

## 급속응고된 Al-Pb-Cu-Mg 합금의 마모특성에 미치는 미세조직의 영향

김홍몰 · 김택수 · 맹덕영 · 김경환 · 천병선  
충남대학교 급속응고신소재연구소

### Effect of the Microstructure of Rapidly Solidified Al-Pb-Cu-Mg Alloys on the Wear Property

Hong-Moule Kim, Taek-Soo Kim, Duck-Young Maeng,  
Kyong-Hwan Kim and Byong-Sun Chun  
Rapidly Solidified Advanced Materials Research Center,  
Chungnam National University, Taejeon 305-764  
(Received November 16, 1999)

**Abstract** Effects of the microstructure of rapidly solidified Al-Pb-Cu-Mg alloys on the wear property were investigated. In order to overcome the miscibility gap between Al and Pb under equilibrium conditions, both in the solid and the liquid states, the alloys were rapidly solidified to produce them in a segregation-free condition. Although the Pb particles showed relatively fine dispersion in the Al matrix in all the alloys by this process, the Al-16Pb alloy was found to have the most favorable microstructure with discrete Pb particles of about 0.5  $\mu\text{m}$  in size. With the addition of Cu and Cu-Mg to Al-16Pb, cellular structures were newly formed; not seen in the binary Al-Pb alloys. Wear properties of the Al-Pb binary alloys measured as a function of the sliding speed, sliding distance, and applied load showed that the Al-16Pb alloy has the best wear resistance, as expected from the fine microstructural features in this alloy. The wear resistance of the alloys containing Cu- and Cu-Mg was higher than that of the Al-16Pb alloy, due to the matrix strengthening by precipitation hardening. The wear mechanism was identified by examining the wear traces and wear debris.

### 1. 서 론

메탈베어링합금은 일반적으로 연한 기지에 경한 입자를 분산시키거나 그 반대의 분포를 가지도록 하는 두 가지의 경우로 구분될 수 있다.<sup>1-4)</sup> 실제로 응용되고 있는 베어링 합금재료 중에서 알루미늄합금도 구리계 합금과 마찬가지로 우수한 베어링특성을 나타내며, 보통 Sn, Pb, Cd, Bi, In 등의 저융점 고체윤활제를 첨가하여 기지의 응착방지에 의한 내마모특성의 향상을 유도하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>5-6)</sup> Al 합금계 베어링 재료중에서는 Al-Sn 합금에 대한 연구가 많이 이루어졌지만, 최근에는 Sn 보다는 Pb 첨가에 의한 더욱 우수한 고체 윤활 특성이 종종 보고되어지고 있다.<sup>7-10)</sup> 이것은 Pb가 Sn에 비해

서 탄성계수와 경도가 낮고 경제적이기 때문이다.

그러나 Al-Pb계 합금은 용융상태에서 존재하는 넓은 범위의 액상분리층 및 커다란 밀도차로 인하여, 제조시 커다란 야금학적 문제점을 안고 있다.<sup>11)</sup> 또한 Al과 Pb는 상호 고용도가 거의 없고 상온으로 응고하는 중에 Pb는 완전분리층을 갖는 편석으로 형성된다.<sup>12-15)</sup> 이러한 제조상의 난점들은 급속응고법을 이용하여 제조하면 용융 상태의 균일한 Al-Pb 합금이 상온까지 유지되기 때문에, Pb가 Al 기지내에 미세하고 균일하게 분산된 조직을 얻을 수 있으며 편석도 최소화된다.<sup>16)</sup> 결과적으로 최근에 급속히 발달한 성형기술을 이용하면, 결정립 미세화 효과 등에 의한 합금의 실온강도가 현저히 증가된 우수한 베어링 합금을 제조할 수 있으리라 예상된다.

