

구름거동에 미치는 은 입자 투여의 영향에 대한 실험적 고찰

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

Effect of Silver Particle Introduction on Rolling Friction

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

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology

*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract - The effect of silver particle introduction on the rolling friction of AISI 52100 steel pairs has been investigated. Experiments were performed in dry conditions using a thrust bearing-type rolling test rig at a load range of 12 - 960 N and a sliding velocity range of 8 - 785 mm/sec with pure(99.99%) silver particles. Results showed that the introduced silver particles formed transfer layers, which protected virgin bearing surfaces and resulted in low rolling friction. By changing the quantity of silver particles, transitions in the rolling friction wear found. Results also showed that the variations in normal load and rolling speed also affected the rolling friction behavior. Analyses using SEM and EPMA showed that the formation of transfer layer was mainly governed by the silver particle quantity, normal load and rolling speed, and this resulted in the different behavior of rolling friction. In this study, it was found that the low and stable rolling friction was resulted from the shakedown phenomena occurred at the silver transfer layer.

Key words; silver, wear particle, transfer, shakedown, rolling friction

1. 서론

마멸입자는 그 거동이 마찰과 마멸에 큰 영향을 미친다는 면에서 연구자들의 지대한 관심사항이 되어왔다. Godet[1]은 마멸입자의 거동을 제3체(the third body)라고 정의하였으며 연속체 역학과 유체역학적인 관점에서, 마멸입자는 접촉하며 상대운동하는 두 물체간에서 속도적응(velocity accommodation)의 형태로 마찰과 마멸에 참여한다고 주장하였다. 즉 마멸입자는 두 물체간의 기존의 상대운동을 마멸입자와 물체표면간의 상대운동으로 변화시키게 되며 이때 마멸입자의 운동, 변형에 의하여 물체표면이 받게 되는 변형률(strain)이 변화되어 이것이 마찰과 마멸에 변화를 일으키게 된다고 하였다. 이러한 관점은 마멸입자가 쟁기질(plowing)

및 연삭(abrasion)과 같은 유해한(malign) 거동을 일으킨다는 일반적인 인식과는 달리 마멸입자로 인한 마찰과 마멸의 저감과 같은 이로운(beneficial)영향에 대한 가능성을 역설하였다는 점에서 그 의미를 찾을 수 있다.

현재까지 여러 연구자들이 Godet의 이러한 주장에 관한 실증과 반증의 연구결과를 계속 발표하고 있으며 이를 통하여 마멸입자의 거동에 대한 서로 다른 시각의 차이를 좁혀나가고 있다. 흥미로운 사실은 동일한 재료의 접촉 상대운동에서도 속도, 하중, 접촉 조건 등에 따라 마찰을 높이고 마모를 증가시키는 유해한 결과를 나타낼 수도 있지만 반대로 마찰을 줄이고, 안정시키고 마모를 줄이는 이로운 영향을 나타낼 수도 있다는 점이다. 실제로 Hirst와 Lancaster[2]는 steel과 brass간의 마찰 시 실험하중을 변화시킬

경우 마멸거동이 천이 한다는 사실을 보고하였는데 이러한 현상이 특정한 실험조건하에서 마멸입자에 의하여 생성되는 제3의 표면 피막(surface film)에 의한 것임을 밝혀내었다.

