

석출경화된 Al-Pb-Cu계 베어링 합금의 마모거동

홍택기* · 허무영* · 임대순** · 안성욱***

*고려대학교 금속공학과, **고려대학교 재료공학과

***한국과학기술연구원 특성분석센터

The Wear Properties of the Precipitation Hardened Al-Pb-Cu Bearing Alloys

Taek-Ki-Hong*, Moo-Young Huh*, Dae-Soon Lim**, Seong-Uk An***

**Dept. of Metallurgical Engineering, Korea University*

***Dept. of Material Science, Korea University*

****Advanced Analysis Center, Korea Institute of Science and Technology*

Abstract—Al-Pb-Cu and Al-Si-Pb-Cu bearing alloys were produced by forced-stirring method and water-cooled copper mold casting to investigate the effect of the precipitation hardening on the wear properties. Sliding of produced alloy pin against a steel disc were performed under various applied loads. Lowering the wear rate and material transfer phenomena were explained by the strengthening of θ' precipitates on Al matrix. The transmission electron microscope observation reveals the role of the precipitates in the alloys with Cu. The movement of dislocations was hindered by precipitates which resulted in the reduction of plastic deformation at the worn surfaces.

1. 서 론

Cu, Si, Mg, Ca, Cd, Sn, Pb 등이 합금원소로 첨가되는 Al계 베어링합금은 베어링 특성이 우수하여 최근 자동차 등의 엔진 부품용 베어링소재로 많이 사용되고 있다[1-3]. 합금원소 Si는 고용강화로 합금의 경도를 높여주며 또한 Si-rich상인 경한 입자를 생성시켜 소착저항력을 향상시키며 또한 합금의 주조성도 향상시켜 내마모성이 요구되는 Al계 베어링합금에 주합금원소로 첨가된다. Pb나 Sn 등의 합금원소는 베어링합금에서 윤활성을 향상시키는 역할을 만들어 고체윤활제로 합금의 내마모성을 향상시킨다[4-7]. 합금원소중 Cu는 Al합금을 강화시키는 가장 일반적인 원소로써 Cu 함량이 증가함에 따라 고용강화가 얻어지며 또한 석출경화에 의한 기지강화로 내마모성을 향상시킬 수 있다[8-10].

본 연구에서는 Al기지에 Pb의 중력편석이 최소화될 수 있고 Si-rich상의 분포가 미세하고 균일하게 얻어지는 강제교반법과 급냉응고법으로 Al-Cu-Pb계와 Al-Si-Cu-Pb계 베어링합금을 제조하였다. 베어링합금이

급냉응고법으로 제조되었기 때문에 합금의 기지에는 Cu가 과포화된 상태로 존재하여 석출경화에 앞서 행하여지는 용체화처리와 같은 효과가 얻어졌다. 주조상태에서 Cu가 과포화된 기지를 갖는 시료를 최대 경도값이 얻어지는 조건에서 시료열처리하여 석출경화된 베어링합금을 얻었다. 이와 같은 시료를 pin-on-disk형태의 마모시험기에서 무윤활 상태로 마모시험하여 석출경화에 의한 기지강화가 베어링합금의 내마모성질에 어떠한 효과를 주는지 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 전 연구[5]에서 보고한 것과 같은 강제교반장치를 사용하였다. 전 연구에서 기지에 Pb와 Si-rich 상을 균일하고 미세하게 분산시킬 수 있었던 최적의 강제교반조건은 2500rpm의 교반속도와 10분의 교반시간이었다. 그리고 최적의 주조조건은 수냉동주형에 의한 급냉응고였다. 본 실험에서도 이 조건을 모든 시료의 제조조건으로 택하였다.

모든 시료에서 Pb의 함량은 Al계 베어링 합금에서

최적의 내마모성이 얻어지는[5] 25wt%로 고정하였으며 Al-2.5%Cu-25%Pb, Al-4.5%Cu-25%Pb, Al-6.5%Cu-25%Pb의 Cu함량이 다른 3개의 시료를 제조하였으며 또한 이 합금에 Si을 13wt% 첨가하여 Al-13%Si-2.5%Cu-25%Pb, Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb, Al-13%Si-6.5%Cu-25%Pb의 3개의 시료를 제조하였다. 이 6개의 시료를 최대경도까지 석출경화시켜 마모시험하였다.

