

## Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Cd 첨가의 영향

김경현 · 이병훈 · 김인배

부산대학교 금속공학과

### Effect of Cd addition on the Fatigue Properties of Al-Cu-Mn cast alloy

Kyung-Hyun Kim, Byung-Hoon Lee and In-Bae Kim

Dept. of Metallurgical Eng., Pusan National University, Pusan 609-735

(2001년 1월 9일 받음, 2001년 3월 7일 최종수정본 받음)

**초 록** Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Cd첨가의 영향을 저주기 및 고주기 피로시험을 통하여 조사하였다. Cd첨가량이 증가함에 따라 피로수명이 증가하였으며, 인장강도도 증가하였다. 고주기 피로시험결과 피로강도는 115MPa이었으며 피로비는 0.31이었다. 피로시험 결과 균열이 표면에서 발생하여 입계를 따라 전파되었는데 이러한 입계파괴는 입계를 따라 존재하는 무석출대의 영향으로 생각된다. 인장강도값은 Cd이 첨가되지 않았을 경우 330MPa이었으나 0.15%의 Cd이 첨가됨으로써 401MPa까지 증가되었다.

**Abstract** Effect of Cd addition on the fatigue properties of Al-Cu-Mn cast alloy was investigated by low and high cycle fatigue tests. With increasing Cd content, fatigue life and tensile strength were increased. It was found that the fatigue strength was 115MPa and the fatigue ratio was 0.31. 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 Cd-free Al-Cu-Mn cast alloy to 401MPa in the 0.15%Cd-containing alloy.

**Key words** : Al-Cu-Mn cast alloy, fatigue life, fatigue strength, fatigue ratio

### 1. 서 론

알루미늄 합금은 비강도가 우수하므로 항공기 및 수송용 기기의 부품으로 주로 사용되고 있으며, 고강도 Al합금의 개발에 따라 최근에는 군용수송기, 미사일 등 군수장비 등에서 피로하중을 받는 조건이나 응력부식분위기 등의 가혹한 조건에까지 그 사용범위가 확대되고 있다.

일반적으로 주조공정에 의한 제품의 회수율은 60-80% 정도로서 단조 제품의 회수율인 20-30%보다 약 3배 정도 높다. 그리고 주조공정은 복잡한 형상의 부품제조가 용이하며 단조공정상의 가열이나 압출, 금형 등의 중간가공공정이 불필요하기 때문에 주조품의 생산단가는 가공품에 비해 훨씬 낮다. 그러나 주조품은 가공품에 비해 기계적 성질이 떨어지므로 여러 가지 열처리 조작이나 합금원소를 첨가하여 주조품의 기계적 성질을 향상시키려는 많은 연구가 행해지고 있으며, 그 결과 미국에서는 A201합금(Al-4.7Cu-0.5Mn-0.5Ag-0.2Ti)이라는 주조용 고강도 알루미늄 합금을 개발하였는데, 이 합금은 주 강화상인  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ )상 이외에  $\Omega(\text{Cu}(\text{Mg})\text{Al}_2)$ 라는 새로운 석출상을 생성시켜 기계적 성질을 향상시킨 합금으로서 항복강도, 인장강도 및 연신율이 각각 345MPa, 420MPa, 5-7% 정도로 우수한 기계적 성질을 가지는 합금이다.<sup>1,2)</sup> 그러나 A201 합금은 성

분 중 Ag가 첨가되어 있어 생산단가가 높은 단점이 있기 때문에 군 수송기나 탱크같은 특수 방산용품등으로 그 사용이 제한되어있기 때문에 고가의 Ag를 대체할 수 있는 합금 개발이 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Ag대체 원소를 개발하여 저가의 주조용 고강도 알루미늄 합금을 개발하기 위한 연구의 일환으로 Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Cd첨가의 영향을 조사함으로써 주조용 고강도 알루미늄 합금 개발을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료의 화학적 조성은 표 1과 같다. Al-Cu-Mn 주조합금의 피로성질에 미치는 Cd첨가의 영향을 조사하기 위하여 Cd의 양을 0.05%, 0.1%, 0.15%로 각각 첨가한 시편을 제조하였다. 전기로에서 순수 Al을 용해한 후 Al-Cu, Al-Mn, Al-Ti, Al-Zr 및 Al-Cd 모합금을 첨가하여 각 조성에 맞는 잉곳을 제조하여, 543°C에서 13시간 용체화 처리후 170°C에서 인공시효를 수행하였다.