마찰중에 발생하는 이러한 표면 피막은 일종의 보호층(protective layer)으로서의 역할을 할 수 있다는 면에서 연구자들의 많은 관심의 대상이 되어왔는데 특히 마멸입자가 마찰면으로 전이(transfer)되어 형성하는 물질전이층은 그 발생빈도가 높고 발생 시 재료의 마찰과 마멸 특성을 크게 변화시킨다는 점에서 주목되어왔다. 최근 물질전이 현상에 대한 연구방향은 크게 두가지로 요약할 수 있는데 그 하나는 물질전이가 일어나는 원인과 기구를 규명하기 위한 연구이고 나머지 하나는 물질전이층이 마찰과 마멸에 미치는 영향을 연구하는 분야이다. 물질전이 기구에 관한 분야에서는 Rigney[3], Alpas[4], Kuhlmann-Wilsdorf[5], Tandon[6], Stott[7], Brendle[8] 등이 표면에너지가 물질전이에 미치는 영향, 선택적 물질전이 현상, 물질전이층의 전위(dislocation)구조 분석, 표면에너지 관점의 물질전이 기구 등의 연구를 수행하였다. 또한 물질전이층의 역할에 관하여는 Kapoor[9], Williams[10], Alpas[11], Brendle[12] 등이 각각 ratchetting 마멸기구 제안, 표면 거칠기의 변화, 마찰열 관점에서의 마멸천이, Fretting 관점에서의 물질전이층의 역할과 같은 연구를 수행하였다. 이상의 연구들을 종합해보면 아직까지도 특정관점에서의 연구만이 진행되었음을 알 수 있는데 이는 마멸입자의 거동 중 중요한 부분을 차지하는 물질전이층의 생성 및 역할에 대한 연구가 세계적으로도 시작단계이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 마멸입자에 의하여 생성되는 물질전이층의 트라이볼로지적 거동을 연구하고자 순수한 은 입자를 투입한 후 구름 마찰 실험을 실시하였으며 그 투입량, 하중 및 속도를 변화시켜 은 입자에 의하여 생성되는 물질전이층이 구름마찰거동에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 연구에서는 상용 트러스트 베어링 시편을 사용하도록 고안 제작된 rolling test-rig

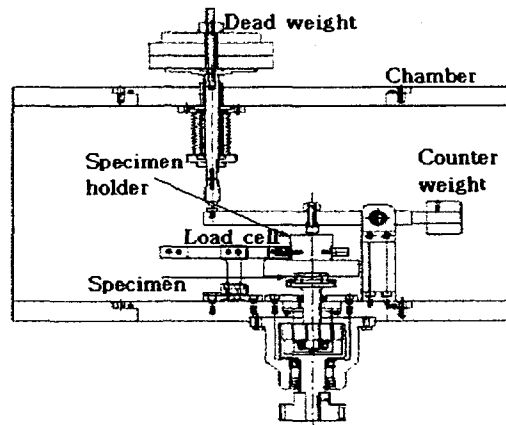


Fig. 1. A schematic figure of rolling test rig.

형태의 구름저항 실험장치가 기본적인 실험장치를 구성하고 있으며, 볼의 편심 발생 및 이에 따른 구름저항의 변화를 없애기 위하여 회전 관성 모멘트가 큰 상부시편 홀더를 사용하였다. 수직하중은 추하중에 의한 하중부과방식을 사용하였으며 이때 추에 의하여 가해진 하중은 지렛대의 원리에 의하여 2.5배로 증폭되며, 시편 상부 홀더의 자중(2.5kg)과 합해져서 시편에 가해지도록 하였다. 또한, servo motor를 사용하여 부하변동 시에도 일정한 회전속도로 실험할 수 있도록 하였다. 구름 실험 시 나타나는 구름 마찰력의 측정에는 미소량 측정용 로드셀(최대 하중 9.8 N)을 사용하였다. 실험부위의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

2-2. 실험시편 및 실험방법

시편 볼은 직경 7.14 mm로 NSK사 제품(NSK 51204, Ra 10 nm)을 사용하였으며 리테이너를 제거한 후 1회 실험 시 13개를 사용하였다. 구름시편으로는 NSK 51204 트러스트 베어링 면(Ra 50 nm)을 사용하였으며 시편볼과 베어링면은 실험전에 normal-hexane을 사용하여 2분간 2회 초음파 세척한 후 실험에 사용하였다.

본 연구에서는 은(silver) 물질전이층이 구름마찰 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 실험전 순수한(99.99%) 은 분말(구형, 직경 0.3 μm)을 베어링면에 투입한 후 구름마찰실험을 실시하였으며, 초기 은 입자 투입량, 실험하중 및 속도를 변화시켜 실험하여 각각의 조건에서 물질전이층의 형상 및 조성

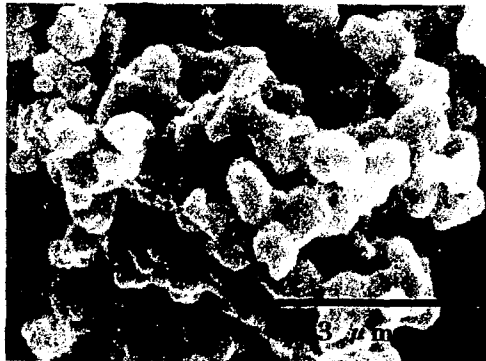


Fig. 2. A micrograph showing the silver particles.

