

순도를 달리한 알루미나 세라믹스의 분위기 압력변화에 따른 Tribology 특성

박흥식* · 서영백*** · 진동규** · 옥철호***

(1999년 5월 7일 접수)

Tribological Characteristics on the Atmospheric Pressure of Alumina Ceramics with Different Purity

Heung Sik Park, Young Baek Seo, Dong Kyu Jin and Chul Ho Ok

Key Words: Alumina Ceramics(알루미나 세라믹스), Tribological Characteristics(트라이볼로지 특성), Atmospheric Pressure(분위기압력), Protective Layer(보호층), Heat Accumulation(열축적)

Abstract

This study was undertaken to investigate tribological characteristics with atmospheric pressure for three alumina ceramics of different purity, such as, 85 %, 95 % and 99.7 %. The wear test was carried out using the wear test device which was designed for this study in air, 10^2 Torr and 10^{-4} Torr. The friction coefficient depends entirely on atmospheric pressure and alumina with lower purity than higher purity has been much affected by heat accumulation. The friction surface of ceramics have been protected in the air by the influence of the oxides transferred from STB2. However, the protective layer can not be formed due to the decrease of oxygen in vacuum.

1. 서론

기계문명의 발달에 따라 새로운 기능을 가진 강인한 재료와 사용기계의 고하중화, 고속화에 부응하기 위한 경량화가 최근 절실히 요구되고 있다. 이와 함께 기계의 정밀도는 향상되고 사용환경의 가혹화에 수반하여 새로운 기계의 구조재료로서 세라믹스가 근래 널리 주목을 받고 있다.

세라믹스는 내식성, 내열성 및 저밀도 등의 우

수한 특성을 가지고 있고, 특히 고온 경도가 높아 마멸하기 어렵다고 하는 성질은 마찰 습동재료로서 최적이며, 이들 성질을 이용하여 기어, 베어링, 노즐 및 미케니컬 시일(mechanical seal) 등 기계의 습동부품 재료 및 자동차 엔진, 가스 터빈을 비롯하여 정밀기기, 의료기기 등의 구조재료로서 기대되고 있으며, 특히 금속으로서는 사용 불가능한 특수 환경하에 있어서 습동재료로서도 수요가 날로 증가하고 있다.^(1~4)

이에 수반하여 세라믹스의 트라이볼로지(tribology)에 관한 연구도 날로 증가하고 있지만 이들 연구결과는 대체로 금속의 연구에 비하여 그 수가 대체로 작고 마찰특성 및 그 마멸기구도 아

* 회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : parkhs@seanghak.donga.ac.kr
TEL : (051)200-7653 FAX : (051)200-7656

** 회원, 부산정보대학 기계산업계열

*** 동아대학교 대학원 기계공학과

직 불분명한 점이 많다. 이것은 세라믹스가 그 종류도 많고 각각의 재질에 따라 표면흡착층 및 기계적 특성이 다르기 때문에 마찰 변형특성도 서로 다르게 되기 때문이라고 생각된다. 세라믹스의 마찰특성을 보다 명확하게 하기 위하여 공기중에서의 각종의 세라믹스에 대한 다양한 마찰 실험을 통하여 세라믹스의 제반 트라이볼로지 특성에 관한 연구와 또한 금속모재에 각종의 세라믹스를 코팅하여 금속의 마찰수명을 연장시키려고 하는 연구는 많이 진행되어 왔다.^(5, 6)

최근 통신, 방송, 기상관측 등에서 사용되는 인공위성 및 우주정거장 등의 특수 환경인 진공중에서의 기계 및 기구의 습동부에 대한 신뢰성은 대부분 트라이볼로지 기술에 의존하고 있다. 진공중에서는 대기중에서의 경우보다 기체분자의 흡착, 산화피막의 생성 등이 없기 때문에 기체에 의한 열전달 및 대류를 기대할 수 없어 실접촉부에서 마찰열이 축적되어 온도상승이 크게 된다. 이로 인하여 습동부분에는 PTFE, MoS₂ 및 연질 금속피막 등의 고체윤활제의 사용⁽⁷⁾과 함께 습동 재료로서 내열성과 내마멸성을 가지는 세라믹스의 이용이 날로 증가함에 따라 진공중의 분위기에서 마찰습동부에 적용가능성을 알기 위하여 세라믹스의 트라이볼로지 특성에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지 기계구동부의 습동 재료로서 사용되는 세라믹스의 트라이볼로지 특성에 관한 연구는 주로 세라믹스의 재질을 달리한 Al₂O₃, ZrO₂, SiC 및 Si₃N₄를 이용하여 다양한 분위기 즉, 건조대기중, 부식환경 및 진공중에서 행하여 왔다.^(3~6, 8~10)