본 연구에서는 10-20 wt.%Pb 조성변화에 따라 Al-Pb계 합금의 미세조직의 변화와 기계적 성질, 특히 마모특성에 대해 고찰하였다. 또한 석출경화원소인 Cu와 Cu-Mg를 Al-Pb 합금에 각각 첨가하여 석출강화 효과가 마모특성 등 기계적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 이와같은 합금원소의 영향은  $\theta'$  및  $\theta$ 상( $Al_2Cu$ )과  $\beta$ 상( $Al_2CuMg$ )의 석출에 기인하여 Al-Pb 2원합금의 강도 보다 약 2-2.5배 증가되었다는 보고를 근거로 한다.<sup>12-13)</sup>

### 2. 실험방법

급속응고 가스분무법에 의한 합금분말을 제조하기 위하여, 먼저 2원계 Al-Pb (10, 16 or 20 wt.%Pb: 이하 모든 조성은 wt.%로 표시)와 3원계 Al-16Pb-4Cu 그리고 4원계 Al-16Pb-4Cu-1Mg 모합금을 각각의 상업용 순금속을 이용하여 고주파유도로에서 제조되었다. 모합금을 1373 K에서 재용융시킨 후, 용탕 공급노즐이 부착된 턴디시를 통과하여  $N_2$  가스 분위기에서 분무시켰다. 이때의 노즐내경은 3 mm, 가스 압은 0.8 Pa 이었다. 분무시 용탕의 유동속도는 약  $2 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ 이었으며 질소가스 공급속도는 약  $1.3 \times 10^{-2} \text{ Nm}^3/\text{s}$ 이다. 분무전 용탕은 액상분리를 방지하기 위하여 80 K이상 과열시키고, 스크루형의 교반기를 이용하여 충분한 교반을 실시하였다. 제조된 급속응고 분말의 평균입径은 70-80  $\mu\text{m}$ 이었으며, 성형을 위한 전처리과정으로서, 냉간성형체를 약 673 K의 온도와 0.133 Pa( $10^{-3} \text{ torr}$ )의 압력에서 약 1시간동안 탈가스처리 하였다. 압출은 673 K에서 1시간동안 유지한 후 25:1의 압출비로 제조하였다. 압출재의 표면에 크랙이나 부풀림현상은 발생하지 않았다. 분말과 압출재의 미세조직은 연마후 부식하여 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 마모특성을 규명하기 위해 기지재료내의 Pb입자의 분포를 SEM(Scanning Electron Microscopy)과 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)를 이용하여 관찰하였다. 또한 합금분말의 상분석을 위해 XRD(X-ray diffractometer)을 사용하여  $10^\circ$ - $80^\circ$ 에 걸쳐 조사하였다. 경도측정은 500 g의 하중 하에서 마이크로 비커스 경도기를 이용하였고, 마모특성은 Ohgoshi형 마모시험기를 이용하여 거리(sliding speed: 2.41 m/s, load: 2.1 kg), 속도(sliding distance: 100 m, load: 2.1 kg) 그리고 하중(sliding

speed: 1.65 m/s, distance 400 m)으로 함수로 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 급속응고 Al-16Pb 합금분말의 입형을 보여주는 주사전자현미경 조직으로서, 상대적으로 큰 분말의 표면에 많은 위성분말을 부착되어 있으며 대체로 구형의 분말이 얻어졌다. 분말제조시 가스압, 가스와 용탕의 충돌 위치 등의 조건에 기인하여 생성되는 위성분말은 보통 커다란 분말액적에 부착되어 핵생성 사이트로 작용하기도 한다.<sup>17)</sup> 또한 합금 조성에 따른 입형의 차이는 관찰할 수 없었다. 그림 2는 광학현미경으로 관찰한 Al-xPb ( $x=10, 16, 20$ ) 및 Al-16Pb-4Cu-xMg ( $x=0, 1$ ) 합금 분말의 미세조직으로서, 2원계 합금의 경우 Pb 함량에 따라 서로 다른 Pb 입자의 크기와 분포를 보여주고 있다(그림 2 a-c). 커다란 비중차에 기인하여 액상중에서도 발생하

