

# 은 박막이 코팅된 베어링강의 마찰거동에 미치는 마모입자의 영향에 대한 실험적 고찰

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

## An Experimental Study on the Effect of Wear Particles on the Sliding Behavior of Silver-Coated Bearing Steels

Seung Ho Yang, Hosung Kong, EuiSung Yoon, Dae Eun Kim\*  
Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology  
\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract**-An experimental study on the effect of silver particles on the sliding behavior of bearing steels was performed by using a ball-on-disk tribometer. Tests were carried out in ambient air, dry air and vacuum. Disks of AISI 52100 were silver-coated by a thermal evaporation method, and the effects of silver particle transfer on friction were firstly analyzed. In order to understand further the mechanism of silver particle transfer and its effect on friction and wear, pre-compressed silver particles were artificially introduced into the friction interface and the results were compared to those of silver-coated specimens. Results showed that the introduced silver particles produced transfer layers and resulted in low friction. It also showed that this low friction is closely related to the characteristic behavior of transfer layers. Shakedown and ratchetting occurred at the friction interface and affected the friction and wear.

**Key words:** friction, wear, material transfer, silver particle, surface energy

### 1. 서론

마찰시 재료의 마모량을 줄이기 위하여 사용되는 세라믹코팅과 같은 고경도의 피막은 마모량이 표면경도에 반비례한다는 Archard [1]의 마모이론(Archard's wear theory)에 근거한 것으로 주로 장시간의 수명이 필요한 경우 이러한 방법을 사용하게 된다.

이와는 반대로, MoS<sub>2</sub>, 그래파이트, DLC (diamond-like carbon) 및 연금속 박막 등으로 대표되는 이러한 고체윤활 피막들은 소성 거동에 필요한 임계전단응력이 작아서 낮은 마찰계수를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 많은 연구자들이 그 낮은 마찰계수를 Tabor[2]의 응착마찰이론(adhesion theory

of friction)에 근거하여 설명하고 있다. 상기한 고체윤활 피막들은 기계요소의 설계변경을 최소화하면서도 원하는 윤활특성을 얻을 수 있다는 점에서 많은 연구자들의 관심사항이 되어왔다.

하지만 작동조건, 환경 및 코팅조건에 변화에 따라 상기한 고체윤활 피막들도 장시간에 걸쳐 낮고 안정된 마찰계수를 나타내는 경우가 나타나게 되는데[3], 만일 피막의 임계전단 강도가 낮다면 피막의 경도가 낮아질 것이며 따라서 장시간 동안 안정된 마찰계수를 나타낼 수 있다는 사실은 Archard의 모델로는 설명이 어렵게 된다. 이러한 사실은 층상고체구조를 가지는 것으로 알려진 MoS<sub>2</sub> 나 그래파이트의 경우 그 구조적 적층면에 수직인 방향에 대하여 상대적으로 큰 경도를

가지고 있다는 것으로 설명될 수 있으나 은(silver)과 같이 층상고체가 아닌 연금속 박막의 경우 이러한 설명은 불가능하게 된다.

최근, 여러 연구자들의 연구결과 이러한 사실은 고체윤활 피막이 마모되면서 나타나는 물질전이층(material transfer layer)이 보호층(protective layer)의 역할을 하면서 윤활을 담당함에 의하여 나타나는 것으로 밝혀졌으며 현재 물질전이층의 형성기구에 대한 연구가 세계적으로 진행되고 있다[4,5]. Godet[6]은 이러한 현상을 'third body'라는 새로운 개념을 도입하여 설명하였고 이후, 속도 하중등의 실험적 변수와 재료조합(material pair)에 의한 물질전이층의 발생 가능성이 타진되고 있다[7,8]. 실제로 본 저자들의 연구에서도 여러 가지 연금속들을 베어링 표면에 가열증발 증착시킨 후 구름접촉 실험한 경우, 증착층 파손후에도 장시간 동안 안정되고 낮은 구름저항이 나타난 연구결과를 보고한 바 있는데 이 경우에도 파손된 증착물질들로 형성된 물질전이층이 결정적 역할을 한 것을 알 수 있었다[9,10].