그러나 전자, 기계부품 및 자동차 부품 등의 구조용 세라믹스로 널리 사용되는 순도를 달리한 알루미늄 세라믹스(Al₂O₃ ceramics)는 저가격으로 인하여 가장 많이 이용되고 있지만 세라믹스의 재질을 달리한 경우와 같이 알루미늄 순도에 따라 물리적 및 기계적 성질이 다르기 때문에 분위기 압력변화에 따른 트라이볼로지 특성도 당연히 변화하게 된다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 순도를 달리한 85%, 95% 및 99.7%의 3 종류의 알루미늄 세라믹스를 이용하여 분위기 압력을 변화시켜 마찰실험을 수행하여 마찰조건에 따른 마찰계수와 마찰면

의 표면관찰을 통하여 순도를 달리한 알루미늄 세라믹스의 트라이볼로지 특성을 조사하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용한 실험재료는 소결한 알루미늄 세라믹스이며, 그 순도는 각각 85%, 95% 및 99.7%의 3 종류와 상대재료로 시판의 베어링 강(STB2)을 선택하였으며, Table 1에는 이들 3 종류의 알루미늄 세라믹스 및 베어링 강들의 물리적 및 기계적 성질을 표시하였다. Table 1에서 처럼 알루미늄 순도가 증가할수록 제반 물리적 성질 및 경도치가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Table 2에는 3 종류의 알루미늄 세라믹스의 화학적 성분을 나타내었다. 여기서 알루미늄 세라믹스의 불순물로서 대부분이 SiO₂ 임을 볼 수 있다.

Fig. 1은 실험전 알루미늄 순도 (a) 85%, (b) 95% 및 (c) 99.7%의 폴리싱한 시험편의 표면을 나타낸 것으로서, 알루미늄의 순도가 증가할수록 표면에 제조상의 결함부인 기공의 크기와 그 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 (d)에서는 순도 85%의 결함부를 확대하여 나타낸 것으로서, 약 2.5 μ m 정도 크기의 알루미늄 입자 및 약 40 μ m 정도의 기공을 볼 수 있다.

Table 1 Physical and mechanical properties of specimens

Properties	85% ceramics	95% ceramics	99.7% ceramics	STB2
Specific gravity	3.5	3.7	3.9	7.8
Bending strength (MPa)	264.6	313.6	372.4	-
Compressive strength (MPa)	1568	2450	2940	2352
Young's modulus ($\times 10^4$ MPa)	2.06	3.14	3.92	1.90
Vickers hardness	1228	1400	1690	825
Thermal conductivity (cal · cm/cm ² · sec · °C)	0.04	0.06	0.08	0.13

Table 2 Chemical compositions of alumina ceramics

Alumina purity	Chemical compositions (wt.%)					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
85% ceramics	85.1	13.0	0.5	0.7	0.15	0.4
95% ceramics	95.2	3.53	0.27	0.05	0.05	0.25
99.7% ceramics	99.7	0.1	-	0.1	-	0.05

