

선접촉시 세라믹의 마찰 및 마멸 특성에 미치는 속도와 하중의 영향

김영호 · 이영제*

홍익대학교 대학원, *성균관대학교 기계공학과

The Effects of Sliding Speed and Load on Tribological Behavior of Ceramics in Line-contact Sliding

Young-Ho Kim and Young-Ze Lee*

Graduate School, Hong-Ik University

*Department of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University

Abstract—Within the practical ranges of speed and load, the formation of transfer films and the consequent effects on the friction and wear behavior of ceramic materials during repeated pass sliding contact were studied. These tests were done using Al_2O_3 , SiC and Si_3N_4 with the cylinder-on-flat test configuration. The three pairings behaved differently, even if some wear mechanisms were common to the three systems. The Al_2O_3 pair showed the least wear in overall conditions, followed by the Si_3N_4 pair in harder sliding conditions. The wear of SiC was very high at severe loading. In case of Al_2O_3 and Si_3N_4 , the transfer film, whenever formed, is strongly attached, enough to resist being wiped off by the slider. As a consequence, the formation of this film leads to a decrease in the wear rate because of the protecting role of the film. The presence of the film at the contact interface also results in high friction. Also, the wear rate of each ceramics is related to the frictional power provided by load, speed and friction.

1. 서 론

세라믹은 윤활공학적인 재질로서 광범위하게 적용되고 있다. 이는 세라믹이 금속 재료보다 가볍고 내마모성이 뛰어나며, 부식과 고온 저항성이 우수하여 극한 조건하에서 매우 뛰어난 내마모 특성을 나타내기 때문이다. 예를 들어 엔진의 마찰운동 부분을 금속 대신 세라믹으로 만든다면 엔진 성능을 크게 향상시킬 수 있다[1,2].

그 동안 세라믹 마멸 연구의 주된 관심사는 표면 손상과 재료 손실 과정이었다. 대표적인 연구결과로 마멸을 소성변형, 취성파괴, 그리고 화학적인 고찰을 포함한 메카니즘등으로 설명하였다[3-5]. 경도, 취성, 탄성계수와 같은 기계적 성질과 세라믹의 마멸 거동을 연관시키려는 시도도 있었다[6]. 이렇듯 많은 연구가

수행되었음에도 연구자들의 관심이 관심을 갖는 좁은 범위에 한정되어 있어 폭 넓은 연구가 진행되지 못한 것이 현실이다. 대부분의 연구자들은 한정된 조건에서 발생하는 어떤 특정한 현상을 기초로 전반적인 마멸을 설명하려는 오류를 범하여 왔다.

일반적으로 세라믹의 마멸은 반복적인 미끄럼 운동을 하는 동안 초기에는 증가하다가 어떤 시점후 감소하여 정상상태로 다가간다고 알려져 있다[7]. 이것은 위에서 언급했듯이 여러 인자가 복합되어 나타나는 현상으로 추정된다. 초기 마멸률이 큰 것에 대한 가장 일반적이고 공통된 견해는 평판 위의 구나 실린더가 미끄럼 초기에 부분적으로 큰 접촉압력을 받기 때문이다. 이 접촉압력은 마멸 표면과 접촉 면적이 커짐에 따라 감소한다. 시간에 따른 마멸률 감소에 대한 좀더 설득력 있는 설명은 마멸입자가 표면에 다

시 붙는 이른바 '전이층'이 형성되기 때문이라는 것이다[7]. 이 과정을 통하여 마멸에 의해 표면에서 떨어져 나간 재료의 일부가 마멸계통에 남게 된다. 일부 금속 재료에서는 미끄럼 접촉하는 동안 전이층(재료의 이동)의 형성이 여러 연구가들에 의해 발표되었다[8]. 전이층의 형성은 마찰과 마멸 거동의 변이와 관계가 있고, 그러한 변이가 표면 거칠기와 외형의 변화와 연관이 있다고 알려졌다[9,10]. 이러한 현상에 영향을 미치는 원인과 인자를 설명하기 위한 많은 연구가 진행되었지만 일정한 속도와 하중을 정하고 그때 발생하는 마찰과 마멸에 관심을 두었기 때문에 세라믹 재료의 전반적인 사용 범위 내에서 특성은 밝혀지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 사용범위 내에서의 하중과 속도의 변화를 주어 가며 마멸량과 마찰계수의 변이를 측정하여 전이층이 형성되는 영역을 살펴본다. 이 영역은 Al_2O_3 , SiC 그리고 Si_3N_4 사용시 마찰과 마모의 특성을 나타내는 매우 좋은 자료가 될 것이다. 또한, 실험 결과는 기존의 마멸률, 그리고 마모량을 시간으로 나눈 값에 대해 마찰동력으로 표시가 가능한데, 마찰동력은 하중과 속도, 그리고 마찰계수를 곱한 값으로 미끄럼운동시 발생하는 마찰열과 밀접한 관계가 있는 값이다. 이 마멸률-마찰동력 선도는 서로 다른 세라믹 재료의 마찰 및 마멸 특성을 종합적으로 비교할 수 있는 자료가 될 것이다.

2. 실험

2-1. 시편

세 종류의 공학적으로 사용가능한 세라믹재료를 이 연구에 사용했다. 시편은 Al_2O_3 , SiC, 그리고 Si_3N_4 의 세 가지를 사용하였다. 각 시편들의 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.

세 종류의 세라믹 시편은 서로 같은 재질끼리 조합하여 사용하였다. 시편은 모두 폴리싱하였고, 표면조도를 Table 1에 나타내었다. 시편은 실험 전에 아세톤과 증류수로 세척하여 사용하였고, 하중과 속도를 바꿀 때마다 새로운 시편을 사용하였다.