이 구름마찰에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 실험에 사용된 은 입자의 SEM 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

실험은 대기중, 실온(15 - 20°C) 환경에서 트러스트베어링을 이용한 건식 구름 타입으로 시행하였으며 재현실험들을 통하여 실험 결과의 신뢰성을 확인하였다. 모든 시편의 실험은 동일한 회전수(16,667 rpm) 동안 실시하였으며 실험 시 측정된 접선력(F_t)을 수직력(F_n)으로 나눈 값을 구름마찰계수로 환산하여 사용하였다.

$$\text{구름마찰계수} = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

Table 1. Test conditions

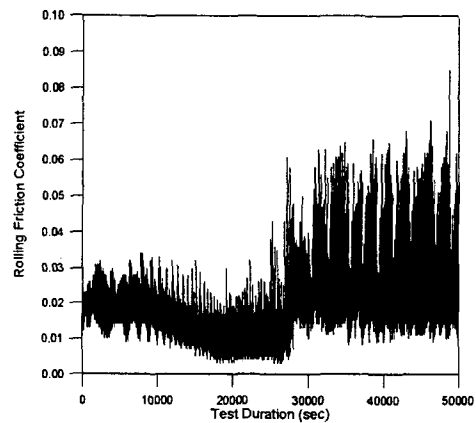
Test Conditions	Specimen	
	Ball	Bearing
Roughness, Ra (nm)	10	40
Speed (mm/sec)	8, 31, 236, 785	
Normal force (N)	12, 24, 61, 147, 500, 960	
Lubrication	Dry	
Environments	Ambient air	
Temperature (°C)	Room temperature	
Silver powder (g)	0.05, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6	

본 논문에서 사용한 구름마찰계수의 값은 구름마찰계수가 안정화된 구간(6,667 - 13,334 회전)의 평균값을 사용하였다. 상세한 실험조건은 Table 1에 정리하였다.

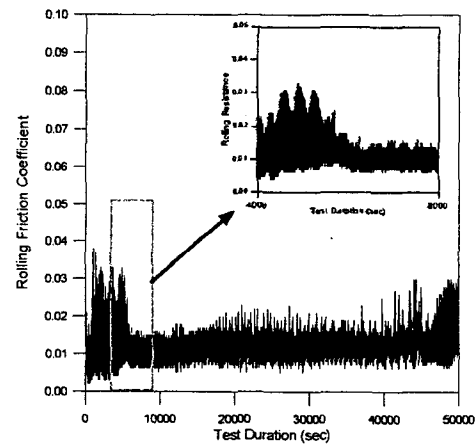
실험 후 구름접촉면 표면에 형성된 물질전이층의 형상을 분석하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 사용하였으며, 물질전이부의 조성분석을 위하여 전자탐침분석기(EPMA)를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

은 입자를 투입한 경우 접촉사이클에 따른 구름마찰거동 및 실험 후 시편볼 및 베어링

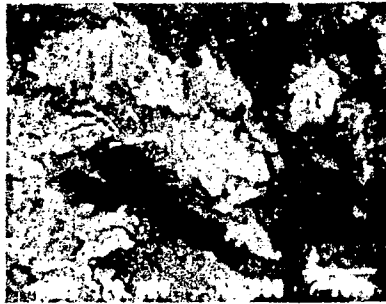


(a) without silver powder



(b) Ag particle, 0.3 g

Fig. 3. Rolling friction coefficient vs. test duration (normal force: 147 N, rolling velocity: 31 mm/sec).



(a) Back-scattered electron image



(b) EPMA silver mapping result

Fig. 4. EPMA analysis results of a tested ball surface (after 20,000 sec(6,667 cycles), Ag powder: 0.3 g, normal force: 147 N, rolling velocity: 31 mm/sec).

표면에 대한 SEM 분석결과를 각각 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 은 입자를 투여한 경우의 구름마찰계수(Fig. 3 (b))는 베어링만을 구름마찰 실험한 결과(Fig. 3 (a))보다 낮고 안정한 구름마찰계수를 나타냄을 알 수 있었다. 은 입자를 투여한 경우 초기 약 5,000 sec(1,667 cycles)까지 구름마찰계수가 증가하다가 점진적으로 감소되면서 낮고 안정한 구름마찰계수를 나타냄을 알 수 있었다. 20,000 sec (6,667 cycles) 실험 후 시편 볼의 표면을 EPMA로 분석한 결과(Fig. 4) 접촉표면에 은의 물질전이층으로 형성되었음을 알 수 있었다.

