

SMART 냉각재순환펌프용 베어링 재료의 마찰 특성에 관한 연구
A Study on the Frictional Characteristics of Bearing Materials for the
Main Coolant Pump in SMART

김은현, 이재선, 박진석, 허형, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 일체형원자로의 냉각재순환펌프에 사용되는 저널베어링 및 스러스트베어링과 유사한 구동 조건인, 고온, 고압의 물로 윤활되는 환경에서 베어링 재료의 마찰 및 마모 특성을 실험적으로 고찰하였다. 본 실험에 사용된 고온 고압용 마찰, 마모시험기를 소개하였으며, 각 재료의 마찰 계수와 마멸량을 분석하여 냉각재순환펌프용 베어링으로 적용할 수 있는 최적의 재질을 선정하고자 하였다. 본 시험에서는 각 재료의 마찰 특성을 얻기 위하여 핀-플레이트 형태의 시편을 사용하였으며, 접시 스프링을 이용하여 각 시편에 수직 하중이 가해지도록 하였다. 마멸량 및 마멸폭의 크기는 전자저울과 마이크로미터로 측정하였으며, 마찰 계수는 스트레인 게이지로 측정하였다. 본 연구에서는 3종의 실리콘 그래파이트 재료에 대하여 비교 실험을 수행하였으며, 각 재료는 유사하지만 서로 다른 마찰 및 마모 특성을 보임을 확인하였다.

Abstract

Experimental frictional and wear characteristics of silicon graphite materials lubricated with high temperature and highly pressurized water to use for the journal bearing and the thrust bearing in the main coolant pump bearing of SMART is studied in this paper. Similar operating condition of the bearings is realized in the tribometer, so the materials are lubricated with high temperature and highly pressurized water. Friction coefficient and wear loss are analyzed to choose the best silicon graphite material. Pin on plate test specimens are used and coned disk springs are used to control the applied force on the specimens. Wear loss and wear width are measured by an precision balance and a micrometer. The friction force is measured by the strain gauge which can be used under high temperature and high pressure. Three kinds of silicon graphite materials are examined and compared with each other, and each material shows similar but different results on frictional and wear characteristics.

1. 서론

세라믹은 금속 재료보다 가볍고, 높은 경도와 탄성계수로 내마모성이 뛰어나며, 부식과 고온 저항성이 우수하여 극한 조건하에서 매우 뛰어난 내마모 특성을 나타내기 때문에 윤활공학적인 재료로서 광범위하게 적용되고 있다[1-3]. 특히 일부 원자로의 회전기계에서는 100℃ 이상의 고온 상태에서 저점도의 물로 윤활되기 때문에 일반적인 베어링 시스템에 사용되는 저널 및 스러스트 베어링에 비해 마찰 및 마모 특성이 열악하게 되고, 특히 마모 특성이 회전기계 시스템의 수명과 안정성에 큰 영향을 미치게 되어 세라믹 재료의 이용이 점증될 전망이다. 더군다나 세라믹의 이용은 물에 의한 직접적인 윤활제의 작용보다 물의 영향으로 마찰계면에 흡착층 및 마찰 화학적 반응으로 생성된 생성물의 작용으로 일반의 윤활유와 같은 효과를 나타내며[4], 특히 우수한 냉각성으로 인하여 열충격에 의한 취성과파괴를 방지하여 기계 수명 연장에 큰 영향을 미칠 것이다.