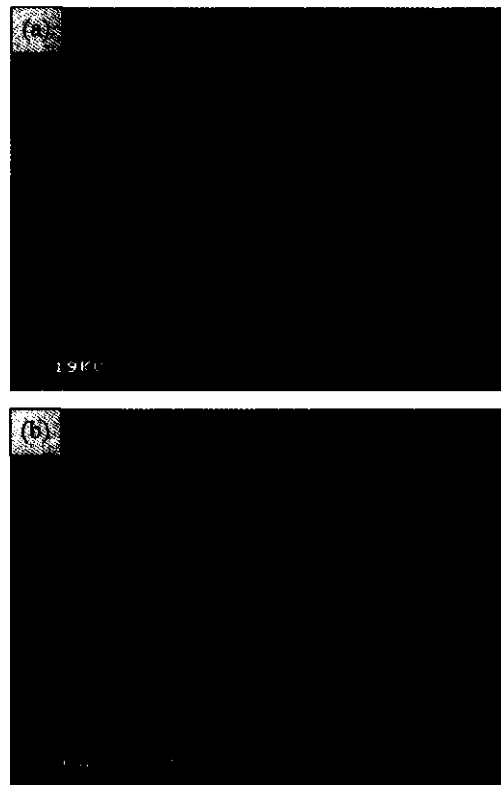


Fig. 1. Powder morphology of Al-16Pb alloy powders at (a) low magnification and (b) higher magnification by SEM.

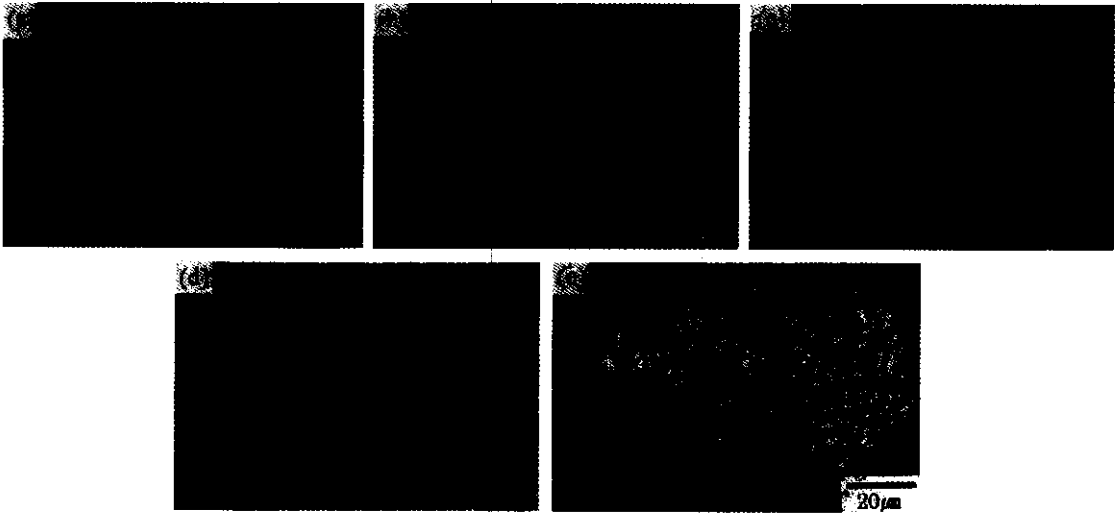


Fig. 2. Optical micrographs of gas atomized (a) Al-10Pb, (b) Al-16Pb, (c) Al-20Pb, (d) Al-16Pb-4Cu and (e) Al-16Pb-4Cu-1Mg alloy powders.

는 Al과 Pb의 분리는 충분한 교반과 급속응고기술과 같은 비평형공정의 적절한 조화를 통해 편석이 없이 Pb 입자가 Al 기지에 미세하고 균일하게 분포되고 있음을 알 수 있다. 분말기지내의 Pb 입자의 크기 및 분포는 첨가한 Pb량에 따라 커다란 차이를 보이는데, Al-10Pb 및 Al-20Pb 분말의 경우 Pb 입자가 조대하게 분산된 반면, Al-16Pb 합금에서는 매우 미세하고 균일한 분포를 나타내고 있다. 이때, 측정된 Pb의 평균 입자크기는 Al-10Pb에서는 약 3-10µm, Al-16Pb에서는 0.5µm, 그리고 Al-20Pb 합금은 1-4µm 이었다. 자세한 분포의 차이 원인의 규명을 위해 추가의 연구가 진행되고 있다.

