

연금속 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동에 미치는 분위기의 영향에 대한 실험적 고찰

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

An Experimental Study of Environmental Effects on the Rolling Resistance of Bearing Surfaces Coated by Soft Metallic Films

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 environmental conditions on the rolling resistance behavior of pure silver and lead coated 52100 bearing steel. Pure silver and lead coating were produced by a thermal evaporation coating method. Experiments using a thrust ball bearing-typed rolling test-rig were performed under vacuum, dry air and controlled humidity conditions. Results showed that agglomeration of particles were prevented in vacuum environment and as it showed low and stable rolling resistance by shakedown phenomena. Also, humidity relates closely to the agglomeration of particles and increased the rolling resistance after the failure of coated layer.

Key Words : soft metallic coating, rolling testing, thermal evaporation coating, agglomeration of particles, environmental effects

1. 서 론

우주선(spacecraft)은 극저온에서 수백도에 이르는 광범위한 온도 및 극저진공에서 대기압에 이르는 광범위한 압력조건에서 동작하므로 유체 윤활에 의해서는 원하는 윤활 성능을 얻을 수 없다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 고체 윤활제를 적용하여 목적하는 윤활 성능을

얻으려는 노력이 지속적으로 진행되어 왔다[1,2]. 그러나 이러한 고체 윤활제들에 의한 연구결과 고체 윤활제로 분류된 물질중 일부만이 우주선용으로 적용이 가능하며 이는 그 윤활 특성에 미치는 환경의 영향이 지배적으로 작용하였음에 기인된다. 즉, 대표적인 고체 윤활제중의 하나인 흑연(graphite)의 예를 들면 일반

사용조건과 달리 진공상태에서는 수증기가 존재하지 못하므로 그 윤활 특성이 상실되는 문제점이 나타났다[3]. 따라서 고체 윤활제를 우주선에 적용하고자 할 경우 먼저 환경변화에 따른 윤활 특성의 변화를 고려해야함을 알 수 있다.

실제로, 대기(ambient air) 분위기에서의 연구결과[4,5]에서 밝힌 바와 같이 고체 윤활제의 일종인 연금속 피막(soft metallic coating)을 가열증발 증착법을 이용하여 베어링 면에 박막의 형태로 코팅한 후 대기(ambient air) 분위기에서 구름 실험한 결과, 코팅층의 파손시점을 수명의 한계로 보는 일반적 개념과는 달리, 코팅층 파손 후 구름저항이 감소되어 낮고 안정적인 값을 장시간 보일 수 있음을 알 수 있었는데 이러한 현상은 물질전이 및 물질 전이부로의 적층에 의하여 형성되는 contact patch, 즉, 접촉평탄부의 형성에 기인됨을 밝힌 바 있다.

이는 물질전이 및 물질 전이부로의 적층 현상을 인위적으로 변화시킬 수 있다면 그 결과로 나타나는 구름저항거동도 변화시킬 수 있다는 가정을 가능케 한다. 따라서 본 연구에서는 물질전이 및 적층 현상과 그 물리-화학적 변화에 영향을 줄 수 있는 실험 환경 조건을 변화시킬 때 나타나는 구름저항거동과 물질전이 및 물질 전이부 적층에 대한 분석 및 고찰을 행하고, 이를 대기(ambient air) 분위기에서의 실험 결과와 비교함으로써 실험환경의 변화가 연금속이 코팅된 베어링의 구름저항거동 변화 및 접촉표면의 물질전이 및 적층 거동에 미치는 영향에 대한 고찰을 행하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 트러스트 볼 베어링의 표면에 순수한 은(silver) 및 납(lead)을 코팅한 후 일방향 회전 시 나타나는 구름저항을 측정하였고, 실험 후 접촉 표면의 물질 전이부 형상을 분석하기 위하여 주사전자현미경(SEM) 분석을 시행하였다.

Fig. 1에는 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 회전관성 모멘트가 큰 상부시편 홀더를 사용하였다[4,5].

