

## 은 박막이 코팅된 표면에서 물질전이층의 형성 및 그 트라이볼로지적 역할에 관한 연구

양승호 · 공호성<sup>†</sup> · 윤의성 · 김대은\*

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터  
\*연세대학교 기계공학과

### A Study on the Formation and the Tribological Role of Mass Transfers Layers at Rubbing Silver-coated Surface

Seung Ho Yang, Hosung Kong<sup>†</sup>, Eui-Sung Yoon and Dae Eun Kim\*

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology  
\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract** – The tribological role of mass transfer layer was studied with silver coatings under various ranges of load and sliding speed. Silver coating was performed with a functionally gradient coating method. Tests were performed in dry sliding conditions, using a ball-on-disk contact configuration, at the load of 0.0196–17.64 N and the sliding speed of 20–1,000 mm/s in ambient air. Optical microscope and EPMA analyses showed that contact surfaces were covered with the mass transfer layers of agglomerated wear particles depending upon the contact conditions, and they greatly influenced the tribological characteristics of the surfaces. However, the formation of mass transfer layer was suppressed as the sliding speed increased, and above a critical sliding speed, no mass transfer layer was able to form. For building up a general framework of tribological behavior of the coated silver films, all test data were summarized on a map whose axes are contact pressure and sliding speed.

**Keywords** – transfer layer, coating; critical speed, wear map, friction.

#### 1. 서 론

은 박막은 고체윤활코팅의 일종으로 주로 우주항공용 기계요소들의 윤활을 목적으로 연구되어왔다. 하지만 이러한 연금속 박막은 대표적 기계구조용 재료인 강(steel)과의 화학적 친화도(chemical affinity)가 낮기 때문에 그 접착강도가 낮아서 베어링과 같은 일반기계요소들의 적용에는 그 한계가 있다고 알려져 왔다[1].

그런데 연금속 박막을 코팅한 경우 작동 조건, 환경 및 코팅 조건의 변화에 따라 장시간의 수명이 나타나는 경우가 있는데, 이와 같은 사실은 연금속 박막이 파손되면서 나타나는 물질전이층(mass transfer layer)이 보호층(protective layer)의 역할을 하면서 윤활을 담당

함에 의하여 나타나는 것으로 밝혀지고 있으며[2], 실제로 본 저자의 연구[3-10]에서도 여러 가지 연금속들을 베어링 표면에 증착 시킨 후 구름접촉 실험한 경우, 증착층 파손 후에도 장시간 동안 안정되고 낮은 구름마찰 계수가 나타난 연구결과를 보고한 바 있는데, 이 경우에도 파손된 증착 물질들로 형성된 물질전이층이 결정적 역할을 한 것을 알 수 있었다.

이러한 물질전이현상은 트라이볼로지 분야에서는 자주 일어나는 현상이다[11-13]. 특히 건마찰이나 고체윤활의 경우에 그러하다. 전이물질의 접착 강도가 강할 경우 물질전이 현상은 마모라기보다는 표면 형상의 변화라는 측면에서 이해되어야 할 것이다. 비록 이러한 물질전이 현상이 응착력과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있지만, 이로 인하여 마찰계수가 영향을 받게 되는 기구(mechanism)적 측면의 연구는 아직도 부족한 현실

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : hkong@kst.re.kr

이다. 다시 말하면 Bowden과 Tabor[14]의 주장대로 표면의 전단이 일어나는 부분에 모세보다 전단강도가 작은 물질이 존재하고 이로 인하여 마찰계수가 감소된다는 이론만으로는 실제로 접하게 되는 광범위한 마찰계수의 변화에 대하여 논리적으로 설명하기가 어렵게 된다. 이는 매끄러운 표면에 전이된 물질전이층에 대하여도 그러하며 특히 물질전이량이 시간에 따라 변화되는 경우가 대표적 예로 나타날 수 있다[15].

물질전이층의 발생기구는 아직도 확실히 밝혀지지 않았지만 현재 세계적으로 주장되고 있는 학설들을 정리하면 다음과 같다. Archard[16]는 상대 운동하는 두 미소 요철이 접촉할 경우 그 높은 접촉 압력에 의하여 순간적인 접합이 발생하게 되며, 이때 상대 운동이 계속되면 두 요철 부위 중 강도가 낮은 부분에서 파단이 일어나서 일부의 물질이 상대 운동면에 부착되며 이러한 방법으로 물질전이가 발생된다는 이론을 주장하였다.

