

## Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Sn 첨가의 영향

김경현 · 김정대\* · 김인배\*†

한국기계연구원  
\*부산대학교 재료공학부

### Effect of Sn Addition on the Fatigue Properties of Al-Cu-Mn Cast Alloy

Kyung-Hyun Kim, Jung-Dae Kim\* and In-Bae Kim\*†

Dept. of Material Eng., Korea Institute of Machinery & Materials, Changuwon 641-010

\*School of Material Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735

(2001년 11월 19일 받음, 2002년 3월 22일 최종수정본 받음)

**Abstract** Effect of Sn addition on the fatigue properties of Al-Cu-Mn cast alloy was investigated by low and high cycle fatigue tests. Fatigue life showed the maximum value of 5450cycles in the Al-Cu-Mn alloy containing 0.10%Sn, but decreased rapidly beyond 0.20% of Sn additions. It was found that the fatigue strength was 132MPa and fatigue ratio was 0.31 in the alloy containing 0.10%Sn. Metallographic observation revealed that the fatigue crack initiated at the surface and propagated along the grain boundary. This propagation path was attributed to the presence of PFZ along the grain boundary. The tensile strength increased from 330MPa in the Sn-free Al-Cu-Mn cast alloy to 429MPa in the alloy containing 0.10%Sn. But above 0.20%Sn additions, tensile strength was decreased by the segregation of Sn.

**Key words:** Al-Cu-Mn cast alloy, effect of Sn addition, fatigue life, fatigue strength, fatigue ratio, tensile strength

### 1. 서 론

알루미늄 합금은 대표적인 경량소재로서 비강도가 우수하여 항공기나 수송용기기의 부품으로 널리 사용되는데 특히 항공기 및 수송용기기의 경우 피로하중을 받는 부품이 많다.<sup>1)</sup> 알루미늄 합금을 주조 방법으로 제조할 경우 단조방법에 의한 제품보다 생산단가가 훨씬 낮은 뿐만 아니라 복잡한 형상의 부품제조가 가능하다. 그러나 주조품은 가공품에 비해 기계적 성질이 떨어지므로 여러 가지 열처리 조작이나 합금원소를 첨가하여 주조품의 기계적 성질을 향상시키려는 많은 연구가 행해지고 있으며 그 결과 미국에서 A201 합금 (Al-4.7Cu-0.5Mn-0.5Ag-0.2Ti) 이라는 주조용 고강도 알루미늄을 개발하여 사용하고 있는데<sup>2)</sup>, 이 합금은 성분 중에 고가의 Ag가 첨가되어 있어 생산단가가 높은 단점이 있어 사용범위가 제한적이다. 이와 같이 고가인 A201 합금을 대체하기 위한 저가의 고강도 Al 합금을 개발하기 위해서는 Ag 대체 성분원소의 개발이 선행되어야 할 것이다. 이에 따라 본 연구의 저자 등은 A201 합금 가격의 절반정도로 저렴한 Al-Cu-Mn의 합금 조성에 강도와 연성 향상에 효과적인 Cd, Sn, Ti, Zr을 첨가한 새로운 합금계를 설계하였으며 그 강도특성을 조사 보고하였다.<sup>3)</sup> 그리고 이러한 고강도 Al 합금이 항공기나 특수방산용으로 사용될 경우에는 가혹한 환경에서 견딜수 있는 SCC 저항성이

나 피로특성과 같은 내구성에 관한 데이터의 제시가 필수적이다. 이와 같은 요구에 따라 Al-Cu-Mn계 주조 합금의 SCC 특성 및 피로특성에 미치는 Cd 첨가의 영향을 조사하여 이미 보고하였고<sup>4-5)</sup> 본 연구에서는 Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Sn 첨가의 영향을 조사함으로써 주조용 고강도 알루미늄 합금 개발을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였으며 아울러 이미 보고한<sup>5)</sup> Cd 첨가의 영향에 관한 조사 결과와도 비교 검토하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시료의 화학 조성은 Table 1과 같다. Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Sn 첨가의 영향을 조사하기 위하여 전기로에서 순수 Al을 용해한 후 Al-Cu, Al-Mn, Al-Ti, Al-Zr 및 Al-Sn 모합금을 첨가하여 Sn의 양을 0.10, 0.20, 0.40%로 변화시킨 합금을 제조하였다. 용탕을 약 15분 동안 Ar 가스취입처리를 하여 개재물 제어와 탈가스처리를 하였으며, 약 300°C 정도로 예열된 주형에 용탕을 주입하였고, 주입시 용탕의 온도는 약 300°C 이었다. 주조한 각각의 시편은 543°C에서 13시간 용체화 처리한 후 170°C에서 인공시효하였다.

