

RF 스퍼터링법에 의한 Al-Sn계 코팅 베어링의 제작과 특성 평가

이 찬 식* · 이 명 훈*

Preparation of Al-Sn Coating Bearings by RF Sputtering Method and Evaluation of Their Properties

C-S Lee and M-H Lee

Key words : RF스퍼터링법(RE Sputtering Method), Al-Sn계 코팅베어링(Al-Sn Coating Bearing), 몰포로지(Morphology), 마찰계수(Friction coefficient)

Abstract

The development of high performance materials is very important subject in order to enhance the properties of bearings whose role is to transfer energy harmoniously by reducing the problem of friction and wear down, etc. between the interacting solid surfaces in relative motion under high loads in comply with mechanical operating mechanism of engines.

In this study, several $(100-x)Al-xSn$ coating films (where $x=85, 75, 65$ atomic % at Al) on substrates which are abt. 2 mm thickness of Kelmet layer sintered back steel were prepared by using RF sputtering system.

These coating films were observed the morphology by SEM(Scanning Electron Microscope) and investigated the crystal structure by XRD(X-ray Diffractor) for their properties. And friction coefficient of these films was measured by ball-on-disc tester for their tribological properties.

From the experimental results, it was shown that high performance properties of bearing can be improved greatly by controlling the composition and morphology of material surface with effective use of the plasma-assisted sputtering process.

1. 서 론

공업기술의 발전에 따라 가혹한 조건하에서 사

용되는 추진기계는 증가하고 있으며, 이들 엔진의 내구성, 신뢰성, 장수명화 등에 대한 요구는 점점 절실해지고 있는 실정이다. 그 중 기계 · 기구 구동

* 한국해양대학교 부식방지공학연구소(원고접수일 : 2000년 8월)

메카니즘에 따라 고체 표면간의 마찰, 마모 등의 문제를 감소시키며, 원활한 에너지 전달역할을 하는 베어링의 tribology특성 향상을 위한 개발요구는 중요한 과제로 부각되고 있다.

일반적으로 베어링의 표면처리 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 습식도금은 밀착성, 마찰·마모 등의 tribology 특성 향상에 있어서 기능상 한계에 달해 있고, 공정상 폐액 처리에 따른 공해유발 등의 문제가 남아있는 실정이다. 한편, 현재 우수한 베어링 재료로서 사용되고 있는 납(Pb)금속은 환경에 유해하다는 지적에 따라 2004년경부터는 사용을 제한하는 움직임에 있다. 이에 따라 최근 선진국에서는 습식도금이 아닌 건식도금과 같은 무공해 프로세스 방법을 도입하려는 연구를 진행하고 있고²¹, 또한 베어링 재료에 구성되어지는 Pb 금속은 다른 재료로 대체하여 tribology특성을 향상시키려는 시도가 이루어지고 있다. 그 예로 최근, Austria에서는 4행정 디젤 엔진에 사용되는 슬라이딩(sliding) 베어링을 건식 PVD 방법에 의해 알루미늄 또는 아연 합금을 코팅하여 베어링의 제작을 적용시키려고 하는 연구내용이 일부 보고되고 있다.²²

본 연구에서는 중고속 메인 베어링 재료로 많이 사용되고 있는 동연합금(Kelmet)에 종래의 습식도금방법으로 처리한 베어링과 무공해 Plasma 프로세스중의 하나인 RF 스퍼터링법에 의해 Al-Sn 합금 코팅처리 한 것을 제작하였다. 또한, 각각의 합금 조성비에 따라 제작된 코팅막들에 대해서는 Morphology를 SEM에 의해 관찰하고, X-ray 회절을 통하여 결정구조를 분석함은 물론, 마찰계수를 측정하여 제작된 막들의 특성을 고찰하였다. 이러

한 연구를 통하여 새로운 베어링의 제작기법에 대한 기초적 지견을 얻음과 동시에 효율적인 응용설계 지침을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 코팅막의 제작

본 실험에 사용된 스퍼터링 장치는 RF Magnetron 스퍼터링 장치²³⁻²⁵로서 최대 출력 600W의 RF Generator를 이용하였으며, 진공 형성을 위하여 로터리 펌프(rotary pump)와 터보분자 펌프(Turbo molecular pump)를 이용하였다. 기판은 필요에 따라 공전과 자전이 가능하도록 설계하여 코팅막의 제작을 가능하게 하였다.