광학현미경과 주사전자현미경으로 주조조직 및 열처리에 따른 조직변화와 함께 마모표면을 관찰하였다. 또한 시효열처리에 따른 석출물의 생성과 마모시험에 따른 기지조직의 변화를 관찰하기 위하여 투과전자현미경용 박판시료를 제조하였다. 박판시료의 최종연마는 10volt, 0.5mA의 전해조건으로, -20°C Nital용액에서 행하였고, 투과전자현미경 관찰은 JEOL 1120 EX에서 행하였다.

마모시험은 전 연구에서 보고한 pin-on-disk형태 마모시험기로 행하였다. 주조된 각종조성의 시료들과 그 시료들을 석출경화열처리 했을 때 최대 경도값을 갖는 시료를 마모시편으로 채택하여 시험하였고, 마모속도는 $88.2 \times 10^{-2} \text{m/sec}$, 마모시간은 1시간으로 고정하고 마모하중을 변화시켜 마모시험하였다. 엔진부품으로 Al계 베어링합금이 실제 사용되는 조건에서 합금의 마모량은 극히 미미하나 본 연구에서는 각 합금의 조성과 미세조직에 따른 마모량의 변화가 얻어지는 마찰속도와 마모하중을 선정하여 실험조건을 택하였다. 마모시험전 마모용 시편과 상대재로 쓰인 SCM4(64HRC) steel disc는 #800 연마포로 고르게 연마했으며 trichloroethylene으로 윤활성분을 제거하고 철저히 건조시켜 실험했다. 마모하중이 변함에 따라 마모표면부근의 미세조직이 변화하므로 각 마모하중에 대하여 시편을 교체하여 마모율을 측정하였다. 마모율은 시험전 후의 마모시편의 무게를 측정하고 각 원소의 밀도값을 이용하여 계산된 마모부피를 마모거리로 나누어서 얻었으며 마찰계수도 측정하였다. 마모율은 동일조건마다 세개의 시편으로부터 측정된 평균값으로 얻어졌으며, 측정된 오차범위는 10%이하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 주조된 상태의 시료를 주사전자현미경 후 방산란전자상으로 관찰한 결과이다. 후방산란전자는 원자번호가 클 수록 그 양이 많아 원자번호 정보를

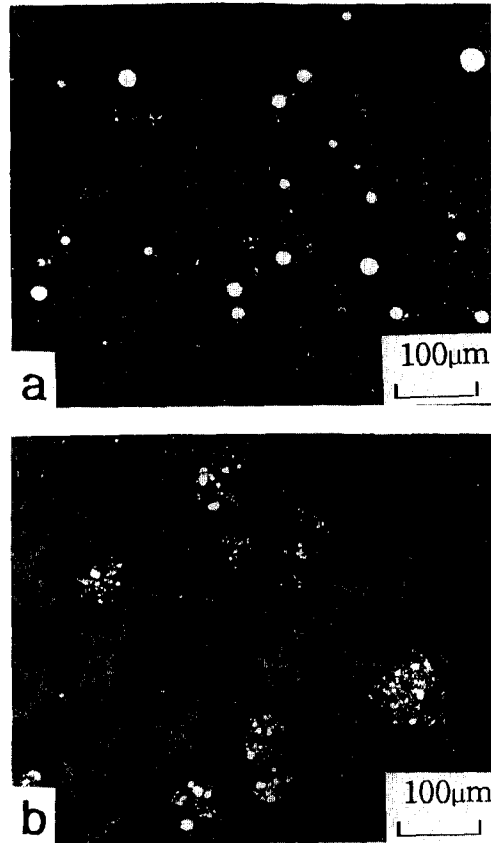


Fig. 1. Backscattered electron images of as-cast specimens (a) Al-4.5%Cu-25%Pb (b) Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb

갖는다. Al-4.5%Cu-25%Pb 시료에서 밝은 콘트라스트를 갖는 크기가 20µm 이하인 Pb가 기지에 균일하고 미세하게 분포되어 있음을 보여준다. Si이 첨가된 Al-13%Si-Cu-25%Pb 시료에서는 중간 콘트라스트를 갖는 Si-rich상 근처에서 많이 보여지지만 Si-rich상과 Pb가 전체적으로는 비교적 균등하게 분포된 미세조직이 얻어졌음을 알 수 있다. 이와 같이 본 실험에서 행한 강제교반법과 수냉동주형을 이용한 주조법에 의해 효과적으로 균일한 베어링 미세조직을 얻을 수 있었다.

