

<論 文>

세라믹 ZrO₂, Si₃N₄ 및 SiC를 SiC, AISI 4340 및 청동으로 윤활 및 건조조건에서 미끄럼시험하였을 때의 마찰 및 마멸 거동

강 석 춘*
(1988년 9월 1일 접수)

Friction and Wear Characteristics During Sliding of ZrO₂, Si₃N₄ and SiC with SiC, AISI 4340 and Bronze under Dry and Lubricated Condition

Suk Choon Kang

Key Words : Transfer Film(전이피막), Debris(마멸입자), Tribological Properties(마찰특성), Transition(미량마멸에서 다량마멸로 이전현상)

Abstract

Friction and wear tests were conducted with several different ceramics sliding against ceramic and metal couples with and without lubricant in a two disk type sliding machine. The purpose was to know the tribological properties of ceramics. With very different physical and chemical properties of ceramics compared to metal, the tribological properties of ceramics should be defined in detail. Among them, the wear and friction with same or different couple is very important. Also the lubrication of ceramic is one of the major area to be studied. From this research, SiC, Si₃N₄ and ZrO₂ were slid against SiC, AISI 4340 and bronze under various sliding condition. It was found that the friction and wear of ceramics are strongly dependent on the sliding condition. For unlubricated sliding against SiC, ZrO₂ shows low wear and friction coefficient over wide range of load, but with lubricated sliding, SiC shows better performance whatever lubricants were used. Also the effect of lubricant depended upon the material properties of sliding pairs. The general tribological properties of ceramics were not correlated with their own material properties. Without lubricant, the ceramics were sliding with chattering and noise at low load but it could be reduced or avoided effectively by using lubricants. SiC and Si₃N₄ slid against SiC have transition from mild to severe wear at high load but ZrO₂-SiC and SiC-steel have not. Wear debris formed on the contact area of SiC couples was main cause of the initiation of transition. At high speed, only ZrO₂ sliding against SiC has transition of wear by low thermal conductivity.

1. 서 론

최근 첨단소재로 개발되고 있는 공업용(fine, new)

세라믹은 화학적인 불활성과 열적 안정성이 높고 강도가 매우 커서 마찰 재료로서의 응용에 관심이 집중되고 있다. 그동안 발표된 논문을 살펴보면 세라믹 결정의 크기 및 성질에 따른 마찰의 연구가 Buckley^(1,2)를 중심으로 행하여 졌고, 세라믹의 마찰에서 서로 종류가 다른 것을 마찰한 실험연구

*정회원, 공군사관학교 기계공학과

Table 1 Properties of ceramics at room temperature

	Density (g/cm ³)	Hardness- Knoop	Fracture- toughness MPa/√m	Thermal- conductivity W/m K
Si ₃ N ₄	3.2	1900	5.4	34
SiC	3.1	2800	4.6	126
ZrO ₂	6.3	1400	6.6	3.0

^(3~6), 세라믹과 금속과의 마찰특성에 관한 연구^(7~11), 물속에서의 세라믹 마찰^(12,13), 높은 온도에서의 세라믹 마찰^(14,15) 및 마찰특성을 고려한 세라믹 재료의 개발^(16~19) 등에 관한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 세라믹의 마찰과 마멸을 지배하는 기구(mechanism)에 관한 연구나 윤활제에 대한 적응성 및 그 효과에 관해서는 연구된 것이 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 공업용 세라믹(요업재료 등)으로 개발된 것 중에서 가장 마찰특성이 우수할 것으로 간주되고 있는 SiC, Si₃N₄와 ZrO₂의 건조 및 윤활마찰특성과 금속과의 마찰특성을 실험적으로 밝혀려 한다.

