

## 급속응고 Al-20Si-5Fe-xPb(x=2, 4, 6 wt.%) 합금의 미세조직과 마모거동

김택수 · 손현택 · 조성석 · 천병선  
충남대학교 급속응고 신소재연구소

### Microstructure and Wear Behaviour of Rapidly Solidified Al-20Si-5Fe-xPb(x=2, 4, 6 wt.%) Alloys

Taek-Soo Kim, Hyeon-Taek Son, Seong-Seock Cho and Byong-Sun Chun

Rapidly Solidified Materials Research Center,

Chungnam National University, Yuseong, Taejeon 305-764, Korea

(Received November 26, 1998)

**Abstract** The effect of Pb addition on microstructure and wear resistance was studied in rapidly solidified Al-20Si-5Fe-xPb (x=2, 4, 6 wt.%) alloys. The R/S Al-20Si-5Fe-xPb (x=2, 4, 6 wt.%) alloys showed a fine and homogeneous microstructure and an improved wear property compared with Al-20Si-5Fe alloy, while no significant change in UTS (Ultimate Tensile Strength) was shown. Contribution of the dispersoids on the wear property was discussed by showing the plastic deformation layers formed during wear track.

## 1. 서 론

급속응고법으로 제조한 과공정 Al-Si 합금은 미세하고 단단한 초정 Si이 Al 기지에 균일하게 분포되어 있어 내마모성의 향상을 위한 가장 우수한 합금으로 알려져 있다.<sup>1,3)</sup> 또한 Al-Si 합금중 Si은 강성을 및 열팽창계수를 낮추는 역할을 하므로, 일반적인 합금들이 사용중에 마찰열 등에 의해 야기되는 부피의 변화 등에 영향을 받지 않으므로, 자동차 엔진용 피스톤, 에어컨 컴프레서 등에 적용되고 있다.<sup>4)</sup> 그러나 급속응고법으로 제조한 과공정 Al-Si 2원계 합금이 우수한 특성을 나타내고 있다고 하더라도, 산업의 지속적인 발전은 더욱 가혹한 조건 또는 환경에서 응용할 수 있는 재료의 개발을 요구하고 있는 실정이어서, 새롭고 획기적인 공정 또는 합금설계가 필요한 상황이다. 본 합금조성에서 가혹한 조건이란 에어컨 컴프레서의 피스톤 또는 스와시 플레이트(swash plate)의 경우를 예로 든다면, 냉매의 압축을 효율적으로 실시하여 고효율이 나올 수 있도록 하는 것일 것이다. 그 결과, 마찰력은 더욱 증가하게 되고 그에 따른 열발생량이 증가하게 되어, 고온 내마모성 및 강성물의

확보가 요구되게 된다.<sup>5)</sup>

이와 같은 가혹한 조건에 적합한 합금개발은 급속응고법의 장점을 고려한다면, 새로운 합금설계를 시도하는 것이 바람직하며, 그 결과 고온에서 안정한 친이원소 Fe를 첨가하여 Al-20Si-xFe(x=3, 5, 7 wt.%)를 제조하고 인장 및 마모특성 등을 미세조직의 변화에 근거하여 검토한 결과 Fe의 첨가는 열적으로 안정한 약 3~5  $\mu\text{m}$ 의  $\delta$ - 및  $\beta$ -AlFeSi 금속간 화합물을 새로이 형성하고 균일하게 분산되어 기계적 성질의 향상을 유도할 수 있었다.<sup>2,6)</sup> 그럼에도 불구하고 고특성을 나타내는 안정한 Al-Si-Fe 합금계에 유효성이 우수한 새로운 원소를 첨가하여 내마모성을 관찰하고 미세조직 및 인장강도 등 다른 특성에 어떠한 영향을 미치는지 검토하는 것도 또한 흥미로운 일일 것이다.