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

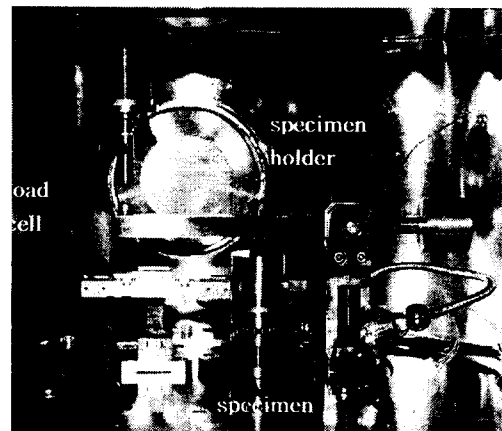


Fig. 1. A close-up view of the tribometer.

cage를 제거한 후 1회 실험 시 13개를 사용하였으며 미소량 측정용 로드셀(최대 하중 9.8N)을 사용하여 구름저항을 측정하였다. 이때, 측정된 접선력(F_t)을 수직력(F_n)으로 나눈 값을 구름저항(rolling resistance)으로 사용하였다.

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

실험환경은 대기(ambient air), 진공(vacuum), 건조공기(dry air), 조절된 습도 조건에서 각각 실행하였다. 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

코팅용 구름시편으로는 NSK 51204 트러스트 베어링면을 사용하였다. 상, 하 베어링면 모두 가열증발 증착 (thermal evaporation coating)법에 의하여 순도

99.999%의 은 및 납을 박막의 형태로 증착하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 가열증발 증착 장치를 Fig. 2에 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 코팅면을 Alpha-Step을 이용하여 측정하였다.

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

Table 1. Test conditions

	conditions
normal load (N)	147.0
velocity (rpm)	20
temperature (°C)	15 ~ 30
environmental conditions	ambient air
	vacuum (4×10^{-5} torr)
	dry air
	controlled humidity conditions (RH=30%, 70%, 100%)

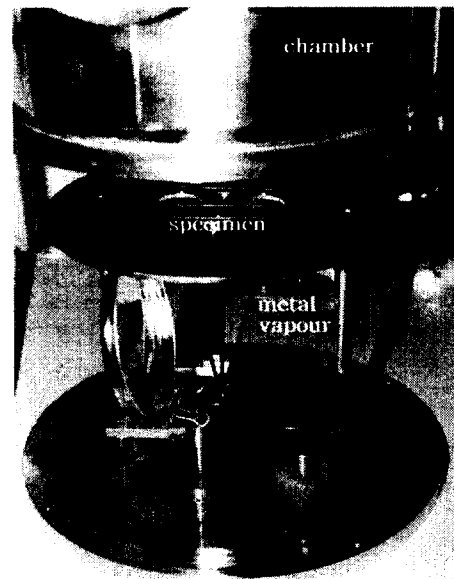


Fig. 2. Thermal evaporation coating device: coating part in a chamber.

Table 2. Surface roughness and coating thickness of specimens

		measured values
surface roughness, Ra (μm)	ball	0.010
	track	0.040 (before coating)
coating thickness (nm)	silver	1400
	lead	2000

3. 실험 결과 및 고찰

3-1 대기중 실험결과 요약

연금속인 은을 가열증발 증착법에 의하여 베어링 면에 코팅한 후 대기 중에서 자유구름 실험한 결과 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 코팅층 파손 후 낮고 안정된 구름저항을 장시간 나타낼 수 있음을 알 수 있었다. 표면분석 결과 이러한 현상은 은 코팅된 시편의 분석결과[4]에서 밝힌 바와 같이 코팅층 파손편들이 볼 및 트랙면에 물질전이 및 적층 현상에 의하여 하중을 지탱하는 부분이 생성되면서 국부적으로 높은 접촉압력에 의하여 소성 변형된 후 형성되는 접촉 평탄부가 셰이크다운(shakedown) 현상에 의하여 탄성거동을 보이게되면서 구름저항이 안정화되기 때문이며 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 납 코팅된 시편의 실험결과에서도 이와 동일한 이유로 인하여 코팅층 파손이후 안정된 구름저항을 나타냄을 알 수 있었다.

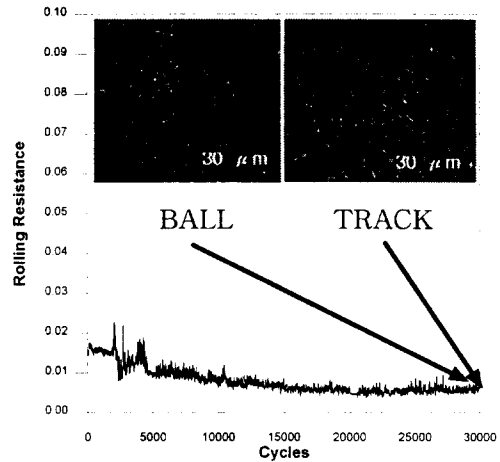


Fig. 3. The variation of rolling resistance with contact cycle and SEM images of contact surfaces after 30000 cycles (silver coating, ambient air).

