

강제교반법으로 제조된 Al-Pb계 베어링 합금의 마모특성

임화영* · 허무영* · 임대순**

*고려대학교 금속공학과

**고려대학교 재료공학과

Wear properties of Al-Pb alloys produced by a forced stirring method

Hwa-Yong Lim*, Moo-Young Huh*, Dae-Soon Lim**

*Dept. of Metallurgical Engineering, Korea University

**Dept. of Material Science, Korea University

Abstract—Al-Pb-Si bearing alloys were produced by a forced stirring method and a rapid solidification process to study wear properties of bearing alloys. A homogeneous distribution of Pb particles in Al matrix could be obtained by means of the forced stirring and the rapid cooling during the casting. The wear properties of bearing alloys were tested by a pin-on-disc wear tester. The change in microstructure according to the alloy manufacturing variables was observed by the back-scattered electron images. Al-Pb and Al-Si binary alloys showed a transition from mild to severe wear. The transition was not found in Al-Pb-Si ternary alloys. It could be concluded that the lubrication effect of Pb and the strengthening effect of Si in the ternary alloys enhanced the bearing properties. A Al-25%Pb-13%Si alloy showed the lowest coefficient of friction in this experiment. It indicated that the optimum concentration of alloy was 25% Pb and 13% Si when the forced stirring of melt and water-cooled-copper-mold solidification were adopted.

1. 서 론

알루미늄계 베어링합금은 응착저항(adhesive resistance)이 큰 베어링특성을 갖고 있어 최근에 마모-마찰하는 자동차의 저널베어링용 부품 등에 많이 사용되고 있다[1]. 합금화되지 않은 순수한 알루미늄은 경도가 낮아 소착을 일으키는 단점을 갖는다. 따라서 알루미늄에 Sn, Si, Pb, Cd 등의 합금원소를 첨가하여 베어링 성질을 향상시키는 연구가 수행되고 있다[2].

현재까지 개발된 알루미늄계 베어링합금은 Al-Sn, Al-Pb, Al-Si계 합금 등이 있다. 이중 Al-Si계 합금[3, 4]은 중량비당 높은 강도, 높은 부식저항, 우수한 주조성 등과 함께 우수한 베어링특성을 갖고 있어 내연기관의 베어링메탈의 소재로 널리 사용되고 있다. 또한 Al-Pb계 합금[5-7]은 Pb가 고체윤활제로써 작용하여 높은 붙음저항(seizure resistance)의 특성을 가지며 가격이 저렴한 잇점도 갖고 있다. 이와 같은 Al-Pb 합금이 우수한 베

어링특성을 갖기 위하여는 Al기지에 Pb가 균일하고 미세하게 분포되어야 한다. 그런데 Al과 Pb는 공용간극내에서 거의 용해도가 없으며 Al과 Pb는 서로 비중차이가 크므로 인해 용융시와 냉각 응고시 중력 편석이 발생한다[8]. 따라서 일반적인 용융 및 주조방법으로는 균일하게 Pb가 분산된 Al-Pb 합금을 얻을 수 없다. 또한 Al기지에 기지강화원소인 Si를 합금화 할때 Si의 함량이 높을수록 합금의 경도값은 높아지지만 Al에 고용되는 Si의 양은 제한되기 때문에 Si의 함량이 높아질수록 일반적인 주조방법으로는 기지가 취약해지는 단점이 있다[9].

따라서 본 연구에서는 Al기지에 Pb의 중력편석을 최소화 하며 Al기지에 Si-rich 상이 생성되는 것을 최소화 하기 위하여 강제교반법[10, 11]과 급냉법을 사용하여 Al-Pb-Si 합금을 제조하였다. 제조변수의 최적조건을 알기 위하여 제조된 합금에서 Pb와 Si의 분포상태는 주로 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 각종변수에 따라 제조된 합금시료들은 pin-on-disc 형태의 마모시험기에서

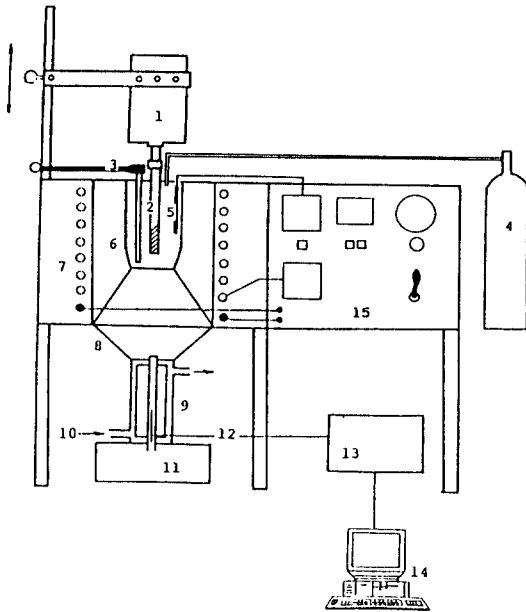


Fig. 1. Schematic diagram of the forced stirring apparatus

1) variable speed motor, 2) carbon impeller, 3) stopper rod, 4) N₂ gas, 5) thermocouple, 6) crucible, 7) furnace, 8) sprue, 9) water cooled Cu-mold, 10) cooling water, 11) refractory, 12) thermocouple, 13) digital multimeter, 14) personal computer, 15) furnace controlling unit.

