

진공중에서의 알루미나 세라믹스의 Tribology 특성

진동규* · 이충엽 · 전태옥 · 박홍식
(부산전문) (동의공전) (동아대)

Abstract

This study was undertaken to investigate tribology characteristics of the alumina ceramics(Al_2O_3) of the various purity for the variation of ambient condition such as air and vacuum. The wear test was carried out under different experimental condition using the wear test device, which was designed for this study, and in which the annular surface of wear testing specimens as well as mate specimen made of STB2 steel, were subjected to sliding speed, applied load and the sliding distance. The results obtained were as follows. As the ambient pressure decreases, the friction coefficient increases because the protective layer made of absorption due to decrease of the amount of ambient gas can not be formed. As the friction coefficient particularly for 85% alumina lower than 95% and 99.7% in the alumina purity increases by an influence of heat accumulation caused by small elastic modulus and thermal conductivity. The friction surface of ceramics can be protected in the air by the influence of the oxides transferred from STB2. However, in the vacuum, the protective layer made of the absorption substance can not be formed due to the decrease of ambient gas.

1. 서 론

기계문명의 발달에 따라 새로운 기능을 가진 기계구조물 등이 많이 만들어지고 있다. 이에 따라 종래에 생각할 수 없었던 강인한 재료가 절실히 요구되고 있는 실정이며, 또한 사용기계의 고하중화, 고속화에 부응하기 위하여 경량화가 요구되고 있다. 이와 함께 기계에서 요구되는 정밀도는 향상되고, 기계의 사용환경의 가혹화에 수반하여 새로운 기계구조재료로서 세라믹스가 최근 널리 주목을 받고 있다[1].

이에 세라믹스는 내식성, 내열성, 저밀도, 내마멸성 등의 우수한 특성을 가지고 있기 때문이며, 특히 고온 경도가 높아 마멸하기 어렵다고 하는 성질은 내마멸재료로서 최적이며, 이를 성질을 이용하여 기어, 베어링, 노즐 및 미캐니컬 실(mechanical seal) 등 기계의 운동부품 재료 및 자동차 엔진, 가스터빈을 비롯하여 정밀기기, 의료기기 등의 구조재료로서 기대되고 있으며, 특히 금속으로서는 사용 불가능한 특수환경하에 있어서 製動材料로서도 수요가 날로 증가하고 있다[2~4]. 이에 수반하여 세라믹스의 마찰

· 마멸 · 윤활의 관계를 동시에 취급하는 학문의 한분야인 트라이볼로지(tribology)에 관한 연구도 증가되고 있지만 그 기초적 연구는 금속에 비하여 훨씬 적고 마찰기구나 그 마멸특성에는 아직 불분명한 점이 많다 [5]. 이것은 세라믹스가 그 종류도 많고 각각의 재질에 따라서 表面吸着層 및 기계적 특성이 다르기 때문에 마찰변형특성도 서로 다르게 되기 때문이라고 생각된다. 또한 최근 통신, 방송, 기상관측 등에서 사용되는 인공위성 및 우주정거장 등이 관심을 모으고 있다. 이와 함께 특수 환경중인 진공중에서의 기계, 기구의 작동부에 대한 마찰 · 마멸의 현상에 대한 연구도 관심이 모아지고 있다. 이에 대한 연구로서 複本[6], Miyosh[7] 및 Hiratsuka[8]는 금속재료에 대한 각종 세라믹스의 진공중의 마찰실험에서 세라믹스와 금속사이의 응착과 마찰은 양자사이의 전단강도가 증가함에 따라서 감소한다는 보고가 있다. 또한 金[9]은 기계, 기구가 작동할 때의 마찰은 접촉면에서 항상 존재하고, 또한 더욱 복잡하게 변화시키며, 비정상적이다는 보고가 있다. 이처럼 세라믹스에 대한 대한 연구도 Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC 및 Si_3N_4 등의 각종 세라믹스의 재질을 달리한 경우의 제특성을 규명하였다. 그러나 지금까지 전자, 기계부품 및 자동차 부품 등의 구조용 세라믹스로 널리 사용되는 純度를 달리한 알루미나 세라믹스의 진공중에서의 트라이볼로지 특성에 연구는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 미끄럼속도, 미끄럼거리 등을 고정하여 순도를 달리한 85%,