본 연구에서는 기계적 에너지, 입자표면적 변화 및 환경변화가 물질전이에 미치는 영향을 도출하기 위하여 행한 일련의 실험 결과들을 다루고 있다. 재료의 조합에 의한 효과를 최소화하기 위하여 시편인 강(steel)과 재료친화도(material compatibility)가 매우 적고 화학적으로도 안정적인 고순도(99.99%) 은(silver) 분말을 선택하여 마찰계면에 투입 후 실험하였다. 또한, 실험 시 투입되는 은 분말을 일방향 압축하여 사전에 기계적 에너지를 가한 후 투입하여 그 결과를 가열증발 증착 시편 및 일반 은 입자투여 실험의 결과와 비교하여서 은 입자가 가진 기계적 에너지, 입자면적 변화 및 환경조건의 변화가 물질전이에 미치는 영향에 대한 정성적인 결론을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 시편

본 논문에서는 AISI 52100 디스크 시편의 표면에 순수한 은(silver)을 코팅한 시편과

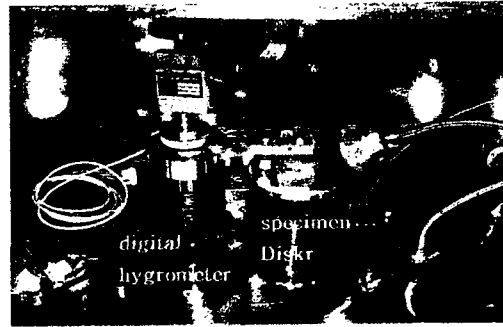


Fig. 1. A close-up view of the tribometer.

코팅하지 않은 디스크 시편에 은(silver)입자를 투여하여 실험한 시편의 마찰 마모 거동을 비교 연구하였다. 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 채용하였다.

본 실험에서는 추에 의한 하중 부과 방식을 사용하였으며 윤활유를 완전히 제거한 조건에서 Ball-on-disk 방식의 일방향 미끄럼 마찰 실험을 실시하였다.

시편으로는 직경 60 mm, 두께 6 mm의 AISI 52100 디스크를 열처리에 의하여 표면 경도를 HRC 57-62으로 맞춘 다음, 최종 표면거칠기가 Ra 0.1  $\mu\text{m}$ 가 되도록 연마/세척 후 사용하였으며, 시편 볼은 재질 AISI 52100(grade 25; extra polished), 경도 HRC 65인 SKF사의 제품을 사용하였다. 실험환경은 대기, 건조공기 및 진공 조건에서 각각 실행하였다.

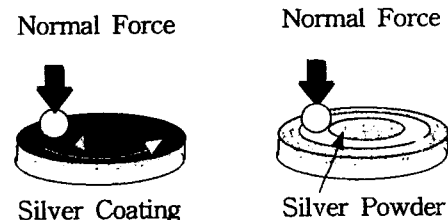


Fig. 2. Schematic figures of ball-on-flat tribo-tests.

Table 1. Test conditions

Test Conditions	Specimen	
	Ball	Disk
Roughness, Ra (nm)	10	100
Speed (mm/sec)	100	
Normal force (N)	9.8	
Lubrication	Dry	
Environments	Ambient air,	
	Dry air, Vacuum ( $4 \times 10^{-5}$ Torr)	
Temperature	Room temperature	

시편디스크는 은 코팅된 것과 코팅되지 않은 것을 사용하였다 (Fig. 2). 이 때, 은 코팅은 시편 디스크를 진공용기 내에 장입하여 1.5 keV의 Ar<sup>+</sup> ion beam으로 5분간 클리닝한 후 가열증발 증착법에 의하여 은 박막을 1 μm 두께로 형성시켜 사용하였다. 은 박막을 코팅하지 않은 디스크시편 실험 시에는 은 입자를 실험전 1회 일정량(0.5 g)을 투입한 후 실험하였다. 이때, 투입된 은 입자는 직경 0.3 μm의 은 입자와 은 입자를 각각 122.5 MPa 및 490 MPa의 수직압력으로 일방향 압축한 것을 사용하였다.