무운할상태에서 마모실험하여 합금조성에 따른 마모-마찰 거동을 연구하였다.

2. 합금의 제조방법 및 실험방법

2-1. 합금의 제조방법

본 실험에서는 Al과 Pb의 두 액상구역에서 두 액상을 균일하게 혼합시키는 강제교반법과 수냉되는 동주형에 합금을 주조하는 급냉법에 의하여 시편을 제작 하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 합금제조장치의 개략도이다. 합금제조시 강제교반속도는 500~2500 rpm이었으며, 강제교반은 두 액상구역인 800℃에서 5~10분간 행하였으며 교반 후 질소가스로 용탕에 압력을 가하여 혼합된 용탕이 직경 8 mm 또는 15 mm의 수냉되는 동주형에서 신속히 응고되도록 하였다.

2-2. 합금의 조성

기존의 보고에 의하면 Al-Si 2상합금[3, 4]에서는 Al에서는 공식조성인 13 wt% Si의 합금에서 가장 좋은 마모특성이 얻어졌으며, Al-Pb 2상합금[10]에서는 Al에

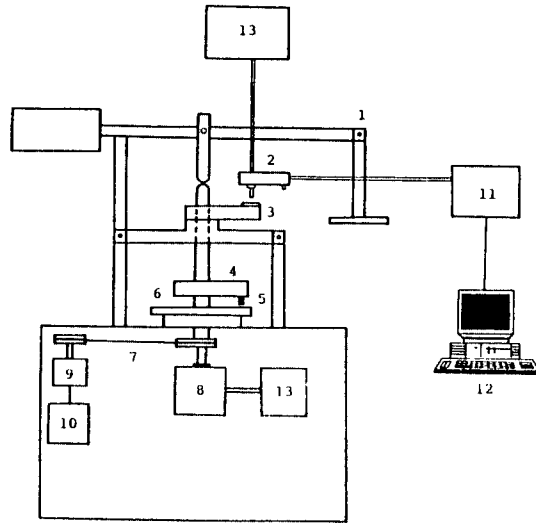


Fig. 2. Schematic diagram of the pin-on-disk type wear machine

1) balance weight, 2) load cell, 3) specimen holder arm, 4) specimen holder, 5) specimen, 6) steel disk, 7) time belt, 8) variable speed motor, 9) rotary encoder, 10) digital tachometer, 11) digital multimeter, 12) personal computer, 13) power supply.

첨가되는 Pb의 양이 많을 수록 점차적으로 마모율은 감소하였으나 Pb가 25 wt%인 합금에서 붙음저항이 가장 크고 마찰계수도 가장 낮다고 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문헌을 참고로 13 wt% Si과 25 wt% Pb를 포함하는 Al-Pb-Si 3상합금을 표준조성으로 하여 Pb와 Si의 양을 변화시켜 최적의 마모특성을 갖는 Al-Pb-Si 3상합금을 제조하고자 실험하였다.

2-3. 마모실험방법 및 실험장치

강제교반법과 급냉법에 의하여 제조된 시편들을 약 1.2 cm의 길이로 절단한 후 마모실험할 면은 #800 연마지에 의하여 평활하게 연마하였다. 상대재인 SCM4 강철 disk도 실험 전 동일한 연마지에 의하여 연마하였다. 마모시험 전에 마모시편과 상대재의 표면을 메틸알콜로 세척한 후 공기 중에서 건조하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 마모시험기의 개략도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 베어링 합금의 제조와 제조방법에 따른 미세조직의 발달