기판은 중고속 엔진용 베어링 재료로 가장 많이 사용되고 있는 동-연 합금으로 SS41 위에 두께 약 2 mm로 Kelmet을 소결한 것을 이용하였으며, target은 순도 99.99%의 Al과 Sn을 각각 사용하였다.

시편의 표면경면연마와 초음파 세척의 전처리 공정을 통하여 준비된 시험편은 Al과 Sn target이 장착된 시험 홀더(Holder)에 설치 한 후 진공용기를 밀폐하고, 로터리 펌프 및 터보분자 펌프를 사용하여 6×10^{-6} Torr까지 진공배기 하였다.

이때, 시험편 및 targets의 스퍼터 클리닝(sputter cleaning)은 99.999 %의 고순도 아르곤 가스를 80sccm 공급하여 1×10^{-2} Torr의 진공도를 유지한 상태에서 -700V의 바이어스 전압(bias voltage)을 인가하여 20분간 이온빔바드먼트 세정(ion bardment clearing)을 시행하고, 각각의 증착 조건에 따라 (100-x)Al-xSn막을 제작하였다.

Table 1 Sputter parameters of (100-x)Al-xSn coatings on substrates

Expected value(Wt.-%)	Target Power(W)		Gas Pressure(Torr)	Used gas in deposition
	Al side	Sn side		
Al : Sn				Ar : N ₂
90 : 10	230	50	5×10^{-3}	Ar only(71 sccm)
90 : 10	230	50		1 : 3
80 : 20	230	55	5×10^{-3}	Ar only(71 sccm)
80 : 20	230	55		1 : 3
70 : 30	230	60	5×10^{-3}	Ar only(68 sccm)
70 : 30	230	60		1 : 3

또한 Ar : N₂의 가스량의 비율 1 : 3으로 유지하며 질소를 강제 고용시킨 (100-x)Al-xSn막도 제작하였다. Table 1은 코팅막 제작을 위한 증착조건을 나타낸다.

이때 Al : Sn의 조성비는 각 기판에 대한 스퍼터율^{6,7)}에 근거하여 유리(glass)를 기판(substrate)으로 이용하여 충분한 예비실험을 통하여 적정 스퍼터 조건을 얻을 수 있었다.

2.2 코팅막의 구조 분석

증착조건에 따라 제작된 코팅막들의 원소조성 분석을 위해, 에너지 분산형 스펙트로메타(EDS, Energy Dispersive Spectrometer, Model ; ISIS)를 이용하였다. 분석시 이용된 가속전압은 20 kV를 인가하여 시험편의 Al과 Sn의 조성비율을 분석하였다.

또한, 코팅막의 Morphology 분석을 위해 주사형 전자 현미경 (SEM, Scanning electron microscopy, model : Jeol Jem-5410)을 사용하였다. Morphology의 표면 및 단면의 관찰은 시험편을 액체질소에 5분이상 침지한 후 취성 파괴시켜 절단하여 준비하였다. 절단된 시험편은 SEM에 장착하기 전에 분해능을 좋게 하기 위하여 금(Au) 코팅을 하고 난 후 SEM을 이용하여 가속전압 20 kV로 관찰하였다. 결정 구조 분석을 위해서는 X-ray 회절장치(XRD, X-ray diffractor, model : D/MAX-2000, Rigaku coporation dmax)를 사용하였다. X-ray 회절시, 타겟(target)은 CuK α 와 파장 1.5405 Å을 사용하였으며, 가속전압 35 kV, 전류 25 mA의 조건에서 분석하였다. 연속 주사(continuous scan)법으로 주사속도는 8 deg./min.로 회절각 2 θ 를 20°에서 70°까지 측정하였다.

2.3 코팅막의 특성 평가

제작한 코팅막들에 대한 미소 경도의 측정은 다이아몬드 피라미드(Diamond pyramid)형 압자를 사용하여 하중을 인가하여 얻어지는 압흔에 따른 투사 면적당의 압력으로 경도를 측정하는 Knoop 경도기를 사용했으며, 경도 측정시 가해진 하중은 5g이었다. 이때 하중을 5g으로 인가한 이유는 모재의 영향을 받지 않기 위해서이며, 각 코팅막에

대하여 3회 이상 측정하여 그 평균값으로 정하였다.

