Journal of the KSTLE Vol. 16, No. 6, December 2000, pp. 409~414
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

고진공하에서의 MoS_2 코팅의 트라이볼로지적 특성

권오원 · 김석삼* · 이상로**

경북대학교 기계공학과 대학원, *경북대학교 기계공학부, **한국기계연구원

Tribological Characteristics of MoS_2 Coatings in High Vacuum

Oh-Won Kwon, Seock-Sam Kim* and Sang-Ro Lee**

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea*
***Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Korea*

Abstract – The friction and wear behaviors of MoS_2 coatings were investigated by using a pin and disk type tester. The experiment was conducted by using silicon nitride as pin material and MoS_2-on-bearing steel as disk material under different operating conditions that include linear sliding velocities in the range of 22~66 mm/sec, normal loads varying from 9.8 N to 29.4 N, corresponding to maximum contact pressures of 1.78~2.83 GPa and atmospheric conditions of high vacuum, medium vacuum, ambient air. The results showed that low friction coefficient of the coating has been identified in high vacuum and that friction coefficient and wear volume increased with increasing normal load. Also at high load conditions, the friction coefficient and wear volume increased with increasing sliding velocity.

Key words – MoS_2, high vacuum, friction coefficient, pin and disk type.

1. 서 론

우주(space)에서 작동하는 기계는 무중력과 대기압에서 초고진공까지 변하는 압력 그리고 -100℃~150℃ 이상의 넓은 범위의 온도변화 및 극심한 먼지와 복사에 의존하는 열전달 등 극한환경에 견딜 수 있는 특성을 가져야 한다[1-2].

이러한 특수 환경 중 고진공 환경하에서의 접촉부의 마찰을 줄이고 수명을 향상하기 위한 윤활제의 개발이 중요한 문제로 대두되고 그에 따른 연구들이 행해져 왔다. 진공하에서 일반 유체 윤활제는 쉽게 증발해 버리거나 윤활제에서 발생한 증기가 장치를 오염시키고 그 성능을 저하시키기도 하므로 적용될 수 없다. 이와 같은 배경에서 고체윤활제를 우주 기계 및 일반 윤활제를 적용할 수 없는 분야에 적용하기 위한 연구들이 많은 사람들에 의해 수행되어 왔다[3-10].

이러한 고체윤활제는 크게 MoS_2, WS_2, graphite 등의 층상(層狀)구조재료, Ag, In, Pb 등의 연질(軟質)금속 및 PTFE 등의 고분자(高分子)재료로 나눌 수 있다[11].

특히 이황화몰리브덴(MoS_2)은 실제로 인공위성 등의 우주항공산업기계와 정밀기계 등의 베어링에 많이 적용되고 있다. 이러한 고체윤활제를 적용하는 방법으로는 분말 상태의 고체윤활제를 일반 윤활제나 그리스 등에 혼합하거나, 금속과 함께 소결하여 복합재로 사용하거나 금속 모재에 결합시켜 피막을 형성하여 사용하는 경우가 있다. 고체윤활제는 기계적 강도가 약하기 때문에 피막의 형태로 부착시켜 사용한다. 이러한 피막의 형성법으로는 간단하게 모재에 고체윤활제 분말을 기계적인 힘을 가하여 문지르는 방법(burnishing)과 본 실험에서 사용된 방법인 고체윤활제 분말을 바인더를 사용하여 모재에 부착시키는 방법(resin-bonded method) 및 증착(sputtering), 이온도금(ion-plating) 등에 의한 침전법(deposition method)등이 사용된다[12].

이미 러시아, 미국 및 일본 등의 선진국에서는 우

주시대에 맞는 새로운 고체윤활제 개발과 그의 실질적인 적용에 대한 연구가 수십 년 전부터 이루어져 왔으며 현재도 계속되고있는 실정이다. 이에 반해 국내에서는 최근 연구가 활발하게 진행되고 있지만 아직 연구자료가 부족한 현실이다. 따라서 기초 자료로써 고체윤활제에 대한 마찰마멸특성에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 진공하에서 우수한 저마찰 특성을 가지는 이황화몰리브덴(MoS_2)을 실제 베어링에 사용되는 고탄소 크롬 베어링강에 코팅하여, 수직하중과 진공도 및 미끄럼속도 변화에 따른 코팅의 마찰·마멸특성을 고찰하고자 한다.

