

# 은 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동 고찰

양승호 · 공호성 · 윤의성 · 권오관

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

## An Experimental Study on the Rolling Resistance of Bearing Surfaces Covered by Pure Silver Film

Seung Ho Yang, Hosung Kong, Eui-Sung Yoon and Oh-Kwan Kwon

Tribology Research Center, KIST

**Abstract**—An experimental study was performed to discover the tribological behaviors of pure silver coated 52100 bearing steel. Pure silver coatings ranging from 80 nm to several micrometers were produced by a thermal evaporation coating method. Experiments using a thrust ball bearing-typed rolling test-rig were performed for the investigations of the influence of coating thickness on the tribological rolling behavior. The existence of optimum film thickness which revealed minimum rolling resistance was discovered. A careful analysis on the contact surfaces for the optimum film thickness has been performed. The contact patches produced by the transferred silver films played an important role for the rolling resistance to keep low.

**Key words**—rolling resistance, silver coating, rolling testing, thermal evaporation coating, optimum film thickness, material-transfer.

### 1. 서 론

일반적으로 마찰과 마모 현상을 저감시키고 원하는 수명을 얻기 위하여 구름요소에 적용되는 윤활유 및 그리이스는 고진공과 같이 증발이 문제되는 환경 조건, 윤활유 자체에 의한 오염이 문제되는 경우, 고온환경 등과 같은 경우 사실상 그 적용상의 한계를 드러내고 있다. 특히 최근에는 MEMS(micro-elctromechanical-system)등과 같이 윤활유 자체의 표면 장력이 문제시 되는 경우 기존의 윤활한계를 해결하기 위한 시도로서 고체 윤활제의 적용이 활발히 연구되고 있다[1].

현재 상용화된 대표적 고체 윤활제로는 MoS<sub>2</sub>, 흑연, PTFE 등을 들수 있는데 이들 모두 우수한 윤활 특성을 보이고 있으나, MoS<sub>2</sub>의 경우 응축 수증기의 존재시 및 500°C 이상에서의 산화현상 발생, 흑연의 경우 작동 환경중의 수증기함량의 저하시, PTFE의 경우 온도 증가시 결정화 분율 변화에 의한 불안정

거동발생 등에 의하여 윤활특성이 급격히 저하되므로 상기한 환경에서의 적용은 상당한 제약을 받고 있다[2].

이러한 제약조건을 극복하기 위하여 전단강도가 낮은 순금속인 은, 납, 주석 등을 박막의 형태(Soft Metallic Coating)로 마찰 표면에 적용하여 마찰계수를 낮춤으로써 윤활특성을 담당케 하려는 시도가 여러 연구자들에 의하여 시도되어 왔다[1,3-6].

그러나, 마찰 요소가 아닌 구름요소에서의 적용을 위한 연구는 Halling 등에 의하여 극히 한정적으로 연구되었으나[7-9] 이 경우에도 초기 피막의 변형 및 구름 거동만을 고찰하는데 그치고 있다[9].

따라서 본 논문에서는 베어링 표면에 전단 강도가 낮은 은(Silver)을 가열 증발 증착법(Thermal Evaporation Coating)에 의하여 증착시켜 실험하중 및 증착피막 두께가 구름저항에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

은(Silver)이 가열 증발 증착법에 의하여 박막의 형태로 코팅된 경우에 나타나는 구름저항 거동에 대한 대표적 예를 제시하고 이의 분석을 위하여 관련된 연구 결과들을 제시하였다.

### 2-1. 구름저항 거동

구름저항 거동은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 다섯 단계의 복잡한 변화를 보인다. 각각의 구간에 대하여 약술하면, 구간 I은 은(Silver) 코팅층이 파손없이 구름하중을 지탱하는 구간이며, 구간 II는 은(Silver) 코팅층의 거시적 파손이 발생하는 구간으로 구름저항의 증가 및 구름저항의 진동폭이 커지게 된다. 구간 III은 파손된 은 박편들이 볼과 베어링 접촉 표면에 물질전이 되는 구간이며, 구간 IV는 비교적 안정화된 구름저항 거동이 나타나는 구간으로 흥미롭게도 피막의 파손 이전보다도 낮은 구름저항이 구간 I보다 약  $10^3$ 배 이상의 기간 동안 구현되었다. 마지막으로, 구간 V에서는 급격한 구름 저항 증가를 보였다.

