

〈論 文〉

세라믹 마멸에 있어서의 새로운 파라미터 제안(I)

질화규소와 지르코니아의 마찰·마멸 특성

김석삼* · 김상우** · S.M. Hsu***

(1992년 12월 8일 접수)

A Proposition of a New Parameter in Ceramic Wear (I)

Friction and Wear Characteristics of Silicon Nitride and Zirconia

Seock-Sam Kim, Sang-Woo Kim and S.M Hsu

Key Words : Ceramic Wear(세라믹 마멸), Wear Mechanism(마멸기구), Nondimensional Parameter(무차원 파라미터), Wear Rate(마멸율), Fracture Mechanics(파괴역학), Stress Intensity Factor(응력확대계수)

Abstract

Under unlubricated condition, the friction and wear tests of silicon nitride and zirconia manufactured by HIP were carried out at room temperature. The wear resistance of silicon nitride was superior to that of zirconia under low load, whereas the wear resistance of zirconia was superior to that of silicon nitride under high load. Wear model of ceramic was suggested by the microscopic SEM observation of worn surfaces and debris. Theoretical analysis and discussions based on linear fracture mechanics were made out about this ceramic wear model. From the theoretical analysis, a new nondimensional parameter, Scf, was introduced to estimate wear rate of ceramics. This new nondimensional parameter consists of contact pressure, surface defect of contact material, frictional coefficient and fracture toughness.

1. 서 론

세라믹은 금속에 비해서 밀도가 낮고, 내마멸성이 우수하고, 열팽창계수가 작고, 높은 온도범위에 걸쳐서 안정성과 경도를 유지함으로 기계구조용재료로서 유망시 되고 있다. 앞으로 세라믹부품에 대한 수요는 더욱 증가하리라고 예상하고 있으며,⁽¹⁾ 세라믹의 응용이 시도되고 있는 부품은 더욱 다양화되어 가고 있는 추세이다. 가스터빈의 고속화와

함께 개발중인 세라믹베어링^(2~9)을 위시하여, 각종 공구, 펌프부품, 각종 자동차용 부품, 엔진부품 등 내마멸성이 요구되는 부분에 세라믹이 응용되고 있다.⁽¹⁰⁾ 미국에서는 1983년에 세라믹엔진 개발계획에서 중요한 연구분야중의 하나가 데이터베이스와 수명예측에 관한 것이었다.⁽¹¹⁾ 그러나 아직 세라믹 재료에 관한 신뢰할 만한 데이터베이스는 확립되지 못한 상태이고, 트라이보시스템에 관한 수명예측과 설계를 위한 기초 자료도 확립하지 못한 상태에 있다. 세라믹재료에 관한 수명예측과 설계를 위해서는 세라믹재료의 트라이보시스템(tribosystem)에서의 마멸기구의 규명과 마멸율을 평가할 수 있는 마멸식을 구하는 것이 가장 기본적인 과제라 할 수 있다.

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**경북대학교 대학원

***Ceramics Division, NIST

Steijin⁽¹²⁾은 1961년에 상온에서 사파이어의 미끄럼마찰실험을 수행하여 그 마멸거동이 소성변형에 의해 마멸이 진행된다고 보고한 바 있다. Eiss⁽¹³⁾와 Miyoshi⁽¹⁴⁾등도 알루미늄과 탄화규소 세라믹의 마멸실험을 수행하여 소성변형이 발생함을 보고하였다. 질화규소의 경우에도 Adewoye⁽¹⁵⁾등이 주로 소성변형에 의해서 마멸이 진행된다고 보고하였으며, 그 후 Aronov⁽¹⁶⁾등과 Aghan⁽¹⁷⁾등이 세라믹마멸기구는 소성변형에 의한 것이라고 주장한 바 있다. 그러나 1980년에 Evans와 Marshall⁽¹⁸⁾은 세라믹의 연삭마멸기구(abrasive wear mechanism)란 논문에서 접촉점의 하부에 표면에 평행한 lateral crack이 발생하여 전파함으로써 마멸이 진행된다고 하는 lateral fracture mechanism을 제시하였다. 탄화규소(SiC)에 있어서도 Adewoye⁽¹⁵⁾등은 이방성으로 인한 탄성변형의 불일치로부터 탄화규소의 마멸이 취성파괴에 기인하는 것과 입계에서 발생한 균열의 전파로 생기는 입계파괴 등에 기인하는 것으로 보고하였다. Iwasa⁽¹⁹⁻²¹⁾는 질화규소의 마멸기구가 균열의 발생과 전파에 의한 것이라고 발표하였으며, 여러가지 세라믹의 마찰·마멸실험에서 마찰계수와 마멸율은 경도와 상관관계가 없으며 파괴인성치와는 상관관계가 있음을 보였으며, 비마멸율(specific wear rate)은 하중과 속도의 곱에 비례하는 것으로 나타났다. 역시 Iwasa⁽²²⁾는 고진공이나 대기중에서의 고하중하에서는 질화규소의 주된 마멸기구는 취성파괴임을 보였다. Kim^(23,24)등은 알루미늄, 질화규소, 탄화규소, 지르코니아, 서어멧의 다섯가지의 구조용세라믹의 구름접촉하에서의 마멸실험에서 마멸기구가 취성파괴에 기인하는 것을 보였다. 그의 다른 연구자들⁽²⁵⁻²⁹⁾은 세라믹의 마멸은 취성파괴와 소성변형이 주된 것이라고 주장한다. 세라믹의 다른 마멸기구로서는 피로현상, 화학적작용, 응착, 열응력 등을 들고 있다. Iwasa⁽²²⁾는 저하중에서 질화규소의 마멸을 피로마멸로 생각하였으며, Buckley⁽²⁷⁾등은 응착마멸을 주장하였다. 그러나 Gates⁽³¹⁾등은 세라믹의 결합성으로부터 응착현상은 불가능하다고 주장하였다.

세라믹마멸은 환경에 의한 영향도 크게 받고 있다. Scott^(32,33)은 PSZ가 물속에서는 그 마멸율이 100배에서 1000배까지 증가함을 보여주었다. Wallbridge⁽³⁴⁾등은 증류수하에서의 알루미늄의 마멸율이 수 십배가 증가되는 것을 보고한 바 있다. Fischer^(35,36)등은 질화규소와 탄화규소의 마멸실험

에서 습도가 마멸을 감소시켜줌을 발표하였다. Ueda⁽³⁷⁾는 질화규소의 제거가공에서 제거과정이 마찰표면에서의 화학작용에 의해 진행되는 것으로 생각하고 있다. Sibly와 Allen⁽³⁸⁾은 무윤활하에서 여러가지 세라믹재료를 평가하여 주된 마멸기구가 상호접촉부의 미시적인 실제접촉부에서의 세라믹재료를 평가하여 주된 마멸기구가 상호접촉부의 미시적인 실제접촉부에서의 마찰열에 의한 열응력에 기인한다고 주장한 바 있다. Wedeven⁽³⁹⁾등은 접촉부에서의 인장응력으로 인한 균열의 발생이 질화규소의 마멸을 야기시킨다고 하였다. 또한 그는 마멸과정에서 화학작용에 의해 SiO₂가 생성됨을 발견하였다.

