

Tribology 특성 향상을 위한 Ag 박막의 형성과 평가에 관한 연구

이경황, 이상기*, 송복한*, 정병진*, 박창남*, 문경만, 이명훈

한국해양대학교 부식방식공학연구소, *FAG-한화 베어링 R&D 센터

A Study on Formation and Evaluation of Ag Thin Films for Improvement of Tribology Properties

K. H. Lee, S. K. Lee*, B. H. Song*, B. J. Jung*, C. N. Park*,
K. M. Moon, M. H. Lee

Institute of Corrosion & Corrosion Control, Korea Maritime University
*FAG-HANWHA BRG' R&D Center

Abstract

Silver is known to have such characteristics as low shear strength, good transfer-film forming tendency, and good corrosion resistance. Silver thin films have been prepared by ion plating of physical vapour deposition (PVD) using both argon gas pressure and bias voltage of processing condition. After the silver films were prepared, the properties in them were examined by gas pressure and bias voltage of substrate. Their morphology and crystal orientation were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractor.

The properties of film were, also, studied to relate with morphology, X-ray diffraction pattern, and friction coefficient at vacuum ambient. The friction coefficient was stabilized remarkably on deposited films with increasing argon pressure for deposition. Also, the effect of increasing of the bias voltage for deposition resulted in lower friction coefficient and stability in 1.7×10^{-4} torr. On the contrary, behavior of friction coefficient was stabilized on deposited films with decreasing the bias voltage in 1.7×10^{-5} torr for deposition.

1. 서 론

산업과 공업 기술의 발전에 따라 각종 다양한 환경 하에서 사용되는 구동 기계등에 원활한 구동 특성의 요구가 증가되고 있다. 특히, 전자·반도체,

정보통신, 식품, 에너지 등의 공업분야에서 이용되는 생산기계, 측정기구, 입출력기구 등은 고진공, 극고온, 극저온 그리고 활성 및 불활성 등의 다양한 환경조건하에 처하게 되었다. 따라서 이들에 대한 고성능화, 고효율화 및 장수명화에 대한 요

구는 점점 증가하고 있는 실정이다.¹⁾ 그중 기계·기구 구동 메카니즘에 따라 고체표면간의 마찰·마모 등의 문제를 감소시켜 원활한 에너지 전달 역할을 하는 베어링의 tribology 특성향상에 대한 요구는 중요한 과제로 부각된다.

영국, 미국, 일본, 독일등 선진국의 통계에서는 tribology 특성을 향상시킴으로써 GNP의 0.5~0.6%의 직·간접 경비 절감이 가능하고, 각종 내연기관의 연비 향상 및 공정상의 maintenance 경비 감축과 생산효율성을 극대화시킬 수 있다고 보고하고 있다.²⁾

일반적으로 극저온, 극고온, 초고진공 혹은 진공상태 하에서 구동부의 tribology 특성을 유지시키기 위해서는 기존의 윤활유나 그리스등의 습식윤활방식으로는 한계가 있으므로 건조마찰 방식으로 고체윤활제인 Pb나 Graphite, MoS₂, 테프론 (PTFE) 등을 코팅막으로 제작하여 이용하는 경우가 많다.^{3, 4)} 반면, MoS₂ 윤활막은 습도에 매우 취약하여 습도가 높은 환경에서는 사용이 억제되고 있으며, PTFE는 약 150°C 이상의 고온에서 사용하기 어렵다는 등의 문제점이 지적되고 있다. 더구나, 전자, 반도체산업과 같은 첨단산업에서 진공 중 구동되는 부분의 고체윤활막의 경우 막으로부터 방출되는 가스와 마모입자의 발생으로 인해 회로의 집적도 저해와 진공의 질을 저하시키는 등의 문제가 발생하여 곤란을 겪는 경우가 종종 있다. 즉, 고체윤활 코팅막은 습도, 온도, 진공 또는 모재 종류등의 사용조건에 따라 윤활특성에 다소 차이가 있으므로 적절한 윤활제의 선정이 매우 중요하다.⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 고체윤활제로써의 기본적인 요구에 부합되고 구동중 가스의 방출과 마모입자의 발생이 비교적 적은 것으로 주목⁶⁾받고 있는 연질금속 Ag를 PVD (Physical Vapour Deposition) ion plating법을 이용하여 여러 가지 증착조건 하에서 고체윤활코팅막의 제작을 시도하였다. 또한, 이들 코팅막의 형성 메카니즘 및 특성을 파악하기 위하여 morphology 및 결정배향성의 변화

를 분석함은 물론 마찰계수 측정 등을 통해 tribology 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2. 1. 막의 제작

본 실험에서 Ag 박막을 제작하기 위해 사용된 장치는 e-beam 증발방식에 의한 ion plating장치이다. Fig. 1에 ion plating 장치의 개략도를 보이고 있다. 이 ion plating 장치는 크게 진공형성장치, 증발원과 이온화 활성화원, 기관전원 인가장치와 가스도입 장치등으로 이루어져 있다.