95% 및 99.7%의 알루미나 세라믹스(Al_2O_3 ceramics)를 실험재료로 하고, 베어링鋼(STB2)을 상대재료로 사용하여 진공중에서의 미끄럼 마찰실험을 수행하여 마찰계수와 마찰면의 표면관찰을 통하여 알루미나 세라믹스의 트라이볼로지 특성을 조사하였다. 이를 결과를 통하여 나아가 우주용 기계의 트라이볼로지 설계에 대한 기초 자료를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험재

본 연구에 사용한 실험재료는 소결한 알루미나 세라믹스이며, 그 순도는 각각 85%, 95% 및 99.7%의 3종류 및 시판의 베어링 강을 선택하였으며, Table 1에는 이들 3종류의 알루미나 세라믹스 및 베어링 강의 물리적 및 기계적 성질을 표시하였다. 알루미나 순도가 증가할 수록 제반 물리적 성질 및 경도치가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2에는 3종류의 알루미나 세라믹스의 화학적 성분을 나타내었다. 여기서 알루미나 세라믹스의 불순물로서 대부분이 SiO_2 임을 볼 수 있다.

Fig. 1은 실험전 순도 (a) 85%, (b) 95% 및 (c)는 99.7%의 폴리싱한 시험편의 표면을 나타낸 것으로서, 알루미나의 순도가 증가할 수록 표면에 시험편의 제조상의 결함부인 氣孔의 크기와 그 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 (d)에서는 순도 85%의 결함부를 나타낸 것으로서, 약 $2.5\mu\text{m}$ 정도

크기의 알루미나 입자 및 약 $40\mu\text{m}$ 정도의 기공을 볼 수 있다.

세라믹스 재료는 일반적으로 가공이 곤란하므로 시험편의 형상은 단순한 것이 요망된다. 따라서 시험편은 Fig. 2와 같이 외경 22mm, 내경 15mm로 하였으며, 마찰면은 링 상이며, 실험전 시험편은 마찰면 옛지부가 실험중 치핑으로 인한 중량감소량을 줄이기 위하여 다이야몬드 줄로 라운딩을 준 후 emery paper #1200으로 연마하여 그 표면조도를 $R_{\max} = 2\mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다. 그리고 마찰형태는 평면과 평면의 미끄럼 마찰이 되도록 하였다.

Fig. 2와 같이 원통형의 시험편으로 실험을 하는 경우, 마찰면 전체에 균일한 접선력이 작용한다고 하여도 발생하는 토크(torque)는 회전반경에 따라 다르고 추정되는 토크는 이들의 적분치가 되므로 접선력을 면밀하게 구할 수는 없다. 따라서 축하중이 마찰면에 균등하게 작용하며, 반경방향으로의 상대 미끄럼속도의 차의 영향도 무시하고 접선력이 마찰면 전체에 균일하게 작용한다고 하면 계산된 토크로 부터 접선력을 다음과 같이 계산할 수 있다.

Fig. 3에 표시한 바와 같이 내반경을 r_1 , 외반경을 r_2 라 하고, 마찰계수를 μ , 접촉압력을 p 로 하면 마찰면 전체에서 발생하는 토크 T 는 式 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \mu p r (2\pi r) dr \quad (1)$$

여기서 작용하중 P 는

$$P = \int_{r_1}^{r_2} p (2\pi r) dr \quad (2)$$

가 되며, μ 는 마찰면 전체에서 일정치를 취한다고 가정하면

$$\mu = [T \int_{r_1}^{r_2} r dr] / [P \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr] \quad (3)$$

으로 표시할 수 있다. 이것을 일반의 마찰계수 $\mu = F/P$ 와 비교하면 접선력 F 는

$$F = T/r_{\text{eq}} \quad (4)$$

이 된다. 여기서

$$r_{\text{eq}} = [\int_{r_1}^{r_2} r^2 dr] / [\int_{r_1}^{r_2} r dr] \quad (5)$$

이다. 이것은 측정된 토크를 r_{eq} 로 나누면 접선력이 얻어진다는 것을 표시하고 있다. 따라서 본 실험에서 미끄럼속도와 미끄럼거리에 따라 마찰계수 μ 는 모두 반경 r_{eq} 에 대하여 계산한 값으로 하였다.

