에서 Si_3N_4 의 비마멸량은 Al_2O_3 의 비마멸량보다 1~3배 정도 컸다. 그리고 Si_3N_4 의 비마멸량은 SiC 의 비마멸량보다 0.05 m/s에서 다소 컸으나 전반적으로 유사하였다.

4. 고 찰

4-1. Al_2O_3

Al_2O_3 의 경우 윤활유와 물을 사용한 결과 유체윤활의 영향으로 대기중 실험에 비해 비마멸량은 매우 작았다. 특히 윤활유를 사용한 경우 다른 세라믹 재료에 비해 현저히 작은 마찰계수와 비마멸량을 나타내었다. Al_2O_3 의 경우 대기 중에서 마멸입자에 의한 연삭작용이 주된 마멸작용[6,8,17]인데, 윤활유의 경우 유막의 형성으로 연삭작용이 활발치 못하였음을 알 수 있다.

물을 사용한 실험에서는 미끄럼 초기에 마멸입자가 형성되나 물의 흐름에 의해 접촉부에서 마멸입자가 제거된다. Fig. 14에서 보듯이, 연삭작용이 감소한 물을 사용한 실험의 마멸률이 대기 중의 마멸률보다 작았다. 물을 사용함으로써 형성된 수막은 하중지지능력이 우수하지 못하여 하중과 속도의 증가에 따라 마멸률이 상대적으로 크게 증가하였다. 물을 사용한 실험에서 하중의 증가에 따라 마멸률이 증가하는 것은 불충분한 하중지지능력으로 인해 표면돌기들의 국부적인 접촉으로 연삭작용보다 표면돌기의 미세 파괴가 증가하고, 마멸입자의 증가는 전이층[9,15,17] 형성을

야기하기 때문이다. 이 전이층은 내마멸성이 우수하여 큰 마찰동력 값에서 마멸률이 크게 증가하는 것을 억제한다.

윤활유 실험시 마멸입자의 연삭작용과 하중지지능력이 우수한 유막의 형성으로 하중은 증가하나 표면돌기의 미세 파괴 현상이 감소한다. Fig. 14에서 보듯이, 윤활유 실험의 마멸률이 대기 중과 물을 사용한 실험의 마멸률보다 작았다. 그리고 윤활유 실험시 하중지지능력이 우수한 유막의 형성으로 마찰계수가 물을 사용한 실험의 마찰계수보다 3배 정도 작다. 또한 물을 사용한 실험과 같은 조건 하의 윤활유 실험의 마찰동력값이 물을 사용한 실험의 마찰동력값의 1/3 정도이다. 윤활유 실험시 하중지지능력이 우수한 유막의 형성으로 마찰계수가 물을 사용한 실험의 마찰계수에 비해 1/3 정도이었다.

4-2. SiC

SiC 의 미끄럼시 대기중 실험의 경우 연삭작용이 두드러졌으나, 물을 사용한 실험에서 물의 흐름에 의해 마멸입자가 씻겨나가 연삭작용을 억제한다. 따라서 미끄럼 속도의 증가에 따라 물의 흐름이 빨라져 Fig. 8에서와 같이 비마멸량이 감소한다. 또한 마멸률과 마찰동력선도를 보여주는 Fig. 15에서 보듯이, 물을 사용한 실험의 마멸률이 윤활유 실험의 마멸률보다 작았다. 고하중에서 수막과 유막의 하중지지능력에 영향을 받는 Al_2O_3 의 마멸특성과 달리 SiC 의 마멸에는 수막과 유막의 하중지지능력의 영향 외에 다른 원인이 있음을 알 수 있다. SiC 의 물을 사용한 이전의 연구[19]에서 SiC 의 마멸은 연삭작용과 화학작용에 의한다고 보고하였는데, 이는 물과 마멸입자가 형성

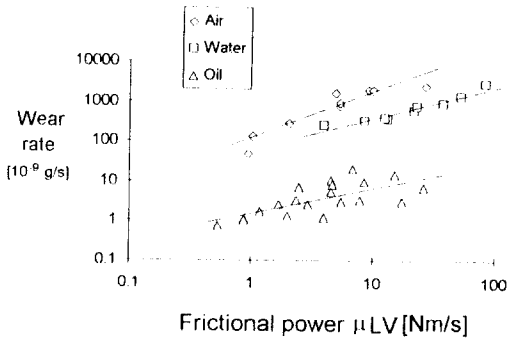


Fig. 16. Wear rates of Si_3N_4 as the function of μLV (L : load, V : sliding speed, μ : friction coefficient).