2. 실험장치와 재료

본 실험에 사용된 세라믹은 열간가압법(hot pressing)으로 제조된 SiC, Si₃N₄ 및 Partially Stabilized Zirconia(PSZ)이었다. 이들의 기계적 성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. 미끄럼 마찰 시험은 Fig. 1에 그 도식적 그림을 나타낸 바와 같

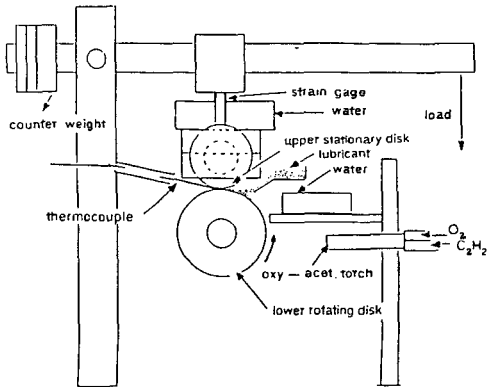


Fig. 1 Schematic diagram of the two disk type wear machine

은 two-disk형의 시험기를 이용하여 행하였다. 위의 고정시편은 직경이 31.5mm, 두께 5.1mm이었고, 아래의 회전 시편은 직경이 42.1mm, 길이가 100-200mm이었다. 윤활재료로는 고체인 graphite(흑연) 및 MoS₂, 액체인 광유 및 증류수 등을 사용하였는데, 이들이 증력에 의해 시편접촉부분 앞에서 연속적으로 주입되도록 하였다.

3. 실험방법

하중을 계단식 하중법(step loading method) 또는 일정하중법(constand loading method)를 이용하여 가해 주었다. 계단식 하중법에서는 초기하중을 2.6N으로 시작하여 28.6N까지 11단계로, 매 단계당 2.6N씩 추가하고 각 단계에서는 1분간 마찰하였다. 일정하중법을 택한 경우에는 5.2N, 10.4N, 15.6N, 20.8N과 26N에서 각각 15분씩 시험하였다.

모든 시험에서 미끄럼 속도는 주로 약 0.3m/sec로 하였으나, 속도의 영향을 관찰하기 위해서 이 속도를 0.5, 2, 3배로 변화시키기도 하였다. 마멸량은 시험후 고정시편의 표면에 생성된 마멸흔적(wear scar)의 길이를 현미경으로 0.01mm까지 측정 한 후 부록에 제시된 식을 사용하여 구하였다. 마찰계수는 회전시편에 의해 고정시편에 발생하는 저항력의 크기를 스트레인 게이지에 의해 기록 측정 한 후 이를 가해진 하중으로 나누어 구하였다.

4. 결과와 고찰

4.1 건조상태에서 SiC와 마찰할 때 각 세라믹의 마멸의 거동

Fig. 2는 계단식 하중법으로 시험하였을 때 하중 증가에 따른 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 전

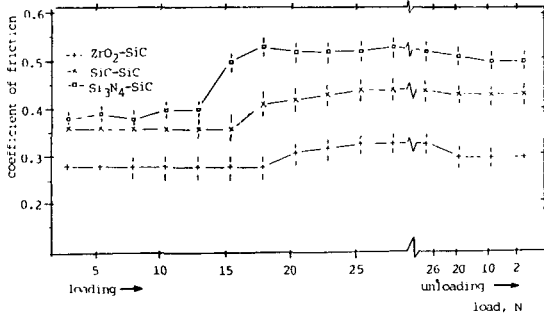


Fig. 2 Variation of the friction coefficient as a function of load for various ceramic couples, chattering :

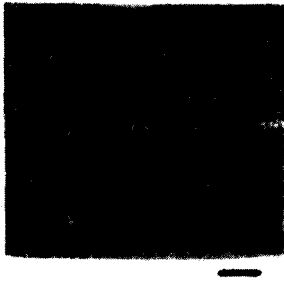


Fig. 3 The worn surface coated with a layer of wear debris and stylus scratch line for SiC-SiC couple slid for 15min. at 26N load, $\text{---}10\mu\text{m}$