Fig. 3은 Al-Pb-Si 합금을 강제교반장치에서 교반 후 수냉되는 동금형에서 응고시킬 때 동금형의 하부로부터

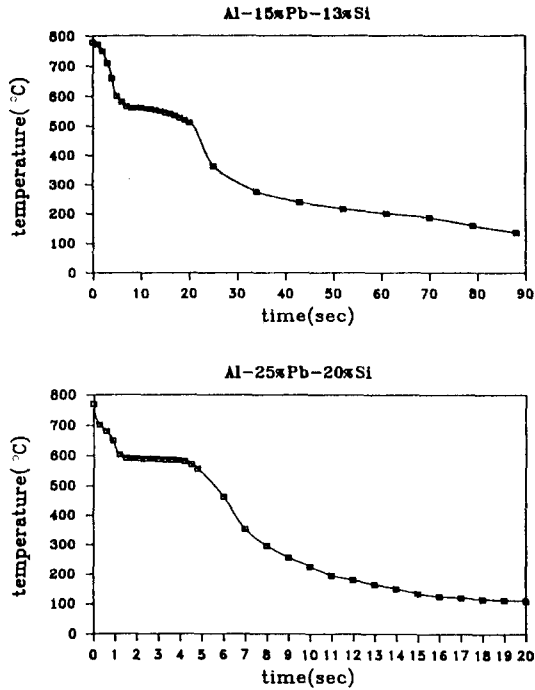


Fig. 3. Cooling curves of Al-Pb-Si alloy in a water cooled cooper mold with diameter of (a) 15 mm, (b) 8 mm

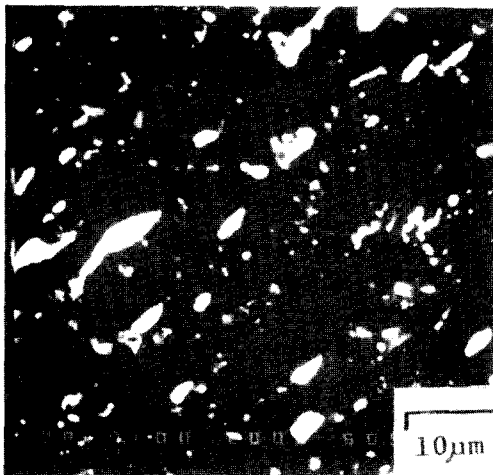


Fig. 4. Back scattered electron image (BEI) of the Al-25Pb Alloy (stirring speed; 2500 rpm, mold diameter 8 mm)

3 cm 위치에 열전대를 삽입하여 냉각속도를 측정된 결과이다. 이 결과에 의하면 응고가 시작되기 전 냉각속도는 주형의 직경이 15 mm일 때 약 30~40°C/sec이고 8 mm일때는 약 100°C/sec였다.

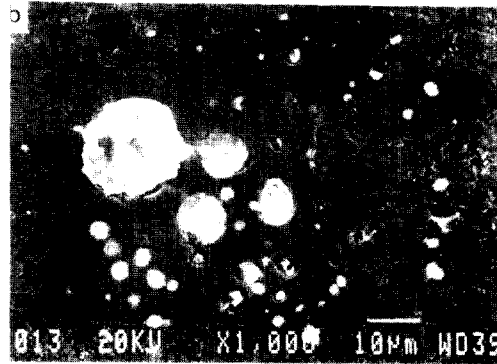
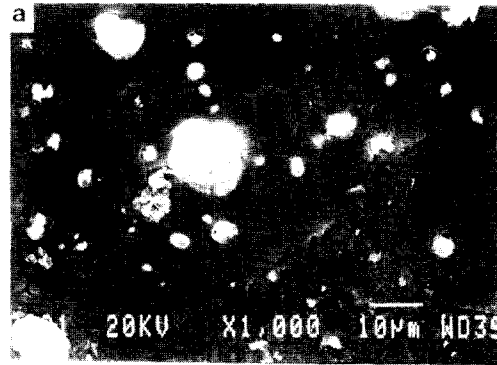


Fig. 5. Back scattered electron images (BEI) of Al-25%Pb-13%Si alloy at various stirring speeds (a) 500 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2500 rpm

Fig. 4는 Al-25%Pb 조성의 합금을 교반속도가 2500 rpm으로 강제교반 후 직경 8mm의 주형에서 응고시킨 시료의 주사전자현미경의 후방산란전자상 미세조직이다. Al과 Pb는 원자번호의 차이가 크기 때문에 후방산란전자상(back scattered electron image)의 조성상(composition image)으로 Al 기지내의 Pb의 분포상태를 잘 나타낼 수 있었다. 이 미세조직에서 무거운 Pb는 많은 산란을 일으켜 흰 부분으로 나타내는데 합금에서 대체로 그 분포가 미세하며 균일한 것을 알 수 있다.