본 연구에서는 전단응력의 함수인 내마모특성을 고려하여, 전단응력이 낮아 전식 윤활마모재로 활용되는 Pb<sup>7)</sup>를 동 합금계에서 기계적 특성이 가장 우수했던 Al-20Si-5Fe 합금에 첨가하여 급속응고 합금분말을 제조하였고 압출을 실시하여 여러 가지 제특성을 관찰하여, Pb의 첨가가 미세조직 및 마모특성에

어떠한 영향을 미치는지 조사하였다.

## 2. 실험방법

각각의 상업용 금속을 이용하여 Al-20 wt.%Si-5Fe-xPb (x=2, 4, 6 wt.%) 모합금을 흑연 도가니가 장착된 고주파유도로에서 제조하였으며, 이 모합금은 조성을 확인한 후에 액상선 온도보다 약 200K 이상으로 재용융되어 3 mm의 용탕 공급노즐(melt delivery nozzle)이 부착되어 모합금 용해 온도로 유지되고 있는 예열 텀디시에 부어졌다. 텀디시에서 일정 시간 안정화된 용탕은 용탕 공급노즐을 통과하여 중력과 냉매가스의 흡인압력에 의해 챔버로 이동되는 도중 주위에 설치된 가스공급노즐에서 분사된 약 0.8 MPa의 N<sub>2</sub> 가스에 의해 파쇄 및 응고 되었으며, 이때의 급속응고 분말은 챔버에 설치된 사이클론에 포집되어 기계적 분급법을 이용하여 입도별 분급이 이루어졌다. 분말제조시 측정된 용탕 및 가스 공급속도는 각각 1.2 kg/min 및 0.8 kg/min이었다.

급속응고 Al-20 wt.%Si-5Fe-xPb(x=2, 4, 6 wt.%) 합금분말은 기계적 분급법(mechanical sieving)으로 분급되어 생산되는 분말의 입도분포를 확인한 후 124 μm 이하의 분말을 선별하여 열간압출을 실시하였다. 열간압출을 위해 6063 Al 캔 및 100톤 프레스를 이용하여 약 70%의 이론밀도를 가진 예비성형체를 제조한 후, 약 673K에서 1시간 동안 탈가스 처리를 한 후 밀봉하였다. 압출은 탈가스와 동일한 조건으로 예열한 후 550톤 규모의 압출기로 25:1의 압출비로 열간압출 하였다.

합금분말 및 압출재의 미세조직은 Keller 시약으로 부식하여 광학현미경(optical microscope; Nikon)을 이용하여 관찰하였고, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM; Akashi WB-6)에 의해 분말의 입형과 인장시험 후의 파단면 분석이 이루어졌다. 분말 및 압출재에 존재하는 결정구조는 EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy) 및 XRD(X-ray diffractometry)를 이용하여 분석되었으며, T6 처리 압출재를 KS 규격의 B 0801 14호 비례시험편 크기로 가공하여 인장시험기(Shimadzu Dss 10t)로 상온 및 473, 573K에서 시험하였다. 한편 상대재로서 SM45C 휠이 장착되어 있는 Ohgoshi 형 시험기를 이용하여 주행거리 100 m를 고정시킨 후 주행속도와

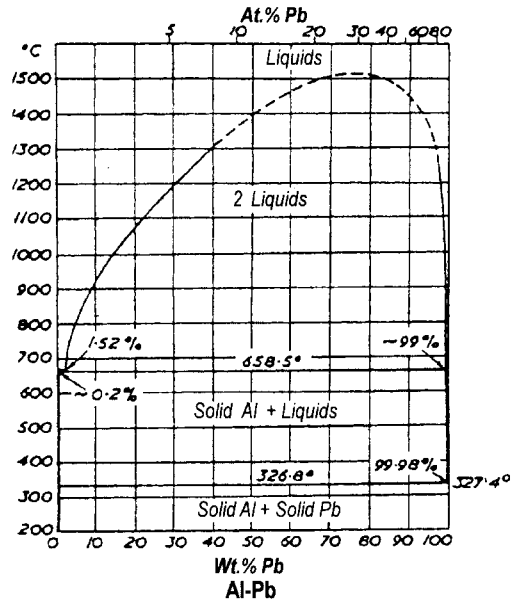


Fig. 1. The equilibrium phase diagram of Al-Pb alloy.