인장시험은 cross head speed 5mm/min으로 상온의 공기 중에서 수행하였으며 강도값은 3회 반복시험 후 평균하여 구하였다. 저주기 피로시험과 고주기 피로시험은 길이

† E-mail: pnuibkim@hanmail.net

Table 1. Chemical composition of Al-Cu-Mn cast alloys (wt%)

alloy	Al	Cu	Mn	Ti	Zr	Sn
Sn-free	Bal.	4.8	0.5	0.3	0.03	-
0.10%Sn	"	"	"	"	"	0.10
0.20%Sn	"	"	"	"	"	0.20
0.40%Sn	"	"	"	"	"	0.40

30mm, 직경10mm의 봉상 시험편을 사용하여 10 ton 용량의 Instron 8516 유압식 시험기로 실시하였다. 피로시험에서 표면 조건의 영향을 최소화하기 위하여 시험편의 표면을 응력축에 평행한 방향으로 최종 1μm까지 연마하였다. 저주기 피로시험 조건은 총 변형진폭을 0.35%~0.6%까지 제어하는 완전역전 응력조건 (R=-1) 으로 실시하였다. 피로수명은 최대응력의 50%가 감소되는 사이클로 정의하였으며, 고주기 피로시험은 진동수 20Hz로 시험하였으며, 피로강도는 10<sup>7</sup>사이클에서의 응력진폭으로 정의하였다. 피로시험시 발생한 균열의 전파경로를 관찰하기 위하여 시험편의 완전파단이 일어나기 전에 하중을 제거하여 축방향으로 재료를 절단한 후 Keller 시약으로 부식시켜 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 인장특성

Fig. 1은 최대 경도값을 나타내는 조건으로 시효처리 하였을 때 Sn첨가량에 따른 상온 인장강도의 변화를 나타낸 것으로서, Sn을 첨가하지 않은 합금은 인장강도 값이 330MPa이었으나, 0.10%Sn이 첨가되었을 때 429MPa로 최대가 되었고 연신율은 8.7%이었다. 0.20% 이상 첨가할 경우에는 0.10% 첨가한 경우 보다 오히려 인장강도 값이 감소되었으며 연신율도 5.2%이하로 감소되었다. Sn 첨가에 의해 인장강도 값이 증가되는 것은 본 연구의 저자 등이 이미 보고한 바와 같이 Sn이 Al-Cu계 합금의 주 강화상인 θ'의 석출 site의 역할을 함으로써 θ'의 석출이 촉진되었기 때문이다.<sup>3, 6, 7)</sup> 그리고 Sn 첨가량이 0.20% 이상에서는

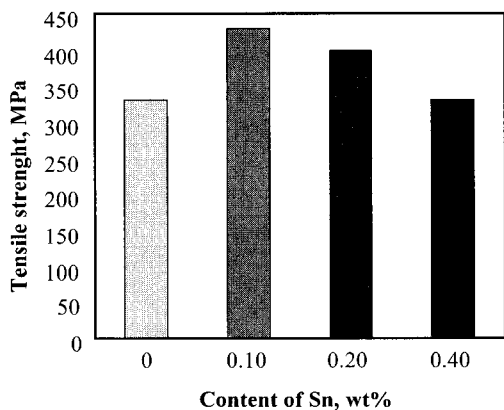


Fig. 1. Tensile strength as a function of Sn content for peak aged Al-Cu-Mn cast alloys

