

각종 응용환경에서 WS₂ 고체윤활제의 마찰 계수

신 동우, 윤 대현, 최 인혁*, 김 인섭**

경상대학교 재료공학부 무기복합재료연구실, 생산기술연구소, 경남 진주 660-701

* 한화기계 (주) 연구소, 경남 창원 641-050

** 국립요업기술원 제품과, 서울 152-023

Factors Controlling Friction Coefficient of WS₂ Solid Lubricant

Dong-Woo Shin, Dae-Hyun Yoon, In-hyuck Chair* and In-Sub Kim**

Kyongsang National University, Division of Materials Science and Engineering,
Ceramic Matrix Composites Lab., RIIT, Kyongnam, Chinju 660-701, Korea

* Hanwha Machinery Co., Ltd. Research Center, Kyongnam 641-050

** National Institute of Ceramic Technology, Seoul 152-023, Korea

ABSTRACT

The tribological behaviour of WS₂ solid lubricant was investigated using a ball-on-disk type tester. The WS₂ powder was spray-coated at room temperature and the effects of specimen configuration, atmosphere, applied load and rotating speed on the friction coefficient was examined. WS₂ coated ball and disk showed the lowest friction coefficient of 0.05 in the nitrogen atmosphere under 0.3 kgf and 100 rpm, whereas relatively high coefficient of 0.1 ~ 0.15 was observed in air atmosphere. This confirmed that the spray-coated WS₂ solid lubricant was effective in reducing the friction coefficient and improving wear life in nitrogen atmosphere.

Keywords : Friction coefficient, Wear life, Nitrogen atmosphere, WS₂ lubricant

요 약

이황화텅스텐(WS₂, Tungsten disulfide)을 고탄소크롬강 모재위에 코팅한 후 ball-on-disk형 마찰·마모시험기를 이용하여 시편구성, 분위기, 가압하중, 회전속도를 변수로하여 마찰계수를 측정하였다. 질소분위기하에서 0.3 kgf의 가압하중과 100 rpm의

회전속도로 시험한 결과, 가장 양호한 마찰계수 0.05를 나타내었다. 공기중(수분함량 50~60%)분위기에서는 마찰계수 0.1~0.15를 나타내었다. 위의 결과로부터 공기중의 산소와 수분이 WS₂의 윤활 효과 감소에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

1. 서론

고체윤활제로 쓰일 수 있는 재료에는 층상구조나 lamella 구조를 가지는 graphite, MoS₂, WS₂ 등이 있다. graphite는 약간의 수분 또는 압축성 기체가 존재하는 대기압 하에서는 매우 낮은 마찰계수(약 0.06~0.1)를 나타내지만 진공이나 고온에서는 윤활 특성이 현저히 떨어진다. 이와는 달리 MoS₂는 진공에서 마찰계수가 낮은 장점은 있으나 내산화성이 낮아서 고온에서의 사용이 제한되며, 습도 등의 작동환경에 따라 마찰계수가 민감하게 변한다. WS₂는 graphite 나 MoS₂에 비해 내산화성이 크고, -273℃~650℃까지 낮은 마찰계수를 나타내며 진공상태에서는 1000℃까지 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다[1].

이러한 고체윤활제들은 자기 윤활 특성을 나타내도록 하기 위하여 금속이나 고분자 매트릭스에 첨가하여 복합체를 만들거나, 모재위에 얇은 막을 결합시키거나 코팅하는 방법으로 사용되어 왔다[2]. 금속 모재위에 고순도의 일정한 두께의 얇은 막을 형성하기 위하여 펄스 레이저 증착 (PLD)을 사용한 보고가 있으며, PLD WS₂ 경우, 공기중 상대습도 55~60% 조건에서 마찰계수가 0.1~0.15이며 마모수명은 4300 cycle 이하, 질소분위기에서는 마찰계수가 0.03~0.04이며 마모수명은 70,000 cycle 이상으로 보고하였다[2, 3].