또한, 제작한 막들의 내마모성 및 마찰계수는 Ball-on-Disc Tester⁸⁾를 통하여 분석하였다. 시험기의 구성은 회전하는 원형 시편과 볼이 수직으로 접촉하는 형태로서 하중은 dead weight type으로 변화시키면서 인가할 수 있도록 하였다. 분석조건은 대기 중에서 상대재료를 3/8"의 스테인레스강 440C 강구를 이용하여 하중을 77g으로 인가하였다. 측정값은 기록계를 통하여 기록한 후에 마찰계수 환산식($\mu=PL/PN$, μ : 마찰계수, PL: 마찰력, PN: 가해진 하중)을 이용하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 코팅막의 원소조성

예비 실험을 통한 스퍼터 조건의 설정에 따라 제작된 코팅막들에 대한 EDS 분석결과 약 2wt. %의 오차는 있지만, 거의 스퍼터 조건에 따라 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 인가되는 RF의 전원이 Al target의 경우는 모든 조성비에 230W를 인가하고, Sn target의 RF전원의 증감에 의해 조성비가 변화됨을 관찰 할 수 있었다. Table 2는 본 실험에서 제작한 Al-Su계 코팅막의 EDS 분석 결과를 나타내고 있다.

3.2 코팅막의 Morphology

각각의 증착조건에 따른 Al-Sn계 합금막들과 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating)) [80%Pb-3%Cu-10%Sn]된 시험편의 표면 SEM

Table 2 Composition ratio of Al and Sn estimated for deposition of films

Target power (W)		Used gas in deposition (at 5×10^{-3} torr)	Deposited films (Wt.-%)
Al side	Sn side	Ar : N ₂	Al : Sn
230	50	Ar only or 1 : 3	85(±2%) : 15(±2%)
230	55	Ar only or 1 : 3	75(±2%) : 25(±2%)
230	60	Ar only or 1 : 3	65(±2%) : 35(±2%)

사진을 Fig. 1에 보이고 있다.

Fig. 1(A)는 Ar 가스 분위기 조건에서 Al에 대한 Sn의 증가비가 커짐에 따른 표면조직의 Morphology 사진을 보여주고 있다. 즉, 일정한 RF 전원이 인가된 Al에 대한 Sn의 RF 전원이 증가하면서 Al의 함량에 대한 Sn의 비가 상대적으로 증가하게 된다. 이때, 증착 중 상대적으로 증가된 Sn원자나 이온같은 입자들은 Al핵의 성장을 저해하는 흡착 억제제(inhibiter)와 같은 작용을 하는 것으로 생각된다⁹⁾. 따라서 Sn함량이 증가될수록 (100-x)Al-xSn 결정립들은 미세화되면서 클러스터(cluster)형태로 존재하는 것으로 생각된다. 이때 클러스터화 형태가 나타나는 것은 Sn target에 인가한 RF 스퍼터 전압이 커짐에 따라 Sn 원자가 증가되어 분산 코팅된 때문으로 생각된다. 또한, 상대적으로 증가시킨 Sn의 입자는 Al입자 주위에 흡착(adsorption)생성될 뿐만 아니라, Al의 원자 내부에 강제 고용되는 흡장(occlusion)효과도 증가시키게 된다. 이것은 Table 3의 XRD 분석결과 d-value의 증가하는 경향과 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 1(B)는 Ar과 N₂ 가스를 1 : 3의 비로 도입하여 Al과 Sn의 스퍼터링 코팅막을 제작하였을 때의 표면의 Morphology 사진을 보여주고 있다. 이 경우도 Fig. 1(A)와 같이 RF 전원에 의해 Al에 대한 Sn의 비를 증가시킴에 따라 스퍼터에 의해 Al

핵 주위에 챔버(chamber) 내에 존재하는 질소와 더불어 Sn 입자가 흡착 억제제와 같은 역할을 함으로써 Al의 핵이 성장되기 보다는 핵의 생성이 촉진되어 결과적으로 막의 결정입이 미세하게 되는 결과를 갖는 것으로 생각한다.