최근 물질전이층이 이러한 기구보다는 미세한 마멸 입자들의 합체 및 상대면으로의 전이에 의하여 발생된다는 것이 많은 연구자들에 의하여 밝혀지면서 물질전이층의 발생에 대한 새로운 주장이 나타나고 있는데 이는 기계적 혼합(mechanical mixing)[17-19]이라는 이론이다. 이는 물질전이가 미세한 입자들의 뭉침(agglomeration)에 의하여 어느 한도 이상의 크기로서 성장한 이후 상대 운동면에 전이되어 물질전이층을 형성한다는 것이다.

이상과 같은 두 가지 가설이 물질전이층의 생성 기구의 주종을 이루고 있으나, 아직도 그 생성 기구는 확실치 않은 실정이며 특히 작동 조건의 변화에 따라 그 생성 기구 및 생성 정도도 변화되기 때문에 물질전이층의 생성과 관련해서는 좀더 체계적인 연구가 필요하다 하겠다.

특히 코팅된 재료 표면간의 마찰 시 나타나는 물질전이층의 트라이볼로지적인 역할은 현재까지 전무한 실정인데 이는 모든 연구가 코팅층의 파손이 수명의 한계라는 일반적인 통념을 넘어서지 못하고 코팅층의 파손 이전까지만을 다루고 있기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 연구 영역을 넘어 코팅층의 파손 이후까지를 연구의 영역으로 다루고자 하였다. 또한 이를 통하여 인체의 자체치유(self-healing) 현상과 같이 마찰에 참가하는 코팅재에서도 이와 유사한 현상이 발생되는데 물질전이 현상이 바로 그것이며 코팅층이 파손된 이후에도 코팅층이 하단 보호층의 역할이 물질전이층에 의하여 수행될 수 있음을 밝히고자 한다. 본 논

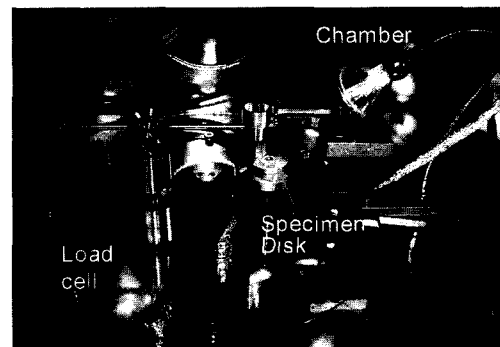
문에서 주장하고자 하는 또 하나의 중요한 점은 이러한 물질전이층이 언제나 발생하는 것은 아니며 작동 조건에 따라 코팅층 파손 이후 물질전이층이 발생할 수도 있고 반대로 발생하지 않을 수도 있다는 것이다.

따라서 본 논문에서는 다양한 조건에서 물질전이층의 발생을 고찰하였으며 이를 접촉 압력과 속도라는 하나의 틀/framework 안에서 정리하고자 하였다.

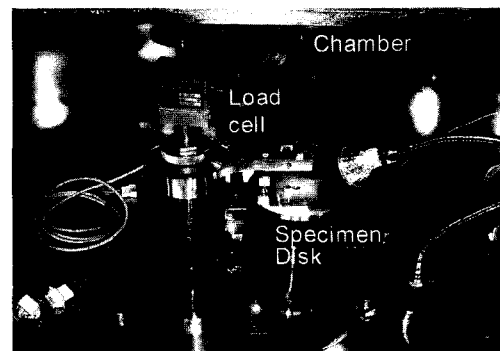
## 2. 실험장치 및 방법

본 논문에서는 AISI 52100 디스크 시편의 표면에 경사가능형 박막증착법[20]을 사용하여 순수한 은(silver)을 코팅한 후 일방향 마찰 시 나타나는 마찰계수를 측정하였고, 실험 후 접촉 표면을 분석하기 위하여 광학 현미경분석 및 EPMA(electron probe micro analyser)를 사용하여 분석을 시행하였으며 시편 불과 디스크의 마모량을 Archard의 마모계수[16]를 사용하여 분석하였다.