한편, Al-Pb 합금에 4%의 Cu와 4%Cu-1%Mg 같은 합금원소의 첨가(그림 2 d-e)는 2원계 합금과는 매우 상이한 미세조직을 형성하고 있다. 즉, 평균 크기가 약 10-20µm인 많은 셀조직의 형성과 대부분 셀계면에 형성된 Pb 입자 -일부는 셀내부에 분포-를 확인할 수 있다(그림 4 참조). 이와같이 독특한 셀조직의 형성은 Cu 첨가 등에 기인한 조성변화와 급속응고 공정 중에 발생하는 냉각속도 차이로 해석할 수 있다. 먼저 후자의 영향을 보면, 가스분무된 분말의 응고속도는 분말크기에 의해 달라지고, 분무 가스압력, 용탕유동속도 그리고 용탕의 점성에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 그러나 본 연구에 이용된 합금분말은 같은 분무조건하에서 제조되었고, 입도도

동일하므로 미세조직 변화에 대한 응고속도의 영향은 적은 것으로 사료된다. 그러므로 조직변화는 주로 Cu첨가, 즉 조성의 변화에 기인한 것으로 간주할 수 있을 것이다. Mg의 첨가에 따른 3원계 합금과의 미

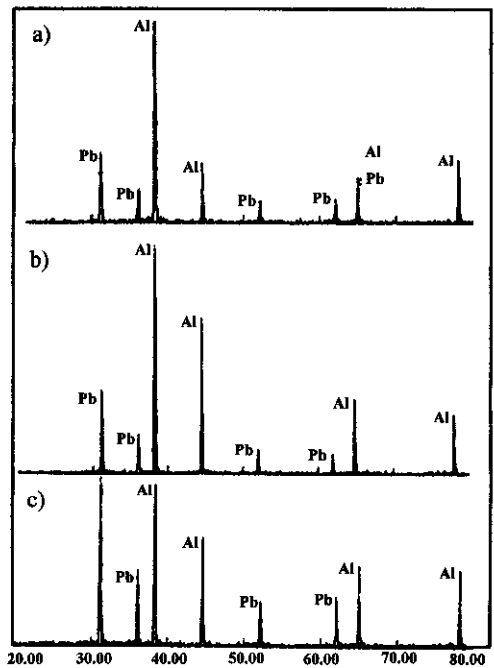


Fig. 3. XRD patterns of (a) Al-10Pb, (b) Al-16Pb and (c) Al-20Pb alloy powders.

세조직의 변화는 구별하기가 힘들었는데, 이는 약 1%의 적은 첨가량이 고용범위내이므로 조직변화에 크게 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

그림 3(a-c)은 Al-10Pb, Al-16Pb, 그리고 Al-20 Pb 합금분말의 X-ray 회절패턴으로서, fcc-Al 과 fcc-Pb상의 형성을 알 수 있고, 두 원소간의 화합물은 형성되지 않았다. Pb 함량이 증가할수록 피크강도는 증가하였으며 미세조직과 회절패턴의 결과로부터, 급속응고된 2원계의 Al-Pb 합금은 어떤 화합물도 형성하지 않으면서 Al 기지내에 Pb 입자가 독립적으로 미세하게 분산되어 있는 것을 알 수 있다.

Al-16Pb-4Cu 합금분말에서 Al, Cu 및 Pb의 분산도를 SEM-EDS mapping 기술을 이용하여 그림 4에 나타냈으며, Cu는 대부분 Al 셀 경계주위에 집중되어 있고 Pb는 산발적으로 분포되어 있다. Pb mapping의 결과 나타난 고립 Pb 입자의 출현은 Al 과 Pb 사이의 비혼합성(immiscibility) 때문이라 생각된다. 셀경계의 Cu-rich 상의 출현은 Al-Pb 2원계 합금과는 전혀 다른 미세조직을 형성시키는 주원인이 된다고 여겨진다. 셀조직이 생성되는 원인을 규명하기 위해서는 더 많은 연구가 진행되어야 하지만,

Cu가 용융상태의 Al의 점도를 증가시키고 Al과 Pb의 혼합을 방해하는 역할에 기인한다고 생각된다.<sup>18)</sup>

그림 5는 여러 합금의 압출재에 대한 경도를 표시하였다. Pb 함량이 10%에서 20%로 증가할수록 경도 값은 52 Hv 에서 46 Hv로 감소하는데, 이것은 Pb의