하중을 변화시켜 비마모시험을 실시하였다.

## 3. 결 과

그림 1은 Al-Pb 이원계 합금 상태도로서, 단일 액상, 2원 액상, 고상 Al+액상, 고상 Al+고상 Pb의 구역으로 구분됨을 알 수 있다.<sup>8)</sup> 특이한 것은 2원 액상구간(immiscibility gap)이 약 1.5%Pb, 931.5K의 편정점으로 부터 99.85%Pb 조성 범위에서 존재하기 때문에 액상일지라도 비중차이에 의한 Al과 Pb 각각의 층이 나타나게 된다는 점이다. 또한, Pb는 Al에 매우 낮은 고용도, 즉 편정온도에서 약 0.15-0.20%Pb를 나타내기 때문에, Pb의 양이 증가할수록 매우 높은 온도에서 용체를 형성한 후 응고시 비중차이(Al: 2.7, Pb: 11.3)에 의한 편석화가 이루어지게 된다. 이와 같은 편석화는 단일 액상 온도에서 급속응고법을 이용하여 합금을 제조하거나 2원 액상 온도에서 교반법등을 이용하여 적절히 혼합이 된 후에 급속응고법으로 제조하는 방법을 통해서 방지할 수 있게 된다. 그림 2는 Al-20Si-5Fe-xPb(x=2, 6 wt.%) 합금분말의 미세조직으로서 공정조성인 그림 3의 XRD 분석을 함께 고려할 때 12%이상의 Si이 첨가되는 과공정 Al-Si-Fe 합금의 대표적인 조직인 구형의 초정 Si 및 비평

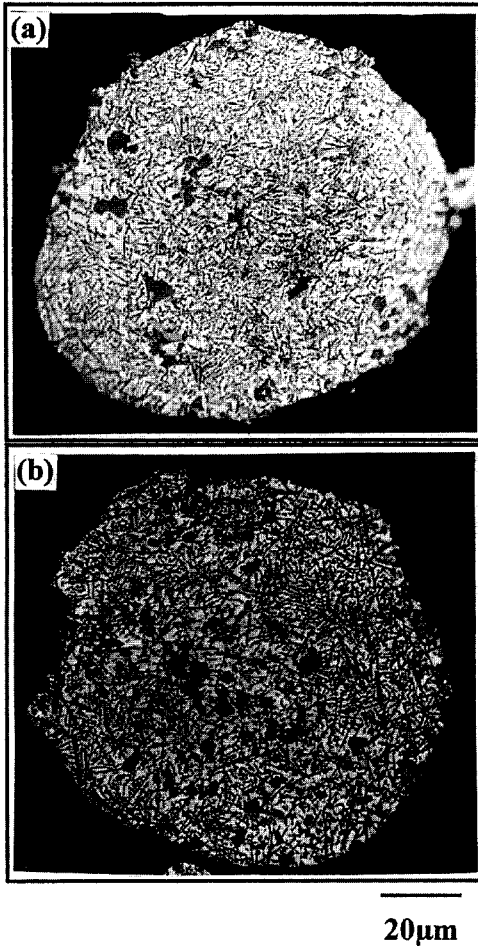


Fig. 2. Optical micrographs of rapidly solidified Al-20Si-5Fe-xPb alloy powders. (a) x=2 (b) x=6.

형상으로 존재하는 침상형의  $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$ 가 생성되어 치밀하게 분포됨을 알 수 있다. 이 조직에서 약 3~5  $\mu\text{m}$ 의 초정 Si과 침상형의  $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$  금속간화합물을 제외한 흰부분은 Al 기지이며, 회색의 점들이 연결되어 있는 것처럼 나타나는 조직은 공정 Si이다.<sup>9)</sup> 그러나 Pb의 첨가량에 따른 미세조직의 변화는 관찰할 수 없었다. 이는 Fe가 Al-Si과 합금화될 때 Fe 1원자당 Al 4원자 및 Si 2원자와 반응하여  $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$ 를 금속간화합물을 형성하는 것과는 달리 Pb는 Fe를 포함한 Al-Si 합금과 전혀 반응하지 못하고 Pb 자체로 응고되기 때문으로 생각된다. 그러나 Pb가 조직내에 분포되었다는 사실은 그림 3의 XRD 곡선으로 확인할 수 있으며, 확연한 그 양의 차이를 구별할 수는 없

