

주석 및 아연 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동에 대한 실험적 고찰

양승호 · 공호성 · 윤의성 · 김대은*

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터
*연세대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Rolling Resistance of Bearing Surfaces Coated by Pure Tin and Zinc Films

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

*Tribology Research Center, KIST
Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract—An experimental study was performed to discover the tribological behaviors of pure tin and zinc coated 52100 bearing steel. Pure tin coatings ranging from 30 nm to 30,000 nm and pure zinc coatings ranging from 500 nm to 52,000 nm 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 effect of coating thickness on the tribological rolling behavior. Results showed that the existence of optimum film thickness which revealed minimum rolling resistance was discovered for tin and zinc coating. The compatibility of coating material to iron showed no significant effect on the rolling resistance behavior. The hardness of coating material revealed significant influence to the rolling resistance behavior.

Key words—rolling resistance, silver coating, tin coating, zinc coating, thermal evaporation coating, optimum film thickness, material-transfer, compatibility, hardness.

1. 서 론

고진공, 고온 및 극저온, 윤활유 자체의 점도가 문제 시 되는 경우 기존의 윤활유 및 그리이스를 윤활제로써 적용하기는 어려우며, 이러한 경우 마찰 및 구름 표면의 윤활 특성을 담당하게 하기 위하여 고체 윤활제를 사용하게 된다. 그러나 현재까지 상용화된 고체 윤활제들도 실제 기계요소에 적용하기 위해서는 온도와 같은 작동 환경상의 제한을 받게되며 이로 인하여 그 적용의 한계가 드러나고 있는 실정이다[1]. 따라서 이러한 한계를 극복하고자 전단강도가 낮은 연금속피막(soft metallic film)을 기계요소의 접촉표면에 적용하여 마찰 및 구름저항을 낮추려는 연구가 시도되어 왔다

[2-5]. 그러나 구름요소와의 적용을 위한 연구는 초기 피막의 변형 및 구름거동만을 고찰하는데 그치고 있다 [5]. 실제로 순수한 은(silver)을 베어링면에 박막의 형태로 코팅하여 실험한 경우 피막파손 전의 경우 최소의 구름저항을 보이는 은(silver)피막의 최적두께가 존재하였으며, 피막파손 후 구름저항은 물질전이에 의하여 형성되는 초기와 다른 거동을 보이는 안정구간이 존재함을 알 수 있었으며 최소의 구름저항을 나타내는 최적의 코팅두께가 존재함을 알 수 있었다[6]. 따라서, 본 연구에서는 은보다 전단강도가 낮은 주석(tin), 철(iron)과의 친화도(compatibility)가 좋은 연금속인 아연(zinc)을 각각 베어링면에 코팅하였을 때 나타나는 구름저항 거동에 대하여 실험적인 고찰을 행하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 스러스트 볼 베어링의 표면에 주석 및 아연을 코팅한 후 각각에 대하여 실험시 나타나는 구름저항을 측정하였고, 물질전이가 구름저항 변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 구름저항이 변화하는 구간을 선정하여 실험후 접촉표면에 전이된 주석 및 아연에 대한 표면 분석을 주사전자현미경(SEM) 및 X선 광전자 분광법(XPS)을 사용하여 시행하였다.

본 연구에 사용된 실험 장치는 자체적으로 제작된 것으로[7] 스러스트 베어링 타입의 실험장치를 사용하였으며, 실험부위에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시편 볼은 Cage를 제거한 후 1회 실험시 13개를 사용하였으며 사용된 시편볼은 직경 7.14 mm로 NSK사 제품을 사용하였다. 이때, 식 (1)과 같이, 측정된 접선력(F_t)을 수직력(F_n)으로 나눈 값을 구름저항(rolling resistance)으로 환산하여 사용하였다.

