

# 내마모 부품 응용을 위한 요업재료의 마모 마찰 특성

임 대 순

고려대학교 재료공학과

## 1. 서 론

Tribology는 미끄럼 혹은 구름베어링, 피스톤 링, 기어, 공구, 그밖의 상대적 움직임하에 있는 부품의 설계 및 제조와 관련된 학문이다. 또한 tribology는 서로 접촉하는 재료의 적절한 사용, 윤활유와의 상호작용 이해 및 적절한 선택을 통해 마모와 마찰의 감소 혹은 최적의 마찰(브레이크, 벨트 등의 경우)을 위해 연구되는 분야이다. 부품의 내마모성을 향상시키고 적절한 마찰계수를 얻기 위해서는 기계 설계, 윤활유 선택 및 개발, 재료의 선택 및 개발 등 여러 분야의 기여가 필요하다. 지금까지는 전통적으로 사용되어 오던 재료, 특히 금속재료를 중심으로 하여 기계 및 윤활제 개발 등에 치중하여 왔다. 그러나 산업이 발전되고 복잡화함에 따라 극한 분위기 즉 고온, 고진공하에서의 장시간 사용과 고효율 등을 요구하여 최근의 tribology 분야에 사용되는 부품들의 신소재로의 대체를 요구하고 있다. 한 예로 지금의 엔진보다 더 고온에서 작동되는 고효율의 경량의 첨단 열엔진의 개발을 들 수 있다. 이러한 열 엔진의 사용 목적을 달성하기 위해서는 기존의 금속재료로는 고온에서 작동되기에는 너무 약하고 무겁기 때문에 구조용 세라믹스가 고려되고 있는 것이다[1]. 신소재 분야중 세라믹스는 고기능성 부품과 이미 산업화된 분야의 부품의 대체 재료로 주목을 받고 있다.

세라믹스는 이미 국내에서도 공구, 메카니칼 쉘, 노즐, 베어링 등에 사용되고 있다. 세라믹스는 고유의 상온 및 고온에서의 고 경도, 강도 그리고 우수한 내마모성, 내식성, 내열성 등으로 기존에 사용되던 재료에 비해 많은 혜택이 예상되고 이들의 응용이 확대될 전망이다. 그러나

지금까지의 연구결과에 의하면 경도 등에서 보여주는 것과 같은 우수한 성질이 내마모성 등에서 나타나고 있지 않으며 이들에 대한 연구가 타 재료에 비해 상대적으로 많이 되어 있지 않아 마모 기구 등에 대한 이해가 부족하여 내마모성 부품에의 상용화가 예상보다 느리게 진행되고 있다. 세라믹스의 마모 마찰 특성은 다른 재료와 마찬가지로 재료의 미세구조, 표면상태, 온도, 응력분포, 분위기 등의 상관관계에 따라 영향을 받는다. 그러므로 본란에서는 상기한 변수에 따른 마모 마찰 특성을 구조용 세라믹스를 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 마모 마찰 특성

### 2-1. 세라믹스와 타 재료

마모 및 마찰거동은 상대적으로 움직이는 두 재료의 내부 성질과 표면특성에 의해 결정된다. 세라믹스는 금속 및 고분자 재료 등과 원자 결합형태부터 다르기 때문에 강도와 같은 기계적 거동에 있어 다른 형태를 보이며 마모 마찰 거동 역시 다르게 나타난다. 재료는 사용 목적에 따라 선택되어 질 수 있기 때문에 실험조건 등이 상이하고 조건에 따른 재료별 마모 마찰의 반응이 달라 세라믹스와 타재료의 구체적인 마모 마찰 거동을 한 눈에 비교하기는 힘들다.