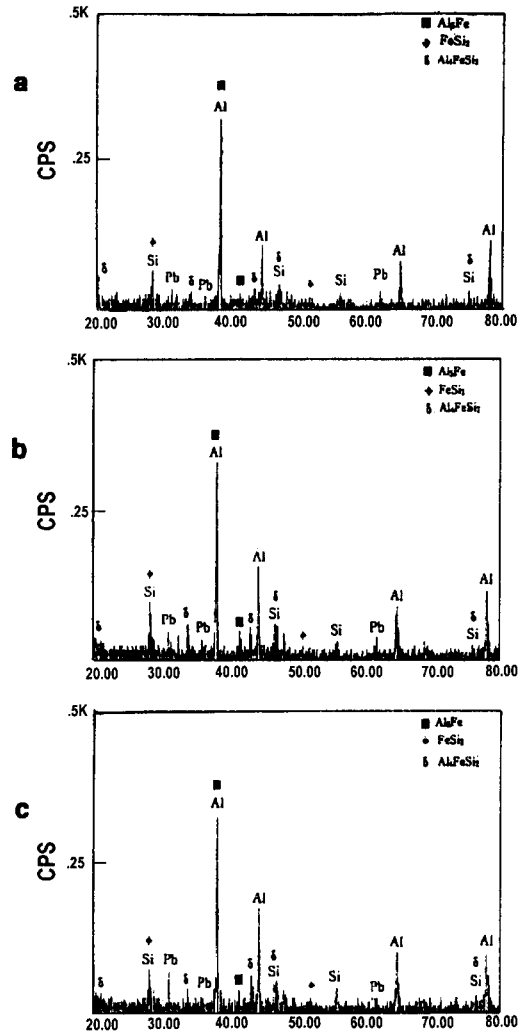


Fig. 3. XRD traces of rapidly solidified Al-20Si-5Fe-xPb alloy powders. (a) x=2 (b) x=4 (c) x=6.

지만 6%Pb의 경우가 곡선의 피크가 더 큼을 알 수 있다. Tewari는 멜트 스피닝법으로 제조한 Al-3 wt.% Pb에 대한 연구를 수행하여, 광학현미경으로는 관찰할 수 없는 0.01~0.25  $\mu\text{m}$  크기의 Pb 입자들이 구상으로 형성되기보다는 각면구조로 이루어져 있음을 투과전자 현미경으로 관찰하여 보고하였다.<sup>10)</sup> 이때, Pb 입자의 형성은 급속응고시  $\alpha$  영역의 확장으로 인해 Al 결정이 우선적으로 핵생성된 다음 그 입계부근에 존재하는 Pb rich 액상과 함께 성장하게 된다. 각면형상의 Pb 입자는 고-액상의 표면에너지 차이에 기인하는데, 즉 Al 고상에 둘러싸이는 Pb rich 액상

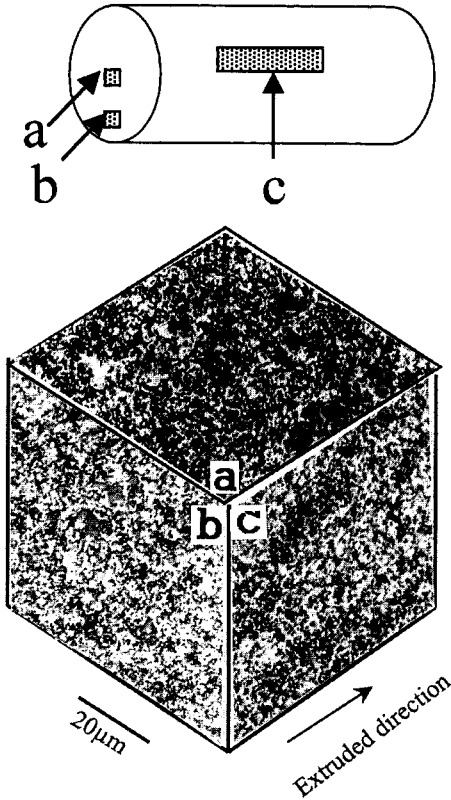


Fig. 4. Optical micrographs of rapidly solidified Al-20Si-5Fe-2Pb alloy bar.