2. 실 험

2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 진공 마찰·마멸 실험기를 Fig. 1에 나타내었다[13].

실험기의 진공챔버(vacuum chamber)는 로터리 펌프(rotary pump)와 확산 펌프(diffusion pump)를 모두 작동시켰을 경우 1.3×10^{-4} *Pa*(10^{-6} Torr)의 진공도가 가능하도록 하였다. 진공 챔버내의 시편 마찰부분은

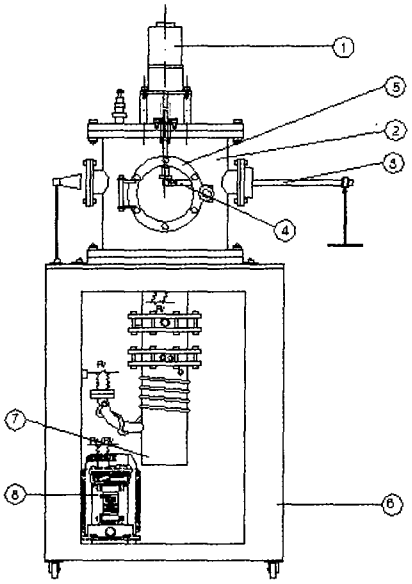


Fig. 1. Schematic diagram of testing apparatus.
① motor ② vacuum chamber
③ dead weight unit ④ loadcell unit ⑤ door
⑥ frame ⑦ diffusion pump ⑧ rotary pump

핀-디스크(pin and disk) 형식으로 모터에 의해 디스크를 회전시켜 고정된 핀과 상대 운동할 수 있도록 하였다. 그리고 핀은 회전 중심에서 7 mm 편심져 있으며, 디스크 접촉면에 직경 14 mm의 마모트랙(wear track)이 발생하도록 하였다.

2-2. 시험편

상부 시편인 디스크 모재는 표준 규격 베어링강인 고탄소 크롬 베어링강(KS STB2)을 사용하였다. 특히 베어링강은 고체윤활제를 사용하기 위한 하부재료로 널리 쓰이고 있다. 디스크는 직경 24 mm, 두께 4.5 mm로 절단하였고 평균거칠기 0.1 μmRa로 연마하였다.

핀 시험편으로는 트라이볼로지 재료로서 가장 유용한 세라믹재료 중 하나인 질화규소(Si_3N_4)를 사용하였다. 직경 5 mm, 길이 30 mm로 가공하였으며 접촉부는 반지름 2.5 mm인 반구(hemispherical)형상으로 가공하였다. Table 1에 시험편의 성질을 나타내었다.

2-3. 코팅

시편제작에 사용된 코팅원액은 이황화몰리브덴 입자, 사불화에틸렌수지(PTFE), 에폭시 수지(Epoxy resin), 수지의 용해 및 분산을 위한 용제인 메틸에틸케톤(MEK)과 입자와 수지가 분리되어 침전하는 것을 방지하고 점도를 높여주기 위한 침강방지제 등으로 이루어져있다. 코팅의 공정순서는 초음파 아세톤 세척을 행한 모재를 코팅원액에 침지(沈漬, dipping)한 후, 꺼내어 200°C에서 30분 정도 건조 및 냉각시킨다. 그리고 침지 과정을 한번 더 반복하여 시험편이 얻어진다. 이러한 공정후의 시험편의 코팅두께는 도막(鍍膜)측정기로 측정하였으며, 평균두께는 10±2 μm로 측정되었다. 그리고 코팅후 디스크의 표면 거칠기는 0.2 μmRa이였다.