실험환경은 대기, 건조공기 및 진공( $4 \times 10^{-5}$  torr)의 세가지 조건에서 행하였으며 15-20°C의 상온에서 시행하였다. 상세한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

시편 볼 및 디스크는 실험전에 헥산(hexane)을 사용하여 초음파 세척한 후 질소가스로 세척하였으며 최종적으로 실험장치에 장착 후 진공분위기( $4 \times 10^{-5}$  torr)에서 1분간 유지하여 최종 세척한 후 Table 1과 같이 실험조건을 조절하여 실험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 은박막 코팅면의 마찰 실험

은 박막을 AISI 52100 디스크 시편의 표면에 가열증발 증착한 후 실험한 대표적

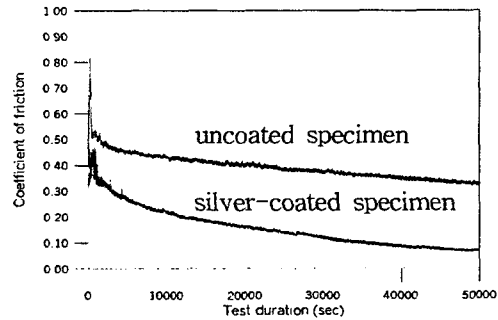


Fig. 3. Friction behavior of uncoated and silver-coated specimens in ambient air.

결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 코팅층 파손 후 마찰계수는 초기 마찰계수보다 감소되어 코팅되지 않은 시편보다 작은 값을 나타내었음을 알 수 있다. 이때 은 박막이 실험초기의 수십 사이클 이내에 모두 파손되었다는 실험적 관찰결과를 고려한다면 이는 은 박막의 미소 파손편들이 마찰계면에 게재하여 표면특성을 변화시켰음을 의미한다. 은을 가열증발 증착하여 실험한 시편에 대한 대표적 Electron Probe Micro-analyzer(EPMA) 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Figure 4에서 알 수 있듯이 시편볼과 시편 디스크 표면에는 물질전이 층(transfer layer)이 형성되어 볼과 디스크의 직접적인 접촉을 줄여주는 보호층(protective layer)으로 작용하였음을 알 수 있다.

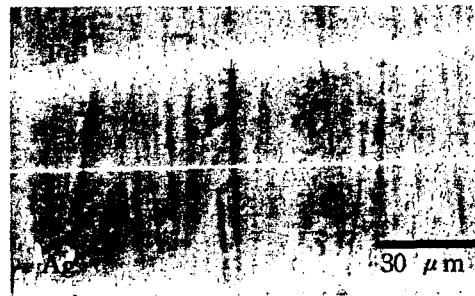


Fig. 4. EPMA line-profiled result of the silver-coated disk that was tested in ambient air(after 50,000 sec).

상기 결과로부터 은 박막은 실험초기에 파손되지만 이로부터 형성된 은 입자들이 마찰계면에 게재하여 제3의 층(the third body layer)을 형성하고 이것이 마찰을 감소시킨 것으로 나타났다.

### 3-2. 은 입자 투여 실험

은 박막에 대한 마찰 실험결과에서 물질전이층은 마찰거동에 큰 영향을 미칠 수 있다는 사실을 알 수 있었는데, 이는 은 박막의 파손으로부터 생성되는 미세한 크기의 은 입자의 역할이 그 핵심이었음을 알 수 있었다.

따라서, 본 절에서는 은 입자들을 마찰전에 시편디스크에 일정량(0.5 g)을 투입한 후 실험한 결과들을 나타내었다. 이때, 실험에 사용된 은 입자는 구형의 가공경화되지 않은 은입자와 압착압력(compaction pressure)을 122.5 MPa, 490 MPa 가한 은 입자들을 사용하였다. 압착 가공한 입자들에 대한 SEM 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다.



(a) 122.5 MPa



(b) 490 MPa

Fig. 5. SEM micrographs showing compressed silver particles.