본 연구는 자체 합성한 WS₂ 고체윤활제 분말을 염가의 코팅 방법으로 각종 접동부에 코팅하여 그 마찰·마모 특성을 평가하여 현장에 적용하는데 있다. 이를 위하여 합성 WS₂ 분말을 상온에서 건식 스프레이 방식으로 금속 모재위에 코팅하여 ball-on-disk 형태의 마찰·마모 시험기를 통하여, 시편구성, 분위기, 가압하중, 회전속도에 따른 합성 WS₂ 고체윤활제의 마찰·마모 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 모재시편의 준비

본 연구의 실험 과정은 먼저 WS₂를 코팅할 모재로 일반 베어링강인 고탄소크롬강 (SUJ 2)을 사용하였다. 마찰시편의 모재로 사용된 볼의 지름은 3/8 inch이며 디스크는 외경 58 mm, 내경 25 mm, 두께 5 mm 이었다. 볼은 일반 베어링에 사용되는 경면의 상용볼을 사용하였으며, 디스크 시편은 디스크 형태로 자른 후 300번 연마지석으로 연마하였다. 이렇게 거친 연마지로 연마한 이유는 연마흔들이 WS₂ 코팅층을 모재에 고정시켜 코팅층의 마모수명을 향상시키도록 하기 위함이다. 연마된 시편을 먼저나 이물질을 제거하기 위하여 알코올로 초음파 세척한 후 건조기에 건조하였다.

2.2 WS₂ 코팅

완전히 건조된 모재시편을 상온에서 건식 스프레이 방식의 코팅장비를 이용하여 WS₂ 분말로 코팅하였다. 사용된 WS₂ 분말은 본 연구실에서 합성한 것으로서 물리적, 화학적 특성을 표 1에 나타내었다. 챔버에서 WS₂ 분말을 입자로 스프레이시켜 스프레이 건으로 보낸 후 압축공기를 이용하여 고속으로 분사시켰다. 고속으로 분사된 WS₂ 입자들이 시편의 표면에 균일하게 코팅되고 나머지는 챔버로 다시 회수되었다. WS₂ 코팅전후의 디스크 시편의 표면과 표면거칠기를 광학현미경 및 표면조도기를 사용하여 관찰하였다.

Table 1. The characteristics of synthesized WS₂ powder.

Distribution of particle size (Average size)	Shape of particle	Phase of crystal
0.5 ~ 50 μm (12.6 μm)	platy (well-defined)	2H-WS ₂

2.3 마찰·마모 시험

시편의 구성은 코팅하지 않은 볼과 디스크(이하 N+N), 코팅하지 않은 볼과 코팅한 디스크(이하 N+C), 코팅한 볼과 디스크(이하 C+C)로 하였다. 사용된 마찰·마모시험기는 ball-on-disk형의 시험기로서 최고 회전수는 500 rpm까지 변화시킬 수 있으며 하중은 분동을 사용하여 조절할 수 있다. 또한 질소분위기 및 공기중 분위기에서 측정이 가능한 장치이다. 사용된 ball-on-disk형 시험기의 모식도를 그림 1에 도시하였다. 질소분위기에서 시험

을 하는 경우 진공 펌프로 공기를 제거시킨 후, 질소 가스로 3회 purging하고 시험

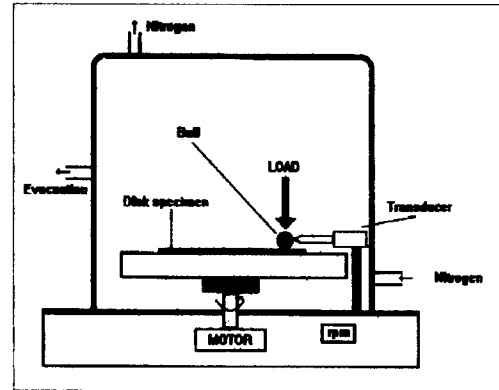


Fig. 1. Schematic of the ball-on-disk type friction tester.

