

은 박막의 미끄럼 마찰거동에 대한 실험적 고찰

양승호 , 공호성 , 윤의성 , 김대은*
한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터
*연세대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Frictional Behavior of Silver Coating Films at Sliding Surfaces

Seung Ho Yang, Hosung Kong, Eui-Sung Yoon, Dae Eun Kim*

Tribology Research Center, KIST

**Department of Mechanical Engineering, Yonsei University*

Abstract - An experimental study was performed to discover the effect of silver coating on the frictional behavior of SM45C steel at sliding surfaces. Pure silver was coated the SM45C disk surfaces by a thermal evaporation method. Experiments using a pin-on-disk test-rig was performed under dry air and various humidity conditions. Friction coefficients increased to a high and unstable value after failure of coating, and friction coefficients increased with increasing the thickness of silver coated layer. But optimum coating thickness was not observed.

Key Words : silver coating, sliding testing, thermal evaporation coating, agglomeration of particles, humidity.

1. 서론

고체윤활제는 고진공 등 기존의 유체 윤활로는 목표하는 윤활 특성을 얻을 수 없을 때 사용된다[1]. 연금속 피막은 고체 윤활의 한 방법으로서 최근에 MEMS등에의 적용 연구가 이루어지고 있는 분야이다[2]. 특히, 전단강도가 낮은 은, 납, 주석등을 박막의 형태로 마찰 표면에 적용하여 마찰계수를 낮춤으로서 윤활특성을 담당케 하려는 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되

었으며[3,4], 경한 모재에 연금속 박막을 코팅하여 실험한 경우 최저의 마찰 계수를 보이는 최적코팅 두께가 존재한다는 사실이 발표되었다[5,6].

실제로, 은, 주석, 납등을 코팅한 베어링의 구름저항과 관련된 일련의 연구결과[7,8]를 통하여 초기 코팅층 파손 후 구름저항이 낮고 안정한 값을 보임을 알 수 있었는데(Fig. 1), 이는 물질전이에 의하여 형성된 접촉평탄부(contact patch)가 셰이크다운(shakedown)되어 나타나는 현상임을

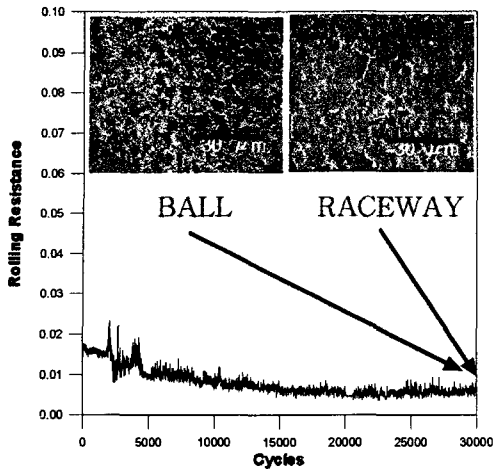


Fig. 1. Rolling resistance vs. contact cycles for a silver coated specimen and SEM images of contact surfaces [9].

밝혔다. 또한 최저의 구름저항을 보이는 최적두께의 존재가 실험적으로 확인된 바 있으며, 환경의 변화가 구름저항에 미치는 영향에 대한 연구[9,10]를 통하여 연금속의 물질전이 및 입자영집 현상이 구름저항에 밀접하게 관련되어있다는 사실을 실험적으로 증명한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 연금속 박막이 미끄럼 마찰거동에 미치는 영향을 실험적으로 알아보기 위하여 마찰 표면에 은 박막을 형성시킨 후 Pin-on-disk 타입의 마찰 실험을 실시하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 실험방법

본 논문에서는 SM45C 디스크 시편의 표면에 순수한 은(silver)을 코팅한 후 일방향 마찰 시 나타나는 마찰계수를 측정하였고, 실험 후 접촉 표면을 분석하기 위하여 광학 현미경분석을 시행하였다.

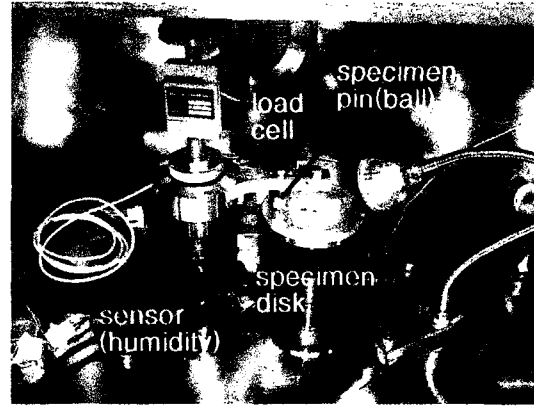


Fig. 2. A close-up view of the tribo-tester.