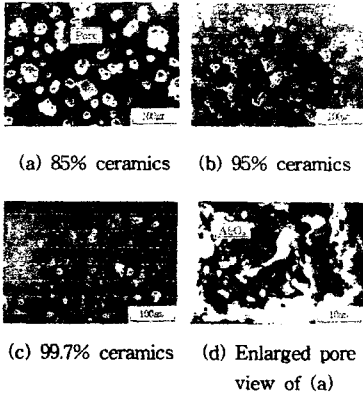


Fig. 1 Photos. of the polished alumina ceramics

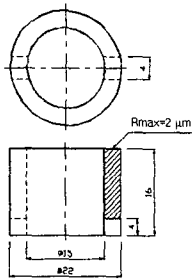


Fig. 2 Shape and dimension of specimen

세라믹스 재료는 일반적으로 가공이 어렵기 때문에 실제 마찰시험을 위한 시험편의 형상은 단순한 것이 요망된다. 본 연구에서 사용한 시험편의 형상은 Fig.2와 같이 외경 22 mm, 내경 15mm로 하였으며, 마찰면은 링(ring)의 형상이며, 실험전 시험편은 마찰면 에지(edge)부가 실험중 미소 칩핑(minute chipping)으로 인한 중량 감소량을 줄이기 위하여 다이아몬드 줄로 라운딩을 준 후 emery paper #1200으로 연마하여 그 표면조도를 $R_{max} = 2 \mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다.

그리고 마찰계수 μ 는 마찰면 전체에서 일정치를 취한다고 가정하면 Fig. 3에 표시한 바와 같이 내반경을 r_1 , 외반경을 r_2 라 하고, 접촉압력을 P , 마찰면 전체에 발생하는 토크를 T 라고 할 때 다음 식

$$\mu = [T \int_{r_1}^{r_2} r \, dr] / [P \int_{r_1}^{r_2} r^2 \, dr] \quad (1)$$

으로 표시할 수 있다.

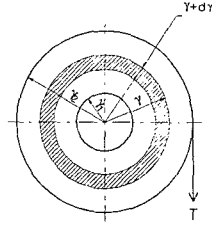


Fig. 3 Torque generated on the frictional surface

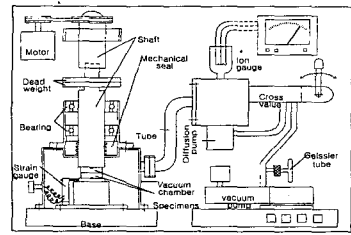


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 진공 실험장치 및 실험방법

Fig. 4는 분위기 압력변화를 위한 진공중에서의 마찰실험을 하기 위하여 제작한 실험장치의 개요도를 나타낸 것이다. 여기서 시험편은 회전부인 상부에 실험재료인 순도를 달리한 알루미늄 세라믹스를, 고정부인 하부에는 상대재료인 베어링을 부착하여 각 실험조건에 따라 진공중에서의 마찰실험을 행하였다. 이때의 마찰력은 스트레인 게이지가 부착된 판 스프링을 통하여 증폭기로 증폭하여 A/D 변환시켜 PC를 이용하여 그 출력파형을 검출하여 산출하였다. 실험조건으로서 분위기 압력은 대기압, 10^{-2} Torr 및 10^{-4} Torr로 하였으며, 미끄럼속도는 0.5 m/sec, 미끄럼거리는 250 mm로 일정하게 하였고, 작용하중은 중심축에 사하중을 가하여 49 N으로 하였다. 여기서 미끄럼속도를 0.5 m/sec로 일정하게 한 것은 이 이상이 되면 upsetting 현상으로 정상적인 마찰이 진행되지 않았기 때문이었다.

그리고 분위기 압력변화를 위하여 진공도 10^{-2} Torr는 양 시험편을 시험편 홀더부에 부착한 후, 진공챔버를 밀폐하고 로터리 펌프를 가동시켜 가이슬러 관(geissler tube)에서 유색의 방전색이 무색으로 전환이 되는 시점에서 얻어지며, 진공도

10^{-4} Torr 를 얻기 위하여 먼저 10^{-2} Torr에서 행한 바와 같이 로터리 펌프를 작동시켜 이 압력에 도달하면 3방향 밸브(cross valve)를 조작하여 확산 펌프를 가동시킨다. 이때 확산펌프에는 고온이 발생하므로 이의 냉각을 위하여 약 $1\ell/\text{min}$ 정도의 냉각수를 계속하여 공급한다. 그리고 약 1시간 정도 지난 후 이온 게이지(ion gauge)에 나타난 10^{-4} Torr 에서 실험을 하였다. 진공중에서의 분위기 압력을 얻기 위해서는 진공챔버와 회전축과의 사이에 유입되는 공기의 역제가 가장 문제가 된다.