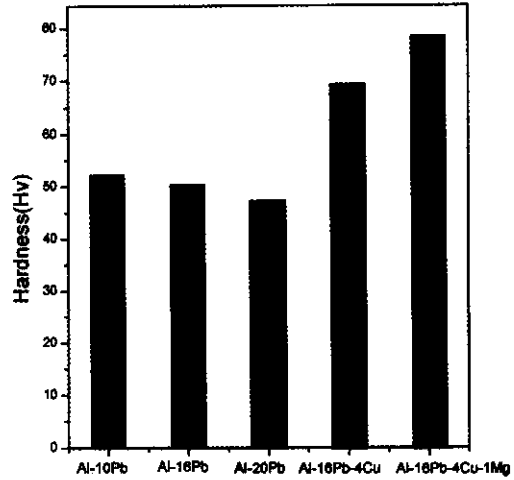


Fig. 5. Micro-vickers hardness of the extruded Al-Pb-Cu alloys (Load: 500 g).

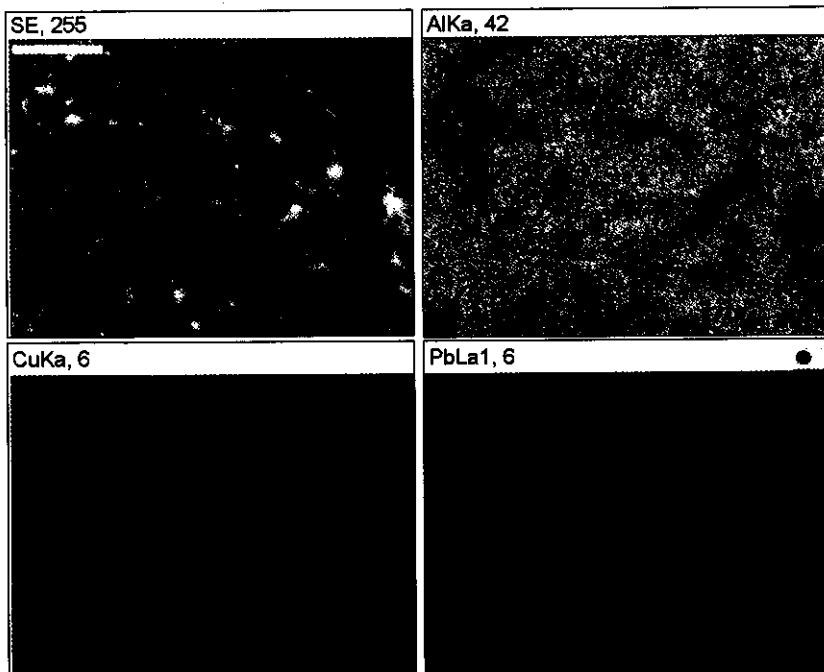


Fig. 4. SEM mapping of gas atomized Al-16Pb-4Cu alloy powder on Cu and Pb.

높은 연성에 기인한다. 그러나 Cu 및 Cu-Mg의 첨가는 70에서 77 Hv의 증가를 야기하는데, 이것은 T6 처리 - 480°C에서 용체화처리 및 170°C에서 7hr동안 시효처리 - 에 의한 석출경화 때문이다. 석출경화는  $\theta''$  및  $\theta'$ 상( $Al_2Cu$ )과  $\beta'$ 상( $Al_2CuMg$ )의 석출에 기인하며, 특히 Cu에 비해서 원자반경이 큰 Mg는 Al-Cu 기지에서 Cu 원자의 영향을 보정함으로써 확산속도가 증가되고, 또한 Cu 원자에 기인하여 형성된 응력을 제거하는 역할을 하게 된다.<sup>19)</sup>

그림 6 (a-c)는 압출재의 윤활속도, 거리 그리고 하중에 따른 비마모량을 평가한 것이다. 윤활중에 Pb는 마찰열과 낮은 전단강도로 인해 상대재 사이에서 얇은 층(film)을 형성하여 상대재와의 직접접촉을 억제하고 응착을 방지하며 마찰계수를 낮추는 것으로 알려졌다.<sup>3)</sup> 속도, 거리 그리고 하중의 변화에 따른 심한마모는 발견되지 않았으며, 비마모량은 합금조성에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 2원계 Al-Pb 합금에서 가장 뛰어난 마모특성을 보인 것은 Al-16Pb 합금이며 이것은 Al 기지내에 Pb의 분포가 가장 균일하고 미세하게 분포하였기 때문에 윤활층도 적절한 두께를 이루며 균일하게 형성되는 것으로 사료된다.