### 2-2. 금속 피막의 접촉 변형 거동

고 정도의 모재에 은(Silver)과 같이 전단 강도가 낮은 금속 피막을 코팅하였을 때 1 GPa 이상과 같은 높은 접촉압력 조건하에서도 피막이 탄성변형 거동을 보일 수 있다는 연구 결과가 Halling에 의하여 발표되었다[9]. Halling은 이러한 거동이 나타나는 이유를 접

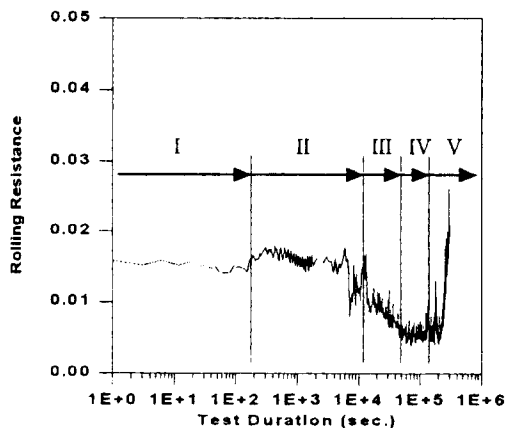


Fig. 1. Rolling resistance vs. test duration showing the various stages of rolling resistance.

촉 표면에서의 편차응력 성분(Deviatoric Stress Component)이 영(Zero)에 가까운 작은 값을 나타냄과 표면부의 높은 정수응력(Hydrostatic Stress)은 재료의 항복에 영향을 미치지 않음에 기인한다고 주장하였다. 또한, 피막이 탄성 변형거동을 보이는 경우의 피막 파손 이전의 초기 구름저항은 피막이 소성변형 거동을 나타내는 경우보다 상대적으로 낮고 거의 모재의 구름저항에 근접하게 된다는 실험결과를 제시하였다. 그러나 Halling의 실험 결과는 단지 피막 파손 이전의 초기에만 해당되는 것이며 단순히 이러한 결과만으로는 본 실험에서 구현된 구간 II 이후의 구름저항 변화를 설명할 수 없었다.

### 2-3. 구름저항 기구

구간 II 이후의 구름저항 거동을 설명하기 위하여 관련 연구 결과들에 대하여 고찰하여 보았다. 구름저항에 관련된 대표적 기구들로는 계면미끄럼이론, 표면요철이론, 점착이론, 히스테리시스 손실 이론, 소성 변형이론, 기하학적 상사비 이론, 셰이크다운(Shakedown)이론 등이 있다. 먼저 계면 미끄럼이론은 구름요소와 트랙간의 탄성계수 차이에 의한 미소 변위에 의하여 계면 미끄럼이 발생되고 이것이 구름저항을 발생시킨다는 이론으로 Reynolds가 주장하였다[10]. 계면미끄럼이론으로는 구간 II 이후에 나타나는 구름저항의 감소를 설명할 수 없다. 표면요철 이론은 구름운동시 접촉 표면에 존재하는 미소 요철의 변형과 그 기하학적 형상이 구름저항을 결정한다는 이론으로 Bikerman 등이 주장하였다[11]. 하지만 본 연구에서 사용된 베어링 표면은 가열 증발 증착법에 의하여 코팅되어 nano scale의 표면 거칠기를 형성하고 또한 볼 표면의 표면조도도 Ra 7 nm 정도로 나타나 구간 I에서 구름저항에 미치는 요철의 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 구간 II에서는 코팅층의 파손(Failure) 및 파손된 은(Silver) 필름이 접촉면상에 존재하게 되며, 이로인한 표면 형상 및 거칠기의 변화로 인하여 구름저항의 변동폭이 커질 수 있으며, 구간 II 이후에는 볼 및 베어링 접촉표면에 존재하는 표면 요철들이 물질 전이된 은(Silver)들을 기계적구속(Mechanical Interlocking)의 형태로 접촉시키는 역할을 담당하는 것으로 판단된다. 점착 이론은 구름요소와 트랙간에 존재하는 점착력(Adhesive Force)이 구름저항을 발생시킨다는 이론으로[10] 본 실험에서 사용