Table 1. Properties of specimens

	STB2	Si_3N_4
Vickers hardness, kgf/mm^2	650	1700
Tensile strength, MPa	1379	524
Elastic modulus, GPa	200	320
Density, $\times$ 10^3 kg/m^3	6.37	3.04
Thermal conductivity, W/(mK)	43.25	30
Coefficient of thermal expansion, $\times$ 10^{-6}/°C	12.4	3.3

2-4. 실험방법

수직하중은 9.8 N, 19.6 N 및 29.4 N으로 변화시키고 진공도는 대기(10^5 Pa)에서와 중진공(1.3×10^{-1} Pa), 고진공(1.3×10^{-4} Pa)하에서 그리고 미끄럼 속도는 22 mm/s, 44 mm/s 및 66 mm/s로 변화시켜 실험하였다. 그리고 마멸량의 계산 및 마멸면의 형상을 알기 위해 표면 거칠기 측정기(SURF-500, MITUTOYO)를 사용하고, 이러한 마멸면의 단면곡선을 면적계(Super PLANIXα, TAMAYA)를 이용하여 마멸면적을 구하고 마멸부피를 계산하였다.

실험이 진행되는 동안 마찰력 측정은 장착된 로드셀의 전압변화를 아날로그/디지털 변환기를 이용하여 컴퓨터에 데이터의 형태로 1초마다 저장되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. MoS_2 코팅의 마찰특성

실험초기에 낮은 마찰계수가 나타나다가 미끄럼거리가 증가됨에 따라 마찰계수는 상승하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 접촉분위기와 관계없이 실험초기 접촉표면의 표면거칠기 영향으로 마찰계수가 상승하다가 그러한 거칠기와 표면 산화막 등이 제거되는 길들이기(running-in)과정을 거쳐 안정된 상태가 나타나게 된다. 그리고 계속적인 미끄럼운동으로 인해 안정된 상태를 벗어나 접촉부의 코팅파손으로 인한 마찰계수의 상승이 나타난다. 이러한 코팅파손에 이르는 미끄럼거리는 실험조건에 따라 다른 경향을 보이고 있다.

고체윤활제 특성평가는 유체윤활제의 경계윤활과 비교할 수 있으며 마찰계수가 0.1~0.2를 초과할 때를 코팅파손으로 인한 수명이 다하는 시점으로 보고된 바 있다[11]. 본 실험에서는 고하중의 경우 초기 마찰계수가 0.1이상에서 시작되고, 대기중에서는 실험종료까지 마찰계수가 0.2를 초과하지 않은 경우도 있었다. 따라서 본 연구에서는 마찰계수가 0.15를 초과할 때 까지의 미끄럼거리를 임계거리로 정하였다.

수직하중 9.8 N, 미끄럼속도 22 mm/sec의 조건에서 각각의 진공도에서의 마찰특성을 Fig. 2에 나타내었다. 고진공(1.3×10^{-4} Pa)에서의 경우 정상상태에서의 평균마찰계수가 대기(10^5 Pa)에서와 비교할 때 현저히 낮게 나타났으며 이러한 저마찰특성이 유지되는 임계거리 또한 현저히 길게 나타났다. 대기(Fig. 2(a))에서의 실험에서는 임계거리가 고진공(Fig. 2(c))에서

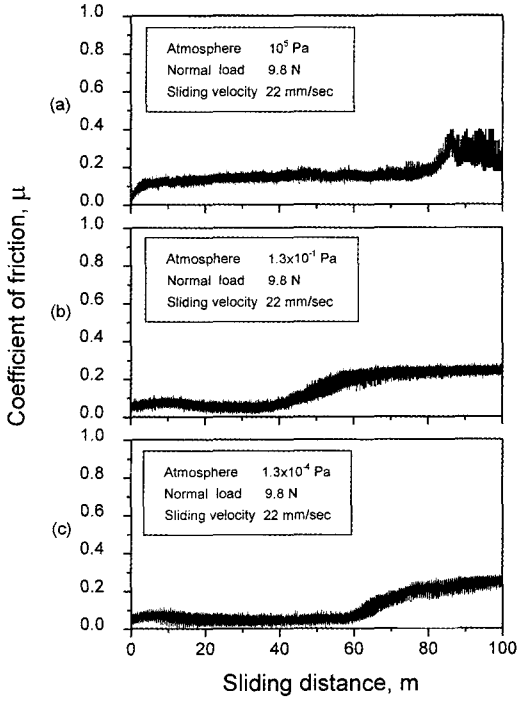


Fig. 2. Variation of the coefficient of friction as a function of the sliding distance.