인장시험은 cross head speed 5mm/min으로 상온의 공기 중에서 수행하였으며 강도값은 3회 반복시험 후 평균하여 구하였다. 저주기 피로시험과 고주기 피로시험은 길이 30mm, 직경 10mm의 봉상 시편편을 사용하여 10 ton 용

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

alloy	Al	Cu	Mn	Ti	Zr	Cd
Cd-free	Bal.	4.8	0.5	0.3	0.03	-
0.05%Cd	"	"	"	"	"	0.05
0.1%Cd	"	"	"	"	"	0.10
0.15%Cd	"	"	"	"	"	0.15

량의 Instron 8516 유압식 시험기로 실시하였다. 피로시험에서 표면 조건의 영향을 최소화하기 위하여 시험편의 표면을 응력축에 평행한 방향으로 최종 3 $\mu$ m까지 연마하였다. 저주기 피로시험 조건은 총 변형진폭을 0.35%~0.6%까지 제어하는 완전역전 응력조건(R=-1)으로 실시하였으며, 파형은 싸인파형으로 변형률 속도와 시험분위기는 인장시험과 동일하다. 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

인장특성

그림 1은 최대 경도값을 나타내는 조건으로 시효처리 하였을 때 Cd첨가량에 따른 상온 인장강도값의 변화를 나타낸 것으로서, Cd를 첨가하지 않은 합금은 인장강도값이 330MPa이었으나, Cd의 첨가량이 증가할수록 인장강도값은 증가하여 0.15% Cd를 첨가한 경우 인장강도값이 401MPa까지 증가 되었다. Cd 첨가에 의해 인장강도값이 증가되는 것은 본 연구의 저자 등이 이미 보고한<sup>3)</sup> 바와 같이 Cd이 Al-Cu계 합금의 주 강화상인  $\theta$ 의 석출 site의 역할을 함으로써  $\theta$ 의 석출이 촉진되었기 때문이다.<sup>4-6)</sup> 그러나 Cd의 첨가량이 0.2% 이상인 경우에는 Cd의 편석에 의해 기계적 특성이 감소하는 것으로 알려져 있다.<sup>7,8)</sup> 본 연구 합금과 동일한 석출물인 CuAl<sub>2</sub>가 시효 석출됨으로써 강화되는 단조용 2024-T3합금의 인장강도값 469MPa과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 값을 나타내었으나 주조용 A201합금의 인장강도값 420MPa과는 큰 차이가 나지 않는다.

그림 2는 Cd첨가량이 0.1%인 합금에서 최대경도 시효 조건(170 $^{\circ}$ C 12시간)과 과시효 조건(170 $^{\circ}$ C 30시간)에서의 인장 강도값의 차이를 나타낸 것으로 과시효시에는 석출물의 조대화에 의하여 인장강도값이 감소된다는 것을 알 수 있다.

저주기 피로특성

Cd첨가량에 따른 저주기 피로수명의 변화를 알아보기 위하여, 총변형진폭( $\Delta\epsilon/2$ )을 0.6%, 0.5%, 0.35% 세 조건으로 조사한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림3에서 보면 Cd 첨가량에 관계없이 총변형 진폭이 작을수록 피로수명이 증가되는 일반적인 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있

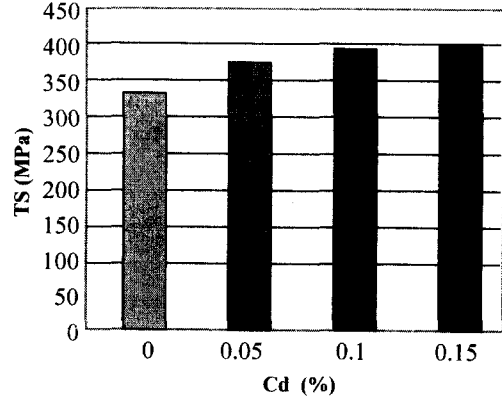


Fig. 1. Tensile strength as a function of Cd content for peak aged Al-Cu-Mn cast alloys.

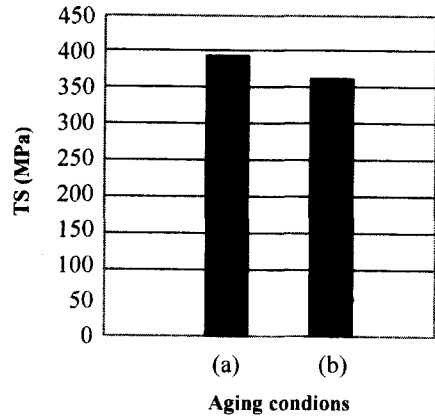


Fig. 2. Comparison of tensile strength in the 0.1%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy a) peak aged (170 $^{\circ}$ C, 12hrs) b) over aged (170 $^{\circ}$ C, 30hrs)

