

Scf 파라메타에 의한 세라믹 마멸 평가

김상우 · 김석삼*

경북대학교 기계공학과 대학원
*경북대학교 기계공학과

The Assessment of Ceramic Wear by the Parameter Scf

Sang Woo Kim and Seock Sam Kim*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University
*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

Abstract—The result of wear test for ceramic materials was assessed by Scf parameter to verify the usefulness of the proposed Scf parameter. Friction and wear tests were carried out with ball on disk type. The materials used in this study were HIPed Alumina (Al_2O_3), Silicon carbide (SiC), Silicon nitride (Si_3N_4) and Zirconia (ZrO_2). The tests were carried out at room temperature with self mated couples of ceramic materials under lubricated condition. Turbine oil was used as a lubricant. In this test, increasing the load, specific wear rates and wear coefficients of four kinds of ceramic materials had a tendency to increase. The wear coefficients of ceramic materials were in order of Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , ZrO_2 . Worn surfaces investigated by SEM had residual surface cracks and wear particles caused by brittle fracture. As the fracture toughness of ceramic materials was higher, wear resistance more increased. The roughness of worn surface had correlation with wear rate. The wear rate(W_s) and Scf parameter showed linear relationship in log-log coordinates and the wear equation was given as $W_s = 5.52 \times Scf^{5.01}$.

1. 서 론

세라믹은 금속에 비해 낮은 밀도와 열팽창계수 그리고 높은 경도와 압축강도를 가지며 내마멸성과 내식성이 우수하며 고온에서도 기계적 성질을 유지하고 화학반응에 대해 안정한 독특한 특성으로 인해 다양한 분야에 응용되고 있으며 앞으로 세라믹의 사용은 더욱 증가하리라 예상된다[1].

1983년, 미국에서 세라믹엔진개발계획에서 중요한 연구분야중의 하나가 세라믹 재료에 대한 데이터베이스와 수명예측에 관한 것이다[2]. 세라믹의 응용을 위해 세라믹재료를 선택하거나 설계할 때에는 세라믹재료의 트라이볼로지적 거동에 대한 체계적이고도 신뢰할만한 데이터가 필요하게 된다. 그러나 아직 트라이볼로지시스템에서 세라믹재료에 대한 신뢰할만한 수명예측과 설계를 위한 기초자료가 잘 확립되어 있지 못한

상태에 있으며 이를 위해서는 세라믹재료의 마멸기구의 규명과 마멸율을 평가할 수 있는 마멸식을 구하는 것이 가장 기본적인 과제라 할 수 있겠다.

Evans와 Marshall[3]은 세라믹의 어브레시브마멸기구(abrasive wear mechanism)를 파괴역학적으로 해석하여 마멸량을 재료특성치(파괴인성치, 탄성계수, 경도)와 하중 그리고 마찰거리로써 나타내고 있다. Sibley등[4]은 고온, 고속하의 다양한 세라믹 마멸실험에서 마멸율을 열확산계수와 열응력 저항계수 및 마찰계수에 대한 식으로 나타냈다. Kim등[5,6]은 알루미늄, 질화규소, 탄화규소, 지르코니아, 서어멧의 다섯가지의 구조용 세라믹의 구름접촉하에서의 마멸실험에서 마멸기구가 취성파괴에 기인하는 것을 보이고 세라믹의 구름마멸에 있어서는 트라이볼로지시스템에서 주요한 재료특성치인 파괴인성치와 하중 및 접촉부의 결합의 크기로써 구성된 Sc (severity of contact) 파라

메타를 제안하여 실용상 편리한 마멸식이 구하여짐을 발표한 바 있다. 또한 Kim등[7,8]은 질화규소와 지르코니아의 무운활하의 미끄럼 마찰, 마멸실험에서 마멸기구가 주로 취성파괴에 의한 것임을 보이고 제안된 마멸모델로부터 마멸을 지배하는 Scf 파라메타를 유도하고 이 파라메타로써 마멸식을 구하였다. Scf 파라메타는 상호 접촉하여 상대운동을 하고 있는 트라이보시스템에서 접촉부의 수직압력과 재료의 파괴인성치 그리고 표면균열의 크기 및 마찰계수로서 구성되어 있다.

본 연구에 적용되는 Scf 파라메타를 이용함으로써 세라믹의 마멸식을 간략히 표현할 수 있으므로 실용상 편리할 뿐 아니라 세라믹재료의 설계시 귀중한 자료로서 활용되리라 생각된다. 그러나 이 Scf 파라메타의 유용성을 검토하기 위해서는 좀 더 다양한 세라믹재료와 실험조건에 대해서 마멸실험을 하고 각 실험조건에 마멸율에 Scf 파라메타를 적용할 필요가 있는 것이다. 따라서 본 연구에서는 기계구조용 세라믹재료로서 유망시되는 질화규소, 지르코니아, 탄화규소, 알루미늄을 재료로 하여 시험편을 제작하고 하중과 미끄럼 속도에 따른 실험조건을 설정하여 마찰, 마멸실험을 수행한다. 그리고 실험결과와 SEM을 이용한 미시적 관찰로부터 마멸기구를 이해하고 각 실험조건하에서 정확한 마멸진행곡선과 마멸율을 구하여 Scf파라메타를 적용하여 마멸율을 Scf 파라메타로서 평가함으로써 이 파라메타의 유용성을 검증하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험 장치