3.3 코팅막의 결정구조

(100-x)Al-xSn계 코팅막들에 대한 결정구조를 조사하기 위하여 측정된 X-Ray 회절 결과를 Fig. 2에 보여주고 있다. 일반적으로 스퍼터링 방법의 경우는 원자 혹은 입자 하나 하나를 스퍼터링시켜 증착하기 때문에 합금화 될 수도 있지만, 본 실험 결과에 의하면 다른 합금 형태의 피크(peak)는 보이지 않고 target으로부터 스퍼터링시켜 형성된 Al 및 Sn 성분의 피크(peak)가 명확하게 나타나고 있음을 확인 할 수 있었다. 또한, Ar과 N₂의 비를 1 : 3의 비율로 하여 제작한 (100-x)Al-xSn 코팅막의 경우는 Fig. 2(b)에서 보여주는 바와 같이 공정 진행 중 도입된 질소 이온의 스퍼터 효과에 의해 그 막두께가 얇게 형성되었고, Al과 Sn 이외에 형성될 수 있는 질소 화합물에 대한 X-ray피크를 확인 할 수 없었다. 또한, 본 실험에서 제작한 코팅막의 경우 동일한 바이어스와 동일한 가스압(진공도)조건이라 할지라도 Ar 가스만에 의한 것 보다 Ar과 N₂ 가스를 1 : 3 비율로 조절하여 스퍼터한 것이 막두께가 현저하게 감소되었

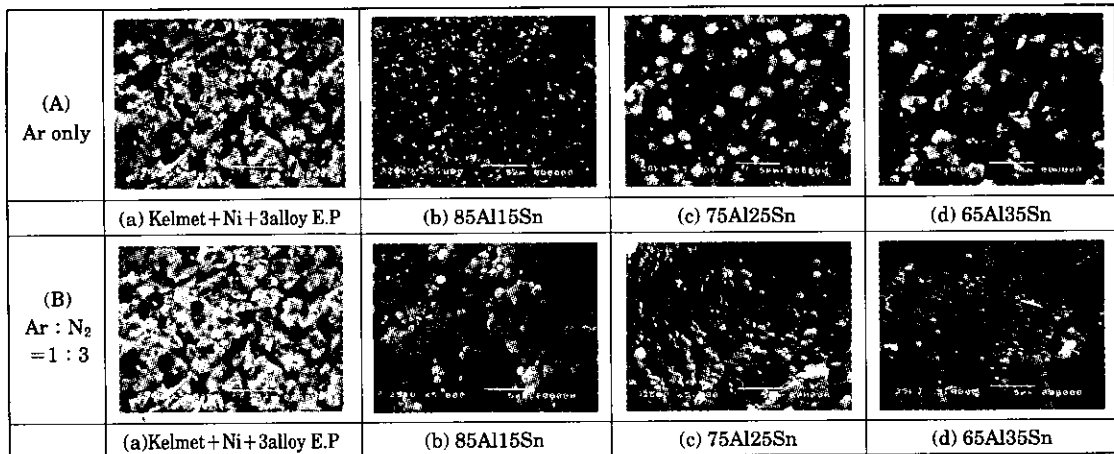
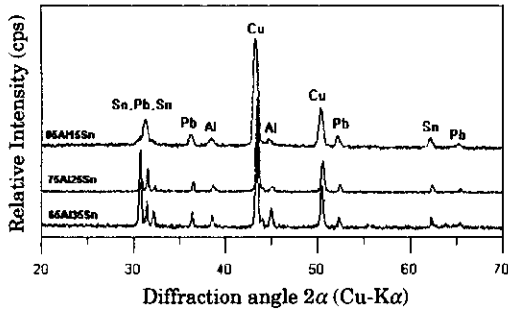
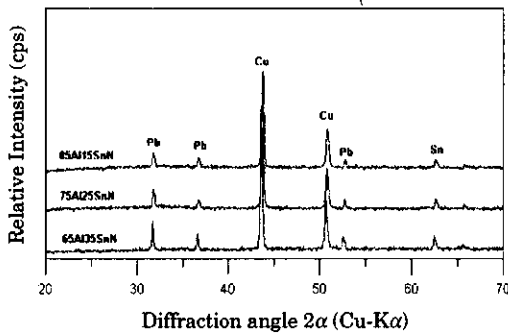


Fig. 1 SEM photographs of top surface as a function of composition ratio of Al and Sn
(* E.P : Electro Plating)



(a) Used gas in deposition ; Ar only



(b) Used gas in deposition ; Ar : N₂ = 1 : 3

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of (100-x)Al-xSn films deposited at different gas and element composition ratio

다. 이것은 질소원자가 아르곤 원자에 비해 3배나 작은 반경과 질량을 갖고 있으므로 동일한 target 인가 전압의 조건이라고 할 지라도 target 표면의 Al과 Sn 원자를 상대적으로 Ar 만큼 스퍼터시키기 용이하지 않은 결과라고 생각된다.