Fig. 2는 Al-Cu-25%Pb계 합금과, Al-13%Si-Cu-25%Pb계 합금을 190°C에서 시효열처리할때, 열처리 시간에 따른 경도변화를 로크웰 경도기로 측정할 결과이다. Al-Cu-25%Pb계 합금에서는 주조된 상태에서 6.5%Cu합금이 2.5%Cu의 합금에 비하여 고용강화에 의하여 25HRF 정도의 높은 경도를 갖는다. 이에 반

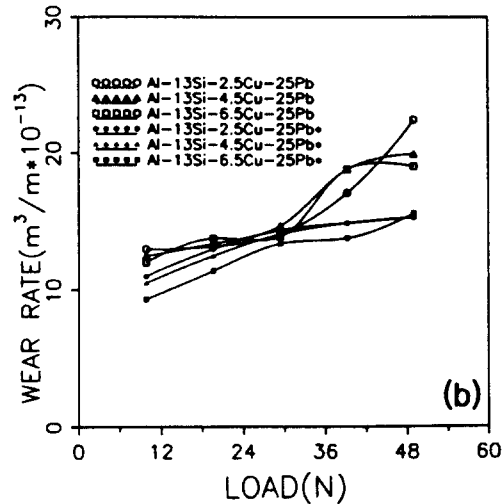
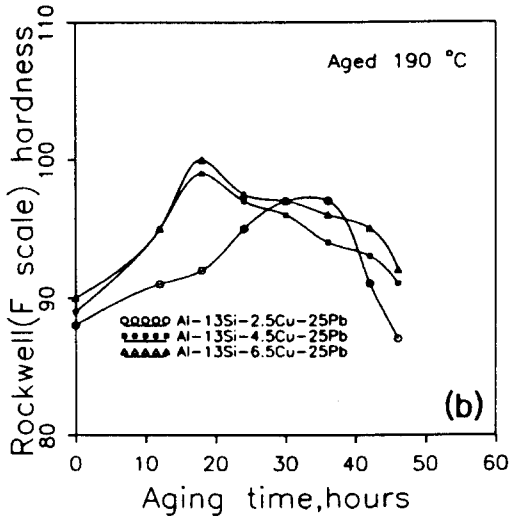
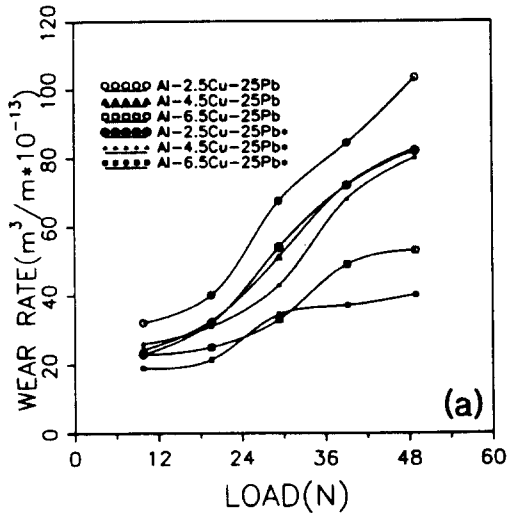
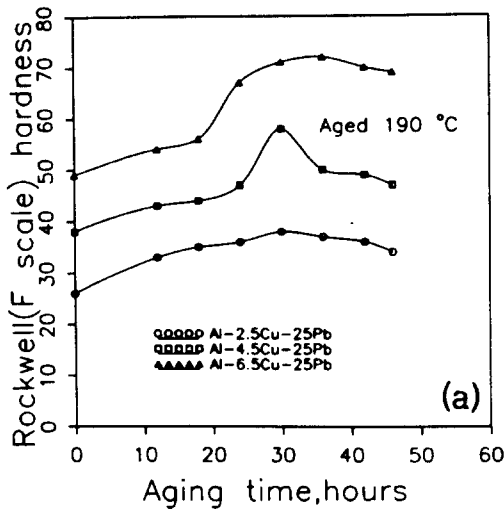