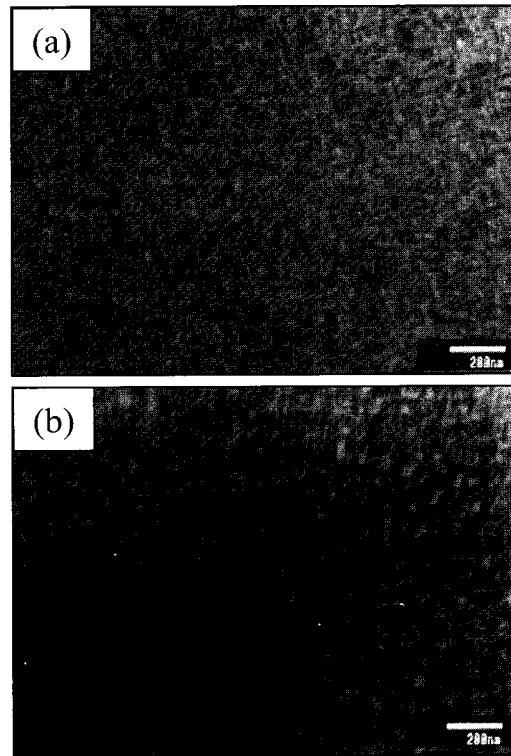


Fig. 2. TEM micrographs of Al-Cu-Mn cast alloy show θ' precipitates a) 0.10%Sn contained, b) 0.20%Sn contained

0.10% 첨가할 경우보다 인장강도가 감소되었는데, 이것은 Sn이 0.20% 이상 첨가되면 Sn의 편석이 일어나 θ'의 석출 site 역할을 하는 Sn의 양이 감소하기 때문이라고 생각한다.<sup>8, 9)</sup> 이와 같이 θ'의 석출 site 역할을 하는 Sn의 양이 감소될 경우에는 생성된 θ' 핵의 숫자가 감소될 것이고 그에 따라 같은 시효조건에서는 θ'의 크기가 상대적으로 커질 것이다.

Fig. 2는 같은 시효조건에서 Sn의 양의 변화에 따른 θ'상의 TEM조직으로서 Sn 첨가량이 0.20%일 경우 (b)가 0.10%인 경우 (a)보다 조대한 θ'상이 석출되었음을 볼수 있는데 이러한 결과는 0.20%의 경우가 0.10%의 경우보다 생성된 θ' 핵의 숫자가 적었음을 의미한다. 따라서 0.20% Sn 이상에서 인장강도가 감소하는 것은 Sn의 편석에 의하여 θ'의 석출 site 역할을 하는 Sn의 양이 감소되었기 때문이라고 판단된다.

Al-Cu-Mn 주조합금의 인장강도에 미치는 Sn첨가의 영향과 Cd첨가의 영향을 비교해 보면, 0.10%Sn첨가시 인장강도는 429MPa로서 0.15%Cd첨가시의 401MPa보다 상당히 높은 값을 나타내었다. Cd보다 적은 양의 Sn이 첨가되었음에도 불구하고 높은 인장강도값을 나타내는 것으로 보아 Sn첨가의 영향이 Cd 보다 훨씬 크다는 것을 알수 있는데, 그 이유는 Sn원자의 크기(0.158nm)가 Cd 원자크기(0.148nm) 보다 크기 때문에 Sn의 경우가 더 큰 strain field를 형성함으로써 θ'상의 석출 site 역할을 상대적으로 잘 할 수 있었기 때문이라고 생각된다.