하중 영역에서 ZrO_2 가 가장 작은 마찰계수를, Si_3N_4 가 가장 큰 마찰계수를 보였다. 또 Si_3N_4 는 가장 낮은 하중에서부터, SiC는 13N의 하중에서부터 진동현상(chattering)이 나타났다. 또 하중의 증가에 의해 SiC와 Si_3N_4 의 경우는 마찰계수가 증가되기 시작하며 동시에 아래 시편인 SiC 표면에는 Fig. 3과 같은 마멸피막이 형성되기 시작하였다. 그러나 ZrO_2 로 마찰하는 경우에는 마멸피막이 형성되지 않았고 마찰계수의 증가도 크지 않았다. 최대하중을 가한 후 마찰하중의 크기를 감소시켰을 때 ZrO_2 마찰에서는 원래의 낮은 마찰계수로 되돌아 오지만 SiC나 Si_3N_4 로 마찰한 경우는 하중이 낮아져도 계속 높은 마찰계수를 갖는다. 따라서 SiC와 Si_3N_4 가 SiC와 마찰한 경우 하중이 커지면 회전시편에 마멸피막이 형성되고 마찰계가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4는 일정 하중 방법으로 의해 SiC-SiC 커플(couple)과 ZrO_2 -SiC 커플의 경우 마찰계수의 시

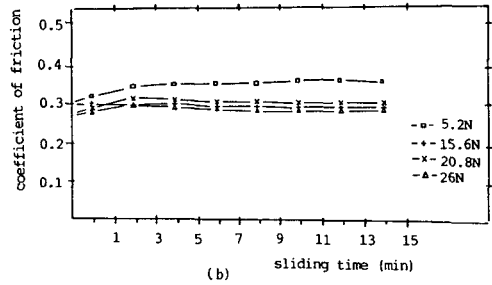
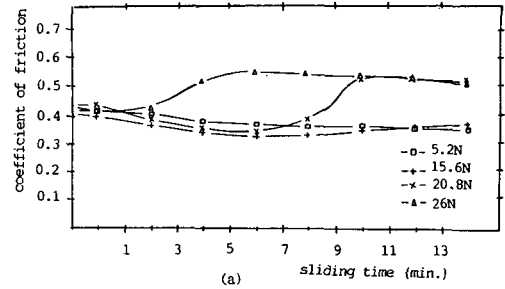


Fig. 4 Coefficient of friction with sliding time on various loads (a) SiC-SiC couple, (b) ZrO_2 -SiC couple

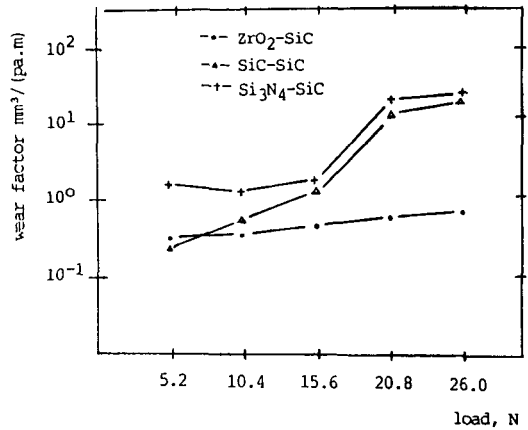


Fig. 5 Variation of wear factor with constant load

간에 따른 변화를 나타낸 것이다. SiC-SiC 커플의 경우는 20.8N 및 26N의 하중에서 어느 일정한 마찰시간 후 마찰계수가 갑자기 증가하였다. 그러나 ZrO_2 -SiC 커플에서는 하중의 크기에 관계없이 모든 하중에서, 마찰계수가 마찰시간에 따라 변하지 않고 거의 일정하였다.

Fig. 5는 일정하중 방법으로 시험한 경우 각 하중에 따른 마멸계수의 크기를 나타낸 것이다.