알루미늄은 이온결합으로 되어 있는데 양이온 Al^{3+} 에 의해 채워져 있는 치환된 8면체와 더불어 음이온 O^{2-} 이 16면체 밀폐 구조를 형성하고 있다. 알루미늄은 고밀도 재료를 만들기 위하여 고온 압축하여 소결하였고, 비정상적인 grain 성장을 줄이기 위하여 도프제를 첨가하였다. SiC는 사면체를 형성하는 Si와 C원자의 공유 결합으로 존재한다. 공유결합을 하고 있는 SiC는 밀도를 높이기가 매우 어렵기 때문에 소결 첨가제가 제조과정에서 고밀도화하는데 필요하다. 이 연구에서 사용한 SiC의 미세구조는 다중 격자결합층 주위에 일부 상이 다른 재료와 더불어 동축의 SiC격자로 존재한다. Si_3N_4 에서 각각의 Si원자는 SiN_4 사면체를 형성하는 네개의 질소와 공유결합하며, 이 사면

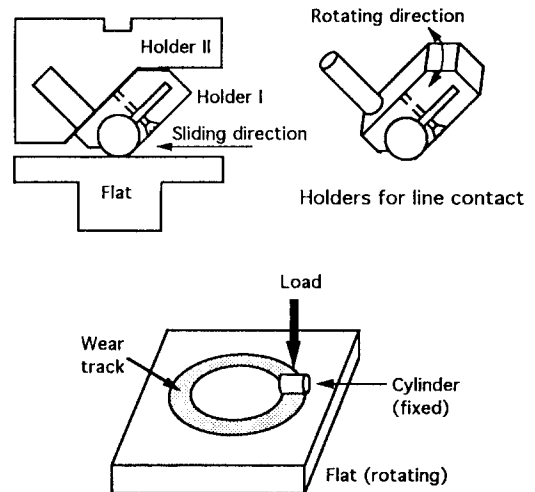


Fig. 1. Contact geometry for friction and wear test.

Table 1. Material properties* and surface roughnesses of experimental materials

Material	Density (g/cm ³)	Elastic Modulus (10 ¹⁰ kg/mm ³)	Hardness (kg/mm ³)	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	0.221	0.311
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	0.252	0.254

*쌍용양회 중앙연구소에서 측정한 값임.

체는 Si_3N_4 구조의 블록을 형성하고 있다. Si_3N_4 또한 공유결합을 하고 있기 때문에 밀도를 높이기 어렵다. 첨가제가 제조과정중에 고밀도화를 촉진하기 위하여 사용되었다. 미세구조는 신장된 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ grain과 연속적인 grain경계층 상태로 구성된다.

2-2. 실험장치 및 조건

실험은 세라믹 실린더와 평판을 사용한다. 이는 선접촉의 경우가 공학적으로 보다 많이 사용되기 때문이다. Fig. 1에서 마멸 시편의 접촉 형태를 나타내었다. 실린더는 정지해 있고 평판은 회전한다. 실린더에는 스크류 로드 에 의해 수직하중이 가해지며, 로드셀과 연결되어 수직하중 및 마찰력을 측정할 수 있다. 실린더의 접촉을 균일하게 하기 위해 실린더를 홀더에 결합한 후 홀더를 로드 에 끼워서 하중이 선접촉 부분을 따라 균일하게 작용토록 하였다.

실린더형 핀은 축에 수직인 방향으로 평판에 미끄럼운동하였다. 하중은 4, 8, 16 [kg]을 사용하였고, 미끄럼 속도는 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 [m/s]로 하중과 미끄럼 속도를 변화시켜 가며 실험하였다. 이 범위에서 각 세라믹은 마찰 및 마멸의 변이를 나타내었고, 그리고 고하중과 고속에서는 표면 파괴가 3분 안에 발생하였다. 또한 전반적인 하중과 속도에서 3분간의 실험에서도 마멸량이 충분히 발생하였다.

특히 마찰력에 의한 속도의 감소 및 변동을 방지하기 위해 본 실험에서는 서보모터를 사용하였다. 마찰력은 수직하중의 영향을 받지 않도록 마찰이 매우 작

은 베어링을 사용하여 실린더 시편에 연결하여 측정하였고, 이는 로드셀에 의해 레코더에 계속 기록하였다. 수직하중 역시 연속적으로 기록하여 회전에 따른 수직하중의 변화를 측정하여, 수직 하중의 미세한 변동을 고려하여 마찰 계수를 계산하였다. 마찰계수는 수직하중과 마찰력을 컴퓨터로 받아들여 계산하였다.

모든 실험은 실내조건에서 행하였다. 마찰은 실험하는 동안 차트 레코더에 의해 연속적으로 측정하고, 기록하였으며, 실린더형 핀의 마멸량은 실험 전과 후의 무게를 전자 정밀저울로써 각각 측정하였다. 모든 실험은 두번 이상 반복하여 평균 값을 결과로 사용하였다.

3. 실험 결과

실험을 수행한 결과 각 세라믹 쌍들의 하중과 속도에 대한 마멸률과 마찰계수를 Table 2에 나타내었다. 마찰계수는 실험 중 계속 측정하였고, Fig. 2에 세라믹 쌍들의 시간에 대한 마찰계수 특성을 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4 그리고 Fig. 5는 세라믹 쌍들의 하중과 미끄럼 속도에 대한 시간에 따른 마멸량과 마멸률 그리고 마찰계수를 Table 2의 자료를 사용하여 나타내었다.