의 실험에 비해 절반이하로 짧았다.

정상상태에서 고진공의 경우 마찰계수는 0.02~0.05 사이이며, 대기에서는 0.1~0.15 사이의 마찰계수를 나타내고 중진공(1.3×10^{-1} Pa)의 경우에는 고진공과 대기의 중간치 정도인 0.08~0.1 사이의 마찰계수를 나타내었다.

이러한 결과를 통해 이황화몰리브덴 코팅은 고진공분위기에서 저마찰의 고유특성을 확인할 수 있다. 이러한 진공도 변화에 따른 마찰특성 변화의 주요인은 산소와 수증기의 영향이다. 대기중에서는 접촉면의 산소와 수증기 등이 이황화몰리브덴 결정구조의 기본방위를 변화시키고 원자 입자들간의 무질서를 유발시켜 원자구조의 결정성을 변화시키게 된다고 보고되고 있다[7].

고체윤활제의 평균마찰계수는 일정하중까지 수직하중의 증가에 따라 낮아지며 반대로 수명은 수직하중의 증가에 따라 크게 감소하는 것으로 보고되고 있다[10]. 그러나 정상상태의 평균마찰계수가 수직하중의 증가에 따라 감소하는 것은 저하중이나 낮은 접촉압력의 경우에 두드러지며, 본 실험에서 최대 헤르쯔 접촉압력을 계산해 보면 1.78~2.83 GPa로서 큰

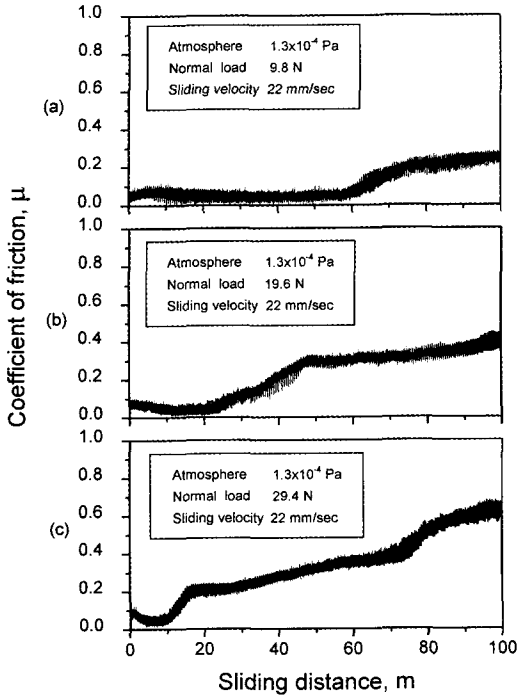


Fig. 3. Variation of the coefficient of friction as a function of the sliding distance.

값을 가지게 되어 그러한 경향이 거의 관찰되지 않았다.

고진공, 미끄럼속도 22 mm/sec의 조건에서 각각의 수직하중에서의 마찰특성을 Fig. 3에 나타내었다. 수직하중 9.8 N에서의 실험결과는 29.4 N에서와 비교할 때 정상상태를 유지하는 임계거리가 매우 길었다.

이러한 현상은 수직하중에 의한 접촉부의 국부적인 소성변형으로 인해 코팅이 하중을 지지하지 못하여 플라우잉(plowing) 현상이 발생함으로써 이황화몰리브덴 고유의 특성이 발휘되지 못하고 높은 마찰계수가 나타나는 것으로 보여진다. 이러한 경향은 고속의 조건에서 더욱 두드러진다.