또한, (100-x)Al-xSn의 경우 Al과 Sn의 원소 조성비에서 Al의 함량이 줄어들어 따라 XRD 분석 자료에서 나타나는 Al의 (111), (200)면과 Sn의 (200), (220), (112)면을 중심으로 면간격 d-value 은 Table 3에서와 같이 모든 결정면에서 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이들 결과를 분석하여 보면 Al 원자들 사이에 Sn이 강제 고용되어 있으며, Sn 원자들 사이에도 Al이 고용되어 있다는 것을 알 수 있다.

3.4 경도 특성

각각의 스퍼터 조건에 따라 제작한 코팅막의 두께를 고려하여 측정된 경도는 3회 이상 경도값을

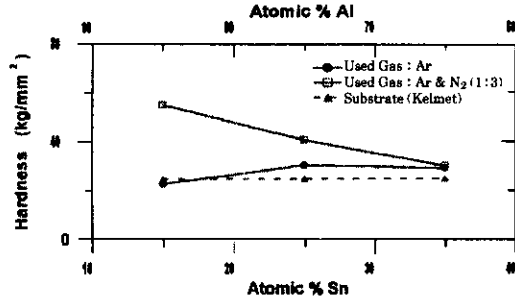


Fig. 3 Hardness of (100-x)Al-xSn films at different compositions

Table 3. d-value of each face at various deposition conditions

Specimens		85Al15Sn	75Al25Sn	65Al35Sn
Al	(111) face	2.3248 (0)	2.3277 (+0.0029 ↑)	2.3364 (+0.0087 ↑)
	(200) face	2.0128 (0)	2.0107 (-0.0021 ↓)	2.0150 (+0.0043 ↑)
Sn	(200) face	2.8915 (0)	2.9006 (+0.0091 ↑)	2.9145 (+0.0139 ↑)
	(220) face	2.0518 (0)	2.0540 (+0.0022 ↑)	2.0562 (+0.0022 ↑)
	(112) face	1.4880 (0)	1.4891 (+0.0011 ↑)	1.4913 (+0.0022 ↑)

측정하여 평균값을 구하고, 이 경도값을 그래프로 나타내 보면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 Ar 가스만을 주입하여 제작한 (100-x)Al-xSn 코팅막의 경도는 기존의 Kelmet에 비하여 그다지 큰 변화는 보이지 않고 있다. 반면, N₂ 가스를 함께 주입하면서 코팅했을 때는 Al의 함량이 85%에서 65%로 점점 감소함에 따라 경도값은 크게 작아지고 있으나 기존의 Kelmet보다는 높은 값을 유지하고 있었다. 이것은 Table 3에서 보여주는 바와같이 N₂ 가스가 주입됨에 따라 AlSn계 합금코팅막 구조내에 N₂ 가스입자가 강제 고용되는 양이 증가되므로 인해 부분적으로 고용강화 되는 효과를 가짐으로써 경도값이 높게 된 것으로 생각된다.

3.5 마찰·마모 특성

마찰·마모 시험의 경우, 액체윤활 상태에서의 마찰경향 평가를 건조마찰의 결과로부터 추정하는 경우가 많다. 따라서 일반적으로 시험편을 일정 조건에서 마멸시켜 시험 전·후의 차이를 중량, 치수 및 표면상태의 관찰 등에 의해 비교하는 방법을

많이 사용하고 있다.¹⁰⁾ 본 실험에서 제작한 (100-x)Al-xSn계 코팅막의 마찰계수는 Ball-on-disk 마찰 시험기¹¹⁾를 이용하여 측정하였다. 마찰계수를 측정하기 위한 시편은 SS41 위에 Kelmet을 소결한 후 그 위에 (100-x)Al-xSn계 코팅막을 제작하였

다. 이때 제작 조건은 Table 1과 같이 진공도 5×10^{-3} torr로 일정하게 유지하면서 각각의 증착조건에 따른 Al-Sn 합금코팅막을 제작하여 마찰계수의 변화를 측정하였다. 이때, 측정 조건은 대기중에서 인가 하중을 77g, 회전 속도를 0.23 m/sec로 하여 측정하였다.