3-1. Al_2O_3 실린더와 Al_2O_3 평판

Al_2O_3 쌍을 사용한 실험에서는 SiC와 Si_3N_4 를 사용한 경우보다 주어진 속도와 하중에서 전반적으로 마

Table 2. Wear rates and friction coefficients of ceramics

Ceramics	하중 속도	4 kg		8 kg		16 kg	
		마멸률*	마찰계수*	마멸률	마찰계수	마멸률	마찰계수
Al_2O_3	0.05 m/s	1.238	1.477	0.710	1.213	1.060	1.823
	0.1 m/s	1.505	1.981	0.710	2.446	0.355	2.434
	0.2 m/s	0.710	2.181	0.530	1.405	1.948	1.695
	0.4 m/s	0.355	1.931	1.858	1.652	1.150	1.161
SiC	0.05 m/s	6.465	0.683	3.232	0.560	25.59	1.227
	0.1 m/s	3.232	0.835	8.086	0.938	45.686	0.917
	0.2 m/s	11.330	0.904	5.654	0.757	13.751	1.084
	0.4 m/s	3.362	0.602	6.065	0.920		
Si_3N_4	0.05 m/s	16.990	0.921	9.910	1.342	8.755	1.195
	0.1 m/s	8.490	0.976	4.960	1.238	3.369	1.234
	0.2 m/s	4.720	1.719	3.540	1.286	2.189	1.175
	0.4 m/s	failure		failure		failure	

*Wear rate (Ks) 10^{-7} g/N·m

*마찰계수는 실험종료 1분전의 평균값

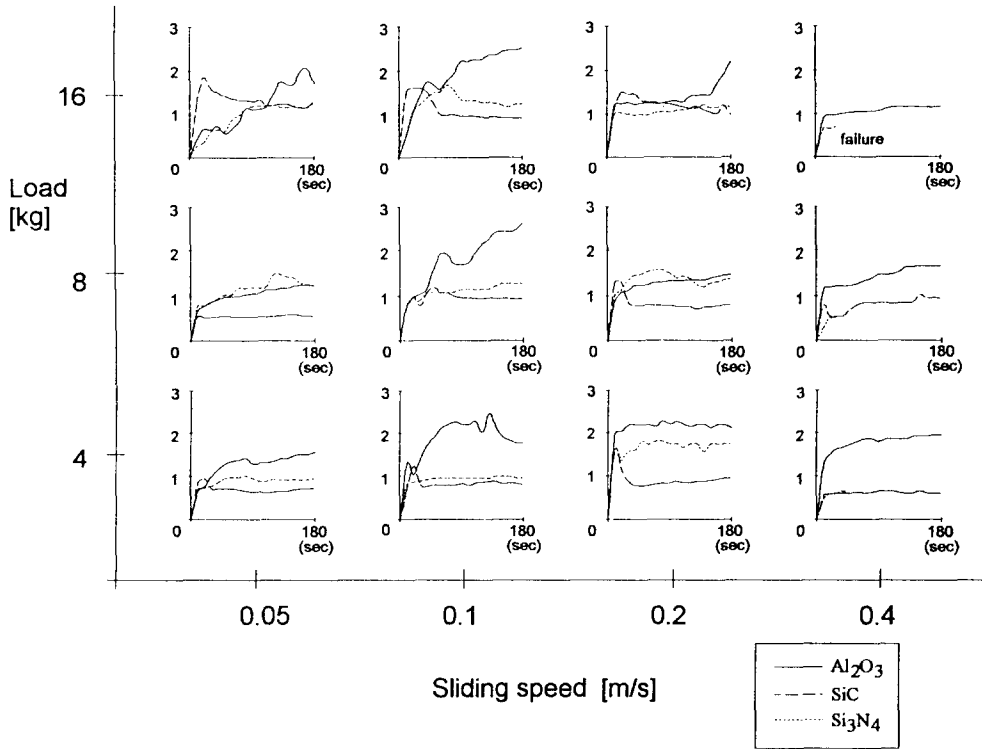
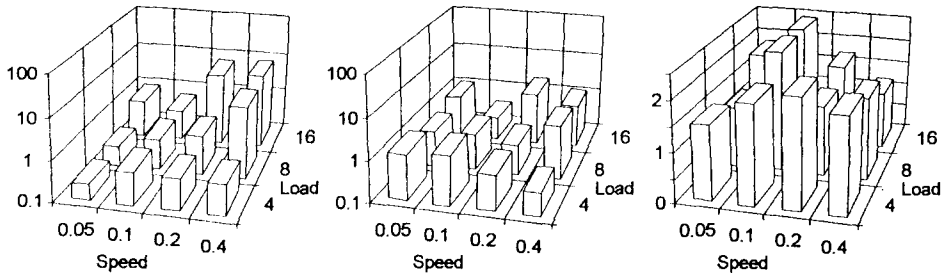


Fig. 2. Friction coefficients map Al_2O_3 , SiC and Si_3N_4 .



(a) Wear mass per time [$\times 10^{-6}$ g/s] (b) Wear rate [$\times 10^{-7}$ g/N m] (c) Friction coefficient

Fig. 3. Wear mass per time, wear rate & friction coefficient of Al_2O_3 under various loads [kg] and sliding speeds [m/s].

멸량과 마멸률이 작았으며, 반면에 마찰력은 매우 큰 것으로 나타났다.

Fig. 3a)에서 Al_2O_3 쌍의 경우 하중과 속도가 증가할수록 마멸량이 증가함을 볼 수 있다. 이 마멸량을 하중과 미끄럼 거리로 나눈 마멸률은 Fig. 3b)에서 보듯이, 저속과 저하중 그리고 고속과 고하중에서 크게 나타나며, 중간 범위에서는 작게 나타난다. 특히 4 kg시 0.4 m/s의 마멸률이 상대적으로 저속인 다른 미끄럼 속도의 마멸률보다 1/2~1/5 정도로 작았으며, 4 kg시

마멸에 대한 미끄럼 속도의 영향이 다른 하중보다 두드러지게 나타났다. 마찰계수는 Fig. 3c)에서 보듯이 4 kg시 다소 크게 나타났으나, Fig. 2에서 보면 매우 안정적임을 알 수 있다. 특히, 0.1 m/s에서는 마찰계수가 매우 크게 나타났다.

