

세라믹 재료의 미끄럼 환경 변화에 따른 마찰 및 마멸 거동

장선태 · 이영제*

홍익대학교 대학원
*성균관대학교 기계공학과

Friction and Wear Behavior of Ceramics under Various Sliding Environments

Sun-Tae Jang and Young-Ze Lee*

Graduate School, Hongik University

*Department of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University

Abstract—The friction and wear behavior of Al_2O_3 , SiC, and Si_3N_4 under the different sliding conditions were investigated. The cylinder-on-disc wear tester was used for a wear test method. Using the servo-motor, the sliding speed did not alternate due to the frictional forces. Three kinds of loads were selected to watch the variation of the wear rates and the frictional forces under a constant speed. Three kinds of sliding conditions were used to see the effects of the oxidation and the abrasion. The dominant wear mechanisms of Al_2O_3 were the abrasion and the formation of transfer layers. The abrasion has a great effect on the wear of SiC. The wear of Si_3N_4 was due to the asperity-failure and the oxidation. Also, the wear rate of each ceramic is shown to be related to the frictional power provided to the tribological system.

1. 서 론

세라믹은 내열성, 내마모성, 내식성 및 경량성, 저팽창성 등이 우수하여 폭 넓은 분야에 사용되고 있으며, 실용화가 진행 중에 있다. 이 중에서도 뛰어난 내마모성으로 인해 세라믹은 여러 기계부품의 소재로 많이 채택되고 있다.

그러나, 불행히도 이러한 세라믹의 우수한 내마모성에도 불구하고, 세라믹의 마찰 및 마멸에 대한 연구는 접촉 형태와 실험 조건에 따라 마찰계수와 마멸률의 차이가 크며, 대부분의 연구도 특정한 영역에서만 이루어지고 있어 포괄적인 세라믹 재료의 마멸거동에 대한 연구가 부족하였다[1-3].

대기 중에서 일반적으로 세라믹(Al_2O_3 , SiC와 Si_3N_4)의 윤활 특성에 관한 연구들에 의하면 마찰 및 마멸 거동은 복잡하여 온도의 증가와 소성변형, 미소파괴, 산화작용과 같은 여러가지 다른 메커니즘에 영향을

받으며[4,5], 또한 미끄럼 속도, 접촉하중, 습도와 같은 인자들이 마멸거동에 영향을 미친다[6]. Al_2O_3 의 경우 주된 마멸과정은 미세 연삭작용이고, 표면조도에 영향받으며, SiC의 경우 접촉 표면에서 마찰열로 인해 산화작용을 하며, Si_3N_4 쌍의 경우 이송막이 형성되고 미끄럼 운동 후 산화가 일어남을 보여주며, 실험 중 Al_2O_3 쌍의 마멸률이 가장 작다고 보고되었다[7]. 이러한 이송막은 마멸입자와 큰 마찰계수로 인해 형성되며, 공유결합 재료인 Si_3N_4 쌍과 SiC 쌍의 미끄럼 운동 시 이송막 형성이 용이하지 않으며, 이온결합 재료인 Al_2O_3 쌍의 실험시 이송막 형성이 우수하다고 알려져 있다[8]. 또한 세라믹의 이송막 형성은 습도에 의해서 영향을 받는데, 회주철과 Al_2O_3 의 실험에서 마멸입자의 역할은 전식 조건에서 유해하고 습식 조건에서 유용하게 나타났다[9]. 그러나 이러한 연구들은 특정한 하중과 속도에서 관찰되는 현상을 설명하였기 때문에 전반적인 세라믹의 마찰 및 마멸 특성을 설명

하기에는 부족하였다.

종합적인 연구 중의 하나가 마멸 거동의 온도에 의한 영향을 보려는 시도인데, 하중과 속도에 따라 발생하는 온도 변화에 관심을 가지고 실험한 결과 Si_3N_4 쌍의 마멸과정은 마찰계수가 0.7이하의 조건에서 화학작용과 산화에 영향을 받으며, 0.8이상의 조건에서는 미소파괴가 일어남을 마찰계수로서 구분하였다 [10]. 그리고 Al_2O_3 쌍의 마멸과정 연구도 유사한 조건에서 실험하였으며, 경도와 인성에 대한 온도의 영향과 임계 파괴 하중 이상에서 미세한 마멸로부터 과도한 마멸로 변이해 가는 과정을 연구하였다 [11]. 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 갖지만 일반적으로 마찰계수 그 자체만으로는 마멸의 기준을 삼기에는 부족하였다. 흥미로운 결과는 속도의 영향이 하중에 비해 매우 작다는 사실인데 [11], 이는 세라믹의 마멸이 반복되는 사이클에 의하기보다는 접촉 압력에 의한다는 것을 보이고 있다 [12].

한편 마멸지도의 등장과 함께 마멸거동은 세라믹 재료들의 특성에 따라 여러 메카니즘이 동시에 일어나며, 미끄럼 접촉면에서 마멸입자의 성분 분석과 색으로 산화작용의 정도를 구분하였고, 마찰계수의 증감으로 마멸거동의 변이를 정하였다. 또한 마멸입자에 의해 이송막 형성이 이루어지나, 이송막 형성은 미끄럼 환경에 영향을 받는다는 결과를 보고하였다 [10-12].

그러나 전반적으로 위의 연구들은 실험 자체가 그전의 연구들에서와 마찬가지로 국부적인 하중과 속도에서만 행해졌기 때문에 세라믹 재료들이 다른 영역에서는 어떤 특성을 나타내는 지를 설명할 수 없다. 그리고 이러한 마멸입자와 산화의 마멸거동에 대한 관계 및 마멸입자와 이송막의 관계를 실험 분위기와 하중의 변화에 대한 연구가 부족하였다.

본 연구는 실험 분위기를 대기 중과 마멸입자의 영향을 보기 위해 마멸입자를 제거하며 실험하였으며, 산화가 세라믹 재료에 어느 정도 영향을 미치는가를 보기 위하여 질소 분위기 하에서 하중을 단계적으로 증가시키며 Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 의 세라믹 재료로써 서로 같은 재질끼리 미끄럼 운동시키며 실험하였다. 각 실험 분위기를 변화시키며 실험한 마찰 및 마멸 데이터

를 분석하여 대표적인 마멸과정이 하중에 따라 어떻게 변이 하는지를 연구하였다. 또한, 마멸의 정도를 나타내는 척도로서 많이 사용되어 온 마멸률(wear rate)과 마멸량을 시간으로 나눈 값(wear weight per time)을 마찰동력에 대해 나타내었다. 마찰동력은 하중과 속도, 그리고 마찰계수를 곱한 값으로 온도와 매우 밀접한 관계를 갖는다.

2. 실험 장치 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 로드에 의해 스프링에 전달된 하중이 수직으로 가해지

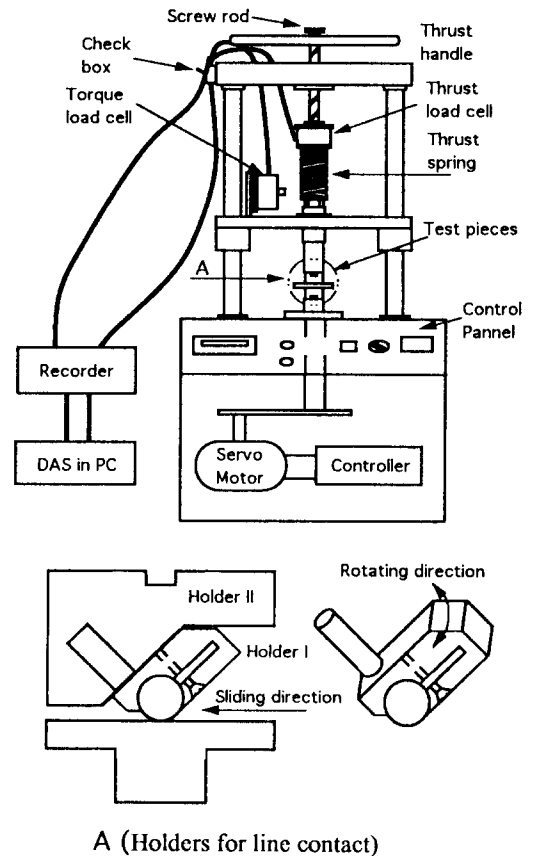


Fig. 1. Friction and Wear Tester.