Fig. 1은 세라믹스 조합 및 타재료간의 일반적인 마모 마찰 경향을 도식적으로 나타낸다. 일반적인 고분자/고분자간의 마모 마찰 특성은 큰 변화의 폭을 보여주며 비교적 큰 값을 보여주나, 내마모성 재료를 겨냥한 첨가제와 섬유 등을 첨가한 복합재와 금속재료간의 조합을 통해 성질을 개선시킬 수 있음을 보인다. 금속재료간의 마모 마찰은 비슷한 상대재에 있어 문

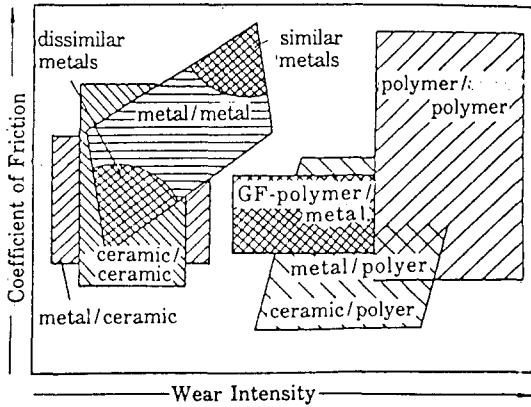


Fig 1. Schematic representation of the relationship between the coefficient of friction and wear resistance of pairs of different materials (2)

Table 1. Mechanical Data from Literature

	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Toughness, MPa·m <sup>1/2</sup>	1.4-6	2-6
Hardness, GPa	13-17	11-22
Elastic Modulus, GPa	290-333	340-410
Density	3.1-3.4	3.8-3.9
Wear coefficient (K=H·V/F·S)		
Ambient	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-3</sup>
Humid air	10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-6</sup>
Lubricated		10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-2</sup>

제가 됨을 보인다. 이는 접촉하는 두 상대재간의 국부적인 접착력이 주요 원인인데, 이 결합력의 구동력은 금속재료가 세라믹스 재료에 비해 움직이는 전자를 많이 포함하고 비교적 원자가 단순 충전되어 있고 비방향성을 띄게 되기 때문이다. 그래서 세라믹스 재료의 마모는 온도가 비교적 낮은 경우에는 접착력에 근거한 adhesive 경향이 많이 나타나게 되는 것이다. 그밖의 세라믹스의 금속재료 및 고분자 재료 등에 비해 직접적인 내마모성에서 우수한 잠재성을 띄고 있는 것은 고경도, 비교적 높은 온도까지의 고강도를 나타낸다는 것이다.

2-2. 미세구조와 마모특성

세라믹스는 고유한 결합 등에 의해 타재료와

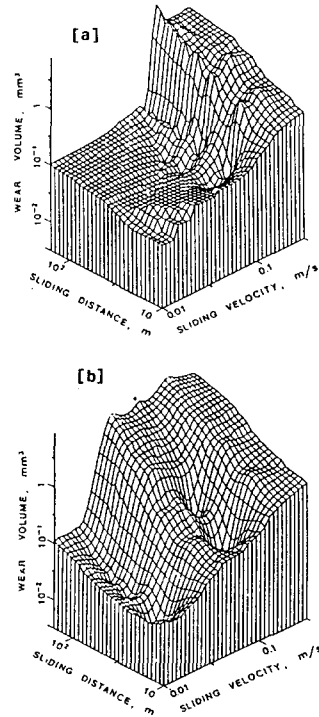


Fig. 2. Wear diagram for two kinds of silicon nitride (5)

다른 성질을 보여 주듯이 같은 종류의 재료에서도 Table 1에서 보여주는대로 수 order의 다른 기계적 성질 및 마모 성질을 나타낸다[3]. 이는 공정방법, 초기 분말의 순도 및 크기, 첨가제 등에 따라 다른 미세구조의 차이 즉 입자 크기, 기공도, 기타 미세결합 등의 차이를 가지게 되어 외부 응력에 대해 서로 다른 반응을 하게 된 결과로 생각할 수 있다.

Rico[4]는 일반적으로 결정입자의 크기가 경도에 미치는 영향의 소위 Hall-Petch 관계가 마모에서도 나타남을 보였다. 이는 결정입 크기가 커짐에 따라 탄성 및 열적 팽창에 의한 mismatch가 커져 마모량이 커지기 때문인 것으로 설명하였다.