이상과 같이 세라믹마멸에 관한 연구결과로부터 알 수 있는 바와 같이 여러가지 조건에 따라 세라믹의 마멸기구도 다양하게 제기되고 있어 여러가지 마멸기구가 제안되고 있다. 마멸식에 관한 것으로는 몇 가지 마멸모델을 제안하여 마멸식을 제안하고 있다. Evans와 Marshall⁽¹⁸⁾은 세라믹의 연삭마멸기구를 파괴역학적으로 해석하여 마멸량을 재료 특성치(파괴인성치, 탄성계수, 경도)와 하중 그리고 마찰거리로써 나타내고 있다. Kim⁽³⁰⁾등은 알루미늄의 터빈유하의 실험을 수행하여 얻어진 마멸율을 하중과 속도에 관한 마멸식으로 발표하였다. 고온에서의 세라믹마멸실험에서는 Sibly⁽³⁸⁾등에 의해서 마멸율을 열확산계수와 열응력저항계수 및 마찰계수에 관한 식으로 나타냈다. 세라믹의 구름마멸에 있어서 Kim^(23,24)등에 의해서 제안된 Sc(severity of contact) 파라미터를 사용하여 실용상 편리한 마멸식으로 구하여짐을 발표하였다. 이 Sc파라미터는 세라믹의 트라이보시스템에서 주요한 재료 특성치인 파괴인성치와 하중 및 접촉부의 결합의 크기로서 구성되어 있다.

이상과 같이 세라믹마멸에 관한 연구결과로부터 알 수 있듯이 사용조건에 따라 다양한 마멸기구에 의해 마멸이 진행되며, 그 마멸기구에 관한 이론도 확립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 최신 기법에 의해서 제조된 HIP제 질화규소와 지르코니아를 실험재료로 하여 무윤활하에서의 미끄럼마찰·마멸실험을 수행하여 마찰·마멸특성을 규명하고, SEM을 이용한 마멸면의 미시적 관찰을 통해서 세라믹의 마멸기구를 조사하여 세라믹마멸기구의 마멸모델을 제시하고자 한다. 제시된 마멸모델에 파괴역학을 도입하여 이론해석과 고찰을 수행하

여 보다 실용적인 세라믹의 마멸율을 평가할 수 있는 새로운 무차원 파라미터를 제안하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 시험기는 Toyo Baldwin 사 (EFM-3-E형)의 마멸시험기⁽⁴⁰⁾이다. 미끄럼속도는 0.2~2000 mm/s범위에서 무단변속이 가능하며, 시험시간도 타이머를 사용하여 0~60분의 범위에서 임의로 조정할 수 있다. 가압하중은 로드셀을 사용하여 0.2~500 kg범위에서 사용할 수 있다. 마찰력도 로드셀을 사용하여 30 kg/cm까지 측정가능하다. 본 실험에서는 하중을 50 kg, 75 kg, 100 kg으로 하여 실험을 수행하였다.

마멸량 측정은 전자저울(Chyo Balance Co., JL-180; capacity 180 g, sensitivity 0.1 mg)을 사용하였다. 마멸면의 형상변화는 Kosaka Laboratory LTD. 제 표면거칠기측정기를 사용하였다.

2.2 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 기계구조용 세라믹으로서 가장 유망시 되고 있는 지르코니아(ZrO_2)와 질화규소(Si_3N_4)로 하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. Fig. 1의 (A)는 상부시험편이고, (B)는 하부시험편이다. 상·하 시험편의 두께를 다르게 함은 마멸량을 측정하고, 표면형상의 변화를 측정하기 위함이다. 두 종류의 시험

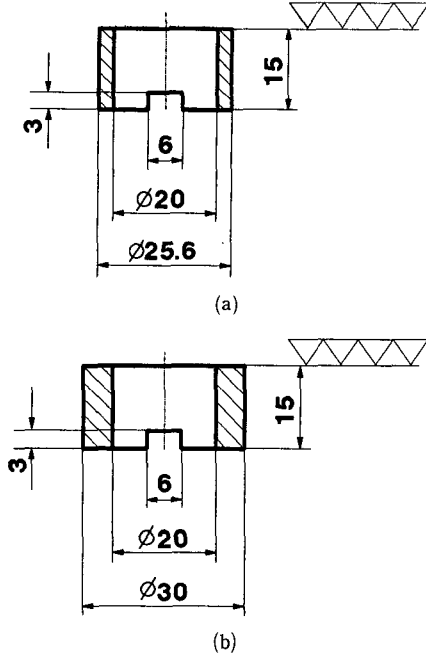


Fig. 1 Shape and size of specimens

편은 공히 성형, 소결, HIP, 연마가공의 순서로 제작하여 시험편 표면의 표면거칠기를 $0.8 \mu R_{max}$ 이하로 하였다. 지르코니아의 소결조제는 Y_2O_3 를 사용하였으며, 질화규소의 소결조제로는 $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$ 를 사용하였다. 제작된 지르코니아와 질화규소의 물리적 기계적성질은 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 경도는 지르코니아가

Table 1 Mechanical and physical properties of specimen

Properties	ZrO ₂	Si ₃ N ₄
Surface roughness, μR_{max}	0.8	0.8
Vickers hardness, kg/mm ²	1250	1500
Bending strength, kg/mm ²	110	80
Elastic modulus, kg/mm ²	2.0×10^4	3.0×10^4
Poisson's ratio	0.30	0.27
Density, g/cm ³	6.05	3.26
Coefficient of thermal expansion, $10^{-6}/^{\circ}C$ (100-1000 $^{\circ}C$)	10.5	3.2
Fracture toughness, MNm ^{-3/2}	5.0	5.5
Thermal conductivity(20 $^{\circ}C$), Cal/cm · sec · $^{\circ}C$	0.007	0.07

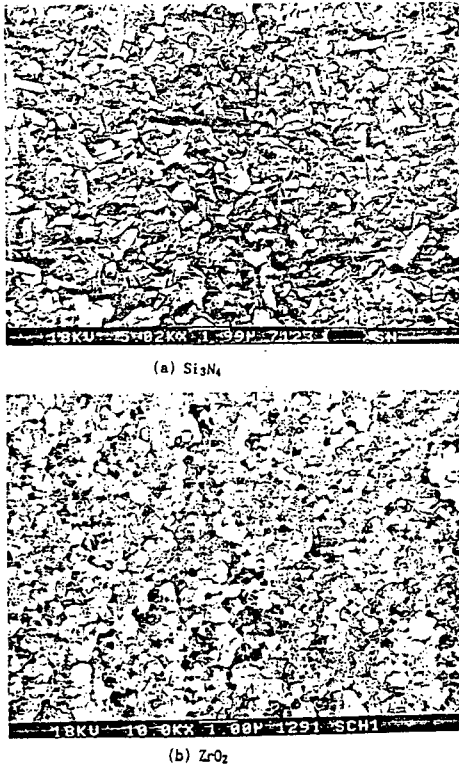


Fig. 2 Microstructure of Si₃N₄ (a) and ZrO₂ (b)

Hv1250, 질화규소가 Hv1500이며, 파괴인성치는 각각 5.0, 5.5 MNm^{-3/2}이다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 시험편인 질화규소와 지르코니아의 미세조직을 보여주는 SEM사진이다. Fig. 2(a)는 질화규소의 조직이며, (b)는 지르코니아의 조직이다. 질화규소는 수 μm의 장방형인 조직을 보이며 지르코니아는 1 μm이하의 원형의 조직을 나타내고 있다.

2.3 시험방법

Fig. 1에 나타난 상하 두개의 시험편을 무운활 상태의 상온, 상압에서 실험을 수행하였다. 실험전에 상하의 두 시험편을 아세톤용액 속에서 5분간씩 2회로 초음파 세척을 시행한 후에 일정시간 실험을 실시한 후에 다시 실험 전과 같이 초음파 세척을 하여 전자저울을 사용하여 중량의 감소량을 측정하여 마멸량을 산출하였다. 중량으로 구한 마멸량은 다시 체적량으로 환산하여 나타냈다. 본 실험에서는 하중을 50 kg, 75 kg, 100 kg의 세가지로 하였다. 미끄럼속도는 20 mm/s로 일정하게 하였다. 실험시간은 10분, 20분, 40분, 60분, 80분, 100분,

140분, 180분, 220분으로 하였다. 마멸면의 표면의 형상은 표면거칠기를 최대높이로 구하였다. 마찰계수의 산출을 마찰토크를 로드셀로서 감지되게 하여 기록지에 각 순간에서의 모든 기록상태로부터 마찰력을 구하여 관계식으로부터 산출하였다. 마멸면의 미시적 관찰은 SEM(scanning electron microscope)을 사용하여 수행하였다. 시험편 표면은 ion coater를 사용하여 금으로서 3분간 코팅한 후 SEM관찰을 하였다.