0.10%Sn이 첨가된 Al-Cu-Mn 주조합금은 본 연구 합

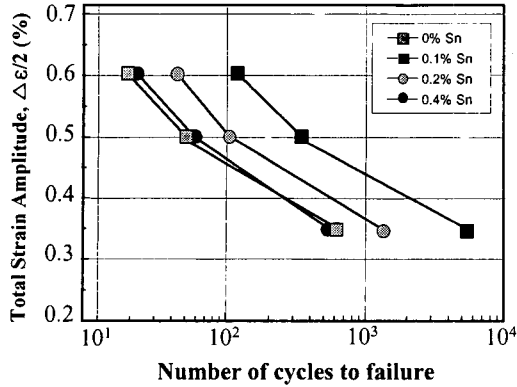


Fig. 3. Fatigue life as a function of total strain amplitude and Sn content for Al-Cu-Mn cast alloys ; Sn content as indicated

금과 동일한 석출물인  $CuAl_2$ 가 시효 석출됨으로써 강화되는 단조용 2024-T3합금의 인장강도값 469MPa과 비교하였을 때는 상대적으로 낮은 값을 나타내었으나 주조용 A201합금의 인장강도값 420MPa과 비슷하거나 높은 값을 나타내었다.

3.2. 저주기 피로특성

Sn첨가량에 따른 저주기 피로수명의 변화를 알아보기 위하여, 총변형진폭 ( $\Delta\epsilon/2$ )을 0.6%, 0.5%, 0.35% 세 조건으로 조사한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있는 것은 첫째 Sn첨가량에 관계없이 총변형 진폭이 작을수록 피로수명이 증가되는 일반적인 경향을 나타낸다는 것이고, 둘째 Sn이 첨가되지 않은 경우 피로수명은 690사이클이었는데 Sn이 첨가됨으로서 피로수명이 증가된다는 것을 알 수 있고, 셋째 인장강도의 경우와 같이 Sn첨가량이 0.10%일 때 피로수명이 최대이었고 (5450사이클) 0.20% 이상 첨가 시에는 피로수명이 급격히 감소된다는 것이다. 재료의 피로수명은 피로균열의 발생과 피로균열의 전파속도에 의하여 지배되는데 피로균열의 발생은 재료의 강도특성에 크게 영향을 받으며 피로균열의 전파속도는 본 연구합금의 경우 피로균열의 전파가 일어나는 결정립계부의 조직 특히 무석출대 (Precipitate Free Zone; PFZ)의 영향을 크게 받을 것으로 사료된다.

고강도 석출경화형 Al합금은 시효과정에서 입계에 PFZ가 잘 형성되는데, 이러한 PFZ는 시효처리에 의해 입계에 안정상이 석출될 경우 안정상 주위 즉 입계부위에 용질원자가 고갈되고 그에 따라 입계부근의 미세 석출상의 소멸과 확산에 의해서 입계에 존재하는 안정 석출상이 Ostwald 성장을 함으로써 입계에 PFZ가 형성된다.<sup>10,11)</sup> 본 연구합금의 경우에도 입계에 PFZ가 형성되었으며 이러한 입계 PFZ가 입계균열전파 경로가 된 것으로 확인되었다. (Fig. 9 (a))

피로수명이 0.10%Sn에서 최대가 되고 (5450사이클), 0.20%Sn이상에서 감소하는 것은 Fig. 1의 인장강도 변화에서 알아 본 바와 같이 0.20% 이상의 Sn이 첨가되면 Sn의 편석에 의해 강도가 감소되어 피로균열의 발생이 0.10%의 경우보다 용이해진다는 것이 하나의 이유가 될 수 있을 것이고, 결정립계 부의 PFZ폭의 영향 즉 PFZ 폭이 넓