Pressureless sintering법에 의해 제조된 질화규소(silicon nitride)의 전형적인 입자의 형태는 불순물의 양에 의해 변화될 수 있는데 질화규소 분말에 소량의 Fe을 함유여부에 따라 입자의 크기와 모양의 큰 차이를 보이고 있다. Fig.

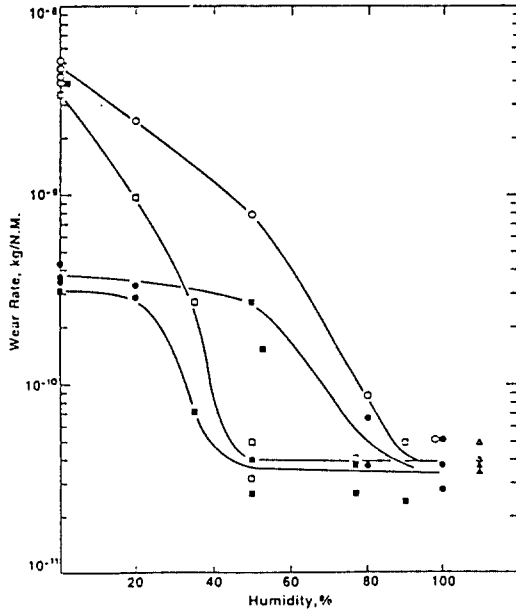


Fig. 3. Wear constant of hot pressed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sliding on hot pressed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (unlubricated) in air and argon as a function of relative humidity and in water (6)

2에서 볼 수 있는 것과 같이 이 두 재료로 만든 pin과 disk를 이용한 동종 조합의 마모 시험 결과는 mild wear에서 severe wear로 변화되는 소위 임계 전이속도만 비교해도 약 1.0에서 0.20 m/sec로 5배 가량이 감소되었음을 보여준다. 즉 0.3% 정도의 소량의 Fe 첨가로 소결성이 향상되어 미세구조의 변화를 가져 왔으며 이로 인해 내마모 특성이 나빠졌음을 알 수 있다. 이는 Fe가 질화규소 내의 glassy phase의 viscosity에의 영향과, 앞에서 설명한 결정립 효과가 나타난 것으로 볼 수 있다. 이밖에도 상변태, 2차상의 분포, cracking을 일으키는 인자들에 따라 마모 및 마찰 특성은 영향을 받는 것으로 알려졌다.

### 2-3. 윤활 및 tribochemical 효과

세라믹스의 마모 특성에 영향을 미치는 인자는 앞에서 설명한 미세구조의 영향 외에도 외부의 화학적 분위기의 영향도 중요하다. 예를 들어 Fig. 3은 상대습도를 0에서 100% 증가시키며 따라 silicon nitride간의 마모율은 두 or-

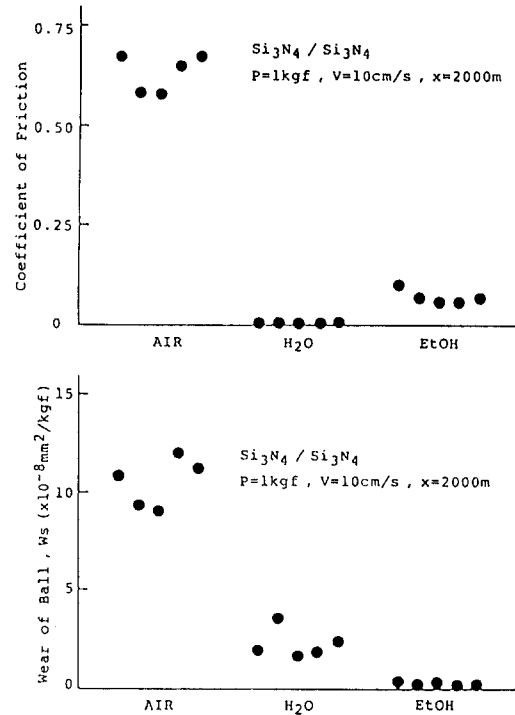


Fig. 4. Friction and wear of silicon nitride ceramics (7)