된 금속은 순철 및 Steel과의 친화도(Compatibility)가 낮으며 더우기, 구간 II 이후의 경우 볼 및 베어링면에 Contact Patch가 생성된 이후에 발생하는 은(Silver) 간의 구름접촉의 경우 구름저항이 구간 I보다 더욱 감소되므로 접촉이론으로는 본 논문의 실험 결과를 설명할 수 없다. 히스테리시스 손실 이론은 구름요소와 접촉하는 트랙면의 임의의 부위에서 전단, 압축, 전단 형태의 연속적 변형을 받게되며, 구름요소가 완전히 통과한 후에도 원래의 형상으로 복귀되지 못하고 히스테리시스 손실의 형태로 에너지 손실을 보이게 되며, 이것에 의하여 구름저항이 발생된다는 이론으로 Tabor에 의하여 주장되었다[12]. 히스테리시스 손실 이론으로도 구간 II 이후의 구름저항의 감소를 설명할 수는 없다. 단지 반복 변형에 의하여 Contact Patch부위에서 가공경화가 발생되어 구름저항의 절대값이 감소되었다고 유추 해석할 수는 있으며, 이 경우 구간 IV의 구름저항은 히스테리시스 손실에 의하여 발생된다고 판단할 수 있다. 소성변형 이론은 Eldredge와 Tabor에 의하여 주장된 이론으로[13] 볼에 의한 구름접촉시 재료의 소성변형이 수반될 경우 구름운동을 계속하기 위하여는 계속적으로 소성변형을 일으켜야 하며 이로 인해 구름저항이 발생된다는 이론이다. 소성변형 이론도 구간 II 이후의 구름저항의 감소를 설명하지 못하고 있다. 기하학적 상사비 이론은 Heathcote 등에 의하여 주장되었으며[14,15], 볼이 트랙 그루브(Groove)에서 구름운동할 경우 그루브면은 타원 형상의 접촉면을 형성하며 볼의 접촉타원의 장축상의 점들은 구름요소 1회전시 각기 다른 구름거리를 나타내게 되어 이로 인하여 접촉면에서 미끄럼이 일어나게 된다는 이론이다. 본 실험의 경우 베어링 트랙의 접촉부 곡률반경의 86%에 해당하는 반경 3.57 mm의 볼을 사용하였으며, 이로 인한 미끄럼 발생 여부를 알아보기 위하여 반경 2.375, 1.575 mm인 볼을 사용하여 실험한 결과 본 실험조건에서 기하학적 상사에 의한 미끄럼 발생은 무시할 수 있음을 알 수 있었다. 셰이크다운 이론은 소성 변형 이론의 진보된 형태로써 반복적 소성 변형에 의하여 재료가 가공경화되며 소성변형 되는 양이 점차 줄어들게 되어 구름저항이 감소된다는 이론으로 Johnson 등에 의하여 주장되었다[16,17]. 셰이크다운 이론은 다시 탄성 셰이크다운(Elastic Shakedown) 이론, 소성 셰이크다운(Plastic Shakedown) 이론으로 나뉘어진다. 탄성 셰이

크다운 현상이란 반복되는 접촉응력을 받을 경우 각 Cycle 당의 변형량이 점차 줄어들게되며, 안정화된 후에는 소성변형이 없는 순수 탄성 거동만을 보인다는 이론이며, 이보다 큰 접촉압력 조건에서 나타나는 소성 셰이크다운 현상은 각 Cycle당 반대부호, 동일한 크기의 변형이 반복되어 변형의 축적이 발생되지 않게 된다는 이론이다. 접촉면이 Smooth 하다고 가정하면 본 실험의 하중조건을 Hertz의 접촉이론으로 계산한 결과 최대 접촉 압력은 은(Silver)의 임계 전단 항복응력의 2.97, 4.29배로 나타났으며, 구간 II이후에서는 물질전이에 의한 Contact Patch가 형성되고 이때의 접촉압력은 접촉표면이 Smooth하다고 가정하여 계산된 결과를 상회할 것으로 판단되었다. 따라서 구간 II 이후에 나타나는 구름저항 감소의 주된 기구는 소성 셰이크다운 및 뒤이어 일어나는 탄성 셰이크다운 현상에 의한 것으로 판단된다.

### 3. 실험 방법

본 논문에서는 스톱-스타트 볼 베어링의 표면에 순수한 은을 코팅한 후 일방향 회전시 나타나는 구름저항을 측정하였고, 실험후 볼 표면에 전이된 은(Silver)의 존재 및 그 형상에 대한 표면 분석을 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 시행하였다. 또한 은(Silver)의 전이가 구름저항 변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 구름저항이 변화하는 구간을 선정하여 각 구간별 베어링 및 볼 표면에 대한 주사전자현미경(SEM)분석

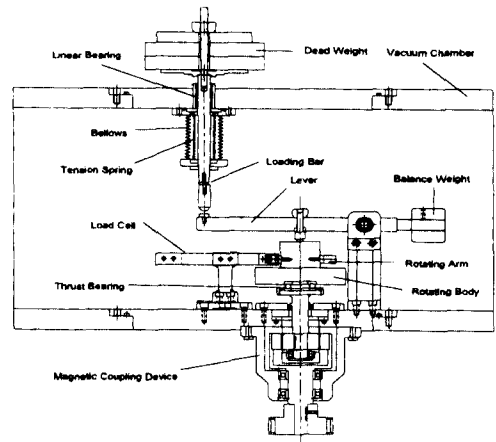


Fig. 2. Sectional view of a rolling test part in the tribotester.