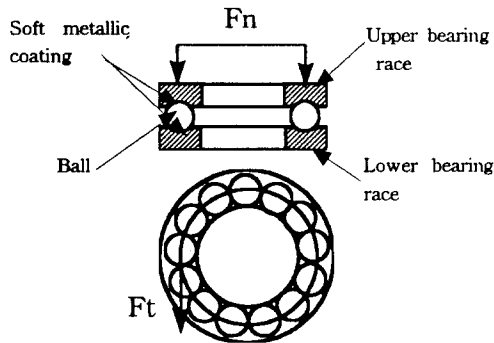


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

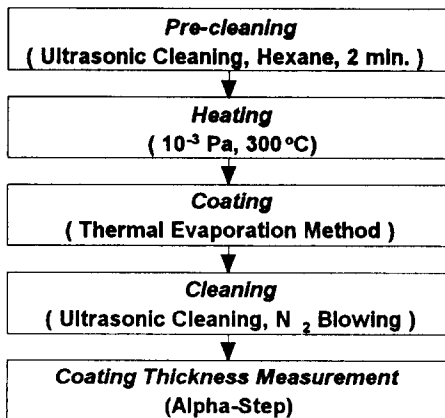


Fig. 2. Schematic diagram of the specimen preparation.

Table 1. Specimen and test conditions

	Specimen	
	Ball	Track
Surface Roughness before coating, Ra (nm)	10	40
Coating Thickness (nm)	-	Tin (99.999%) 29, 42, 57, 220, 700, 1900, 4300, 7500, 15000, 17500, 30000
		Zinc (99.9999%) 500, 1100, 2200, 4500, 11300, 22500, 52000
Speed (rpm)	20	
Normal Load (N)	147.0	
Lubrication	Dry	
Environment	Room Temp. RH 30~60%	

Table 2. Po/k value and related properties for bulk Tin, Zinc and AISI 52100 hardened steel under the load of 147 N

Material	Total Load, L (N)	Maximum Contact Pressure, Po (MPa)	Shear Yield Stress, k (MPa)	Po/k
AISI 52100 (Hardened)	147	622	1250	0.50
Silver	147	622	145	4.30
Tin	147	622	10	62.2
Zinc	147	622	55	11.31

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

코팅용 구름시편으로는 NSK 51204 스러스트 베어링 면을 사용하였다. 실험편의 제작 절차 및 실험조건을 각각 Fig. 2와 Table 1에 나타내었으며, 코팅물질 및 베어링케드류에 대한 최대접촉압력(Hertzian maximum contact pressure, Po)과 임계전단강도(k)의 비를 Table 2에 나타내었다.

3. 실험결과

은을 가열 증발 증착법에 의하여 박막의 형태로 코팅된 경우 구름저항 거동에 대하여 고찰해 보면 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 네단계의 변화를 보인다[6]. 구

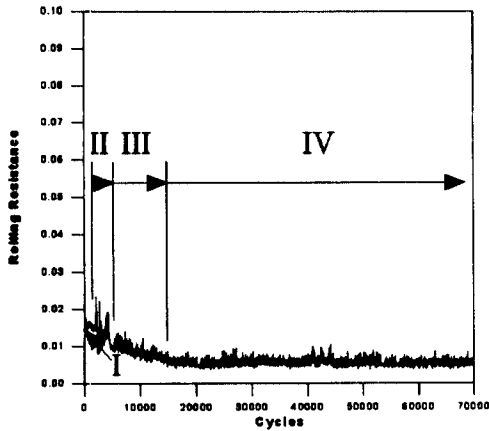


Fig. 3. Rolling resistance vs. cycles for silver coated specimen [6].

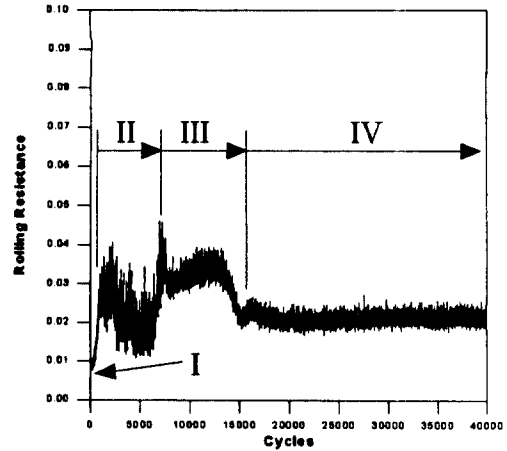


Fig. 5. Rolling resistance vs. cycles for tin coated specimen.