하중을 8 kg으로 증가시킨 경우, 마멸률은 0.4 m/s 이외의 조건에서 4 kg시의 1/2배 정도로 작다. 마찰계동은 4 kg시와 유사한 특성을 보인다.

16 kg으로 하중을 보다 크게 하여 실험한 경우, 0.1

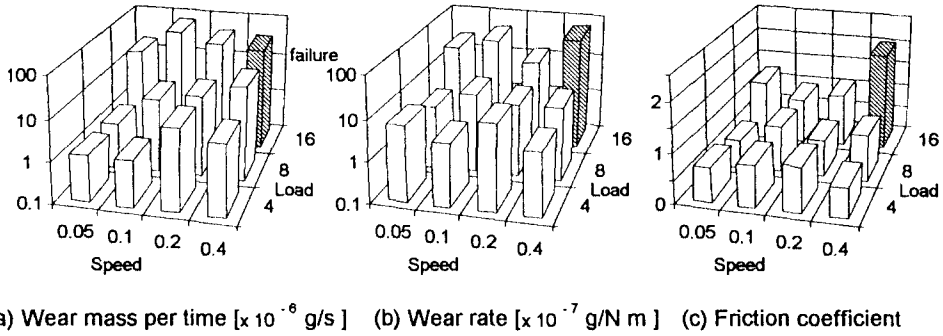


Fig. 4. Wear mass per time, wear rate & friction coefficient of SiC under various loads [kg] and sliding speeds [m/s].

m/s를 제외하고 나머지 실험에서 상당히 큰 마멸이 일어났다. 마찰계수는 0.05, 0.1 m/s시 불안정하였고, 마찰계수 또한 컸다. 그러나 고속도에서는 안정적인 거동을 나타낸다.

따라서 마멸률은 저하중에서 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고, 이러한 경향은 하중이 증가함에 따라 저속에서는 유사한 경향을 보이나, 속도가 증가함에 따라 급격히 마멸량이 증가함을 알 수 있다.

그리고 Fig. 3c)에서 알 수 있듯이 이러한 낮은 마멸률과 높은 마찰계수는 Al₂O₃ 쌍의 실험[1]에서 흔히 관찰되었듯이 Al₂O₃ 마멸입자가 어떤 하중과 속도 영역에서 형성하는 전이층의 영향으로 볼 수 있다. 또한 마찰계수는 고속과 고하중을 제외하고는 전반적으로 매우 큰데, 시간에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 2에서 살펴보면 마찰계수가 매우 안정적임을 알 수 있다.

3-2. SiC 실린더와 SiC 펄판

SiC 쌍의 실험에서는 Al₂O₃ 쌍을 사용한 경우보다 주어진 속도와 하중에서 전반적으로 마멸량이 매우 컸으며, 따라서 마멸률도 전 영역에 걸쳐서 증가하였다. 반면에 마찰력은 현저히 감소하였다.

Fig. 4a)에서 고하중과 고속도일수록 마멸량이 증가하며, 특히 0.4 m/s와 16 kg시 예기치 못한 표면파괴가 발생하였다. 그리고 Fig. 4b)에서 보듯이, 4 kg시 0.05와 0.2 m/s의 마멸률이 0.1과 0.4 m/s의 마멸률보다 2~3배 크게 나타난다.

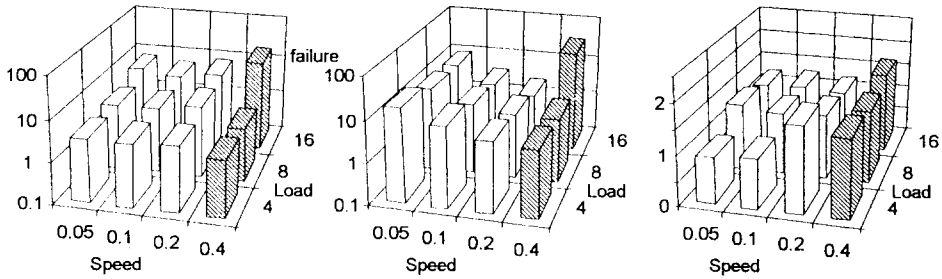
하중을 8 kg으로 증가시킨 경우 0.05와 0.2 m/s의 마멸률은 4 kg시 보다 2배 정도 감소하나, 0.1과 0.4 m/s의 마멸률은 4 kg시 보다 2배 정도 증가한다. 그러나, 8 kg시에는 0.05 m/s를 제외하고 나머지 미끄럼

속도에서 마멸률이 비슷하였다. 여기서 접촉압력이 증가함에 따라 미끄럼 속도의 영향이 감소함을 보여 준다. 그리고 Fig. 4c)에서 보듯이, 마찰계수는 Al₂O₃ 쌍과 Si₃N₄ 쌍보다 작았다. 하중을 16 kg으로 증가시켜 실험한 경우, 과도한 접촉압력으로 표면돌기의 파괴가 두드러진다[3]. 이러한 현상으로 인해 마멸률이 급격히 증가하며 0.4 m/s에서는 과도한 표면파괴가 일어났다.

SiC 쌍의 실험[11]에서 볼 수 있듯이 이렇게 낮은 마찰계수와 접촉압력의 증가에 따른 마멸거동은 마멸 입자에 의한 연삭작용과 표면파괴가 두드러지는 영역이 있음을 보여준다. 하중과 미끄럼 속도에 대한 마찰계수는 Fig. 4c)에 보여주며, 마찰계수는 Fig. 2에 나타났다. 4 kg시 마찰계수는 안정적이고 하중이 증가함에 따라 표면파괴가 일어나 불안정해지는 영역이 나타나기 시작하며, 16 kg시 마찰계수는 모든 미끄럼 속도에서 불안정하였다.