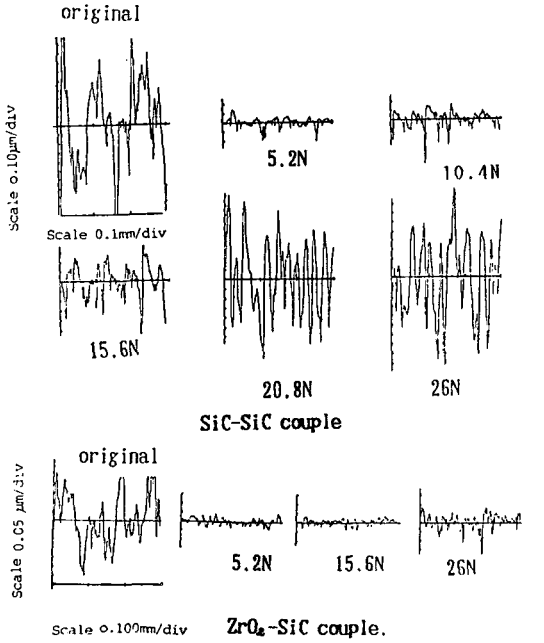


Fig. 6 Surface topography changes of the SiC and ZrO_2 slid for 15min. at various loads

SiC-SiC 커플이나 Si_3N_4 -SiC 커플은 20.8N에서 마멸계수가 크게 증가하였지만 ZrO_2 -SiC 커플은 하중 크기에 따라 선형적으로 약간 증가할 뿐이다.

따라서 세라믹의 건조마찰에서 마찰계수나 마멸은 마찰면에 형성되는 마멸입자의 피막형성에 의해 영향을 받고 있다. 즉 피막형성은 마멸량과 마찰계수를 증가시키지만 피막형성이 안 되는 경우에 비교적 영향을 덜 받음을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 일정 하중에서 마찰시험한 세라믹 마찰표면형상과 거칠기 크기를 나타내고 있다. SiC나 Si_3N_4 를 SiC와 마찰한 경우 하중이 낮

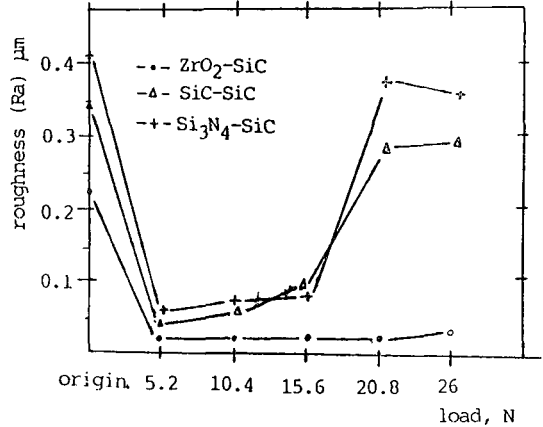


Fig. 7 Changes of surface roughness as a function of load for various ceramics slid against SiC

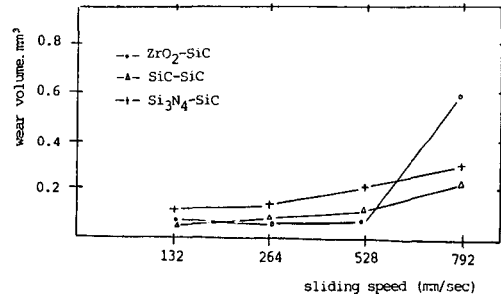


Fig. 8 Variation of the wear volume with sliding speed

을수록 매끄럽고 하중이 증가함에 따라 거칠어지다가 마찰계수가 크게 증가되고 마멸피막이 형성되는 20.8N에서는 매우 거칠은 형상과 조도를 갖는다. 그러나 ZrO_2 를 마찰한 경우는 하중의 크기에 무관하게 매끄러운 평면을 유지하였다. 따라서 세라믹 표면을 거칠게 하는 요소도 마멸피막의 영향으로