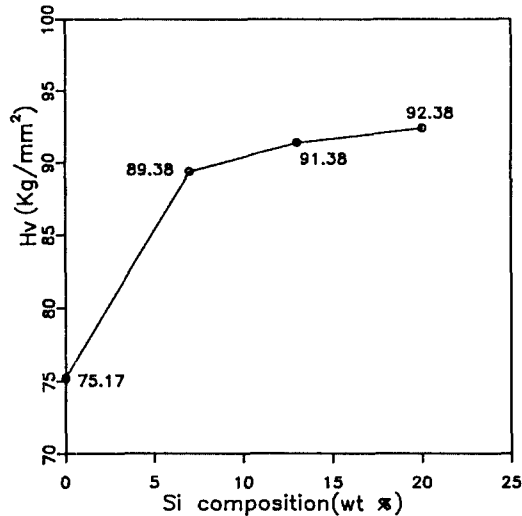
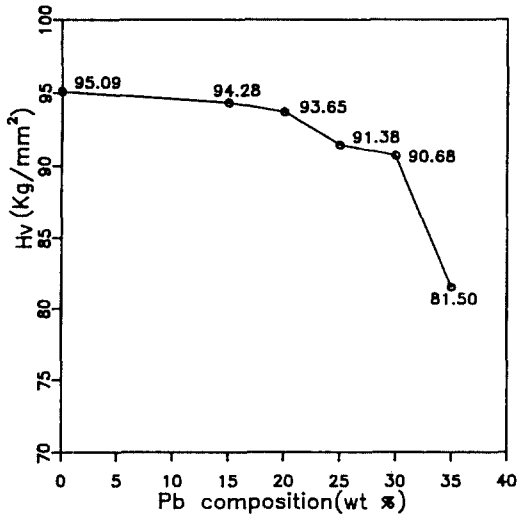


Fig. 6. Variation of hardness with the change in alloying elements (stirring speed; 2500 rpm, mold diameter 8 mm)

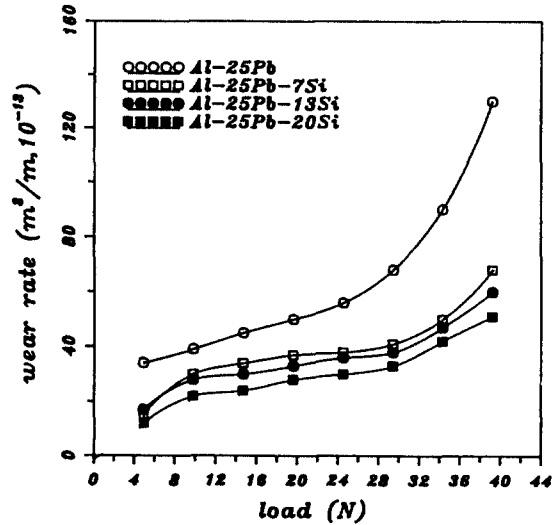
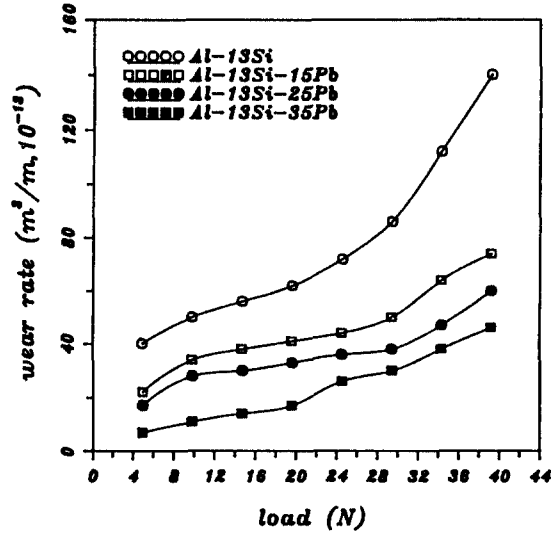


Fig. 7. Effect of load on wear rate in various bearing alloys

Fig. 5는 강제교반시 강제교반속도에 따른 베어링합금 내에서 Pb의 분산정도를 나타내주는 후방산란전자상으로 모두 같은 조성을 갖는 Al-25%Pb-13%Si 합금이 동일한 8 mm의 주형에서 응고된 합금의 미세조직이다. 교반속도가 증가함에 따라 Pb가 미세하고 균일하게 분포되고 있으며 2500 rpm의 강제교반에 의하여 submicron 이하의 Pb 분포가 관찰되고 있다. 이와 같은 미세조직의 관찰에 의하면 Al 기지에 Pb와 Si의 분포상태가 가장 양호한 주조조건은 본 시험장치에서 가장 교반속도가 큰 강제교반속도 2500 rpm일 때와 본 실험조건에서

가장 냉각속도가 큰 수냉되는 동주형의 직경이 8 mm에서 응고시켰을 때였다. 따라서 이 제조조건을 연구에서 표준조건으로 선택하여 마모시험용 시편을 제조하였다.

3-2. 합금조성에 따른 경도변화

Fig. 6의 (a)는 Al-13%Si 합금에 Pb가 증가함에 따른 합금의 경도변화를 마이크로 비커스 경도로 측정된 결과이다. 연한 금속인 Pb의 함량이 증가할 수록 합금의 경도는 감소하고 있으며 특히 30% 이상의 Pb가 함유된 합금에서는 경도의 감소가 매우 크게 일어났다. Al의

기지에 경한 석출물을 만드는 Si의 함량이 증가할 수록 경도가 증가하고 있으며 함량증가에 따른 경도의 증가는 7% Si까지에서 높게 나타났다.