Fig. 1에는 본 연구에 사용된 실험장치들을 나타내



(a) miniature tribo-tester



(b) macro tribo-tester

Fig. 1. Close-up views of tribo-testers.

었다. 본 실험장치들은 인위적으로 분위기 조절이 가능한 용기(chamber) 내에서 실험을 실시할 수 있게 제작되었으며 최대 접촉압력(Hertzian maximum contact pressure,  $P_{max}$ ) 0-400 MPa까지는 Fig. 1(a)의 미소 마찰 실험장치를 사용하여 실험하였으며, 최대접촉압력 500-1000 MPa에서는 Fig. 1(b)의 마찰 실험장치를 사용하여 실험을 실시하였다.

본 실험에서는 추에 의한 하중 부과 방식을 사용하였으며 윤활유를 완전히 제거한 조건에서 정속(20 mm/sec), 건식 마찰 실험을 실시하였다.

시편으로는 직경 40 mm, 두께 6 mm의 AISI 52100 디스크를 열처리에 의하여 표면경도를 HRC 57-62로 맞춘 다음, 최종 표면거칠기가 Ra 0.1  $\mu$ m가 되도록 연마세척 후 코팅하여 사용하였으며, 시편 볼은 직경 12.7 mm, 재질 AISI 52100(grade 25; extra polished), 경도 HRC 65인 SKF사의 제품을 사용하였다

마찰계수는 로드셀을 사용하여 측정하였으며 또한 은 코팅의 상대재(counter part)인 시편 볼의 마모량을 정량적으로 비교하기 위하여 Archard의 마모계수(K, wear coefficient)를 사용하였다.

$$V = \frac{VH}{Ld} \quad (1)$$

이때, K는 Archard의 마모계수, V는 마모체적, d는 미끄럼거리, L은 부과된 수직하중을 나타낸다.

실험환경은 대기(ambient air)에서 실행하였으며 상세한 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 코팅용 시편으로는 열처리된 AISI 52100 디스크를 사용하였으며 원자혼합층 형성공정 이후 가열증발증착 공정에 의하여 접착강도가 높고 표면 전단강도가 낮은 경사기능형 은 박막을 코팅하여 실험에 사용하였다.

이때 시편 디스크는 코팅전에 n-hexane을 사용하여 2분간 초음파 세척한 후 진공도  $5 \times 10^{-5}$  torr에서 1.5

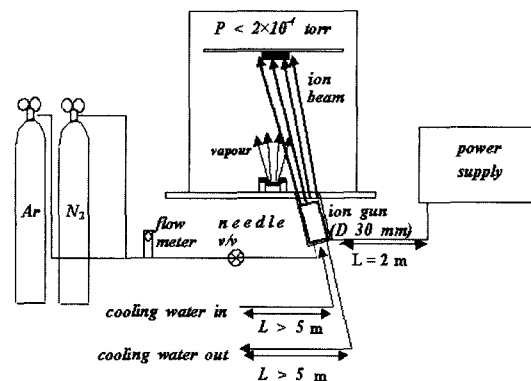


Fig. 2. Coating device.

keV로 가속된 Ar<sup>+</sup> 이온을 시편 디스크의 표면에 2분간 조사하여 표면을 cleaning하였다. Cleaning후 이온 빔처리층은  $9 \times 10^{-5}$  torr에서 1.5 keV로 가속된 Ar<sup>+</sup> 이온을 시편 디스크의 표면에 조사하면서 순도 99.99%의 은 0.1 g을 가열증발시켜 실시하였으며 시편디스크의 표면에 은과 강(steel)의 원자 혼합층 형성 후 약 80 nm의 은 박막층을 형성시켜 이후의 은 가열증발증착 시 seed layer로 활용하였다. 원자 혼합층을 형성시킨 후 그 위에 2  $\mu$ m 두께의 은 박막층을 가열증발증착법만을 사용하여 원자혼합층위에 증착시켜 실험에 사용하였다.