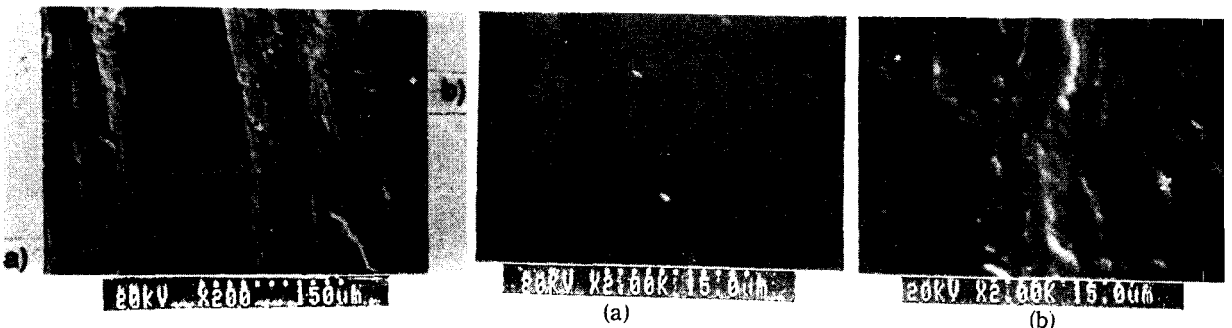


Fig. 9 SEM micrograph of wear scar on ZrO_2 slid against SiC at high speed (792mm/sec.), $\times=10\mu m$.

생각된다.

Table 1에서 제시된 세라믹의 기계적 성질은 SiC의 열전도 계수가 철(1.0% carbon, 상온 : 43 W/m.K)보다 3배 가량 크고 ZrO₂는 철의 1/10 정도이므로, 발생열과 열전도에 직접관련이 있는 속도의 영향을 살펴보았다.

세라믹의 마찰시험에서 마찰속도를 기준속도(262 mm/sec)와 기준속도의 1/2, 2, 3배로 하고 하중은 마멸피막의 영향을 받지않는 10.4N에서 15분간 마찰시험한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Si₃N₄와 SiC의 경우는 속도증가에 의해 마멸체적이 선형적으로 증가하였지만 ZrO₂는 최고속도인 792mm/sec에서 전의 속도보다 25배 이상 마멸되었다. Fig. 9는 ZrO₂의 최고속도에서 마찰면에 관한 현미경 사진이다. 거친면인 (b)부분은 높은 마찰속도에서 생성되는 발생열에 대해 재료의 열전도가 크지 않아 열축적에 의한 마멸저항이 감소되고 마멸을 증대시켜 준 것으로 생각된다.

4.2 건조마찰에서 세라믹과 철과의 마찰거동
회전시험을 AISI 4340철(경도 : Rb=86)로 만들고 SiC와 ZrO₂를 고정시험으로 하여 마찰시험을 하였다.

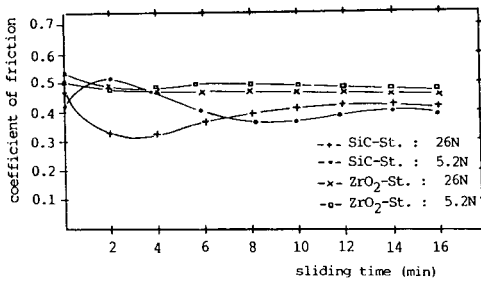


Fig. 10 Variation of the coefficient of friction with sliding time

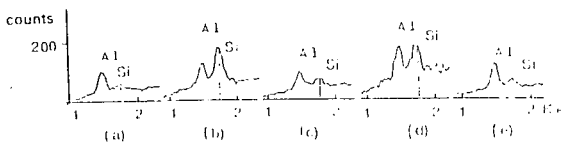


Fig. 11 EDS spectra of the steel surface slid against SiC for 15 minutes at various condition (a) original surface, (b) dry slid surface (thick oxide layer), (c) dry slid surface (thin oxide layer), (d) lubricated slid surface with graphite, (e) lubricated slid surface with mineral oil.