은 가장 늦게 성장하는 Al 최조밀 원자면인 {111}면에 의해 그 형상이 결정되는 것이라 생각된다.

그림 4는 열간 압출한 Al-20Si-5Fe-2Pb 합금 분말 압출재를 단면 중심부(a), 단면 외곽부(b) 및 압출방향부(c)에서의 각각의 미세조직을 나타낸 것이다. 400°C에서 25:1의 압출비로 심한 소성변형을 일으켜 분말간의 결합이 완료되었다 하더라도, 급속응고 분말조직에서 비교적 구형으로 형성되었던 초정 Si의 크기 변화는 관찰되지 않았지만, 침상형의 금속간화합물  $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$ 는 안정상인  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 로 변태됨과 동시에 압출방향으로 배열되어 단면(a와 b)에서는 공정 Si와 유사하게 점의 형태로 관찰되고, 압출방향(c)에서의 관찰에서는 2~3  $\mu\text{m}$ 의 크기로 분쇄되어 배열되어 있음을 알 수 있다. 또한 공정 Si도 열간가공 과정을 통하여 분말에서의 선명한 점조직의 연결에서 점의 경계부가 불규칙하게 이루어진 성장을 보여주고 있다. 이것으로 보아 본 합금에 존재하는 두 종

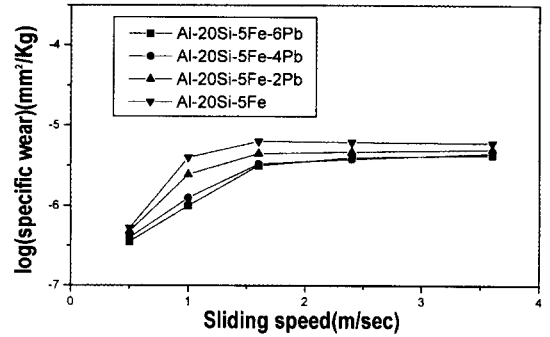


Fig. 5. Relation between abrasion speed and specific wear of Al-20Si-5Fe-xPb(x=0, 2, 4, 6 wt.%) alloy bars (load : 12.6 kg).

류의 Si중 열적으로 안정한 초정 Si이 가혹 조건에서 재료의 특성을 결정하는 주요 상이라 판단된다.

그림 5는 열간압출한 Al-20Si-5Fe-Pb 합금을 Pb의 변화량에 따라 마모속도의 함수로 관찰한 비마모 특성이다. 이 합금계에서 내마모특성을 관찰할 경우에는 열적으로 안정하고 부피분율이 높은 초정 Si과  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  금속간화합물의 역할을 고려하여야 하며, 또한 윤활제로서 첨가된 Pb가 내마모성이 일반적으로 우수하다고 알려진 Al-Si 합금에 어떻게 기여를 하고 있는지, 경합금으로 이용되어지는 Al-Si 합금에 중합금 원소를 얼마만큼 첨가하여야 그 특성을 유지하며 마모특성을 향상시킬 수 있는지 등을 종합적으로 관찰하여야 한다. 그림에서 비마모 특성(specific wear)은 상대재가 회전하면서 시료의 마모도를 결정하는 오고시 타입의 마모시험기에서  $W_s = B \cdot b^3 / 8rPL$ 이라는 관계식을 이용하여 결정할 수 있다.<sup>2)</sup> 여기서,  $W_s$ 는 비마모량, B는 시료와 접촉하여 회전하는 상대재의 두께, b는 회전방향으로 마모된 부분의 길이, r은 회전 상대재의 반경, P는 인가하중, L은 활주길이이다. 전반적으로 Pb가 첨가된 합금이 그렇지 않은 기지재 Al-20Si-5Fe 분말 압출재에 비교하여 내마모 특성이 우수하게 나타나고 있다. Pb 량의 차이에 따른 마모특성은 Pb가 증가함에 따라 향상되는 경향을 알 수 있다. 마모기구를 설명하기 위해서 그림 6에 급속응고 Al-Pb 합금 및 Al-Si-Fe-Pb 합금의 이상적인 마모거동을 간략히 나타내었다. Al-Pb 2원 합금에서는 Al 기지상에 분포되어 있는 Pb가 Al에 비해 전단응력이 매우 작으므로 그림 6(a)과 같은 반응을 통하여 Al 표면위에 도포되는 윤활마모 양상을 보여준다.<sup>7)</sup>