본 연구에서 사용된 경사기능형 박막의 코팅 장치에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

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

코팅두께는 시편 증착 시 증착 장치에 함께 장입하여 코팅한 시편디스크의 코팅면을 Alpha-Step을 이용하여 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 실험 조건의 영향

접촉압력이 마찰과 마모에 미치는 영향을 알아보기 위하여 일정 실험속도(20 mm/sec), 여러 가지 수직하중조건하에서 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이로부터 알 수 있듯이 접촉압력이 300 MPa 이하일 경우 은 코팅층의 파손이 나타나지

Table 1. Test conditions

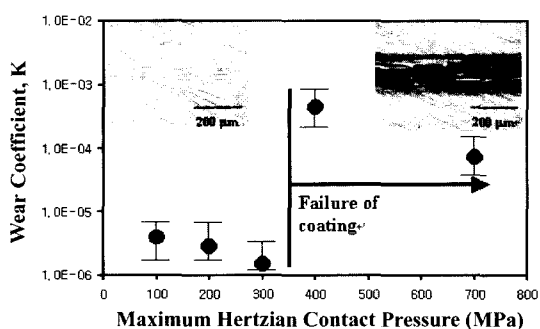
Test Conditions	Specimen	
	Ball	Disk
Roughness, Ra (nm)	10	100
Speed (mm/sec)	20, 100, 400, 1000	
Normal force (N)	0.02, 0.098, 0.47, 0.98, 5.88, 17.64	
Lubrication	Dry	
Environments	Ambient air	
Temperature	Room temperature (15-20°C)	

않았으며 시편볼에서도 경마멸(mild wear)이 나타난 것을 알 수 있었다. 접촉압력이 400 MPa 이상일 경우에는 은 코팅층의 파손으로 인하여 상대재인 볼 접촉부의 마멸계수가 증가한 것을 알 수 있었다.

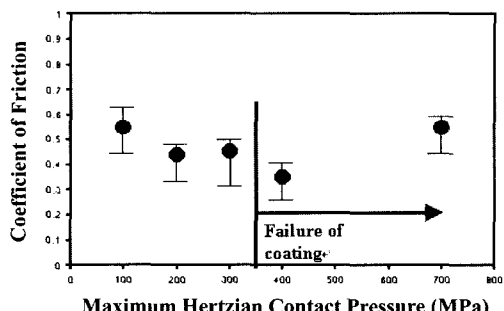
이때, Fig. 3의 접촉압력에 따른 마찰계수의 변화에서 알 수 있듯이 접촉압력 400 MPa 이상에서는 은 박막의 파손이 실험중에 발생하였음에도 불구하고 마찰계수의 증가가 나타나지 않았다. 이는 코팅층의 파

손이후에 접촉면에 새로운 보호막(protective layer)이 발생하였음을 암시해 주는 결과이며, 시편 디스크 표면에 대한 EPMA 분석결과(Fig. 4)에서도 확인할 수 있듯이 은 코팅층의 파손이후에 접촉 표면에 은 물질전이층이 발생하였음을 확인할 수 있었다.

따라서 이러한 결과로부터 은 박막의 파손이후 접촉

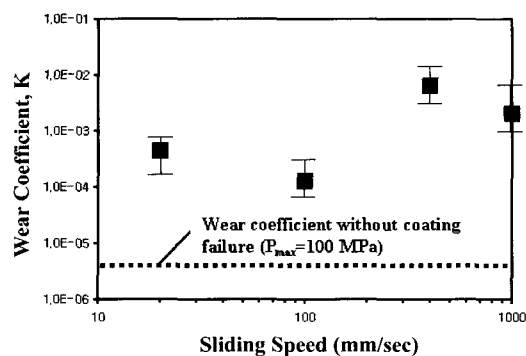


(a) K vs.  $P_{max}$

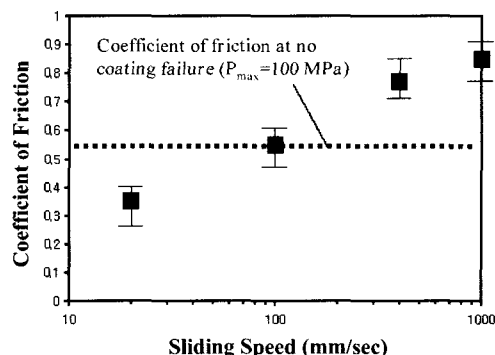


(b) Coefficient of friction vs.  $P_{max}$

Fig. 3. Wear coefficient of specimen balls and coefficient of friction after 1 km sliding (sliding speed: 20 mm/sec).