3. 실험결과

3.1 마찰거리에 따른 마찰계수의 변화

Fig. 3은 하중 50 kg, 미끄럼속도 20 mm/s에 있어서의 마찰거리 변화에 따른 마찰계수의 변화관계를 나타낸 것이다. 표면에서의 마멸진행과 함께 표면손상의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 마찰거리의 증가와 더불어 거의 안정되어 가는 것을 알 수 있으나 표면으로부터 취성파괴에 따른 마멸입자의 탈락과 함께 마찰저항의 증가로 마찰계수가 크게 되고 있다. 질화규소의 마찰계수가 질화규소의 마찰계수보다 전 실험범위에 걸쳐 크게 나타나고 있다. 질화규소의 마찰계수는 약 0.7이며, 지르코니아의 마찰계수는 0.8~0.9정도를 나타내고 있다. Fig. 4는 하중이 75 kg일 때의 마찰거리 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 이 경

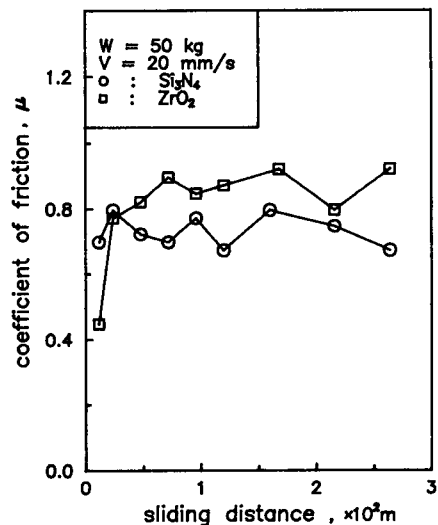


Fig. 3 Coefficient of friction as a function of sliding distance at the load of 50 kg.

우의 전체적인 마찰계수의 변화는 Fig. 3의 경우와 동일한 양상을 보여 주고 있다. Fig. 5는 하중이 100 kg인 경우의 마찰거리의 변화에 따른 마찰계수의 변화관계를 나타낸 것이다. 하중이 100 kg으로 증가한 경우 마찰계수가 약간 작게 나타나고 있다. 이것은 표면에서의 마찰열에 의한 것으로 생각된다. 하중이 크게됨에 따라 마찰로 인한 접촉표면에서 온도가 상승함에 따라 접촉부에서 재질이 다소 연화되었음을 생각할 수 있다. Fig. 5의 경우는 질

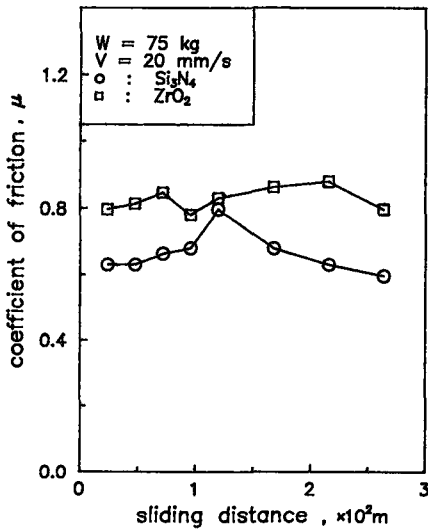


Fig. 4 Coefficient of friction as a function of sliding distance at the load of 75 kg.

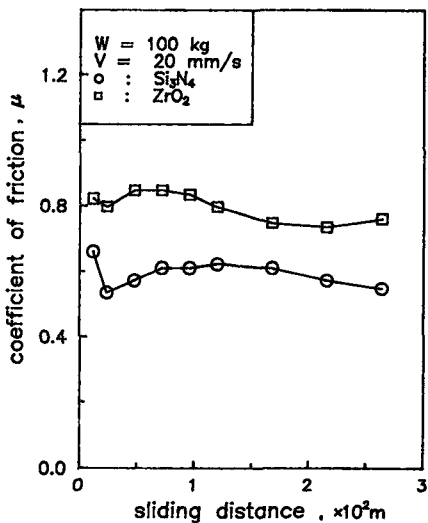


Fig. 5 Coefficient of friction as a function of sliding Distance at the load of 100 kg.

화규소의 마찰계수는 0.6~0.7이며, 지르코니아의 마찰계수는 약 0.8의 값을 나타내고 있다. 본 실험에서 수행된 하중범위에서 질화규소의 마찰계수가 지르코니아의 마찰계수보다 작은 값을 나타낸다.

3.2 마찰거리에 따른 마멸량의 변화

Fig. 6은 하중이 50 kg인 경우의 마찰거리 증가

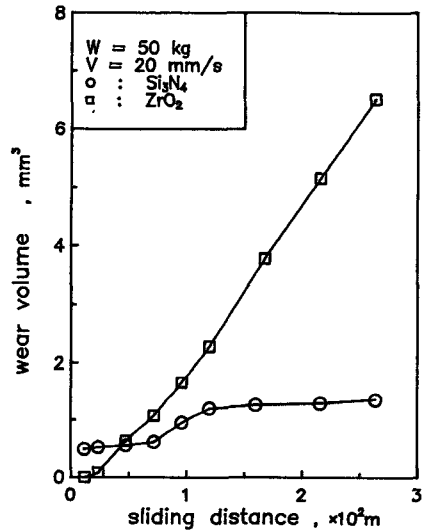


Fig. 6 Wear volume vs sliding distance at the load of 50 kg

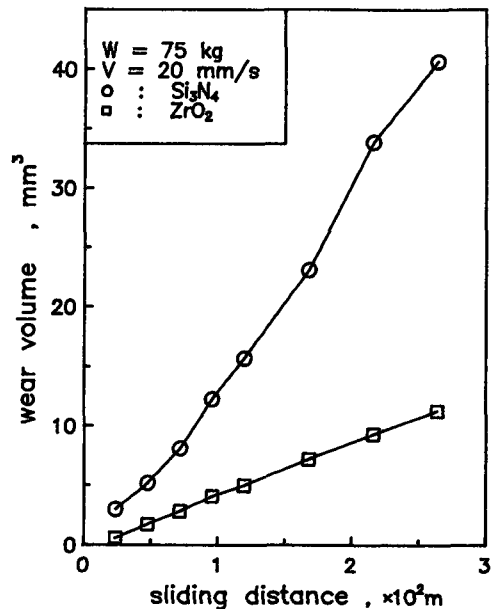


Fig. 7 Wear volume vs sliding distance at the load 75 kg

에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 것이다. 질화규소는 마멸이 거의 발생하지 않고 있다. 지르코니아의 경우는 마멸량이 마찰거리가 증가함에 따라 비례해서 증가하고 있다. 그래프에서 부터 알 수 있는 바와같이 질화규소의 마멸량이 지르코니아의 마멸량보다 적다. 하중이 50 kg의 경우는 질화규소의 내마멸성이 지르코니아의 내마멸성보다 양호하다. Fig. 7은 하중 75 kg인 경우의 마찰거리 변화에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 마멸곡선이다. 이 경우는 질화규소와 지르코니아가 동일하게 마멸량과 마찰거리는 서로 비례하고 있음을 알 수 있다. Fig.