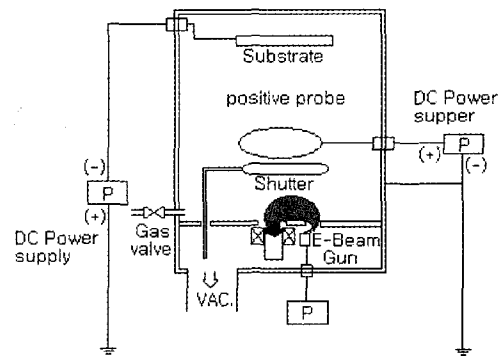


Fig. 1. Schematic diagram of ion plating apparatus.

Graphite crucible (4×7cc) 내에 채워진 금속 (Ag)을 증발시키기 위해서 electron beam (COMPLETE STIH-270-1 CK/CKB SOURCE)을 증발원으로 이용하였으며, 증발된 금속의 이온화율을 높이기 위해서 crucible로부터 약 8cm위에 타원형의 positive probe를 설치하였다.

Ag 박막 제작을 위해 이용된 기관의 재료는 두께 5mm의 열처리된 마르텐사이트계 STS 440C의 사각시편 (35×15mm²)과 원판시편 (내경8mm, 외경58mm)으로 가공된 것을 이용하였다. Fig. 2에 시편의 형상도를 보인다. 각각의 모든 시험편은 표면면적을 #100, #600, #800, #1000번의 SiC 연

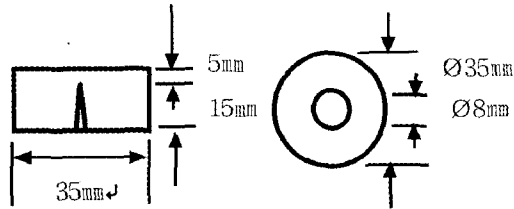


Fig. 2. View of schematic diagram for specimen.

마지를 이용하여 순차적으로 연마한 후 $6\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ diamond paste를 이용한 경면연마를 시행하였다 (평균조도 $R_a=0.013\mu\text{m}$). 준비된 시험편들은 진공용기에 장착하기 전에 알칼리 탈지유를 이용하여 20분간 초음파세척을 시행하고, 아세톤과 알콜에 각각 10분씩 순차적으로 초음파 세정을 하였다.

세척한 시험편은 진공용기에 setting 시킨 후 진공용기를 밀폐하고 진공형성을 시작했다. 진공형성은 rotary pump와 oil diffusion pump에 의해 약 3×10^{-6} torr까지 충분히 배기 시킨 후 99.99%의 Ar 가스를 도입하여 ion bombardment cleaning을 시행하였다. Ion bombardment cleaning 처리가 끝나면 각각의 증착조건에 따라 박막을 제작하였다. Table 1에 Ag 박막의 제작조건을 보이고 있다.

2. 2. 막의 구조분석

증착된 Ag 박막의 표면 및 단면의 morphology 관찰은 주사형전자현미경과 전계방사형전자현미경으로 관찰하였다. 단면 morphology는 일반 SEM (JEOL : JSM-840A)을 이용하여 관찰하였고, 표면 morphology는 결정입자가 매우 미세하여 높은 배율에서도 휘도가 높고 분해능이 뛰어난 FE SEM (HITACH : S-4200)을 이용하여 관찰하였다.

박막의 결정구조를 해석하고, 결정배향성을 측정하기 위해 2θ scan X선 회절장치를 이용하였다. 이때, X선 회절장치에 이용된 X선은 Cu- α 이며, X-ray tube의 전압과 전류는 각각 40kV, 40mA로 2θ 범위를 30° 에서 70° 로 하였다.

2. 3. 막의 특성 평가

증착조건에 따라 제작된 Ag 박막의 진공 중에 나타내는 마찰계수의 측정을 위해 진공마찰계수시험기인 Ball-on-disk tester를 이용하여 실험을 행하였다. 실험의 조건은 분위기 압력 8×10^{-6} torr 이하의 진공상태 하에서 sliding speed 0.23m/sec (rpm 100)로 하여, 인가하중 77g으로 총회전수 10^5 cycles (마찰거리 15km)로 각각의 시험편에 대하여 마찰계수 시험을 행하였다.

Table 1. Deposition conditions for Silver films.

Condition Substrate	Vacuum (torr)	Bias voltage (V)	Positive probe (V)	E-Beam current (A)	Film thickness (μm)
STS 440C	1.2×10^{-5}	-	+250	0.055	1.0
		-300			
	1.7×10^{-4}	-500			
		-700			
		-800			
		-300			
	1.7×10^{-5}	-500			
		-700			
		-900			

3. 실험결과 및 고찰

일반적으로 PVD ion plating 공정시 박막의 morphology 및 결정배향성에 영향을 미치는 주요 변수로는 크게 기판의 온도, 진공도, 바이어스 전압 및 증착속도 등이 있다.⁷⁾ 본 연구에서는 주로 진공도 변화에 따라 제작한 Ag 생성막의 mor-

phology 및 결정배향성에 대한 분석과 tribology 특성 평가를 하였다.