이와 함께 세라믹의 수윤활에 관한 연구도 증가되고 있지만 그 기초적 연구는 금속에 비하여 훨씬 적고 마찰기구나 마멸특성에 아직 불분명한 점이 많다. Sasaki[4]는 세라믹의 마찰, 마멸에 미치는 분위기 습도 및 수분의 영향에 대한 연구로서 마찰면에 형성된 물의 흡착층 및 수산화물이 마찰에 큰 영향을 미친다고 보고하고 있고, Nakamura[5] 등은 Si-Al-O-N 세라믹과 회주철에 대한 각종 유체윤활제의 효과에 대한 마멸실험에서 수윤활의 경우가 우수한 열분산 및 액체윤활막의 작용으로 인하여 회주철의 경우 가장 우수한 내마멸성을 가진다고 보고하고 있다. 또한 Li[6] 등은 물로 윤활되는 실리콘 카바이드의 마찰학적 특징을 소결 조건에 따라 연구하였으며, 그 연구 결과에 따르면 강한 소결에 의해서 생성된 SiC의 경우 마찰계수의 값이 0.01보다 작다는 것을 보여 주었으며, 그 원인으로는 SiC가 H₂O와 만나서 SiO₂와 SiO₂·nH₂O의 생성물이 마찰표면을 덮어서 강한 면을 생성하기 때문이라고 보았다. 또한 국내에서는 이영제[7] 등은 산화, 질화, 및 탄소 세라믹에 대하여 무윤활, 수윤활, 윤활유 윤활을 연구하여 탄소 세라믹의 경우 수윤활에서 산화막의 생성이 윤활유에 의해서 생성된 유막의 효과보다 내마멸성이 더 좋다고 보고하였으며, 진동규[8] 등은 알루미늄 세라믹의 순도에 따른 수윤활을 연구하여 알루미늄 순도가 증가할수록 tribochemical 반응속도가 상승하여 초기에 경계윤활막을 형성하여 미끄럼 거리에 따른 마찰계수의 변화가 적다고 보고하였다. 그러나 아직까지 국내에서는 원자력에서 사용되어질 고온, 고압하에서의 마찰 및 마모 시험을 한 연구는 전무한 상태이다.

본 논문에서는 일체형 원자로의 냉각재순환펌프 축 시스템에 발생하는 반경방향 하중을 지지하기 위한 2개의 저널베어링용 소재로 세라믹을 이용하는데, 실제 운전 조건에 상응하는 120℃, 147bar를 구현하여, 실리콘 그래파이트의 마찰 및 윤활 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

냉각재순환펌프용 베어링 소재의 마찰 및 마모 특성을 얻기 위해서는 고온, 고압용 마찰 및 마모 시험기의 왕복동 시험기를 이용하였다. 본 실험은 저속에서 운전되기 때문에 베어링 재료의 윤활 특성을 배제하고, 재료 자체의 마찰 및 마모 특성을 고찰하도록 한다. Fig. 1은 시험기의 개략도이다. Fig. 1에서 고압용기 내부는 고온, 고압의 물로 순환이 되는 구조이며, 물의 온도는 열전

대를 이용하여 측정한다.

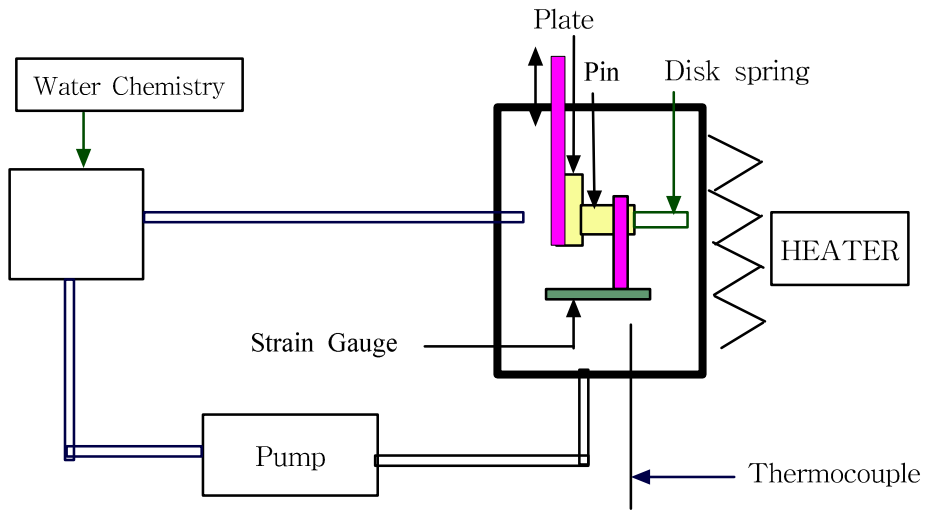


Fig. 1 Schematic diagram of the tribometer

왕복 운동을 하는 플레이트에 핀이 접촉되어 있으며, 핀 홀더에는 스트레인 게이지를 설치하여 마찰력이 스트레인 게이지로 전달이 되도록 하였다. 또한 핀에는 접시 스프링을 이용하여 하중을 줄 수 있는 구조로 되어 있다.