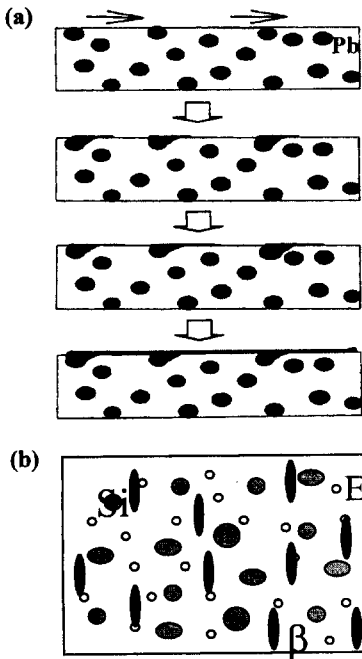


Fig. 6. Schematic of ideal wear mechanism of rapidly solidified (a) Al-Pb and (b) Al-Si-Fe-Pb alloys (Pb: lead, Si: primary silicon, E: eutectic silicon,  $\beta$ : Al<sub>3</sub>FeSi intermetallics).

그러나 Al-20Si-5Fe는 그림 6 (b)와 같이 단단하고 열적으로 안정한 초정 Si 및  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi 금속간화합물이 연한 Al 기지를 서로 연결해주는 일종의 징검다리 역할을 하게 된다. 즉, 마모 상대재가 매우 치밀하게 분포된 이 입자들과 우선적으로 마모반응을 일으켜 상대적으로 Al 기지는 상대재에 의한 직접적인 마모보다는 Si 및  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi 화합물과의 마모에 의한 열의 인가를 경험하게 될 것이다. 그러나 위 두가지 마모 형태, 즉 윤활마모 및 징검다리 마모가 결합된 본 합금계 즉, Al-20Si-5Fe-xPb는 각각의 반응만을 나타내는 각각의 두 합금계 즉, Al-20Si-5Fe 및 Al-xPb 보다 우수한 내마모 특성을 예상할 수 있다. 이와 같은 결과는 그림 8과 Kim<sup>7)</sup>의 연구를 통해 알 수 있다.

그림 7은 Al-20Si-5Fe-xPb(x=0, 2, 4, 6 wt.%) 합금 분말 압출재를 마모시험 후 그 변형층을 측면으로부터 관찰하여 조직의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 마모기구에는 연삭(abrasion), 용착(adhesive), 산화(oxidative), 피로(fatigue)마모 등의 여러 가지 인자들로 구분하고 있지만, 마모기구는 복합적으로 작용하므로 각각의 마모기구를 정확히 규명하는데는 많