3. 1. 막의 morphology 및 결정배향성

Fig. 3(A)는 두 진공도에서 각각의 바이어스 전압에 따른 표면 morphology를 보여준다. 1.7×10^{-4} torr에서 제작된 막의 표면 morphology는 $1.7 \times$

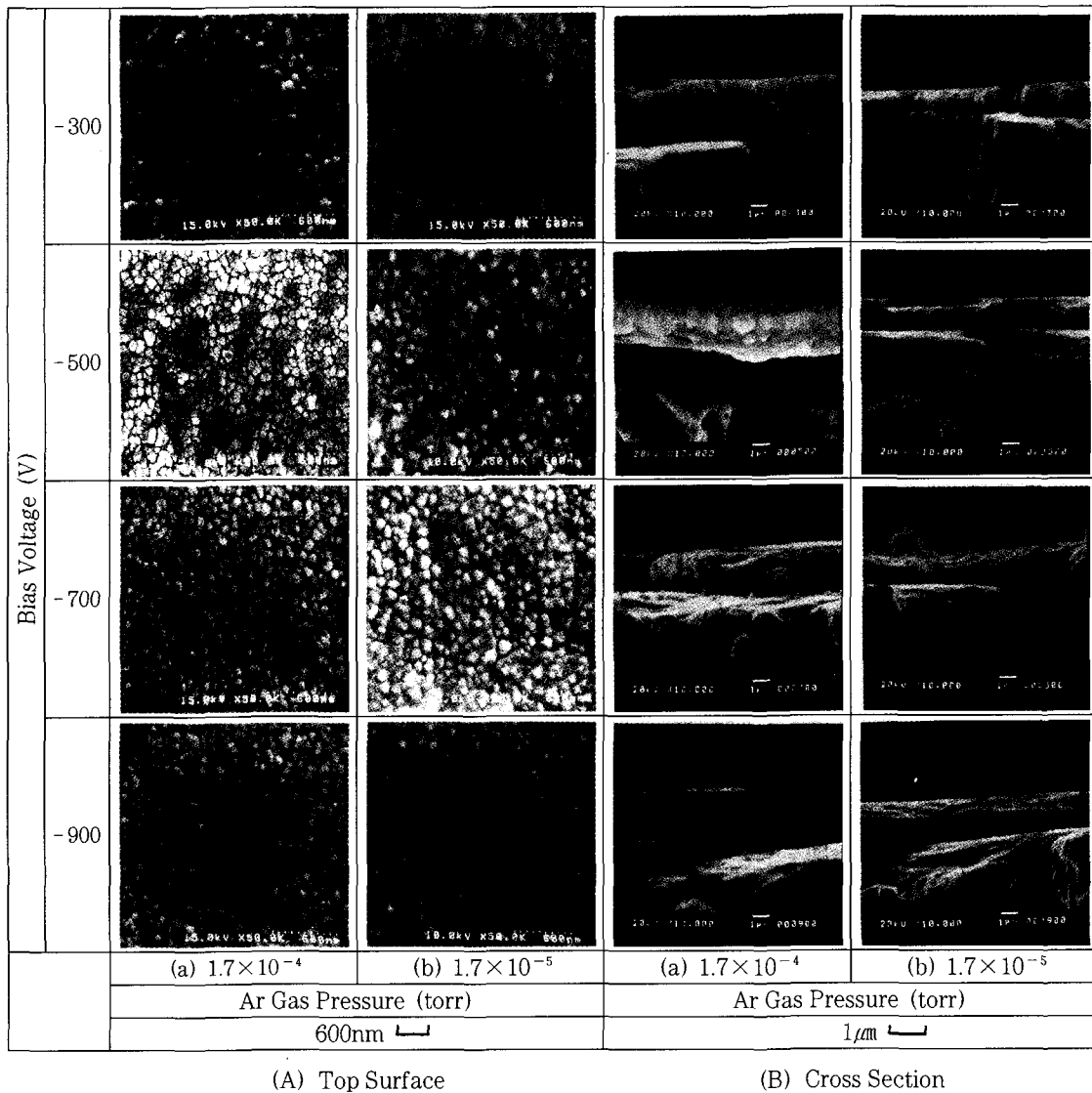


Fig. 3. SEM photographs of top surface and cross section for Ag films on the substrate of STS 440C.