8은 하중이 100 kg의 경우에 대한 마찰거리의 변화에 대한 마멸량을 나타낸 마멸곡선이다. 이 경우도 질화규소와 지르코니아 모두 마찰거리와 마멸량이 직선적으로 비례하고 있음을 알 수 있다. 하중이 75 kg과 100 kg의 경우 동일한 마찰거리에 대한 질화규소의 마멸량이 지르코니아의 마멸량보다 많다. Table 2는 본 실험에서 구해진 질화규소와 지르코니아의 비마멸율(specific wear rate)를 나타낸 것이고, Table 3은 마멸계수를 나타낸 것이다. 비마멸율은 단위마찰거리당, 단위중량당에 대한 마멸량으로 정의되며, 마멸계수는 진실접촉부(real contact area)가 마멸입자가 되어 탈락할 확률을 의미하는 것으로서 내마멸성 평가에 많이 적용되고 있다. Table 2 및 3으로부터 하중이 50 kg인 경우에는 질화규소의 내마멸성이 양호하지만 하중이 75 kg과 100 kg의 경우에는 지르코니아의 내마멸성이 양호함을 알 수 있다.

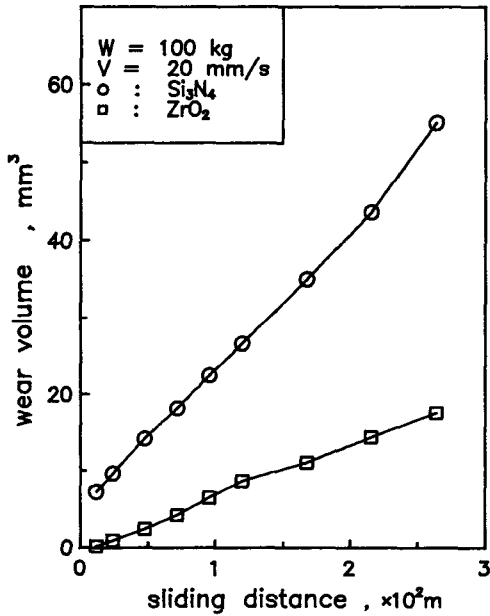


Fig. 8 Wear volume vs sliding distance at the load of 100 kg

Table 2 Specific wear rate, W_s ($\times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{kg}\cdot\text{mm}$)

	50 kg	75 kg	100 kg
Si ₃ N ₄	1.02	20.54	20.87
ZrO ₂	4.93	5.68	6.66

Table 3 Wear coefficient, K ($\times 10^{-4}$)

	50 kg	75 kg	100 kg
Si ₃ N ₄	1.53	30.81	31.30
ZrO ₂	6.16	7.10	8.32

3.3 마멸면의 형상변화

Fig. 9, Fig. 10과 Fig. 11은 하중 50 kg, 75 kg 및 100 kg의 경우에 대한 마멸면의 형상변화를 알아보기 위해 구한 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 표면거칠기의 값은 최대높이 거칠기인 R_{max} 으로 구한 것이다. 마찰거리의 증가와 더불어 표면으로부터

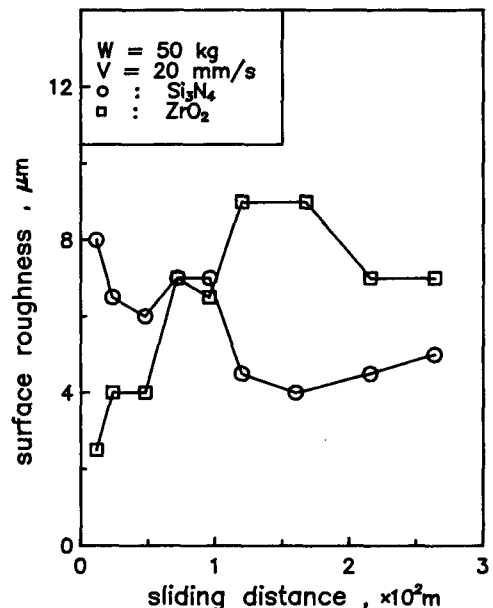


Fig. 9 Surface roughness vs sliding distance at the load of 50 kg

터 마멸입자가 탈락하면서 부분적으로 표면형상의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 질화규소와 지르코니아의 마멸면의 표면거칠기는 4~12 μm를 나타내고 있다. Table 1로부터 마멸시험 하기 전의 시

험편의 표면거칠기는 질화규소와 지르코니아 모두 0.8 μm인 것을 고려하면 정상마멸 단계에서는 마멸면의 최초의 표면거칠기는 모두 제거되고 새로운 표면형상을 유지하면서 마멸이 진행되는 것으로 생각된다.

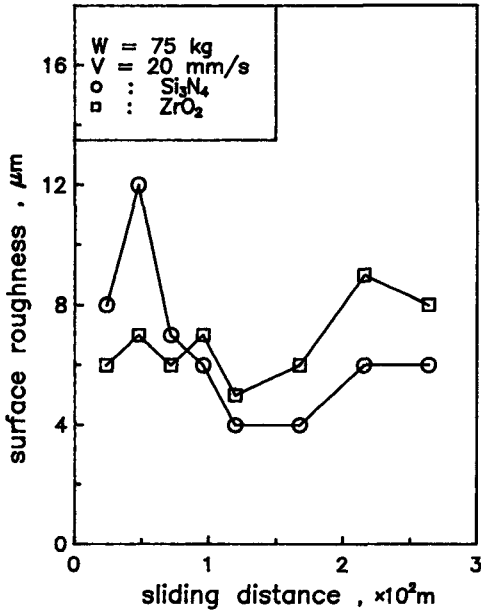


Fig. 10 Surface roughness vs sliding distance at the load of 75 kg

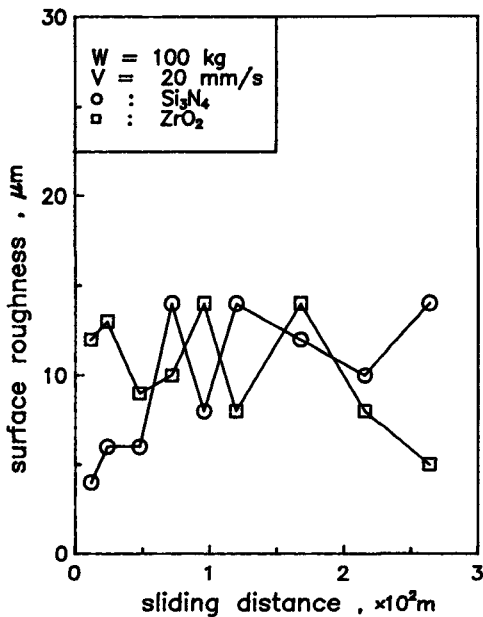


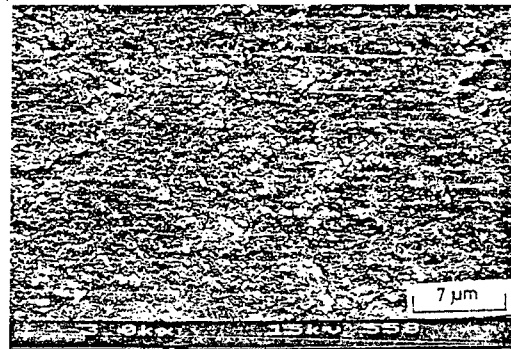
Fig. 11 Surface roughness vs sliding distance at the load of 100 kg

3.4 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 형상변화와 마멸입자의 생성과정을 알아보기 위해서 SEM을 사용하여 마멸면의 미시적 관찰을 수행하였다. Fig. 12는 질화규소와 지르코니아 시험편의 실험하기전의 연마가공을 마친 상태에서의 표면을 나타내는 SEM사진이다. 그래프의 상단의 사진은 질화규소의 연마면을 나타내고, 하단의 사진은 지르코니아의 연마면의 사진을 나타낸다. 질화규소의 연마면은 연마과정에서 생성된 표면균열이 상당히 많이 산재하고 있음을 알 수 있다. 이것은 미끄럼운동이 일어날 경우 상호접촉부에서 수직하중과 함께 접선하중이 표면에서 동시에