Table 1. Material properties and surface roughness of ceramics

Material	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (10 ¹⁰ kg/mm ²)	Hardness (kg/mm ²)	Toughness (MN/m ^{3/2})	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C)	Roughness(μm)	
						flat	cylinder
Al ₂ O ₃	3.94	3.8	1800	3.0	9.5	0.252	0.254
SiC	3.20	4.0	2800	2.5	4.2	0.130	0.238
Si ₃ N ₄	3.24	3.0	1500	5.0	2.8	0.221	0.311

며, 로드셀과 연결되어 수직하중 및 마찰력을 측정할 수 있다. 특히 마찰력에 의한 속도의 감소를 방지하기 위해 본 실험에서는 서보모터를 사용하였다. 그리고 축방향의 진동도가 0.02 mm 이하가 되도록 하였다.

실린더의 접촉을 균일하게 하기 위해 실린더를 홀더에 결합한 후 홀더를 로드케에 끼워서 하중이 선접촉 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 Al₂O₃, SiC, 그리고 Si₃N₄의 세가지를 사용하였다. 이 시편의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

실린더 시편의 길이는 10 mm, 직경은 9.5 mm이다. 평판은 가로 세로가 각각 37 mm 이고, 두께는 6 mm 이다. 시편은 모두 폴리싱하였으며, 아세톤과 증류수로 세척하여 사용하였다. 시편의 표면거칠기는 Table 1에 나타나 있으며, 여기서는 Ra(산술평균) 값을 사용하였다. 미끄럼 속도는 0.2 m/s로 고정하여 사용하였다. 이는 속도의 변화가 마멸량에는 영향을 미치나, 마멸률에는 그다지 영향을 미치지 않기 때문이다[12, 13]. 특히 마찰력에 의한 속도의 감소를 방지하기 위해 본 실험에서는 서보모터를 사용하였다. 하중은 4, 8, 12 kg을 단계적으로 증가시켰고, 각 하중에서 3분 동안 실험하였다. 3분은 마찰계수가 안정화되기에 충분한 시간이었다[14]. 모든 실험은 두번 이상 반복하여 평균 값을 결과로 사용하였다.

특히 본 연구에서는 마멸특성에 미치는 분위기의 영향을 보기 위해 대기 중에서 실험을 하였고, 질소 분위기에서 실험을 하였다. 또한 마멸입자의 영향을 보기 위해 대기 중에서 실험시 공기압축기를 사용하여, 마멸입자를 제거하며 실험하였다. 이때는 접촉부의 반대 부분에 공기를 공급하여 접촉부의 마멸에 영향을 주지 않도록 하였다.

마찰력은 수직하중의 영향을 받지 않도록 베어링을 사용하여 실린더 시편에 연결하여 측정하였고, 이는

로드셀에 의해 레코더에 계속 기록하였다. 수직하중 역시 연속적으로 기록하였고, 회전에 따른 수직하중의 변화를 측정하여, 수직 하중의 미세한 변동을 고려하여 마찰계수를 계산하였다. 마찰계수는 수직하중과 마찰력을 컴퓨터로 받아들여 계산하였다. 마멸량을 측정하기 위해서 실험 전과 후에 각각 무게를 정밀 저울로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

실험 분위기는 대기 중과 마멸입자의 영향을 보기 위해 공기압축기를 이용하여 마멸입자를 제거하며 실험하였고, 또한 질소 분위기에서 산화를 억제하며 실험하였다.

실험 분위기 변화와 하중에 대한 세라믹 쌍들의 마찰계수와 마멸률을 Table 2에 나타낸다. 대기 중 실험은 Air로, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우는 Clean으로, 질소 분위기의 실험은 N₂로 표기하였다.

Fig. 2는 시간에 대한 세라믹 쌍들의 마찰거동을 실험 분위기와 하중에 따라 나타낸 것이다. Fig. 3은 세라믹 쌍들의 하중에 대한 마멸률을 보여주며 Fig. 4는 하중에 대한 각각의 실험 분위기에 따른 마멸률의 변화를 보여준다.

마멸률은 다음과 같이 정의되는 마멸률 K로 표시하였다.

$$K = \frac{W}{LS} \quad (1)$$

여기서 W는 정밀 저울에서 측정한 마멸량(g), L은 수직하중(N), S는 미끄럼 거리(m)를 나타낸다.

3-1. Al₂O₃ 실린더와 Al₂O₃ 평판

Al₂O₃ 쌍의 실험에서 4 kg시 Al₂O₃ 실린더에 의한 Al₂O₃ 디스크에서 발생한 마멸입자의 미세 연삭마멸로 인해 Fig. 3a)에서 보듯이 대기 중과 질소 분위기의

Table 2. Wear rates (Ks, 10^{-7} g/N · m) and friction coefficients of ceramics at various environments (sliding speed : 0.2 m/s, step loading)

Ceramic Couples	Load Environment	4 kg		8 kg		12 kg	
		Wear rate	Friction coefficient [†]	Wear rate	Friction coefficient	Wear rate	Friction coefficient
Al ₂ O ₃	Air*	0.71	2.181	0.35	1.054	7.08	0.937
	Clean**	0.18	1.371	0.71	1.181	4.72	0.926
	N ₂ ***	0.71	1.548	6.37	1.576	4.25	1.152
SiC	Air	11.33	0.904	7.08	1.296	7.79	1.359
	Clean	1.42	0.750	1.06	1.194	2.60	0.815
	N ₂	8.50	1.603	6.37	1.006	8.50	1.183
Si ₃ N ₄	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

*under atmosphere, **cleaning wear particles, ***under N₂
[†]averaged values during last 1 minute