따라서 은 입자를 투여한 후 구름실험한 경우에서 나타나는 구름마찰계수의 감소 후 안정화 현상은 은 물질전이층의 형성 및 그 접촉변형과 밀접한 관계를 가진다고 할 수 있다. Johnson[13]에 의하면 최대접촉 압력(Hertzian maximum contact pressure, Po)

Table 2. Po/k value and the related properties for bulk silver under the load of 147 N.

Material	Total Load, (N)	Maximum Contact Pressure, Po (MPa)	Shear Yield Stress, k (MPa)	Po/k
Silver	147	622	145	4.29
AISI 52100 (Hardened)	147	622	1,250	0.50

과 임계전단 강도(k)의 비가 4.7 이하인 경우 셰이크다운 현상이 나타날 수 있다고 하며, Table 2에 나타낸 금속 은에 대한 Po/k 값으로부터 Fig. 3에서 나타난 구름마찰계수의 감소 및 안정화 현상은 셰이크다운에 의한 것으로 유추할 수 있다[14].

상기한 실험 및 분석결과로부터 은 입자를 투여한 후 구름실험한 경우의 구름마찰거동은 은 물질전이층 및 그 변형거동에 지배적으로 영향을 받음을 알 수 있었다. 이러한 거동에 영향을 줄 수 있는 인자들로는 초기 전이물질의 공급량[15], 하중[8,12] 및 속도[4,8,12]를 들 수 있다. 따라서 본 논문에서는 초기 전이물질의 공급량을 변화시키기 위하여 은 입자초기 투여량을 변경하였고, 여러 가지 수직하중과 속도에서 실험을 실시하였다.

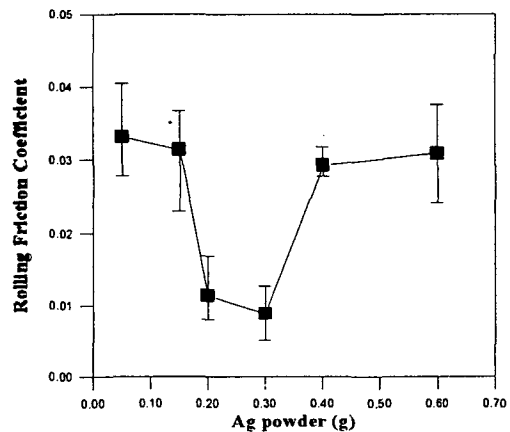
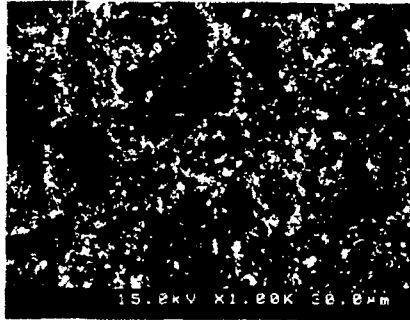


Fig. 5. The variation of rolling friction coefficient with the quantity of added silver powder(after 50,000 sec(16,667 cycles), normal force: 147 N, rolling velocity: 31 mm/sec).

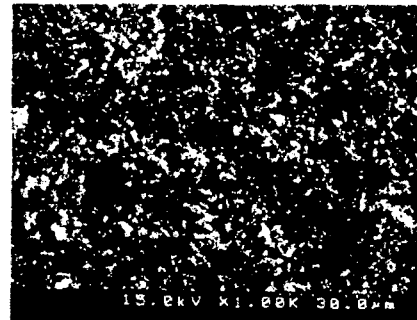
Fig. 5에 은 입자의 초기 투여량을 변화시켜 구름 실험을 실시한 결과를 나타내었다. 이로부터 알 수 있듯이 은 입자 투여량 0.2 - 0.3 g에서 가장 낮은 구름마찰계수나 나타났으며 이보다 낮거나(0.05 g, 0.15 g), 높은 (0.40 g, 0.60 g) 은 입자 투여시편의 경우 그 구름마찰계수가 현저히 큰 값을 가짐을

알 수 있었다. 이러한 결과의 원인을 알아내기 위하여 SEM으로 실험후 볼 및 베어링 표면을 분석한 결과 Fig. 6 및 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