der까지 감소함을 보인다[6]. Kinoshita 등도 Fig. 4 및 5에서 보여주는 바와 같이 silicon nitride 끼리의 미끄럼에서는 물과 ethanol이 공기 분위기 보다 마찰계수와 마모율을 현저히 줄인다. 반면에 alumina간의 시험결과는, 마찰계수는 조금 낮출 수 있는 반면에 마모는 오히려 공기 중에서의 것보다 증가함을 보인다[7]. Fischer 및 Gates 등도 zirconia 및 alumina 등에서 비슷한 결과가 나타남을 보고하였다[8, 9]. 이와 같은 차이는 재료 표면에서의 산화층의 여부로 설명하였다. 즉, 비산화물인 silicon nitride의 경우에는 마찰열에 의해 부드러운 비정질 hydrated  $\text{SiO}_2$ 가 직접적인 원인이라고 본다. Ishigaki 등은 물의 흡착이 소성변형에 영향을 미쳐 이러한 차이를 보인다고 주장하였다[10]. Silicon nitride에 비해 silicon carbide는 이러한 습기에 무관한 성질을 보이는데 이는 계면에 탄소층이 생성될 수 있다는 제안과 관련이 있을 수 있으나 이에 대한 설명이 명확치 않다[11].

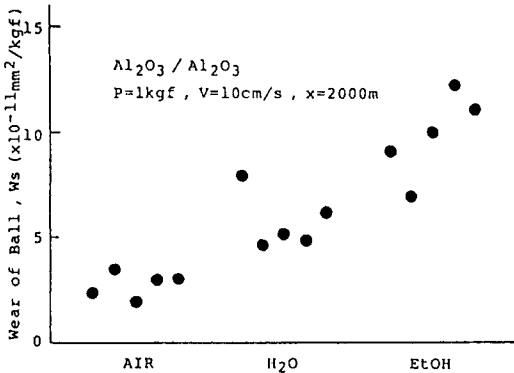
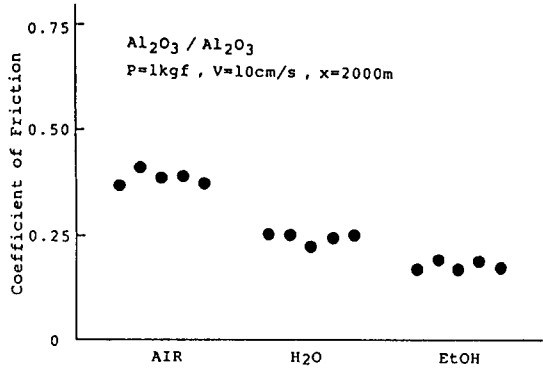


Fig. 5. Friction and wear of alumina ceramics (7)

이와 같이 화학적 분위기 및 윤활유 등에 의해 화학적 반응 및 직·간접 응력 변화에 의한 균열, 입계 및 기공 등에 우선 반응하여 마모 및 마찰에 영향을 주는 것을 tribochemical 효과라 하는데 세라믹스 마모의 주요 메카니즘으로 고려되어야 한다.

세라믹스의 우수한 특성에도 불구하고 비 윤활상태에서의 마찰계수는 비교적 높아 실제적 응용에 문제가 있다. 세라믹스의 효과적인 윤활체는 아직 개발되지 않은 상태이나 몇 가지의 모델 용액 및 고체 윤활에 대한 연구는 계속되고 있다. Fig. 6은 엔진 응용을 위한 엔진 oil하 주철 및 각종 세라믹스에 대한 접촉응력의 증가에 따른 마찰계수를 나타낸다[12]. 주철에 비해 높은 load bearing capacity를 보여주며 silicon nitride 및 silicon carbide의 경우 oil은 boundary lubricant의 역할을 함을 알 수 있다.