및 전자탐침분석(EPMA)을 시행하였다.

Fig. 2는 본 논문의 실험에 사용된 실험 장치의 개략도이다. 본 실험 장치는 자체적으로 제작된 것으로 [18], 부하변동 시 일정한 회전속도를 얻기위해 servo motor를 채용하였으며, 불의 편심 발생 및 이에 따른 구름저항의 변화를 없애기 위하여 회전 관성 모멘트가 큰 상부시편 홀더를 사용하였다. 또한 본 실험에서는 추(Dead Weight)에 의한 하중 부과 방식을 사용하였고, 수직하중 49 N, 147 N을 사용하였으며 수직하중 49 N, 147 N을 가하여 상온, 상대습도 30-60%, 20 rpm 의 회전속도, 윤활유를 완전히 제거한 건조조건에서 실험하였다. 시편 불은 Cage를 제거한 후 1회 실험시 13개를 사용하였으며 사용된 시편불은 각각 직경 3.15, 4.75, 7.14 mm 로 NSK사 제품을 사용하였다. 또한 미소량 측정용 로드셀(최대 하중 9.8 N)을 사용하여 구름저항을 측정하였으며, 측정된 접선력( $F_t$ )을 수직력( $F_n$ )으로 나눈 값을 구름저항(Rolling Resistance)으로 환산하여 사용하였다.

$$\text{구름저항} = \frac{\text{접선력}}{\text{수직력}} = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

코팅용 구름시편으로는 NSK 51204 스텔리트 베어링면을 사용하였다. 상, 하 베어링면 모두 가열증발 증착법(Thermal Evaporation Coating)에 의하여 순도 99.999%의 은을 증착하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 가열증발 증착장치 및 증착조건을 각각 Fig. 3과 Table. 1에 나타 내었다. 시편은 증착전 및 증착후 Hexane)을 사용하여 초음파 세척한 후 질소 가스로 최종 세척하여 사용하였다. 코팅두께는 증착시 함께 장입된 Slide Glass의 코팅면을 Alpha-Step을 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 평균 코팅두께는 80, 150, 400, 750 1400, 3500, 4400, 9000 nm 이었으며, Fig. 4에 코팅두께 측정을 제시하였다.

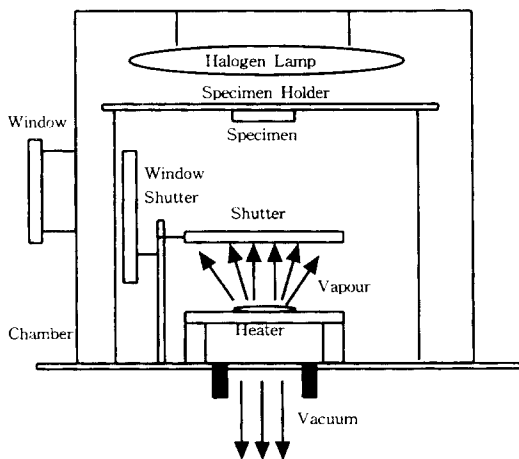


Fig. 3. Thermal evaporation coating device.

Table 1. Conditions for thermal evaporation coating

Base pressure (Pa)	$10^{-3}$
Operating pressure (Pa)	$2 \times 10^{-3}$
Heater Current (A)	500
Heater Voltage (V)	6.0
Heater to substrate distance (mm)	20

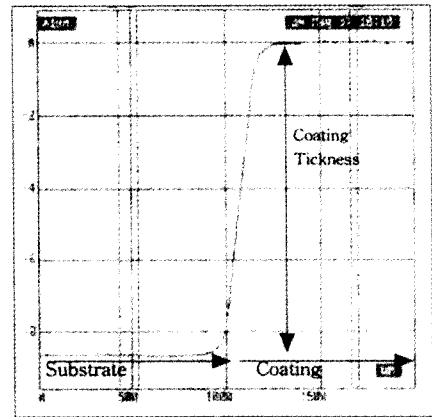


Fig. 4. An example of coating thickness measurement using Alpha-step.