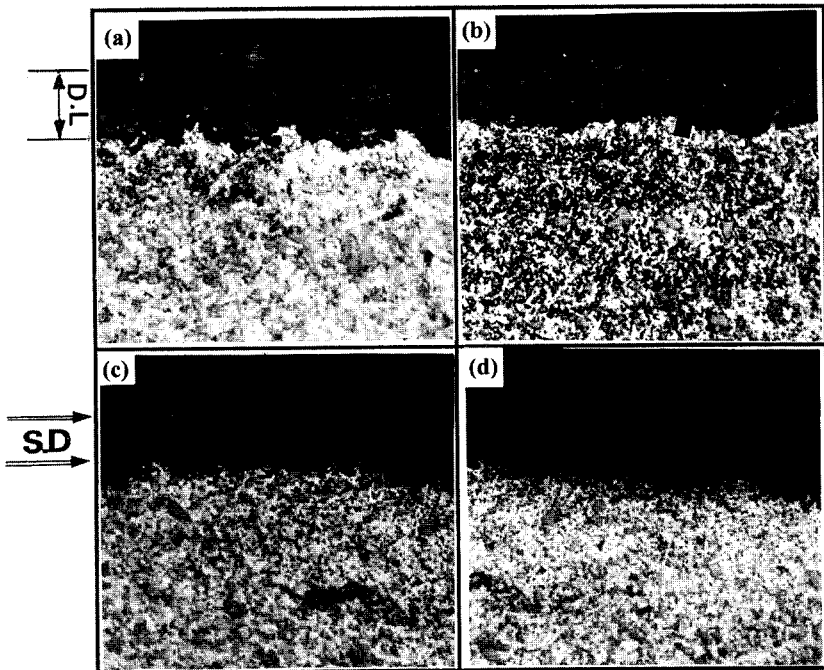


Fig. 7. Optical micrographs of wear tested Al-20Si-5Fe-xPb (x=0, 2, 4, 6) alloys bars in transverse sections. (final load: 2.1 kg, sliding speed: 3.62 m/s, sliding distance: 100 m, D.L.: deformed layer, S.D.: sliding direction); (a) Al-20Si-5Fe, (b) Al-20Si-5Fe-2Pb, (c) Al-20Si-5Fe-4Pb and (d) Al-20Si-5Fe-6Pb.

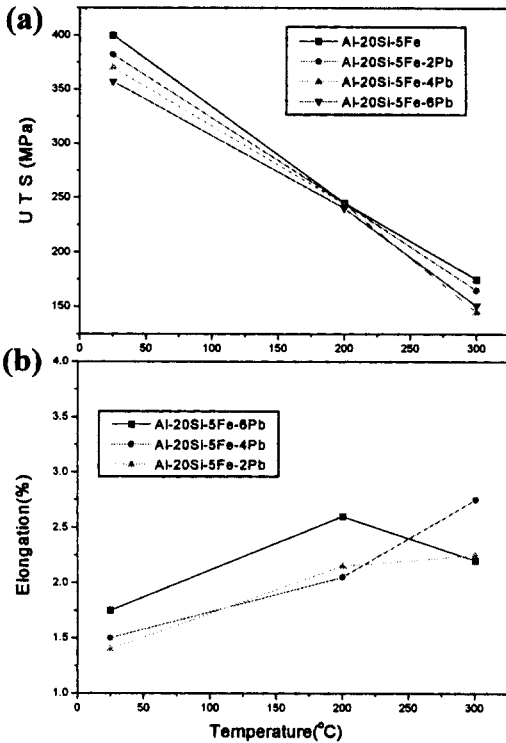


Fig. 8. (a) Ultimate tensile strength and (b) elongation of Al-20Si-5Fe-xPb alloy bars with temperature.

은 어려움이 따른다. 그러나 철계 합금에서 일반적으로 관찰하는 산화마모는 Al에서는 거의 일어나지 않을 것이다.<sup>11)</sup> 왜냐하면 Al에 형성하는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화막은 매우 안정하고 강하기 때문에 일단 한번 형성하면 마모에 의한 다음 단계의 산화가 거의 일어나지 않기 때문이다. 또한 산화막의 두께는 거의 2 μm 이하이므로 약 100 μm의 직경을 가지고 있는 분말의 부피를 고려한다면, 약 1 μm의 마모 데브리스가 형성된다고 하더라도 그 것의 부피는 전체 분말의 약 1%에 지나지 않으므로 마모에 큰 영향을 미치지 않을 것이다. 그러나 그림 7에서 보듯이 마모시험이 일단 진행되면 소성변형층이 형성되어 그 소성마모 거동을 고려하는 것이 매우 중요하다. 그림 7(a-b)에서 모든 합금에서 일정한 활주속도, 하중, 거리의 마모트래에 의해서 소성변형층과 변형되지 않은 기지로 구분됨을 알 수 있다. 그러나 Pb가 첨가되지 않은 경우(그림 7a)에는 변형층의 깊이가 불규칙적이고 형성된 균열의 크기도 굵고 서로 연결되어 있어 마모특성의 저