Fig. 2. Variation of hardness with aging time in the alloy system of
(a) Al-Cu-25%Pb (b) Al-13%Si-Cu-25%Pb

Fig. 3. Dependence of wear rate on applied load in the alloy system of
(a) Al-Cu-25%Pb (b) Al-13%Si-Cu-25%Pb
(* denoted p.p.t. hardened alloy)

하여 Al-13%Si-Cu-25%Pb계 합금에서는 주조된 상태에서 Cu 첨가에 따른 고용강화 효과가 나타나지 않는데 이것은 Si-rich상의 경도가 매우 높아 경도가 주로 Si-rich상에 의해서만 지배를 받음을 알 수 있다. Al-Cu-25%Pb 합금계에서는 Cu의 양이 많을 수록 석출물의 부피분율의 증가에 의한 석출경화에 의하여 경도증가가 크게 나타났다.

Al-Si-Cu-Pb계에서도 석출경화에 따른 경도증가가 일어났다. 이와 같이 Si가 포함된 시료에서도 석출경

화는 효과적으로 기지를 강화시킬 수 있다. 또한 Si가 포함된 합금계에서 최대경도가 나타나는 석출 경화시간이 2.5%Cu 합금과 4.5%Cu 합금 등과 다른 것은 이 합금계에서 보다 불규칙한 석출물의 핵생성 기구로 석출물이 생성되는 것으로 생각된다. 모든 시료에서 최대 경도값을 가진 후 열처리시간이 증가함에 따라 과시효에 의하여 경도값의 감소가 나타났다. 경도값이 Al-Cu-25%Pb계 합금보다 높은 경도를

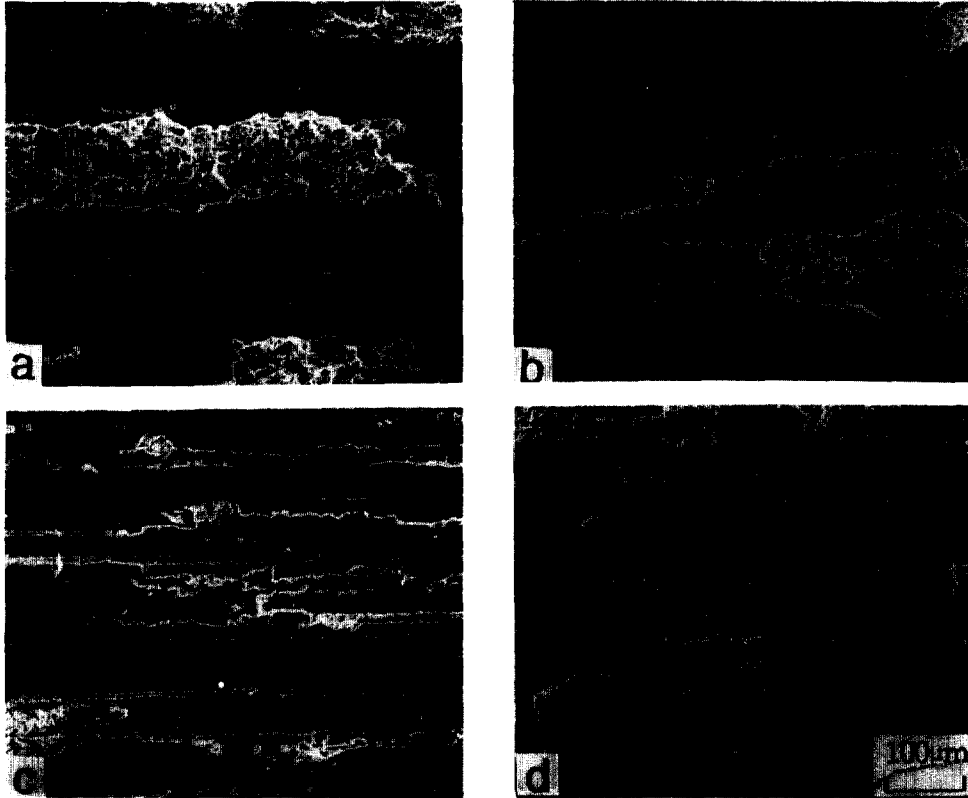


Fig. 4. Scanning electron micrographs of the worn surface after wear test at the applied load of 49N
 (a) Al-4.5%Cu-25%Pb (b) heat-treated Al-4.5%Cu-25%Pb
 (c) Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb (d) heat-treated Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb

가졌는데 이것은 경한 Si-rich상의 존재 때문이다. 모든 시료들에서 열처리시간이 증가함에 따라 계속 경도가 증가하다 최대경도값을 갖고 그 후 과시효되어 경도값이 떨어지는 것은 보여주었다.