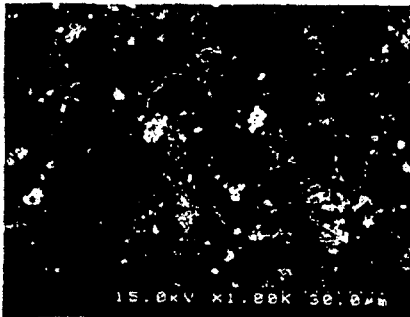
Fig. 6 및 Fig. 7로부터 은 입자를 0.6 g 투여한 경우에 0.3 g 투여한 경우보다 물질 전이층이 발달되어 나타났음을 알 수 있었는



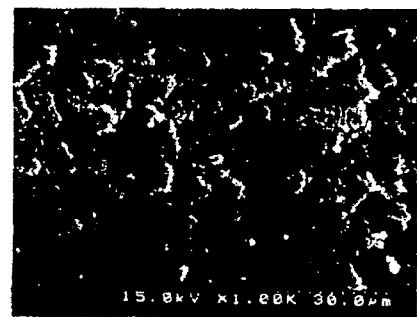
(a) Ag particle, 0.05 g



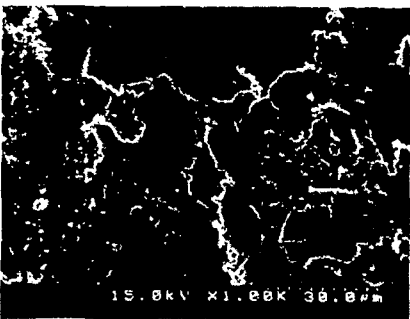
(a) Ag particle, 0.05 g



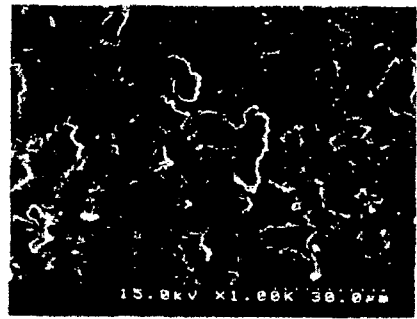
(b) Ag particle, 1.0 g



(b) Ag particle, 0.1 g



(c) Ag particle, 0.6 g



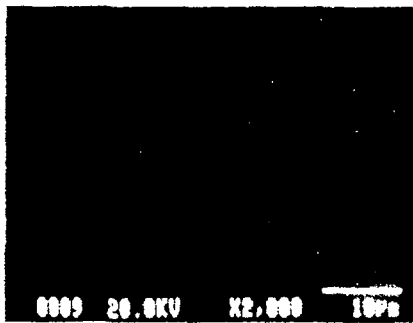
(c) Ag particle, 0.6 g

Fig. 6. SEM micrographs of tested ball surfaces (after 20,000 sec(6,667 cycles), normal force: 147 N, rolling velocity: 31 mm/sec).

Fig. 7. SEM micrographs of tested bearing surfaces (after 20,000 sec(6,667 cycles), normal force: 147 N, rolling velocity: 31 mm/sec).



(a) Back-scattered electron image



(b) EPMA silver mapping results

Fig. 8. EPMA analysis results of a tested ball surface (after 20,000 sec(6,667 cycles), Ag powder: 0.05 g, normal force: 147 N, rolling velocity: 31 mm/sec).

데, 이경우 물질전이층이 과도하게 발달되어 물질전이층의 소성변형이 구름마찰계수의 증가를 가져온 것이라고 사료된다. 또한 은 입자를 0.05 g을 투여하여 실험한 결과에서도 은 입자를 0.3 g 투여하여 실험한 경우보다 물질전이층이 발달된 결과를 알 수 있었는데 EPMA로 분석한 결과 (Fig. 8) 이는 은의 물질전이층이 아닌 것을 알 수 있었으며 이로부터 은 입자 0.05 g을 투여하여 실험한 경우 은 입자의 물질전이층은 발달되지 못하였으며, 따라서, 볼과 베어링면에서 나타나는 파손현상에 의하여 구름마찰계수가 증가된 것으로 사료된다.

따라서 이상과 같은 은 입자의 투여량 변화 실험결과로부터, 최소의 구름마찰계수를 보이는 최적의 전이물질 공급량이 존재한다는 사실을 알 수 있었다.