3-3. 베어링합금 조성에 따른 마모시험

Fig. 7은 강제교반 속도가 2500 rpm이고 수냉되는 동주형의 직경이 8 mm인 금형에서 응고시키는 표준 주조 조건에서 제조된 각종 조성의 시편들의 하중에 따른 마모율의 변화를 측정된 결과이다. 이때 미끄럼 속도와 거리는 각각 88.2×10^{-2} m/sec와 3.2×10^3 m였다. Fig. 7의 (a)는 Al에 첨가하는 Si의 양을 13 wt%로 고정시키고 Pb의 양을 0%에서 35%까지 변화시켰을 때 마모율을 측정된 것으로 Pb의 양이 증가할 수록 마모율은 작아졌다. 또한 Fig. 7의 (b)에서는 Al에 첨가하는 Pb의 양을 25%로 고정시키고 Si의 양을 0%에서 20%까지 변화시킨 시편의 마모거동으로 Si의 양이 증가할 수록 마모율은 역시 감소하고 있다.

Al-13%Si와 Al-25%Pb의 2원계 합금의 경우에는 약한 마모(mild wear)와 심한 마모(severe wear)의 경계점인 변환점(transition point)이 하중 19.6~29.4 N에서 확연히 나타나지만 Al-Si-Pb의 3원계 합금들에서는 이와같은 변환점이 미약하게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 3원계 합금의 경우가 2원계 합금에 비해 상대적으로 높은 하중에서 덜 심한 마모형태를 나타내는, 즉 보다 우수한 내마모특성을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 8은 표준 주조조건에서 제조된 각종 조성의 시료들의 마모시험 시 하중에 따른 마찰계수를 측정된 결과이다. 마찰계수는 마모시험기에 장착된 load cell로부터 직접 측정되었다. 2원계 합금에 비하여 3원계 합금에서 측정된 마찰계수가 적은 값을 나타내었으며 각 합금에서 하중에는 무관한 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 Al-13%Si-25%Pb 합금에서 가장 낮은 마찰계수가 얻어졌다. 물론 합금에 Pb와 Si의 양이 증가할 수록 마모량은 감소하지만 과도한 Pb는 합금의 강도를 낮추며 과도한 Si는 Si-rich 상의 편석을 일으키므로 강제교반법과 수냉되는 동주형을 사용하는 주조법으로는 마모량도 비교적 적으며 마찰계수도 최저값을 보이는 Al-13%Si-25%Pb 조성이 베어링 합금을 제조 시 가장 적절한 조성이라 생각된다.

3-4. 마모표면의 관찰

Fig. 9는 합금 조성이 Al-25%Pb이고 강제교반속도가 2500 rpm, 수냉되는 동주형의 직경이 8 mm일 때 제조된 시료들의 마모시험 후 마모표면의 주사전자현미경 미세조직이다. 마모하중이 19.6 N까지는 마모표면에서 관찰되는 소성변형 구역이 매우 적는데 비하여 마모하중이