3-3. Si₃N₄ 실린더와 Si₃N₄ 펄판

Si₃N₄ 쌍의 마멸과정은 Fig. 5a)에서 보듯이, 하중과 속도에 따라 마멸량이 거의 일정하였으나, 0.4 m/s시 급격한 표면파괴로 인해 마멸량이 급증하였다. 그러나, Al₂O₃ 쌍과 SiC 쌍과는 대조적으로 마멸량은 미끄럼 속도의 증가에 따라 각각 하중에 대해 유사한 특성을 보인다. 그리고 Fig. 5b)에서 보듯이, 각 하중에 대해 0.05 m/s시의 마멸률보다 0.1 m/s시의 마멸률이 모든 하중에서 약 2배 가량 작았고, 0.1m/s시의 마멸률보다 0.2 m/s시의 마멸률이 1.6배 정도 작았다. 여기서 마멸량이 하중과 미끄럼 속도에서 거의 일정하였으나, 고속으로 갈수록 마멸률이 감소하는 것은 하중과 미끄럼 거리로 나누었기 때문이며, Si₃N₄ 쌍의 실험



(a) Wear mass per time [$\times 10^{-6}$ g/s] (b) Wear rate [$\times 10^{-7}$ g/N m] (c) Friction coefficient

Fig. 5. Wear mass per time, wear rate & friction coefficient of Si_3N_4 under various loads [kg] and sliding speeds [m/s].

[11,12]에서 보듯이 표면돌기 파괴 후, 새로이 형성되는 표면의 특성에 영향받을 수 있다.

그리고 0.05 m/s시의 마멸률이 모든 하중에서 다른 미끄럼 속도의 마멸률보다 컸으며, 특히 0.05 m/s의 4 kg시 가장 큰 마멸이 일어났다. 또한 0.05와 0.1 m/s에서 4 kg시의 마멸률이 8 kg시의 마멸률보다 1.7배 정도 컸고, 0.2 m/s에서는 4 kg시의 마멸률이 8 kg시의 마멸률보다 1.4배 가량 컸다. 그러나, 미끄럼 속도가 0.4 m/s로 증가하면 과도한 마찰로 인해 표면이 파괴되는 현상이 발생하였다.

Fig. 5(c)는 각각의 하중과 미끄럼 속도에 대한 마찰계수의 변화를 보여준다. 그리고 Fig. 2에서 보듯이, 고하중에서 마찰계수가 감소하는 것은 상대적으로 저하중보다 고하중에 잘 견디는 Si_3N_4 의 우수한 파괴인성때문이다. 그러나 마찰계수는 하중이 커짐에 따라 표면돌기의 접촉이 증가하여 불안정해진다. 그리고 0.4 m/s에서 매우 큰 마찰이 일어났으며, 마멸률도 크게 나타났다.

4. 고찰

일반적으로 미끄럼 운동을 하는 물체의 마멸은 작용하중, 미끄럼 속도, 마찰계수, 미끄럼 시간, 형상계수(진원도, 표면조도 등), 그리고 재료의 물성(탄성계수, 경도 등), 주변조건(온도, 습도, 대기압 등) 등에 영향을 받는다. 따라서 일정한 시간 동안에 마멸을 관찰하면, 시간에 대한 마멸량(w)은 속도, 혹은 하중에 대해 각각 일정한 관계를 찾는 것은 불가능하다[9]. 작용하중(L)과 속도(V), 그리고 마찰계수(μ)를 곱한 값은 마찰에너지에 해당하는데, 이는 접촉부위 온도와 매

우 밀접한 관계가 있다. Table 2의 결과를 이용하여 마찰에너지를 시간에 대한 마멸량, 그리고 일반적으로 사용하는 마멸률과 비교하면 매우 좋은 관계를 얻을 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7 그리고 Fig. 8에 마찰동력(frictional power, μLV [Nm/s])과 마멸률(wear rate, K , [g/Nm])의 관계 그리고 마찰동력과 시간에 대한 마멸량(wear mass per time, w/t [g/s])의 관계를 보여준다.

$$w/Ls = \alpha(\mu LV)^\beta$$

여기서 미끄럼 거리 $s=Vt$ 와 작용하중을 이용하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$w/t = (\alpha/\mu) \cdot (\mu LV)^{\beta+1}$$

위의 두 식에서 w/t와 μLV , 그리고 w/Ls와 μLV 의 관계는 log선도에서 거의 같은 선형성을 나타낸다. 단지 오차는 마찰계수가 일정치 않아서 발생한다. 또한, w/Ls와 μLV 의 log선도에서 기울기, $\beta=0$ 인 경우 w/Ls는 일정하여 같은 재료에 대한 고전적인 마멸의 관계식을 얻을 수 있다.

4-1. Al_2O_3 실린더와 Al_2O_3 평판

Al_2O_3 쌍의 마멸특성은 Fig. 6(a)에서 보듯이 시간에 대한 마멸량이 마찰동력의 증가에 따라 커지며, 임계 마찰동력 영역에서 급격히 증가함을 보여준다. 이렇게 시간에 대한 마멸량이 급격히 증가하는 영역은 0.2 m/s와 16kg 그리고 0.4 m/s와 8, 16 kg으로 고하중과 고속도의 조건이다. 그리고 이러한 마멸특성은 마멸률과 마찰동력의 관계를 보여주는 Fig. 6(b)에서 잘 나타나며, 마멸률은 마찰동력의 증가에 따라 점진적으로 감소하고, 특히 4 kg시 0.4 m/s와 8 kg시 0.1, 0.2

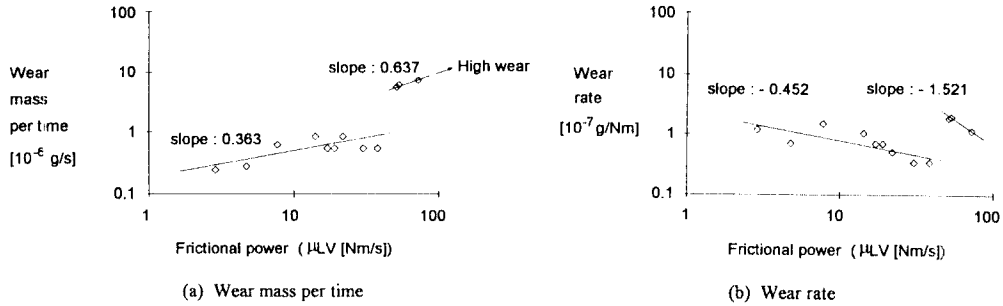


Fig. 6. Wear mass per time and wear rates of Al_2O_3 , as the function of μLV (L: load, V: sliding speed, μ : friction coefficient).