(a) K vs. sliding speed



(b) Coefficient of friction vs. sliding speed

Fig. 5. Wear coefficient of specimen balls and coefficient of friction after 1 km sliding (contact pressure: 400 MPa).

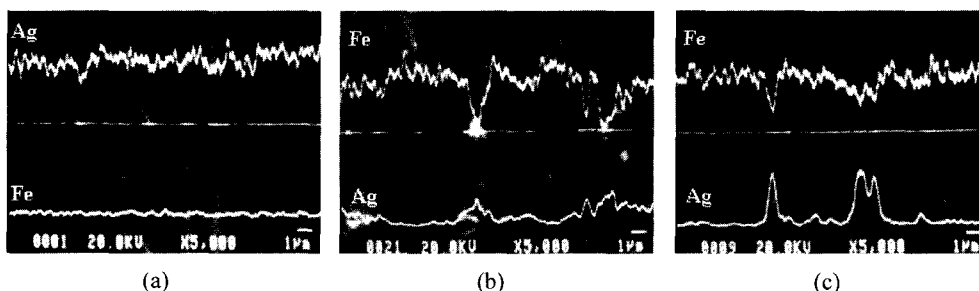


Fig. 4. Results of EPMA line profiling analysis

(a)  $P_{max}=100$  MPa,  $V=20$  mm/sec, (b)  $P_{max}=400$  MPa,  $V=20$  mm/sec, (c)  $P_{max}=700$  MPa,  $V=20$  mm/sec.

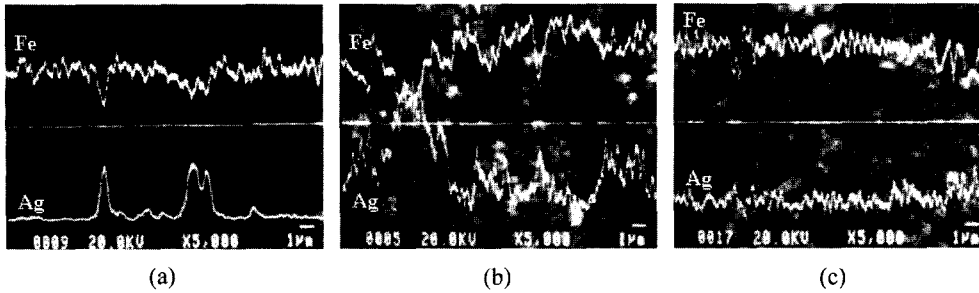


Fig. 6. Results of EPMA line profiling analysis

(a)  $V=20$  mm/sec,  $P_{max}=400$  MPa, (b)  $V=100$  mm/sec,  $P_{max}=400$  MPa, (c)  $V=1000$  mm/sec,  $P_{max}=400$  MPa.

표면에 발생된 물질전이층이 재료의 마찰과 마멸에 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다.

실험 속도의 영향을 알아보기 위하여 은 코팅층의 파손이 발생하는 하중(400 MPa)에서 실험속도 20 mm/sec, 100 mm/sec, 400 mm/sec, 1,000 mm/sec의 조건으로 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실험속도가 100 mm/sec 이하인 경우에는 마멸계수가 비교적 낮은 값( $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ )을 보였으나 실험속도가 이보다 증가된 경우 마멸계수가 약 10배정도 증가되는 것을 알 수 있었다. 또한 이 경우 마찰계수도 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

접촉표면에서 발생한 변화를 알아보기 위하여 시편 디스크의 표면에 대하여 EPMA 분석을 시행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험속도 100 mm/sec 이하의 경우 접촉표면에서 은 물질전이층이 관찰되었지만, 실험속도 1000 mm/sec 인 경우에는 은 물질전이층을 관찰할 수 없었다. 따라서 은 박막이 파손된 이후 비교적 저속에서 나타나는 물질전이층은 보호층의 역할과 고체윤활층의 역할을 동시에 나타낸 것을 알 수 있었으며 은 물질전이층이 형성되지 않은 비교적 고속의 실험조건에서는 마찰과 마멸이 높게 나타남을 정성적으로 설명할 수 있었다.