3-2. MoS_2 코팅의 마멸특성

수직하중이 일정한 경우, Fig. 4와 Fig. 5의 그림에서 고진공하에서의 경우가 대기상태에 비해 마멸량이 적게 나타나고 있다. 이것은 이황화몰리브덴의 저마찰특성이 마멸량 감소의 주요인으로 판단된다. 즉, 진공에서는 산소와 기타 불순물의 상대적인 부재(不在)로 인해 낮은 전단강도를 가진 이황화몰리브덴의 고유특성이 잘 나타나고 있다. 그리고 Fig. 5에서 보

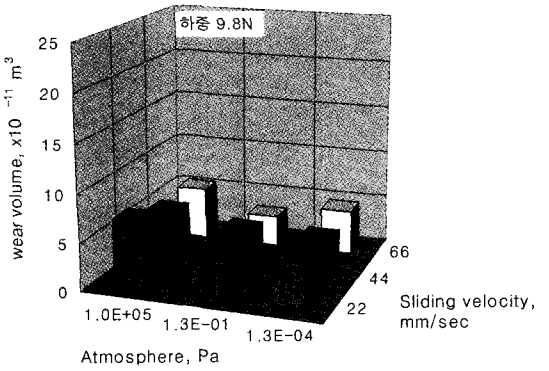


Fig. 4. Wear volume of MoS_2 coated disk.

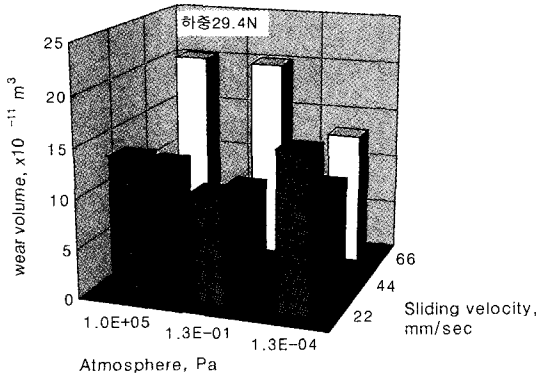


Fig. 5. Wear volume of MoS_2 coated disk.

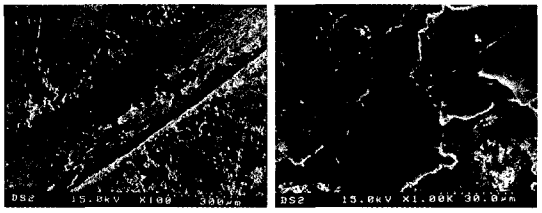
는 것과 같이 고하중에서의 경우 미끄럼속도를 고속으로 변화시켰을 경우 마멸량이 급격히 증가하였다.

이것은 고하중으로 인하여 이황화몰리브덴의 고유특성보다 모재의 영향이 나타났다고 보여진다.

3-3. 마멸면의 미시적 관찰

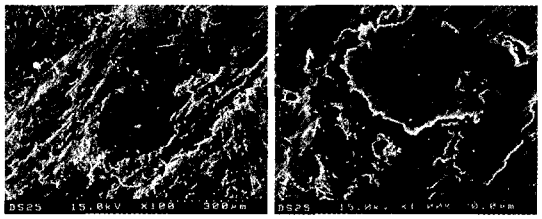
이황화몰리브덴(MoS_2) 코팅의 미시적 마멸현상의 관찰을 위하여 주사식 전자 현미경을 사용하였다. 고진공(1.3×10^{-4}Pa), 수직하중 9.8 N에서 실험한 마멸면을 Fig. 6에 나타내었다. 이황화몰리브덴 코팅층의 소성유동(plastic-flow) 현상으로 전단력에 의한 코팅의 변형을 알 수 있으며, 저마찰 효과의 주기구임을 확인할 수 있다.

고진공(1.3×10^{-4}Pa), 수직하중 29.4 N에서 실험한 마멸면을 Fig. 7에 나타내었다. 저하중과는 달리 강한 표면 돌기가 지나간 흔적이 보이고 있으며, 소성유동에서 수직하중으로 인한 표면돌기의 경도차로 발생하는 연삭(abrasive) 마멸기구가 나타났다.



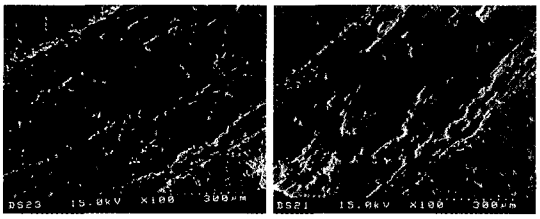
(a) X 100배 (b) X 1000배

Fig. 6. SEM photograph of the worn surface for MoS_2 coating (normal load : 9.8 N, sliding velocity : 44 mm/sec, atmosphere: high vacuum).