Fig. 2에는 본 연구에 사용된 실험장치를 나타내었다. 본 실험장치는 인위적으로 진공 및 분위기 조절이 가능한 용기(chamber) 내에서 실험을 실시할 수 있게 제작되었으며 부하변동 시 일정한 회전속도를 얻기 위하여 servo motor를 채용하였고 볼의 편심 발생 및 이에 따른 구름저항의 변화를 없애기 위하여 회전 관성 모멘트가 큰 상부시편 홀더를 사용하였다[4,5].

본 실험에서는 추에 의한 하중 부과 방식을 사용하였으며 윤활유를 완전히 제거한 조건에서 사용하였다.

시편으로는 직경 110 mm, 두께 6 mm의 SM45C 디스크를 열처리에 의하여 표면경도를 HRC 18 - 24로 맞춘 다음, 최종 표면거칠기가 Ra 0.1 μm 가 되도록 연마/세척 후 코팅하여 사용하였으며, 시편 볼은 재질 EN 31(grade 25; extra polished), 경도 HRC 65인 SKF사의 제품을 사용하였다 로드셀(최대하중 20 N)을 사용하여 마찰계수를 측정하였다. 이때, 측정된 접선력(F_t)을 수직력(F_n)으로 나눈 값을 마찰계수

(friction coefficient)으로 사용하였다.

$$\text{마찰계수} = \frac{\text{접선력}}{\text{수직력}} = \frac{F_t}{F_n}$$

Table 1. Test conditions

	Conditions
Normal load (N)	4.9, 9.8, 19.6, 39.2
Velocity (mm/sec)	73
Temperature (°C)	15 ~ 30
Environmental conditions	ambient air
	dry air (< 10%)
	controlled humidity conditions
	(RH=30%, 60%, 90%)

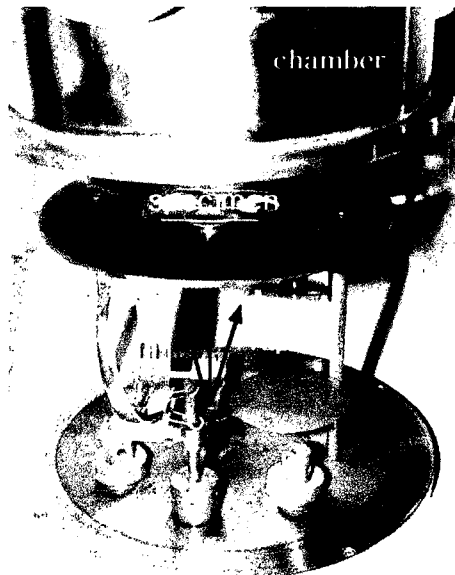


Fig. 3. Thermal evaporation coating device: coating part in a chamber.

실험환경은 대기(ambient air), 건조공기(dry air) 및 조절된 습도 조건에서 각각 실행하였다. 상대습도는 digital hygrometer (polymer thin film type)를 사용하여 측정하였으며, 건조공기(dry air)와 수증기(water vapor)의 chamber내 투입량을 PLC(programmable logic controller)를 사용하여 제어함으로써 실험시의 상대습도를 일정하게 조절하여 실험하였다. 상세한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

코팅용 시편으로는 SM45C 디스크를 사용하였으며 가열증발 증착 (thermal evaporation coating)법에 의하여 순도 99.999%의 은을 박막의 형태로 증착하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 가열증발 증착 장치를 Fig. 3에 나타내었다.

시편은 증착 전 및 증착 후 헥산(hexane)을 사용하여 초음파 세척한 후 질소가스로 세척하였으며 최종적으로 실험장치에 장착 후 진공분위기(4×10^{-5} torr)에서 5분간 유지하여 최종 세척한 후 Table 1과 같이 실험조건을 조절하여 실험하였다.