10^{-5} torr에서 제작된 막에 비하여 모든 바이어스 전압의 경우 결정립이 미립화된 경향을 나타내며, 표면 결정립의 크기도 균일하고, 막 표면의 굴곡이 적고 좋은 것으로 보인다. 이것은 증착 중 substrate 막표면 주위에 상대적으로 많이 존재하는 Ar 가스의 흡착에 의해 핵이 계속적으로 증착하며 성장하기보다는 또 다른 핵의 생성으로 crystal grain size가 미립화되는 것으로 생각된다.^{8, 9)} 또한, 두 진공도에서 모두 결정립이 미립화 된 것은 박막의 증착시 증발원의 e-beam 전류를 올려 증착했기 때문에 증착속도가 증가되어 증착되는 막 중에서 핵의 성장이 진행되기 전에 다른 핵의 증착으로 결정립이 미립화 된 것으로 생각된다.¹⁰⁾

Fig. 3(B)는 기판 주위에 설치한 thickness monitor를 통하여 막 두께를 $1\mu\text{m}$ 로 증착하였을 경우 단면 morphology를 보이고 있다. 1.7×10^{-4} torr에서 제작된 막의 단면이 1.7×10^{-5} torr에서 제작된 막에 비해 morphology가 조밀하지 않은 것으로 보이며, 전체적으로는 입상정에 가까운 단면구조를 보이고 있다. 이것은 Ag, Au와 같은 귀금속의 경우에 10^{-4} torr 이하의 고진공도에서 주상정 구조를 형성하지 않는다는 보고¹¹⁾와 일치하는 것으로 진공도가 낮을 경우 2차 핵생성이 활발함을 뒷받침하고 있다. 또한, 막 두께를 thickness monitor를 통하여 $1\mu\text{m}$ 로 증착하였음에도 불구하고 막의 두께는 미소하나마 가스량의 증가에 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 증착과정 중 막 내부로 흡착가스의 혼입에 의한 영향이라 생각된다. 앞서 설명한 기판 주변의 아르곤 가스의 영향인 가스 흡착인히비타의 영향을 받지 않고(가스량이 없는 경우), 입자와 이온들 각각이 갖는 Total 에너지적 관점으로 생각한다면, 분위기 압력이 고진공으로 갈수록 기판에 입사되는 입자 및 이온들의 에너지는 증가하게 된다. 기판과 수직하게 성장하는 막은 큰 에너지를 갖고 입사되는 입자 및 이온들에 의해 기판과 수평방향으로 원자들을 배열시켜 원자의 가장 안정한 자리

로 이동하게 된다. 또한, 기판에 증착된 막 원자들의 resputter 혹은 re-evaporation의 확율은 입사되는 입자 및 이온들의 입사에너지 증가에 의해 상대적으로 1.7×10^{-5} torr에서 증가될 것으로 사료된다. 따라서, 이들의 복합적인 영향에 의해 단면 SEM 사진에서 보이는 것과 같이 조밀(dense)한 막을 형성하여 막의 두께가 감소하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

막의 결정면 표면에너지 값의 상대값을 통한 결정성장면 및 결정배향성에 대하여 관찰하고, 표면 및 단면 morphology와의 상관관계에 대하여 고찰하면 다음과 같다.

면심입방격자구조(FCC)가 갖는 각 결정면의 표면에너지 값을 계산식¹²⁾에 대입하여 구한 상대값을 Table 2에 보인다. Table 2는 표면에너지 값이 가장 낮은 (111)면을 1로 보았을 때 (200), (220) 결정면의 순서로 표면에너지 값이 높은 것을 알 수 있다. 구조적으로 나타나기 힘든 (220)면을 제외하고 표면에너지가 낮은 (111)면과 다소 높은 (200)면을 중심으로 고찰하면, 다음과 같다.

Table 2. Relative values of surface free energy for Silver.

Crystal plane	(111)	(200)	(220)
Relative value	1.000	1.154	1.223

Fig. 4는 제작된 막들의 X-ray 회절 피크의 상대강도 값을 보이고 있다. Fig. 4(A), (B)의 (a)는 ASTM Card peak를 보이고, (b)는 바이어스 전압이 -300V이고 (c)는 -700V, (d)는 -900V에서 각각 1.7×10^{-4} torr와 1.7×10^{-5} torr의 진공도에서 제작된 막에 대한 XRD pattern의 상대강도를 보인다. Morphology의 관찰에서 살펴보았던 것과 같이 증착속도의 증가 때문에 가스의 흡착에 의한 영향은 미비하게 되고, 개개의 입자 및 이온들이 갖는 총합 에너지에 의한 영향이 지배적으로 막의 형성에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 진