(a) X 100배 (b) X 1000배

Fig. 7. SEM photograph of the worn surface for MoS_2 coating (normal load : 29.4 N, sliding velocity : 44 mm/sec, atmosphere: high vacuum).



(a) 22mm/sec (b) 66mm/sec

Fig. 8. SEM photograph of the worn surface for MoS_2 coating (normal load : 29.4 N, atmosphere : high vacuum).

미끄럼속도를 변화시켰을 경우 수직하중 9.8 N의 경우에서는 마찰 및 마멸특성에서 고찰하였듯이 미끄럼속도에 관계없이 동일한 마멸형태를 나타내었다. 반면 고하중에서는 Fig. 8에서와 같이 미끄럼속도의 증가에 따라 하중의 영향으로 인해 마멸흔적이 심해지는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 고하중에 따른 심한 소성변형과 고속의 미끄러짐에 수반되는 열적 변형까지 동시에 발생한 것으로 보여진다.

4. 결 론

실험을 통하여 얻어진 결과를 다음과 같이 요약하였다.

1. 이황화몰리브덴(MoS_2) 코팅은 고진공하에서 고유의 저마찰특성이 잘 나타났다. (μ : 0.02~0.05)
2. 대기중에서 이황화몰리브덴 코팅은 산소와 수증기등의 영향으로 높은 마찰계수를 나타내었다(μ : 0.1~0.15).
3. 초기 접촉압력이 높은 본 실험의 조건에서 이황화몰리브덴 코팅은 수직하중의 증가에 따라 마찰계수와 마멸량이 증가하였다.
4. 고하중의 경우 미끄럼속도가 증가할수록 이황화몰리브덴 코팅은 마찰계수 및 마멸량이 증가하였다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단 외국석학과의 공동연구과제(1997-011-E00024) 연구비에 의하여 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. A. C. Tribble, The Space Environment-Implications for Spacecraft Design, Princeton university Press, 1995.
2. P. D. Fleischauer, "Tribology in the space environment," New Directions in Tribology-Plenary and invited papers from the first World Tribology Congress, pp. 217-227, 1997.
3. R. L. Fusaro, "Lubrication of Space Systems," J. of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 51, pp. 182-194, 1995.
4. E. W. Roberts, "Thin Solid lubricant films in space," Tribology International, Vol. 23, pp. 95-104, 1990.
5. 金亨貪, 全泰玉, 加藤康司, "초고진공 중에서 연질금속의 Tribo-Coating에 관한 윤활특성," 한국윤활학회지, 제10권, 제3호, pp. 18-28, 1994.
6. K. Kato, H. Furuyama and M. Mizumoto, "The Fundamental Properties of Tribo-Coating Films in Ultra High Vacuum," Proc. of Japan International Tribology Conference.Nagoya, pp. 261-266, 1990.
7. C. Donnet, J. M. Martin, T. L. Mogne and M. Belin, "Super-low friction of MoS_2 coatings in various environments," Tribology International, Vol. 29, pp. 123-128, 1996.
8. H. Kong, H. G. Han, E. S. Yoon, O. K. Kwon and N. K. Myshkin, "Evaluation of the wear life of MoS_2-bonded-films in tribo-testers with different contact configuration," Wear, Vol. 215, pp. 25-33, 1998.

9. J. P. G. Farr, "Molybdenum disulfide in Lubrication. A Review," Wear, Vol. 35, pp. 1-22, 1975.
10. A. J. Haltner and C. S. Oliver, "The frictional properties of some solid lubricant films under high load," J. Chem. Eng. Data, Vol. 6, pp. 128-130, 1961.
11. 日本潤滑學會, 新材料の トライボロジー, 養賢堂, 1991.
12. K. Holmberg, A. Mattews, Coatings Tribology, Elsevier Tribology Series, 1994.
13. 김석삼, 권오원, "고진공하에서 소재의 마찰 및 마멸 실험장치," 대한민국특허, 출원번호 10-1999-33223호, 1999.