을 진행하였다. 시험 도중 마찰력의 증가로 심한 진동이나 소음이 발생할 경우 시험을 중단하였다. 시편구성, 분위기, 하중, 회전속도를 변수로하여 마찰·마모 시험을 행한 후, 디스크 시편의 마모트랙(wear track) 부분의 마모흔을 SEM으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모재시편의 WS₂ 코팅 전후의 표면

디스크 시편의 WS₂ 코팅 전후의 표면 거칠기를 측정된 결과, 300번 연마시적으로 연마한 후의 디스크 시편의 평균 표면조도는 0.2 μm 이고 최대 표면조도는 4.0 μm 이었다. 그러나 WS₂로 코팅처리한 후 디스크 시편의 평균 표면조도는 0.1 μm 이었으며 최대 표면조도는 1.6 μm 이었다. 그림 2에 코팅전후의 디스크 표면의 광학현미경 사진을 나타내었다. (a)는 코팅전 디스크 시

편의 광학현미경 사진으로서 연마휠의 연마흔이 그대로 남아 있음을 보여주고 있다. (b)는 코팅후의 디스크 시편의 광학현미경 사진으로 연마흔들이 WS_2 입자로 코팅되어 표면 상태가 매끄러워져 있음을 보여주고 있다. 표면거칠기 측정에서도 알 수 있듯이, 코팅 후 모재시편의 평균조도 및 최대 표면조도 값이 약 $\frac{1}{2}$ 로 감소하였다.

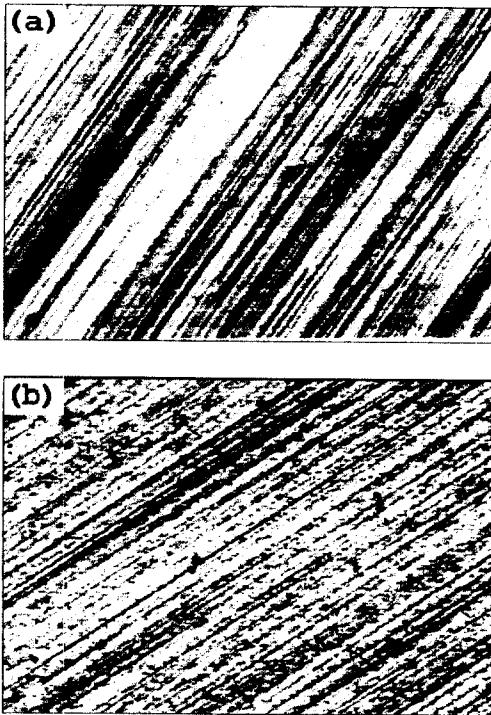


Fig. 2. Optical micrographs showing (a) as-ground and (b) WS_2 coated surfaces of disk ($200\times$)

3.2 시편구성에 따른 마찰·마모 거동

질소분위기하에서 가압하중 0.3 kgf, 회

전속도 100 rpm의 조건으로 시험한 C+C, N+C, N+N 시편 구성의 마찰·마모 거동을 그림 3에 도시하였다. 그림에서 보는 것과 같이 안정된 마찰·마모 거동을 나타

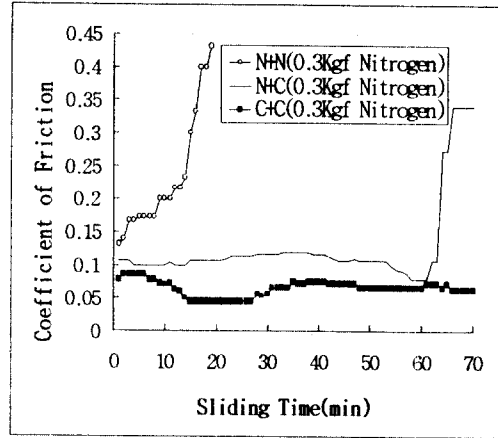


Fig. 3. Effect of specimen configuration on friction coefficient with respect to the sliding time under 0.3 kgf load in N_2 gas atmosphere.