본 실험에 사용된 시험기(Toyo Baldwin Co. EFM-3-E)는 회전운동에 의해 미끄럼 마찰운동을 하는 마찰, 마멸시험기로서 미끄럼 속도는 0.2~2000 mm/s 범위에서 무단변속이 가능하고 가압하중은 0.2~500 kg 범위에서 조정할 수 있고 마찰토크도 로드셀을 사용하여 최대 30 kg-cm까지 측정 가능하다. 시험편에 가해지는 축하중과 마찰마멸 실험시에 발생하는 마찰력은 로드셀(Load Cell)로 제작된 압력감지기(Pressure Detector)와 마찰력감지기(Friction Detector)에 의해 측정된다. 본 실험에서는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 회전하는 disk 위에 ball을 얹고 일정하중으로 가압하

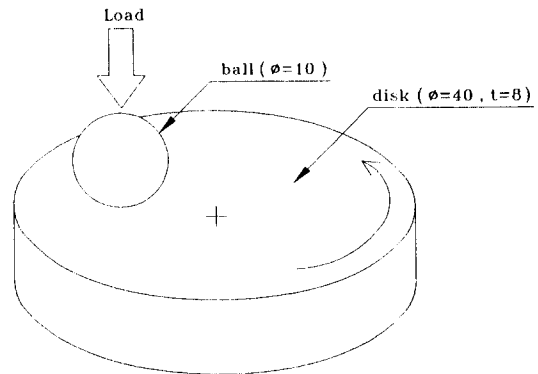


Fig. 1. Schematic illustration of ball on disk type wear test.

는 ball on disk type으로 마찰, 마멸실험을 수행하였다. 실험장치는 크게 상단부와 하단부로 나눌 수 있으며 상단부는 하중을 가해주는 수직축과 그 밑에 ceramic ball을 고정하는 지그를 제작하여 ball을 고정하였으며 하단부는 rotator가 있어 ceramic disk를 고정시키는 지그를 회전시켜 준다. ball의 접촉점은 disk의 회전중심에서 5 mm 편심되도록 고안되어 disk면에 직경이 10 mm의 wear track이 발생하도록 하였다.

2-2. 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 기계구조용 세라믹으로서 유망시되고 있는 지르코니아(ZrO_2), 질화규소(Si_3N_4), 탄화규소(SiC) 그리고 알루미늄(Al_2O_3)로 하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 상부 시험편은 직경 10 mm의 ball로, 하부시험편은 직경 40 mm, 두께 8 mm의 disk로 하였다. 제작된 각 시험편의 조성과 물성치들은 Table 1에 나타내었다. Table 1의 세라믹 재료의 파괴인성치는 Vickers Indentation Method로 Marshall[9,10] 등에 의해서 제안된 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$K_{IC} = 0.018(EH)^{1/2} (PC_R^3)^{2/3} \quad (1)$$

여기서 E, H, P는 각각 세라믹의 종탄성계수, 비커스경도 및 하중이며 C_R 은 비커스압자의 하중 P로 인해서 발생하는 래디얼균열(Radial Crack)의 길이이다. 각 재료별로 비커스경도계로 10 kg~50 kg의 하중범위에서 약 20회 정도로 래디얼균열의 길이를 측정하여 식 (1)에 의해 파괴인성치의 값을 계산하였다. 본 실험

Table 1. Composition and mechanical properties of specimens

Material	SiC	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	ZrO ₂
Composition	SiC+B ₄ C(1%)	Si ₃ N ₄ (86%)+Al ₂ O ₃ (2.8%)+AlN(4.7%)+Y ₂ O ₃ (6.5%)	Al ₂ O ₃ (99.9%)	ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ (3%)
Density (g/cm ³)	3.1	3.2	3.8	6.1
Hardness (GPa)	25.3	20.8	18	11.9
Young's modulus (GPa)	450	360	400	200
Fracture toughness, K _{IC} (MPa m ^{1/2})	3.29	4.66	3.61	4.8
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	3.3	4.0-5.0	7.0-8.0	9.0-10.0
Surface roughness (μm)	0.05	0.1	0.05	0.05

Table 2. Conditions for sintering and HIP procedure

	Al ₂ O ₃	SiC	Si ₃ N ₄	ZrO ₂
Sintering	Atmosphere 1 hr, 1600°C	Ar 1 hr, 2100°C	N ₂ 1 hr, 1800°C	Atmosphere 1 hr, 1530°C
HIP	Ar, 1550°C 1 hr, 1500 kg/cm ²	Ar, 2100°C 1 hr, 1500 kg/cm ²	Ar+N ₂ , 1800°C 1 hr, 1500 kg/cm ²	Ar, 1530°C 1 hr, 1500 kg/cm ²

험에 사용된 시편들은 HIP처리된 시편으로서 성형, 소결, HIP, 연마가공의 순으로 제조되었으며 소결과 HIP과정의 분위기, 시간, 온도, 압력의 세부사항은 Table 2에 나타난 바와 같다.