이상과 같이 가공경화된 입자들을 투입하여 마찰 실험한 결과를 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 압착압력 122.5 MPa, 490 MPa로 미리 가공경화 시킨 은 입자를 투여한 경우 안정구간의 마찰계수는 실험 환경에 관계없이 가공경화 하지 않은 은 입자를 투여한 경우 가장 높은 값을 나타내었고 490 MPa로 가공 경화한 경우에 가장 작은 값을 나타내었다.

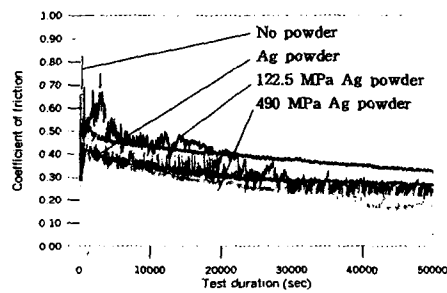


Fig. 6. Effect of the introduced silver particle in ambient air.

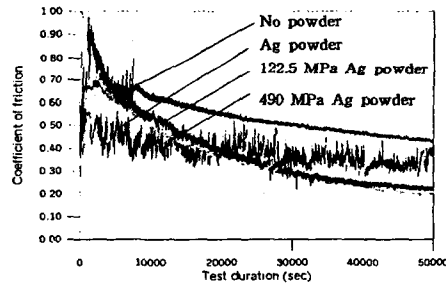


Fig. 7. Effect of the introduced silver particle in dry air.

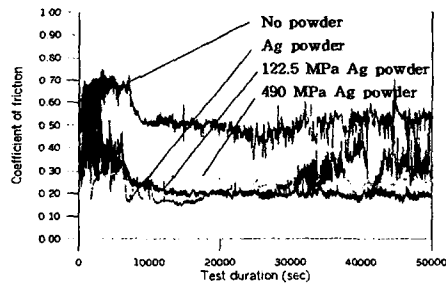


Fig. 8. Effect of the introduced silver particle in vacuum.

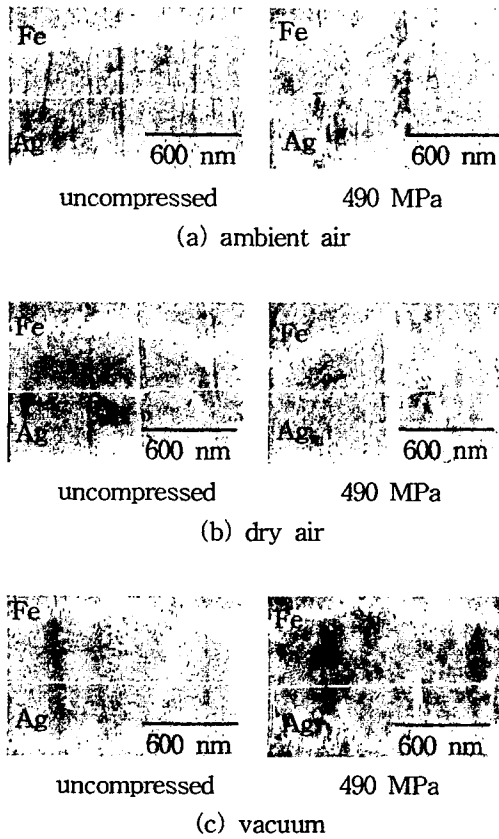


Fig. 9. EPMA line-profiled results of specimen disks of uncompressed and 490 MPa compressed silver particles (after 50,000 sec).

이때, 마찰 표면을 EPMA로 분석한 결과 (Fig. 9) 490 MPa로 미리 가공경화한 은 입자를 투여한 경우가 가공하지 않은 입자를 투여한 경우보다도 현저하게 은의 물질전이 현상이 증대함을 관찰할 수 있었다.

### 3-4. 고찰

#### 3-4-1. 물질전이에 영향을 미치는 요소

기존의 이론에 의한다면 마찰재료의 조화도(compatibility)가 적을 경우 물질전이가 나타날 확률은 매우 적은 것으로 알려져 있었으며[11], 최근에는 Rigney등[12]이 열역학

적으로 이를 모델링(modelling)하여 발표하기도 하였다.