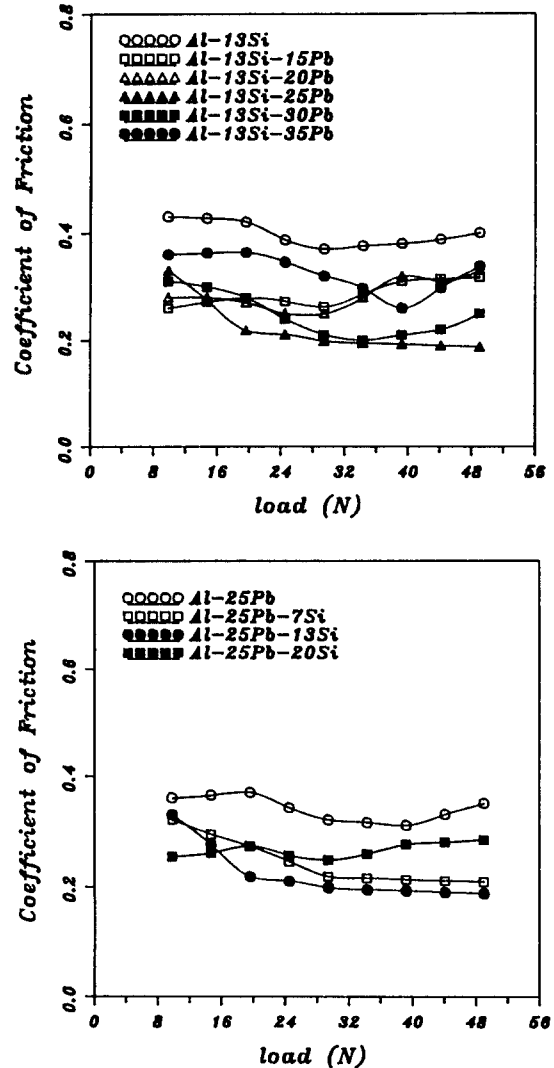


Fig. 8. Effect of load on a coefficient of friction in various bearing alloys

29.4 N 이상에서는 마모면에 cracking과 spalling 등의 심한 소성변형이 일어나고 있으며 전단변형에 의하여 마모입자(debris)가 소성 변형 구역으로 부터 분리되고 있다. 이 2원계 합금에서는 29.4 N 이상의 하중을 받은 마모시료 표면의 거의 모든 곳에서 이와 같은 심한 마모가 관찰되었다. Fig. 9의 마모표면에서 관찰되는 소성 변형은 전형적인 금속재료의 마모재료손상의 형태이다.

Fig. 10은 Al 기지에 Pb와 Si의 분포상태가 가장 양호한 주조조건인 강제교반 속도가 2500 rpm이고 수냉되는 동주형의 직경이 8 mm에서 응고시키는 표준 주조 조건에서 제조되었고, 또한 Fig. 8의 마찰계수 측정결과

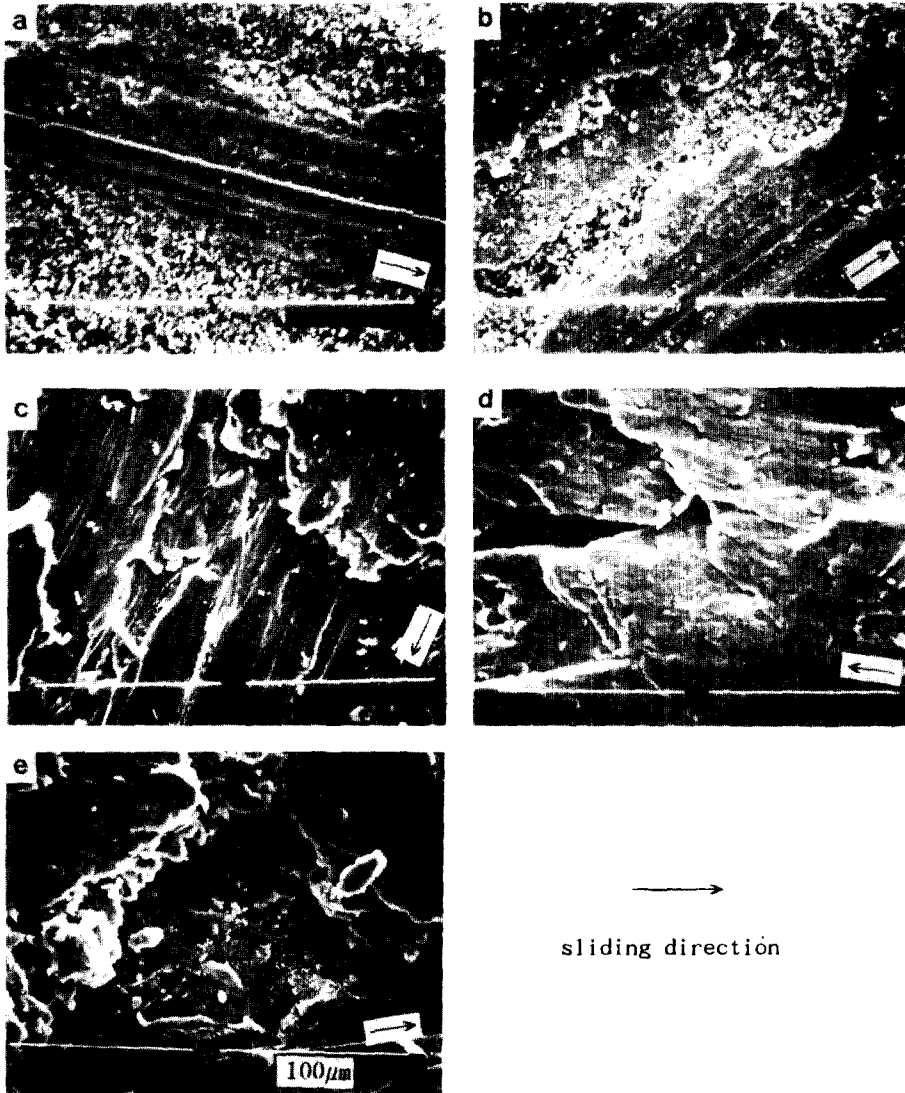


Fig. 9. Scanning electron micrographs of the wear surfaces
 (Al-25%Pb alloy, stirring speed; 2500 rpm, mold diameter 8 mm)
 applied load of (a) 9.8N, (b) 19.6N, (c) 29.4N, (d) 39.2N, (e) 49.9N

가장 적었던 Al-13%Si-25 Pb 합금을 마모실험 후 마모 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. Fig. 9의 2원계 합금에 비하여 같은 마모하중에서 전체적으로 재료의 손상구역이 적으며 49 N의 높은 마모하중에서 마모시험을 한 경우에도 시료의 모든 표면에서 재료 손상구역이 관찰되지는 않았다. 또한 Al-13%Si-25%Pb 합금에서는 2원계 합금에 비하여 소성구역의 크기가 작음을 알 수 있다. 이것은 이 3원계합금에서 Pb의 고체윤활 효과와 Si의 Al 기지강화 효과에 의하여 응착마모를 억제해 주는 효과가 생겨나는 것으로 믿어진다.