2-3. 실험 방법

본 실험에서는 마찰, 마멸실험을 동일 재료끼리 상온, 상압하에서 수행하였다. 미끄럼속도는 0.0438 m/s로 항상 일정하게 하고 미끄럼거리는 1314 m(500분)로 하였다. 단 61.7N과 110.7N의 저하중의 실험에서는 미끄럼거리를 2890 m(1100분)으로 하였다. 윤활상태는 터어빈유를 사용하여 윤활하에서 실험을 하였다. 윤활상태에 따른 각 시편의 하중조건은 Table 3에 나타내었다. 마멸량의 측정 및 마멸면의 형상변화를 알아보기 위해 Kosaka Laboratory LTD TR100x의 표면거칠기측정기(Surface Roughness Tester)를 사용하였다. 실험 전에 시편을 아세톤 용액 속에서 3분 동안 2회로 초음파세척을 한 후에 일정시간 실험을 실시하고 다시 실험전과 같이 초음파세척을 한 후에 표면거칠기 측정기로 disk면상의 wear track의 단면형상과 거칠기 형상을 구하였다. track의 4곳을 선정하여 4곳

Table 3. Load conditions used in this test

Material	Load (N)
Al ₂ O ₃	61.7, 110.7, 208.7, 306.7, 502.7
SiC	61.7, 110.7, 208.7, 257.7, 306.7, 404.7
Si ₃ N ₄	61.7, 110.7, 208.7, 257.7, 306.7, 502.7
ZrO ₂	61.7, 110.7, 306.7, 404.7, 502.7

의 단면형상으로부터 면적계(Planimeter)를 이용하여 마멸부피를 계산하였고 거칠기 형상으로부터 최대높이거칠기(R_{max})를 구하였다. 측정은 10분, 20분, 40분, 60분, 80분, 120분, 160분, 200분, 300분, 400분, 500분 때 하였으며 ball의 접촉점은 80분, 160분, 200분, 300분, 400분 때마다 바꾸어 실험을 하였다. 시험기의 로드셀에 의해 측정된 가압하중과 마찰력의 값은 아날로그/디지털변환기(PCL812 Analog/Digital Converter)를 통하여 IBM-PC에 입력되어 마찰계수를 산출하였고 마찰계수의 값은 1초에 한번씩 읽어 PC의 하드디스크에 저장하였다. 실험은 각 하중조건에 대해 2회 반복하였다. 실험이 완료된 후 마멸면의 미시적 관찰을 위해 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하였다.

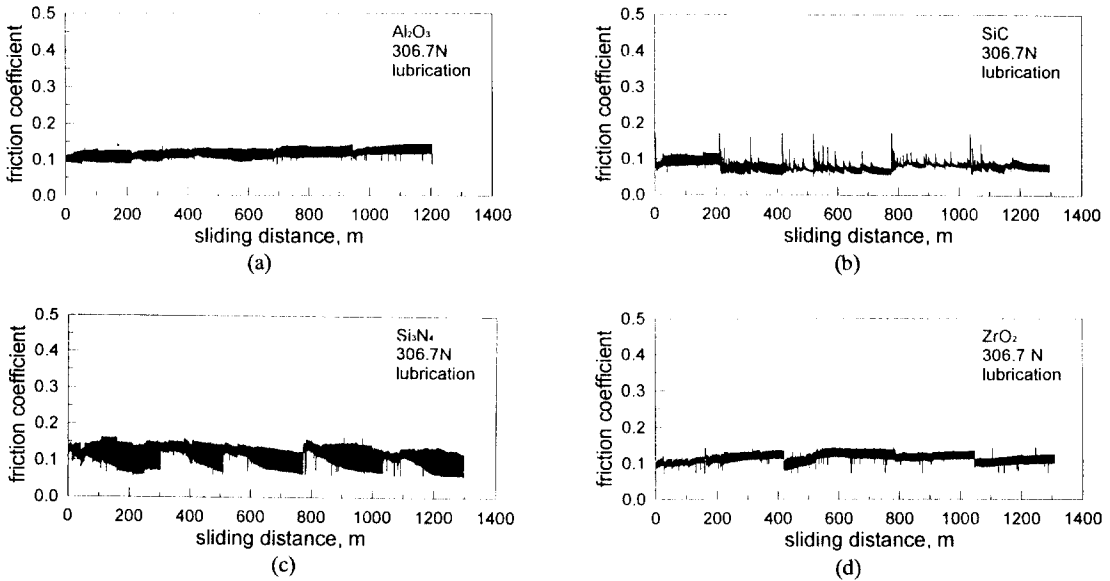


Fig. 2. Friction coefficient as a function of sliding distance at the load of 306.7 N (a) Al_2O_3 (b) SiC (c) Si_3N_4 (d) ZrO_2 .

3. 실험 결과

3-1. 마찰계수의 변화

Fig. 2는 하중이 306.7 N일 때 각 재료의 미끄럼거리에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 알루미늄의 경우로서 0.09~0.13값의 범위에서 0.04 정도의 변화폭을 가지며 미끄럼거리의 변화에 대해 일정하다. Fig. 2(b)는 탄화규소의 경우로서 0.06~0.09의 값의 범위에서 마찰계수의 변화가 상당히 심하다. 특히, 볼의 접촉점을 바꾼 지점에서는 0.15이상까지 상승하여 급속히 감소함을 알 수 있다. Fig. 2(c)는 질화규소의 경우로서 볼의 접촉점을 바꾼 직후는 0.12~0.14의 범위의 값을 가지다가 미끄럼거리가 증가함에 따라 마찰계수가 약간 감소하고 변화폭이 크게 되어 0.08~0.14범위의 값을 가진다. Fig. 2(d)는 지르코니아의 경우로서 0.09~0.13범위의 값을 가지고 0.02의 변화폭을 가지며 미끄럼거리의 변화에 따라 일정함을 보인다.