Table-1 Physical and mechanical properties of alumina ceramics and STB2

Properties	Alumina ceramics and STB2	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 ($\times 10^6$ 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

2.2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 4는 진공중에서의 마찰실험을 하기 위하여 제작한 실험장치의 개요도를 나타내었다. 여기서 시험편은 회전부인 상부에 실

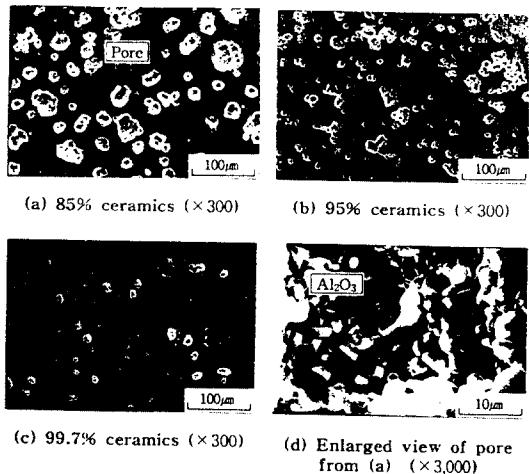


Fig. 1 Photographs of the polished specimen surface

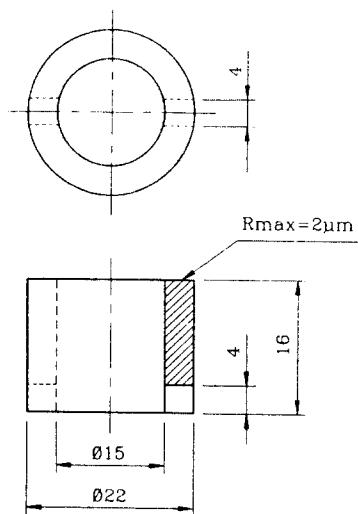


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

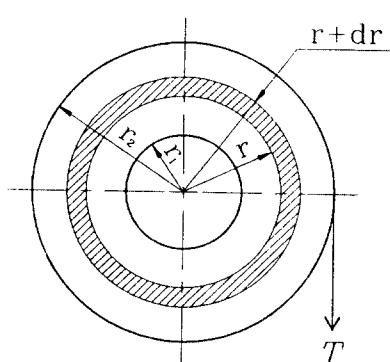


Fig. 3 Torque generated on the frictional surface

현재로인 순도를 달리한 알루미나 세라믹스를, 고정부인 하부에 상대재료인 베어링강을 부착하여 각 실험조건에 따라 진공중에서의 마찰실험을 실시하였다. 이때의 마찰력은 스트레인 게이지가 부착된 板스프링을 통하여 증폭기로 증폭하여 선형기록계로 그 출력파형을 검출하여 산출하였다. 마멸체적은 0.1mg의 정확도를 가진 디지털 천칭을 사용하여 실험전후의 중량감소량을 측정하고 이를 시험편의 비중을 이용하여 환산하였다. 실험조건으로서 압력변화는 대기압(공기중), 10^{-2} Torr 및 10^{-4} Torr, 미끄럼속도는 0.5m/sec, 미끄럼거리는 0.25km로 일정하게 하였으며, 작용하중은 중심축에 정하중을 가하여 49N으로 하였다.

그리고 真空度 10^{-2} Torr의 실험에서는 시험편을 장착한후, 진공챔버를 밀폐하여 진공펌프를 가동시켜 가이슬러 관(Geissler tube)에서 유색의 방전색이 무색으로 전환이 되면 실험을 하였으며, 진공도 10^{-4} Torr의 경우는 시험편을 장착한후, 진공챔버를 밀폐하여 진공펌프를 가동시킨 후, 확산펌프를 가동 시킨다. 이때 확산펌프에는 고온이 발생하므로 약 1ℓ/min 정도의 냉각수를 계속하여 공급한다. 그리고 가이슬러 관에서 유색의 방전색이 무색으로 전환이 되면 3방향 밸브(cross valve)를 조작하여 확산펌프를 작동 시킨다. 약 1시간 정도 지난후 이온게이지(ion gauge)로 진공도를 측정하여 실험을 하였다. 그리고 실험중 진공챔버와 회전축사이의 기밀을 유지하기 위하여 자성유체를 이용하였다.