Fig. 3은 마모속도 $88.2 \times 10^{-2} \text{m/sec}$, 마모시간을 1시간으로 하여 전 논문[5]에서 보고된 pin-on-disk 마모시험기에서 무윤활 상태로 상대재를 SCM4 steel disk로 하여 마모시험한 결과로 마모하중에 따른 마모율의 변화를 나타낸 그림으로서 이 그림에서 *가 붙은 시료는 최대경도까지 석출경화열처리한 시료이며 *가 없는 시료는 주조된 상태의 시료이다. 모든 시편에서 마모하중이 증가함에 따라 마모율은 증가하고 있으며 Cu함량이 증가할수록 고용강화 효과로 기지가 강화되어 마모율은 감소하였다. 또한 시효열처리에 의한 θ' 의 석출강화효과로 마모율을 더욱 감소시킬 수 있었으며 또한 Si를 첨가함으로써 마모율을 더욱 낮출 수 있었다. 이것은 고용강화, 석출경화 그

리고 Si-rich 입자상의 분산 강화에 의한 기지강화효과가 모두 마모율을 낮추는 효과를 나타내기 때문으로 믿어진다.

Fig. 4는 29N의 일정한 마모하중에서 마모속도 $88.2 \times 10^{-2} \text{m/sec}$, 거리 3175.2 m의 마모조건에서 마모시험 후 마모표면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. (a)의 주조된 상태의 Al-4.5%Cu-25%Pb합금에서는 응착마모와 관련이 있는 소성구역이 매우 크며 균열 등이 전파하여 재료에 큰 표면박리가 관찰되고 있다. (a)를 석출경화한 시료의 마모표면인 (b)에서는 (a)와 유사한 형태의 재료손상이 관찰되지만 (a)에 비하여 전체적으로 재료손상구역이 적고 박리가 일어나지 않은 곳의 표면이 보다 매끄러운 것을 알 수 있다. (c)는 주조된 상태의 Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb 합금의 마모표면으로 Si이 첨가되지 않은 (a)와 (b)에 비하여 재료가 박리된 폭이 좁고 또한 마모시 미끄럼 방향으로 골들이 발견되어 있다. 이와 같은 골들의 형성은

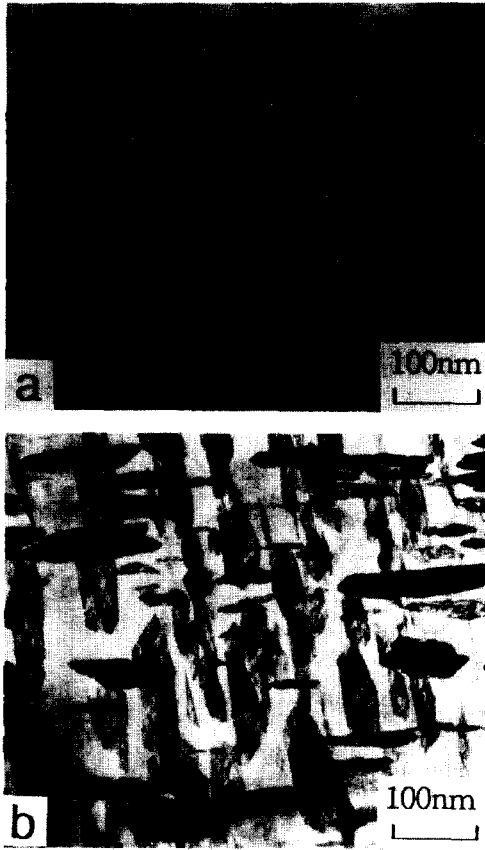


Fig. 5. Transmission electron micrographs of Al-4.5% Cu-25%Pb Alloys
(a) as-cast (b) 190°C/30h heat-treatment