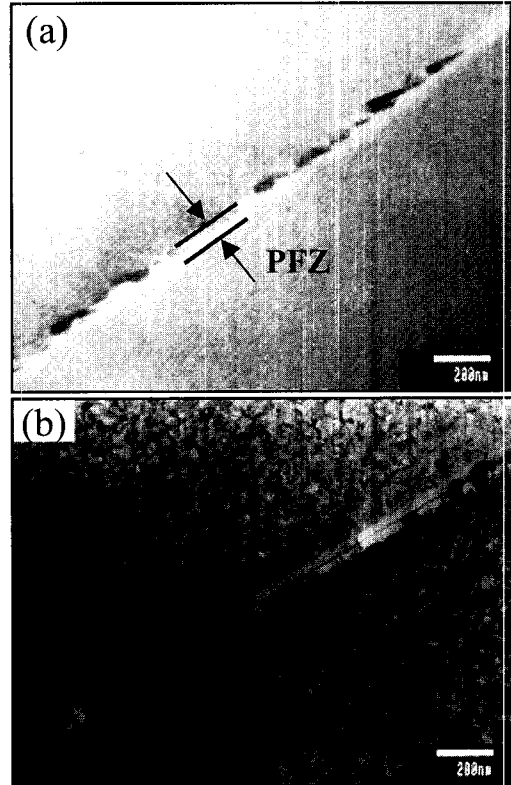


Fig. 4. TEM micrographs of Al-Cu-Mn cast alloys showing the PFZ along the grain boundary a) 0.10%Sn contained and peak aged(170°C, 5hrs), b) 0.20%Sn contained and peak aged(170°C, 30hrs)

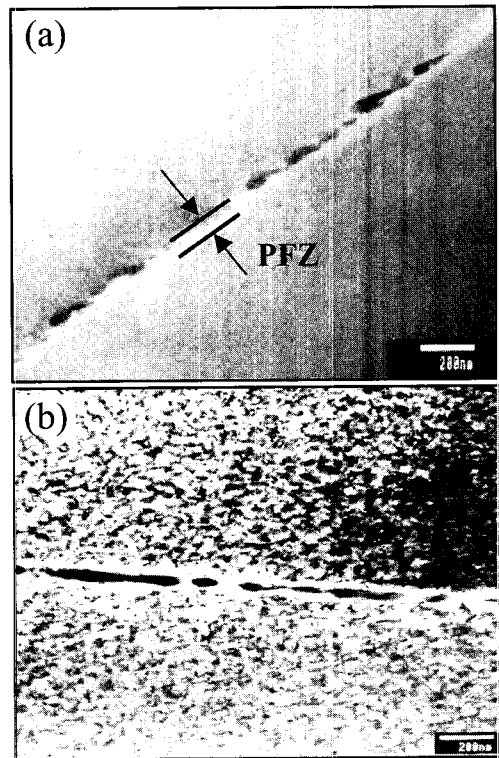


Fig. 5. TEM micrographs of Al-Cu-Mn cast alloys showing the PFZ along the grain boundary a) 0.10%Sn contained and peak aged(170°C, 5hrs), b) 0.10%Cd contained and peak aged(170°C, 12hrs)

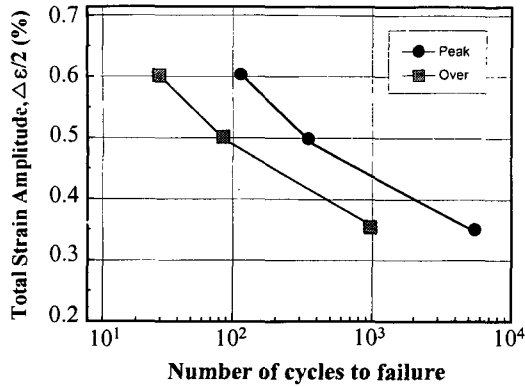


Fig. 6. Effect of aging conditions on the strain-controlled fatigue of 0.10%Sn containing Al-Cu-Mn cast alloy ; aging conditions as indicated