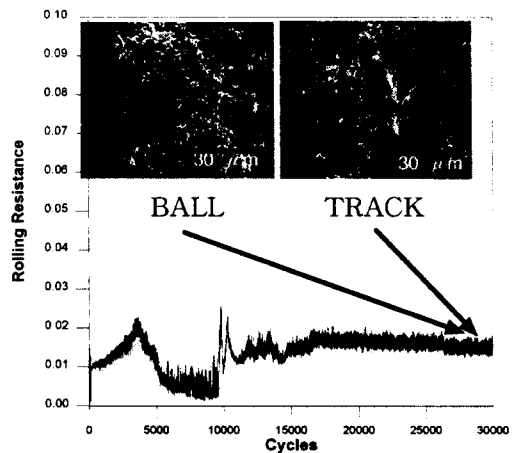


Fig. 4. The variation of rolling resistance with contact cycle and SEM images of contact surfaces after 30000 cycles (lead coating, ambient air).

3-2. 진공 분위기에서의 구름실험 결과 및 고찰

대기 조건에서의 실험 결과로부터 물질전이 및 전이부 적층이 구름저항에 결정적 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 물질전이 및 전이부 적층에 영향을 미치는 모든 환경적 요인을 배제한 조건인 진공 분위기(4×10^{-5} torr)에서 실험을 실시하였다. 은 및 납코팅 시편에 대한 대표적 실험 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

은 코팅 시편을 진공 중에서 실험한 결과 대기중에서의 경우와 마찬가지로 코팅층 파손 후 구름저항이 감소되어 안정하고 낮은 구름저항을 보이는 구간이 나타남을 알 수 있었다. 이때, 접촉 표면에서 나타난 현상을 알아보기 위하여

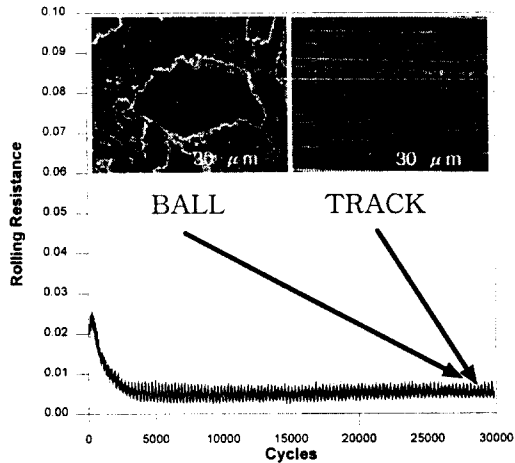


Fig. 5. The variation of rolling resistance with contact cycle and SEM images of contact surfaces after 30000 cycles (silver coating, vacuum).

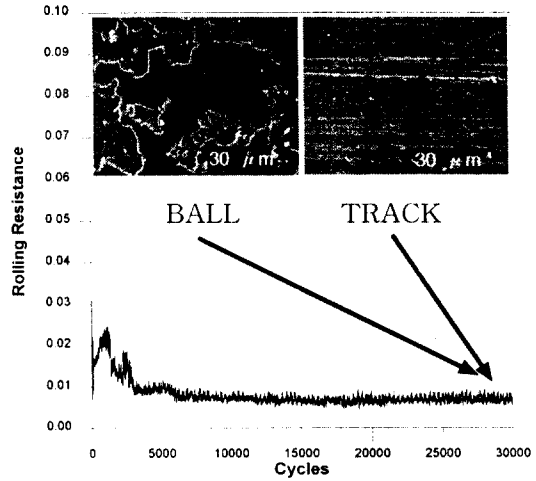


Fig. 6. The variation of rolling resistance with contact cycle and SEM images of contact surfaces after 30000 cycles (lead coating, vacuum).

실험 종료 후 접촉 표면에 대한 SEM 분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 시편 볼 표면에 대한 분석결과 코팅층의 거시적 파손 시 탈락된 거대박편($< 60 \mu\text{m}$)들이 볼 표면에 물질 전이되어 접촉평탄부를 형성하였음을 알 수 있다. 또한 트랙 접촉면에서는 미세한 박편들이 트랙면으로 재 전이되어 접촉 표면을 덮고 있음이 관찰되었다. 이때, 박편들의 적층에 의해 구성된 전이 입자군은 관찰되지 않았다.