### 3-2. Construction of wear map

본 연구에서 나타난 결과들을 Hertz 최대 접촉압력 및 실험속도의 축으로 구성된 2차원 평면에 본 연구에서 얻어진 다양한 결과들을 통합하여 정리한 결과 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 3가지의 특징적인 마멸영역(characteristic wear regime)을 구분할 수 있었다.

#### 3-2-1. 마멸영역 I

마멸영역 I은 본래의 코팅층이 파손되지 않고 주어진 하중을 지탱한 구간이다. 이 구간에서는 연금속

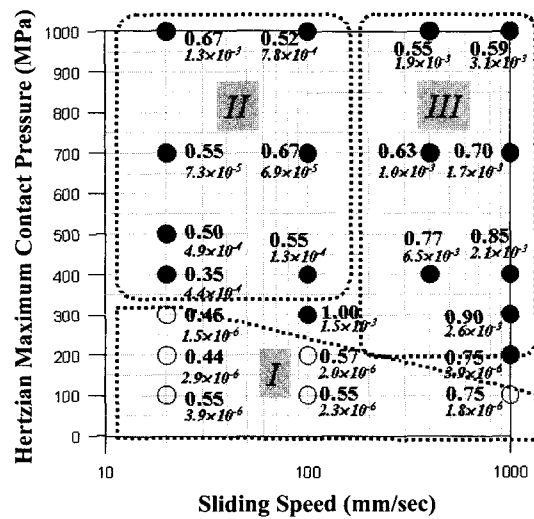


Fig. 7. The characteristic wear regimes of the functionally gradient silver-coated surfaces.

코팅층이 보호층의 역할을 하기 때문에 상대재인 볼의 마멸도 극히 작다. 이때 접촉 압력을 증가시켜 마멸영역 I에서 마멸영역 II 또는 마멸영역 III의 조건으로 작동 조건이 바뀌면 코팅층의 파손이 일어나게 된다.

#### 3-2-2. 마멸영역 II

마멸영역 II는 은 박막의 파손이후에도 경마멸(mild wear)이 나타나는 구역으로 은 물질전이층이 보호층 및 고체윤활층의 역할을 수행하여 마찰과 마멸이 비교적 낮은 구간이다.

#### 3-2-3. 마멸영역 III

마멸영역 III은 은 박막의 파손이후에 중마멸(severe wear)이 나타나는 구역으로 은 물질전이층이 나타나지 않으며 따라서 마찰과 마멸이 가장 높은 구간이다.

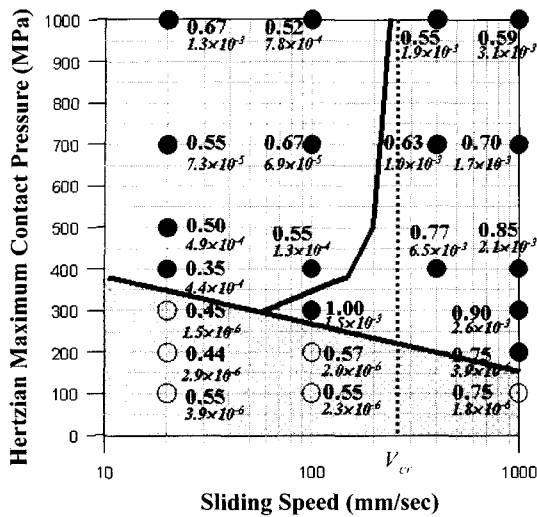


Fig. 8. A wear mechanism map of the functionally gradient silver coating (italicized wear coefficients and coefficient of friction were given numerically).

### 3-3. 경사기능형 은 박막의 마멸기구 map

상기한 3가지 마멸영역을 구분하여 경사기능형 은 박막의 마멸기구 map을 구성하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

이때 Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 마멸영역 II와 마멸영역 III간의 경계는 실험속도에 크게 의존함을 알 수 있었다. 이는 실험 속도의 증가시 원심력과 같은 물질전이를 방해하는 힘들이 증가되어 물질전이층이 발생하게 될 확률이 감소되게 되어 더 이상 물질전이층이 안정하지 못한 임계속도( $V_{cr}$ )가 존재함을 나타내고 있다.

## 4. 결 론

이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있었다.