실험조건에서 미끄럼거리를 0.25km로 한것

은 본 실험에서 미끄럼거리를 0.2km 이상 증가시켜도 마찰계수의 변화없이 안정되었기 때문이며, 또한 진공중에서 마찰실험시 미끄럼거리가 약 0.2km 이내에서 마찰계수가 안정된다[1,10]는 보고가 있다.

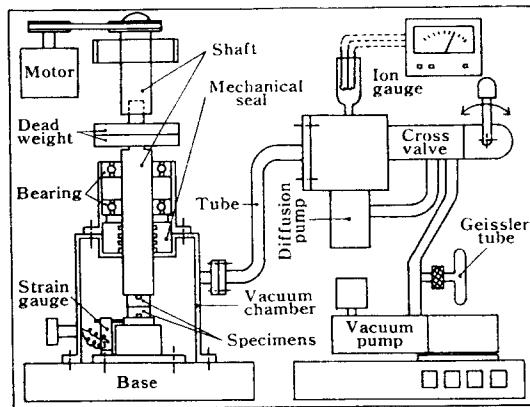


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus in vacuum

3. 진공중에서의 Tribology 특성

3.1. 마찰계수에 미치는 진공 압력변화의 영향

Fig. 5는 접촉하중 P 를 49N, 미끄럼속도 V 를 0.5m/sec, 미끄럼거리 L 을 0.25km로 하였을 경우, 상대재를 베어링강으로 하고 실험재를 알루미나 순도를 달리한, 즉 85%, 95% 및 99.7% 세라믹스로 하였을 때의 진공 압력변화에 따른 마찰계수 μ 를 나타낸 것이다. 마찰계수는 진공 압력이 감소할 수록 큰것을 볼 수 있으며, 알루미나 순도 85%의 경우가 순도 95% 및 99.7% 보다 마찰계수가 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그리고 마찰시 양 시험편의 접촉부에서 고온의 마찰열에 의하여 세라믹스의 입자가 불꽃색을 나타내면서 비산하였다.

마찰계수가 공기중보다 진공압력이 증가할 수록 큰 것은 진공중에서의 마찰에서는 공기중에서의 마찰과 같은 마찰면에서 형성되는 흡착물질에 의한 윤활효과는 그다지 기대할 수 없다고 생각된다. 즉 진공중에서는 공기중에서의 분위기와는 달리 고체표면에 충돌흡착하는 기체분자의 양이 감소하기 때문에 격렬한 상호 이착과 탈락이 계속 반복적으로 진행된다고 생각된다. 이와 함께 진공중에서는 대류에 의한 마찰열의 제거가 불량하게 되고 이로 인하여 마찰부가 예상 이상으로 고온이 되어[11], 양 시험편의 접촉계면에서의 응착이 증가하여 이착입자의 탈락이 계속되기 때문이다라고 생각된다. 그리고 알루미나 순도가 낮은 85%의 경우가 순도가 높은 95% 및 99.7% 보다 마찰계수가 큰 값을 가지는 것은 Table 1에서처럼 탄성계수 및 열전도도가 적기 때문에 열축척에 의한 영향이 지배적으로 작용하여 기공 경계부에서 알루미나 순도 95%와 99.7% 보다 알루미나 입자의 탈락 속도가 증가하기 때문이라 생각된다.

Fig. 6은 접촉하중 P 를 49N, 미끄럼속도 V 를 0.5m/sec, 미끄럼거리 L 을 0.25km로 하였을 경우, 알루미나 순도 85%의 진공 압력변화에 따른 마찰면을 나타낸 것으로서 그림에서 (a) 공기중, (b) 10^{-2} Torr, (c) 10^{-4} Torr이며, (d)는 (c)의 마찰면을 확대한 것이다. 공기중인 (a)에서는 이착된 강의 적갈색의 산화물(Fe_2O_3 와 Fe_3O_4)층이 마찰면 표면전체를 덮고 있고, 이 산화물층은 순도 85%의 결합부인 기공에도 충진되어 기공을 거의 볼 수 없을 정도로 두꺼운 층을 형성