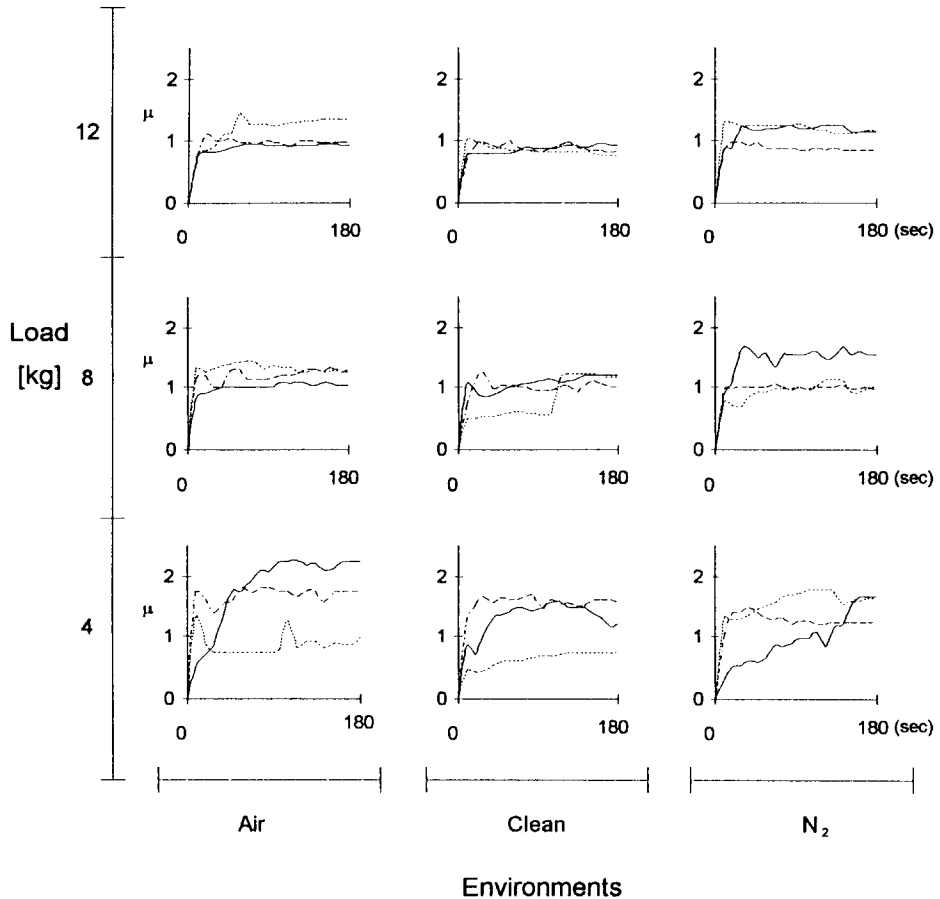


Fig. 2. Friction coefficients map of ceramic couples (— Al₂O₃, SiC, - - - - Si₃N₄).

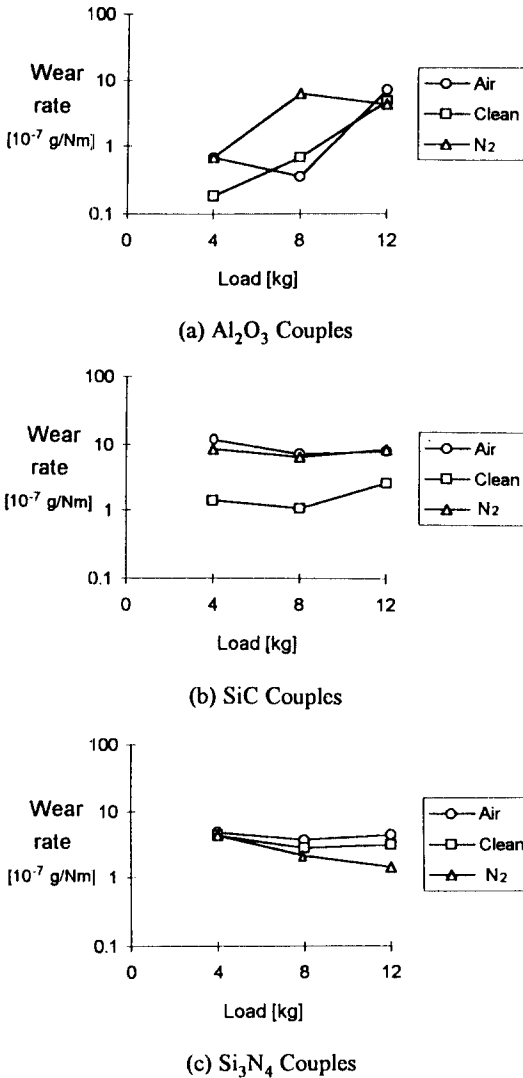


Fig. 3. Wear of ceramic couples for various loads.

실험에서 마멸이 발생하였고, 또한 마멸입자가 많이 생성되었다. 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 미세 연삭작용이 일어나기 어려워 미세한 양의 마멸이 발생하였다. 그리고 Fig. 2에서 보듯이, 대기 중과 질소 분위기의 실험에서 마멸입자의 작용으로 마찰은 시간에 따라 증가하였다. 이러한 마멸은 표면결합에서 미소파괴 그리고 상대표면의 표면돌기의 파괴로 야기되는 미세 연삭마멸에 의해 일어나며[7], 본 실험에서 마멸입자를 제거하며 실험한 경우에 마멸입자의 미세 연삭작용이 매우 작았고, 그 밖의 실험에서 미세 연삭

작용이 활발하게 발생하였다. 그래서 Al_2O_3 쌍의 초기 마멸은 주로 미세 연삭작용에 의해 점진적으로 진행됨을 알 수 있다.

하중을 8 kg으로 증가시킨 실험에서 Al_2O_3 쌍과 같은 이온결합재료끼리의 미끄럼 조합시 연속적인 이송막이 형성되며, 이로 인해 마멸은 감소하고 형성된 이송막은 기저층의 파괴를 방지하여 내마모성을 향상시킨다. 또한 이송막은 마멸입자로 형성되며 이송막의 형성을 조장하는 분자간의 결합력과 전자기력은 주위 분위기에 의해 표면에서 기인한다[8]. 그래서 실린더 표면에 이송막이 형성되어 기저층을 보호한다. 그러나, 질소 분위기는 산소의 부족으로 이러한 이송막 형성을 저해하였기 때문에 마멸률이 커지며 마멸입자의 간섭 현상으로 인해 Fig. 2에서 보듯이, 마찰도 크고 접촉 경계층에서 마멸을 증대하는 요인으로 작용한다. 그래서 Fig. 3a)에서 보듯이, 대기 중 실험에서 마멸이 상당히 줄었으나 질소 분위기 하의 실험에서는 컷으며, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우에서도 마멸이 상당히 증가하였다. 그리고 대기 중 실험의 마멸률은 4 kg의 대기 중 실험보다 마멸이 거의 반으로 줄었다. 또한 대기 중의 산소가 이송막 형성에 도움을 주어 질소 분위기의 실험의 마멸률보다 대기 중 실험의 마멸률이 1/18정도로 감소하였다.

마멸입자를 제거하며 실험한 경우 마멸 입자의 간섭 현상은 작았고, 마멸입자가 제거되어 이송막의 형성이 어려워 표면돌기의 직접적인 접촉으로 접촉압력의 증가로 표면돌기의 파괴과정이 일어났다. 그래서 이송막은 주위 분위기에 영향받음을 알 수 있고, 재료의 내마모성을 향상시켜 마멸을 줄인다. 그리고 이러한 이송막과 같은 윤활막 형성이 미끄럼 환경에 영향을 받으며 임계 파괴 하중 이상에서 미세한 마멸로부터 과도한 마멸로의 변이[11]가 일어남을 보여준다.

하중을 보다 증가시켜 12 kg에서 실험한 경우 대기 중 실험시 8 kg 때 형성된 이송막이 부하 하중을 충분히 견디어 내지 못하고 파괴가 일어나 더 이상 표면을 보호하지 못한다. 그리고 파괴된 이송막은 접촉 경계층에서 연삭작용을 하며 표면파괴가 일어나 마멸을 촉진한다.

질소 분위기의 실험과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우는 8 kg시처럼 계속적인 표면파괴가 일어나 마멸이 지속된다. 그래서 Fig. 3a)에서 보듯이, 12 kg 시의 대기 중 실험에서 이송막이 형성된 8 kg의 대기

중 실험 보다 큰 마멸이 일어났으며, 질소 분위기의 실험과 입자를 제거하며 실험한 경우도 상당한 양의 마멸이 발생했다.