코팅두께는 시편 증착 시 증착 장치에 함께 장입하여 코팅한 slide glass의 코팅

Table 2. Surface roughness and coating thickness of specimens

		Measured values
Surface roughness, Ra (μm)	ball	0.010
	disk	0.1 (before coating)
Coating thickness (nm)	silver	80, 150, 400, 750, 1400

면을 Alpha-Step을 이용하여 측정하였다.

Table 2에 실험 시 사용된 시편의 표면 조도 및 코팅 두께를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 은 박막이 코팅된 시편의 마찰거동

은 박막을 SM45C 디스크 시편의 표면에 가열증발 증착한 후 실험 한 대표적 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 코팅층 파손 후 마찰계수는 초기 마찰 계수보다 증가되었음을 알 수 있었다. 이는, Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이, 구름 실험의 경우와는 다른 결과로서 은 박막의 물질전이가 일어나지 못함으로 인하여 구름시 나타났던 셰이크다운 현상이 발생되지 않았기 때문이며 또한 볼/디스크 간의 직접적인 접촉에 의하여 접촉 표면이 손상되고 마모입자가 발생되어 그중 일부는 트랙면으로 물질전이되고 일부는 제3체(third body)로 작용하여 볼 및

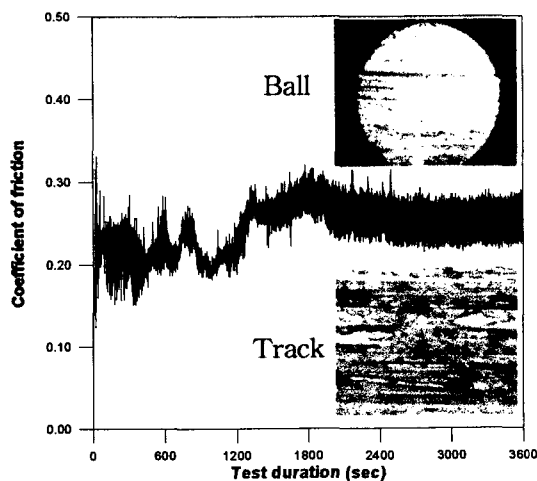


Fig. 4. The variation of friction coefficient with test duration and the photographs of contact surfaces.

트랙면에 긁기마모(ploughing wear)를 유발 한 것으로 나타났다.

3-2. 코팅 두께별 마찰거동

은박막의 코팅두께를 변화시키면서 마찰 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 역시 구름실험의 경우와는 달리 뚜렷한 최적두께가 나타나지 않았다. 이는 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 은 박막의 조기 파손으로 인하여 은 코팅층이 코팅으로서의 역할을 하는 대신 은 입자의 공급원의 역할을 하였기 때문이며 이때, 생성된 은 입자들과 볼/디스크 접촉으로 생성된 마모입자들은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 시편 볼의 선단에 집적되어 Prow를 형성하게 된다.

수직하중(F_n) 19.6 N, 코팅두께 750 nm, 1400 nm인 경우 마찰계수가 증가된 것은 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 Prow에서 일어난 입자영집으로 인하여 볼 및 디스크 표면에 긁기마찰(ploughing friction)을 일으켜서 나타난 것으로 사료된다.

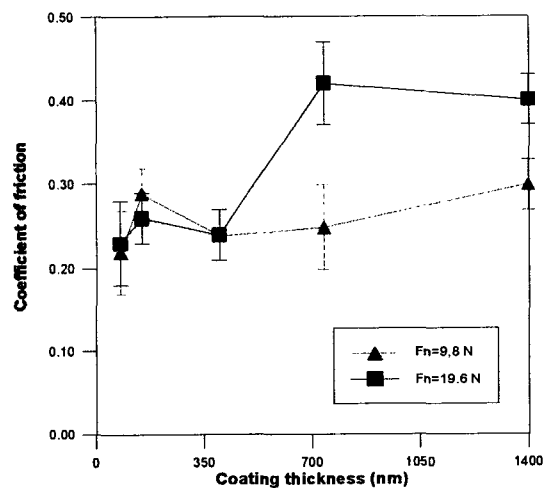


Fig. 5. Friction coefficient vs. coating thickness.