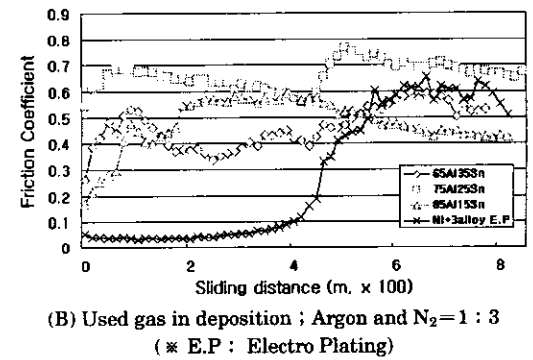
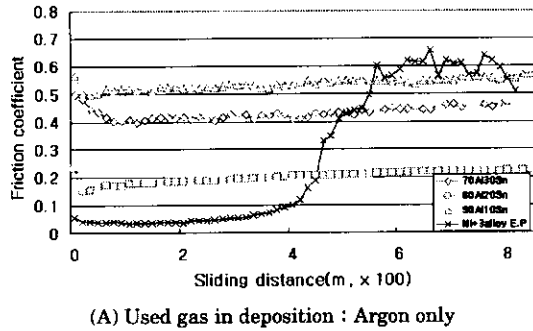


Fig. 4 Friction coefficient of effect on different composition ratio of Al and Sn

Fig. 4(A)는 증착공정 중 Ar 가스 분위기에서 제작한 (100-x)Al-xSn 코팅막과 기존의 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating)) 막들의 마찰계수를 나타낸다. 스퍼터링 공정에 의해 제작된 코팅막들이 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating)) 막에 비교해 초기 마찰계수 값은 다소 높지만, 시험 전구간에 걸쳐서 매우 안정적인 마찰계수 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 그 중에서 조성비를 75Al25Sn으로 제작한 스퍼터링 코팅막의 마찰계수는 가장 낮으며 안정적인 마찰마모 거동을 나타내고 있다. 반면, 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating))한 막의 경우, 초기 마찰계수 값은 낮으나, 미끄럼 거리가 약 400m를 경과하면서 윤활 막이 파괴되어 마찰계수가 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다. 이것은 윤활막으로서의 기능이 이미 손실되었다고 판단된다.

Fig. 4(B)는 스퍼터링 공정 중 아르곤 가스와 질소가스의 비율 1 : 3으로 주입하여 제작한 (100-x)Al-xSn코팅막들의 마찰계수를 보이고 있다. 모든 막에 대하여 전체적으로 고찰하여 볼때 다소

(A) Ar gas only				
	(a) Kelmet + Ni + 3alloy E.P	(b) 85Al15Sn	(c) 75Al25Sn	(d) 65Al35Sn
(B) Ar : N ₂ = 1 : 3				
	(a) Kelmet + Ni + 3alloy E.P	(b) 85Al15Sn	(c) 75Al25Sn	(d) 65Al35Sn

Fig. 5 Micrographs of wear scar surface as a function of composition ratio of Al and Sn (* E.P : Electro Plating)

높은 경향을 보이고 있다. 이것은 증착시 N_2 가스의 흡장으로 인해 강제고용 질화처리 되어 이들 막의 재질이 경화되었기 때문에 강한 ball 재질(STS 440C)과 마찰하면서 마찰계수 값이 다소 불안정하지만 어느 정도 미끄럼 거리를 경과하면서 다소 안정한 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 5(A),(B)는 Fig. 4의 마찰계수 시험후의 마찰면 마모흔(Wear scar) 사진을 보이고 있다. 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating))한 시편의 경우는 (100-x)Al-xSn계 코팅막에 비해서 심하게 긁힌 상태를 확인할 수 있으며, 질소를 고용한 85Al15Sn코팅막의 경우가 가장 손상이 적은 것으로 나타나고 있다. 이것은 앞서 경도측정값에서 살펴 본것과 같이 질소를 고용한 85Al15Sn코팅막의 경도가 가장 높았던 결과로 마멸에 대한 저항성이 큰 것으로 추정된다.