따라서 본 연구에서는 이를 위하여 회전축의 베어링부에 자성유체를 주입시켜 공기의 유입을 차단시켜 기밀을 유지하였다. 본 연구의 실험조건에서 미끄럼거리를 250 m로 일정하게 한 것은 본 실험에 앞서 많은 예비실험에서 미끄럼거리를 250 m 이상 증가시켜도 마찰계수는 거의 변화없이 안정적으로 일정하게 진행되었기 때문이었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수에 미치는 분위기 압력의 영향

Fig. 5는 알루미늄 순도를 달리한, 즉 85%, 95% 및 99.7% 세라믹스의 분위기 압력변화에 따른 마찰계수 μ 를, Fig. 6에는 3종류 알루미늄의 표면조도 Ra를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 μ 는 분위기 압력이 감소할수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 알루미늄 순도 85%의 경우가 순도 95% 및 99.7% 보다 μ 가 큰 값을 가지며, 특히 10^{-4} Torr 의 μ 는 거의 1.0 정도의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 한편 마찰시 접촉부에서 고온의 마찰열에 의한 세라믹스의 입자가 불꽃색을 나타내면서 비산하는 것을 확인하였다. 그리고 Fig. 6의 표면조도에서 분위기 압력이 감소할수록 3종류의 알루미늄 모두 Ra가 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

μ 가 대기압에서 보다 분위기 압력이 감소할수록 큰 값을 가지는 것은 본 연구에서 설정한 진공분위기 중에서의 마찰에서는 대기압의 마찰에

서 나타나는 마찰면에서 형성되는 흡착물에 의한 윤회효과는 그다지 기대할 수 없게 된다. 고진공 중에서는 세라믹스의 마멸이 금속간에서의 접촉점에서 나타나는 junction 성장이 아닌 취성과파괴가 주로 마멸기구로서 작용한다는 보고⁽¹¹⁾가 있지만 본 연구에서 설정한 진공 분위기의 경우 대기압의 경우와는 달리 고체표면에 충돌흡착하는 기체분자의 양이 감소하여 흡착물에 의한 영향이 적게 된다. 이로 인하여 대기중의 경우보다 재료 표면에 형성될 수 있는 산화물과 같은 흡착물의 효과가 적어 두 마찰재료의 접촉면에 형성된 돌기부간의 응착이 증가하기 때문이라고 생각된다. 또한 양 마찰재료의 응착에 의한 실제 접촉부의 온도상승과 함께 진공중에서는 대류에 의한 마찰열의 제거가 불량하게 되는 것도 이와 같은 영향을 가속화시킨다고 생각된다.

이 결과로 표면조도의 경우 대기압에서는 3종류 알루미늄의 Ra는 0.7~0.8 정도의 값을 가지지만 분위기 압력이 감소할수록 Ra는 이보다 큰 값을 가지는 것에서 진공도의 증가는 접촉면에서 이착막의 결여를 나타내고 있으며, 이것이 진공중에서 중요한 마멸기구로 작용한다는 것을 알 수 있다.

그리고 알루미늄 순도가 낮은 85%의 경우가 순도 95% 및 99.7% 보다 μ 가 큰 값을 가지는 것은 Table 1에서 처럼 불순물이 많은 순도가 낮은 알루미늄은 경도가 낮고, 기공이 증가하여 열전도도가 작기 때문에 열축척에 의한 영향이 지배적으로 작용하고 또한 순도가 높은 알루미늄보다 탄성계수가 작아 소성유동이 쉽게 되어 입자탈락이 가속화되기 때문이라 생각된다.