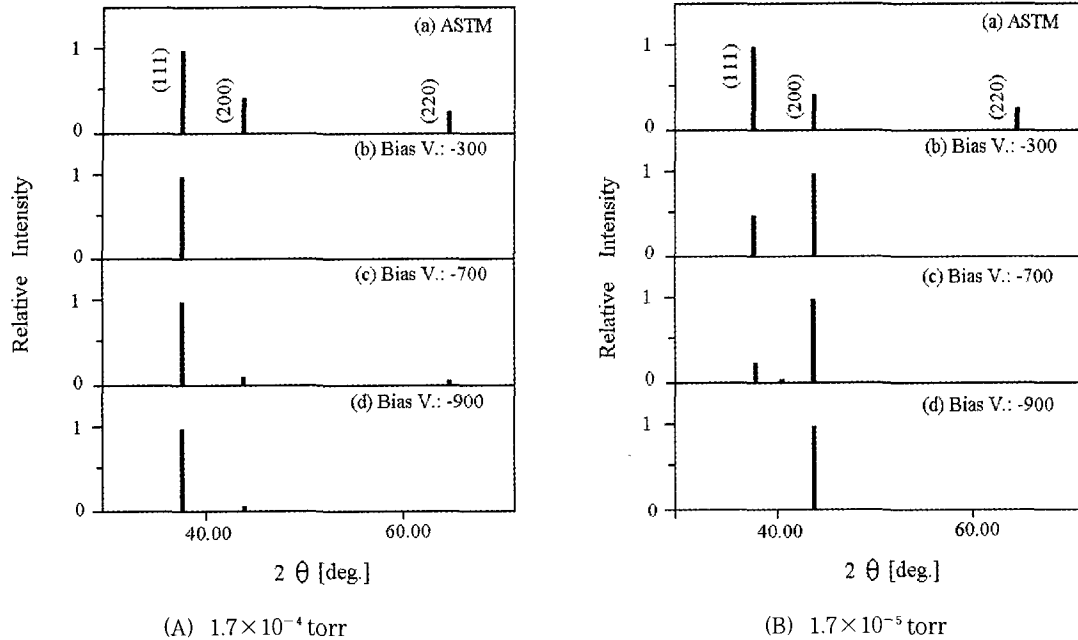


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of Ag films deposited at various deposition conditions.

공도 1.7×10^{-4} torr의 경우는 아르곤 가스가 소량 공급되었으며, 1.7×10^{-5} torr의 경우는 가스의 공급이 거의 없었다. 두 진공도 내에서 존재하는 개개의 입자 및 이온들에 주어지는 총합에너지는 진공도가 상대적으로 높은 (가스량이 적은) 1.7×10^{-5} torr에서 크게 된다. 이 경우에 제작되는 막은 기관에 입사되는 이온 및 입자들의 에너지가 증가된다. 즉, 처음 입사되는 이온 및 입자들은 표면 에너지가 상대적으로 큰 (200)면에 원자의 공급이 매우 활발하게 진행되며, 이때 표면에너지가 큰 결정면에 증착된 원자들은 입사되는 또 다른 큰 입사에너지를 갖는 이온 및 원자들의 충돌에 의해 resputter 혹은 re-evaporation이 더욱 증가하게 된다. 이것은 표면 에너지가 상대적으로 낮은 (111)면에 원자의 공급을 증가시키고 이 면의 성장을 빠르게 한다. 따라서 (111)면의 성장으로 인해 표면에 노출되는 (200)면의 면적점유율은 증가되어 결국 1.7×10^{-5} torr에서 제작된 막들은 (200)면에서 X-ray 회절 피크의 상대강도가 강하

게 되고 (200) 결정면이 우선 배향되는 것으로 추정된다. 반면, 1.7×10^{-4} torr에서는 표면에너지가 상대적으로 큰 (200)면의 원활한 원자공급과 함께 resputter 혹은 re-evaporation의 확률이 감소되어 표면에너지가 작은 (111)면의 원자공급이 적어져 (200)면의 성장이 촉진된다. 이것은 앞서 설명한 것과 같이 표면에서의 (111)면의 면적점유율을 증가시키게 되어 X선 회절강도를 강하게 한다. 따라서, 1.7×10^{-4} torr에서는 (111) 결정면이 1.7×10^{-5} torr에서는 (200) 결정면이 우선 배향된 것으로 사료된다.

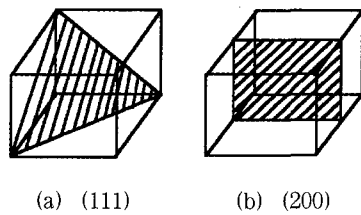
3. 2. 진공상태하에서 마찰계수의 변화 거동

일반적으로 연질막의 tribology 특성은 면심입방정의 결정구조를 갖고 결정적으로는 등방성이기 때문에 점도가 큰 유체와 유사한 거동을 나타내고 층상구조물질에 비하여 마찰계수는 다소 크게 나타난다. 그리고 결정구조로부터 층상구조물질보다 고내하중 능력이 다소 떨어지는 단점이 있지만,

연질금속은 유동에 의해 막이 파단되어도 자기회복을 하여 윤활성을 회복하는 효과가 뛰어나다는 특징을 갖고 있다. 각각의 증착조건에 따라 제작된 막을 진공상태 ($<8 \times 10^{-6}$ torr) 하에서 Ball-on-disk tester를 이용하여 막의 윤활거동을 조사해 보았다. 마찰계수 측정의 시험조건은 Table 3에 나타내는 것과 같다. Fig. 5는 FCC의 결정구조의 (111)면과 (200)면을 보이고 있다.

Table 3. Test conditions of friction coefficient for Ag films.

Factors	Vacuum (torr)	Load (g)	RPM	Cycles (Sliding distance)
Condition	$<8 \times 10^{-6}$	77	100	$>10^5$ (15Km)



(a) (111) (b) (200)

Fig. 5. Lattice plane of cubic.