- (1) 은 박막이 파손된 후 접촉면에 형성되는은 물질전이층은 보호막과 교체윤활막의 역할을 한다.
- (2) 다양한 실험 변수에 의하여 얻은 박막의 마찰 마멸 특성을 접촉 압력-속도의 평면에 그 마찰과 마멸 및 물질전이층 발생 여부를 정리하여 map을 구성한 결과 코팅층이 파손되지 않는 영역, 코팅층이 파손된 후 물질전이층이 발생하는 영역 및 코팅층 파손이후 물질전이층이 발생하지 않는 영역의 세가지 특징적인 영역으로 구별되었다.

(3) 코팅층의 파손이 일어나는 접촉 압력 조건에서는 속도를 증가시킴에 따라 물질전이층이 줄어드는 것이 관찰되었으며 어떤 속도 이상에서는 더 이상 물질전이가 발생되지 않는 임계속도가 존재하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정 연구개발 사업 중 중점국가연구개발사업과, 국가지정연구실사업의 연구비지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp.28-31, 1995.
2. 양승호, 공호성, 윤의성, 권오관, “은 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름저항 거동 고찰,” 한국윤활학회지, Vol.13, No.3, pp.85-92, 1997.
3. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, “주석 및 아연 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름저항 거동에 대한 실험적 고찰,” 한국윤활학회지, Vol.14, No.1, pp.1-6, 1998.
4. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, “연금속 박막이 코팅된 베어링의 구름저항 거동에 미치는 분위기의 영향에 대한 실험적 고찰,” 한국윤활학회지, Vol.14, No.3, pp.1-6, 1998.
5. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, “플라즈마 표면개질 처리된 은 박막의 구름저항 거동 고찰,” 한국윤활학회지, Vol.15, No.3, pp.321-327, 1999.
6. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, “은 박막이 코팅된 베어링강의 마찰거동에 미치는 마모 입자의 영향에 대한 실험적 고찰,” 한국윤활학회지 Vol.17, No.3, pp.221-227, 2001.
7. 양승호, 공호성, 윤의성, 김대은, “구름거동에 미치는 은 입자투여의 영향에 대한 실험적 고찰,” 한국윤활학회지, Vol.17, No.6, 2001.
8. 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.
9. H. Kong, S.H. Yang, S-K. Koh and S.C. Choi, “The Effect of Humidity on the Rolling Resistance of Silver Coatings Modified by Plasma Surface Treatments,” Wear, Vol.249, Issue 9, pp.780-787, 2001.
10. S.H. Yang, H. Kong, E-S. Yoon, “An Experimental Study on the Effect of Wear Particles on the Sliding Behavior of Silver-coated Bearing Steel,” Proceedings of the 2nd World Tribology Congress, September, 2001.
11. M. Godet, “Third-bodies in Tribology,” Wear,

- Vol.136, pp.29-45, 1990.
12. I.L. Singer, "How Third-body Process Affect Friction and Wear," MRS Bulletin, June, pp.37-40, 1998.
  13. S. Wilson and A.T. Alpas, "Tribo-layer Formation during Sliding Wear of TiN Coating," Wear, Vol.245, pp.223-229, 2000.
  14. F.P. Bowden and D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids, Part II, pp.52-86, 1964.
  15. Y. Tsuya and R. Takagi, "Lubricating Properties of Lead Films on Copper," Wear, Vol.7, pp.131-143, 1964.
  16. J.F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," J. Applied Physics, Vol.24, No.8, pp.981-988, 1953.
  17. D.A. Rigney, "Transfer, Mixing and Associated Chemical and Mechanical Processes during the Sliding of Ductile Materials," Wear, Vol.245, pp.1-5, 2000.
  18. X.Y. Li and K.N. Tandon, "Microstructural Characterization of Mechanically Mixed Layer and Wear Debris in Sliding Wear of an Al Alloy and an Al based Composite," Wear, Vol.245, pp.148-161, 2000.
  19. P. Diss and M. Brendle, "A General Approach to Discontinuous Transfer Films: Influence of Sliding Speed and Stick-Slip Phenomena," Wear, Vol.203-204, pp.564-572, 1997.
  20. 양승호, 윤의성, 공호성, "원자혼합법으로 증착된 은 박막의 트라이볼로지적 특성에 관한 연구," 한국윤활학회 제34회 추계 학술대회, pp.27-34, 2001.