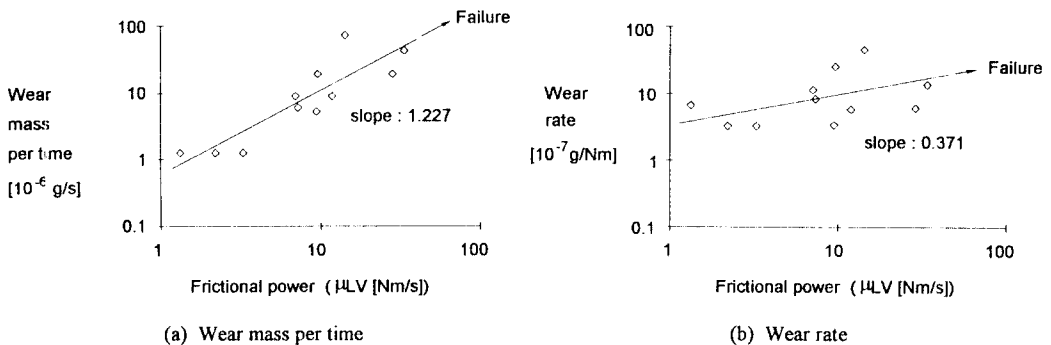


Fig. 7. Wear mass per time and wear rates of SiC as the function of μLV (L: load, V: sliding speed, μ : friction coefficient).

m/s 그리고 16 kg시 0.1 m/s에서 매우 작은 마멸이 일어난다. 그리고 큰 마찰동력 영역에서 마멸률이 크게 나타났다. 이러한 마찰동력은 전이층의 형성에 영향을 미치는 접촉하중, 미끄럼 속도 그리고 마찰계수로 구성되어 있다[9]. 따라서 마찰동력과 시간에 대한 마멸량 그리고 마멸률의 관계로서 전이층의 형성이 두드러진 영역을 볼 수 있다. 일반적으로 Al_2O_3 쌍의 미끄럼 시, 저 마찰동력 영역에서는 표면돌기의 파괴로 인한 마멸입자의 미세 연삭작용이 두드러짐을 보여준다[11]. 이러한 현상은 마찰동력이 증가함에 따라 낮은 마멸률과 높은 마찰계수로 특징 되는 전이층의 형성되어 마찰 및 마멸 특성이 변화하게 된다.

위에서 보듯이, 전이층의 형성이 용이한 영역은 마찰동력이 증가함에 따라 마멸률의 감소가 두드러진 4 kg시 0.4 m/s와 8 kg시 0.1, 0.2 m/s 그리고 16 kg시 0.1 m/s이다. 그리고 이러한 마찰동력 값 이상의 영역에서 과도한 접촉압력으로 인해 마멸이 크게 일어난다.

4-2. SiC 실린더와 SiC 평판

SiC 쌍의 마멸거동은 일반적으로 연삭작용[11]에 의해 특성지어지는데, 접촉하중과 미끄럼 속도에 따른 접촉 경계층에서 마멸입자의 생성과 이탈에 밀접한 관계를 가지고 있다.

4 kg시 미끄럼 초기에 생성된 마멸입자가 연삭작용을 하며 마멸을 이룬다. 그러나, 접촉 경계층에서 연삭작용을 하는 마멸입자의 간섭현상은 미끄럼 속도에 영향을 받는다.

이러한 연삭작용은 접촉압력이 증가함에 따라 미끄럼 속도의 영향은 감소하며, 미끄럼 초기에 마멸입자의 간섭현상이 줄어들고, 과도한 접촉압력으로 인한 표면돌기 파괴가 일어난다. 그래서 Fig. 7a)에서 보듯이, 마찰동력이 커짐에 따라 시간에 대한 마멸량이 증가한다. 마찰동력이 낮은 영역에서 시간에 대한 마멸량의 차이가 나타나지 않으나, 마찰동력이 10 Nm/s 이상의 영역인 고하중과 고속도에서 마찰동력의 미세한 변화에도 시간에 대한 마멸량이 큰 폭으로 변한다. 이러한 마찰동력 영역에서 접촉하중의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 마찰동력이 과도하게 커지면, SiC

표면의 파괴가 일어난다. 그리고 Fig. 7b)에서 보듯이 마멸률은 마찰동력이 증가함에 따라 커지는 현상을 나타내며, 과도한 마찰동력에서 표면파괴가 발생한다. 따라서 마찰동력과 마멸률의 관계로써 마멸거동의 추세를 볼 수 있다.

4-3. Si_3N_4 실린더와 Si_3N_4 펄판

Si_3N_4 쌍의 마멸거동은 Fig. 8a)에서 보듯이, 마찰동력과 시간에 대한 마멸량이 큰 마찰동력의 경우 크게 나타나나, Fig. 8b)에서 보듯이, 마찰동력과 마멸률의 관계는 작은 마찰동력에서는 마멸률이 높다. 이것은 마멸률의 경우, 하중과 거리의 비로 마멸 정도를 보여주기 때문에 Fig. 8b)의 높은 마찰동력 값을 갖는 구간에서 마멸률이 감소하였으나, Fig. 8a)의 높은 마찰동력 값을 갖는 영역에서 시간에 대한 마멸량이 증가하였다. 따라서 SiC보다 고하중 특성이 우수함을 알 수 있다. 그리고 과도한 마찰동력에서 표면파괴가 일어났으며 마찰계수 또한 매우 컸다.