하는 산화물에 기인한다는 것이다. 이 산화물은 매우 좋은 내마멸성을 가지고 있다고 보고되었는데[7,18], 본 연구에서도 대기중이나, 더욱이 윤활유를 사용한 경우에 비해서도 매우 뛰어난 내마멸성을 나타내었다. 수막의 형성은 표면돌기들의 국부적인 직접 접촉으로 발생하는 마멸입자가 접촉부에서 일부 제거하는 역할을 한다. 이러한 수막의 마멸입자 제거 역할은 연삭작용을 억제하여 비마멸량을 감소시키는 원인 중의 하나가 된다. SiC의 대기 중 실험시, SiC 표면에서 미끄럼 하는 동안 연삭된 흔적이 많이 관찰되었다.

4-3. Si_3N_4

Si_3N_4 의 마멸특성은 Al_2O_3 의 마멸특성과 유사하여 윤활제에 의해 형성되는 막의 하중지지능력에 영향을 받는다[20]. Si_3N_4 는 Al_2O_3 보다 유막의 하중지지능력의 영향을 더 크게 받는다. Si_3N_4 의 마멸은 표면돌기 파괴[14]가 두드러져, 유막이 형성된 윤활유 실험의 비마멸량이 물을 사용한 실험의 비마멸량보다 작았다.

Fig. 16은 마멸률과 마찰동력선도를 보여준다. 이 선도는 윤활제의 하중지지능력에 대한 마멸률의 관계가 잘 나타나있다. Si_3N_4 와 강재의 대기중에서의 마멸은 입자의 연삭작용에 의해 진행되어 Si_3N_4 의 표면과 괴에 이룬다고 알려져 있다[14]. 따라서 윤활유를 사용하는 경우는 유막의 형성으로 연삭작용이 감소한다. 하중지지능력이 우수한 윤활유를 사용한 실험의 마찰동력에 대한 마멸률이 대기중과 물을 사용한 실험보다 매우 작음을 볼 수 있다. 물의 경우는 유체윤활의 효과가 매우 작운데, 이는 물의 낮은 점도로 막의 형성이 원활치 못하여 미끄럼 면에서 직접적인 접

촉이 많았기 때문에 연삭작용이 대기중 실험에 비해서는 적었지만, 어느 정도 진행되었음을 알 수 있다.

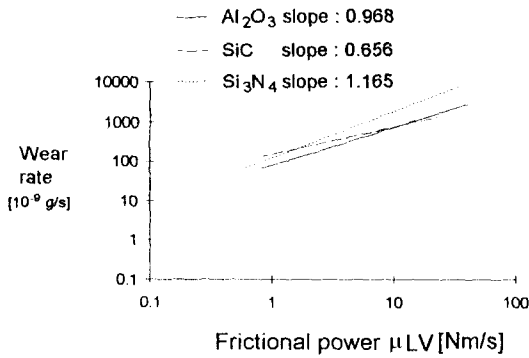
4-4. 세라믹과 강재의 마멸과정

각 세라믹들의 마멸거동은 표면돌기들의 접촉, 마멸입자, 전이층, 그리고 산화막 등에 의해 영향을 받는다. Al_2O_3 의 마멸거동은 대표적으로 전이층 형성에 영향받고, SiC의 마멸거동은 연삭작용과 산화막 형성에 영향을 받는다. 그리고 Si_3N_4 의 마멸거동은 표면돌기의 하중지지능력에 영향을 받는다. 대기 중에서는 직접적인 접촉과 연삭작용, 그리고 전이층 형성 등이 예상되는데 Fig. 17(a)에서 보듯이 재료간에 마멸률의 차이는 매우 작으나, Si_3N_4 의 경우 마찰동력이 증가하면서 마멸률이 많이 증가함을 알 수 있다. Fig. 17(b)는 물에서 실험한 결과를 간략히 표시한 그림인데, 수막의 형성과 그로 인한 청정작용이 예상되는 실험으로 Si_3N_4 의 경우 물이 그다지 작용을 하지 못했으나, Al_2O_3 과 SiC의 경우 그 효과가 컸으며, SiC의 경우 물과 마멸입자의 산화막 형성으로 매우 뛰어난 내마멸성을 나타내었다. Al_2O_3 의 경우는 마찰동력이 증가함에 따라 물의 작용이 감소함을 알 수 있다. 윤활유를 사용한 경우는 Fig. 17(c)에서 보듯이 SiC의 경우 유막의 형성으로 인한 마멸의 감소효과를 볼 수 있었고, 이는 Al_2O_3 과 Si_3N_4 의 경우에 비해 매우 작았다. Si_3N_4 의 경우는 주된 마멸과정이 대기 중에서는 돌기의 표면과 괴에 의한 것이기에 유막의 형성으로 매우 작은 마멸률을 나타내었다. Al_2O_3 의 경우는 마찰동력이 증가함에 따라 유막의 효과가 감소하였다. Al_2O_3 , SiC, 그리고 Si_3N_4 의 경우 물과 윤활유의 작용을 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 18은 Fig. 17의 자료를 바탕으로 마찰동력이 10일 때의 예상되는 마멸률과 주된 원인을 나타낸 것이다.