Fig. 10은 하중이 5.2N과 26N에서 기준속도로 마찰한 경우 마찰계수의 변화에 관한 것이다. ZrO₂는 하중에 관계없이 일정한 마찰계수를 가지나, SiC의 경우는 하중이 26N에서는 짧은 기간내에, 5.2N에서는 좀 늦게 마찰계수가 낮아지는 경향이 있다. 이 시험에서도 ZrO₂는 철의 마찰표면에 피막을 형성하지 않으나 SiC는 검은색의 피막을 형성한다. 이때 철의 피막에는 약간의 Si가 Fig. 11에서와 같이 EDS(energy dispersed spectrum)에 의해 검출되었으나 주로 철의 산화물로 형성되었다.

이 시험에 의하면 ZrO₂는 금속과의 마찰에서도 피막형성이 안 되고 SiC는 금속마찰면에 피막을 형성하지만 형성과정에는 마찰이 증가하나 형성한 후에는 오히려 마찰계수가 감소하여 세라믹의 마멸 피막과는 반대 기능을 갖고 있음을 알 수 있었다.

4.3 윤활제를 사용하였을 때 세라믹 마찰의 거동

마찰과정에서 마찰계수를 감소시키고 마멸을 억제하기 위해 윤활제를 사용하며, 세라믹 마찰에서 윤활하였을 경우 마찰거동을 조사하였다. SiC-SiC, Si₃N₄-SiC, ZrO₂-SiC 커플들을 고체윤활제인 흑연과 MoS₂와 액체윤활제인 순수광유 및 증류수로 윤활하고 10.4N에서 기준속도로 15분간 마찰시험한 결과가 Fig. 12와 Fig. 13에 주어져 있다. MoS₂는 세라믹의 종류에 관계없이 마찰계수의 크기가 같고 가장 낮으며 마멸체적도 가장 적었다. 증류수로 윤활하면 마찰계수는 건조마찰의 값과 비슷하나 마멸체적은 ZrO₂-SiC 커플을 제외하고 오히려 증가하였다. 광유는 마찰계수는 흑연보다 작지만 마멸은 오히려 더 많아 마멸억제기능에는 고체윤활제