실험하중이 은 입자를 투여한 베어링간의 구름마찰에 미치는 영향을 알아보기 위하여

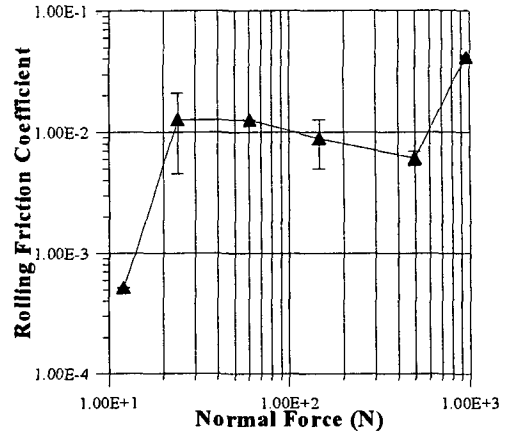
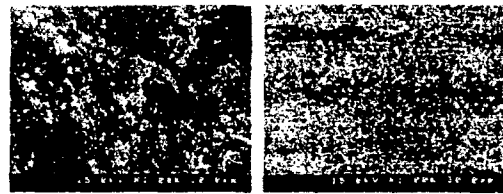
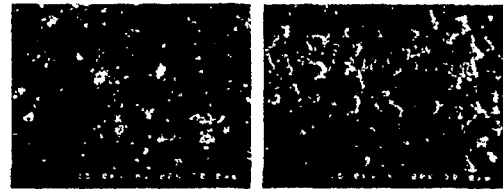


Fig. 9. The variation of rolling friction coefficient with normal force(after 50,000 sec(16,667 cycles), the Ag powder: 0.3 g, rolling velocity: 31 mm/sec).



ball surface bearing surface
(a) normal load: 12 N

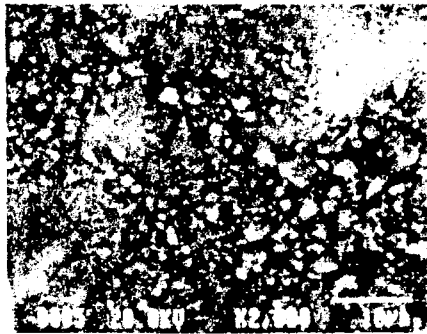


ball surface bearing surface
(b) normal load: 147 N

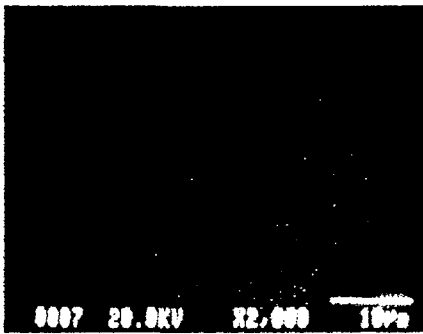


ball surface bearing surface
(c) normal load: 960 N

Fig. 10. SEM micrographs of tested surfaces (after 20,000 sec(6,667 cycles), Ag powder: 0.3 g, rolling velocity: 31 mm/sec).



(a) back scattered electron image



(b) EPMA silver mapping result

Fig. 11. EPMA analysis results of a tested ball surface (after 20,000 sec(6,667 cycles), Ag powder: 0.3 g, normal force: 960 N, rolling velocity: 31 mm/sec).

동일한 초기 은 입자 투여량(0.3 g), 회전속도(31 mm/sec)에서 여러 가지 수직하중(12 N, 24 N, 61 N, 147 N, 500 N, 960 N)을 가한 시편들에 대한 구름마찰 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 수직하중을 12 N에서 24 N으로 증가시킨 경우 구름마찰계수가 증가하였으며 수직하중을 24 N에서 500 N으로 증가시킴에 따라 구름마찰계수는 점진적인 감소가 나타났고 수직하중을 500 N에서 960 N으로 증가시킨 경우 다시 구름마찰계수가 증가하였음을 알 수 있었다.