산(Hexane)을 사용하여 초음파 세척한 후 질소 가스로 최종 세척하여 사용하였다. 코팅두께는 증착시 함께 장입된 Slide Glass의 코팅면을 Alpha-Step을 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 평균 코팅두께는 80, 150, 400, 750 1400, 3500, 4400, 9000 nm 이었으며, Fig. 4에 코팅두께 측정을 제시하였다.

## 4. 실험결과

### 4-1. 물질전이 이전의 구름접촉 거동

실험 초기인 구간 I의 경우 은(Silver) 피막의 물질 전이가 일어나지 않고 피막이 실험 하중을 지탱하게 된다. 은(Silver) 피막의 두께를 변경하여서 실험한 결과 물질전이 이전의 구름저항이 최소화 되는 필름두께가 존재한다는 것을 발견하였다. 이를 피막의 변형 거동과 관련하여 고찰하기 위해 접촉 타원면 단축의 길이( $b$ )를 필름 두께( $t$ )로 나눈 무차원계수 " $b/t$ "를 사용하여 구간 I에서의 구름저항을 나타내면 Fig. 5와 같다. Halling은 임계  $b/t$ 값 이하에서는 소성변형 거동을 보이나 이를 초과할 경우 순수 탄성 거동만을 보인다고 주장하였고[9],  $b/t$ 값이 무한대로 접근할 때 코팅

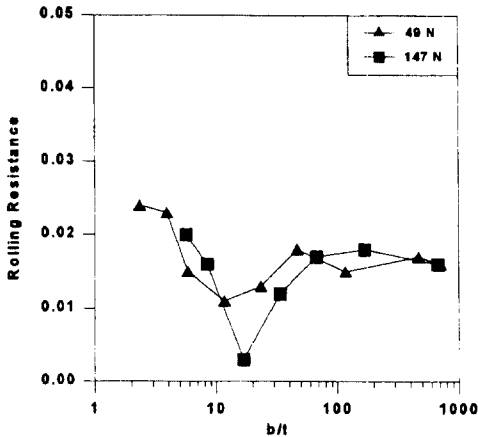


Fig. 5. Rolling resistance vs. b/t value before the failure of silver film (stage I).

되지 않은 베어링 자체의 구름저항에 근접하게 된다고 주장하고 있다. 그러나 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 구간 I의 구름저항은 구름저항 최소점 이하의 코팅두께에서 급격히 증가한 후 일정치를 유지하는 것을 알 수 있었다.

4-2. 물질전이 이후의 구름접촉 거동

실제적으로 물질전이 이후에는 Contact Patch가 하중을 지탱하게 된다. 은(Silver) 피막의 두께를 변경하여 실험한 결과 구간 II에서의 구름저항은 Fig. 6과 같이 나타나며, 실험하중 147 N 하에서는 구름저항이 최소화 되는 필름두께가 존재한다는 것을 확인하였으

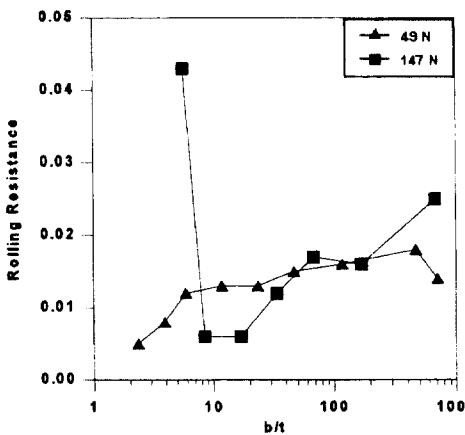


Fig. 6. Rolling resistance vs. b/t value after the failure of silver film (stage IV).

나, 실험하중 49 N에서는 접촉 단반경의 38%에 해당 되는 필름 두께인 9000 nm까지 필름 두께를 증가시키면서 실험하였지만 점진적인 구름저항의 감소만이 나타났다.

5. 고찰

5-1. 기하학적 미끄럼 현상 고찰

그루브(Groove) 형상의 트랙에서 볼이 구름 운동할 경우 볼과 트랙간의 기하학적 적합성(Geometrical Conformity), 즉 볼과 트랙 곡률반경의 차이가 작아질수록 접촉면이 확장되는 현상에 의하여 구름운동시 부분적으로 미끄럼 현상을 나타내게 된다. 따라서 본 실험에서는 이러한 기하학적 미끄럼 발생여부를 알아보기 위해, 직경 3.15, 4.75, 7.14 mm인 볼을 120° 간격으로 3개만 사용하여 구름저항에 미치는 기하학적 적합성의 영향에 대해 고찰하였다. 이때 볼과 접촉하는 베어링은 코팅되지 않은 것을 사용했고 트랙면 중심부의 곡률 반경은 4.15 mm였으며, 실험하중 증가시 수반되는 접촉 면적의 증가가 미끄럼 현상의 발생에 미치는 영향도 함께 고찰하였다. 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다. 볼의 직경을 바꾸어 실험한 결과 측정된 구름 저항은 볼의 직경을 3.15, 4.75, 7.14 mm로 바꾸어 실험한 경우 Fig. 7과 같이 동일한 결과를 나타내었으며, 실험하중 증가시에도 볼의 직경에 관계없이 동일한 증가경향을 나타내었다. 따라서 볼과 트랙간의 기하학적 상사성(Geometric Conformity)에 의하여