Fig. 7은 alumina의 경우 하중과 미끄럼 거리에 따른 마모율을 나타낸 것으로 비윤활상태에

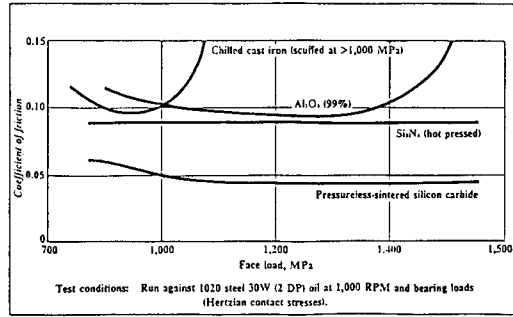


Fig. 6. The coefficient of friction between 1020 steel and various materials (12)

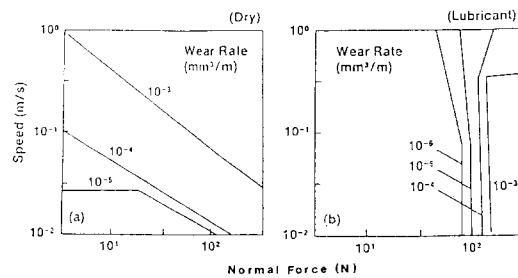


Fig. 7. Contour map of (a) the unlubricated and (b) the lubricated wear of alumina

서는 두 변수의 의존성을 보여주나 윤활상태에서는 mild wear를 나타내는 가용영역(usable region)이 넓어지며 하중에만 의존하는 경향을 보여준다. Fig. 8의 하중과 미끄럼속도에 따른 마모율의 3차원적인 데이터는 paraffin oil 하에서 alumina와 silicon nitride의 마모거동을 한 눈에 볼 수 있도록 나타났다. 이 결과는 silicon nitride의 경우 저하중 고속에서는 마모율이 떨어지는 소위 hydrodynamic 윤활 효과를 보이며 alumina의 경우와 같은 속도 증가에 따른 급격한 천이를 보이지 않는다. 그러나 이러한 지금까지의 paraffin oil 등의 세라믹스에 대한 윤활 효과에 대한 명확한 기구가 설명되어 있지 않다.

#### 2-4. 고온 특성

구조용 세라믹스의 가장 큰 장점 중의 하나는 1500°C 이상까지의 고온에서 견딜 수 있다는 것이다. 이러한 이유에서 구조용 세라믹스는 열

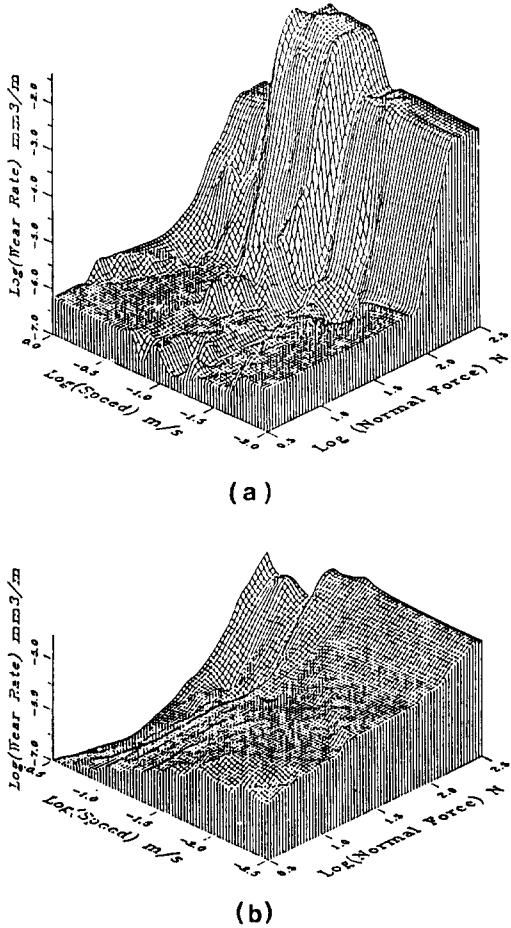


Fig. 8. (a) Alumina wear map and silicone nitride (b) wear map under paraffin oil lubrication