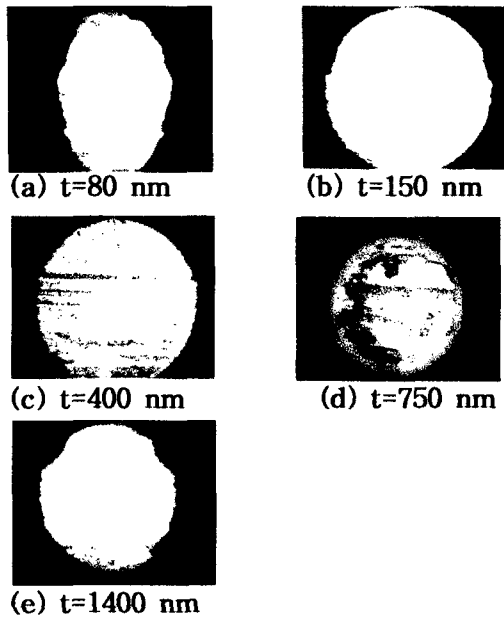


Fig. 6. Micrographs of tested ball surfaces; $F_n=19.6\text{ N}$ ($\times 50$).

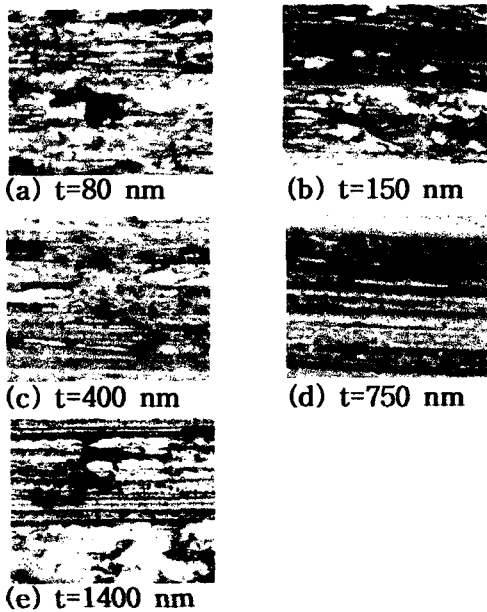


Fig. 7. Micrographs of tested track surfaces; $F_n=19.6\text{ N}$ ($\times 100$).

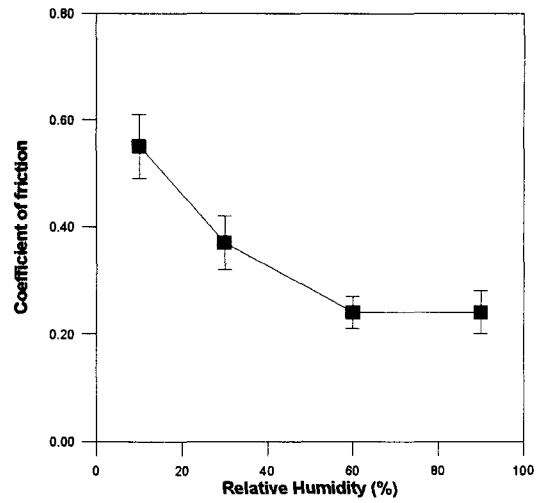


Fig. 8. Friction coefficient vs. relative humidity.

3-3. 상대습도 변화 시의 마찰거동

상대습도 변화 시의 마찰거동을 알아보기 위하여 은 박막을 코팅한 시편을 건조 공기(RH 10%), RH 30%, RH 60%, RH 90%의 조건에서 일방향 마찰 시험 한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 상대습도가 10%에서 60%로 증가될 때, 마찰계수는 감소되고 있는 것을 알 수 있는데 상대습도를 60%에서 90%로 증가시킬 경우 마찰계수의 변화가 나타나지 않았다. 이로부터 이러한 현상은 입자영김에 의한 것이라기 보다는 흡착습기가 일종의 윤활막을 형성하여 마찰계수를 낮춘 것으로 사료되었다. 이는 Fig. 9 및 Fig. 10에서 알 수 있듯이 볼과 디스크간의 거시적인 접촉면적이 상대습도의 증가에 따라 감소되었으며 마모파손도 상대적으로 감소되고 있음에서도 알 수 있었다.