(a)

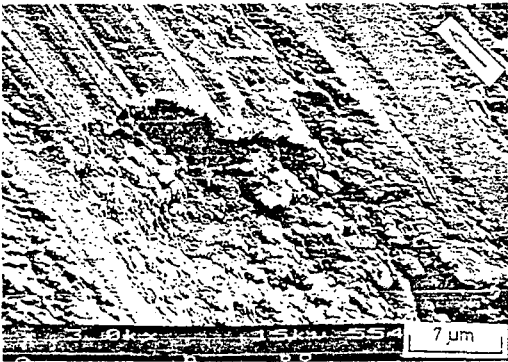


(b)

Fig. 12 As-received surface of Si₃N₄(a) and ZrO₂ (b)



(a)



(b)

Fig. 13 Worn surface of Si_3N_4 (load: 50 kg, sliding distance: 744 m) the arrows indicated sliding direction

작용할 경우에 표면균열로 부터 마멸입자가 생길수 있음을 생각할 수 있다. 그러나 많은 부분에 소성 변형된 표면도 산재해 있음을 알 수 있다. 지르코니아의 연마가공면의 표면에는 작은 입자상의 형상



(a)



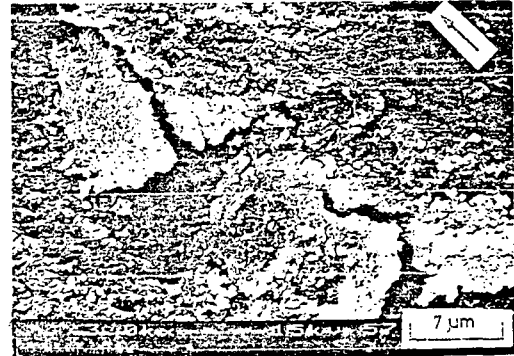
(b)

Fig. 14 Worn surface of ZrO_2 (load: 50 kg, sliding distance: 744m) the arrows indicate sliding direction

을 나타내고 있다. 지르코니아의 연마면에도 상당한 연마과정에서 생성된 것으로 생각되는 표면손상이 많이 산재되어 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 질화규소의 하중 50 kg, 미끄럼거리 744 m의 실험

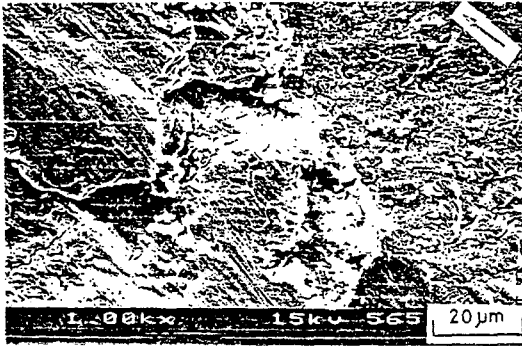


(a)



(b)

Fig. 15 Worn surface of Si_3N_4 (load: 75 kg, sliding distance: 264 m) the arrows indicate sliding direction



(a)



(b)

Fig. 16 Worn surface of ZrO_2 (load : 75 kg, sliding distance : 264 m) the arrows indicate slidin direction

이 완료된 마멸표면을 나타내고 있다. 사진내의 화살표는 미끄럼방향을 지시하는 것이다. Fig. 13(b)는 (a)를 확대하여 나타낸 것이다. 상부 사진에서는 질화규소의 표면에서 마멸입자가 탈락된 후의 파여진 흔적을 볼 수 있다. 그 길이가 약 $70 \mu m$, 폭이 $30 \mu m$, 길이가 $8 \mu m$ 정도의 비교적 큰 것이다. Fig. 14는 지르코니아의 마멸면의 사진으로서, 하중이 50 kg, 미끄럼거리가 744 m의 마멸면이다. 하부의 사진은 상부의 일부분을 확대한 것이다. 마멸면의 표면에 마찰과 마멸의 진행으로 야기된 표면균열이 많이 발견되고 있다. Fig. 15는 하중 75 kg, 미끄럼거리 264 m까지 마멸실험이 완료된 질화규소의 마멸면의 사진이다. 사진에서의 화살표는 미끄럼방향을 나타낸다. 이 사진에서도 아주 심한 마멸이 발생한 것으로 생각되는 마멸흔적은 볼 수 있다. 표면균열의 진행에 의해서 마멸입자가 생성되어 탈락하고 남은 잔류표면균열도 여러 곳에서 발견되고 있다. 하부 사진에서는 마멸입자가 탈락



Fig. 17 Wear debris of Si_3N_4 at the load of 75 kg

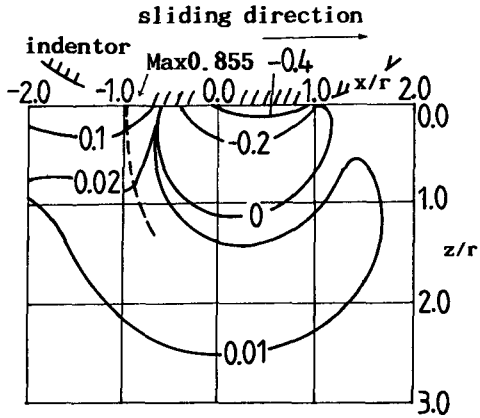
하려는 순간으로서 크기가 약 $10 \sim 16 \mu m$ 임을 알 수 있다. Fig. 16은 하중 75 kg, 미끄럼거리 264 m의 지르코니아의 마멸면의 사진이다. 하부 사진은 상부의 일부분을 확대한 것이다. 이 사진을 Fig. 14의 하중 50 kg의 마멸면과 비교해 보면, 매우 심하게 마멸이 진행되었으며 많은 잔류표면균열이 산재해 있음을 알 수 있다. 이것은 표면에 산재해 있는 표면균열이 미끄럼접촉으로 운동할 때 그 표면균열이 성장하여 마멸이 진전되고 잔류표면균열로서 남게 된다고 생각된다. Fig. 17은 하중 75 kg의 경우 질화규소의 마멸면에 남아 있는 마멸입자를 나타낸 것이다. 크기는 길이가 약 $70 \mu m$, 폭이 약 $30 \mu m$, 두께가 약 $20 \mu m$ 임을 알 수 있다.

4. 고찰

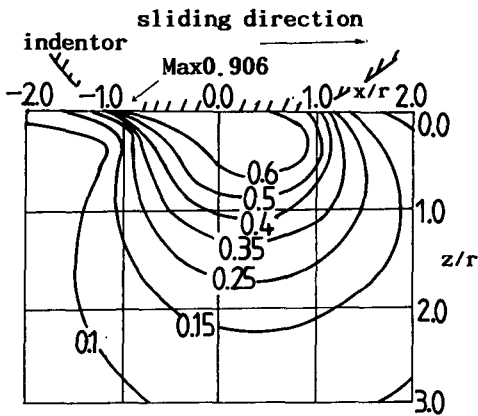
4.1 질화규소 및 지르코니아의 마찰·마멸특성

본 실험에 사용된 질화규소와 지르코니아의 동일 재료끼리 무윤활상태에서 마찰실험을 수행하여 마찰계수는 질화규소가 0.6~0.7, 지르코니아가 0.8의 값을 나타내고 있는데, 이것은 Aronov⁽¹⁶⁾등의 지르코니아들 끼리의 마찰계수가 0.8이었고, Fischer⁽³⁵⁾등의 질화규소간의 마찰계수값이 마찰분위기 조건의 변화에 따라 0.7~0.85의 높은 값을 보여주고 있어 이들 마찰계수의 값들은 본 실험의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편 Ueda⁽⁴¹⁾는 세라믹의 트라이볼로지(tribology)를 기술하기 위한 가장 적합한 모델로서 압자의 미끄럼접촉 모델을 제시하여 Hamilton의 방법을 이용하여 응력해석을 수행하여 세라믹의 미끄럼접촉에서의 균열의 발생과 소성변형의 가능성에 대