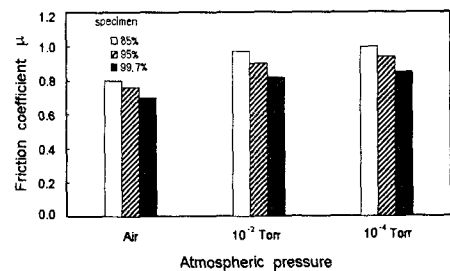


Fig. 5 Relation between friction coefficient and atmospheric pressure

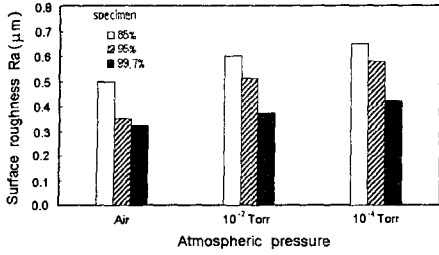


Fig. 6 Relation between surface roughness and atmospheric pressure

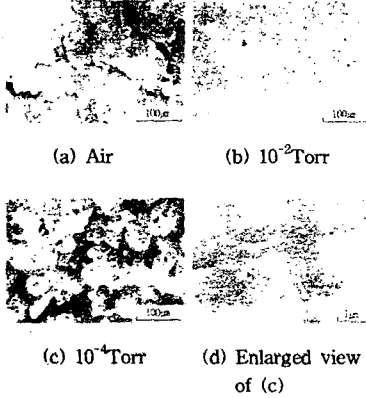


Fig. 7 Photos. of the rubbed surface for 85 % ceramics

Fig. 7은 알루미나 순도 85%의 분위기 압력변화에 따른 마찰면을 나타낸 것으로서 (a) 대기압, (b) 10⁻² Torr, (c) 10⁻⁴ Torr 이며, (d)는 (c)의 마찰면 일부를 확대한 것이다. 대기압인 (a)에서는 알루미나 입자와 공기흡착으로 상대재료인 강의 마멸분이 산화하여 형성된 적갈색 및 흑색의 산화물(Fe₂O₃와 Fe₃O₄)이 마찰면 전체를 덮고 있고, 이 산화물층은 결합부인 기공에도 충전되어 기공을 거의 볼 수 없을 정도로 두꺼운 흡착층을 형성하고 있다. (a)에서 (b)로 분위기 압력이 감소함에 따라 마찰면에 생성된 흡착층의 두께는 점점 감소한 것을 볼 수 있다. 특히 10⁻⁴ Torr인 (c)에서는 기공부분을 기점으로 하여 기공 주위에서 심한 응착이 마찰면 전 부분으로 확대되어 있으며, 기공 내부에도 미세한 양이지만 이착물이 충전되어 있지만 대체로 10⁻² Torr의 경우와 같은 흡착물의 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있다. 그리고 (d) 10⁻⁴ Torr의 기공부에 인접한 부분을 확대한 표면에는 0.5μm 이하의 탈락한 알루미나 입자가 부분적으로 산재해 있으며, 마찰면에는 상대재료인

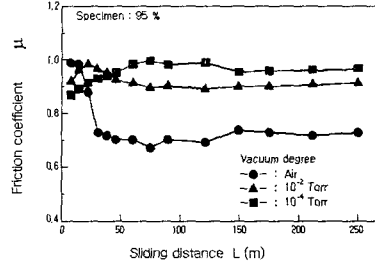


Fig. 8 Effect of sliding distance on friction coefficient for specimens

강에서 탈락한 미세한 마멸분으로 덮혀 있는 것을 볼 수 있다.

3.2 마찰계수에 미치는 미끄럼거리의 영향

Fig. 8은 순도 95%의 세라믹스의 경우, 대기압, 10⁻² Torr 및 10⁻⁴ Torr의 분위기 압력에서 미끄럼거리 L에 따른 마찰계수 μ를 나타낸 것이다. μ는 마찰초기, 즉 미끄럼거리가 약 20m까지는 대기압에서 0.98 정도로 가장 크고, 분위기 압력이 감소할수록 μ는 감소하지만 이후 L의 증가에 따라 μ는 반대로 대기압, 10⁻² Torr 및 10⁻⁴ Torr 순으로 μ가 증가하고 있다.