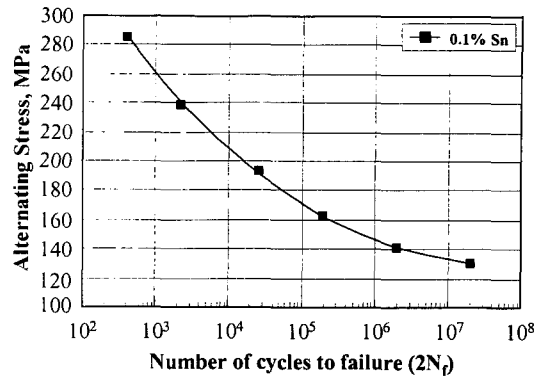


Fig. 8. S-N curve of 0.10%Sn containing Al-Cu-Mn cast alloy

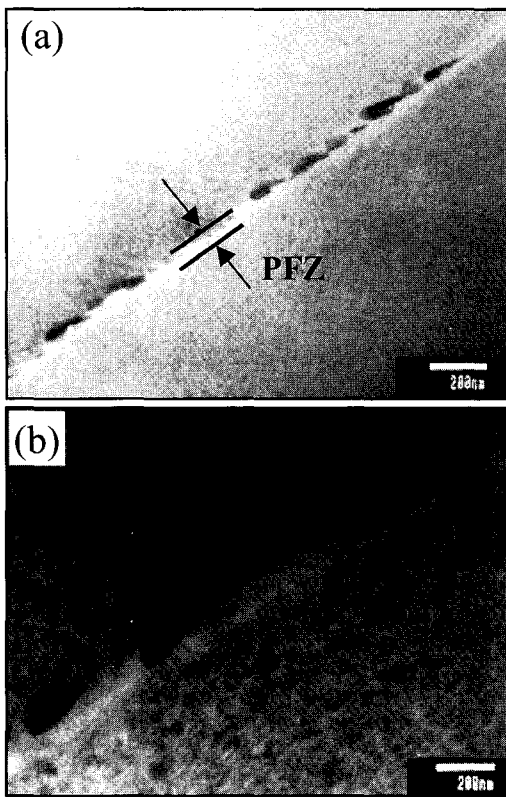


Fig. 7. TEM micrographs of 0.1%Sn containing Al-Cu-Mn cast alloy show PFZ and coarse particles distribution along the grain boundary a) peak aged(170°C, 5hrs), b) over aged(170°C, 30hrs)

을수록 피로균열 전파속도가 빠르다는 피로균열 전파특성이 또다른 이유가 될 것이라는 판단에 따라 Sn첨가량에 따른 PFZ 폭을 TEM에 의하여 조사한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4로부터 Sn첨가량에 따라 PFZ의 폭이 0.10%의 경우 60nm, 0.20%의 경우 80nm로서 0.10%의 경우가 PFZ의 폭이 가장 작다는 것을 알 수 있었다. 종합하면 Sn첨가량이 0.20% 이상에서는 Sn의 편석에 의한 강도 감소로 피로균열의 발생이 0.10%보다 상대적으로 쉽고, PFZ의 폭이 커서 피로균열 전파속도가 0.10%보다 크기 때문에 0.20% 이상에서는 피로수명이 감소되는 결과를 나타낸

것이라고 생각된다.

피로수명에 대한 Cd 첨가의 영향과 Sn 첨가의 영향을 비교해보면, 0.10%Sn 첨가의 경우가(5450사이클) 0.10%Cd 첨가의 경우보다(1710사이클) 피로수명 값이 크게 나타났다. 이와 같이 Sn 첨가의 영향이 큰 이유는 0.10%Sn을 첨가한 경우의 인장강도가(429MPa) 0.10%Cd를 첨가한 경우의 인장강도(396MPa)보다 커서 균열발생이 상대적으로 어렵고 Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 0.10%Sn 첨가의 경우가 PFZ폭이(60nm) 0.10%Cd 첨가의 경우(95nm)보다 적어 균열 전파속도가 상대적으로 느리기 때문이라고 판단된다.

Fig. 6는 Sn이 0.10%첨가되었을 때, 최대강도 시효조건과 과시효조건에서 피로수명의 차이를 나타낸 것으로 최대강도 시효조건(5450사이클) 경우가 과시효 조건(980사이클)보다 4470사이클 정도 큰 값을 나타내었다. 이와 같이 피로수명이 감소되는 이유는 과시효에 의해서 강도가 감소되고<sup>9)</sup> Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 최대강도 시효 조건에서는 PFZ폭이 60nm이었는데 과시효에 의해서 PFZ폭이 90nm로 증가되기 때문이다.