은(silver)은 철계 금속과의 조화도가 매우 낮고 따라서 상기한 이론에 의한다면 물질전이는 일어나기 어려운 금속이다. 그러나 현실적으로는 많은 실험들에서 은 입자의 물질전이가 보고되고 있다[13,14]. 이때 나타나는 공통적인 사항은 은 입자가 상당히 큰 가공경화(work hardening)를 받았고 그 형상이 판상의 구조를 이룬다는 사실이다.

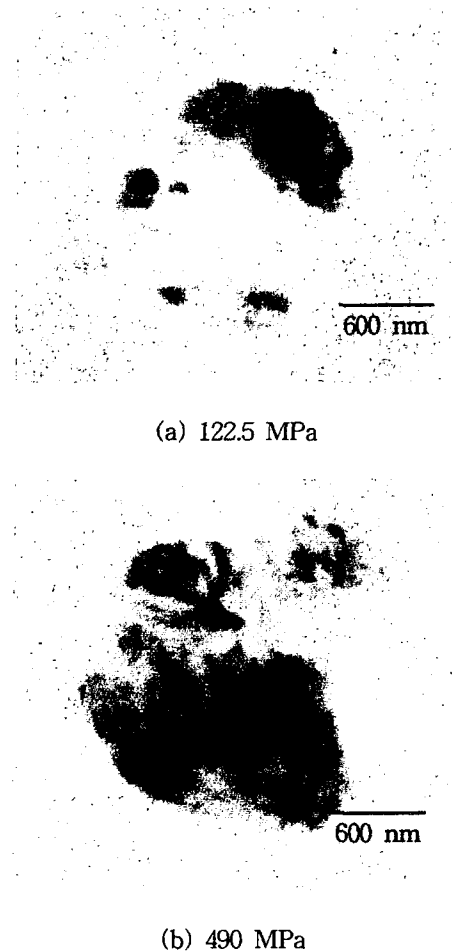


Fig. 10. STEM micrographs showing the dislocation density of silver particles.

전술한 Fig. 5에서 알 수 있듯이 압착압력을 122.5 MPa에서 490 MPa로 증가시킨 경우 압축방향에 수직한 면을 가진 평판 형태로 은 입자가 변형된 모습을 볼 수 있다. 이때 압착압력에 의한 은입자군(silver powder)의 변형으로 인하여 생성된 내부 전위(dislocation)에 대한 STEM(scanning transmission electron microscope)분석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이로부터 압착압력을 증가시킴에 따라 은 입자내부의 전위 밀도가 증가함을 알 수 있었으며 이로부터 입자가 부분적으로 가공경화가 되었음을 유추할 수 있었다. 이는 마찰 계면에서 입자가 물질전이시 입자의 탄성 회복현상을 증가시켜 입자의 물질전이를 방해하는 역할을 담당하게 된다.

이와 더불어 나타나는 판상으로의 형상 변화는 입자의 표면적을 증가시켜 입자전체의 표면에너지를 증가시키게 되어 물질전이의 경향을 증가시키게 된다. 동일 체적을 가진 완전한 구형 입자의 표면적을 1로 보았을 때, 판 형태의 입자 두께가 감소할수록 그 표면적은 1 이상으로 증가하게 된다. 따라서, 만일 원자간의 화학적 친화도(chemical affinity)를 무시한다면 입자의 전체에너지 변화량은 에너지 보존 법칙으로부터 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta U = -\Delta A(\Delta G) + \Delta V(E) \quad (1)$$

$$\Delta U = -\text{Surface Energy} + \text{Elastic Energy}$$

이때,  $\Delta U$ 는 물질전이시 입자의 전체에너지 변화량,  $\Delta A$ 는 물질전이에 참여하는 입자 표면적,  $\Delta G$ 는 단위면적당의 표면자유에너지(internal free energy)의 변화량,  $\Delta V$ 는 입자의 탄성회복 시의 부피 변화량,  $E$ 는 단위부피 변화시의 기계적 에너지 변화량이다. 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 11과 같다. 즉, 기계적 변형에 의하여 입자두께가 어느 한도( $t_{cr}$ ) 이하가 되면 탄성 회복보다는 표면적 증가에 의한 입자의 표면에너지 증가량이 지