경한 Si-rich 상들이 재료로부터 분리되어 연삭효과를 가져오기 때문으로 믿어진다. (d)는 (c)를 석출경화열 처리한 시편의 마모표면으로 전체적으로 마모에 의한 재료손상이 비교적 적은 것을 보여준다. 이것은 이 합금에서 마모율이 낮았던 Fig. 4의 마모시험결과를 입증하는 것이다. 이와 같은 마모표면 관찰 결과 석출경화에 의하여 마모면의 재료파괴 구역의 감소가 얻어졌으며 대체로 응착마모에 수반되는 소성변형구역도 감소됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Al-4.5%Cu-25%Pb합금의 주조된 상태의 시료와 190°C, 30시간 즉 최대 경도까지 열처리한 후의 미세조직을 박판시료를 제조하여 투과전자현미경으로 관찰한 결과이다. 그림(a)의 as-cast의 경우 Al기지에는 어떠한 석출상도 관찰되고 있지 않으며 주조시 급냉에 의하여 생성된 것으로 믿어지는 약간의 전위들이 존재하고 있다. 그림(b)의 시효열처리된 시

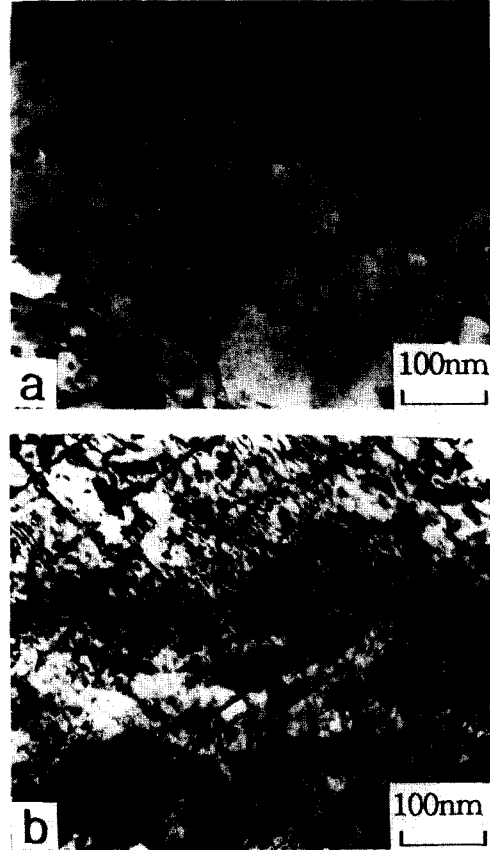


Fig. 6. Transmission electron micrographs of Al-4.5% Cu-25%Pb alloys after wear test at the applied load of 49N
(a) as-cast (b) 190°C/30h heat-treatment

료에서는 특정한 결정면을 따라 석출상이 형성된 것을 관찰할 수 있는데 이 석출상들은 투과전자현미경 국부전자회절상에 의하여 {100}면을 따라 생성 성장하고 있음을 확인하였으며 석출물도 준안정상인 θ' 상이었다. 이러한 반정합의 석출물의 존재에 의하여 기지 내에 격자뒤틀림이 일어나면 경도의 상승이 얻어진 것이다.

Fig. 6은 석출물이 Al기지에 존재할 때 마모표면에서 응착마모와 관련이 있는 소성변형구역이 감소되는 이유를 규명하기 위하여 Al-4.5%Cu-25%Pb합금의 (a) 주조상태 시료와 (b) 석출경화된 시료를 마모시험 후 마모표면에 근접한 곳을 절단하여 박판시료를 만들어, 투과전자현미경으로 관찰한 결과이다. 주조상태의 시료에서는 마모에 의하여 전위들이 생성되어 어떤 방향을 받지 않고 규칙성이 없는 전위셀을 이루고 있