### 3.3. 고주기 피로특성

대부분의 비철합금은 피로한도를 나타내지 않기 때문에 임의의 사이클 수에서의 응력을 피로한도로 정의하여 사용하며 본 연구에서는 10<sup>7</sup>사이클에서의 응력진폭을 피로강도로 정의하였다. Fig. 8은 Sn의 첨가량이 0.10%인경우의 고주기 피로시험결과를 S-N곡선으로 나타낸 것으로서 피로강도는 132MPa이었으며, 피로비는 0.31이었다.

Table 2는 0.10% Sn을 첨가한 본 연구 합금과 다른 고강도 Al합금의 피로강도 및 피로비<sup>12)</sup>를 비교한 것으로서, 0.10%Cd를 첨가한 것(123MPa)보다는 피로강도가 우수하지만 가공용 Al합금인 2024-T3, T4나 7075-T6재에 비하여 피로강도는 적은 값을 나타내었으며 인장강도와 피로강도의 비인 피로비값은 0.31로서 비교재와 비슷한 값을 나타내었다. 일반적으로 강이나 Ti합금 등에서는 피로비가 0.5정도의 값을 가지는 반면에 Al합금은 0.3내외의 값을 가지는 것으로 알려져 있는데, 본 연구합금의 경우에도 일반적인 Al합금의 피로비 범주에 속한다는 것을 확인하였으며, Al합금이 강이나 Ti합금에 비해 피로비가 적은 것은

Table 2. Comparison of fatigue strength and fatigue ratio of 0.10%Sn and 0.10%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloys with commercial wrought Al alloys

	Fatigue strength (MPa)	Fatigue ratio
0.10%Sn Al-Cu-Mn cast alloy	132	0.31
0.10%Cd Al-Cu-Mn cast alloy	123	0.31
2024(T3)	151	0.32
2024(T4)	175	0.37
7075(T6)	176	0.30

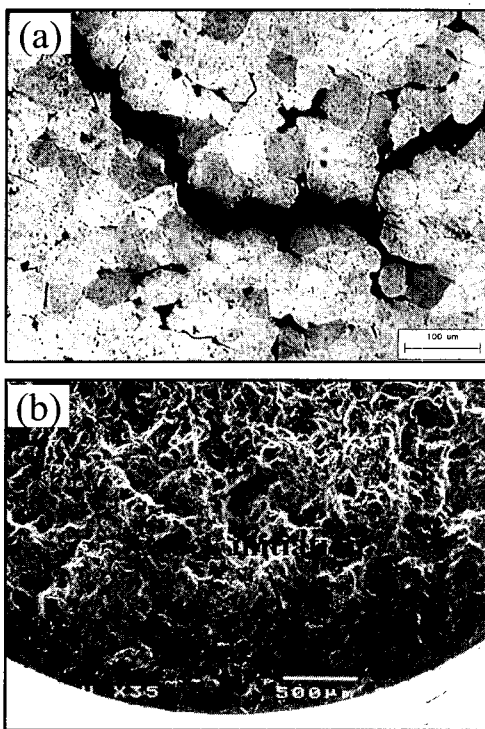


Fig. 9. Fatigue crack initiation and propagation path of 0.10%Sn containing Al-Cu-Mn cast alloy along the grain boundary (a) crack propagation path, (b) surface crack initiation

적층결합에너지가 Al 합금의 경우 약  $200\text{mJ m}^{-2}$ 이고 강의 경우는  $8\sim 45\text{mJ m}^{-2}$  정도로서<sup>13)</sup> Al 합금의 적층결합에너지가 크기 때문에 교차슬립이 잘 일어나고 그 결과 표면에 고집슬립대가 잘 형성되어 피로균열의 발생이 상대적으로 용이하기 때문이다.