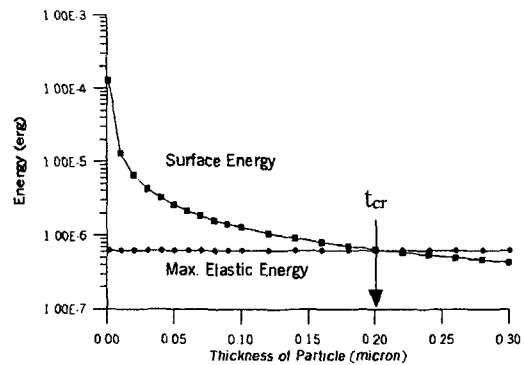


Fig. 11. Changes in surface energy and volumetric strain energy.

배적이 되어 물질전이가 활발하게 된다고 유추할 수 있다.

따라서 이로부터 Fig. 11과 같이 압착 가공된 입자 투여시 물질전이현상이 두드러지게 나타나는 이유를 정성적으로 설명할 수 있었다.

또한, 마찰 표면에 철계 산화물이 생성될수록 물질전이 가능성은 낮아지게 되는데 대기중 실험의 경우 마찰 표면에 흡착하는 물분자들의 영향으로 철계 산화층이 발생할 가능성이 높으며 따라서 마찰표면에 물질전이층이 발생될 가능성은 대기, 건조공기, 진공의 순으로 적아지게 된다고 판단되며 이는 Fig. 9의 EPMA 분석결과로부터도 검증할 수 있었다.

### 3-4-2. 물질전이층과 마찰의 상관관계

전술한 바와 같이 발생하는 물질전이층은 마찰에 참여하여 두가지의 주된 역할을 한다고 판단된다. 그중 첫째는 보호층(protective layer)으로의 역할인데 이는 시편볼의 마모량을 도시한 Fig. 12에서 확인할 수 있다.

두 번째로 물질전이층은 마찰에 특징적인 방식으로 영향을 미친다는 점이다. 은(silver) 물질전이가 마찰에 참여하는 모습에 대한 대표적 예를 Fig. 13에 나타내었다. 이 결과는 Johnson[19], Williams[20], Kapoor[21]가

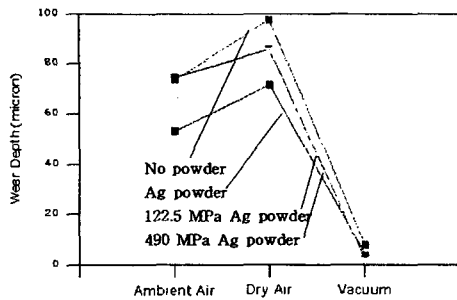


Fig. 12. Wear depths for various specimens.



Fig. 13. SEM micrograph showing filmy wear (490 MPa, vacuum).

제시한 Ratchetting에 의한 Filmy Wear 메카니즘과 부합되는데 이로부터 물질전이층은 전단(shear)에 의한 소성변형의 형식으로 마찰에 참여함을 알 수 있다. 물질전이층의 소성전단에 필요한 에너지가 마찰에 의하여 소산되는 에너지의 주된부분을 차지함을 알 수 있었다. 따라서 은 입자의 물질전이층이 형성되면서 나타나는 독특한 형태의 마찰계수 감소는 Ratchetting에 의하여 미소요철간의 부분이 채워지면서 나타나는 평탄화 현상과 은 물질전이층의 지속적인 가공경화와 잔류응력 누적으로 발생하는 Shakedown[22]에 의한 현상으로 유추할 수 있었다. Johnson에 의하면 Shakedown현상은 최대접촉압력( $P_{max}$ )과 임계전단강도( $k$ )의 비가 4.7이하인 경우까지 나타날 수 있다고 하며 따라서 Table 2에 제시한 바와 같이 본 실험의 조

Table 2.  $P_o/k$  value and the related properties for bulk silver under the load of 9.8 N.