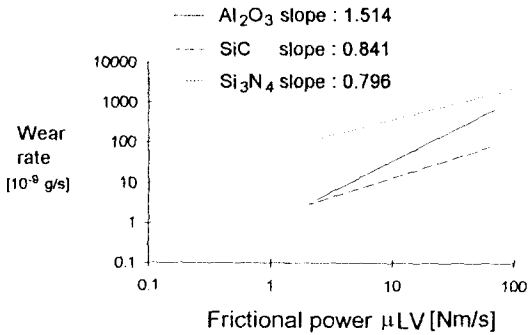
5. 결 론

본 연구에서는 세라믹(Al_2O_3 , SiC와 Si_3N_4)과 강재의 마멸 거동에 윤활조건이 미치는 영향을 조사하였다. 하중과 속도를 증가시키며 공기, 물, 그리고 윤활유를 사용하여 마찰 및 마멸 거동을 연구하였다.

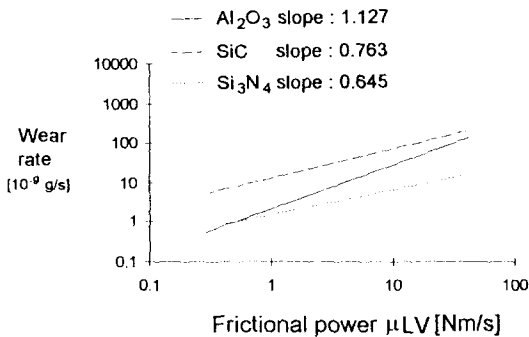
(1) 마찰동력은 윤활유를 사용하는 실험에서 마멸률과 매우 좋은 선형성을 나타내었다. 마멸률-마찰동력 선도는 세라믹의 마찰 및 특성을 나타내기 매우



(a) Wear rates of ceramics in air



(b) Wear rates of ceramics in water



(c) Wear rates of ceramics in oil

Fig. 17. Wear rates of ceramics under air, water and oil lubrication.

적합한 선도이다.

(2) Al₂O₃의 경우, 하중의 증가에 따라 두드러지는 표면돌기의 미세파괴현상은 윤활제에 의한 유막 형성으로 감소한다. 그러나 이 효과는 마찰동력이 증가하

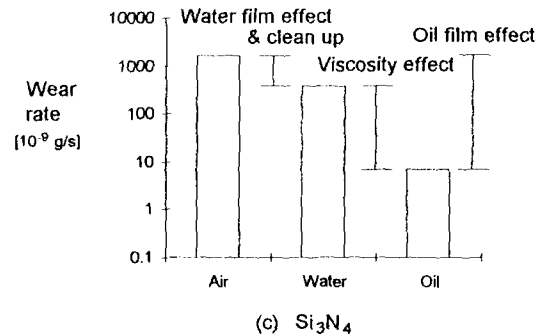
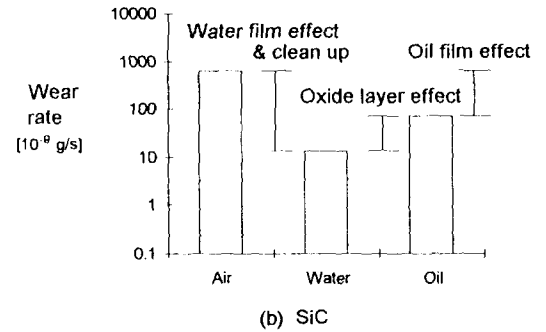
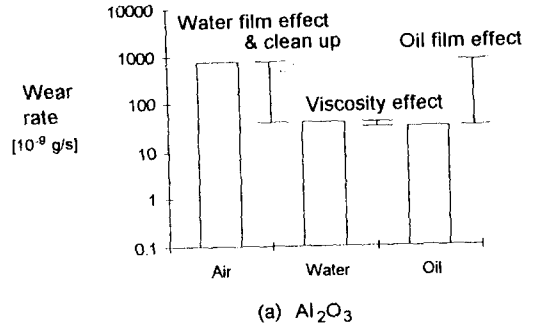


Fig. 18. The effects of water and oil on wear of ceramics (μ LV=10 Nm/s).