마모하중변화에 따른 비마모량은 Al-10Pb와 Al-20Pb 합금이 큰 차이를 보이지 않는데 반해, 마모거리의 함수로서는 Al-10Pb 합금이, 마모속도의 함수로서는 Al-20Pb 합금이 더 우수한 내마모특성을 나타낼 수 있다(그림 6 a-c). 이러한 내마모특성의 변화는 기지내의 Pb 입자 역할의 결과이다. 일정한 마모거리에서 마모속도의 증가는(그림 6a) 마찰에 의한 접촉면의 국부적 온도증가를 야기하게 되는데, 이것은 표면에서 발생한 마찰열이 시편 내부로의 확산이 충분히 이루어지지 못하기 때문이다. 이 때문에 Pb 입자는 급속하게 용융되고 표면에 윤활되어 내마모특성을 향상시키는 것으로 사료된다. 이러한 효과는 Al-20Pb 합금에서 더 지배적이지만, 일정한 마모속도에서 단순한 마모거리의 증가는 표면의 마찰열이 시료에 충분히 흡수될만한 시간을 가지게 되어 국부적인 온도구배의 형성이 이루어지지 않게 될 것이다. 결과적으로 마모거리의 함수로서 결정되는 마모기구는 Pb 입자의 급속한 용융과 이에 따른 윤활(smearing) 보다는 Pb의 자체 윤활특성과 기지의 경도라고 할 수 있다(그림 6b). 반면에 하중변화에 있

어서 이 두 합금의 비마모량은 거의 일정하였는데, 이것은 두 합금 모두 Pb 입자의 불균일한 분포에 의한 하중의 국부적 집중현상 때문이다. Al-16Pb 합금은 Pb의 균일한 분포로 인해 부가된 하중의 분산

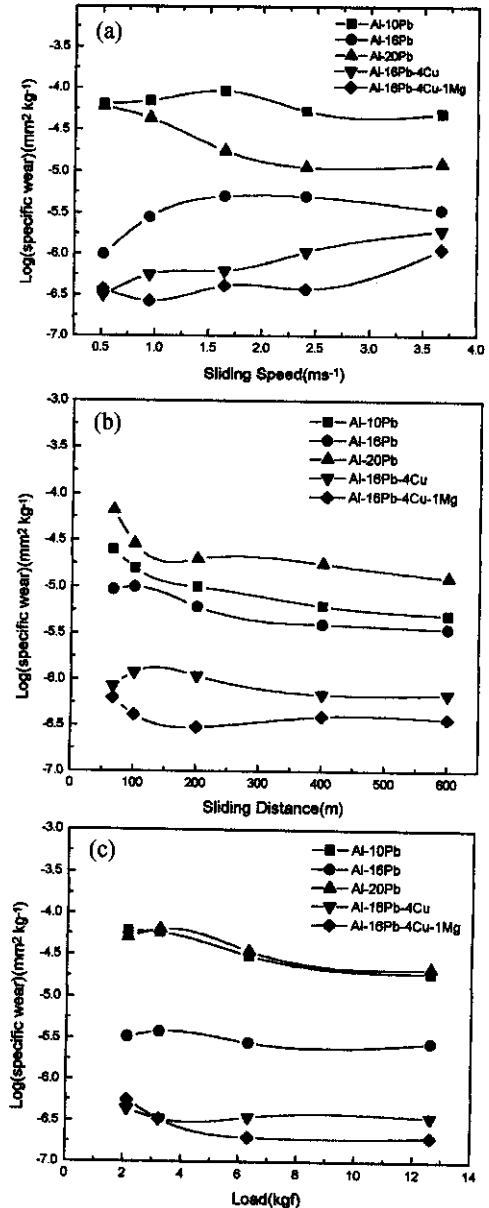


Fig. 6. Effect of (a) sliding speed, (b) sliding distance and (c) applied load on the specific wear of extruded Al-Pb-Cu alloys (sliding distance: 100 m, load: 2.1 kg, sliding speed: 2.41m/s, load: 2.1kg; and sliding speed: 1.65m/s, distance 400 m)