이송막 형성에 관한 이 전의 연구에서는 어떠한 임계영역에서 소성변형과 표면파괴가 일어난 후 마멸입자가 이송막을 형성하여 하중지지능력이 커져 마멸을 감소시키며 기저층을 보호함[12]을 보여주었다. Al_2O_3 쌍의 실험시 저하중에서 미세 연삭작용에 의해 형성된 마멸입자가 이송막을 형성하여 마멸을 줄이나, 하중이 커짐에 따라 이송막이 파괴되고 표면파괴가 야기된다. 그리고 마멸입자를 제거하며 실험한 경우는 표면 파괴가 일어나며 마멸입자의 제거로 이송막 형성이 어렵다. 그래서 저하중에서 마멸은 적었으나 고하중으로 갈수록 마멸은 커진다. 또한 질소 분위기는 이송막 형성을 저해하는 요인으로 작용하여 마멸입자의 연삭작용과 표면 파괴로 인해 상당한 양의 마멸이 발생한다.

따라서 Al_2O_3 쌍의 마멸은 이송막의 형성으로 인한 기저층의 보호와 밀접한 관계가 있으나, 이송막은 마멸입자에 의한 것이고 주위 분위기에 영향받으며 산소가 이송막 형성을 돕는다. 그리고 이송막이 지지할 수 있는 이상의 하중으로 커지면 이송막의 파괴가 일어나 기저층을 계속해서 보호하지 못하여 표면파괴를 야기한다.

3-2. SiC 실린더와 SiC 펄판

SiC 쌍의 4 kg 실험시 SiC의 좋지 못한 파괴인성에 의해 표면돌기가 부서지는 표면 파괴로 마멸이 일어나며 이렇게 형성된 마멸입자는 연삭작용을 한다. 그래서 Fig. 3b)에서 보듯이, 마멸은 대기 중에서 가장 크게 나타났으며 질소 분위기의 실험에서도 상당한 양의 마멸이 일어났다. 그러나, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마멸률은 마멸입자의 연삭작용이 발생하기 어려워, 4 kg의 대기 중 실험시 일어난 마멸률의 1/8정도로 매우 적다. 그리고 Fig. 2에서 보듯이, 마찰도 매우 작았다. SiC 쌍과 같은 공유결합 재료들의 미끄럼시 연속적인 막이 형성되지 않으며 SiC 쌍의 마멸은 그레인 경계층 파괴[8]를 수반한다. Fig. 3b)에서 보듯이, 본 실험에서 산화작용보다 연삭작용이 우세하여 산화작용을 억제하며 실험한 질소분위기의 실험에서도 마멸률이 상당히 크게 나타났다.

본 연구와 대조적으로 다른 연구[7]에서는 SiC 쌍

의 실험시 산화 작용이 두드러져 마찰과 마멸 거동이 산화에 영향을 받으며 산화층이 존재한다고 보고되었다. 그리고 실리콘 산화물 입자가 형성되어 표면에 응착되나 응착성이 좋지 않아 쉽게 제거되며, 재료표면의 강도에 의해 과도한 응력에 저항하며 산화지역에서 파괴가 관찰되지 않았고, 큰 마멸량은 SiO₂의 형성에 의한 산화작용[12] 때문임을 보여준다. 그러나, 본 실험에서는 대기 중 실험시 표면돌기의 파괴와 마멸입자의 연삭작용 그리고 산화에 의한 마멸이 일어난다. 산화에 의해 형성된 막은 응착성이 좋지 않고 마멸입자의 연삭작용에 의해 쉽게 파괴된다. 그래서 질소 분위기의 실험보다 더 많은 마멸이 발생한다. 그리고 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 표면돌기의 파괴가 일어난다. 그러나, 마멸입자의 연삭작용이 일어나기 어려워 산화에 의해 형성된 산화막이 표면을 보호하는 역할을 한다. 그래서 대기 중 실험과 질소 분위기의 실험보다 매우 적은 마멸이 일어난다.

하중을 8 kg으로 증가시켰을 때 4 kg시 일어난 표면 파괴에 의해 형성된 마멸입자의 연삭작용이 계속해서 진행되어 대기 중과 질소 분위기의 실험에서 여전히 마멸이 크나 4 kg시 보다는 적었다. 그리고 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마멸은 4 kg의 입자를 제거하며 실험한 경우와 비슷한 정도로 적었다. Fig. 3b)에서 보듯이, 8 kg시 대기 중과 질소 분위기 하의 실험에서 마멸률이 유사하다는 것은 산화에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그리고 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 연삭작용이 억제되었기 때문에 마멸이 적었다. 이렇게 연삭작용이 산화보다 두드러지는 것은 취성 재료의 미끄럼 시 높은 국부인장응력이 세라믹의 경우 미소파괴마멸을 이끌고 파괴된 입자가 연삭작용을 가속시키기 때문[15]이라고 설명할 수 있다.

하중을 보다 증가시켜 12 kg 실험시 8 kg 실험의 경우와 유사한 현상인 접촉압력 증가로 표면돌기들의 파괴가 일어나, 여전히 대기 중과 질소 분위기에서 마멸률이 컸다. 그리고 Fig. 3b)에서 보듯이, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 마멸입자의 연삭 작용이 억제되었는데도 8 kg시의 입자를 제거하며 실험한 경우보다 마멸률이 커진 것은 하중의 증가에 따라 파괴인성이 좋지 못한 표면돌기의 접촉압력 증가로 파괴가 일어났기 때문이다.

SiC 쌍의 마멸은 미소파괴에 의해 마멸입자가 형성된다. 그리고 산화작용으로 인해 산화막이 형성되나

마멸입자의 연삭작용으로 산화막이 쉽게 파손되어 마멸을 가속시킨다. 그리고 이러한 현상은 파괴인성이 좋지 않은 SiC 표면의 파괴를 이끈다. SiC의 좋지 못한 파괴인성이 마멸을 한층 더 가속시키며 초기 거칠기가 파괴되고 산화가 일어남을 알 수 있다. 그러나, 하중이 커지면 마멸입자의 연삭작용이 가중되어 산화막을 파괴하며 마멸을 크게 한다. 그래서 마멸입자는 SiC 쌍의 미끄럼 운동에 유해하며, 마멸은 파괴인성과 초기 거칠기에 큰 영향을 받는다. 그리고 파괴인성이 보다 작은 재료라면 이러한 현상이 한층 더 가속화될 것이다.

3-3. Si₃N₄ 실린더와 Si₃N₄ 평판

Fig. 3c)에서 보듯이, Si₃N₄ 쌍의 실험에서 4 kg시 마멸은 SiC 쌍처럼 표면파괴 후 마멸입자의 연삭작용에 영향을 받지 않으며, Al₂O₃ 쌍의 실험에서 나타난 이송막의 형성을 보여 주지도 않는다. 그래서 마멸입자의 연삭작용이나 산화작용이 일어나기 어려워, 대기 중 실험의 마멸률이 마멸입자를 제거하며 실험한 경우와 질소 분위기의 실험보다 약간 컸다. 또한 이송막이 형성되지 않아 실린더의 표면을 보호하지 못하였다. 이것으로 Si₃N₄ 쌍은 미소 표면돌기의 파괴가 진행되어 마멸이 발생하였음을 알 수 있다. 그리고 이송막 형성에 관한 Si₃N₄ 쌍의 실험에서 어떠한 이송막도 발견되지 않았으며, 초기 마멸은 표면층의 손상과정에 의해 가속화된 파괴 과정[8]임을 보여준다.

그러나, 다른 연구[7]에서 Si₃N₄ 쌍의 실험시 마멸과 마찰은 매우 컸으며 디스크에서 핀으로의 이송막을 형성하였고, 마멸현상은 연삭작용임을 보여주며 접촉 후 산화가 일어남을 보여준다. 본 실험 중 Fig. 3c)의 4 kg 실험시를 보듯이, Si₃N₄의 표면파괴로 인해 질소 분위기의 실험시 산화를 억제하며 실험하였는데도 마멸률이 대기 중의 실험과 마멸률의 차이가 별로 없었다. 또한 마멸입자가 이송막을 형성하는데 도움을 주지 못하여 대기 중의 실험의 마멸률과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마멸률도 차이가 별로 없었다.