(a)

(b)

Fig. 2 Water Chemistry Panel(a) and Electrical Control Panel(b)

Fig. 2는 수화학 장치 패널(a)과 전기 제어 패널(b)의 실물을 나타내며, 실제 냉각재순환펌프의 구동 조건과 같은 물의 조성을 만들 때 사용하며, 각종 센서(수소, 산소, 이온, 압력)가 있다. 또한 필요한 압력을 가하기 위해서 압력펌프가 있다. 전기 제어 패널은 시스템에 필요한 전원 공급 및 각종 센서에서 나오는 신호를 처리하여 보여준다. 또한 각종 제어 장치가 모터의 구동속도 조절과 히터의 온도 조절을 한다.



그림 3 Reciprocating Tribometer



Fig. 4 Autoclave

Fig. 3은 왕복동 시험기 상부의 실제 사진으로, 모터의 회전력은 감속기를 거쳐 편심 원판을 구동하게 되며, 편심 원판에 크랭크축으로 연결된 봉이 왕복동 운동을 하게 된다. 모터 회전 속도는 200:1로 감속되고, 시험 편도 행정 거리는 11.75mm이다. 행정 사이클은 LVDT로 측정하였다.

Fig. 4는 압력용기의 실물 사진으로 5ℓ의 시험공간을 제공하며, 주위에는 히터가 장착이 되어 있다.

2.2 시험 시편

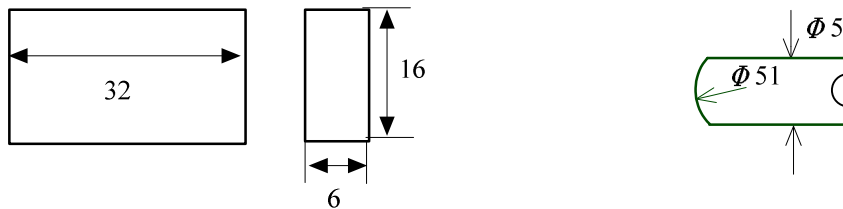
마찰 및 마모 특성은 탄화규소 세라믹 다공에 침투한 그라파이트와 실리콘의 구성에 따라 변화 될 것으로 예측되어지며, 현재 냉각재순환펌프용 베어링 소재의 검토 시편으로 시험에 사용된 것은 SiC30, PGS200과 PG-9723이다. 탄화규소는 입방정 결정구조를 갖는 β 상과 육방정 결정구조를 갖는 α 상이 존재한다. β 상은 1400~1800℃의 온도 범위에서 안정하고, α 상은 2000℃ 이상에서 형성되는데 시험에 사용된 시편 SiC 30의 경우 변형된 β 상 탄화규소이며, PGS200과 PG-9723

은 α 상 탄화규소이다. Table 1에는 시편의 물리적 및 기계적 성질을 나타내었다.

	SiC 30	PG-9723	PGS200
Density (g/mm ³)	2.65	2.80	2.60
Compressive strength (N/mm ²)	NA	552	482.65
Graphite Composition (% of mass)	App. 35	NA	NA
Thermal Expansion Coefficient [$10^{-6}/K$]	3.0 (20~200°C)	4.14 (20~200°C)	2.3 (70~1000°F)
Modulus of Elasticity [kN/mm ²]	140	152	124
상 구성	변형된 β 상	α 상	α 상
제조사	Schunk	MAMAT	MAMAT

Table 1. Physical and mechanical properties of SiC30, PG9723 and PGS200

Fig. 5에는 시편의 형상과 치수를 나타내었다. 플레이트의 표면 거칠기는 $0.4\mu\text{m}$, 편평도는 0.02mm , 평활도는 0.05mm 이며, 핀의 마찰되는 부분에 표면 거칠기는 $0.1\mu\text{m}$ 이다.