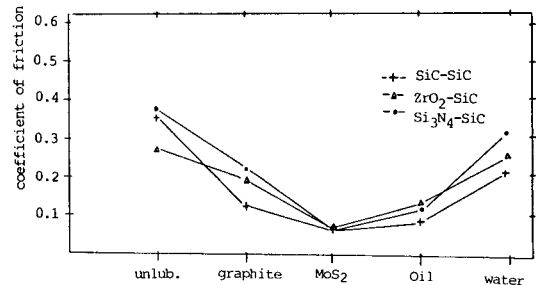


Fig. 12 Variation of the coefficient of friction with lubricants

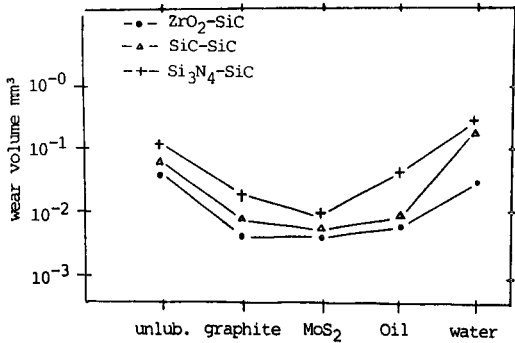


Fig. 13 Comparison of wear volume with lubricants

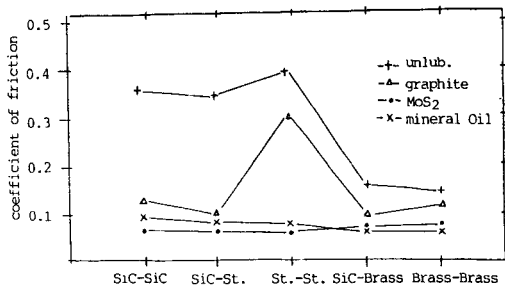


Fig. 14 Comparison of the coefficient of friction with lubricants

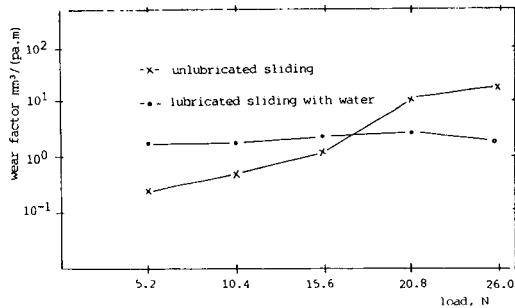


Fig. 15 Changes of the wear factor with loads of SiC-SiC couple

가 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 14는 금속과 SiC와의 마찰에서 윤활제를 사용한 경우 마찰계수의 상대적 비교를 나타낸 것이다. 철과 철의 마찰에서 윤활이 안 된 경우 마찰계수가 가장 크고 흑연은 거의 윤활기능을 하지 못하며 청동을 제외하고 MoS₂가 가장 효과적인 마찰 감소기능을 갖는다. 청동은 원래 낮은 마찰계수를 갖는 금속으로써 MoS₂ 피막이 부분적으로 형성되고 광유가 더 효과적이었다.

Fig. 15는 윤활을 안한 경우와 물로 윤활한 경우 SiC-SiC 커플에서 하중에 따른 마멸량의 비교를 나타낸 것이다. 낮은 하중에서는 물로써 윤활한 경우가 마멸량이 더 많지만 20.8N의 하중 이상에서는 윤활을 안한 경우가 더 많이 마멸되었다. 따라서 물이 윤활제로 사용되면 하중에 영향을 덜 받고 높은 하중에서는 오히려 마멸이 감소하는 경향이 있어 마멸억제기능을 갖고 있음을 보여주었다.

5. 결 론

세라믹의 건조 및 윤활마찰시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SiC와 Si₃N₄는 건조마찰에서 하중이 클 경우, 마찰표면에 형성되는 마멸피막이 마찰과 마멸을 증대시킨다. 그러나 낮은 하중에서 혹은 ZrO₂를 고정시편으로 할 경우는 피막형성이 되지 않으며 마찰계수와 마멸이 비교적 작다. 따라서 피막형성 여부가 건조마찰기구를 지배한다.

(2) ZrO₂는 마찰속도가 커질 때 마멸이 크게 증가하는데 이것은 낮은 열전도 계수의 영향으로 보인다.

(3) 철과 건조마찰할 때 SiC는 철의 마찰표면에 피막을 형성하면서 마찰계수를 감소시키고, ZrO₂는 피막형성이 되지 않으며, 마찰계수가 SiC보다 크다. 따라서 금속피막은 세라믹 피막과 달리 세라믹과 금속과의 마찰에서 마찰계수를 감소시키는 특징을 가진다.

(4) 세라믹 재료의 윤활마찰에서 MoS₂가 가장 효과적으로 마찰계수를 감소시키고 마멸을 억제하지만, 청동과 마찰할 경우에는 광유가 더 효과적이다.

참 고 문 헌

- (1) Buckley, D.H., and Miyoshi, K., 1985, "Fundamental Tribological Properties of Ceramics", Ceramic Eng. Sci. Proc. Vol. 6, pp. 919~930.
- (2) Miyoshi, K., and Buckley, D.H., 1979, "Friction and Wear Behavior of Single-Crystal Silicon Carbide in Sliding Contact with Various Metals", ASLE Trans., Vol. 22, 3, pp. 245~256.
- (3) Mehrotra, P.K., 1983, "Mechanisms of Wear in Ceramic Materials", Wear of Materials 83, pp. 194~201.