면서 다른 세라믹에 비해 현저히 감소한다. 대기 중에서는 전이층의 형성으로 Al₂O₃가 다른 재료에 비해 마멸률이 작았다.

(2) SiC의 마멸은 주로 연삭작용을 감소시킴으로 현저히 줄일 수 있다. 특히, 수분에 의한 산화막의 형성으로 내마멸성이 뚜렷이 향상되었다. 이는 점도에 의해 형성된 유막의 효과보다 내마멸성에 큰 영향을 미쳤다.

(3) Si₃N₄의 마멸과정은 표면돌기파괴가 두드러져서, 유체윤활의 경우 유막의 형성으로 매우 작은 마멸

를 나타내었다. 물을 사용한 경우는 수막의 효과가 매우 작았다.

참 고 문 헌

1. K.H. Zum Gahr, "Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel, and steel-steel pairs in lubricated and lubricated contact," *Wear*, 133, pp. 1-22, 1989.
2. J.P. Singh, "Effect of flaws on the fracture behavior of structural ceramics: a review," *Adv. Ceram. Mater.*, 3, pp. 18-27, 1988.
3. K.H. Lee and K.W. Kim, "Effects of humidity and sliding speed on wear properties of Si₃N₄ ceramics," *Materials Science and Engineering*, A186, pp. 185-191, 1994.
4. M.G. Gee, C.S. Matharu, E.A. Almond and T.S. Eyre, "The measurement of sliding friction and wear of ceramics at high temperature," *Wear*, 138, pp. 169-187, 1990.
5. T.E. Fisher and H. Tomizawa, "Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction and wear of silicon nitride," *Wear*, 105, pp. 29-45, 1985.
6. 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.
7. Shinya Sasaki, "The effects of the surrounding atmosphere on the friction and wear of alumina, zirconia, silicon carbide and silicon nitride," *Wear*, 134, pp.185-200, 1989.
8. P. Andersson and K. Holmberg, "Limitation on the use of ceramics in unlubricated sliding applications due to transfer layer formation," *Wear*, 175, pp. 1-8, 1994.
9. O.O. Ajayi and K.C. Ludema, "Formation of transfer film during ceramics and ceramics repeat pass sliding," *Proc. Wear of material*, pp. 349-359, 1989.
10. C. Papaphilippou, M. Vardavoulis and M. Jeandin, "The influence of humidity and the role of debris in the unlubricated wear of ductile cast iron against alumina," *Wear*, 177, pp. 151-157, 1994.
11. H.G. Scott, "Friction and wear of zirconia at very low sliding speeds. In K. C. Ludema (ed.), *Wear of materials*, 1985," ASME, New York, pp. 8-12, 1985.
12. H. Ishigaki, R. Nagata and M. Iwasa. "Effect of adsorbed water on friction of hot-pressed silicon nitride and silicon carbide at slow speed sliding," *Wear*, 121, pp. 107-116, 1988.
13. H. Ishigaki, I. Kawaguchi, M. Iwasa and Y. Toibana, "Friction and wear of hot pressed silicon nitride and other ceramics. In K. C. Ludema(ed.), *Wear of Materials 1985*," ASME, New York, 1985, pp. 13-21, 1985.
14. P. Gautier and K. Kato, "Wear mechanisms of silicon nitride, partially stabilized zirconia and alumina in unlubricated sliding against steel," *Wear*, 162-164, pp. 305-313, 1993.
15. 김영호, 이영제, "선접촉시 세라믹의 마찰 및 마멸 특성에 미치는 속도와 하중의 영향," *윤활학회지*, Vol. 11, No.4, pp.35-44, 1995.
16. G. Kapelski, F. Platon and P. Boch, "Unlubricated wear and friction behaviour of alumina and silicon carbide ceramics," *Proc. 15th Leeds-Lyon Symp. on Tribology*, pp. 349-354, 1988.
17. 장선태, 이영제, "세라믹 재료의 미끄럼 환경변화에 따른 마찰 및 마멸 거동," *윤활학회지*, Vol.11, No.3, pp. 11-23, 1995.
18. T. Sugita, K. Ueda and Y. Kanemura, "Material removal mechanisms of silicon nitride during rubbing in water," *Wear*, 97, pp. 1-10, 1984.
19. P. Andersson, "Water lubricated pin on disc tests with ceramics," *Wear*, 154, pp. 37-47, 1992.
20. J. Denape, A. Marzinotto and J. A. Petit, "Roughness effect of silicon nitride sliding on steel under boundary lubrication," *Wear*, 155, pp. 173-184, 1992.