하중을 증가시켜 8 kg으로 하였을 때 질소 분위기의 실험시 표면돌기의 파괴가 여전히 일어남과 동시에 산화가 발생하여 마멸률이 대기 중 실험과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마멸 보다 작았다. 그리고 산화 작용으로 실리콘 산화막의 형성과 소멸로 마멸입자가 형성되며, 이러한 산화막은 소멸 후 빠르게

재 형성되며 이 현상이 마멸률을 증가시킴을 보여준다[10]. 본 실험에서도 산화가 발생하나 표면을 보호할 수 있을 정도의 하중지지 능력을 갖춘 산화막이나 이송막이 형성되지 않아 마멸을 이끈다.

하중을 12 kg으로 증가시켜 실험한 경우 표면파괴가 계속 진행되는 하나, 산화가 보다 가속화되어 산화막의 형성과 파괴가 마멸을 크게 한다. 그리고 Fig. 2에서 보듯이, 질소 분위기의 실험시 마멸입자는 마찰거동을 불안정하게 하지 않으며, SiC 쌍처럼 연삭작용을 이끌지 않아 마멸입자가 접촉 경계층에서 간섭작용을 하지 않는다. 그리고 마멸입자가 이송막을 형성하여 마멸률을 줄인다. 그래서 대기 중 실험시 형성되는 산화막 대신 마멸입자가 이송막을 형성하여 마멸률을 감소시켜 Fig. 3c)에서 보듯이, 마멸률이 8 kg시보다 대기 중의 실험에서 다소 증가하였고, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우도 약간 증가하였다. 그리고 질소 분위기의 실험 시의 마멸률은 8 kg시의 마멸률보다 1/2배 정도 감소하였다.

위에서 보듯이, Si₃N₄ 쌍의 마멸은 초기 표면돌기의 파괴로 인해 일어나며 그 후 산화와 함께 발생함을 볼 수 있다. 질소 분위기의 실험시 산화가 방지되어 산화막의 형성과 파괴가 일어나지 않아 Fig. 2에서 보듯이, 마찰거동이 특히 안정적이고 마멸입자의 이송막이 형성된다. 실험시편의 물성치를 보면, SiC의 파괴인성보다 Si₃N₄의 파괴인성이 두배 가량 크다. 그래서 Si₃N₄의 파괴인성이 뛰어나 SiC 쌍의 실험처럼 마멸입자의 연삭작용에 의한 마멸이 억제되었다. 그러나, 이러한 마멸입자는 접촉경계층에서 작용하여 산화막의 파괴를 이끈다. 그래서 대기 중에서 Si₃N₄ 쌍의 마멸은 Al₂O₃ 쌍의 실험처럼, 마멸입자에 의한 이송막이 형성되지 않았음에도 SiC 쌍의 실험처럼 마멸이 크지 않았던 것은 우수한 파괴인성 때문이다.

3-4. 세라믹 쌍들의 마멸 과정

Fig. 4는 각 세라믹 쌍들의 실험 분위기 변화에 따른 마멸률을 나타낸다.

Fig. 4a)에서 보듯이, 질소 분위기의 실험시 마멸은 대기 중 실험과 유사하게 일어났고, 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 마멸률이 대기 중과 질소 분위기의 실험보다 4배 가량 적었다. 따라서 4 kg 실험시 Al₂O₃의 초기 마멸은 주로 미세 연삭작용에 의해 일어난다. 그리고 SiC 쌍의 마멸률은 마멸입자의 연삭작용으로 대

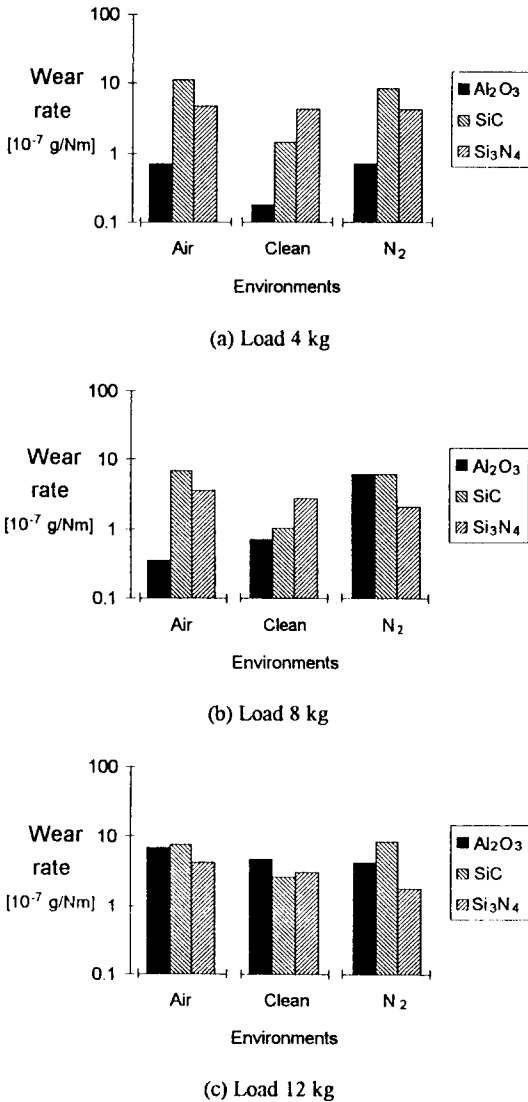


Fig. 4. Wear rates of ceramic couples under various environments.

기 중과 질소 분위기의 실험에서 매우 크며 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 마멸입자의 연삭작용이 일어나기 어려워, 마멸물이 질소 분위기의 실험보다 6배 정도 적었다. 그리고 대기 중 실험보다는 약 8배 적었다.

SiC 쌍은 미세 연삭작용이 두드러진 Al_2O_3 쌍 보다 더 큰 연삭작용이 일어나, Al_2O_3 쌍의 마멸률 보다 컸다.

Si_3N_4 쌍의 마멸의 주된 원인은 표면돌기의 접촉에

의한 파괴이다. 그래서 실험 분위기에 영향을 적게 받아 연삭작용이 일어난 SiC 쌍처럼 마멸입자를 제거하며 실험한 경우에도 마멸물이 대기 중 실험과 유사하게 발생하였다. 그리고 산화작용을 억제하며 실험한 질소 분위기의 실험에서도 대기 중과 비슷하게 마멸이 일어났다.

Fig. 4b)에서 보듯이, 8 kg 실험시 Al_2O_3 쌍의 마멸률은 이송막이 형성된 대기 중의 실험에서 매우 작았으며, 이송막의 형성이 저해된 질소분위기의 실험의 마멸률보다 대기 중 실험의 마멸률이 1/18배 정도로 작았다. 이로서 산소가 이송막 형성에 도움을 준다는 것을 알 수 있다.

SiC 쌍의 8 kg시의 마멸거동은 4 kg 시와 유사한 현상을 보여준다. 이는 연삭작용이 계속해서 일어나기 때문이다. 그리고 Si_3N_4 쌍의 마멸률은 Fig. 4b)에서 보듯이, 실험 분위기의 변화에 영향을 받고 접촉압력의 증가로 표면돌기의 파괴가 일어나며 산화막의 형성과 파괴가 마멸을 이끈다. 그래서 질소 분위기에서 대기 중과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우 보다 산화막의 형성이 억제되어 마멸이 작았다. 그러나, 8 kg의 실험에서도 4 kg의 실험처럼 표면파괴가 산화작용보다 두드러지며 이러한 현상이 마멸을 이끈다.