3. 2. 1. 박막의 구조에 따른 미찰계수의 변화

Fig. 6은 진공도 1.7×10^{-4} torr에서 각각의 바이어스 전압 조건으로 제작된 막들에 대한 마찰계수 변화를 나타낸다. 모든 막들의 마찰계수는 안정되고 우수한 tribology 특성을 보이고 있다. 바이어스 전압이 -300V 및 500V인 경우 전반적으로 마찰계수의 변화가 크게 나타나고 있지만, -700V, -900V의 바이어스 전압에서 제작된 막들은 낮고 안정한 것을 알 수 있다. 특히, 바이어스 전압이 -900V로 제작된 막의 경우는 시험 끝까지 안정되고 낮은 마찰계수를 나타내고 있다. 반면, Fig. 7에 보이는 1.7×10^{-5} torr에서 제작된 막들은 대부분 초기의 마찰계수가 크다. 이들 막들 중 바이어스 전압이 -300V, -500V일 때 제작된 막들은 -700V, -900V에서 제작된 막들에 비해 상대적으로 낮고 안정한 마찰계수 거동을 보이고 있지만, 전반적으로 불안정한 경향을 보이고 있다. 이것은 1.7×10^{-4} torr에서 제작된 막들이 1.7×10^{-5} torr에서 제작된 막들에 비교하여 표면 SEM 사진에서 살펴 본 것과 같이 결정입자가 미립화되고 균일화되었기 때문으로 추정된다. 이와 같이 막morphology의 결정입자가 미립화되고 균일화된다면, 마찰력 ($F=A \cdot s$ (A :

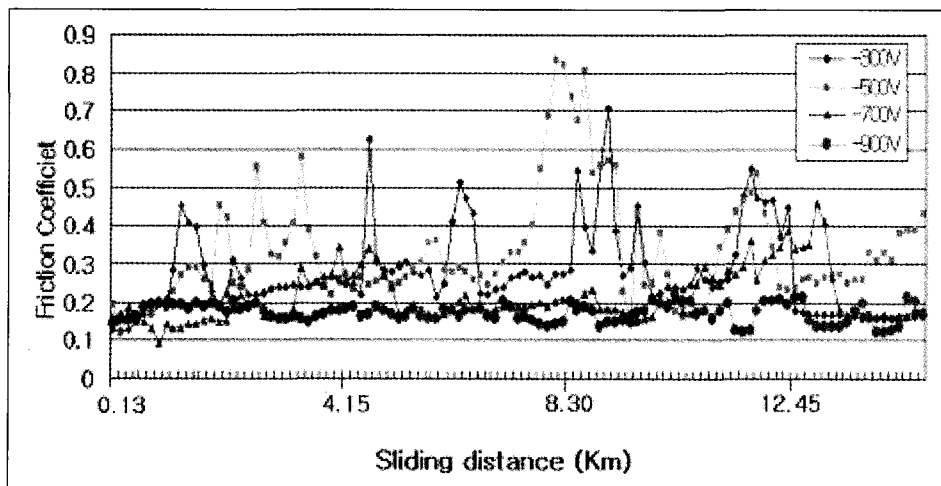


Fig. 6. Variation of friction coefficient with sliding distance for Ag films deposited at different Ar gas pressures. (Vac.: 1.7×10^{-4} torr)

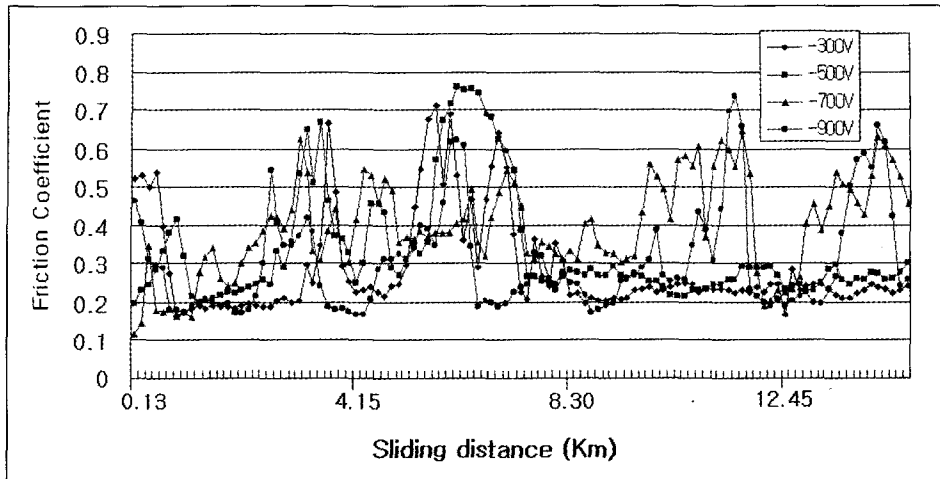


Fig. 7. Variation of friction coefficient with sliding distance for Ag films deposited at different Ar gas pressures. (Vac.: 1.7×10^{-4} torr)

접촉면적, s : 전단강도))과 마찰계수 ($\mu = F/W$)의 관계로부터 접촉되는 ball과 코팅된 표면막과의 접촉시 접촉면적이 일정하게 되고, 접촉 면적 또한 감소됨으로 인해 초기 마찰계수가 안정하고 낮게 나타내는 것으로 추정된다.