마찰초기에 진공도의 증가에 따라 μ가 감소하는 것은 진공중에서 마찰초기에는 진공챔버내의 잔류 기체중의 습기를 가진 수분이 접촉계면에서 화학흡착되어 양 시험편의 실제 접촉점이 방해되고, 이로 인하여 계면 접촉부에 흡착분자막이 개재되어 전단저항이 감소되기 때문이다. 이와 같은 현상에 대하여 Mori⁽¹²⁾는 진공중에서의 세라믹스를 마찰하면 수소가 발생하며, 이 수소의 발생은 마찰초기 뿐이고 동일한 트랙(track)을 반복 마찰시키면 이 수소는 더 이상 발생하지 않는다고 하였다. 여기서 발생한 수소는 시험편 표면에 화학흡착한 수분 또는 표면 수산기가 마찰시 열에 의하여 분해 생성된 것이며 이와 같은 수소생성은 산화물계와 비산화물계 세라믹스 모두 확인하였다. 이후 L의 증가에 따라 진공도가 증가할수록 역으로 μ가 증가하는 것은 분위기 기체의 소멸로 인하여 양 돌기부의 실제 접촉점의 전단저항이 증가하여 마찰저감 효과가 작기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9는 분위기 압력 10^{-4} Torr에서 3 종류 세라믹스의 미끄럼거리 L 에 따른 마찰계수 μ 를 나타낸 것이다. μ 는 L 이 약 60m까지는 다소 증가하고 있으며, 이후 L 의 증가에 따라 대체로 일정한 μ 를 가지며, 알루미나 순도의 감소에 따라 μ 는 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 마찰초기에 다소 μ 가 증가하다가 다시 그 이후의 L 에서 대체로 일정하게 진행하는 것은 전술한 바와 같이 마찰초기에는 잔류 기체중의 습기를 가진 수분이 분해되어 생성된 수소의 영향이며, 생성된 수소는 미끄럼거리의 증가에 따라 마찰열에 의하여 소멸되어 접촉계면의 돌기부에서 접촉점이 빠르게 확대됨에 따라 실제 접촉부 전단면적의 증가가 진행되면서 이 상태가 계속되기 때문이다. 그리고 알루미나 순도가 감소함에 따라 μ 가 크게 나타나는 것은 알루미나 순도의 감소에 따라 기계적 강도가 작고 또한 열전도의 감소로 인하여 열축적 현상으로 접촉점의 열충격에 의한 취성파괴가 현저히 진행되어 마멸이 급격히 된 결과로 생각된다.

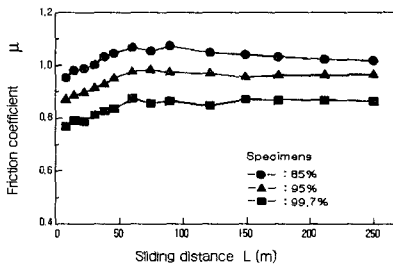


Fig. 9 Effect of sliding distance on friction coefficient for 10^{-4} Torr vacuum degree

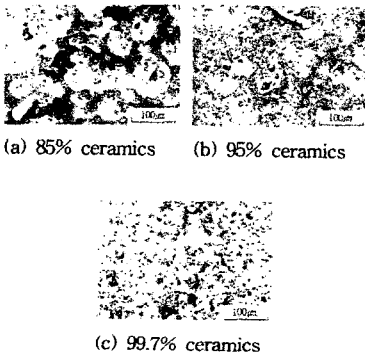


Fig. 10 Photos. of the rubbed surface for alumina purity

Fig. 10은 10^{-4} Torr의 진공도에서 실험을 완료한 후의 3 종류의 세라믹스의 마찰면을 나타낸 것으로서 (a) 85%, (b) 95% 및 (c) 99.7%이다. 3 종류 세라믹스 모두 큰 진공도를 가진 분위기에서 상대재료와 마찰되었기 때문에 마찰면에는 대기중에서의 마찰에서 나타나는 이착물은 거의 볼 수 없다는 것을 알 수 있다. (a) 85%의 경우는 기공부에는 상대재료인 강에서 탈락한 미세한 이착물이 충전되어 있고, 기공에서 취성파괴되어 기공이 확대된 흔적을 뚜렷이 볼 수 있다. 또한 사진의 좌측 하단부에는 격렬한 응착으로 인하여 상대재료인 강에서 탈락한 약 $60\mu\text{m}$ 의 크기를 가진 피상의 마멸입자를 볼 수 있다. 그리고 알루미나 순도 (b) 95%는 (a)인 순도 85%에 비하여 기공에서부터의 응착은 감소되며, 순도가 큰 (c) 99.7%의 경우는 정상적인 응착마멸이 마찰면 전체에 걸쳐 진행된 것을 알 수 있다.