(a) Maximum principal stress σ_1



(b) Equivalent stress distribution σ_e

Fig. 18 Maximum principal stress and equivalent stress distribution under the sliding contact of indenter

해서 기술하였다. Fig. 18의 (a)와 (b)는 Ueda의 계산결과이다. Fig. 18은 포아송비가 0.21이고 마찰 계수가 0.5인 경우의 최대주응력분포와 상당응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 압자의 아래 전방의 영역에는 압축응력장이 지배적인 반면, 후방영역에는 높은 인장응력이 작용하고 있다. 최대주응력의 최대값은 압자의 후방에 접촉원경계의 표면에 발생함을 알 수 있다. 또한 상당응력은 상당응력의 높은 영역이 앞쪽 아래를 향하여 넓어짐을 알 수 있다. 상당응력의 최대값은 압자의 후방의 접촉원경계부근에 위치하고 있음을 알 수 있다. 응력장은 접촉부의 마찰계수에 크게 의존한다. Ueda의 계산에 의하면 최대주응력은 마

찰계수의 증가와 더불어 직선적으로 증가한다. 상당응력에 대한 마찰계수의 영향은 다소 복잡한 양상을 나타내는데, 최대상당응력은 마찰계수의 증가와 함께 증가하는데 마찰계수가 0.27부근에서 현저하게 증가함을 보였다. 특히 마찰계수가 0.27이하에서는 접촉원의 앞쪽 아래편에서 최대상당응력이 나타나지만, 마찰계수가 이보다 크게 되면은 접촉원이 후방에서 접촉원경계에 최대상당응력이 나타난다고 보고하고 있다. 이것은 마찰계수가 0.27이상의 경우에는 접촉부의 후방 경계부근에서 표면균열이 생성될 가능성이 높다는 사실을 의미한다. 본 실험에서 얻어진 마찰계수의 값이 0.7~0.8임을 고려하면 질화규소와 지르코니아의 미끄럼접촉에서는 접촉부의 표면에서의 균열의 발생이나 소성변형의 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. Fig. 15와 16에서 질화규소와 지르코니아의 마찰면의 SEM사진 관찰에서도 표면균열의 흔적을 볼 수 있다.

다음으로 마멸면의 표면거칠기와 마멸입자의 두께에 대한 상호관련성에 관해 고찰하고자 한다. Fig. 13에서는 마멸입자가 탈락한 뒤의 질화규소의 마멸면의 사진으로서 그 깊이가 8 μm 정도임을 알 수가 있는데, Fig. 9의 마찰거리의 변화에 따른 질화규소의 표면거칠기의 값이 4~8 μm 임을 고려하면 표면거칠기와 마멸입자 두께와의 상호관련성을 인정할 수 있다. 표면거칠기의 표시방법은 여러가지가 있으나 최대높이로써 나타내는 것이 마멸면에서 탈락한 마멸면의 최대깊이를 반영하는 것으로서 마멸면의 최대깊이는 마멸량을 결정짓는 중요한 인자이기 때문이다. Hisadado⁽⁴²⁾ 등은 네 종류의 세라믹디스크에 질화규소 핀을 대기중에서 무운활상태로 마찰실험을 수행하여 마멸면의 표면거칠기의 기하학적 형상이 비마멸물과 마찰계수에 영향을 미치고 있음을 보였다. 즉 핀의 비마멸물은 미세마멸깊이의 증가와 더불어 증가하는 경향을 보였다.

4.2 세라믹마멸 모델과 이론해석

본 실험에서 수행한 질화규소와 지르코니아의 마멸실험의 결과와 마멸면의 SEM을 사용한 미시적 관찰 및 고찰을 바탕으로 Fig. 19와 같은 세라믹마멸 모델을 설정하였다. 그림과 같이 세라믹표면을 반무한 탄성체로 간주하여, 반무한 탄성체의 표면에 표면균열이 존재하고, 이 반무한 탄성체표면상을 상대편 세라믹표면이 접촉하여 미끄럼운동하는 것으로 한다. 이때 접촉하중으로는 집중하중 $Q(x)$

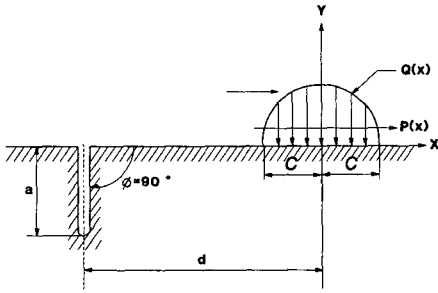


Fig. 19 Ceramic wear model

와 접선방향의 traction $P(x)$ 가 작용하는 것으로 한다. $Q(x)$ 와 $P(x)$ 는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Q(x) &= P_0 \sqrt{1-x^2} \\ P(x) &= \mu Q(x) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 a 는 표면균열의 크기이며, μ 는 접촉면의 마찰계수이고, P_0 는 최대 Hertz 압력이다. 전보⁽⁴³⁾에서 이미 이 해석모델에 대해서 선형파괴역학을 도입하여 표면균열선단의 mode 1과 mode 2의 무차원 응력확대계수 $K_1/P_0\sqrt{\pi a}$ 와 $K_2/P_0\sqrt{\pi a}$ 를 수치 해석을 통하여 구하여 고찰한 바 있다.

Fig. 20은 본 실험결과를 고려하여 무차원 균열 길이 $a/c=0.02$, 균열의 경사각 $\phi=90^\circ$, 균열면에서의 마찰계수 $\mu^c=0.7$, Hertz 접촉부에서 마찰계수 $\mu=0.7$ 로 선택했을 때의 접촉하중점의 이동에

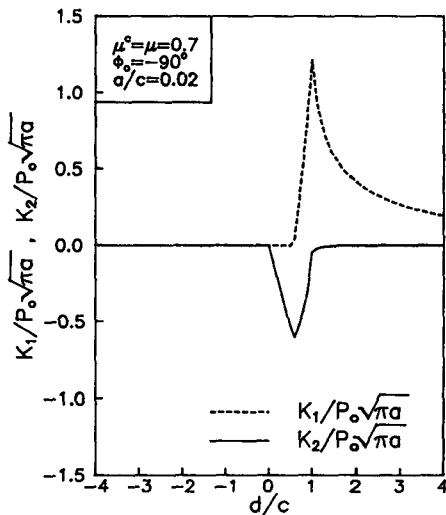


Fig. 20 Nondimensional stress intensity factors as a function of movement of Hertzian contact loading

다른 무차원 응력확대계수는 최대치를 나타낼 수 있다. 해석모델에서의 분포하중 $Q(x)$ 와 $P(x)$ 를 각각 집중하중 Q 와 P 로 나타내면, 이 때의 각 최대응력확대계수의 값을 근사적으로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{1\max} &= AP\sqrt{\pi a} = A\mu Q\sqrt{\pi a} \\ K_{2\max} &= BQ\sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 A, B 는 상수이다. 한편, mixed mode하에서는 유효 응력확대계수 K_e 는 식(3)과 같이 주어진다.

$$K_e^2 = K_1^2 + K_2^2 \quad (3)$$

따라서 최대유효 응력확대계수는 식(4)와 같이 주어진다.

$$K_{e\max} = CQ\sqrt{(1+\mu^2)\pi a} \quad (4)$$

여기서 C 는 상수이다.