엔진과 같은 고온에서 작동되는 동체의 부품의 이상적 재료로 많은 주목을 받고 있다. 이들의 응용을 위해서는 고온에서의 마찰 마모 특성의 이해가 필수적이다. 지금까지의 실험결과는 금속재료 등에 비해 세라믹스의 잠재성을 보여주나 만족할만한 결과를 보여주지 못하고 있다.

Tomizawa[13] 등은 hot pressed silicon nitride끼리의 마찰계수를 800°C까지의 온도에서 측정한 결과 dry argon과 air에서는 0.8을 유지하였으며 습기를 포함한 공기 중에서는 650°C까지는 0.2를 유지하다 그 이상의 온도에서는 다시 증가되는 것을 보고하였다. Gray[14]는 partially stabilized zirconia(PSZ)/PSZ와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/

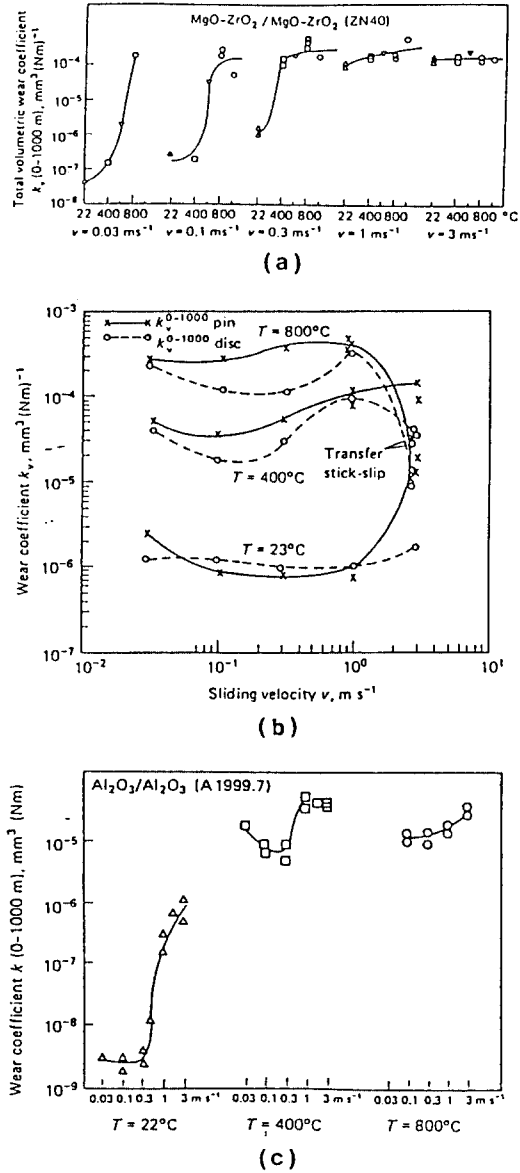


Fig. 9. Coefficient of friction as function of sliding velocity at different temperature for (a) MgO-ZrO<sub>2</sub>, (b) reaction bonded SiC and (c) alumina couples (15)

SiC의 마찰계수가 상온에서 650°C 증가함에 따라 약 0.2에서 0.8 내외로 약 0.35에서 0.75로 각각 증가함을 보였다. Fig. 9는 MgO-ZrO<sub>2</sub>, reaction bonded SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>끼리의 온도에 따른 미끄럼 마모 실험의 결과를 나타낸 것이다[15]. 각 재료 공히 온도가 증가함에 따라 마모율이

현저하게 증가하여 상온에서 800°C 까지 증가시키면 마모계수는 약 1000배 이상 증가됨을 보여준다. 그 밖의 다른 실험결과도 비슷한 경향을 보이는데 이러한 고온에서의 높은 마찰 마모계수는 세라믹 엔진 등의 작동에서는 허용할 수 없는 높은 값으로 새로운 고온 윤활제의 개발을 요구한다. 이러한 시도로 고온 액체 윤활, 분말 윤활, 가스막 윤활, 이온주입 방법 등이 제안되었다[14, 16, 17].