- (4) Mehan, R.L., Hejna, C.I., and McConnell, M.D., 1985, "Dry Sliding Wear of Hard Materials against a Diamond Composite", *J. of Material Sci.*, 20, pp. 1222~1236.
- (5) Breznak, J., Breval, E., and Macmillan, N.H., 1985, "Sliding Friction and Wear of Structural Ceramics", *J. of Material Sci.*, 20, pp. 4657~4680.
- (6) Breznak, J., Breval, E., and Macmillan, N.H., 1986, "Analysis of Room-temperature Wear Debris", *J. of Material Sci.*, 21, pp. 931~936.
- (7) Scott, H.G., 1985, "Friction and Wear of ZrO_2 at Very Low Sliding Speeds", *Wear of Materials*, 85, pp. 8~12.
- (8) Wallbridge, H., Dewson, D., and Roberts, E.W., 1983, "The Wear Characteristics of Sliding Pairs of High Density Polycrystalline Aluminum Oxide under Both Dry and Wet Conditions", *Wear of Materials*, 83, pp. 202~211.
- (9) Aronov, V., and Mesyef, T., 1986, "Wear in Ceramic/Ceramic and Ceramic/Metal Reciprocating Sliding Contact", *Trans. of the ASME*, Vol. 108, pp. 16~21.
- (10) Hisakado, T., 1986, "Wear Mechanism of Ceramics and Surface Topography", *J. of Tribology*, Vol. 108, pp. 9~15.
- (11) Adewoye, O.O., and page, T.F., 1981, "Frictional Deformation and Fracture in Polycrystalline SiC and Si_3N_4 ", *Wear*, 70, pp. 37~51.
- (12) Sugita, T., Ueda, K., and Kanemura, Y., 1984, "Material Removal mechanism of Silicon Nitride During Rubbing in Water", *Wear*, 97, pp. 1~8.
- (13) Fisher, T.E., and Tomizawa, H., 1985, "Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride", *Wear of Material*, 85, pp. 22~32.
- (14) Sutor, P., 1984, "Tribology of Silicon Nitride and Silicon Nitride Sliding Pairs", *Ceramic Eng. & Sci. Proc.*, 5, pp. 461~470.
- (15) Semenov, A.P., and Katsura, A.A., 1979, "Investigation of Friction and Wear of Corundum Ceramics at Temperatures to 1500°C", *Wear of Materials*, 79, pp. 551~555.
- (16) Sargent, P.M., and Page, T.F., 1978, "The Influence of Microstructure on the Microhardness of Ceramic Materials", *Proc. British Ceramic Soc.*, Vol. 26, pp. 193~208.
- (17) Rice, R.W., 1985, "Micromechanics of Microstructural Aspects of Ceramic Wear", *Ceramic Eng. and Sci. Proc.* 6, pp. 940~958.
- (18) Wu, C.C., Rice, R.W., Johnson, D., and Platt, B.A., 1985, "Grain Size Dependence of Wear in Ceramics", *Ceramic Eng. & Sci. Proc.*, 6, pp. 995~1001.
- (19) Ajayi, O.O., and Ludema, K.C., 1987, "Surface Damage of Structural Ceramics: Implications for Wear Modeling", *Wear of Materials*, 87, pp. 349~360.

부 록

●원판의 마멸체적은 다음의 공식을 이용하여 구하였다.

$$V = L \times \{ \pi \times (R_1^2 Q_1 + R_2^2 Q_2) / 180 - a(R_1 \cos \theta_1 + R_2 \cos \theta_2) / 2 \}$$

여기서

V : 마멸체적 (고정시편)

a : 마멸 현 (wear scar) 의 길이 (고정시편)

R_1 : 회전시편의 반경

R_2 : 고정시편의 반경

L : 고정시편의 두께

Q_1 : $\sin^{-1}(a/(2R_1))$,

Q_2 : $\sin^{-1}(a/(2R_2))$

●마멸계수(K)는 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$K = \frac{V}{SX}$$

여기서

K : 마멸계수 ($mm^3/(Pa)m$)

S : 평균접촉응력 (P/aL)

X : 마찰거리 (m)

P : 하중 (N)