Halling[16]에 의하면 경한 모재위에 이종의 연한 층이 존재하는 경우, 그 두께가 특정치 이하로 얇아지면 그 이중층의 변형거동은 경한모재의 변형거동을 따른다고 하였다. 본 연구에서 수직하중 12N을 가하여 실험한 경우에 그 접촉면에 형성된 은의 물질전이층은 Fig. 10 (a)에 나타난 바와 같이 수직하중 147 N 및 690 N 의 경우보다 상대적으로

얇으며 특히 접촉 시 소성변형으로 발생하는 contact patch를 찾아볼 수 없었다. 따라서 수직하중 12 N을 가하여 실험한 경우에는 접촉면에 형성된 은 전이층은 불과 베어링의 직접적인 접촉을 방지하면서도 모재인 베어링강(AISI 52100)의 접촉 변형거동(탄성변형 거동)을 따르게 되므로, Fig. 9와 같이 낮은 구름저항을 나타내게 된다고 사료된다. 수직하중을 24 N에서 500 까지 증가시킨 경우에 접촉면에 형성된 은 물질전이층(Fig. 10(b))은 소성변형에 의하여 contact patch를 형성하며 이때 나타나는 웨이크다운 및 가공경화 현상에 의하여 구름마찰계수는 감소하게 된다. 수직하중 960 N으로 구름실험한 경우에도 발달된 물질전이층이 접촉표면에서 관찰되었다 (Fig. 10(c)). 이 물질전이층을 EPMA로 분석한 결과 (Fig. 11) 이것은 은의 물질전이층이 아닌 것으로 나타났는데 이로부터 수직하중 960 N에서는 과도한 접촉 응력으로 인하여 은 물질전이층이 보호층으로서의 역할을 하지 못하고 파손되었음을 알 수 있었다.

실험속도가 은 입자를 투여한 베어링강의 구름마찰에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동일한 초기 은 입자 투여량(0.3 g), 수직하중(147 N)에서 여러 가지 속도(8 mm/sec, 31 mm/sec, 236 mm/sec, 785 mm/sec)로 구름마찰 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 실험속도를 8 mm/sec에서 785 mm/sec으로 증가시킬수록 구름마찰계수가 점진적으로 증가한 것을 알 수 있었다.

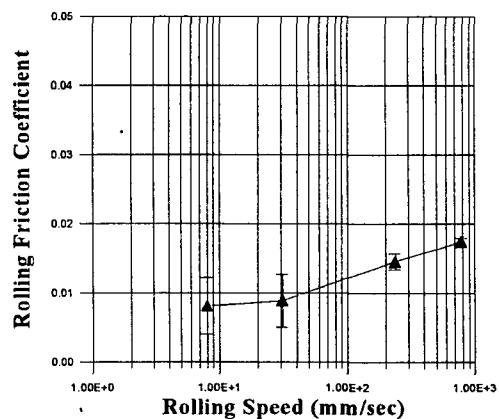


Fig. 12. The variation of rolling friction coefficient with rolling speed (after 50,000 sec(16,667 cycles), Ag powder: 0.3 g, normal force: 147 N).

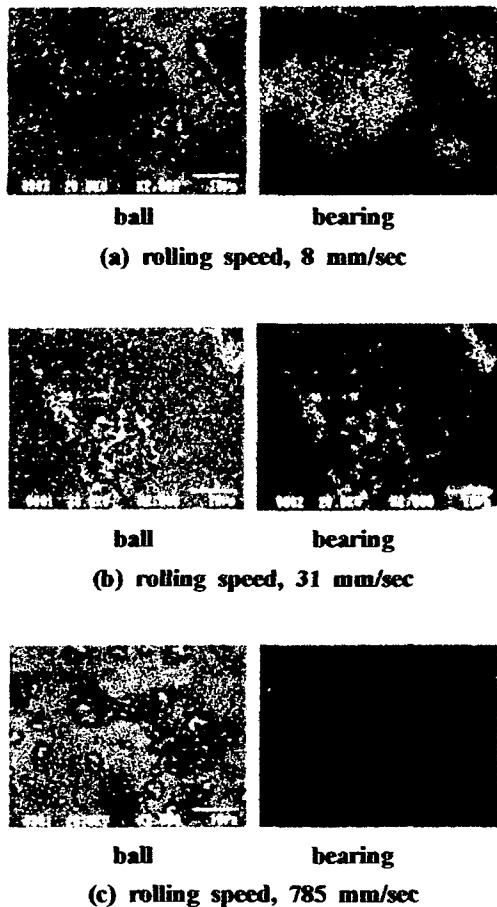


Fig. 13. EPMA analysis results of tested surfaces (after 20,000 sec(6,667 cycles), Ag powder: 0.3 g, normal force: 147 N).