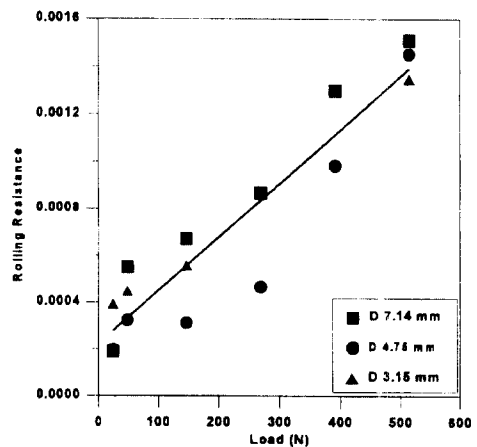


Fig. 7. The influence of ball diameter on the rolling resistance of uncoated specimens.

**Table 2. Po/k value and related properties for the bulk silver and AISI 52100 hardened steel under the load of 49 and 147 N**

Material	Total Load, L (N)	Maximum Contact Pressure, P <sub>0</sub> (MPa)	Shear Yield Stress, k (MPa)	P <sub>0</sub> /k
Silver	49	431	145	2.97
	147	622	145	4.29
AISI 52100 (Hardened)	49	431	1250	0.34
	147	622	1250	0.50

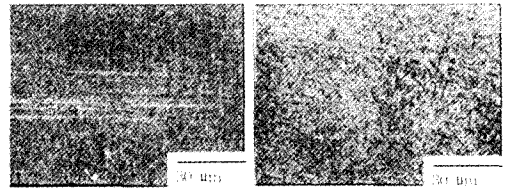
발생하는 미끄럼 현상은 무시 가능하다고 판단 된다

**5-2. 접촉 변형 거동 고찰**

은(Silver)과, 베어링의 소재 AISI 52100 (Hardened)에 대한 접촉변형 거동을 고찰하기 위하여 각 시험 하중에 대한 최대접촉 압력(Hertzian Maximum Contact Pressure, P<sub>0</sub>)과 임계전단 강도(k)의 비를 Table 2에 나타내었다. 접촉 표면이 Smooth하다고 가정할 때, 은(Silver)의 경우 시험하중 49, 147 N 모두의 경우에 소성 접촉 변형거동을 보이게되며 실제로 Contact Patch에서의 접촉응력은 보다 증가되게 된다. Johnson에 의하면 탄성 웨이크다운 현상은 최대접촉 압력(Hertzian Maximum Contact Pressure, P<sub>0</sub>)과 임계전단 강도(k)의 비가 4.7이하인 경우까지 나타날 수 있다고 하며[15], 따라서 Contact Patch에서는 소성 웨이크다운 현상이 일어날 수 있다. 경화 처리된 AISI 52100 소재의 경우 49, 147 N 모두의 경우에 탄성 거동만을 보이게 된다.

**5-3. 물질전이 현상 고찰**

물질전이가 구름저항에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 각 구간별로 볼과 베어링면에 대한 표면분석을 시행하였다. 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 물질전이된 은(Silver)의 형상과 표면 Scratch 존재 여부를 분석하였고, EPMA Mapping 을 통하여 전이된 물질이 은(Silver)임을 확인하였다. 볼에 대한 분석 결과 Fig. 8에 나타낸 부터 미세한 은(Silver) 전이 입자가 볼 표면에서 관찰되었으며, 구간 IV에서는 전이 입자군에 의해 형성된 Contact Patch가 관찰되었다. 구름저항이 증가한 후에도 구간 V에서 나타나는 바와 같이 전이 입자군의 크기가 증가하여 Contact Patch의 면적이 증가되었음을 알 수 있다. 이때의 구름저항 증