Fig. 3은 재료별로 각 하중에 대한 평균마찰계수의 값을 하중에 대하여 나타낸 것이다. 평균마찰계수의 값은 1초 간격의 마찰계수의 값들의 평균값을 구한 것이다. 알루미늄은 하중의 변화에 관계없이 0.11의 값으로 일정하게 나타난다. 탄화규소는 네 재료의 마찰계수의 값중 가장 낮은 값을 보이며 하중의 변화에

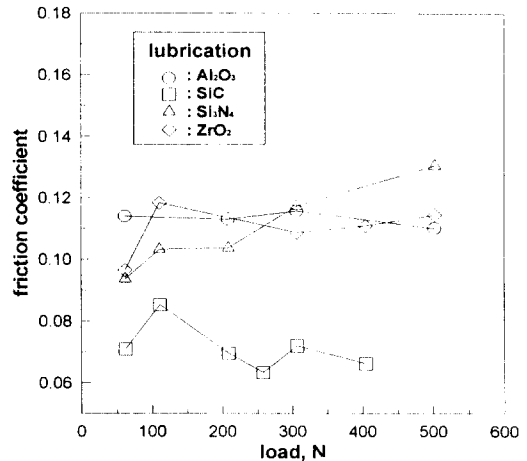


Fig. 3. Friction coefficient as a function of load.

관계없이 약 0.07의 값을 보인다. 질화규소는 네 재료중 다소 높은 마찰계수 값을 보이며 0.09~0.13범위에서 하중이 증가함에 따라 약간 증가함을 보인다. 지르코니아는 64.7 N에서 0.09의 값을 보이고 그 이상의 하중에서는 하중의 변화에 관계없이 0.11의 값으로 일정하게 나타난다.

3-2. 마멸진행곡선과 비마멸율 및 마멸계수

Fig. 4는 윤활상태하에서 네 종류의 세라믹 재료의

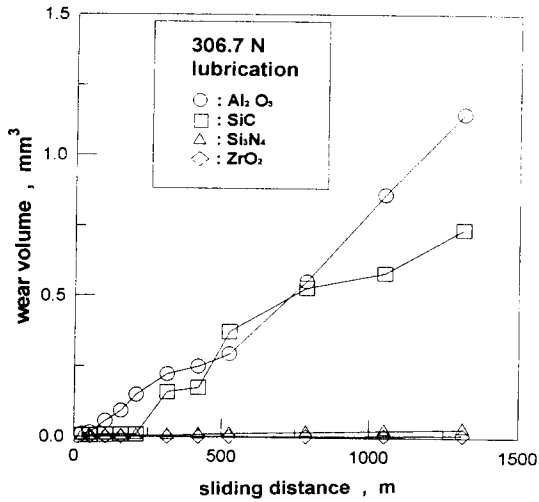


Fig. 4. Wear volume as a function of sliding distance at the load of 306.7 N.

하중이 306.7 N일 때 미끄럼거리에 대한 마멸량의 변화를 나타낸 마멸진행곡선이다. 네 재료 모두 마멸이 미끄럼거리에 직선적으로 비례하여 증가하고 있으며 탄화규소의 경우 미끄럼거리가 250 m 이전에는 거의 마멸이 없이 완만하게 마멸이 증가하다가 250 m 이후부터 마멸이 크게 증가함을 보인다. 질화규소와 지르코니아의 경우가 알루미늄과 탄화규소에 비해 마멸진행곡선의 기울기가 완만하고 마멸량도 극히 적음을 알 수 있다.

Fig. 5는 본 마멸실험에서의 네 종류 세라믹재료의 비마멸율(specific wear rate)을 하중에 대해 나타내고 있다. 비마멸율은 단위미끄럼거리당, 단위하중당에 대한 마멸량(mm^3/Nm)으로 정의된다. 알루미늄은 비마멸율이 네 재료의 세라믹재료중 가장 높은 $3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$ 범위의 값을 가지며 하중이 증가함에 따라 다소 증가함을 보이나 306.7N과 502.7N은 거의 같은 값을 갖는다. 탄화규소의 비마멸율은 $10^{-8} \sim 3 \times 10^{-6}$ 범위의 값을 가지며 다른 재료에 비해 하중이 증가함에 따라 상대적으로 크게 증가함을 보이고 특히 200 N 이후 약 10^{-6} 의 높은 값을 갖는다. 질화규소의 비마멸율은 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 범위에 있으며 하중이 증가함에 따라 다소 증가한다. 지르코니아는 비마멸율이 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 범위의 값을 갖는다. 윤활상태하에서 동일재료간의 마찰, 마멸실험을 수행한 본 연구에 있어 지르코니아가 가장 내마멸성이 우수하며 질화규소, 탄화규소, 알루미늄

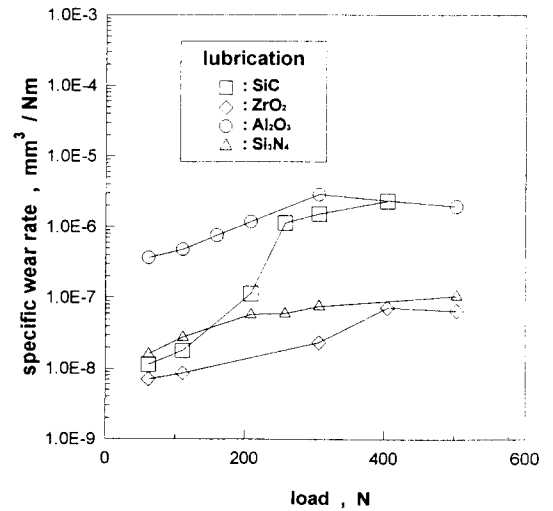


Fig. 5. Specific wear rate as a function of load.