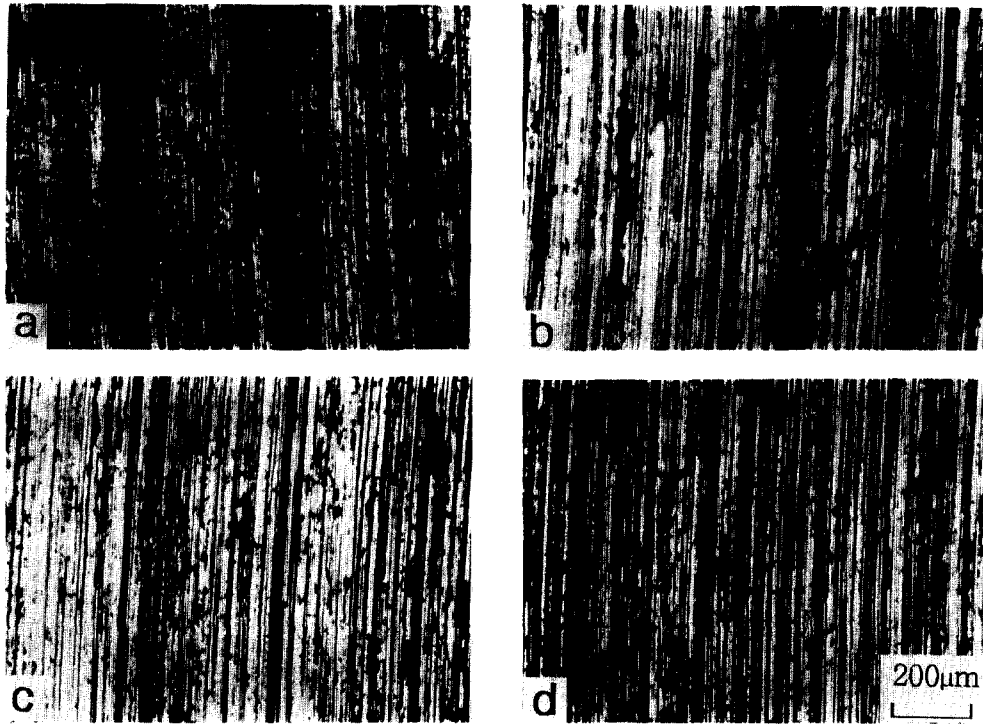


Fig. 7. Optical micrographs of the steel disc surfaces (applied load of 29.4N)
 (a) Al-4.5%Cu-25%Pb (b) the ppt. hardened Al-4.5%Cu-25%Pb
 (c) Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb (d) the ppt. hardened Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb

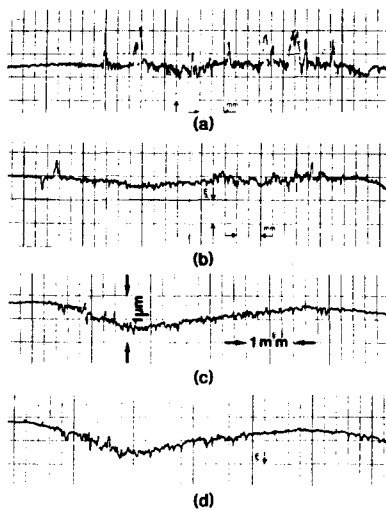


Fig. 8. Surface roughness profiles of the steel disc surfaces
 (a) Al-4.5%Cu-25%Pb (b) the ppt. hardened Al-4.5%Cu-25%Pb
 (c) Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb (d) the ppt. hardened Al-13%Si-4.5%Cu-25%

으며 이것은 마모시 재료손상이 전위의 이동과 생성 등의 소성변형에 의하여 지배받고 있음을 보여주는 것이다. 그런데 석출경화상을 갖는 (b)의 마모시료에서는 전위의 이동이 석출상에 의하여 방해받고 있음을 보여준다. 따라서 이와 같은 석출물의 존재는 응착 마모를 일으키는 소성변형이 폭넓게 일어나는 것을 방해하는 역할을 할 것으로 믿어진다.

Fig. 7은 마모하중 29N에서 속도 $88.2 \times 10^2 \text{m/sec}$, 거리 3175.2 m의 마모조건에서 마모시험 후 상대재인 SCM4 steel disk 표면의 광학현미경 사진이다. Al-4.5%Cu-25%Pb 합금에서 주조된 합금에 비하여 석출경화된 합금과 마모시험한 상대재의 표면에는 기지강화에 의하여 적은 물질전달이 일어났음을 알 수 있다. Si이 첨가된 Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb 합금과 마모시험한 상대재의 표면은 합금의 시효열처리에 무관하게 매우 물질전달이 적음이 보여진다. 이것은 Si 첨가에 의해 기지강화가 일어나 물질전달양이 적게 일어나고 합금으로부터 마모에 의해 상대재로 전달된 물질이 마모가 진행되는 동안 합금에 존재하는 경한 Si 입

자에 의하여 다시 분리되어 마모부스러기로 이탈되었기 때문에 믿어진다.