하중을 12 kg으로 증가시켜 실험한 경우 Fig. 4c)에서 보듯이, Al_2O_3 쌍의 마멸률은 8 kg 시 형성된 이송막의 하중지지능력 이상의 하중으로 인하여 이송막의 파괴가 일어나 8 kg의 대기 중 실험의 마멸률보다 12 kg의 대기 중 실험시 약 20배 컸다.

Al_2O_3 쌍의 마멸은 Fig. 5a)에서 보듯이, 4 kg시 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 점선 표시 부분은 Al_2O_3 쌍의 접촉시 표면돌기의 파괴로 생겨난 마멸입자의 미세연삭작용이 억제되어, 미세연삭작용이 일어난 대기 중 실험과의 마멸률 차이를 보여준다. 또한 질소 분위기의 실험시 산화작용이 억제되었는데도 미세연삭작용으로 인해 대기 중 실험과 마멸률이 같았다. 8 kg시 이송막이 형성된 대기 중 실험의 마멸률과 표면파괴가 일어난 그 밖의 실험과의 마멸률 차이를 점선으로 보여준다. 12 kg시 대기 중 실험에서 이송막의 파괴로 다른 실험들 보다 마멸률이 컸으며 그 차이를 점선으로 나타내었다.

그리고 마찰거동은 4 kg시 마멸입자의 미세연삭작용이 활발하게 진행된 대기 중과 질소분위기 실험의 마찰계수가 마멸입자의 제거로 미세연삭작용을 억제

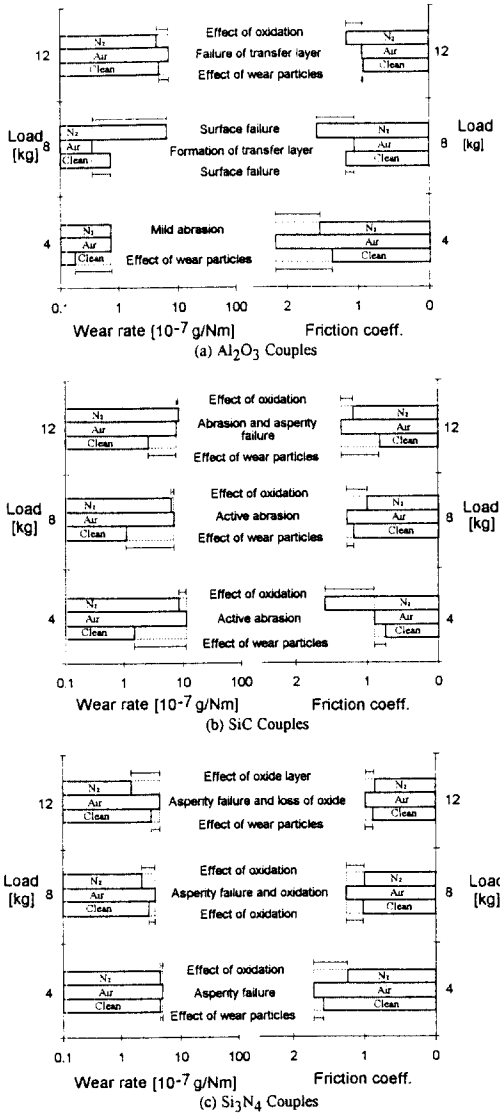


Fig. 5. Wear rates and friction coefficients of ceramic couples for the dominant behavior of friction and wear.

한 실험보다 컸다. 하중을 8 kg으로 증가시켜 실험한 경우, 이송막이 형성된 대기 중 실험의 마찰계수가 표면파괴가 일어난 질소분위기 실험과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우보다 작았다. 12 kg 시 접촉압력의 증가로 이송막이 파괴된 대기 중 실험과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마찰계수는 산화작용을 억제 한 질소분위기의 실험보다 작았다. 그래서 미끄럼 거 리가 증가함에 따라 대기 중의 산소가 마찰계수를 작

게 한다.

위에서 보듯이, Al_2O_3 쌍의 초기 마멸은 주로 미세 연삭작용에 의해 일어나며 이렇게 형성된 마멸입자는 이송막을 형성한다. 그러나, 이송막의 하중지지 능력 이상의 하중을 받게 되면 파괴가 일어나 마멸이 촉진 된다. 그러나 그 후 다시 더 큰 하중에 견딜 수 있는 이송막이 형성될 것이다.

그리고 SiC 쌍의 마멸은 Fig. 5b)에서 보듯이, 4 kg 시 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 점선 표시 부분은 마멸입자의 영향을 받은 대기 중 실험과의 마멸 률 차이를 보여준다. 또한 대기 중 실험보다 질소 분 위기의 실험시 마멸률이 적은 것은 산화작용의 억제 때문이며, 산화작용으로 인한 마멸률 차이를 점선으 로 보여준다. 8 kg시에서도 4 kg시와 유사한 마멸거 동을 보여준다. 12 kg시 연삭작용과 표면 돌기 파괴가 함께 일어난다. 마멸입자를 제거하며 실험한 조건에 서 점선 표시 부분은 마멸입자의 연삭작용의 억제로 인한 대기 중 실험과의 마멸률 차이를 보여준다. 그러 나, 연삭작용의 영향은 하중이 증가할 수록 감소하고 있음을 Fig. 5b)에서 보듯이, 마멸입자를 제거하며 실험한 조건에서 연삭작용의 영향의 정도를 나타내는 점선 표시 부분의 크기 감소로서 알 수 있다. 그러나, 12kg시 마멸입자를 제거하며 실험하여도 마멸률이 상당히 큰 것은 표면 돌기 파괴때문이다.

그리고 마찰거동은 4 kg시 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마찰계수는 산화막의 파괴를 이끄는 마 멸입자의 연삭작용이 일어나기 어려워, 연삭작용이 활발히 진행된 대기 중의 실험보다 작았다. 또한 산화 를 억제한 질소분위기 실험의 마찰계수보다 2배 가량 작았다. 8 kg시 마멸입자를 제거하며 실험한 경우와 대기 중 실험에서 4 kg시보다 마찰계수가 크게 증가 한다. 4 kg시보다 마찰계수가 급격히 증가하는 것은 접촉압력과 마멸입자의 증가 때문이다. 12 kg시 연삭 작용이 활발히 진행된 대기 중의 실험과 질소분위기 실험의 마찰계수가 마멸입자의 연삭작용을 억제하며 실험한 경우보다 컸다. 또한 대기 중 실험 시 접촉압 력과 마멸입자의 증가에 따라 마찰계수가 커진다.

위에서 보듯이 SiC 쌍의 초기 마멸은 연삭작용에 의해 두드러지게 일어나며 산화막이 형성되나, 마멸 입자의 연삭작용에 의해 쉽게 파손되어 마멸이 증가 한다. 그리고 하중이 커짐에 따라 연삭작용과 표면돌 기의 접촉 증가로 표면 돌기 파괴를 수반한다.

그리고 Si₃N₄ 쌍의 마멸은 Fig. 5c)에서 보듯이, 4 kg 시 주로 표면돌기파괴의 영향으로 마멸입자와 산화에 영향을 적게 받아 실험 분위기가 변하여도 유사한 마멸률을 보여준다. 8 kg시 표면돌기파괴와 함께 산화작용이 일어나기 시작하며 질소 분위기 실험의 점선 표시 부분이 산화작용이 일어난 대기 중 실험과의 마멸률 차이로서 산화작용의 정도를 보여준다. 또한 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 점선표시 부분은 마멸입자의 영향을 대기 중 실험과의 마멸률 차이로서 보여준다. 12 kg시 산화작용이 8 kg시 보다 활발히 진행되어 질소 분위기 실험에서 마멸률이 대기 중의 실험보다 적었으며, 이 차이를 점선으로 나타내어 산화작용으로 인한 산화막의 형성과 파괴의 영향을 보여준다.