하고 있다. (b)에서 (c)로 진공 압력이 증가함에 따라 마찰면에 생성된 이착물은 점점 얇아지고 있고 응착의 진행이 수반되고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 10^{-4} Torr인 (c)에서는 알루미나 순도 85%의 기공부가 부분적으로 이착물로 충진되어 있지만 대체로 Fig. 1의 실험前 시험편과 유사하다는 것을 보아도 이착물에 의한 윤활작용은 그다지 진행이 되지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 (d) 10^{-4} Torr의 마찰면을 확대한 표면에는 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 탈락한 알루미나 입자가 부분적으로 산재해 있으며, 마찰면에는 얇은 이착물이 덮혀 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6과 동일한 조건인, Fig. 7의 순도 95% 와 Fig. 8의 순도 99.7%의 경우에서도 압력이 감소할 수록 이착물은 그 두께가 얇아지고 있다는 것을 볼 수 있다. 이것도 공기중보다도 진공 압력이 증가할 수록 분위기 기체중의 기체분자가 고체 표면에 충돌흡착하는 양이 감소된 결과를 나타내 주고 있다고 생각된다.

이 결과로 나타나는 알루미나 표면의 마찰상태를 알기위하여 Fig. 9에는 Fig. 5와 동일한 조건에서의 표면조도 Ra를 나타내었다. 그림에서처럼 진공 압력이 증가할 수록, 각각의 시험편에서 Ra가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 진공중에서의 마찰에서는 양 시험편의 강한 응착의 영향을 나타내 주고 있다고 생각된다. 이처럼 진공중에서 강한 응착은 마찰표면에서의 산화막의 결여[12]를 나타내고 있다고 할 수 있다.

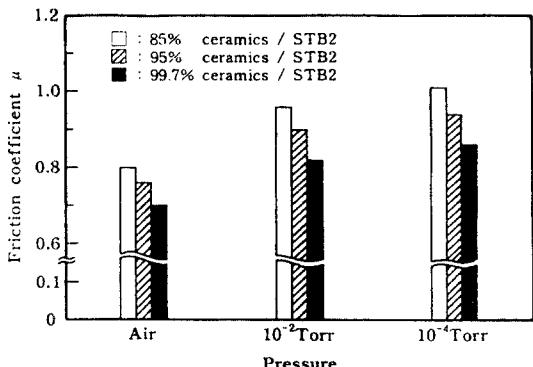


Fig. 5 Relation between friction coefficient and pressure
($P = 49\text{N}$, $V = 0.5\text{m/sec}$, $L = 0.25\text{km}$)

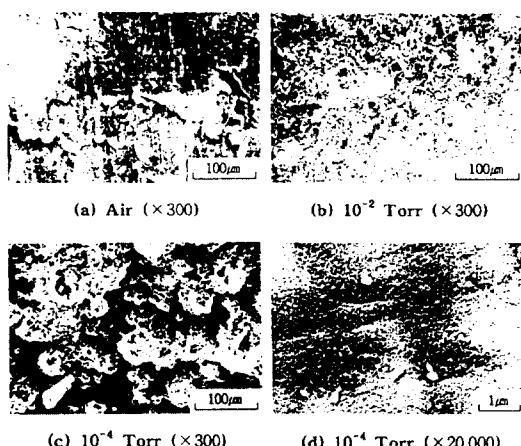


Fig. 6 Photographs of the rubbed surface for the 85% ceramics in air and vacuum environment
(Mate specimen : STB2, $P = 49\text{N}$, $V = 0.5\text{m/sec}$, $L = 0.25\text{km}$)

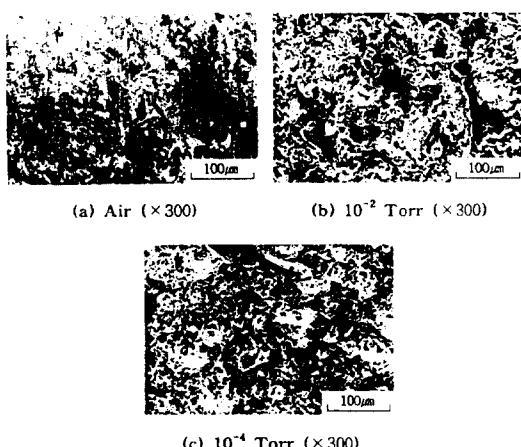


Fig. 7 Photographs of the rubbed surface for the 95% ceramics in air and vacuum environment
(Mate specimen : STB2, $P = 49\text{N}$, $V = 0.5\text{m/sec}$, $L = 0.25\text{km}$)