Material	Total Load, L (N)	Maximum Contact Pressure, $P_o$ (MPa)	Shear Yield Stress, $k$ (MPa)	$P_o/k$
Silver	9.8	660	145	4.28

건에서는 부분적 Shakedown현상의 발생이 가능한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이상의 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

1. 은 박막을 코팅하여 마찰 실험한 결과 코팅층이 파손되었음에도 불구하고 마찰계수는 낮은 값을 나타내는 것은 은 코팅의 파손에 의하여 생성된 은 입자가 마찰계면에 물질전이 되었기 때문이다.
2. 은 입자의 형상과 기계적 가공정도가 물질전이 및 마찰 현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가공하지 않은 은 입자, 압착가공한 은 입자를 마찰에 투여한 결과, 마찰계수는 압착 가공한 입자를 투여한 경우에서 은 입자의 물질전이가 현저하게 증가하였으며, 또한 낮은 마찰계수를 나타내었음을 알 수 있었다.
4. 마찰 계면에 형성된 은 전이층은 보호층의 역할을 한 것으로 판단된다.
5. 마찰계면의 관찰결과, 물질전이층은 filmy wear현상을 나타내었으며 부분적으로 Shakedown에 의하여 마찰계수를 저감시킨 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정 연구개발 사업 중 중점국가연구개발사업과, 국

가 지정연구실사업의 연구비지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. J. Halling, Principles of Tribology, The Macmillan Press, pp. 96-98, 1978.
2. F.P. Bowden and D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids', Part II, pp. 52-86, 1964.
3. I.L. Singer, "How Third-body Process affect Friction and Wear," MRS Bulletin, June, pp. 37-40, 1998.
4. J.A. Williams, J.H. Morris and A. Ball, "The Effect of Transfer Layers on the Surface Contact and Wear of Carbon-graphite Materials," Tribol. Int. Vol. 30. No. 9, pp. 663-676, 1997.
5. D.A. Rigney, "Transfer, Mixing and Associated Chemical and Mechanical Processes during the Sliding of Ductile Materials," Wear, Vol. 245, pp. 1-5, 2000.
6. M. Godet, "Third-bodies in Tribology," Wear, Vol. 136, pp. 29-45, 1990.
7. Y. Berthier, M. Godet and M. Brendle, "Velocity Accommodation in Friction," Tribology Transactions, Vol. 32, No. 4, pp. 490-496, 1989.
8. M. Brendle, P. Turgis and S. Lamouri, "A General Approach to Discontinuous Transfer Films: the Respective Role of Mechanical and Physico-chemical Interactions," Tribology Transactions, Vol. 39, No. 1, pp. 157-165, 1996.
9. 양승호, 공호성, 윤의성, 권오관, "은 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동 고찰," 한국 윤활 학회지, 제 13권, 제 3호, pp. 85-92, 1997.
10. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, "주석 및 아연박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동에 대한 실험적 고찰," 한국 윤활학 회지, 제14권, 제1호, pp. 1-6, 1998.
11. E. Rabinowicz, "The Nature of the Static and Kinetic Coefficient of Friction," J. Applied Phys., Vol. 22, No. 11, pp. 1373-1379, 1951.
12. L.H. Chen and D.A. Rigney, "Adhesion Theories of Transfer and Wear during Sliding of Metals," Wear 136, Vol. 136, pp. 223-235, 1990.
13. M.S. Bednar and D. Kuhlmann-Wilsdorf, "Amorphous and Alloy Film Formation in Sliding of Silver on Copper," Wear, Vol. 181-183, pp. 922-937, 1995.
14. 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.
15. E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp. 28-31, 1995.
16. K.L. Johnson, "Contact Mechanics and the Wear of Materials," Wear, Vol. 190, pp. 162-170, 1995.
17. J.A. Williams, "Wear Modelling: Analytical, Computational and Mapping: a Continuum Mechanics Approach," Wear, Vol. 225-229, pp. 1-17, 1999.
18. A. Kapoor and F.J. Franklin, "Tribological Layers and the Wear of Ductile Materials," Wear, Vol. 245, pp. 204-215, 2000.
19. K.L. Johnson, Contact Mechanics, Chapter 8, pp. 268-271, 1985.