(a) Plate specimen

(b) Pin specimen

Fig. 5 Shape and dimensions of specimens

2.3 실험 방법

Fig. 6은 왕복동 시험기의 하부 사진이며 압력 용기 내부에 들어가는 시편 장착 부위를 나타낸 실물 사진이다. 4개의 시편 장착 여유가 있으며, 각 시편은 A, B 및 C, D 스트레인게이지에 한조를 이루어 조립된다. 따라서 핀-플레이트 조합 시편을 한번 시험에 각 2조를 설치하며, 설치 위치는 동일한 시편 조합별로, 첫 번째 시험에서는 A, C 스트레인 게이지에 SiC30의 핀과 플레이트를 각각 설치하였고, B, D 스트레인게이지에는 PG-9723의 핀과 플레이트를 각각 설치하였다. 두 번째 시험은 A, C 스트레인 게이지에는 PGS200의 플레이트와 핀을 설치하였고, B, D 스트레인 게이지에는 플레이트는 PGS200을 핀은 PG9723을 각각 설치하였다.

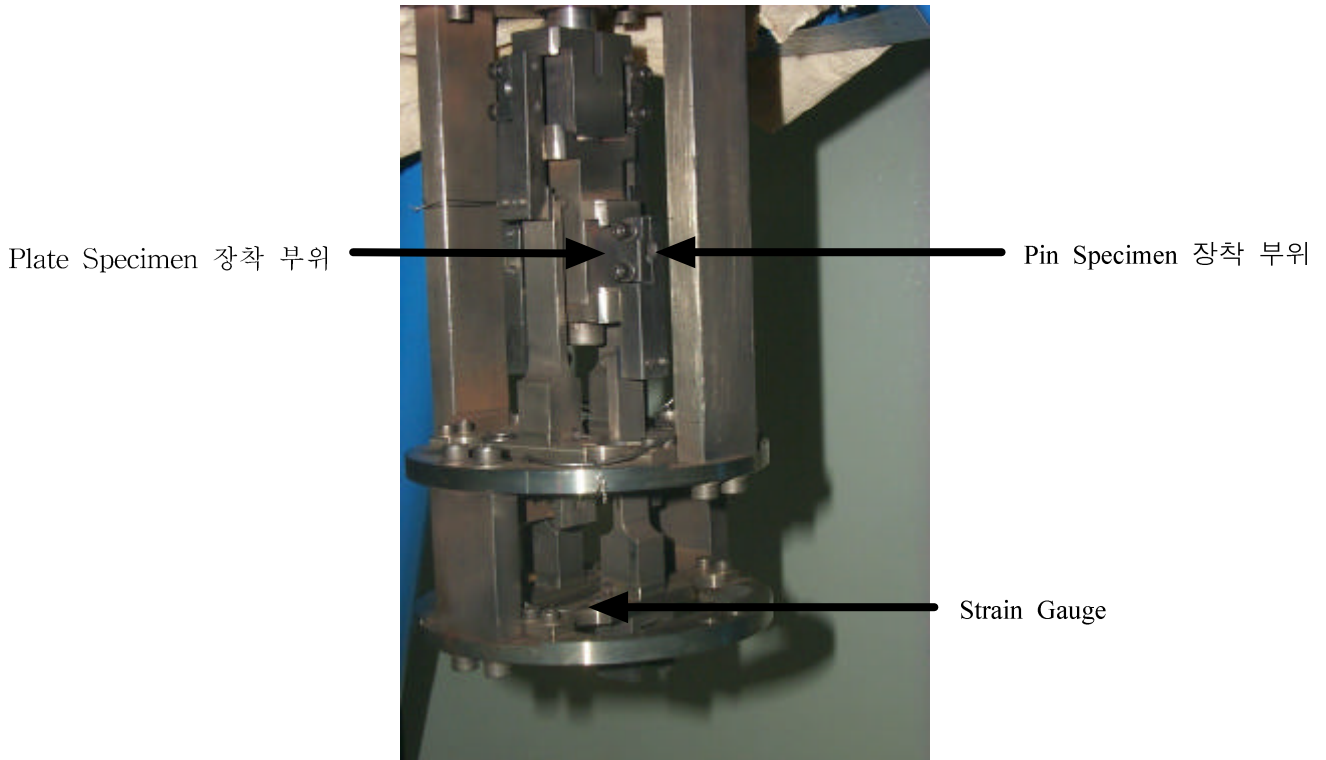


Fig. 6 Reciprocating Tribometer with installed specimens

실험은 냉각재순환펌프의 구동 조건을 맞추기 위하여 3차 증류수를 이용하여 25℃의 물에서 조성을 맞추었으며, 그 조성 분포는 Table 2에 나타내었다.