### 2-5. 요업재료의 마모기구

내마모성 재료의 개발을 위해서는 마모기구의 이해가 우선이다. 이러한 마모기구의 변화는 사용된 재료의 미세구조 및 표면상태, 작동인자 등에 따라 변하게 된다. 본란에서는 일반적인 요업재료의 마모기구를 소개하고자 한다. 지금까지의 연구결과 소성변형(plastic deformation), 취성과파괴(brittle fracture) 및 화학적 상호작용(chemical interaction 혹은 tribochemical effect) 등에 의한 마모가 주된 마모기구로 작용하고 있음을 보여준다. Rice는 이러한 인자들과 재료의 미세구조 즉 기공(pore), 입자(grain) 및 crack들이 상호작용을 일으키고 이들에 따라 마모가 결정될 것이라고 제안하였다[4]. 요업재료에서도 소성변형이 일어날 수 있는가에 대해서는 논란이 있었으나, 상온에서도 마모에 의해 국부적인 소성변형이 일어날 수 있음이 silicon nitride, alumina 시편의 x-ray diffraction 및 전자투과 현미경 관찰로 보여졌다[18, 19]. 취성과파괴에 의한 마모는 Evans 등이 제안한 lateral crack 모델과 같이 균열(cracking)에 의해 재료가 떨어져 나가는 것을 말한다[20]. 즉 asperity의 하중과 마찰력에 의해 crack이 생성되고 이것이 마모입자 생성에 기여한다는 것이다. Zirconia, magnesium oxide 등을 사용한 실험을 통해 마모의 양과 재료의 인성 및 경도와 상관관계를 보인다는 모델이 타당성이 있음을 보였다. 다음의 화학적 상호작용을 동반하는 마모는 앞에서 설명한 분위기나 윤활유 등이 마모면에 영향을 끼쳐 마찰력 변화와 균열 및 입계 등과의 반응으로 마모에 영향을 끼치는 것이다. 이러한 예는 앞절에서 설명하였다.

이와 같은 마모기구는 독립적으로 일어나기 보다는 상호작용을 일으켜 복합적으로 일어난다. 또한 재료의 종류 및 상태와 마모 속도, 하중, 분위기 등에 따라 지배하는 마모기구가 변하게 되며, 이에 따라 마모율도 변하게 된다. 아직까지는 요업재료의 마모기구에 대한 이해는 완전치 못하나 재료의 사용이 증대됨에 따라 나아질 것이다.

## 3. 결 론

이상에서 세라믹스의 tribology 특성을 이해하고자 미세구조, 재료변화, 윤활 및 온도에 따른 마모 마찰의 영향을 몇 가지 예를 통해 알아보았다. 세라믹스는 상온 및 고온에서의 고경도 및 강도, 화학적 안정성, 내열성 등의 우수한 특성을 갖고 있고 내마모 특성 등도 타재료에 비해 우수하여 세라믹스 공구 등에 이미 응용되고 있으나, 인성이 떨어지고 고온에서의 비윤활시 마모 마찰 특성은 기대치에 미치지 않고 신뢰성이 떨어지는 등의 문제를 갖고 있어 세라믹 엔진과 같이 잠재적인 분야에의 응용이 늦어지고 있다. 그러나 타 재료에 비해 우수한 특성을 보이며 미세구조 등의 제어 등으로 재료의 특성이 향상될 여지가 있으므로 이 분야의 집중적인 연구로 이러한 문제는 해결되고 응용이 확대될 것이다. 세라믹스의 기계적 성질을 개선하고 세라믹스와 화학적 분위기, 윤활제와의 상호작용을 이해하여 효과적인 윤활 및 매체를 개발하고, 특히 고온 윤활제를 개발하는 것이 고온에서의 동체 부품 응용을 위해 중요하다. 이를 위해서 미국, 일본 및 유럽 여러 나라에서는 국가적으로 연구를 수행하고 있으나 국내에서는 이에 대한 노력이 부족하다. 이 분야의 기술수준 격차를 줄이기 위한 국가적인 지원과 이 분야 관련자의 관심과 연구노력이 있어야 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. D.E. Dechman, S.M. Hsu and E.E. Klaus, NIST SP 754, Vapor Phase Deposition Studies of Phos-