이러한 구름저항의 증가는 Fig. 13에 나타난 것과 같이 실험속도의 증가에 따른 은 물질 전이층의 감소 및 이로 인한 볼 및 베어링면의 파손에 기인하는 것으로 사료되며 이러한 결과는 속도증가시 물질전이층의 strain rate의 증가를 야기시켜 물질전이층이 불안정하게 되고 그 성장이 억제된다는 Brendle[8]의 결과와 일치하는 것이라 할 수 있다.

4. 결론

이상과 같은 연구를 통하여 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 은 입자를 투입한 경우에 낮고 안정한 구름마찰계수를 나타냄을 알 수 있었다.

(2) 은 입자의 초기 투입량을 변화시켜 실험한 결과 최소의 구름마찰을 보이는 최적의 초기전이물질 공급량이 존재한다는 사실을 알 수 있었다.

(3) 실험하중을 변화시켜 구름마찰 실험을 실시한 결과 수직하중 12 N에서는 은 전이층이 얇아서 모재인 베어링강의 탄성 변형거동이 구름마찰의 주된기구가 되어 최저의 구름저항값을 나타내었으며 수직하중을 24 N에서 500 N으로 증가시킴에 따라 구름마찰계수는 웨이크다운 및 가공경화 현상에 의하여 점진적인 감소를 나타냈고 수직하중을 500 N에서 960 N으로 증가시킨 경우 다시 은 물질전이층이 보호층으로서의 역할을 하지 못하고 파손되어 구름마찰계수가 증가하였음을 알 수 있었다.

(4) 실험속도를 8 mm/sec에서 785 mm/sec로 변화시켜 실험한 결과 은 물질전이층의 감소 및 이로 인한 볼 및 베어링면의 파손 증가에 의하여 구름마찰계수가 점진적으로 증가하였다.

후기

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

참고문헌

1. Godet, M., "Third-bodies in Tribology," *Wear*, Vol.136, pp.29-45, 1990.
2. Hirst, W and Lancaster, J.K., "Surface Film Formation and Metallic Wear," *J. Appl. Phys.*, Vol.27, No.9, pp.1057-1065, 1956.
3. Rigney, D.A., "Transfer, Mixing and Associated Chemical and Mechanical Processes during the Sliding of Ductile Materials," *Wear*, Vol.245, pp.1-5, 2000.
4. Wilson, S. and Alpas, A.T., "Tribo-layer Formation during Sliding Wear of TiN Coating," *Wear*, Vol.245, pp.223-229, 2000.
5. Bednar, M.S. and Kuhlmann-Wilsdorf, D., "Amorphous and Alloy Film Formation in Sliding of Silver on Copper," *Wear*, Vol.181-183, pp.922-932, 1995.
6. Li, X.Y. and Tandon, K.N.,

"Microstructural Characterization of Mechanically Mixed Layer and Wear Debris in Sliding Wear of an Al Alloy and an Al based Composites," *Wear*, Vol.245, pp.148-161, 2000.

7. Stott, F.H., "The Role of Oxidation in the Wear of Alloys," *Trib. Intern.*, Vol.31, No.1-3, pp.61-71, 1998.

8. Brendle, M., Turgis, P. and Lamouri, S., "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. Kapoor, A. and Franklin, F.J., "Tribological Layers and the Wear of Ductile Materials," *Wear*, Vol.245, pp.204-215, 2000.

10. Williams, J.A., Morris J.H. and Ball, A., "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.

11. Zhang, J. and Alpas, A.T., "Transition between Mild and Severe Wear in Aluminium Alloys," *Acta Mater.*, Vol.45, No.2, pp.513-528, 1997.

12. 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.

13. Johnson, K.L., *Contact Mechanics*, Chapter 8, pp.268-271, 1985.

14. 양승호, 공호성, 윤의성, 권오관, "은 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동 고찰", *한국 윤활 학회지*, 제 13권, 제 3호, pp. 85-92, 1997.

15. Brendle, M.C., Diss, P.H. and Spano, F.J., "3D Optical-profilometric Assessment of Transfer and Its Significance for the Mechanisms of Primary Particle Detachment and Wear," *Wear*, Vol.225-229, Part 1, April, pp. 417-426, 1999.

16. Halling, J., El Shafei, T.E.S., and Arnell, R.D., "The Rolling Resistance of Surface Covered by Soft Metal Films," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol.199, No.C1, pp.51-55, 1985.