pH	9.5-10.6 (25℃)
Ammonia	10 ppm
Dissolved Hydrogen	25-50cc/kg H ₂ O
Dissolved Oxygen	<5 ppb
Dissolved Nitrogen	0-100cc/kg H ₂ O
Chloride	<0.05 ppm
Fluoride	<0.05 ppm
Iron	<50ppb

Table 2. Water chemistry

실험은 핀에 각각 400N의 하중을 가하였으며, 플레이트의 이동 속도는 약 5.88mm/sec로 설정하였다. 물의 압력은 147bar로 설정하며, 온도는 120℃로 설정하여 모터를 구동하였다. 물의 온도가 급격히 변하여 시편에 열응력이 발생하는 것을 방지하기 위하여 25℃에서 120℃까지 가열하는데 약 1시간 30분 정도 소요하였다. 그리고 총 마찰 거리가 1km에 도달할 때까지 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마멸량 측정

마멸량을 측정하기 위해서 1/10000g의 정밀도를 가진 전자 저울을 이용하였으며, 실험을 하기전 세척을 한 후 건조 질량을 측정하였으며, 시험 후에도 같은 방법으로 질량을 측정하였다. 시편은 물 속에서 오랫동안 잠겨있기 때문에 시편 속에 물이 침투하는 양을 조사하기 위해서 시편을 48 시간 동안 물 속에 담근 후 건조 질량을 측정하여 보았으나 마멸량에 크게 못 미치는 2/10000g의 차이가 났으나, 이 정도의 낮은 전자 저울의 오차 범위에 속하는 것으로 판단된다. Table 3은 시편의 시험전과 시험후의 질량 및 그 차이를 마멸량으로 나타낸 값이다.

실험	시 편		시험전 질량(g)	시험후 질량(g)	마멸량(g)
1번 실험	SiC 30	Plate	8.3756	8.3736	0.0020
	PG-9723	Plate	8.7154	8.7108	0.0046
2번 실험	PGS200	Plate	7.9114	7.9080	0.0034
	PGS200	Plate	7.9064	7.9036	0.0028

Table 3. Wear losses of SiC30, PG-9723 and PGS200

PG-9723과 PGS200의 편은 마찰 시험 중 디스크 스프링의 하중이 닿는 부분은 깨어지지 않았으나 그 주위에 많은 양이 깨어지는 현상이 일어나 정확한 측정값을 얻을 수는 없었는데, 그 원인은 가공 불량이나 재료 자체의 결함으로 판단되어진다. 그러나 플레이트의 경우 마멸량을 정확하게 측정할 수 있었는데, 세로로 세워진 평판과 순환하는 물 속에서 이루어지는 실험이기 때문에 깨어진 조각이 마찰면에 영향을 주기는 어렵다고 판단되어지기 때문이다. 표에서 얻은 플레이트의 마멸량을 보면 PG-9723이 SiC 30보다 약 2배가 더 많은 마멸량을 나타내고 있으며, 특히 마멸폭을 검사하였을 경우 심한 굽힘 현상이 나타나고 있었다. PGS200의 경우 시편의 불량으로 조립할 때 깨지는 현상이 일어났으며 특히 편인 경우 시험 도중에 부러지는 현상이 일어났으나 마멸폭은 부러지지 않는 것과 거의 일치하는 현상이 일어났다.

마찰이 이루어지는 편인 지름은 5mm이고, 마찰면은 지름 51mm의 구형으로 제작이 되어 마찰이 이루어지면서 조금씩 큰 마멸폭을 가지게 되며 결국 편인 지름인 5mm와 같게 된다. 마멸면 관찰을 위해서 플레이트에서 마멸폭을 측정한 값을 Table 4에 나타내었다.