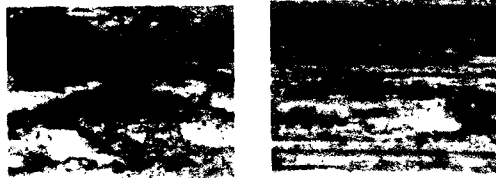


(a) Dry air (b) RH 30%

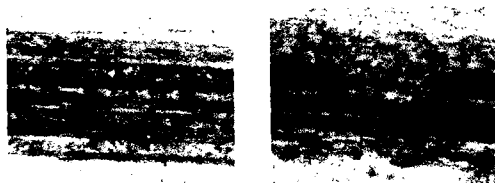


(c) RH 60% (d) RH 90%

Fig. 9. Micrographs of tested ball surfaces ($\times 50$).



(a) Dry air (b) RH 30%



(c) RH 60% (d) RH 90%

Fig. 10. Micrographs of tested track surfaces ($\times 100$).

따라서 이는 은박막 및 그 입자에 의한 효과가 아닌 것으로 판단되었다. 이를 증명하기 위하여 코팅하지 않은 시편을 RH 40%에서 5분간, RH 95%에서 3분간, RH 40%에서 2분간 마찰 실험하였고 동일한 실험을 은박막이 코팅된 시편에 대하여도 실시하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

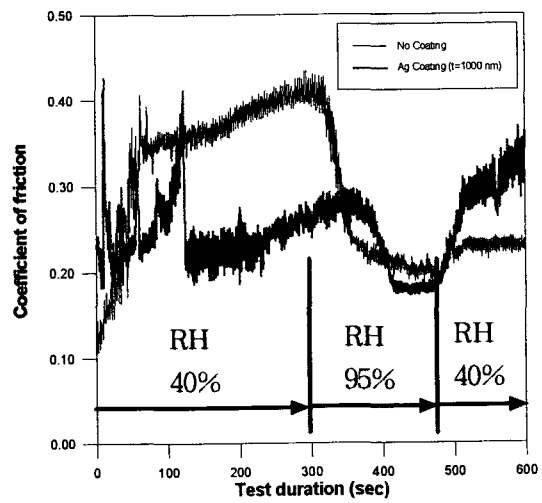


Fig. 11. Variations of friction coefficients by varying relative humidity.

4. 결론

이상과 같은 실험에 의하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 미끄럼의 경우 초기에 파손된 은 박막은 구름마찰의 경우와는 달리, 물질전이에 참여하지 못함을 알 수 있었다.
- (2) 초기파손 후 마찰계수에 대한 분석결과에서, 최소의 마찰계수를 나타내는 최적의 두께는 존재하지 않는 것을 알 수 있었다.

(3) 상대습도 변화시 나타난 마찰계수의 변화는 마모입자보다는 흡착된 습기막에 의한 윤활효과에 기인함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. M. R. Hilton and P. D. Fleischauer, "Applications of Solid Lubricant Films in Space", *Surface and Coatings Technology*, 54/55, pp. 435-441, 1992.
2. D. Jang and D. E. Kim, "Optimum film thickness of thin metallic coatings on silicon substrates for low load sliding applications", *Tribology International*, Vol. 29, No. 4, pp. 345-356, 1996
3. E. F. Finkin, "The friction of lead films in spherical contact", *Transactions of the ASME*, July, pp. 328-332, 1973.
4. J. Gerkema, "Lead thin film lubrication", *Wear*, Vol. 102, pp. 241-252, 1985.
5. C. Y. Shih and D. A. Rigney, "Sliding friction and wear of tin-, indium-, and lead-coated 52100 steel", *Wear*, Vol. 134, pp. 165-184, 1989.
6. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, 2nd Edition, pp. 28-31. 1995.
7. 양승호, 공호성, 윤의성, 권오관, "은박막이 코팅된 베어링 표면의 구름저항 거동 고찰", *한국윤활학회지*, 제13권, 제3호, pp. 85-92, 1997
8. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, "주석 및 아연박막이 코팅된 베어링 표면의 구름저항 거동에 대한 실험적 고찰", *한국윤활학회지*, 제14권, 제1호, pp.1-6, 1998.
9. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, "연금속 박막이 코팅된 베어링의 구름 저항 거동에 미치는 분위기의 영향에 대한 실험적 고찰", *한국윤활학회지*, 제14권, 제3호, pp. 1-8, 1998.
10. S. H. Yang, H. Kong, E-S. Yoon and D. E. Kim, "An experimental study on the rolling resistance of bearings coated by pure silver", *Wear*, Vol. 225-229, pp. 119-126, 1999.