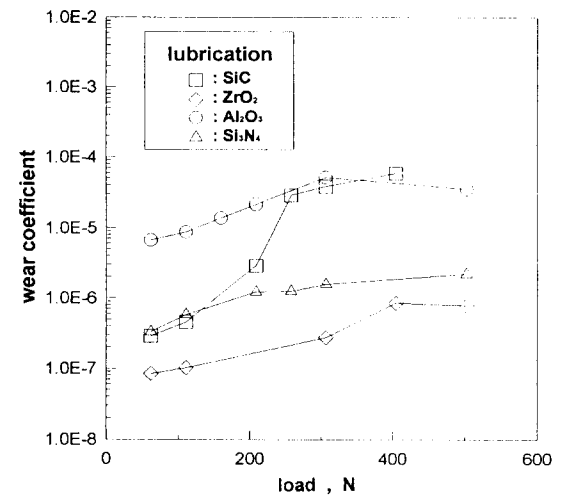


Fig. 6. Wear coefficient as a function of load.

의 순으로 나타났다. Fig. 6은 본 마멸실험의 네 종류 세라믹재료의 마멸계수를 하중에 대해 나타낸 것이다. 마멸계수는 비마멸율에 그 재료의 경도값을 곱한 무차원 값으로서 진실접촉부에서 마멸입자가 되어 탈락할 확률을 의미하며 내마멸성 평가에 많이 적용되고 있다. 비마멸율을 나타내는 Fig. 5와 비슷한 양상을 보이며 알루미늄과 탄화규소는 각각 $6 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ 와 $3 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-5}$ 범위의 값을 가지며 질화규소와 지르코니아는 $3 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-6}$ 과 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 범위의 값을 갖는다.

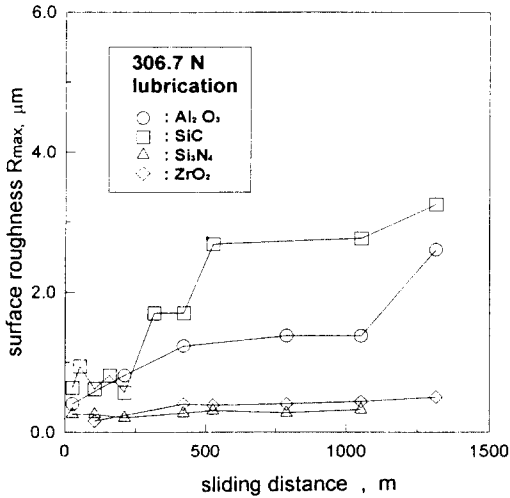


Fig. 7. Surface roughness as a function of sliding distance at the load of 306.7 N.

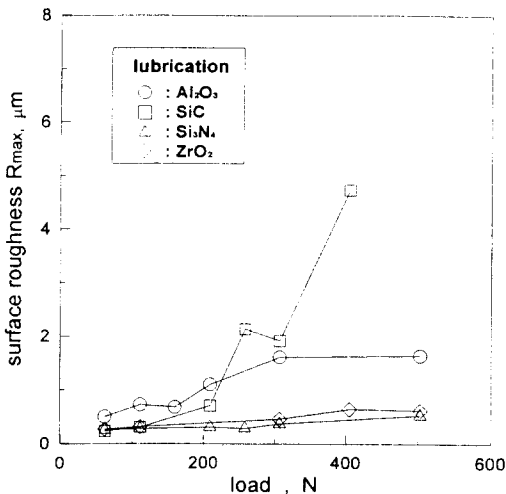


Fig. 8. Surface roughness as a function of load.

3-3. 마멸면의 표면형상의 변화

Fig. 7은 하중이 306.7 N일 때 미끄럼거리에 대한 마멸면의 거칠기의 변화를 각 재료별로 나타낸 것이다. 표면거칠기의 값은 최대높이거칠기인 R_{max} 로 구한 것이다. 질화규소와 지르코니아의 경우는 각각 약 0.4 μm 와 0.5 μm 의 일정한 값을 가지며 알루미늄과 탄화규소에 비해 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 알루미늄은 0.5~3 μm 범위의 값을 가지며 탄화규소는 미끄럼거리가 증가함에 따라 증가하다가 약 500 m 이후 약 3 μm 의 값을 가지며 네 재료중 가장 거친 마멸면

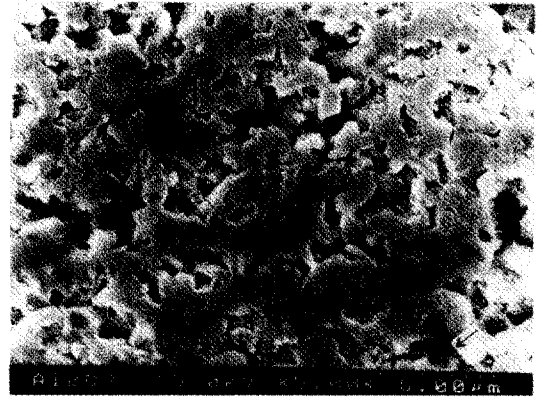


Fig. 9(a). Worn surface of Al₂O₃ (load : 306.7 N, sliding distance : 1314 m).