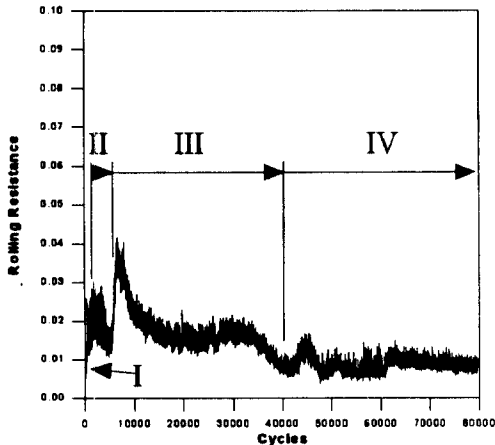


Fig. 4. Rolling resistance vs. cycles for zinc coated specimen.

면에 물질전이 되는 구간이며, 구간 IV는 비교적 안정화된 구름저항이 나타나는 구간이다.

간 I은 코팅층의 파손없이 구름하중을 지탱하는 구간이며, 구간 II에서는 은 코팅층의 거시적 파손이 발생되어 구름저항의 증가 및 구름저항의 진동폭이 커지게 된다. 구간 III은 파손된 은 박편들이 불과 베어링 접촉 표면에 물질전이 되는 구간이며, 구간 IV는 비교적 안정화된 구름저항 거동이 나타나는 구간이다. 주석 및 아연 코팅된 경우 Fig. 4, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 은 코팅된 실험편에 대한 실험결과[6]와 유사한 네단계의 거동을 보이는데, 각각의 구간에 대해 약술하면 구간 I은 코팅층의 거시적 파손이 발생되지 않은 구간이며, 구간 II는 코팅층의 거시적 파손 및 파손된 코팅피막의 미시적 파손이 발생하는 구간이다. 구간 III은 파손된 코팅물질들이 불과 베어링 접촉 표

3-1. 물질전이 이전의 구름접촉 거동

물질전이 없이 피막이 하중을 지탱하는 구간인 구간 I의 경우 은에 대한 실험결과 구름저항이 최소화되는 필름두께가 존재함을 알 수 있었는데[6], 은보다 임계전단강도가 낮은 주석 및 순철과의 친화도가 좋은 아연에 대한 실험 결과에서도 Fig. 5와 같이 최소의 구름저항을 나타내는 필름두께가 존재함을 확인하였다. 이때 최소의 구름저항을 나타내는 최적의 코팅두께는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 $Zn \approx Sn > Ag$ 순서

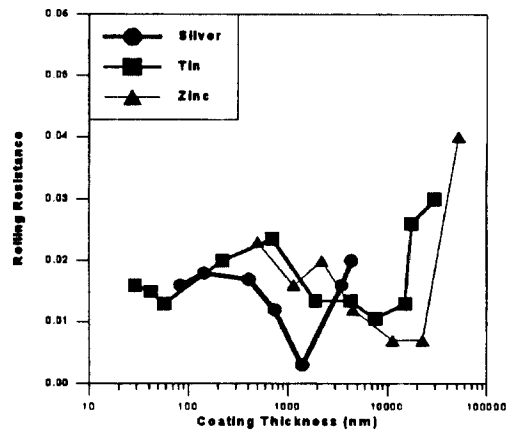


Fig. 6. Rolling resistance vs. film thickness for silver [6], tin and zinc films (stage I).

이며, 이때 구름저항은 $Sn > Zn > Ag$ 순으로 나타났다. 이는 임계전단강도비의 역순과 일치하는 결과로 나타났으며 친화도의 차이는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 나타났다.

3-2. 물질전이 이후의 구름접촉 거동

은을 코팅하여 실험한 경우 최소의 구름저항을 보이는 코팅두께가 존재함을 알 수 있었는데[6], 주석 및 아연 코팅된 시편에 대한 실험결과에서도 Fig. 7과

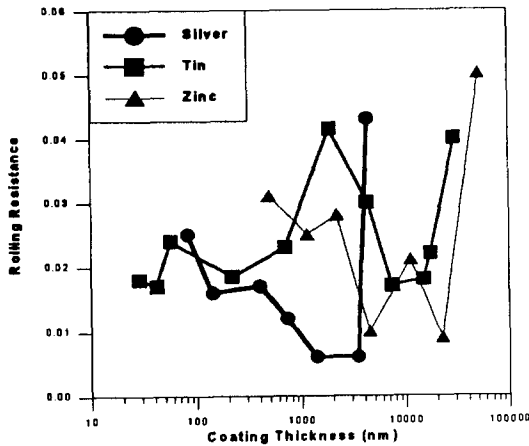


Fig. 7. Rolling resistance vs. film thickness for silver [6], tin and zinc films (stage IV).