또한, X-ray 회절 결과 나타내는 (111), (200) 결정면은 Fig. 5에 나타내는 (111)면과 (200)면으로 표현이 가능하다. 이 결정면들이 접촉면 표면에 각각 노출될 때 원자의 접촉면적은 (200)면이 (111)면에 비하여 확률적으로 차지하는 면적이 크게 된다. 또한, 표면에너지가 (111)결정면에 비하여 다소 높은 (200) 결정면에서는 보다 활성화적으로 이물이 흡착되고 접촉면에서의 Ball과 표면막과의 금속간 결합력이 강하게 될 것으로 생각된다. 즉, 접촉면에서의 금속간 결합력 증가는 표면의 전단강도와 인장력을 증가시켜 마찰계수의 증가를 초래하게 될 것으로 생각된다. 또한, 모재로부터 발생된 $10^{-1}\mu\text{m}$ 혹은 $10^{-1}\mu\text{m}$ 정도 크기의 경질입자 마모흔이 표면에너지가 낮은 결정면보다 높은 결정면에서의 흡착시간이 길어지며, 그 양도 많을 것으로 생각된다. 이와 같은 모든 원인들이 복합적으로 작용함으로써 표면에너지가

다소 낮은 (111) 결정면이 우선 배향된 1.7×10^{-4} torr에서 제작된 막이 (200) 결정면이 우선 배향된 1.7×10^{-5} torr에서 제작된 막보다 안정된 마찰계수 거동을 나타내는 것으로 사료된다.

3. 2. 2. 박막의 두께에 따른 마찰계수의 변화

일반적으로 박막을 이용하여 tribology 특성을 기대하는 경우 막의 두께에 대한 영향도 중요하다. 대체적으로 막의 적정 두께는 문헌에 따라 다소 차이는 있지만, 보통 $1\mu\text{m}$ 이상에서는 뛰어난 윤활특성은 나타내지 않는 것으로 보고¹³⁾되고 있으며, 막이 너무 얇은 경우는 막이 쉽게 파괴되어 기판 표면의 표면조도에 의해 기판 돌기부분과 접촉이 많아져 마찰이 크게 된다. 따라서 표면조도보다 얇은 막을 코팅하는 경우에는 막의 윤활특성은 크게 기대할 수 없다. 또한, 막이 너무 두껍게 되면 부하능력이 작기 때문에 소성유동 발생이 용이해져 실제접촉면적을 증가시켜 마찰계수가 상승하게 된다.

Fig. 8은 1.7×10^{-4} torr의 진공도에서 바이어스 전압을 -300V로 하여 막 두께를 각각 $0.1\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$ 로 제작된 막들에 대한 마찰계수의 변화를 나

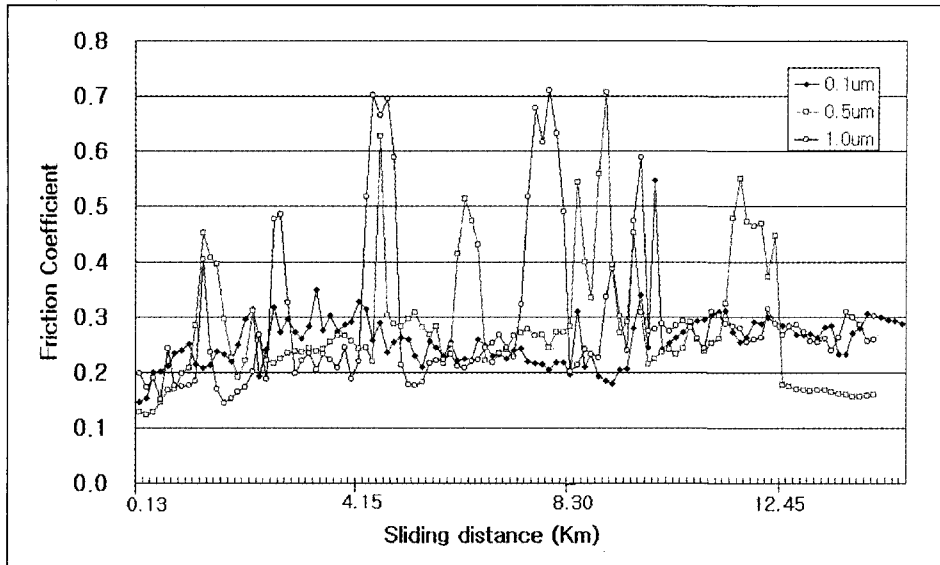


Fig. 8. Variation of friction coefficient with sliding distance on the thickness of Ag films deposited at 1.7×10^{-4} torr. (Bias V.: -300V)