#### 3.4. 파단면 관찰 및 피로균열 성장특성

Fig. 9는 본 연구합금에서 관찰된 피로균열의 발생과 전파과정을 보여주는 광학현미경 사진으로서 (a) 사진을 보면 균열이 시편의 표면에서 시작하였음을 알 수 있으며 (b) 사진은 피로균열의 전파가 입계를 따라 전파되는 것을 보여준다. 이렇게 입계를 따라 피로균열이 전파하는 이유는 앞서 언급한 것처럼 입계 주위에 존재하는 PFZ의 영향이라 생각된다. 일반적으로 피로파괴는 시편 내부에 큰 응력 집중

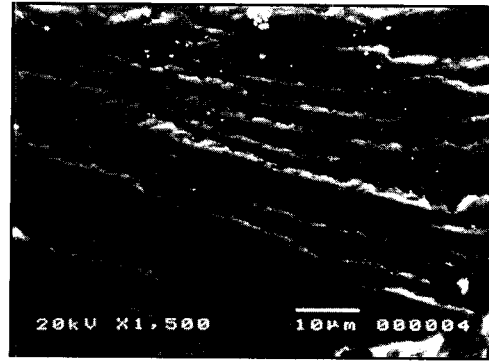


Fig. 10. Fatigue striation of 0.10%Sn containing Al-Cu-Mn cast alloy

요소가 있을 경우에는 시편의 내부에서 피로파괴가 시작되기도 하지만 시편 내부에 큰 응력 집중요소가 없이 즉 조직이 시편의 전단면에 걸쳐 균일하게 분포되었다면 시편의 표면에서 피로균열이 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구 합금의 경우 피로파괴가 표면에서 시작된 것으로 보아서 시편 석출강화상이 시편의 전단면에 걸쳐 균일하게 분산 분포 되었다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 2단계 피로균열 전파과정에서의 전형적인 고주기 피로파면의 특징인 striation을 나타낸 것이다.

#### 4. 결 론

Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Sn첨가의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 저주기 피로시험 결과 0.10%Sn을 첨가하였을 경우 피로 수명이 5450사이클로서 최대값을 나타내었고, 0.20%Sn 이상 첨가하였을 경우에는 피로수명이 급격히 감소되었다.
- 2) 고주기 피로시험결과 0.10%Sn이 첨가되었을 경우 피로강도는 132MPa이었으며 피로비는 0.31이었다.
- 3) 피로균열은 표면에서 발생하여 입계를 따라 전파하였는데 균열의 전파는 입계를 따라 형성된 무석출대의 존재에 기인한다고 판단된다.
- 4) 인장시험 결과 Sn을 첨가하지 않은 경우 인장강도값이 330MPa이었으나 0.10%Sn이 첨가되었을 때 인장강도값은 429MPa로 최대이었고, Sn이 0.20% 이상 첨가되면 Sn의 편석에 의해서 인장강도 값이 감소되었다.
- 5) Sn이 Cd 보다 피로강도 및 피로수명을 향상시키는데 효과적이었다.

#### 감사의 글

본 연구는 1999년도 과학기술부 민군겸용과제 연구비에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. W.J. Plambridge, J. of Mater. Sci., 7, 939 (1972).
2. I.J. Polmear, Trans. Met. Soc. AIME, 230, 1331 (1964).

3. K.H. Kim, T.H. Lee, J.G. Park and I.B. Kim, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **37**(2), 142 (1999).
4. C.H. Lee, K.H. Kim and I.B. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **11**(4), 226 (2001).
5. K.H. Kim, B.H. Lee and I.B. Kim, *J. Mater. Res.*, **11**(4), 300 (2001).
6. S.P. Ringer, K. Hono and T. Sakurai, *Met. and Mater. Trans. A.*, **26**, 2207 (1995).
7. J.D. Boyd and R.B. Nicholson, *Acta Metall.*, **19**, 1101 (1971).
8. A.H. Sulley, H.k. Hardy and T. Heal, *J. Inst. Met.*, **76** 269 (1949-1950).
9. J.G. Park, MS thesis Pusan National University, (1998)
10. T.H. Sanders, Jr. E.A. Ludwiczak and R.R. Sawtell *Mat. Sci. Eng.*, **43**, 247 (1980).
11. R.B. Nicholson, *J. Inst. Met.*, **95**, 91 (1967).
12. H.O. Fuchs and R.I. Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*. Wiley & Sons, Inc. p.298 (1980).
13. George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill p.137 (1988).