→
 sliding direction

3-5. Al-Pb-Si 베어링 합금의 마모기구

기존의 연구[12, 13]에 의하면 Cu-Pb 합금에서는 Pb는 베어링 합금의 기지와 다른 접촉면 사이의 응착을 막는 피막(film)을 형성하고 이러한 피막은 베어링의 표면에서 윤활작용을 함으로써 접촉면 사이의 마찰과 마모를 감소시킨다고 보고된 바 있다. 따라서 이러한 결과로 볼 때 Al-Pb-Si 합금에서도 Pb가 같은 역할을 할 것을 기대할 수 있다. 또한 Si는 Al기지의 강도를 향상시켜 하중 증가에 따른 기지의 약화를 보완하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 과정을 통해서 균일하고 안정적인 Pb막이

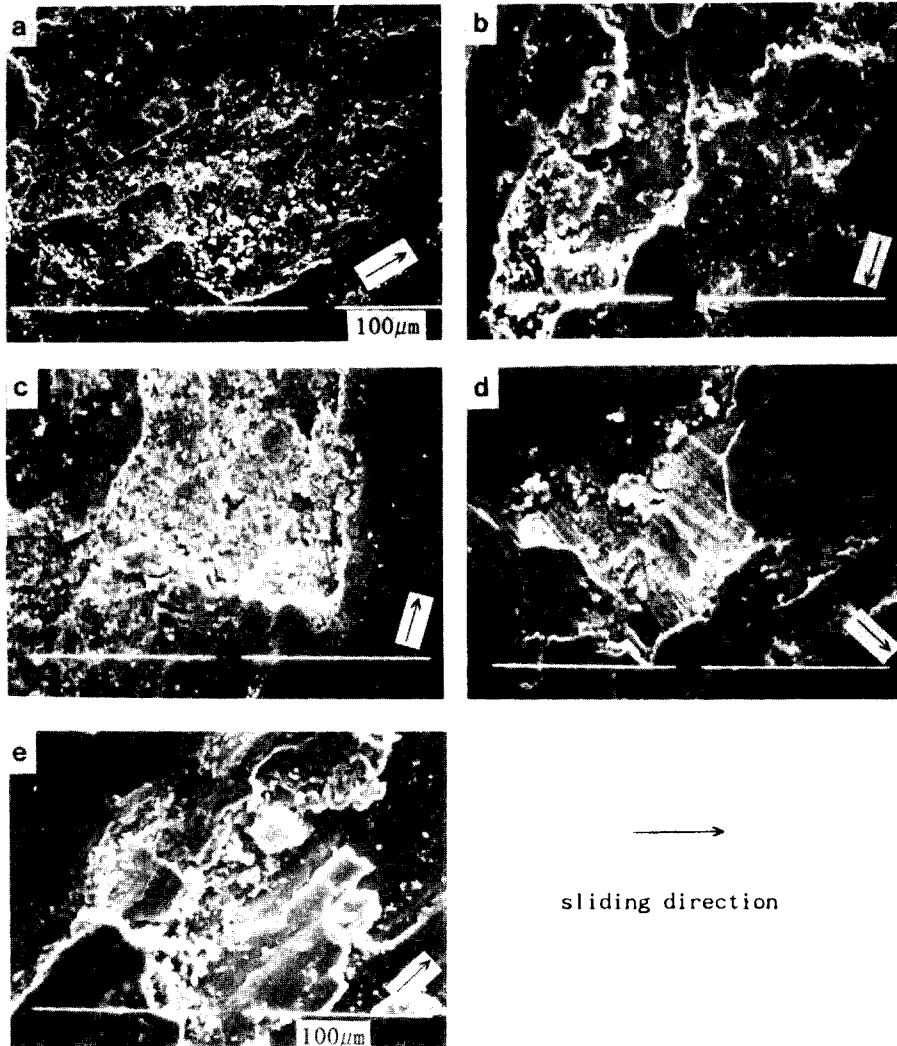


Fig. 10. Scanning electron micrographs of the wear surfaces

(Al-25%Pb-13%Si alloy, stirring speed; 2500 rpm, mold diameter 8 mm)
 applied load of (a) 9.8N, (b) 19.6N, (c) 29.4N, (d) 39.2N, (e) 49.9N

pin과 steel disc의 접촉면 사이에서 유지되어 고체윤활제의 역할을 하여 마찰계수를 줄이고 이에 따라 마모율도 감소하는 것으로 생각된다.