납 코팅 시편에 대한 실험 결과에서도 코팅층의 파손 후 구름저항의 강하 현상이 발생되었으나 은 코팅 시편과 마찬가지로 물질 전이부의 적층 현상은 관찰되지 않았다. 따라서 이러한 결과로부터 분위기의 변화가 물질 전이부의 적층에 결정적 영향을 미침을 알아내었다. 이는 대기 중에 포함된 기체들 중 물질 적층에

영향을 줄 수 있는 인자가 존재한다는 것을 의미한다. Gao[6,7]는 대기 중에 포함된 인자들 중 산소 및 습기(humidity)가 미세 표면간의 상호작용에 영향을 줄 수 있다는 연구 결과를 발표한 바 있다. 이때, 주목할만한 사실은 진공분위기에서의 실험 시 은과 납코팅 시편 모두 적층이 억제되었으며 상온에서 은(silver)은 산화가 일어나기 어려운 금속이라는 점이다. 따라서 대기 중에 포함된 습기가 물질 전이부의 적층을 결정하는 요소임을 추정할 수 있었다.

3-3. 습도 변화 조건에서의 실험결과 및 고찰

진공분위기에서의 실험결과를 대기 조건에서의 실험결과와 비교한 결과 대기 중에 포함된 습도가 물질 전이부의 적층에 결정적 영향을 준다는 사실을 알아내었다. 이는 습도 조절 시 코팅층 파손 후의 구름저항에 변화를 줄 수 있음을 나타내는 것이다. 따라서 본 절에서는 인위적으로 실험 환경 중 습도 조건을 조절한 후 구름실험을 실시하였다. 이때, 실험 환경은 Table 1에 나타낸 바와 같이 진공, 건조공기, 조절된 습도(상대습도 30%, 70%, 100%)조건으로 설정하여 각각의 경우 초기 및 코팅층 파손 후의 구름저항 거동을 관찰하였다. 은 코팅 시편 및 납 코팅 시편에 대한 실험결과를 각각 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다.

실험 결과로부터 초기 구름저항은 환경의 변화에 관계없이 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 이와는 달리, 코팅층 파손 후 안정화 구간에서의 구름저항은 상대습도 30% 이상에서 습도 증가에 따라 증

가하는 경향을 나타내었다. 이때, 납 코팅된 시편의 경우 건조공기(상대습도 10%)조건에서 실험 시 코팅층 파손 후 납 파손편의 산화에 의하여 구름저항이 증가되는 현상이 나타났는데 이는 납의 경우 습기존재 시 산화현상이 부분적으로 억제됨에 기인된다.

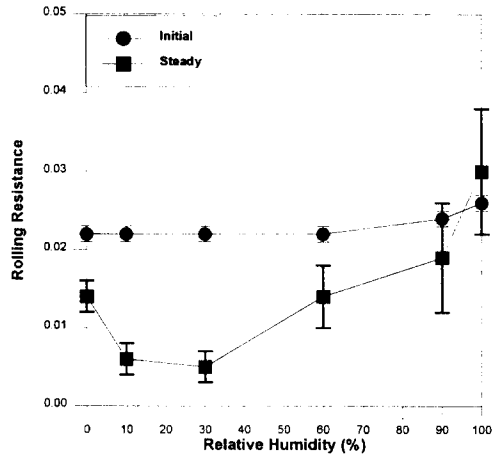


Fig. 7. Rolling resistance vs. relative humidity (silver coating).

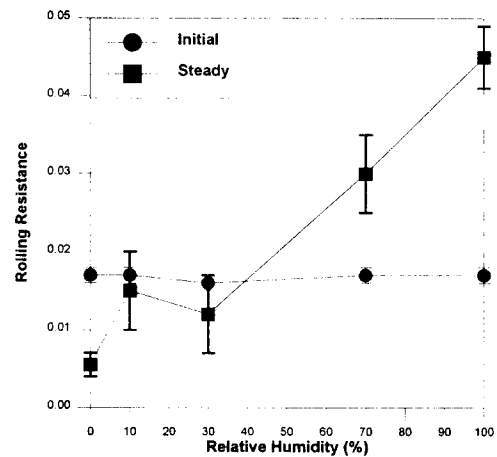


Fig. 8. Rolling resistance vs. relative humidity (lead coating).

5. 고 찰

물질전이에 의해서 나타나는 접촉면의 트라이볼로지적 특성의 변화는 거시적인 상대 운동면이 아닌 물질전이부가 실제 접촉에 참여하게 되면서 나타나게 된다. 특히, 물질 전이부의 변형 및 가공경화 정도는 그 적층 현상에 의존하게 되며, 분위기 변화에 의하여 전이입자의 표면에 물리-화학적 변화가 발생할 경우 물질전이 및 적층 현상에 변화가 발생할 수 있다.