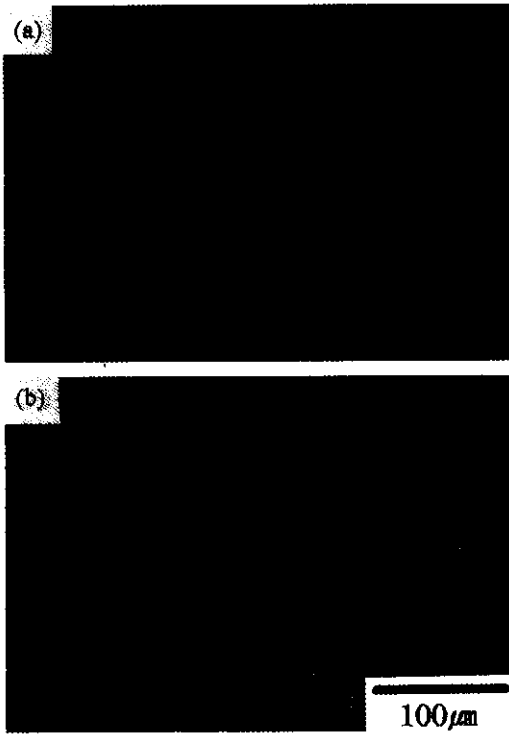


Fig. 7. SEM micrographs of worn surface of Al-Pb alloys (a) Al-10Pb and (b) Al-16Pb alloys.

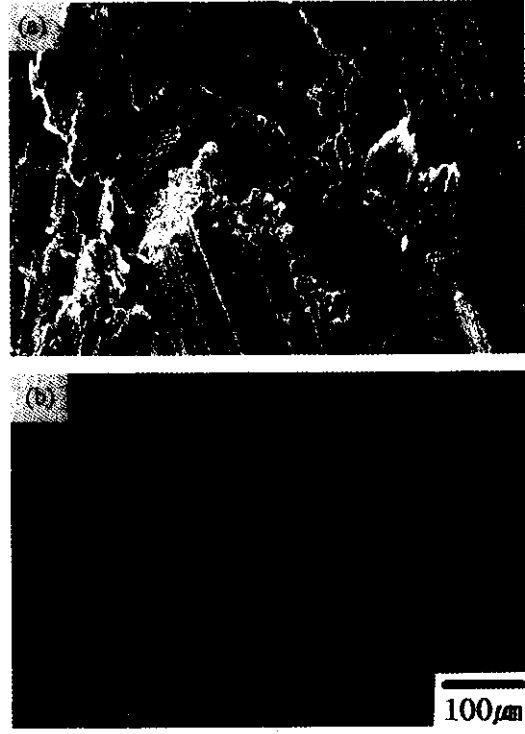


Fig. 8. Typical wear debris detached from test specimens due to abrasion (a) Al-20Pb and (b) Al-16Pb.

일시켜 우수한 마모특성을 가진 것으로 사료된다. 한편, Al-16Pb 합금에 Cu나 Cu-Mg같은 합금원소의 첨가는 그림 6 a-c)에서 보이는 것처럼 내마모특성을 향상시켰다. 이것은 석출상이 기지의 경도향상에 기여하였기 때문으로 사료된다.

그림 7 a-b)는 SEM에 의해 관찰된 2원계 Al-Pb 합금의 마모면을 나타낸 것이다. Al-10Pb 합금은 그림 7 a)에서 보는 것처럼 Pb가 부분적으로 윤향층이 형성되어 있다. 윤향층은 윤향초기에 발생하지만 열 에너지의 축적에 의해 기지가 약화되어 최종적으로 불균일한 윤향층을 형성한다. 그러나 Pb 입자가 미세하고 균일하게 분포하는 Al-16Pb 합금은 전면적에 걸쳐 균일한 윤향층을 보였다. 그림 8의 마모분(debris particles)은 이러한 마모기구를 뒷바침한다. Al-20Pb 합금은 그림 8 a)에서 처럼 모서리가 날카롭고 약 200 μm이상의 조대하며 편상을 갖는 반면 Al-16Pb 합금은 미세하고 비교적 일정한 크기를 갖는다. Al-20Pb 합금에서 나온 조대한 마모분은 약한 기지에서 발생한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

급속응고된 Al-XPb (X=10, 16 and 20)와 Al-16Pb-Y (Y=4Cu or 4Cu-1Mg)합금분말의 미세조직 거동과 마모특성에 대한 연구가 이루어졌다.