- phate Esters on Metal and ceramic surfaces, 2 (1988).
2. K. Zum, Gahr, Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, p. 460, N.Y., (1987).
  3. S.M. Hsu, D.S. Lim, Y.S. Wang and R.G. Munro, J. of the Soc. of Trib. and Lubr. Eng. 47(1), 49-54 (1991).
  4. R.W. Rice, Ceramic Eng. and Sci., Proceed, 6(7-8), 940-958 (1985).
  5. D.S. Lim, S.K. Pack and H. Moon, Wear Testing of Advanced Materials, STP1167, 151-160 (1992).
  6. T.E. Fischer and H. Tomizawa, Wear, 105, 29-45 (1985).
  7. M. Kinoshita and M. Iwasa, 신요업기술 seminar, 요업기술원, 17-23 (1992).
  8. T.E. Fischer, Scripta Met., 24, 833-838 (1990).
  9. R.S. Gates, S.M. Hsu and E.E. Klaus, Tribology Trans, 32, p. 357 (1989).
  10. H. Ishigaki, I. Kawaguchi, M. Iwasa and Y. Toibana, Wear of Materials, 13-21 (1985).
  11. J.L. Lauer and S.R. Dwyer, Tribology Trans, 34(4), 521-528 (1991).
  12. Guide to Engineered Materials, Advanced Materials and Processes, p. 87 (1990).
  13. H. Tomizawa and T.E. Fischer, ASLE Trans, 30(1), 41-46 (1987).
  14. S. Gary, Ceramic Eng. Sci. Proceed, 6(7-8), 965-974 (1985).
  15. M. Woydt and K.-H. Habig, Tribology International, 22(2), 75-88 (1989).
  16. J.M. Perez, C.S. Ku and S.M. Hsu, SAE Tech. Series 910454, 1-9 (1991).
  17. J. Lankford, W. Wei, J. of Mater. Sci., 22, 2069-2078 (1987).
  18. O.O. Adewoye and T.F. Page, Wear, 70, 37-51q (1981).
  19. S.J. Cho, B.J. Hockey, B.R. Lawn and S.J. Bonninsson, J.Am. Cer. Soc., 72(7), 1249-52 (1989).
  20. A.G. Evans; the Science of Ceramic Machining and Surface Finishing, B.J. Hocky and R.W. Rice Ed. NBS SP, 562 (1979).

## 해 외 소 식 ●

### **Vth Internation Symposium INTERTRIBO '93**

Bratislava, Slovakia August 26-29, 1993

### **16th International Congress on Tribology**

Friction-Wear-Lubrication-Design

Theory and Practice of Tribology, August 30-September 2, 1993, Budapest, Hungary

### **Micro-Tribology '93**

7-8 September, 1993, Warsaw, Poland

### **DISSIPATIVE PROCESSES IN TRIBOLOGY**

XXth Leeds-Symposium on Tribology

7-10 September, 1993, France

### **The University of Leeds Three Day Course on Engine Tribology**

21-23 September, 1993

### **The First Balkan Conference on Tribology: BALKANTRIB '93**

1-3 October, 1993, Sofia, Bulgaria

### **21 Years of Materials Engineering**

6-8 October, 1993, Univ. of Cape Town, South Africa

### **SYMPOSIUM '93: Porec, Croatia: 27-29 October, 1993**

(Tribology, Lubricants and Lubrication)