내는 순서는 C+C, N+C, N+N 이었다. N+C 시편의 경우 60분이 경과할 때까지 다소 높은 마찰계수를 유지하며 C+C 시편 구성과 유사한 거동을 나타내지만 그 이후에는 마찰계수가 급격히 증가하여 코팅층의 마모수명은 매우 짧은 것을 나타낸다. 이러한 결과로부터 접동되는 상대면도 동시에 코팅되어야 유효효과를 오래 지속시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 분위기에 따른 마찰·마모 거동

그림 4에 질소분위기 및 공기중에서의 WS_2 코팅시편의 마찰계수 측정 결과를 도시하였다. C+C 시편구성으로 0.3 kgf의 가압하중과 100 rpm의 회전속도로 각각 질소분위기와 공기중에서 접동시켰을 경우, 공기중에서는 초기에 0.1 정도의 마찰

계수를 나타내다가 15분 경과후에는 마찰계수 값이 0.13으로 증가하여 정상상태를 이루다가 30분이 지나면 마찰계수 값이 급격히 증가하기 시작하여 40분 후에 심한 진동과 소음이 발생하며 마찰계수 값이 0.4에 도달했다. 즉 마모수명이 4000 cycle 이다. 질소분위기의 경우, 일시적으로 마찰저항이 증가되다가도 곧바로 안정된 상태를 반복하며 0.05~0.1 사이의 마찰계수를 유지하면서 400분이 지나도록 전반적으로 안정된 마찰·마모거동을 나타내고 있다. 450분이 경과한 후 마찰저항이 증가하기 시작하여 45,000 cycle의 마모수명을 나타낸다. 즉 공기중 분위기에 비하여 질소분위기에서 마찰계수가 약 1/3 정도로 낮으며, 마모수명은 10배 이상 길다는 것을 알 수 있다.

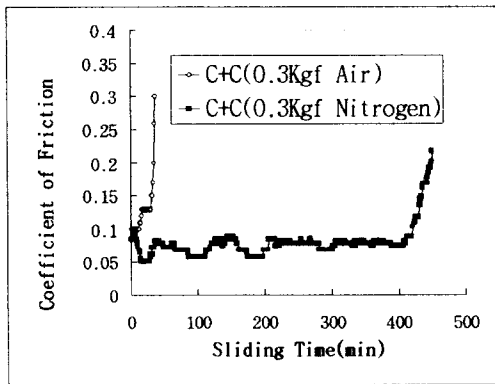


Fig. 4. Change of friction coefficient in air and nitrogen gas atmospheres.

3.4 회전속도에 따른 마찰·마모 거동

회전속도에 따른 마찰계수의 변화를 알아보기 위하여 C+C의 시편구성을 가압하중 0.3 kgf의 조건으로 질소분위기 및 공기중

에서 회전속도를 50 rpm 에서 400 rpm까지 변화시키며 접동시킨 결과를 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보듯이 질소분위기와 공기중에서 회전속도의 변화에 따른

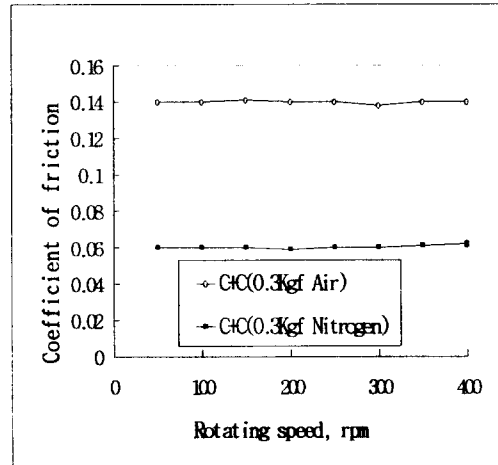


Fig. 5. Friction coefficient as a function of rotating speed under 0.3 kgf load in air and nitrogen atmospheres.

마찰계수의 변화는 거의 없다. 아주 미소하기는 하지만 마찰계수가 공기중 분위기 하에서 다소 감소하고, 질소분위기에서는 다소 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 공기중 분위기하에서는 회전속도가 빨라짐에 따라 마찰열이 커져서 공기중의 수분의 일부가 증발하기 때문이다. 그러나 WS₂ 코팅층의 마찰·마모 거동은 회전속도와는 거의 무관함을 알 수 있다.