을 가짐을 알 수 있다. Fig. 8은 본 실험의 네 가지 세라믹 재료의 최대 높이 거칠기의 평균값을 하중에 대해 나타낸 것으로 평균값은 각 하중조건에서 측정값들의 평균을 취한 것이다. 질화규소가 네 재료중 가장 낮은 거칠기 값을 가지며 질화규소와 지르코니아의 평균값은 하중이 증가함에 따라 다소 증가하여 약 0.5 μm 가 됨을 보인다. 알루미늄은 306.7 N 이후 약 2 μm 가 됨을 보인다. 탄화규소는 0.4~2 μm 범위의 값을 가지며 404.7 N에서는 약 5 μm 의 상당히 큰 값을 갖는다. 특히 탄화규소의 경우 다른 재료에 비해 하중이 증가함에 따라 상대적으로 크게 증가하며 특히 200 N 이후 급격히 증가함을 알 수 있다. Fig. 8의 네 재료의 표면거칠기의 값들을 Fig. 5의 비마멸율의 값들과 비교할 때 상당히 연관성이 있음을 보인다. 즉 높은 비마멸율을 갖는 재료가 높은 표면거칠기 값을 갖음을 알 수 있다.

3-4. SEM에 의한 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 형상변화와 마멸입자의 생성과정을 알아 보기 위해서 SEM을 사용하여 마멸면의 미시적 관찰을 수행하였다. 관찰된 마멸면은 하중이 306.7 N이고 미끄럼거리가 1314 m인 실험이 완료된 disk 표면이다. 각 그림의 화살표의 방향은 미끄럼 방향을 나타낸다. Fig. 9(a)는 알루미늄의 마멸면으로서 입자단위의 탈락(grain pull out)으로 마멸입자가 탈락 후 표면손상들이 산재해 있음을 보여준다. Fig. 9(b)는 알루미늄의 마멸면에 존재하는 비교적 큰 표면균열의 모습으로 표면균열의 전파로 입자(grain)단위의 마멸에 대해 상



Fig. 9(b). Worn surface of Al₂O₃, showing surface crack (load:306.7 N, sliding distance : 1314 m).

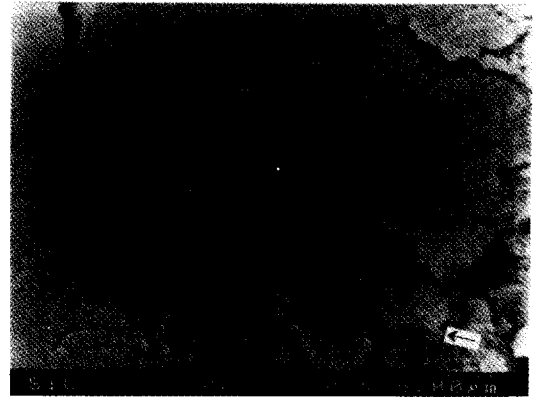


Fig. 10(b). Worn surface of SiC showing the propagating surface crack (load : 306.7 N, sliding distance : 1314 m).

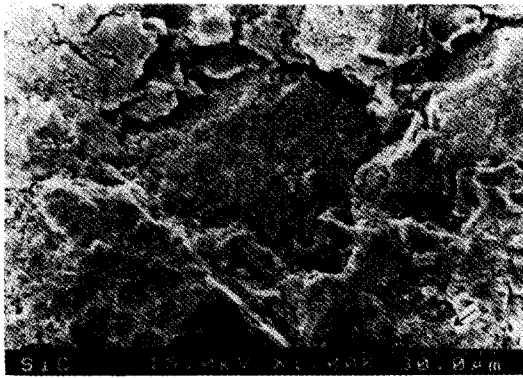


Fig. 10(a). Worn surface of SiC (load : 306.7 N, sliding distance : 1314 m).



Fig. 11. Worn surface of Si₃N₄, showing the surface pit (load : 306.7 N, sliding distance : 1314 m).

대적으로 큰 규모의 마멸을 야기하리라 생각된다. Fig. 10(a)는 탄화규소의 마멸면으로 마멸입자가 탈락된 후의 파여진 모습으로 심하게 마멸이 진행되었음을 보여준다. 파여진 곳의 둘레에는 표면균열들이 산재해 있으며 취성파괴에 의해 마멸이 진행된 상당히 거친 마멸면의 모습을 보여준다. Fig. 10(b)는 탄화규소의 마멸면에 표면균열이 전파하여 마멸입자가 형성되려는 모습을 보여주고 있다. Fig. 11은 질화규소의 마멸면으로 취성파괴에 의해 마멸입자가 탈락된 후의 크기가 약 20 μm인 표면손상의 내부의 모습으로 많은 균열들과 거친 표면을 가짐을 보인다. 질화규소의 마멸면에는 크기가 10~20 μm정도의 표면손상들이 많이 존재하며 표면손상의 주위에는 거친 표면에 많은 표면균열들이 존재하고 손상 내에는 10 μm이하의 탈락직전의 마멸입자들이 존재한다. Fig. 12는 지르코

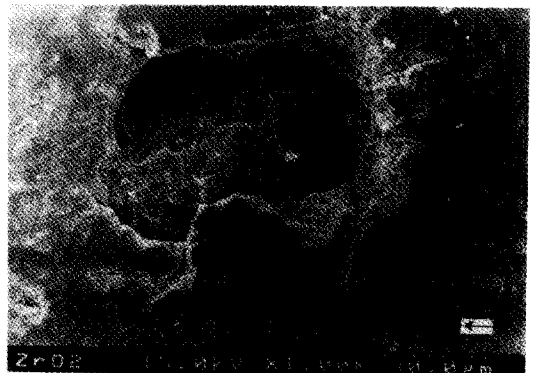


Fig. 12. Worn surface of ZrO₂, showing the surface pit (load : 306.7 N, sliding distance : 1314 m)