1. Al 기지에 Pb 입자의 균일한 분산은 모든 Al-Pb계 합금에서 나타났고 그중에서 Al-16Pb 합금은 0.5 μm의 크기를 갖는 미세하고 균일한 분포를 가졌다.

2. Cu 및 Cu-Mg 합금원소의 첨가는 2원계에서는 볼수 없었던 셀조직을 나타냈으며 Pb 입자분포에 약간의 편석을 가져왔다. Al-16Pb-4Cu와 Al-16Pb-4Cu-1Mg 합금의 미세조직에서는 비슷한 크기의 셀조직을 갖는 것으로 나타났다.

3. 2원계 Al-Pb 합금의 마모특성은 속도, 거리, 하중에 따라 평가되었다. 여기서 Al-16Pb 합금이 가장 우수한 마모특성을 얻었는데 이것은 Pb 입자가 미세하고 균일하게 기지에 분포하였기 때문에 일정한 두께의 윤향층을 형성하고 상대재로부터의 응력을 효

과적으로 분산시키기 때문에 사료된다.

4. Cu와 Cu-Mg를 첨가한 Al-16Pb계 합금은 경도 증가로 인해 마모특성이 더욱 향상되었으며 마모면은 건전한 윤활면을 보였으며 마모분은 다소 미세하고 균일한 크기를 보였다.

### 참고문헌

1. S.N.Tiwari, J.P.Pathak and S.L.Malhotra: Aluminium, **63** (1987) 411.
2. J.P.Pathak, S.N.Tiwari, S.L.Malhotra: Wear, **112**, (1986) 341.
3. S.N.Tiwari, J.P.Pathak and S.L.Malhotra: Mat. Sci. Tech., **1** (1985) 1040.
4. S.Mohan, V.Agarwala and S.Ray: Wear, **157** (1992) 9.
5. S.N.Tiwari, J.P.Pathak and S.L.Malhotra: Metals Tech., **10**, (1983) 413.
6. D.Nath, R.Bolla, S.Chandra: Powder Metall. Internat., **24**(2) (1992) 84.
7. J.P.Pathak, S.N.Tiwari, S.L.Malhotra: Metals Technol., **6** (1979) 442.
8. Th. Berrenberg, R. Mergen: Mater. Sci. Eng., **A173**, (1993) 413.
9. S.K.Srivastava, S.Mohan, V.Agarwala and R.C.Agarwala: Metall. Mater. Trans. A, **25A** (1994) 851.
10. S.N.Ojha, A.K.Tripathi and S.N.Singh: Powder Metall. Internat., **25**(2) (1993)
11. T.B.Massalski(ed.): Binary Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park, OH (1991).
12. J.P.Pathak, V.Singh and S.N.Tiwari: J. Mater. Sci. Lett., **12** (1993) 1450
13. J.P.Pathak, V.Singh and S.N.Tiwari: J. Mater. Sci. Lett., **11** (1992) 639.
14. S.Mohan, V.Agarwala and S.Ray: Wear, **140** (1990) 83.
15. C.S.Sivaramakrishnan, R.K.Mahanti and R.Kumar: Wear, **96** (1984) 121.
16. Y.Zhang, Y.Hao, Z.Liu and G.Chen: Mat. Sci. & Eng., **98** (1988) 119.
17. T.S.Kim, S.J.Hong, W.T.Kim, C.W.Won, S.S.Cho and B.S.Chun: Mat. Trans. JIM, **39**(12) (1998) 1214.
18. E.Gebhardt, M.Becker and S.Dorner: Aluminum, **31** (1955) 315-321.
19. 한봉회: 금속재료(개정판), 반도체출판사, 서울 (1997) 188.