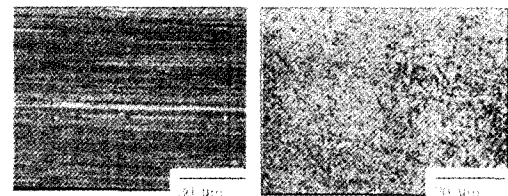
Stage I Stage III  
Rolling Direction →



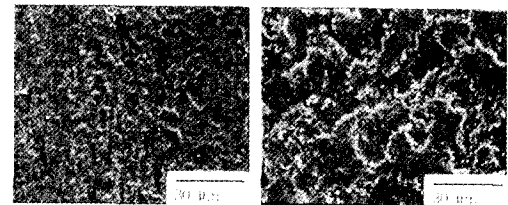
Stage IV Stage V

**Fig. 8. SEM images of tested ball surfaces for each stage.**

가는 Contact Patch이외 부분에 약하게 모재와 결합되어 있던 금속은 파편들이 입자군 접촉면과의 접촉시 다시 전이되어 입자군의 부피를 증가시키고 그결과 드러나게 되는 모재 표면의 Fretting에 의해 나타나는



Stage I Stage III  
Rolling Direction →



Stage IV Stage V

**Fig. 9. SEM images of tested bearing surfaces for each stage.**

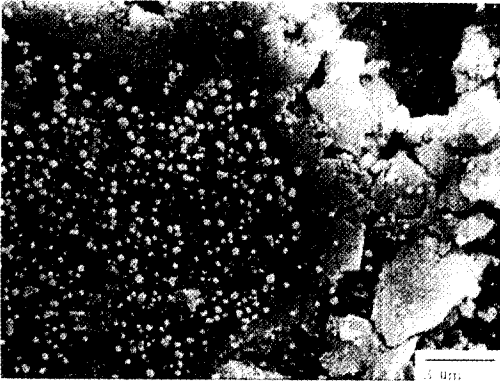


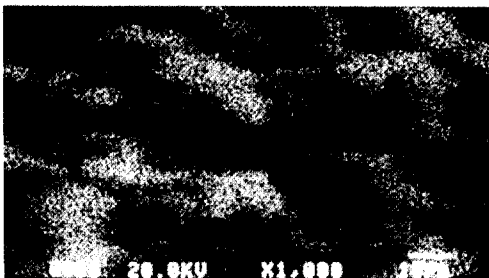
Fig. 10. SEM image of a tested ball surface for stage V.

철계 산화물의 발생에 기인된다고 판단되며, Fig. 10에 나타낸 바와 같이 1만배로 표면을 관찰한 결과 구간 IV에서는 관찰되지 않았던 다량의 미세한 산화물 입자들의 존재를 확인할 수 있었다.

베어링 접촉면에 대한 분석결과 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 구간 I 말기에서 은(Silver)피막이 박리되기 시작하면서 나타나는 모재표면은 기계가공 흔적이 나타난다. 구간 III에서는 미세한 금속은 전이 입자들이



(a)



(b)

Fig. 11. Silver mapping results for the contact patches on the ball surfaces by Electron-probe Micro Analyzer. (a) Back-scattered image, (b) Result of Silver mapping.

기계적 구속의 형태로 집착되기 시작함을 알 수 있다. 구간 IV에서는 볼의 경우와 같이 전이 입자군에 의해 형성된 Contact Patch가 관찰되며, 구간 V에서는 전이 입자군에 의해 형성된 접촉면의 면적증가가 나타났으며 미세한 산화물의 존재를 확인할 수 있었다. Fig. 11은 구간 V에서 탈거한 볼 표면을 전자 탐침 분석(EPMA)으로 Silver Mapping한 결과이며 형성된 입자군 접촉면은 은(Silver)의 전이층임을 확인하였다.

## 6. 결 론

은(Silver) 박막을 베어링면에 코팅한 경우 박막이 손상되지 않은 초기의 경우에 구름저항이 최소치를 보이는 최적의 코팅 두께가 존재함을 확인하였다. 이는 코팅두께 감소에 따라 소성에서 순수 탄성 거동으로 전이 한다는 Halling의 연구결과와는 상이한 결과로써, 전이점 이후 코팅두께가 감소될 때 나타나는 구름저항의 증가는 코팅층의 조기 파손에 의해 나타나는 현상으로 판단된다. 실제로 일정 코팅두께 이하에서는 Fretting 현상이 조기에 발생됨을 관찰할 수 있었다.