시험	시편 (plate)		마멸면 폭 (mm)
1번 시험	SiC 30	Pin - SiC30	2.0
	PG-9723	Pin - PG9723	3.84
2번 시험	PGS200	Pin - PGS200	2.79
	PGS200	Pin - PG9723	3.15

Table 4. Wear width of SiC30, PG-9723 and PGS200

SiC30이 PG-9723보다는 1.84mm정도 작고 PGS200보다는 0.79mm 작으며, PG-9723을 핀으로 사용한 PGS200보다는 1.15mm더 작은 값을 나타낸다. 또한 PG-9723의 플레이트의 경우 육안 관찰에서도 쉽게 구별할 수 있는 긁힘 현상이 나타나고 있었다. 긁힘 현상이 일어나는 특정한 부분에서만 마멸이 진행되는 것이다.

3.2 마찰 계수 측정

오실로스코프에서 나오는 데이터를 이용하여 마찰 계수를 구하기 위하여 Fig. 7과 같은 그래프를 이용하였다. Fig. 7은 마찰 거리가 약 10m일 때 SiC30의 마찰력을 추출한 데이터이다.

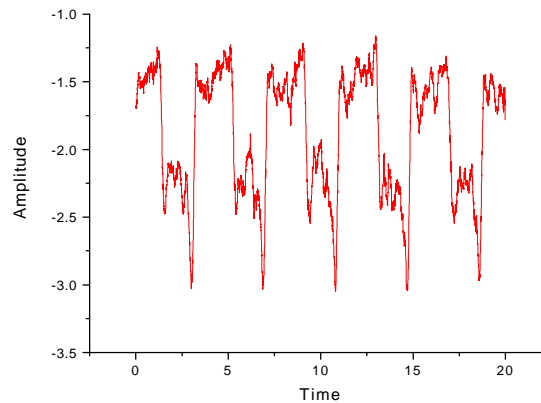


Fig. 7 Graph of data to calculate friction coefficient

Fig. 7에 나타난 값을 이용하여 플레이트가 위로 진행할 때와 아래로 진행할 때 최대값, 최소값을 구하였으며, 마찰계수를 구하기 위해서, 최소 마찰계수 값은 플레이트가 위로 진행할 때의 최저값과 아래로 진행할 때 최고값의 차이로 구한 값이고, 최대 마찰계수 값은 위로 진행할 때의 최고값과 아래로 진행할 때의 최저값의 차이를 구한 값이다. 평균 마찰계수 값은 각각의 진행 방향에서 최고값과 최저값을 평균한 값들의 차이로 구하였다.

3.2.1 PG-9723 마찰 계수

Fig. 8에서 보듯이 초기의 평균 마찰 계수가 0.171에서 시작하여 마찰거리가 70m일때 0.129까지는 지속적인 감소를 보이다가 마찰 거리가 110m 근방에서 최고값인 0.238을 나타낸다. 마찰거리가 230m에서 0.113 이후에는 점진적인 증가를 보이고, 마찰거리가 600m 이후에는 0.135 이하로 안정적인 추세를 보인다. 이러한 결과는 초기에는 표면 돌출부의 마멸로 마찰계수가 작아지지만 지속적인 마멸이 일어나 어느 한 부분만 마멸이 진행되어 마찰계수가 높아졌다가 전체적으로 마멸이 진행되어 마찰계수가 안정을 찾는다고 볼 수 있다. 안정된 값을 가지는 이유로는 표면 흡착층의 형성이 마찰 계수를 줄인다고 보고되었으며[6] 표면 흡착층의 마멸이 높은 마찰계수를 가지게 되고 다시 표면 흡착층의 생성이 마찰계수를 낮춘다. 이러한 현상이 발생하는 것을 그림에서 보듯이 알 수 있었다.