Fig. 8b)에서 마찰동력과 마멸률의 관계를 보여주는 기울기는 -0.670이며, 선형적이다. 이로써 마멸거동의

경향을 보는데 유용하였다. 그리고 Fig. 8b)에서 보듯이 작은 마찰동력 값에 대응하는 구간인 0.05, 0.1 m/s시의 마멸률보다 큰 마찰동력 값에 대응하는 구간인 0.2 m/s에서 마멸률이 감소하고 있으며, 이러한 현상은 접촉부의 응력 분포와 밀접한 관계를 가지고 있음을 보여준다. 그리고 0.2 m/s시 마찰동력의 증가의 폭이 적으며, 마멸률은 마찰동력의 증가에 따라 감소한다. 이로써 저속인 영역보다 0.2 m/s에서 마찰동력의 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 그러나, 미끄럼 속도가 0.4 m/s로 증가하면, 과도한 마찰로 인해 표면의 파괴가 일어난다.

4-4. 세라믹 재료들의 마찰 및 마멸 특성

Al_2O_3 쌍의 마멸률은 SiC 쌍과 Si_3N_4 쌍보다 작았으나 마찰계수는 매우 크며, 이러한 현상은 전이층의 영향이다. 이러한 전이층의 형성으로 인해 고하중에서도 마멸률이 크지 않았고, 이를 토대로 Al_2O_3 쌍의 마멸률과 마찰계수로서 하중과 미끄럼 속도에 대한 마찰 및 마멸의 전반적인 관계를 Fig. 9a)에 경마멸(low wear)과 과도마멸(high wear)로 마멸변이 영역과 마찰이 안정화되지 못하고 요동하는 영역으로 구분하여 보여준다.

그리고 SiC 쌍의 마멸은 저하중에서 미끄럼 속도에 영향을 받으며, 이는 마멸입자의 생성과 이탈에 관여하나, 고하중에서 접촉압력의 증가로 미끄럼 속도의 영향은 감소하며, 표면파괴가 일어난다. 이러한 현상을 종합하여 SiC 쌍의 마멸 및 마찰거동을 Fig. 9b)에 미끄럼 조건에 따라 마멸이 경마멸(low wear)과 과도마멸(high wear)로 변이해가는 영역을 보여주며, 마찰거동이 요동하는 영역을 나타낸다. 그리고 마찰이 안정화되지 못하는 영역의 대부분이 과도한 마멸과 표면파괴가 일어난 영역이다.

Si_3N_4 쌍의 마멸은 Al_2O_3 쌍과 SiC 쌍과는 대조적으로 미끄럼 속도의 영향이 적으며, 하중의 증가에 큰 영향을 받는다. 그래서 Fig. 9c)에서 Si_3N_4 쌍의 마찰 및 마멸특성을 미끄럼 조건에 따라 경마멸(low wear)과 과도마멸(high wear)의 변이를 볼 수 있다. Si_3N_4 쌍은 0.05 m/s에서 과도마멸(high wear)이 두드러진다. 이러한 마멸영역의 변이는 표면돌기 파괴와 Si_3N_4 의 파괴인성에 영향을 받는다. 초기 미끄럼시 표면돌기의 파괴 후, 새로이 형성된 표면은 고하중에 효율적으로 저항한다. 그래서 저속도시의 마멸이 고속도시보다 가혹한 조건이 된다. 그러나 미끄럼 속도가 매우

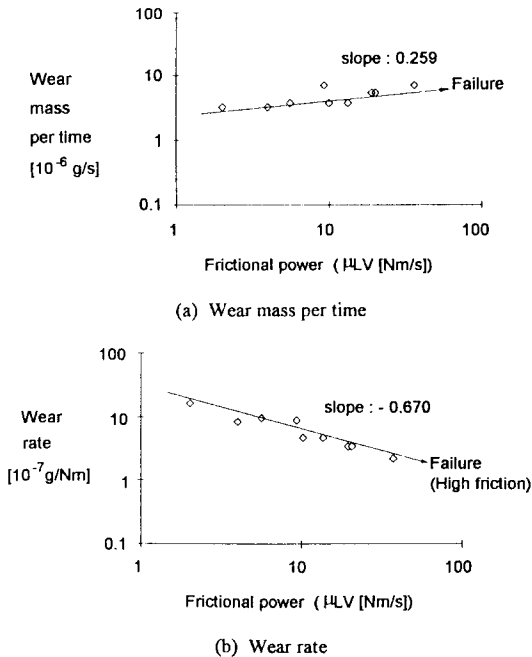


Fig. 8. Wear mass per time and wear rates of Si_3N_4 as the function of μLV (L: load, V: sliding speed, μ : friction coefficient).