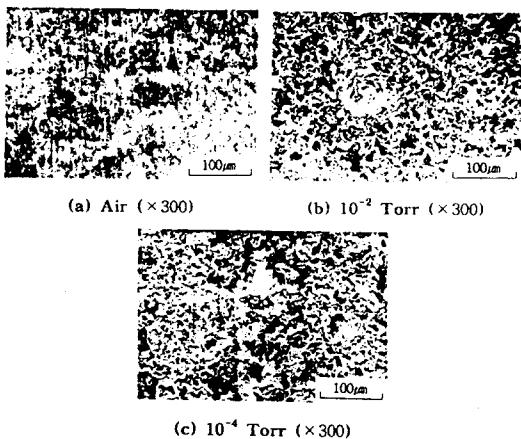


Fig. 8 Photographs of the rubbed surface for the 99.7% ceramics in air and vacuum environment
(Mate specimen : STB2, $P = 49N$, $V = 0.5m/sec$, $L = 0.25km$)

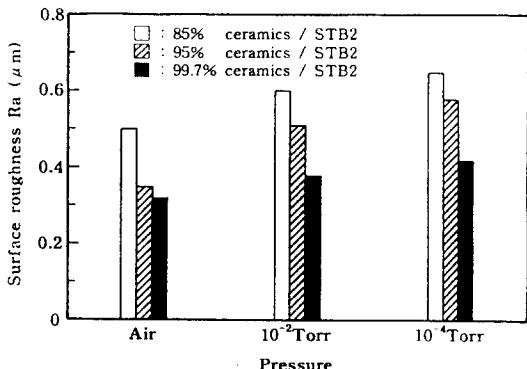


Fig. 9 Relation between surface roughness and pressure
($P = 49N$, $V = 0.5m/sec$, $L = 0.25km$)

3.2. 마찰계수에 미치는 미끄럼거리의 영향

Fig. 10은 접촉하중 P 를 49N, 미끄럼속도를 V 를 0.5m/sec, 상대재를 베어링강, 실험재를 95% 세라믹스로 하였을 경우, 공기중, 10^{-2} Torr 및 10^{-4} Torr의 3가지의 진공 압력에 대한 미끄럼거리 L 에 따른 마찰계수 μ 를 나타낸 것이다. 마찰계수는 마찰초기, 즉 미끄럼거리가 약 0.02km까지는 공기중에서 0.98 정도로 가장 크고 진공 압력이 증가할 수록 마찰계수는 감소하지만 이후 미끄럼거

리의 증가에 따라 마찰계수는 반대로 공기중, 10^{-2} Torr 및 10^{-4} Torr 순으로 마찰계수가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

마찰계수가 마찰초기에는 공기중 보다 진공도가 증가할 수록 감소하는 것은 마찰초기에는 잔류 기체중의 水分子[13]가 접촉계면에서 화학흡착되어 양 시험편의 실제 접촉점이 방해된다. 이로 인하여 계면 접촉부의 전단응력이 감소되고 상대재인 강에서 탈락되는 이착입자가 적기 때문이라고 생각된다. 이와 같은 현상에 대하여 Mori[14]는 진공중에서의 세라믹스면을 마찰하면 수소가 발생하며, 이 수소의 발생은 미찰초기 뿐이고 동일한 트랙(track)을 반복마찰시키게 되면 이 수소는 더이상 발생하지 않는다고 하였다. 여기서 발생한 수소는 시험편 표면에 화학흡착한 물 또는 표면수산기가 마찰시 열에 의하여 분해생성된 것이며 이와 같은 수소생성은 산화물계와 비산화물계 세라믹스 모두 확인 하였다. 이후 미끄럼거리 L 의 증가에 따라 공기중보다 진공도가 증가할 수록 역으로 마찰계수가 증가하는 것은 분위기 기체의 소멸로 인하여 양 시험편의 돌기부의 접촉점이 빠르게 확대되고 실제 접촉부의 전단응력이 증가하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 11은 접촉하중 P 를 49N, 미끄럼속도를 V 를 0.5m/sec, 진공도 10^{-4} Torr, 상대재를 베어링강, 실험재를 85%, 95% 및 99.7% 세라믹스로 한 경우, 미끄럼거리 L 에 따른 마찰계수 μ 를 나타낸 것이다. 마찰계수는 마찰초기, 즉 미끄럼거리가 약 0.06km까지는 다소 마찰계수가 증가하고 있으며, 이후