같이 최적두께가 존재함을 확인할 수 있었다. 이때, 최소의 구름저항을 나타내는 최적의 코팅 두께는 $Zn \approx Sn > Ag$ 순서를 나타내었으며, 이때의 구름저항은 $Sn > Zn > Ag$ 순으로 나타났다. 따라서 물질전이 이후 안정구간에서도 친화도보다는 임계전단강도 비에 의존하는 결과가 나타났다. 다만, 주석의 경우 코팅두께 2000 nm 부근에서 재현실험 결과간의 편차가 심하게 나타났고, 이로 인하여 재현실험 결과들의 산술 평균 결과 그림과 같이 부분적으로 구름저항이 큰 부분이 나타났다.

4. 고찰

4-1. 접촉변형 거동 고찰

접촉변형 거동을 고찰하기 위하여 최대접촉압력 (P_o)과 임계전단강도(k)의 비를 고찰해 보았다. Johnson[8]에 의하면 반복적인 접촉하중이 가해지는 상태에서 계속적 소성변형이 발생되기 위하여는 최대접촉압력(P_o)과 임계전단강도(k)의 비가 4.7 이상이 되어야 한다고 한다. 실제 Contact Patch의 경우 접촉압력은 최대접촉압력(P_o)보다 작은 값을 가지나, 거시적 접촉면적보다 작은 실제 접촉면을 보이므로 이때 최대접촉압력과 임계전단강도 비(P_o/k) 값은 Table 2에 나타난 값보다 크게 된다. 이로부터 물질전이에 의하

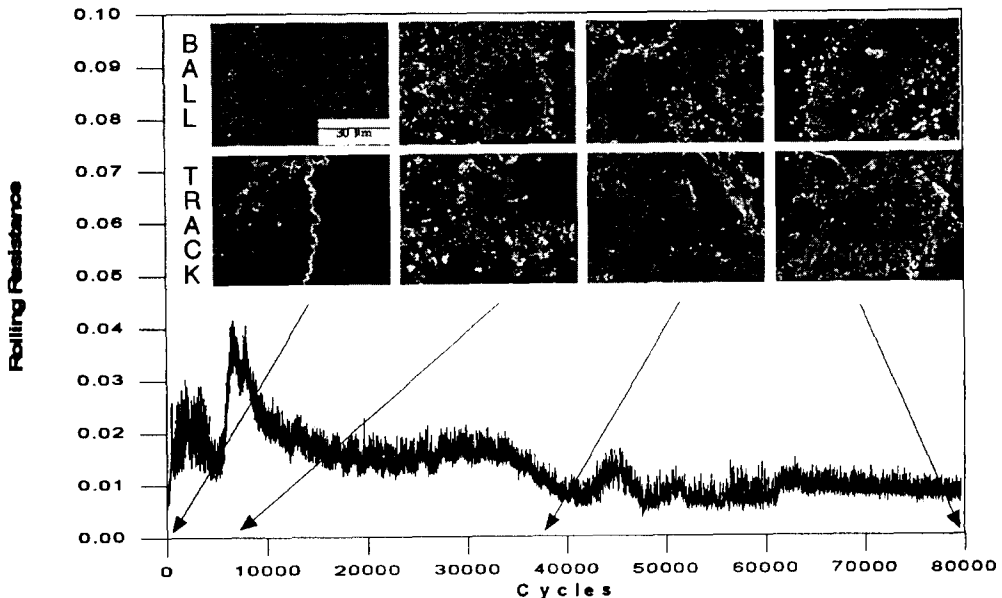


Fig. 8. SEM images for zinc coated surface, showing the variation in the rolling resistance with the contact cycle.