은(Silver)의 물질전이 후인 경우 높은 실험하중에서는 최소의 구름저항을 나타내는 최적두께가 존재하였으나, 낮은 실험하중의 경우 접촉 단반경의 38%에 해당하는 두께까지 코팅한 경우에도 코팅두께 증가에 따라 지속적인 구름저항 감소를 나타내었는데, 이는 시험 하중 49 N의 경우 최대 접촉압력이 은(Silver)의 임계전단 항복강도의 약 3배에 해당되므로 소성변형 거동 초기에 해당되며 따라서 피막의 파손 및 거시적 탈락이 지연되어 Contact Patch를 형성할 수 있는 가능성을 높여주기 때문이다. 실제로 시험하중 147 N의 경우 코팅두께 4400 nm 일 때, 실험초기부터 급격한 구름저항의 증가가 나타남을 관찰할 수 있으며, 접촉 표면을 주사전자현미경으로 관찰해보면 물질 전이에 의한 접촉면(Contact Patch)의 형성이 거의 되지 않았음을 알 수 있다.

구간별 표면 분석한 결과 Contact Patch는 초기 코팅층의 파손에 의하여 증가된 구름저항이 감소되기 시작하는 시기부터 볼 및 베어링 표면으로의 물질전이가 일어남을 알 수 있다. 이때부터 시간의 증가에 따라 물질전이층의 부피는 증가되며 이것이 접촉면의 면적을 증가시키게 된다. 물질전이 초기에는 거시적 접촉면적보다 작은 면적에서 하중을 지탱하게 되므로

계산된 접촉압보다는 큰 값을 가지게 된다. 따라서 이 경우 초기에 소성 웨이크다운이 일어나게 되며 이에 의하여 Contact Patch의 두께가 안정화된 후에는 탄성 웨이크다운 현상과 히스테리시스 손실에 의해 구름저항이 발생하는 것으로 사료 된다. 계속적인 Contact Patch의 성장은 모재면이 볼의 구름운동에 노출되게 하는 역할도 하게 되며 이에 의한 Fretting 현상에 의하여 구름 저항의 평균값 및 진폭이 증가하게 된다.

## 참 고 문 헌

1. 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.
2. F.J. Clauss, Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Chap. 3, pp.45-50, Academic Press, New York and London, 1972.
3. D. Jang and D.E. Kim, "Tribological Behavior of Ultra-Thin Soft Metallic Deposites on Hard Substrates," Wear, Vol. 196, pp.171-179, 1996.
4. E.F. Finkin, "The Friction of Lead Films in Spherical Contact," Transactions of the ASME, July, pp.328-332, 1973.
5. J. Gerkema, "Lead Thin Film Lubrication," Wear, 102, pp.241-252, 1985.
6. 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.
7. J. Halling, "The Role of Surface Films in the Frictional Behavior of Lubricated and "Dry" Contacts-A Unifying Influence in Tribological Theory," ASLE Transactions, Vol.24, No.4, pp.528-536, 1982.
8. T.E.S. El Shafei, R.D. Arnell and J. Halling, "An Experimental Study of the Hertzian Contact of Surfaces Covered by Soft Metal Films," ASLE Tras., Vol. 26, No. 4, pp.481-486, 1982.
9. J. Halling, T.E.S. El Shafei and R.D. Arnell, "The Rolling Resistance of Surface Covered by Soft Metal Films," Proc. In st. Mech. Engrs., Vol.199, No.C1, pp. 51-55, 1985.
10. F.P. Bowden and D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids, Chap. 15, pp.288, 1964.
11. J.J. Bikerman, "Effect of Roughness on Rolling Friction," J. Appl. Phys. Vol. 20, pp.971-975, 1949.
12. D. Tabor, "The Mechanism of Free Rolling Friction," Lubrication Engineering, Vol. 12, pp.379-386, 1956.
13. K.R. Eldredge and D. Tabor, "The Mechanism of Rolling Friction, I. The Plastic Range," Proc. Roy. Soc., A229, pp.181-197, 1955.
14. B.G. Brothers and G.R. Bremble, "The Effect of Geometric Conformity between a Ball and Its Track on the Free Rolling Resistance." Wear, Vol. 20, pp. 175-187, 1972.
15. K.L. Johnson, Contact Mechanics, Chap.8, pp.268-271, 1985.
16. K.L. Johnson, "Rolling Resistance of a Rigid Cylinder on an Elastic-Plastic Surface," Int. J. Mech. Sci., Vol. 14, pp.145-148, 1972.
17. S.K. Wong, A. Kapoor and J.A. Williams, "Shakedown Limits on Coated and Engineered Surfaces," Wear, 203-204, pp 162-170, 1997.
18. 공호성, 윤의성, 권오관 외, "진공 및 특수 환경 분위기에서 사용하기 위한 마찰 및 마모 시험 장치," 대한민국특허, 출원번호 제 94-10027호, 1994.