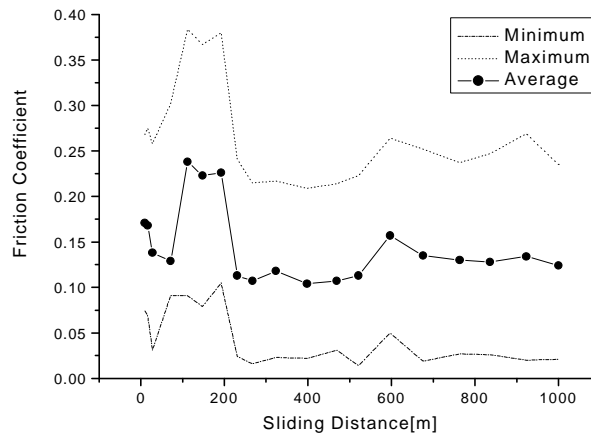


Fig. 8 Friction coefficient of PG-9723

3.2.2. SiC 30 마찰 계수

Fig. 9에서 보듯이 초기의 마찰계수가 0.273에서 지속적인 감소를 보이다가 마찰 거리가 110m 근방에서 최하값인 0.103을 나타내고, 안정적인 추세를 보인다. 이러한 결과는 초기에 표면 거칠기가 마멸되면서 높은 마찰 계수를 나타내지만 마찰이 진행될수록 거친 표면이 마멸로 사라짐으로서 안정적인 마찰계수를 보인다. 안정된 값 이후에 평균 마찰 계수가 일정한 값을 가지지 않는 이유는 표면 흡착층의 영향으로 생각할 수 있으며 표면 돌출부에는 표면 흡착층이 생성되기 전에 마멸로 없어지지만, 이후에는 표면 흡착층의 발달로 낮은 마찰계수를 가지며 표면 흡착층의 마멸이 마찰계수에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 또한 PG-9723과 같은 부분적인 마멸로 인하여 높은 마찰계수가 갑자기 나타나는 현상은 없으며, 마찰 거리가 110m이후의 마찰 계수를 평균적으로 구하여 보면 약 0.115의 값이 나왔다.

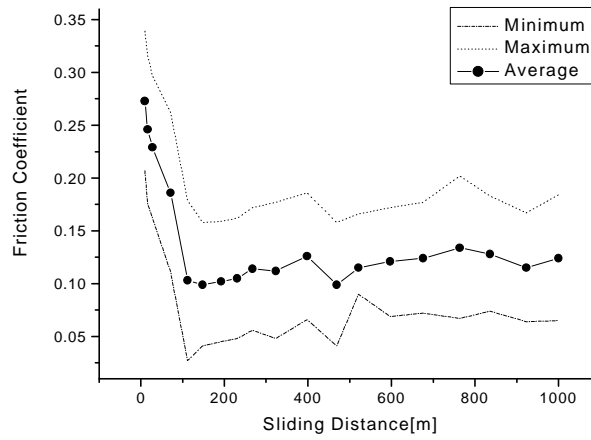


Fig. 9 Friction coefficient of SiC30

3.2.3 PGS200 마찰 계수

Fig. 10은 PGS200의 마찰 계수 변화를 나타낸다. 평균 마찰계수의 변화는 마찰거리가 약 10m 일때 0.193에서 시작을 하여 마찰거리가 475m일때 0.089까지 급격한 변화 없이 서서히 감소를 하다가 이후에는 안정한 형태를 보인다. SiC30과 같은 급격한 감소가 이루어지지 않는 이유는 표면 거칠기의 마멸이 계속적으로 이루어지고 있다는 것을 뜻하며 이것은 표면 돌출부의 마멸이 진행 되기 전에 흡착층 생성이 되어 마멸의 진행을 늦추는 것이며, 이후에 안정적인 값을 찾지 못하는 이유로는 표면 흡착층의 마멸이 진행되는 것이다. 표면 흡착층의 마멸이 진행이 되는 동안은 높은 마찰계수를 가지지만 다시 흡착층이 생기면 마찰계수는 낮게 된다. 475m이후의 값을 평균적으로 구하면 약 0.090로 그 값이 SiC30의 0.115와 PG-9723의 0.124보다 작은 값이 나왔다.