4. 결론

순도를 달리한 85%, 95% 및 99.7%의 3 종류의 알루미나 세라믹스의 분위기 압력변화에 따른 트라이볼로지 특성을 알기 위하여 대기압과 진공도 10^{-2} Torr 및 10^{-4} Torr의 분위기에서 상대재료를 베어링강으로 하여 미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 세라믹스의 마찰표면은 대기압의 경우는 상대재료인 강에서 이착된 산화물의 영향으로, 진공중에서는 흡착물질에 의한 보호층은 형성되지 못한다.
- (2) 분위기 압력이 감소할수록 마찰계수는 증가하며, 알루미나 순도 85%의 경우 10^{-4} Torr에서의 마찰계수는 1.0, 표면조도 Ra는 0.65 정도의 값을 가진다.
- (3) 알루미나 순도 85%가 순도 95%와 99.7% 알루미나 보다 기계적 강도의 감소 및 낮은 열전도도에 의한 열축적으로 현상으로 마찰계수는 증가한다.
- (4) 진공중에서 미끄럼거리 초기에는 마찰계수는 감소하며, 미끄럼거리의 증가와 함께 상승하지만 일정 미끄럼거리 이상에서는 거의 일정치를 갖는다.

후 기

이 논문은 1998년도 동아대학교 학술연구조성비 (공모과제)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Kano. M. and Tanimoto. I., 1991, "Wear Resistance Properties of Ceramic Rocker Arm Pad," *Wear*, 145, pp. 153~165.
- (2) 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, 1986, "アルミナセラミックスの焼付きと摩耗特性," *潤滑*, 第31卷, 第5號, pp. 329~335.
- (3) 이영제, 1996, "미끄럼 환경의 변화에 따른 Si_3N_4 의 마멸거동," 대한기계학회 논문집(A) 제20권, 제6호, pp. 329~335.
- (4) Ajayi. O. O., Erdemir. A., Hsieh. J. H. and Erck. R. A., 1993, "Boundary Film for Structural Ceramic Materials," *Wear*, 162, pp. 1150~1155.
- (5) Gautier. P. and Kato. K., 1993, "Wear Mechanical of Silicon Nitride, Partially Stabilized Zirconia and Alumina in Unlubricated Sliding against Steel," *Wear*, 162 -164, pp. 305~313.
- (6) Ahn. H. S., Kim. J. Y. and Lim. D. S., 1997, "Tribological Behaviour of Plasma-Sprayed Zirconia Coatings," *Wear*, 203-204, pp. 77~87.
- (7) 川邑正男, 1989, "原子爐・真空用機器の摩耗と対策," *潤滑*, 第34卷, 第5號, pp. 375~376.
- (8) Perez-Unzueta. A. J., Beynon. J. H. and Gee. M. G., 1991, "Effects of Surrounding Atmosphere on the Wear of Sintered Alumina," *Wear*, 146, pp. 179~196.
- (9) Sasaki. S., 1989, "The Effects of the Surrounding Atmosphere on the Friction and Wear of Alumina, Zirconia, Silicon Carbide and Silicon Nitride," *Wear*, 134, pp. 185~200.
- (10) 復本明弘, 平塚健一, 笹田直, 1990, "アルミナ對金屬の摩擦・摩耗に對する金屬の酸化活性の影響と雰圍氣酸素の効果," *トライボロジスト*, 第36卷, 第1號, pp. 51~56.
- (11) Kato. K., 1990, "Tribology of Ceramics," *Wear*, 136, pp. 117~133.
- (12) Mori. S., 1991, "Adsorption and Chemical Reaction," *JAST*, Vol.36, No.2, pp. 130~134.