하를 예상할 수 있다. 그러나 Pb의 양이 증가될수록 (b → c) 균열은 아직 연결되지 않고 여러 개의 미세 크랙이 동시에 나타나 있다. (c, d)에서는 (b)의 경우보다 형성된 균열의 양은 작지만 서로 유사하여 그림 5에서의 유사한 마모특성과 연관지을 수 있다고 생각된다. 또한 일정한 마모조건에서 마모가 계속 진행된다면 소성변형량은 증가되어 그림 7에서 형성된 균열들의 양이 마모데브리스를 형성할 정도로 충분하게 되어 균열로 둘러 쌓인 부분이 파편으로 잘려나가게 될 것이다. 계속적인 마모운동은 잘려나간 파편을 통하여 피로마모를 경험하게 될 것이다.

그림 8은 Pb의 첨가량에 따른 최대 인장강도 및 연신률의 변화를 보여주며 Al-20Si-5Fe 기지 금속과 비교할 때 커다란 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 인장강도가 저하되지 않는다는 점은 Pb의 향상된 내마모특성을 고려할 때 적절한 내마모 재료라 생각된다.

#### 4. 결 론

급속응고법으로 제조한 Al-20Si-5Fe 기지합금에 첨가된 2, 4, 6 wt.%Pb는 기지합금보다 우수한 내마모 특성을 나타내었으며, 인장강도 및 연신률에는 변화가 없었다. 마모특성의 향상은 Al-20Si-5Fe 합금에 형성된 안정하고 경한 초정 Si 및 β-Al<sub>3</sub>FeSi 금속간화합물의 징검다리 마모 효과와, Pb에 의한 윤활효과로 설명될 수 있으며, 이와 같은 적절한 결합은 급속응고법으로 제조시 가능하였다. 또한 Pb 첨가량의 증가에 따라 마모시 발생하는 소성변형층은 균일해지며, 표면층으로부터 일정한 깊이에 형성되는 균열의 양 및 크기도 미세하여, 이러한 균열의 성장 및 결합에 의한 파편의 형성이 억제됨을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Z. Zhou, J. Duszczkyk and B. M. Korevaar: *J. Mater. Sci.*, **26** (1991) 824.
2. T. S. Kim, S. J. Hong, W. T. Kim and B. S. Chun: *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **1** (1994) 66.
3. J. L. Estrada and J. Duszczkyk: *J. Mater. Sci.*, **25** (1990) 886.
4. T. Hayashi, T. Kaji, Y. Takeda, Y. Odani and K. Akechi: *Sumitomo Electric Technical Review*, **34** (1992) 1.
5. N. Amano, Y. Odani, Y. Takeda and K. Akechi: MPR,

- (1983) 186.
6. T. S. Kim, S. J. Hong, W. T. Kim and B. S. Chun: *Mat. Sci. Eng.*, **A226** (1997) 878.
  7. H. M. Kim: Thesis of Master Degree, Chungnam Natl. Univ., (1996).
  8. L. F. Mondolfo: *Al Alloys: Structure and Properties*, Butterworth & Co. Ltd., Boston, USA (1984) 352.
  9. T. S. Kim, S. J. Hong, W. T. Kim, C. W. Won, S. S. Cho and B. S. Chun: *Mat. Trans. JIM*, **12** (1998).
  10. S. N. Tewarry: *J. Mat. Sci. Lett.*, **8** (1989) 1098.
  11. R. Antoniou and C. Sunramanian: *Scripta Met.*, **22** (1988) 809.