그리고 마찰거동은 4 kg시 표면돌기파괴가 두드러져 모든 실험 분위기에서 마찰계수는 크게 나타난다. 그러나, 산화를 억제하며 실험한 질소분위기의 마찰계수가 다른 실험보다 다소 작았다. 8 kg과 12 kg시에서도 4 kg시와 유사한 현상이 계속해서 진행된다. 이로서 산화막의 형성과 파괴가 마찰계수를 크게 한다. 그리고 마멸입자에 의한 산화막의 파괴를 억제한 실험보다 질소분위기에서 실험하여 산화를 방지한 실험의 마찰계수가 작았다. 따라서 산화작용이 마찰거동에 유해함을 알 수 있다.

위에서 보듯이, Si₃N₄ 쌍의 초기 마멸은 Al₂O₃ 쌍과 SiC 쌍처럼 연삭작용에 의해 일어나지 않고, 주로 표면돌기 파괴에 의해 일어난다. 그리고 미끄럼 거리와 하중의 증가에 따라 표면돌기 파괴와 산화가 발생하며 산화막의 파괴가 마멸을 발생시킨다. 그래서 미끄럼 거리와 하중이 증가할 수록 산화가 보다 많이 일어나 산화막의 형성과 파괴가 주된 마멸과정이다. 그러나, 질소 분위기는 산화를 방지해 하중지지 능력이

작은 산화막 대신 하중지지 능력이 우수한 이송막이 형성되어 마멸을 감소시킨다.

위에서 고찰한 마멸 현상을 종합하여 Table 3에서 세라믹 쌍들의 실험 분위기와 하중의 변화에 대한 대기 중 실험을 기준으로 하여, 대표적인 마멸 과정의 변이와 마멸률을 나타냈다.

세라믹 쌍의 마멸거동의 추세와 변이 영역을 보기

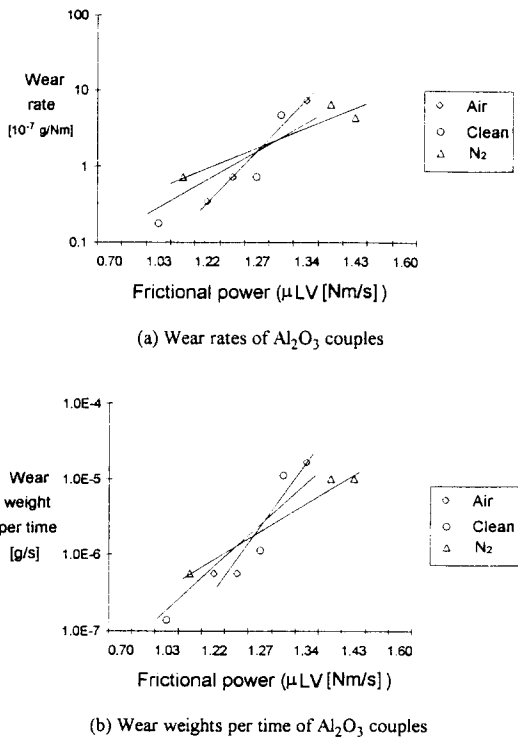


Fig. 6. Wear rates and wear weights per time of Al₂O₃ couples as the function of μLV for various environments and step loading (L: Load, V: sliding speed, μ: friction coefficient).

Table 3. Dominant wear mechanisms of ceramics due to step loading

Ceramics \ Load	4kg	8kg	12kg
Al ₂ O ₃	Mild abrasion (0.71 [†] , 2.181 [*])	Formation of transfer layer (0.35, 1.054)	Failure of transfer layer (7.08, 0.937)
SiC	Abrasion (11.33, 0.904)	Abrasion (7.08, 1.296)	Abrasion and asperity failure (7.79, 1.359)
Si ₃ N ₄	Asperity failure (4.72, 1.719)	Asperity failure and oxidation (3.54, 1.027)	Formation and loss of oxide (4.25, 0.982)

[†]wear rate, ^{*}friction coefficient

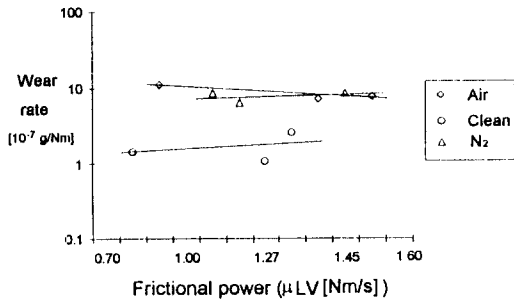
위하여 접촉온도와 밀접한 관련이 있는 마찰동력 (frictional power, μLV [Nm/s])과 마멸률 (wear rate, K_s [g/Nm])의 관계, 그리고 마찰동력 (frictional power, μLV [Nm/s])과 시간에 대한 마멸량 (wear weight per time, w/t [g/s])의 관계를 Fig. 6, Fig. 7, 그리고 Fig. 8에서 보여준다. μ 는 마찰계수이고, L 은 하중(N), V 는 미끄럼 속도(m/s), w 는 마멸량(g), t 는 시간(sec)이다.

여기서 시간에 대한 마멸량은 Kato[16]등이 제안한 마멸계수이며, 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 기울기 변화로 마멸거동의 변이를 볼 수 있다. 그리고 마찰동력은 하중과 속도, 마찰계수의 함수로서 온도와 마멸에 밀접한 관계를 가지고 있다.

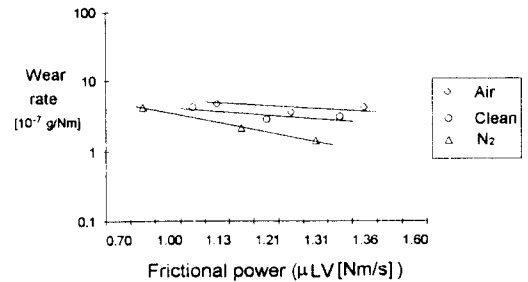
Fig. 6a)에서 보듯이, Al_2O_3 쌍의 실험에 대한 마찰동력과 마멸률의 관계를 나타낸다. 그리고 마찰동력이 이송막의 형성과 소멸에 영향을 미치고, 마찰동력의 증가에 따라 마멸 정도의 경향이 바뀌고 있음을 보여준다. 이로서 마찰동력은 마멸거동과 밀접한 관계를 가지고 있고, 마찰동력의 변화에 따라 마멸거동의

추세를 볼 수 있다. 그리고 Fig. 6b)는 Al_2O_3 쌍의 실험에 대한 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계와 기울기의 변화로 마멸거동의 변이를 보여준다. 여기서 대기 중 실험의 기울기와 마멸입자를 제거하며 실험한 경우와 질소분위기의 기울기의 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 이로서 마멸거동이 마멸입자와 질소분위기에 영향을 받음을 기울기의 변화로 알 수 있다. 따라서 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계로부터 마멸거동의 변이를 볼 수 있다.