Fig. 8은 Fig. 7의 상대재 표면의 거칠기를 측정하기 위하여 상대재의 마모표면의 조도를 측정한 결과이다. 주조된 (a)의 Al-4.5%Cu-25%Pb 합금의 상대재에는 합금으로 부터의 물질전달에 의하여 원래의 표면보다 높은 부분이 여러곳이며 거의 상대재의 마모는 없음을 알 수 있다. (b)의 석출열처리된 Al-4.5%Cu-25%Pb합금의 상대재는 부분적인 물질전달이 보여지며 상대재의 마모는 경미하다. 주조된 상태나 시효열처리한 상태의 Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb합금과 거의 유사하게 마모손상을 받아 원래표면으로 부터 1 μ m 정도의 마모가 일어났음을 알 수 있다. 이것은 Al-13%Si-4.5%Cu-25%Pb 합금에서는 경한 Si 입자가 존재하기 때문에 이 입자에 의한 국부적으로 연삭마모가 일어났기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강제교반법과 급냉법을 이용하여 Al-Cu-Pb계와 Al-Si-Cu-Pb계 베어링합금을 제조하여 석출경화에 의한 기지강화가 베어링합금의 내마모성질에 어떠한 효과를 가져오는지 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Cu가 첨가된 모든 합금들에서 석출열처리에 의하여 θ' 상이 석출되면 Al기지의 강화효과에 의하여 마모율의 감소를 얻을 수 있었다.
2. 마모표면 근접 부위의 투과전자현미경 관찰 결과 마모에 따른 상변태는 관찰되지 않았다. 마모에 의하여 시료에서 전위의 생성이 관찰되었는데 석출경화상을 갖는 시료에서는 석출물이 전위 이동을 방해하여 마모에 수반되는 소성변형을 억제하는 효과를 보였다.
3. 석출경화에 의한 기지강화는 상대재료의 물질전달을 감소시켰으며, Si-rich상이 존재하는 시료의

상대재에서는 Si입자에 의한 심한마모가 관찰되었다.

후 기

이 연구는 1991~1992년도 한국과학재단의 기초연구비에 의해 수행된 일부로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Shivanath, P.K. Sengupta and T.S. Eyre, "Wear of Aluminium-Silicon alloys", Br. Foundryman, Vol. 70, pp. 349-356, 1977.
2. T.S. Eyre, "Treatise on Material Science and Technology", Wear, Vol. 13, pp. 362-442, 1979.
3. S.V. Prasad and P.K. Rohatgi, "Tribological Properties of Al Alloy Particle composite", J. of Metal, Vol. 37, pp. 22-26, 1987.
4. J.P. Pathak, S.N. Tiwari, S.L. Malhotra, "On the wear characteristics of Leaded Aluminium Bearing Alloys", Wear, Vol. 112, pp. 341-353, 1986.
5. 임화영, 허무영, 임대순, "강제교반법으로 제조된 Al-Pb계 베어링합금의 마모 특성", 한국윤활학회지, 제 8 권, 제1호, pp. 70-77, 1992.
6. K. Ichikawa and S.Ishizuka, "Production of Leaded Aluminium Alloys by Rheocasting", J. Jap Inst. Metals, Vol. 49, pp. 1093-1098, 1985.
7. T. Ikeda, S. Nishi and T. Yagi, "Manufacturing of Homogeneous Ingots of Al-Pb Alloy by Casting in a Movable Metal Mold with Water Spraying", J. Jap Inst. Metals, Vol. 50, pp. 98-107, 1986.
8. S.N. Tiwari, J.P. Pathak, S.L. Malhotra, "Microstructures and Mechanical Properties of Leaded Aluminium Alloys", Metals Tech., Vol. 63, pp. 411-415, 1987.
9. S.G.. Caldwell, J.J. Wert, "A Microscopic Study of the Behavior of Selected Al-Cu Alloy in Unlubricated Sliding Wear", Wear, Vol. 122, pp. 225-249, 1988.
10. D.S. Lin, "The Effects of Age-Hardening and Work Hardening on the Friction and Wear of Al-4 wt%Cu During Abrasion", Wear, Vol. 14, pp. 323-328, 1969.