실험결과에서 나타난 바와 같이 코팅층 파손전 초기의 구름저항은 실험환경의 변화에 무관하게 일정한 값을 나타내었으나, 이와는 반대로 코팅층 파손 후의 구름저항은 실험환경 변화에 따라 변화되는 값을 나타냄을 알 수 있었다. 그런데, 코팅층 파손 후의 구름저항은 물질전이 및 적층에 의하여 형성되는 접촉평탄부의 변형 거동에 의존하게 된다는 사실[4,5]로부터 실험 환경의 변화시 물질 전이 및 적층 현상에 변화가 있었음을 유추할 수 있다.

실제로, 실험결과를 살펴보면 상대습도가 증가될수록 코팅층 파손 후의 구름저항이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 접촉표면의 표면에너지 변화와 같은 물리-화학적 변화가 물질전이 및 적층 현상에 영향을 미친다는 Stupian[8], Bredle [9]의 연구 결과 및, 상대습도 60% 이상이 되면 미세 표면에 흡착되는 수증기층에 의한 모세관력 (capillary force)에 의하여 표면 접촉력이 발생됨을 실험을 통하여 증명한 Gao[6,7]의 연구 결과 등을 볼 때 상호 유사한 결과들으로써 본 실험결과가 나타난 것으로 판단된다.

6. 결 론

가열증발 증착법에 의하여 연금속인은 및 납을 베어링 표면에 코팅한 후 구름실험 및 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대기분위기에서의 실험 시 일반적으로 코팅층의 파손시점을 수면의 한계로 보는 것과는 달리, 코팅층 파손 후 구름저항이 낮고 안정한 값으로 감소된 후 장시간 지속되는 현상이 나타났다.
- (2) 이러한 현상은 물질전이 및 적층에 의해 형성된 접촉부가 소성변형에 의하여 접촉평탄부를 형성하면서 나타나는 웨이크다운 현상에 의하여 탄성거동을 보임에 기인된다.
- (3) 진공분위기에서의 실험결과 코팅층 파손 후 물질전이부의 적층이 억제되었음을 알 수 있었는데, 이는 대기중 습기와 같이 입자 적층을 용이하게 해주는 분위기적 영향이 배제되었기 때문이다.
- (4) 실험환경의 변화는 초기 구름저항에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났는데 이로부터 구름실험 초기에는 표면의 물리-화학적 현상보다는 기계적 변형 및 표면 형상등의 요인이 구름저항에 지배적 영향을 미침을 알 수 있었다.
- (5) 분위기중의 상대습도를 증가시킬 경우 코팅층 파손 후 안정구간의 구름저항이 증가하는 경향이 나타났는데 이는 모세관력의 작용으로 물질 전이부의 적층이 활성화된 때문으로 판단된다.

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. E. W. Roberts, "Thin Solid Lubricant Films in Space", *Tribology International*, Vol. 23, No. 2, pp. 95-104, 1990.
3. F. J. Clauss, 'Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Chap. 3, pp. 45-50, Academic Press, New York and London, 1972.
4. 양승호, 공호성, 윤의성, 권오관, "은 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동 고찰", *한국윤활학회지*, 제13권, 제3호, pp. 85-92, 1997.
5. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, "주석 및 아연 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동에 대한 실험적 고찰", *한국윤활학회지*, 제14권, 제1호, pp. 1-6, 1998.
6. C. Gao, D. Kuhlmann-Wilsdorf and M. S. Bednar, "On the Tribological Behavior of Adsorbed Layers, Especially Moisture", *Wear*, 149, pp. 297-312, 1991.
7. C. Gao, D. Kuhlmann-Wilsdorf and D. D. Makel, "Moisture Effects Including Stiction Resulting from Adsorbed Water Films", *J. Tribology*, Vol. 114, pp. 174-180, Jan. 1992.
8. G. W. Stupian, S. Feuerstein, A. B. Chase and R. A. Slade, "Adhesion of MoS₂ Powder Burnished on Metal Substrate", *J. Vac. Sci. Technol.* Vol. 13, No. 3, pp. 684-692, 1976.
9. M. Brendle, P. Turgis and S. Lamouri, "A General Approach to Discontinuous Transfer Films: The Respective Role of Mechanical and Physico-Chemical Interactions", *Trib. Trans.*, Vol. 39, No. 1, pp. 157-165, 1996.