4.3 세라믹의 마멸을 지배하는 무차원 파라미터 유도

파괴역학을 마멸기구의 해석에 도입한 Suh^(44,45) 등은 마멸율과 균열의 전파율을 관련지어 나타내고자 하였다. Suh 등이 주장한 Delamination이론에서는 피로파괴에 관한 균열의 전파법칙인 Paris법칙을 적용하였다.⁽⁴⁴⁾ 한편 Minnear와 Bradd⁽⁴⁶⁾ 그리고 Sines⁽⁴⁷⁾는 취성재료에 관한 macroscopic crack-growth law로서 식(5)를 제안했다.

$$V = \frac{da}{dt} = B \left(\frac{K}{K_{Ic}} \right)^n \quad (5)$$

위식에서 a 와 t 는 각각 균열의 길이와 시간을 나타내며, B 와 n 은 상수이다. K 는 재료의 균열선단에서의 응력확대계수이며, K_{Ic} 는 재료의 파괴인성치를 의미한다. 임의의 순간에 있어서의 균열의 전파속도는 그 순간에 있어서의 균열선단의 유효 응력확대계수 ($K_{e\max}$)와 접촉부의 파괴인성치 (K_{Ic})의 비로서 주어진다. 같은 논리를 세라믹의 마멸율에도 적용하면 세라믹의 마멸율 W_s 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_s = \frac{dw}{ds} = \alpha \left(\frac{K_{e\max}}{K_{Ic}} \right)^\beta \quad (6)$$

여기서 S 는 마찰거리를 나타내고, α 와 β 는 상수이다. 식(4)와 (6)으로부터 세라믹의 마멸율 W_s 는 식(7)과 같이 구하여진다.

$$W_s = \alpha \left(\frac{Q\sqrt{(1+\mu^2)}a}{K_{IC}} \right)^\beta \quad (7)$$

여기서 $Scf = \frac{Q\sqrt{(1+\mu^2)}a}{K_{IC}}$ 로 두면, 식(7)은 식(8)과 같이 주어진다.

$$W_s = \alpha (Scf)^\beta \quad (8)$$

여기서 유도된 Scf 가 세라믹의 마멸율을 평가하는데 사용될 새로운 무차원 파라미터인 것이다. 이 무차원 파라미터 Scf 는 상호접촉하여 상대운동을 하고 있는 Tribosystem을 생각하면 접촉부에 작용하는 하중(Q)와 접촉부의 재료특성치로서 파괴인성치(K_{IC})와 재료표면의 표면결함의 정도를 나타내는 표면균열의 크기(a) 및 접촉면의 윤활특성을 나타내는 마찰계수로서 구성되어 있어 세라믹재료의 설계시에 귀중한 자료로서 활용되리라고 생각된다. Fig. 21은 본 실험에서 얻어진 질화규소와 지르코니아의 마멸율과 NIST에서 얻어진 알루미늄과 탄화규소의 마멸율을 Scf 파라미터로서 나타낸 것이다. 양대수 그래프상에 하나의 직선으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 실험데이터중에서 NIST의 것은 NIST에서 세라믹의 마찰 및 마멸실험으로 개발된 세개의 평면상에 하나의 회전하는 구형 시험편이 미끄럼접촉하면서 마멸실험을 수행

하여 얻어진 것이다.⁽³¹⁾ 각 마멸율은 동일 재료의 것들을 평균하여 나타냈다. Fig. 21의 그래프로부터 구하여진 식은 다음과 같다.

$$W_s = 4.09 \times 10^{-6} \cdot Scf^{4.48} \quad (9)$$

여기서 유도된 무차원 파라미터를 실제의 실험데이터에 적용할 경우 보다 많은 종류의 세라믹을 실험 재료로 하여 여러가지 기하학적 형상의 시험편을 여러가지 실제 실험조건하에서 실험을 수행하여 정확한 마멸진행곡선을 구하여 초기마멸단계와 정상마멸단계를 구별하여 각 마멸단계에서의 마멸율을 구하여 적용하여야 할 것으로 생각된다. 저자들은 앞으로 더욱 많은 종류의 세라믹의 마멸실험을 수행한 후에 본 논문의 속보로서 보고하고자 한다. 아울러 본 무차원 파라미터와 마찰열에 관한 영향도 다음 속보에서 고찰하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

무운활상태하에서 HIP법으로 제조된 질화규소와 지르코니아를 상온·상압에서 마찰·마멸실험을 수행하여 마찰·마멸특성을 규명하고, 그 마멸면에 대해 SEM을 이용한 미시적 관찰과 고찰을 통하여 세라믹마멸 모델을 설정하였다. 설정된 세라믹마멸 모델에 파괴역학을 도입하여 이론해석과 고찰을 통하여 세라믹의 마멸율을 평가할 수 있는 새로운 무차원 파라미터 Scf 를 제안했다. 또한 본 실험에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 저하중의 경우는 질화규소의 내마멸성이 지르코니아의 내마멸성보다 양호하지만, 고하중의 경우에는 지르코니아의 내마멸성이 질화규소의 내마멸성보다 양호하다.

(2) 세라믹의 마멸율을 평가하기 위한 새로운 무차원 파라미터 Scf 를 유도하였으며, 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 Q 는 접촉압력, a 는 세라믹 표면결함의 크기, K_{IC} 는 접촉부재료의 파괴인성치, μ 는 접촉면의 마찰계수를 각각 의미한다.

(3) 세라믹의 마멸율 W_s 는 무차원 파라미터 Scf 를 사용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