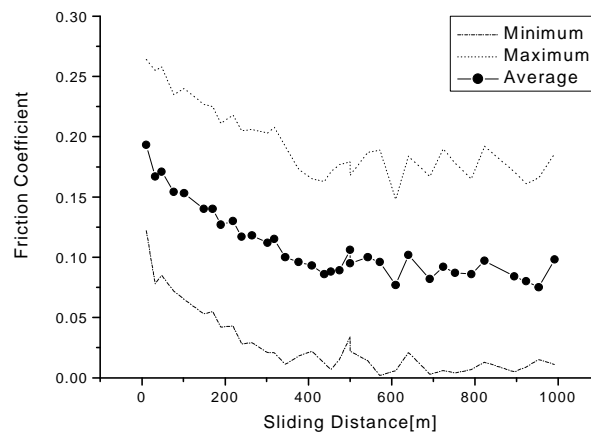


Fig. 10 Friction coefficient of PGS200

4. 결 론

고온, 고압 마찰 및 마모 시험기를 이용하여 120℃, 147bar의 물로 윤활되는 환경에서 SiC30, PGS200과 PG-9723을 상대 비교하여 보았으며, 이 중에서 SiC30이 가장 작은 마멸량을, PGS200이 가장 작은 마찰 계수를 나타내었다. 각 재질별 특징은 다음과 같다.

1. PG-9723의 경우 마찰계수는 초기에 작은 값을 가지지만, 이후 급격히 높아졌다가 다시 감소하는 경향을 보였으며, 그 이유로는 부분적인 마멸이 많이 일어남으로써 마찰 계수를 높게 하고 마멸량도 많아지게 된다. 이후에는 표면 흡착층의 발달이 이루어져 안정적인 마찰 계수를 보인다. 그러나 초기의 마멸이 많이 일어나 결과적으로 가장 많은 마멸량을 나타내었다.

2. SiC30의 경우 높은 마찰 계수는 마찰 거리가 늘어날수록 초기에는 급격히 감소하고 이후에는 표면 흡착층의 영향으로 안정적인 값을 나타낸다. 마찰 거리가 늘어날수록 흡착층의 마멸이 진행된다. 마멸량은 3가지 재질 중 가장 작은 값을 나타내었다.

3. PGS200의 경우 초기의 큰 마찰계수는 거리의 증가에 따라 서서히 감소하여 나가고 안정된다. 이것은 표면 돌출부에 흡착층의 생성으로 초기에 돌출부의 마멸이 늦어지며, 마찰계수가 서서히 감소하게 되는 원인이 된다. 안정적인 마찰 계수는 표면 흡착층의 마멸과 생성으로 요철과 같은 그래프를 그리게 되었다. 평균 마찰 계수에서는 가장 낮은 값을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. K.H. Zum Gahr, "Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel, and steel-steel pairs in lubricated and lubricated contact", *Wear*, 133, pp. 1-22, 1989.
2. J.P. Singh, "Effect of flaws on the fracture behavior of structural ceramics: a review", *Adv. Ceram. Mater.*, 3, pp. 18-27, 1988.
3. K.H. Lee and K.W. Kim, "Effects of humidity and sliding speed on wear properties of Si3N4 ceramics", *Materials Science and Engineering*, A186, pp. 185-191, 1994
4. Shinya Sasaki, "The Effects of Water on Friction and Wear of Ceramics", *JSLE*, 33, 8, pp.620-628, 1985.
5. Yoshikazu Nakamura and Shigekazu Hirayama, "Effect of Liquid Lubricants on the Wear of Gray Cast Iron against Si-Al-O-N Ceramics", *Wear*, 37, pp.91-97, 1990
6. J.F. Li, J.Q. Huang, S.H. Tan, Z.M. Cheng, C.X. Ding, "Tribological properties of silicon carbide under water-lubricated sliding", *WEAR*, Vol. 218, pp. 161-171, 1998
7. 이영제, 김영호, 장선태, "경계윤활 및 무윤활 상태에서 선접촉을 하는 세라믹과 강 의 마찰과 마멸 특성", *한국윤활학회지*, 제12권 제3호 pp. 12-25, 1996
8. 진동규, 박홍식, 전태욱, "알루미나 세라믹스의 순도에 따른 수윤활 기구에 따른 연구", *한국윤활학회지*, 제11권 제4호, pp.13-20, 1995