니아의 마멸면으로 취성파괴에 의해 마멸입자가 탈락된 후의 크게 파여진 모습으로 그 크기가 가로가 약

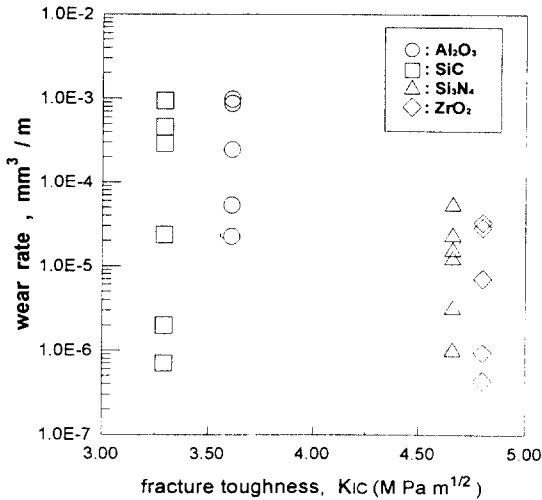


Fig. 13. Relationship between wear rate and fracture toughness.

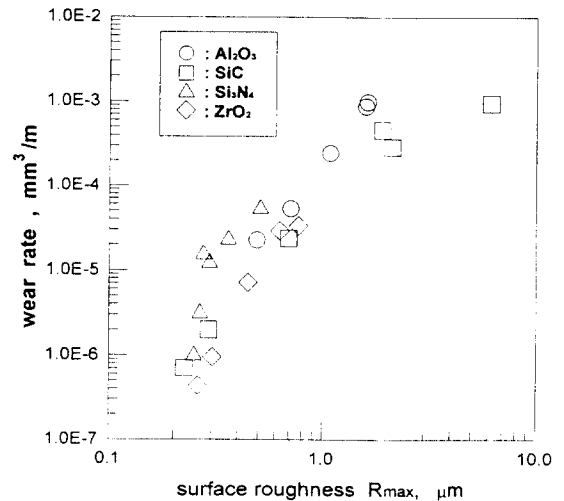


Fig. 14. Relationship between wear rate and surface roughness.

55 μm 이고 세로가 32 μm 이다. 파여진 곳의 둘레에 몇 개의 표면균열들이 산재되어 있음을 알 수 있다. 지르코니아의 마멸면에는 수 μm 의 미소 표면손상 및 마멸입자와 수십 μm 의 표면손상들이 산재되어 있음을 보인다.

4. Scf 파라메타의 적용 및 고찰

4-1. 마멸율과 표면거칠기 및 K_{IC} 와의 관계

Fig. 13은 세라믹의 마멸율과 파괴인성치와의 관계를 나타낸 것이다. 원활하의 본 실험에서는 세라믹재료의 파괴인성치가 클수록 마멸율이 작아져 내마멸성이 커짐을 알 수 있다. 이는 본 실험의 주된 마멸기구가 취성파괴임을 알 수 있고 파괴인성치가 세라믹마멸의 주된 인자임을 의미한다. Fig. 14는 본 실험에서 재료별로 각 하중조건에서 표면거칠기와 마멸율과의 관계를 나타낸 것이다. 마멸면의 표면거칠기와 마멸율간에 양대수 그래프 상에서 상당한 상관관계가 있음을 보여준다. 취성재료인 세라믹재료의 마멸면에서 표면거칠기는 표면균열에 상당하는 것으로 생각할 수 있으며 파괴역학적 관점에서 마멸입자는 이러한 표면균열의 전파에 의해 생성된다고 생각할 수 있다. 세라믹의 마멸율이 증가함에 따라 마멸면의 표면거칠기가 커짐은 마멸기구가 소성변형보다는 주로 취성파괴에 의해 마멸이 진행되는 것으로 생각된다.

4-2. Scf 파라메타에 의한 마멸율의 평가

본 연구에서 적용되는 세라믹 마멸율을 평가하기 위한 Scf 파라메타는 세라믹의 마멸실험과 마멸면의 SEM을 사용한 미시적 관찰 및 고찰을 바탕으로 세라믹 마멸모델로부터 유도되었다[7,8]. 이 해석모델에 선형파괴역학을 도입하여 표면균열전단의 무차원 응력확대계수를 수치해석을 통하여 고찰하고 취성재료에 관한 macroscopic crack growth law[11]를 세라믹의 마멸식에 적용함으로써 Scf 무차원파라메타를 유도하였다. Scf는 상호 접촉하여 상대운동을 하고 있는 Tribosystem을 생각하면 접촉부에 작용하는 평균압력(P)과 접촉부의 재료특성치로서 파괴인성치(K_{IC})와 재료의 표면결함의 정도를 나타내는 표면균열의 크기(a) 그리고 접촉면의 윤활특성을 나타내는 마찰계수(μ)로써 구성되며 다음의 식과 같이 표현된다.

$$Scf = \frac{P\sqrt{(1+\mu^2)a}}{K_{IC}} \quad (2)$$

세라믹의 마멸식(wear equation)은 Scf로써 다음 식과 같이 주어진다.

$$W_s = \alpha (Scf)^\beta \quad (3)$$

마멸식에서 W_s 는 마멸율(mm^3/m)이며 α 와 β 는 상수이다.