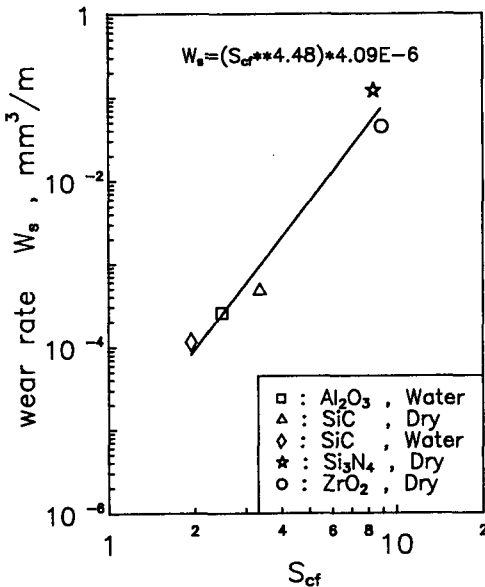


Fig. 21 Relationship between wear rate and Scf in ceramic materials

후 기

본 연구는 1991년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 이루어진 것으로서 재단 관계자에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Johnson, D. R., Schaffhanser, A. C., Tenney, V. T., Long, E. L. and Schulz, R. B., 1985, "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Project," The American Ceramic Society Bulletin, Vol. 64, No. 2, pp. 276~281.
- (2) Sundberg, D. V., 1974, "Ceramic Roller Bearings for High Speed and High Temperature Application," SAE Paper, 740241, pp. 1060~1066.
- (3) Dalal, H. M., Chiu, Y. P. and Rabinowicz, E., 1975, "Evaluation of Hot Pressed Silicon Nitride as a Rolling Bearing Material," ASLE Trans. Vol. 18, No. 3, pp. 211~221.
- (4) Parker, R. J. and Zaretsky, E. V., 1975, "Fatigue Life of High-Speed Ball Bearings with Silicon Nitride Balls," Trans. ASME, Series F, Vol. 97, No. 3, pp. 350~357.
- (5) Reddecliff, J. M. and Valori, R., 1976, "The Performance of a High-Speed Ball Thrust Bearing Using Silicon Nitride Balls," Trans. ASME, Series F, Vol. 98, No. 4, pp. 553~563.
- (6) Baumgartner, H. R., 1978, "Ceramic Bearings for Turbine Applications," Proceedings of the Fifth Army Materials Technology Conference, pp. 423~443.
- (7) Hamburg, G., Cowley, P. and Valori, R., 1981, "Operation of an All-Ceramic Mainshaft Roller Bearing in a J-402 Gas-Turbine Engine, Lubrication Engineering, Vol. 37, No. 7, pp. 407~415.
- (8) Miner, J. R., Grace, W. A. and Valori, R., 1981, "A Demonstration of High-Speed Gas Turbine Bearings Using Silicon Nitride Rolling Elements," Lubrication Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 462~464, 473~478.
- (9) Bhushan, B. and Sibley, L. B., 1982, "Silicon Nitride Rolling Bearings for Extreme Operating Conditions, ASLE Trans., Vol. 25, No. 4, pp. 417~428.
- (10) Kirchner, H. P., 1975, "Strengthening of Ceramics-Treatments, Tests and Design Applications, Marcel Dekker, Inc., pp. 215.
- (11) Schulz, R. B. and Johnson, D. R., 1987, "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Program," Advanced Materials Conference, Ed. by Morse, J. G., pp. 145~162.
- (12) Steijin, R. P., 1961, "On the Wear of Sapphire," J. of Applied Physics, Vol. 32, No. 10, pp. 1951~1958.
- (13) Eiss, N. S. and Fabiniak, R. C., 1966, "Chemical and Mechanical Mechanisms in Wear of Sapphire on Steel," J. of American Ceramic Society, Vol. 45, No. 4, pp. 221~226.
- (14) Miyoshi, K. and Buckley, D. H., 1979, "Friction Deformation and Fracture of Single-Crystal Silicon Carbide," ASLE Trans., Vol. 22, No. 1, pp. 79~90.
- (15) Adewoye, O. O. and Puge, T. F., 1981, "Friction Deformation and Fracture in Polycrystalline SiC and Si₃N₄," Wear, Vol. 70, pp. 37~51.
- (16) Aronov, V. and Mesyef, T., 1986, "Wear in Ceramic/Ceramic and Ceramic/Metal Reciprocating Sliding Contact Part 1," 1986, J. of Tribology, Vol. 108, pp. 16~21.
- (17) Aghan, R. L. and Mcpherson, R., 1973, "Mechanism of Material Removal During Abrasion of Rutile," J. of American Ceramic Society, Vol. 56, No. 1, pp. 46~47.
- (18) Evans, A. G. and Marshall, D. B., 1981, "Wear Mechanism in Ceramics," Fundamentals of Friction and Wear of Materials, pp. 439~452.
- (19) Iwasa, M., Toibana, Y. and Hayami, R., 1984, "Friction and Wear of Si₃N₄ Ceramics," J. of the Society of Material Science, Japan, Vol. 33, No. 374, pp. 1389~1394.
- (20) Iwasa, M., Toibana, Y., Yoshimura, S. and Kobayashi, E., 1985, "Wear of Si₃N₄ Ceramics Measure With Variow Testers," J. of Ceramic Industry Society, Japan, Vol. 93, No. 2, pp. 73~80.
- (21) Iwasa, M. and Toibana, Y., 1986, "Friction

- and Wear of Ceramics Measured by a Pin-on-Disk Tester," J. of Japan Ceramic Industry Society, Vol. 94, No. 3, pp. 336~343.
- (22) Iwasa, M., 1987, "Tribological Properties of Silicon Nitride Ceramics," J. of Japan Society of Lubrication Engineers, Vol. 31, No. 7, pp. 449~454.
- (23) Kim, S. S., Kato, K., Hokkirigawa, K. and Abe, H., 1986, "Wear Mechanism of Ceramic Materials in Dry Rolling Friction," Trans. ASME, J. of Tribology, Vol. 108, pp. 522~526.
- (24) 김석삼, 김재호, 1990, "세라믹의 마멸기구에 관한 파괴역학적 연구-마멸실험결과와 고찰," 대한기계학회논문집, 제14권, 제3호, pp. 636~645.
- (25) Swain, M. V., 1975, "Microscopic Observation of Abrasive Wear of Polycrystalline Alumina," Wear, Vol. 35, pp. 185~189.
- (26) Hisakado, T., 1986, "Wear Mechanism of Ceramics and Surface Topography," Trans. ASME, J. of Tribology, Vol. 108, pp. 9~15.
- (27) Buckley, D. H. and Miyoshi, K., 1985, "Tribological Properties of Structural Ceramics, NASA Tech. Memo. 87105.
- (28) Mehrotra, P. K., 1983, "Mechanisms of Wear in Ceramic Materials," Wear of Materials, pp. 194~201
- (29) Yust, C. S. and Carignan, F. T., 1985, "Observation on the Sliding Wear of Ceramics, ASLE Trans., Vol. 28, No. 2, pp. 245~252.
- (30) Kim, S. S., Kato, K. and Hokkirigawa, K., 1987, "Seizure and Wear in Alumina Ceramics," J. JSLE. Inter., vol. 8, pp. 123~128.
- (31) Gates, R., Hsu, S. and Klaus, E., 1988, "Ceramic Tribology: Methodology and Mechanisms of Alumina Wear," NIST Special Publication 758.
- (32) Scott, H. G., 1985, "Friction and Wear of Zirconia at Very Low Sliding Speeds," Wear of Materials, pp. 8~12.
- (33) Hannink, R. H. J., Murray, M. J. and Scott, H. J., 1984, "Friction and wear of Partially stabilized Zirconia: Basic Science and Practical Applications," Wear, Vol. 100, pp. 355~366.
- (34) Wallbridge, N., Roberts, E. W. and Dowson, D., 1983, "The Wear Characteristics of Sliding Pairs of High Density Polycrystalline Aluminum Oxide Under Both Dry and Wet Conditions," Wear of Materials, pp. 202~211.
- (35) Fischer, T. E. and Tomizawa, H., 1985, "Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride," Wear of Materials, pp. 22~32.
- (36) Tomizawa, H. and Fischer, T. E., 1987. "Friction and Wear of Silicon Nitride and Silicon Carbide in Water: Hydrodynamic Lubrication at Low Sliding Speed Obtained by Tribochemical Wear," ASLE Trans., Vol. 30, No. 1, pp. 41~46.
- (37) Sugita, T., Ueda, K. and Kanemura, Y., 1984, "Material Removal Mechanism of Silicon Nitride During Rubbing in Water, Wear, Vol. 97, pp. 1~8.
- (38) Sibley, L. B. and Allen, C. M., 1962, "Friction and Wear Behavior of Refractory Materials at High Sliding Velocities and Temperatures, Wear, Vol. 5, pp. 312~329.
- (39) Wedeven, L. D., Pullini, R. A. and Miller, N. C., 1987, "Tribological Examination of Unlubricated and Graphite Lubricated Silicon Nitride Under Traction Stress," Wear of Materials, pp. 333~347.
- (40) 김석삼, 1982, "합금공구강의 마모특성에 관한 연구," 경북대학교 공대연구지, 제11집, pp. 87~97.
- (41) Ueda, K., 1989, "Deformation and Fracture of Ceramics in contact Stress Field," J. JST, Vol. 34, No. 2, pp. 82~87.
- (42) Hisakado, T. and Saruya, N., 1991, "Wear Characteristics of Ceramics at High Sliding Speeds," J. JST, Vol. 37, No. 5, pp. 397~404.
- (43) 김재호, 김석삼, 박중환, 1990, "반무한 탄성체의 헤르쯔 접촉하의 경사진 표면균열의 전파거동," 대한기계학회논문집, 제14권, 제3호, pp. 624~635.
- (44) Fleming, J. R. and Suh, N. P., 1977, "The Relationship between Crack Propagation Rates and Wear Rates," Wear, Vol. 44, pp. 57~64.
- (45) Fleming, J. R. and Suh, N. P., 1977

- "Mechanics of Crack Propagation in Delamination Wear," *Wear*, Vol. 44, pp. 39~56.
- (46) Minnear, W. P. and Bradt, R. C., 1975, "(K-V) Diagrams for Ceramic Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 58, No. 7·8, pp. 345~346.
- (47) Sines, G., 1976, "Rationalized Crack Growth and Time-to-Failure of Brittle Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 59, No. 7·8, pp. 370~371.