낮은 하중이나 낮은 미끄럼 속도 하에서는 마모시편의 연속적인 횡단운동이 표면층에 얼마간의 변형과 경화의 원인이 되고(Fig. 9(a), (b)), 마모입자는 연속적인 변형의 결과인 cracking과 spalling에 의해 형성된다(Fig. 9(c)).

Pb는 낮은 전단강도를 갖기 때문에 하중이 변환점을 초과하게 되면 이러한 Pb막이 깨지고 기지와 기지가

직접 접촉함에 따라 마모율을 증가시키게 된다. 이러한 높은 하중에서는 총체적인 결합이 시편의 전 표면에서 일어나고 응착마모나 층이 떨어져나가는 소위 delamination이 일어나게 된다(Fig. 9(d), (e)).

이와 같이 Al-Pb-Si 3상 합금에서는 Si에 의한 지지 강화 효과와 Pb에 의한 윤활 효과가 복합적으로 일어나 Al-Pb 2상 합금에 비해 낮은 마모율 형태를 보이는 것으로 생각되며 특히 높은 하중에서 이러한 효과로 표면의 심한 변형과 파괴가 Fig. 10(c), (d), (e)에서와 같이 표면의 변형과 파괴가 덜 일어나는 것으로 생각된다.

4. 결 론

Al계 베어링합금을 강제교반법에 의해 제조하여 미세 조직 관찰 및 마모실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강제교반법에 의한 용해 후 냉각응고시 교반속도가 클 수록, 또한 냉각속도가 클 수록 Al 기지내의 Pb 입자의 크기가 미세하고 균일하게 분포되었다.
2. Al-Pb 또는 Al-Si의 2원계 합금에서는 합금의 약한마모(mild wear)와 심한마모(severe wear)의 분기점인 변환점(transition point)이 19.6~29.4 N의 수직하중(normal load)에서 나타났지만 Al-Pb-Si 3상 합금에서는 이러한 변환점이 거의 나타나지 않았다.
3. Al-Pb-Si 3상 합금은 모든 조성에서 2상 합금보다 적은 마모율을 나타냈다.
4. Al기지에 첨가되는 Pb와 Si의 양이 증가할 수록 마모율은 감소하였다.
5. 본 연구에서 실험된 마찰하중의 범위에서 Al-25% Pb-13%Si 합금에서 마찰계수가 가장 작게 나타났다.

후 기

본 연구는 1991년도 한국과학재단의 기초연구비에 의해 수행된 일부로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T.S. Eyre, "Treatise on Material Science and Technology", Wear, Vol 13, pp. 362-442, 1979.
2. S.V. Prasad and P.K. Rohatgi, "Tribological Properties of Al Alloy Particle Composite", J. of Metal, Vol

- 37, pp. 22-26, 1987.
3. K. Mohammed Jasim and E.S. Dwarakadasa, "Wear in Al-Si Alloys Under Dry Sliding Conditions", Wear, Vol 119, pp. 119-130, 1987.
4. A.D. Sarkar, "Wear of Aluminium-Silicon Alloys", Wear, Vol 31, pp. 331-343, 1975.
5. J.P. Pathak, S.N. Tiwari and S.L. Malhotra, "On the Wear Characteristics of Leaded Aluminium Bearing Alloys", Wear, Vol 112, pp. 341-353, 1986.
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. T.B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagram, pp. 147. ASM, 1986.
9. R. Shivanath, P.K. Sengupta and T.S. Eyre, "Wear of aluminium-silicon alloys". Br. Foundryman, Vol 70, pp. 349-356, 1977.
10. S.N. Tiwari, J.P. Pathak and S.L. Malhotra, "Seizure Resistance of Leaded Aluminium Bearing Alloys, Mat. Sci. and Tech., Vol 1, pp. 1040-1045, 1985.
11. J.P. Pathak, S.N. Tiwari and S.L. Malhotra, "Production of High-Leaded Aluminium by Impeller Mixing", Metal Technology, Vol 7, pp. 442-445, 1979.
12. S.N. Tiwari, J.P. Pathak and S.L. Malhotra, "Microstructures and Mechanical Properties of Leaded Aluminium Bearing Alloys", Aluminium, Vol 63, pp. 411-415, 1987.
13. S.N. Tiwari, J.P. Pathak and S.L. Malhotra, Varanasi, "Lead-a Potential Soft-Phase Alloying Addition to Aluminium Bearing Alloys", Aluminium, Vol 63, pp. 411-415, 1987.