따라서, 본 실험에서 제작한 (100-x)AlxSn막 및 N_2 에 의해 강제고용 강화처리된 (100-x)Al-xSn 코팅막의 경도가 습식법인 전기도금(wet process)에 의해 제작한 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating))한 막에 비해 높기 때문에 윤활 상태에서의 수명은 훨씬 증가될 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상의 RF 스퍼터링법에 의해 제작된 Al-Sn계 코팅막에 대한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 스퍼터링법에 의해 제작된 (100-x)Al-xSn코팅막은 기존의 습식법(Wet process)에 의한 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating))에 비해 전체적으로 표면의 morphology가 미세화된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 Al핵 주위에 Ar 또는 Sn의 입자가 흡착(adsorption) 생성되고, Al의 원자내부에 강제 고용되는 흡장(occlusion) 효과 때문으로 생각된다.
2. X-ray 회절 결과 나타내는 피크로부터 (100-x)Al-xSn 코팅막의 결정구조를 살펴보면, Al에 대한 Sn의 상대 함량이 많은 코팅막일수록 Al과 Sn의 각 결정면에서의 면간격 d-value는 증가하는 경향을 보이고 있었다. 이것은 흡착 및 흡장효과에 기인된 것으로 확인

할 수 있었다.

3. 스퍼터된 (100-x)Al-xSn 막의 초기 마찰계수는 종래의 습식법에 의한 3원도금(Ni+3alloy E.P(Electro Plating)) 막에 비해 상대적으로 약간 높았지만, 이들 막의 전체적인 경향은 마찰계수의 큰 변동 없이 안정하게 나타나고 있었다. 그 중 75Al25Sn 코팅막은 가장 낮고 안정된 마찰계수값을 나타내고 있었다. 따라서 실제 윤활 상태에서의 수명은 훨씬 증가할 것으로 추정된다.
4. 향후에는 스퍼터링법에 의해 제작한 베어링을 실제 엔진에 적용하여 장기간 운전시험을 거쳐 현재 사용되고, 있는 실용 베어링과 그 성능을 비교 분석하고, 최적의 tribology 특성을 나타내는 프로세스 조건을 설정하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 부산·울산중기청 및 부산광역시 지원하는 1999년 산·학·연 지역콘소시엄 사업연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 川口 純, 엔진에用いられる表面處理技術, 表面技術, Vol. 49, No.8, 1998
- [2] H. Kirsch, F. Koroschetz & U. Ederer, MIBA Gleitlager AG, Laakirchen, Austria, New Bearing Types for Diesel Engines. Materials Processes Application (CIMAC), 1991
- [3] 金原 祭, 物理工學實驗 5, 薄膜の基本技術「第2版」, 東京大學出版會, pp.56~86, 1976
- [4] 和佐清孝, 早川 茂, 薄膜化技術「第2版」, 共立出版(株), pp.76~97, pp.112~130, 1992
- [5] 川口 純, 엔진에用いられる表面處理技術, 表面技術 Vol.49, No.8, 1998
- [6] Brian Chapman, GlowDischarge Processes, Sputtering and Plasma Etching, A Wiley-Interscience Publication, pp.374~376.
- [7] Maissel and Reinhard Glang, Handbook of thin Film Technology, Special Pattern-Formation

Techniques, McGRAW-HILL Book Co., pp.374~376.

- [8] 한국기기유화시험연구원, 기계와 윤활, 제128호, pp.1~7, 1998
- [9] 李明勳, 沖猛雄, 熱電子活性化型イオンプレーティング法による Al 薄膜の作製とその耐食特性, 日本金屬學會誌, 第57卷 第6號, 686~691, 1993.
- [10] 金永植, 金允海, "最新機械材料學", 螢雪出版社, pp.99~106, 1997
- [11] 李祥基, RF Magnetron Sputtering에 의한 MoS₂/PTFE 적층박막의 계면 및 내구성에 관한 연구, 1993

저 자 소 개



이천식(李禎植)

1966년생. 1988년 2월 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 2000년 2월 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학부 졸업(석사). 2000년~현재 한국해양대학교 동대학원(박사과정). 1995년~현재 한국기선급(KR)기관기술부.



이명훈(李明勳)

1959년생. 1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 동대학원 졸업(박사). 1995년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수