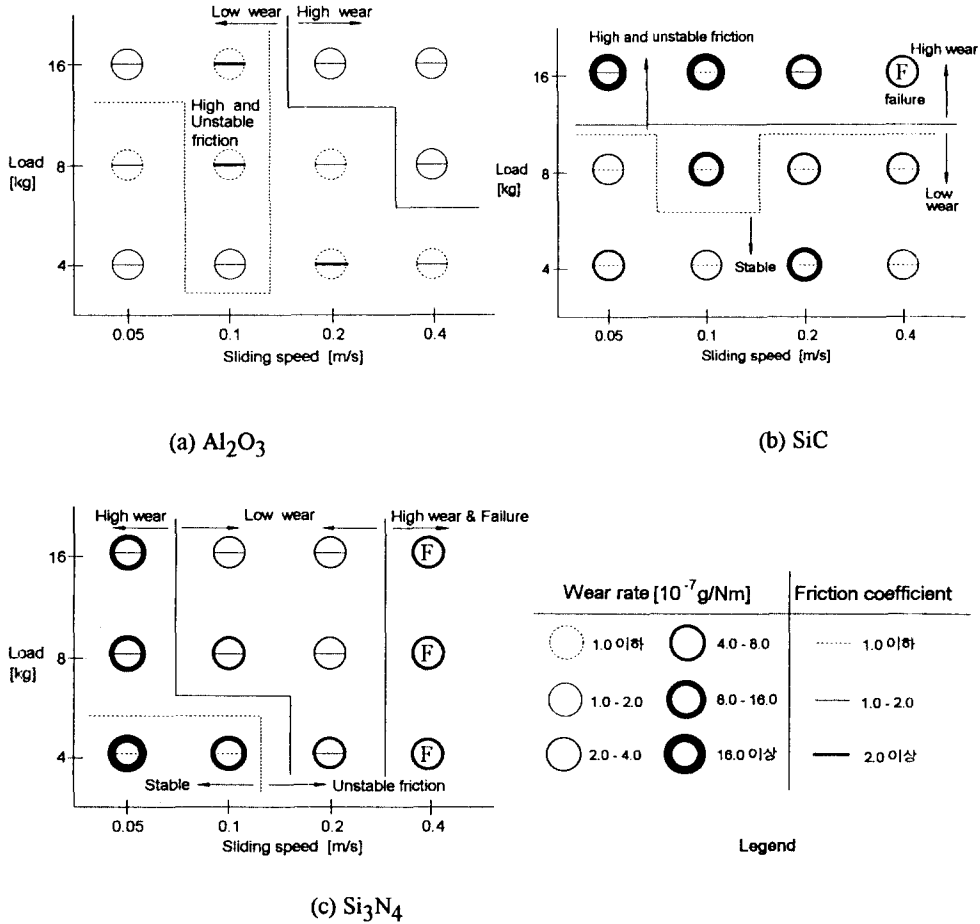


Fig. 9. Friction and wear diagrams of ceramics under various loads and sliding speeds.

커지면, 과도한 마찰로 인해 표면파괴가 일어난다. 그리고 마찰계수의 안정과 불안정한 거동의 영역을 Fig. 9c)에 함께 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 세 종류의 세라믹을 다양한 하중과 속도 범위에서 같은 재료끼리 미끄럼 운동을 시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험을 통해서 작성한 하중과 속도에 대한 마찰과 마멸선도는 마멸기구를 설명하는데 매우 유용하였으며, 세라믹의 마찰 및 마멸은 마멸률 (w/Ls)과 마찰동력 (μLV)의 log선도에서 매우 좋은 선형성을 나타내었다.

(2) Al_2O_3 상호간의 접촉 시에는 저속에서는 불안정한 거동을 보이다가 속도가 증가함에 따라 안정화 되어 가는 양상을 나타내었다. 다른 세라믹 재료에 비해서 전반적으로 마멸률은 작았으나 마찰계수는 상대적으로 증가하였다. 이는 알루미늄의 경우, 마찰동력이 증가함에 따라 전이층이 형성되어 내마모성이 증가하였다.

(3) SiC의 경우 다른 세라믹 재료에 비해 마멸률이 컸으며, 특히 고하중에서 그러하였다. 그러나, 마찰계수는 매우 안정적이었으며, 크기도 작았다.

(4) Si_3N_4 는 저속에서 불안정한 마찰거동을 보이다가 속도 증가에 따라 안정된 양상을 보였으며, 고하중에서 보호층의 형성으로 마멸이 상대적으로 작았다. 저하중과 저속에서 마멸이 심하였다.

후 기

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

참고 문헌

1. A.V.Levy and N.Jee, "Unlubricated Sliding Wear of Ceramic Materials, Wear," 121, pp.363-380, 1988.
2. S.Jahanmir, "Tribological Application for a Advanced Ceramics," Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 140, pp. 285-291, 1989.
3. O.Ajayi and K.Ludema, "Surface Damage of Structural Ceramics: Implications for Wear Modeling," Wear, 124, pp.237-257, 1988.
4. M.N.Gardos and R.Hardisty, "Fracture Toughness and Hardness Dependent Polishing Wear of Silicon Nitride Ceramics," Tribology Trans., 36, pp.652-660, 1992.
5. T.Fisher and H.Tonizawa, "Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride," Wear, 105, pp.29-45, 1985.
6. T.Libsich, P.Becker and S.Rhee, "Dry Friction and Wear of Toughened Zirconias and Toughened Aluminas against Steel," Wear, 110, pp.263-283, 1986.
7. O.Ajayi and K.Ludema, "Formation of Transfer Film during Ceramics and Ceramics Repeat Pass Sliding," Proc. Wear of material, pp.349-359, 1989.
8. J.McDonald and J.Eberhalt, "Adhesion in Aluminum Oxide-Metal Systems," Trans. Metall. Soc. AIME, 233, pp.512-517, 1965.
9. P.Gautier and K.Kato, "Wear Mechanism of Silicon Nitride, Partially Stabilized Zirconia and Alumina in Unlubricated Sliding Against Steel," Wear, 162, pp. 305-313, 1993.
10. J.Denape, A.Marzinotto and J.A.Petit, "Roughness effect of Silicon Nitride Sliding on Steel under Boundary Lubrication," Wear, 159, pp.173-184, 1992.
11. 장선태, 이영제, "세라믹 재료의 미끄럼 환경 변화에 따른 마찰 및 마멸 거동," 윤활학회지, Vol.11, No.3, pp.11-23, 1995.
12. 장선태, 김영호, 이영제, "미끄럼 환경의 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸 거동," 대한 기계학회 논문집 심사중