3.5 하중에 따른 마찰·마모 거동

하중변화에 따른 마찰계수의 변화를 알아보기 위하여 C+C 시편구성으로 질소분위기에서 회전속도 100 rpm의 동일조건하에 0.3 kgf의 하중을 가한 경우와 0.5 kgf

의 하중을 가한 경우의 시험 결과를 그림 6에 도시하였다. 0.3 kgf의 하중을 가한 경우 안정된 마모거동을 나타내는데 비하여 0.5 kgf의 하중을 가한 경우 60분이 경과되면 마찰저항이 증가하기 시작하였다. 이는 가압하중이 증가함에 따라 접동부와 접동부 사이의 진접촉면적이 하중에 비례하여 늘어나지 못하기 때문이라고 생각된다. WS₂ 코팅층의 유효성이 장시간 유지되기 위해서는 접동부와 접동부의 접촉형태에 관계없이 저하중의 경우가 좋은 조건임을 알 수 있다.

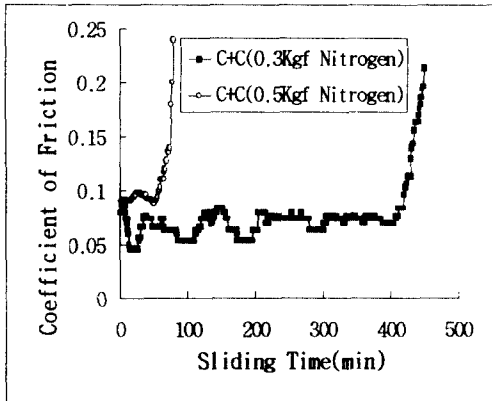


Fig. 6. Friction coefficient with respect to the loads of 0.3 kgf and 0.5 kgf in nitrogen atmosphere.

3.6 마모흔 관찰

그림 7는 마찰·마모 시험 후 디스크 시편의 마모트랙(wear track) 부분의 마모흔(wear scar)을 SEM으로 관찰한 사진이다. (a)는 C+C 시편구성으로 질소분위기에서 0.3 kgf의 가압하중과 회전속도 100 rpm 에서 450분간 시험한 후의 마모트랙

을 나타낸 것이다. 마모트랙 내에 부분적으로 마모가 많이 진행된 부분과 WS₂ 코팅층이 smooth한 면을 이루고 있는 부분으로 이루어져 있음을 알 수 있다. (b)는 C+C 시편구성으로 공기중에서 0.3kgf의 하중과 회전속도 100rpm에서 40분간 시험한 후의 마모트랙을 나타낸 것이다. 흰 반점 형태로 보이는 부분은 WS₂ 코팅층이 마모로 인하여 제거되어진 후 모재의 입자들까지 탈락된 것이다. 마모시간이 40분이지만 마모시간이 450분인 (a)와 비교해보면 탈락된 입자부분이 더 많고 그 크기도 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 마모트랙내의 평평한 면도 grooving 마모가 진행된 흔적을 관찰할 수 있다. 즉, 공기중에서는 생성된 WO₃나 황산의 영향으로 연마마모가 일어나며 WS₂ 코팅층이 쉽게 제거되어져 유효효과를 장시간 지속시키기 어렵다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

SUJ 2 모재 시편에 WS₂를 건식 스프레이 방식으로 코팅하여 분위기, 가압하중, 회전속도, 시편구성을 변수로하여 ball-on-disk형 마모시험기로 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 불과 디스크를 WS₂ 코팅하여 질소분위기의 낮은 하중 (0.3 kgf) 조건에서 시험한 결과, 가장 양호한 마찰계수 0.05와 마모수명 45000 cycle을 나타내었다.
- 2) 공기중에서는 질소분위기에 비하여 WS₂ 코팅층의 마찰계수는 3배이상 증가하였고 마모수명은 1/10 이하로 감소하였다.

3) 위의 결과로부터 공기중의 산소와 수분이 WS_2 고체윤활제의 마찰·마모 거동에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산·학·연 컨소시엄 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. P. M. Magie, "A Review of the

Properties and Potentials of The New Heavy Metal Derivative Solid Lubricants," Bemol Inc., Newton Massachusetts.

2. S. V. Prasad, J. S. Zabinski, "Pulsed-laser deposition of tungsten disulphide films on aluminium metal-matrix composite substrates," J. Mater. Sci. Lett., 11, 1282-1284 (1992).
3. S. V. Prasad, J. S. Zabinski, "Tribology of tungsten disulphide (WS_2) : characterization of wear-induced transfer films," J. Mater. Sci. Lett., 12, 1413-1415 (1993).