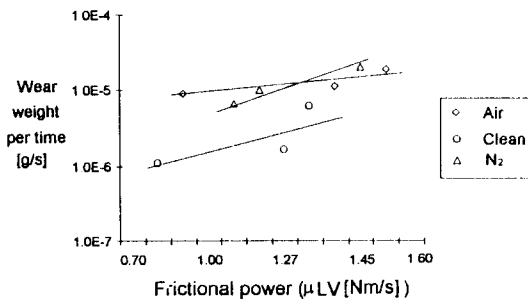
Fig. 7a)에서 보듯이, SiC 쌍의 실험에 대한 마찰동력과 마멸률의 관계를 보여주며, 대기 중 실험과 질소분위기에서 마찰동력의 증가에 따른 마멸률의 변화가 마멸입자를 제거하며 실험한 경우보다 마찰동력의 증가에 따른 마멸률의 변화가 작았다. 이로서 마멸거동이 마멸입자의 영향을 받는다는 것을 볼 수 있다. 따라서 SiC 쌍의 마멸거동의 경향을 보는데 마찰동력과 마멸률의 관계가 유용하다. 그리고 Fig. 7b)는 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계를 나타내며, 마멸입



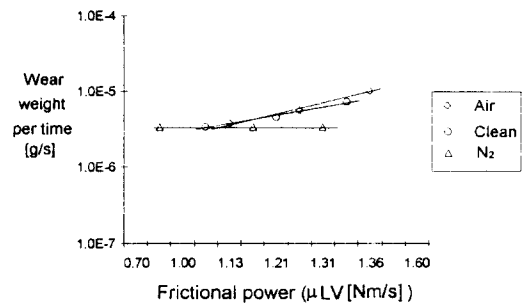
(a) Wear rates of SiC couples



(a) Wear rates of Si_3N_4 couples



(b) Wear weights per time of SiC couples



(b) Wear weights per time of Si_3N_4 couples

Fig. 7. wear rates and wear weights per time of SiC couples as the function of μLV for various environments and step loading (L: Load, V: sliding speed, μ : friction coefficient).

Fig. 8. Wear rates and wear weights per time of Si_3N_4 couples as the function of μLV for various environments and step loading (L: Load, V: Sliding speed, μ : friction coefficient).

Table 4. Slopes of the wear rate and the wear weight per time of ceramics based on the frictional power at various environments

Ceramics	Slopes		Slope (wear rate)	Slope (Wear weight per time)
	Environment			
Al ₂ O ₃	Air		9.936	12.421
	Clean		4.100	5.587
	N ₂		2.551	3.769
SiC	Air		-0.284	0.432
	Clean		0.145	0.920
	N ₂		0.098	1.351
Si ₃ N ₄	Air		-0.297	1.693
	Clean		-0.628	1.486
	N ₂		-1.518	0

자를 제거하며 실험한 경우의 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 기울기가 다른 실험의 기울기의 차이가 나타난다. 그러나 SiC 쌍의 마멸거동을 보는데는 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계보다 마찰동력과 마멸률의 관계가 더 유용하다.

Fig. 8a)는 Si₃N₄ 쌍의 마찰동력에 대한 마멸률의 관계를 보여주며, 대기 중과 마멸입자를 제거하며 실험한 경우의 마찰동력에 대한 마멸률의 기울기와 질소분위기의 마찰동력에 대한 마멸률의 기울기가 차이를 나타낸다. 이로서 Si₃N₄ 쌍의 마멸거동은 마찰동력과 마멸률의 관계로부터 산화에 더 큰 영향을 받음을 보여준다. 그리고 Fig. 8b)는 마찰동력과 시간에 대한 마멸량의 관계를 나타내며, 질소분위기의 실험의 기울기와 다른 실험의 기울기가 차이를 보여준다. 따라서 산화작용에 의해 마멸거동의 변이가 일어남을 알 수 있다. 이러한 산화에 대한 영향은 다른 결과[7,10]와도 잘 일치한다.

이러한 세라믹 쌍들의 실험들에 대한 마찰동력에 대응하는 마멸률과 마찰동력에 대응하는 시간에 대한 마멸량의 기울기를 Table 4에서 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 세라믹(Al₂O₃, SiC와 Si₃N₄)의 마멸 거동에 실험 분위기가 미치는 영향을 조사하였다. 하중을 증가시키며 마찰 및 두드러진 마멸 거동을 연구하여 검토한 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 일반적으로 Al₂O₃ 쌍의 마멸은 미세연삭작용이

일어나나, 본 연구에서 저하중에서는 미세연삭작용이 일어나고, 고하중에서는 이송막의 형성과 파괴가 발생한다. Al₂O₃ 쌍의 마멸은 초기에 미세연삭작용이 두드러지게 일어나며 그 후 마멸입자에 의해 이송막이 형성되어 표면을 보호하여 마멸률을 줄이나 접촉압력이 증가하면 이송막의 파괴가 일어나 마멸률을 크게 한다. 그래서 이송막은 형성된 하중 조건과 실험 분위기에 영향받는다.

(2) SiC 쌍의 초기 마멸은 산화 작용보다 연삭작용의 영향이 크며 하중이 증가함에 따라 연삭작용과 표면돌기들의 접촉압력 증가로 파괴되어 마멸률을 증가시킨다. 그래서 SiC 쌍의 미끄럼 시 마멸입자는 유해하며, 마찰계수는 접촉압력과 마멸입자가 증가함에 따라 커진다.

(3) Si₃N₄ 쌍의 마멸은 초기에 표면돌기 파괴가 우세하며 미끄럼 거리와 하중의 증가에 따라 표면돌기 파괴와 산화작용이 일어난다. 그리고 마찰계수가 0.8 이상의 영역에서도 미끄럼 거리의 증가에 따라 산화작용이 일어나며, 산화에 의한 산화막의 형성과 파괴가 마멸을 촉진시킨다. 그래서 산화작용을 억제하여 마멸률을 줄일 수 있다.

(4) 접촉온도와 밀접한 관련이 있는 마찰동력(frictional power, μLV [Nm/s])을 이용하면, 마멸률(wear rate, Ks [g/Nm])과 시간에 대한 마멸량(wear weight per time, w/t [g/s])과의 관계를 통하여 마멸거동을 나타낼 수 있다. 여기서 μ 는 마찰계수, 그리고 L 은 하중(N), V 는 미끄럼 속도(m/s), w 는 마멸량(g), t 는 시간(second)이다.

후 기

이 논문은 94년도 한국과학재단 연구비 지원(핵심 연구 과제번호 941-1000-034-2)에 의해 수행된 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. Holmberg, P. Andersson and J. Valli, "Three body interaction in metal-ceramic and ceramic-ceramic contacts", Proc. 14th Leeds-Lyon Symp. on Tribology, pp.227-235, 1987.
2. P. Andersson, "Water lubricated pin on disc tests with ceramics", Wear, 154, pp.37-47, 1992.
3. T. Hisakado, H. Suda and H. Watanabe, "The friction

- and wear mechanisms between ceramics and metals", *Wear*, 155, pp.251-268, 1992.
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. K. H. Lee and K. W. Kim, "Effects of humidity and sliding speed on wear properties of Si_3N_4 ceramics", *Materials Science and Engineering*, A186, pp.185-191, 1994.
 7. 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.
 8. 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.
 9. C. Papaphilippou, M. Vardavoulias 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.
 10. X. Dong and S. Jahanmir, "Wear transition diagram for silicon nitride", *Wear*, 165, pp.169-180, 1993.
 11. S. Jahanmir and X. Dong, "Mechanism of mild to severe wear Transition in alpha-alumina", *J. of Tribology*, Vol. 114, pp.403-411, 1992.
 12. A. Blomberg, M. Olsson and S. Hogmark, "Wear mechanisms and tribo mapping of Al_2O_3 and SiC in dry sliding", *Wear*, 171, pp.77-89, 1994.
 13. 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.
 14. 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.
 15. E. S. Herold and D. Christopher, "The friction and wear of ceramic/ceramic and ceramic/metal combinations in sliding contact", *STLE*, Vol. 50, pp.571-576, 1994.
 16. 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.