타낸다. 이때 마찰계수의 측정조건은 Table 3과 동일하게 적용하여 막 두께 $0.1\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ 에 대한 마찰계수 실험결과이다. 초기 마찰계수는 모두 안정적이다. 시간의 경과에 따라 두께에 따른 변화의 양상을 조금씩 나타내고 있다. 실험에 이용된 기판의 표면조도는 약 $Ra=0.013\mu\text{m}$ 로 $0.1\mu\text{m}$ 코팅된 막에서도 기판의 표면조도에 의한 영향은 거의 없는 것으로 생각된다. 그러나, 막이 파괴되었다가 다시 막물질의 유동에 의해 전이되는 윤활특성을 회복하는 경향이 다소 떨어져 $0.5\mu\text{m}$ 보다는 윤활특성이 다소 떨어지는 것으로 생각된다. 또한, $1\mu\text{m}$ 의 증착막은 소성유동에 의해 막이 파괴되어 마찰계수가 다소 불안정하게 되는 것으로 추정된다.

4. 결 론

Ion plating법에 의해 제작된 Ag막의 표면 및 단면 morphology 변화와 결정배향성과의 상관관계에 대하여 분석을 행하였다. 또한, 이들 막의 tribology 특성변화에 대하여 평가한 것을 종합적

으로 요약하면 다음과 같다.

1) Ion plating법을 이용하여 Ag박막을 증착하는 경우, 증착변수 중 가스압의 증가에 따라 결정립의 morphology는 미비하나마 작아지는 경향을 보였다. 이것은 가스의 흡착인hibit에 의해 핵생장이 억제되고, 핵의 생성이 촉진된 결과로 이해된다.

2) 증착 중 가스량의 증가에 따라 X-ray 회절 강도의 상대강도 변화는 이온 및 입자들의 입사에너지가 증가된 경우 표면에너지가 높은 (200)면에 공급된 원자들의 재증발율이 증가되어 표면에너지가 낮은 (111) 결정면에서 빠른 핵생장이 이루어져 (200)면이 우선적 배향이 일어나는 것을 볼 수 있었다.

3) 진공상태 하에서 Ag막의 마찰계수 변화는 표면 결정립 morphology가 작고 균일할 때 안정한 초기 마찰계수 거동을 보였다. 또한, 결정배향성과의 관계로부터 표면에너지가 다소 낮은 (111) 결정면이 우선 배향된 막이 이보다 표면에너지가

높은 (200) 결정면이 우선 배향된 막보다 접촉면에 원자의 표면 노출 면적과 이물의 흡착이 작고 접촉면적이 작기 때문에 낮고 안정한 마찰계수 변화를 나타낸 것으로 생각된다.

4) 진공상태 하에서 막두께에 따른 마찰계수 실험결과 0.5 μ m의 막두께에서 우수한 tribology 특성을 보였다. 이것은 인가된 하중에 의한 막의 소성 변형이나 기관의 조도에 대한 영향을 받지않는 전형적인 은막의 마찰거동을 보인 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 1999년 산업자원부 공업기반기술개발사업에 선정된 FAG-한화 베어링 R&D 센터의 위탁연구지원으로 공동연구 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. Jang and D. E. Kim : Tribology International, Vol. 29, No. 4, (1996) pp. 345~356.
2. Shigeyuki MORI : 表面技術, Vol. 47, No. 2, (1996) pp. 2~6.
3. NSK Technical Journal No.648. "潤滑 그리스 및 潤滑油による潤滑とその限界", pp 9~21.
4. 日本學術振興會薄膜第131任員會 編, 薄膜製作 핸드ブック, 3編, 3章 "機械的性質と應用", オーム社, (1983) pp. 874~8784.
5. E. J. Clauss : Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Academic Press, New York and London, Chap. 3, (1972) pp. 45~ 30,
6. Y. Fujii and H. Ishimaru : J. Vac. Sci. Technol., A9, (1991), pp. 2017
7. 沖 猛雄 : PVD·CVD皮膜の基礎と應用, 3章"ドライプロセスによる薄膜の結晶背向性, モルフォロジと諸特性" 社團法人 表面技術協會編, (1994) pp. 22~ 39.
8. 李明勳 : "PVD法による製作した金屬薄膜の形成 機構と評價", (1994) pp. 17~ 34
9. 王 東冬, 村 田昭, 沖 猛雄 : 表面技術, Vol. 41, (1990) pp. 382
10. Maissel and Reinhard, Handbook of Thin Film Technology, Chap. 8, McGRAW-HILL Book Company, New York
11. 應用物理學會/薄膜·表面物理分科會, 薄膜製作 핸드ブック, 第1編, 第 4章, 共立出版株式會社, (1991)
12. 日本金屬學會編, 薄膜·微粒子の構造と物性, 14, 363 (1974)
13. T. Spalvins and B. Buzek : Thin Solid Films,