미끄럼거리의 증가에 따라 그의 일정한 마찰계수가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 알루미나 순도의 감소에 따라 높은 마찰계수를 가지는 것을 볼 수 있다. 마찰초기에는 잔류 기체중의 수분자가 접촉계면에서 화학흡착되어 양 시험편의 실제 접촉점이 방해되기 때문이며, 계속적인 마찰로 분위기 기체의 소멸로 인하여 양 시험편의 돌기부의 접촉점이 빠르게 확대되고 실제 접촉부 전단면적의 증가에 기인하며 이후 계속적인 마찰로 어느 임계치에 달하면 일정한 마찰계수를 가진다고 생각된다. 그리고 알루미나 순도의 감소에 따라 마찰계수가 크게 나타나는 것은 알루미나 순도의 감소에 따라 열전도의 감소로 인하여 마찰면의 양 시험편의 돌기부의 접촉점이 빠르게 확대되어 보다 응착의 양이 많아지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 12는 Fig. 11의 조건에서의 순도를 달리한 알루미나 세라믹스의 마찰면 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 85% 세라믹스의 경우는 기공부가 부분적으로 이착물로 충진되어 있으며 기공 경계부에서 알루미나 입자가 탈락어 기공이 확대된 흔적이 관찰되며 또한 마찰면에는 상대재인 강에서 탈락된 괴상의 마멸분이 보이며 전체적으로 양 시험편의 직접접촉에 의한 격렬한 응착 마찰의 흔적을 볼 수 있다. 그리고 알루미나 순도가 증가할 수록, 즉 (b) 95% 및 (c) 99.7% 세라믹스에서는 우수한 열분산작용으로 응착의 양은 적으지만 마찰표면에는 매우 얇은 이착물을 볼 수 있다.

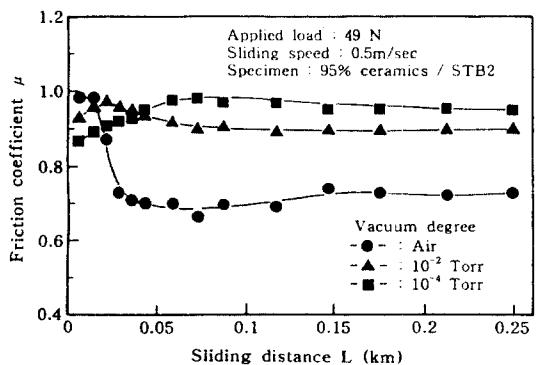


Fig. 10 Effect of sliding distance on the friction coefficient

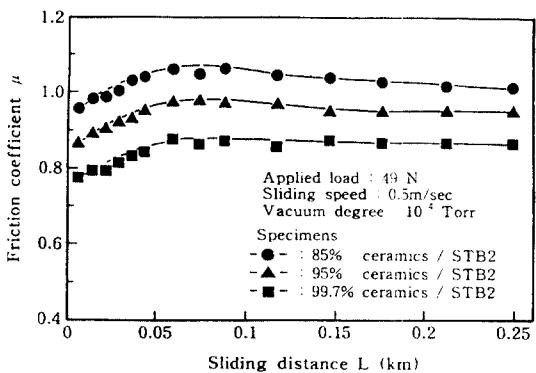


Fig. 11 Effect of sliding distance on the friction coefficient

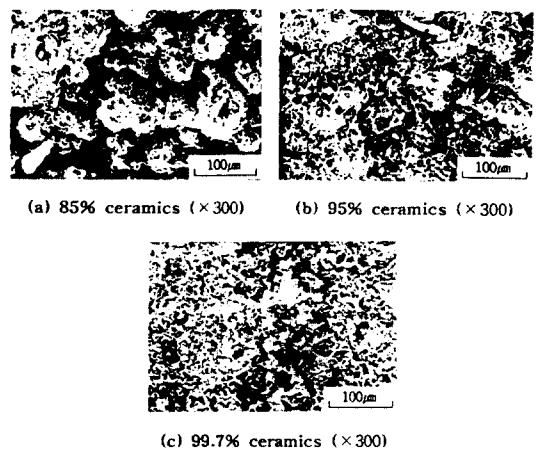


Fig. 12 Photographs of the rubbed surface for variation of alumina purity (Mate specimen : STB2, $P = 49N$, Vacuum degree : 10^{-4} Torr, $V = 0.3m/sec$)