Fig. 15는 본 실험에서 얻어진 알루미늄, 탄화규소,

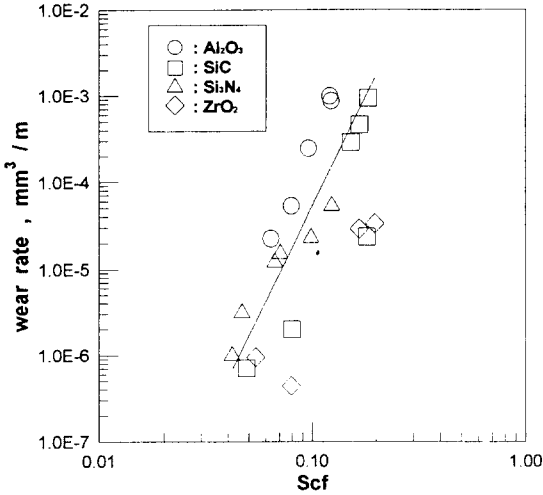


Fig. 15. Relationship between wear rate and the Scf parameter.

질화규소, 지르코니아의 각 하중에 대한 마멸율과 이에 대응하는 Scf 파라메타의 값을 양대수 그래프 상에 나타낸 것이다. Scf 파라메타 값의 산출에서 마찰계수는 평균마찰계수의 값을 대입하고 균열의 길이는 최대표면거칠기의 평균값을 대입하였으며 평균압력은 마멸트랙의 폭을 직경으로 하는 원면적을 접촉면적으로 하여 주어진 하중에 대해 압력을 계산하여 대입하였다. Fig. 15로부터 세라믹 재료의 마멸율과 Scf 파라메타는 양대수 그래프 상에서 하나의 직선으로 나타낼 수 있었으며 그래프로부터 구하여진 마멸식은 다음과 같이 주어진다.

$$W_s = 5.52 \times Scf^{5.01} \quad (4)$$

5. 결 론

세라믹 마멸율을 평가하기 위해 제안된 Scf 파라메타의 유용성을 검증하기 HIP법으로 제작된 알루미늄, 탄화규소, 질화규소, 지르코니아의 네 가지 세라믹 재료를 시편으로 하여 ball on disk type으로 마찰, 마멸실험을 수행하였다. 실험은 윤활하에서 상온, 상압상태로 하였다. 본 실험의 결과로 다음의 결론을 얻었다.

1. 본 실험에 사용된 네 종류의 세라믹재료의 비마멸율과 마멸계수는 하중이 커짐에 따라 증가함을 보이고 네 종류의 세라믹재료의 마멸계수의 순서는 다

음과 같다.

$$ZrO_2 < Si_3N_4 < SiC < Al_2O_3$$

2. SEM에 의해 관찰된 마멸면에는 취성파괴에 의한 표면균열과 마멸입자들이 존재하며 마멸입자의 크기는 수 μm 에서 수십 μm 정도이다.

3. 윤활하의 본 실험에서 세라믹의 파괴인성치가 클수록 내마멸성이 증가함을 보이고 마멸면의 표면거칠기와 마멸율은 상당한 상관관계를 가진다.

4. 세라믹 마멸율을 평가하기 위해 제안된 무차원 파라메타 Scf를 본 실험의 데이터들에 적용한 결과 세라믹 재료의 마멸율과 Scf 파라메타는 양대수 그래프 상에서 하나의 직선으로 나타낼 수 있었으며 그래프로부터 구하여진 마멸식은 다음과 같다.

$$W_s = 5.52 \times Scf^{5.01}$$

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비 (기계공학ME94-E-01)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Johnson, D. R., Schaffhanser, A. C., Tennery, V. T., Long, E. L. and Schulz, R. B., "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Project", The American Ceramic Society Bulletin, Vol. 64, No. 2, pp.276-281, 1985.
2. Schulz, R. B. and Johnson, D. R., "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Program", Advanced Materials Conference, Ed. by Morse, J. G., pp. 145-162, 1987.
3. Evans, A. G. and Marshall, D. B., "Wear Mechanism in Ceramics", Fundamentals of Friction and Wear of Materials, pp.439-452, 1981.
4. Sibley, L. B. and Allen, C. M., "Friction and Wear Behavior of Refractory Materials at High Sliding Velocities and Temperatures", Wear, Vol. 5, pp.312-329, 1962.
5. Kim, S. S., Kato, K., Hokkirigawa, K. and Abe, H., "Wear Mechanism of Ceramic Materials in Dry Rolling Friction", Trans. ASME, J. of Tribology, Vol.

- 108, pp.522-526, 1986.
6. 김석삼, 김재호, "세라믹의 마멸기구에 관한 파괴역학적 연구-멸실험결과의 고찰", 대한기계학회논문집, 제14권, 제3호, pp.636-645, 1990.
 7. 김석삼, 김상우, S. M. Hsu, "세라믹 마멸에 있어서의 새로운 파라메타 제안(1)" 대한기계학회 논문집, 제17권, 제6호, pp.1441-1455, 1993.
 8. S. S. Kim, S. W. Kim and S. M. Hsu, "A New Parameter for Assessment of Ceramic Wear", *Wear*, 179, pp.69-73, 1994.
 9. Marshall, D. B., Lawn, B. R. and Evans, A. G., "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack system", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 65, No. 11, pp.561-566, 1982.
 10. Lawn, B. R., Evans, A. G. and Marshall, D. B., "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 63, No. 9-10, pp.574-581, 1980.
 11. Sines, G., "Rationalized Crack Growth and Time-to-Failure of Brittle Materials", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 59, No. 7-8, pp.371-371, 1976.