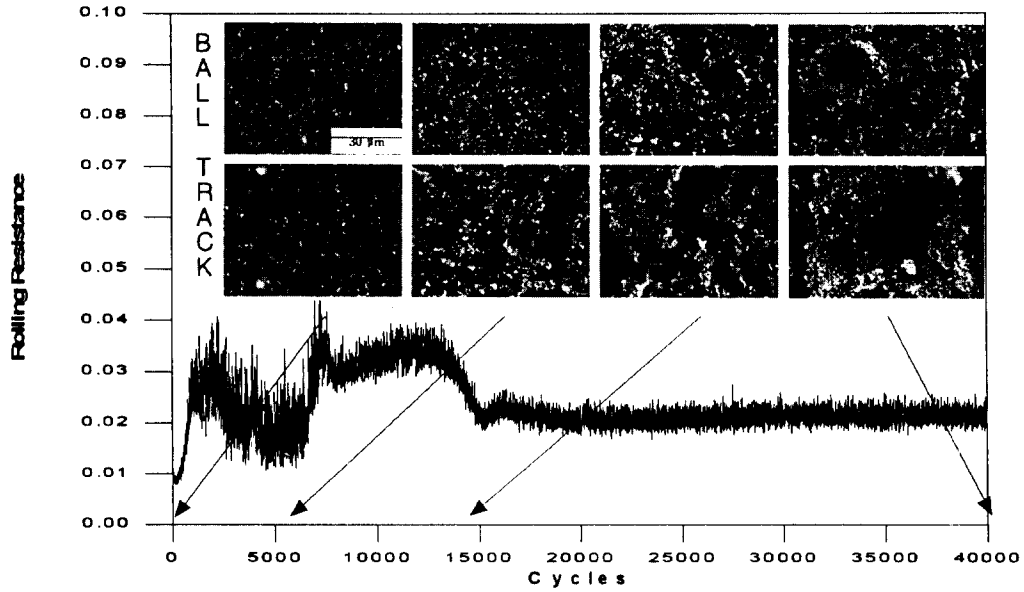


Fig. 9. SEM images for tin coated surface, showing the variation in the rolling resistance with the contact cycle.

여 성장하는 접촉선단부는 계속적 소성변형을 받을 수 있으며 물질전이층의 성장이 둔화되는 경우 계속적인 잔류응력의 축적에 의하여 웨이크다운(shakedown) 현상이 나타날 수 있을 것으로 사료된다.

4-2. 물질 전이 현상 고찰

물질전이가 구름저항에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 각 구간별로 볼과 베어링면에 대한 표면분석을 시행하였다. 각 구간별 주사전자현미경 분석결과를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었고, X선 광전자 분광법 분석결과를 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다. 먼저, 주사 전자 현미경에 의한 표면관찰 결과, 코팅층의 파손은

아연 코팅의 경우 거시적 박리에 의해, 주석 코팅의 경우 코팅 피막의 부분적 파손에 이은 박리에 의해 진행됨을 알 수 있었으며, 구간 II의 말기에서부터 아연 및 주석 모두 전이 입자군에 의하여 물질전이층들이 형성되기 시작함을 알 수 있었다. 또한, 구간 III의 말기에는 생성된 물질전이층들의 면적이 증가됨과 선단 접촉부위의 소성변형에 의한 평탄부위형성이 시작되었음을 알 수 있었다. 구간 IV에서는 계속적인 물질 전이층의 면적 증가가 관찰되었으나, 아연 코팅된 베어링 Race를 시편으로 사용한 경우 볼표면으로 전이되었던 아연 피막이 부분적으로 제거되어 물질전이층의 면적 및 두께가 감소되었음을 알 수 있다.

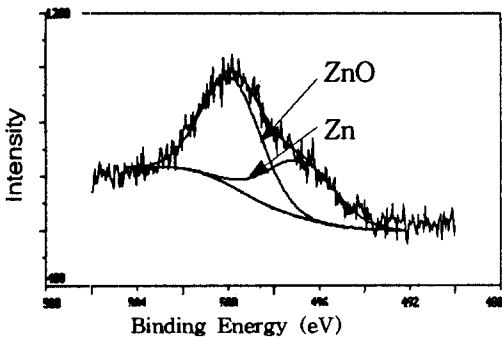


Fig. 10. XPS spectra of ball surface for zinc coated specimen.

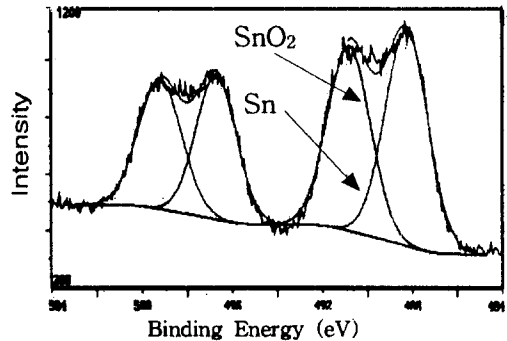


Fig. 11. XPS spectra of ball surface for tin coated specimen.