4. 결 론

순도를 달리한 85%, 95% 및 99.7%의 알루미나 세라믹스를 실험재료로 하고 베어링鋼을 상대재료로 하여 진공 압력의 변화 즉, 공기중, 10^{-2} Torr 및 10^{-4} Torr에서의 트라이볼로지 특성을 알기 위하여 미끄럼속도, 접촉하중 및 미끄럼거리에 대하여 원통형 시험편으로 미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진공도가 증가 할 수록 고체표면에 충돌하는 기체분자의 감소로 인하여 이착물에 의한 보호층이 형성되지 못하게 되어 마찰계수는 증가한다.
2. 저순도 85% 알루미나가 고순도(95%, 99.7%) 알루미나 보다 탄성계수 및 열전도도가 낮아 이로인한 열축적의 영향으로 마찰계수는 증가한다.
3. 세라믹스의 마찰표면은 공기중의 경우는 상대재인 강에서 이착된 산화물의 영향으로, 진공중에서는 분위기 기체의 감소로 인하여 흡착물질에 의한 보호층은 형성되지 못한다.

참 고 문 헌

- 1) 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, “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, (1986)
- 2) O.O. Ajayi, A. Erdemir, J.-H. Hsieh and R.A.Erck, “Boundary Film for Structureal Ceramic Materials”, Wear, 162-164, pp.1150~1155, (1993)
- 3) K.-H.Zum Gahr, W.Bundschuh and Zimmerlin, “Effect of Grain Size on Friction and Sliding Wear of Oxide Ceramics”, Wear, 162-164, pp.269~279, (1993)
- 4) M.Kano and I.Tanimoto, “Wear Resistance Properties of Ceramic Rocker Arm Pad”, Wear, 145, pp.153~165, (1991)
- 5) 石垣博行, “セラミックの摩擦について”, 潤滑, 第30卷, 第9號, pp. 627~632, (1985)
- 6) 複本明弘, 平塚健一, 笹田直, “アルミニウムの摩擦・摩耗に對する 金屬の酸化活性の影響と霧露氣酸素の効果”, トライボロジスト, 第36卷, 第1號, pp.51~56, (1990)
- 7) Kazuhisa Miyoshi, “Fundamental Considerations in Adhesion Friction and Wear for Ceramic-Metal Contacts”, Wear, 144, pp.35~44, (1990)
- 8) K. Hiratsuka, A. Enomoto and T. Sasada, “Friction and Wear of Al_2O_3 , ZrO_2 and SiO_2 Rubbed Against Pure Metals”, Wear, 153, pp.361~373, (1992)
- 9) 金亨資, “超高真空中에 있어서 軟質金屬의 트라이보-코팅에 관한 研究”, 東亞大學校 大學院 博士學位論文, (1994)
- 10) G. Kapelski, F. Platon and P. Boch, “Unlubricated Wear and Friction

- Behavior of Alumina and Silicon Carbide Ceramics", Proc. 15th Leed s-Lyon Symp. on Tribology, pp.349 ~354, (1988)
- 11) 西村 允, "高真空中におけるトライボロジー", 潤滑, 第33卷, 第2号, pp.110 ~115, (1988)
- 12) A.Iwabuchi, K.Kato and T. Kayaba, "Fretting Properties of SUS304 Stainless Steel in a Vacuum Environment", Wear, 110, pp.205~216, (1986)
- 13) 金持徹, "真空技術ハンドブック", 日刊工業新聞社, pp.458 ~ 463, (1990)
- 14) Shigeyuki. Mori, "Adsorption and Chemical Reaction", JJST, Vol.36, No.2, pp.130 ~ 134, (1991)