X선 광전자 분광법에 의한 분석결과 아연 및 주석 코팅시편 모두 구간 II의 말기부터 불과 베어링 접촉부에서 아연산화물(zinc oxide) 및 주석산화물(tin oxide)이 나타남을 알 수 있었다. 이는 은 코팅 시편에 대한 실험[6]에서는 나타나지 않았던 현상이며, 이 경우, 물질전이에 의한 접촉부위를 형성하는 각각의 박편 및 그 표면은 파손 및 반복 변형에 의해 산화되어 산화물을 형성하는 것으로 판단된다. 따라서, 진공 등과 같이 실험 환경조건을 조절할 경우 이와는 다른 결과가 나타날 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

주석 및 아연을 베어링 표면에 코팅한 경우 은의 경우[6]와 마찬가지로 코팅층 파손전 및 물질전이 후 최소의 구름저항을 보이는 코팅층의 최적두께가 존재함을 실험을 통하여 확인하였다. 구간별 표면분석 결과로부터, 초기 코팅층의 파손에 의해 증가된 구름저항이 감소된 후 파편들이 물질전이에 의하여 볼 및 베어링 접촉면으로 물질전이되기 시작하면서 구름저항이 급격히 증가되며 웨이크다운 현상에 의하여 구름저항이 감소되게 된다. 은 코팅된 시편의 경우에는 이때부터 물질전이층의 발생 및 성장이 관찰되었으나[6], 주석, 아연 코팅된 시편의 실험결과 물질전이된 접촉면에서 산화 현상이 일어나게 되어 물질전이층의 형성 및 성장이 억제되게 된다. 구간 III의 말기에서는 접촉 표면에 일정 두께의 물질전이층을 형성한 후 계속되는 물질전이 현상에 의하여 미세한 박편들에 의한 물질전이층의 일부분에서 부분적 적층 및 압착(compaction)이 일어나게 되어 돌기형태의 돌출부위를 형성하게 된다. 이때 돌기전단의 접촉압은 거시적 접촉압을 상회하므로 소성변형에 이은 웨이크다운 현상에 의하여 구간 III의 말기에 다시 한번의 구름저항 감소가 나타나게 되며 Contact Patch가 형성되게 된다. 구간 IV에서는 형성된 Contact Patch의 선단 접촉부위가 계속적 산화를 받게되어 두께의 증가는 둔화되게 되며 접촉면적의 증가가 주로 일어나게 된다.

이상에서 알 수 있듯이 주석 및 아연 코팅된 시편의 경우, 물질전이시에도 산화 현상이 일어나기 때문에 친화도의 영향은 구름저항에 큰 영향을 나타내지 못하였으며, 코팅층 및 물질전이층의 변형특성인 임계전단강도 비가 구름저항에 영향을 미치는 주요 요인인 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 실험 결과로부터, 고진공 등과 같이 변화된 환경하에서는 산화 현상이 억제되므로 본 연구와 상이한 결과를 보일 수도 있을 것으로 판단되며 환경변화, 특히 고진공 조건에 대한 실험을 통해 산화 및 물질전이 현상에 대한 체계적 연구를 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

1. M.R. Hilton and P.D. Fleischauer, "Applications of solid lubricant films in spacecraft," *Surface and Coating Technology*, Vol. 54/55, pp. 435-441, 1992.
2. 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.
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. F.P. Bowden and D.Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids," Chap. 15, pp. 288, 1964.
5. J. Halling, T E S El Shafei, R.D. Arnell, "The Rolling Resistance of Surface Covered by Soft Metal Films," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 199, No. C1, pp. 51-55, 1985.
6. 양승호, 공호성, 윤의성, 권오관, "은 박막이 코팅된 베어링 표면의 구름 저항 거동 고찰," *한국윤활학회지*, vol. 13, No. 3, pp.85-92, 1997.
7. 공호성, 윤의성, 권오관 외, "진공 및 특수환경 분위기에서 사용하기 위한 마찰 및 마모 시험 장치," 대한민국 특허, 출원번호 제 94-10027호, 1994.
8. K.L. Johnson, "Contact Mechanics," Chap. 8, pp. 268-271, 1985.