다. Cd첨가의 영향은 Cd첨가량이 증가함에 따라 같은 변형진폭에서 피로수명이 크게 증가됨으로서, Cd이 첨가되지 않았을 경우보다 Cd의 양이 0.15%첨가되었을 경우 피로수명은 1300사이클 정도 증가되었다. 이러한 이유는 Cd의 첨가에 의하여 시효초기에 미세하게 균일분포한 Cd-cluster가  $\theta$  상의 불균일 핵생성 위치로 작용하여  $\theta$  상의 석출을 촉진시킴으로써 강도를 증가시켜 피로균열의 생성이 억제되었기 때문이라고 생각된다. 그림 4는 Cd의 첨가량이 0.1%첨가되었을 때, 최대경도 시효조건과 과시효 조건에서의 피로수명의 차이를 나타낸 것으로 총변형율 진폭이 0.35%일 때 최대경도 시효조건일 경우가 과시효 조건보다 750사이클 정도 피로수명이 증가하였다. 이렇게 과시효 시킬수록 피로특성이 떨어지는 이유는 입계의 조대 석출물의 크기가 증가되고 조대 석출물간 간격이 넓어짐으로써(그림

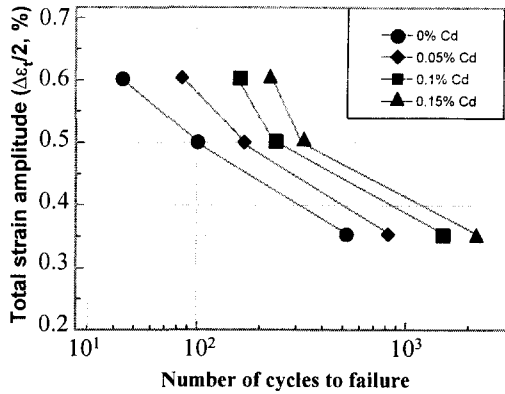


Fig. 3. Fatigue life as a function of total strain amplitude and Cd content for Al-Cu-Mn cast alloys ; Cd content as indicated.

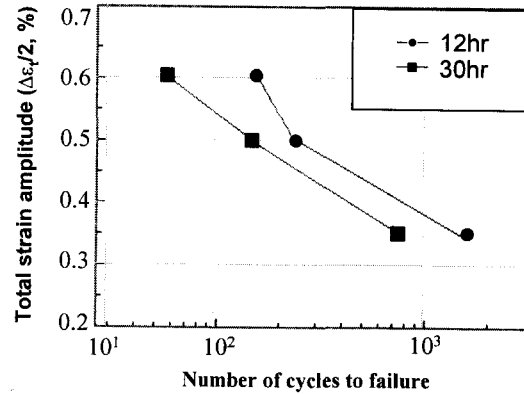


Fig. 4. Effect of aging conditions on the strain-controlled fatigue of 0.1%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy ; aging conditions as indicated

5) 피로균열 전파속도가 상대적으로 빨라졌기 때문이라 생각된다. 일반적으로 고강도 석출경화형 Al합금은 시효과정에서 입계에 PFZ(Precipitate Free Zone)가 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>9,10</sup> 본 연구합금의 경우에도 입계에 PFZ가 형성되었으며 이러한 입계 PFZ가 입계균열전파 경로가 될 것으로 예상된다. 그림 5는 최대경도 시효처리했을 때와 과시효처리 하였을 경우 입계에 생성된 PFZ를 나타낸 TEM 사진으로서, 과시효 시켰을 경우가 입계석출물의 크기가 상대적으로 크고 석출물간의 간격이 넓다는 것을 확인할 수 있다.

고주기 피로특성

대부분의 비철합금은 피로한도를 나타내지 않기 때문에 임의의 사이클 수에서의 응력을 피로한도로 정의하여 사용하며 본 연구에서는 10<sup>7</sup>사이클에서의 응력진폭을 피로강도

로 정의하였다. 그림 6은 Cd의 첨가량이 0.05%인 경우의 고주기 피로시험결과를 S-N곡선으로 나타낸 것으로서 피로강도는 115MPa이었다. 저주기 피로시험시 Cd의 양이 0.15% 첨가되었을 경우 피로수명이 최대였음을 감안하였을 경우 Cd의 첨가량이 0.15%인 경우 피로강도는 더 높아질 것이라고 생각된다.

표 2<sup>11)</sup>는 0.05% Cd를 첨가한 본 연구 합금과 다른 고강도 Al합금의 피로강도 및 피로비를 비교한 것으로서, 가공용 Al합금인 2024-T3, T4나 7075-T6재에 비하여 피로강도는 적은 값을 나타내었으나 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 Al합금이 강이나 Ti합금에 비해 피로비가 적은 것은 이들 합금이 상대적으로 적층결함에너지가 크기 때문에 교차슬립이 잘 일어나고 그 결과 표면에 고집슬립대가 잘 형성되어

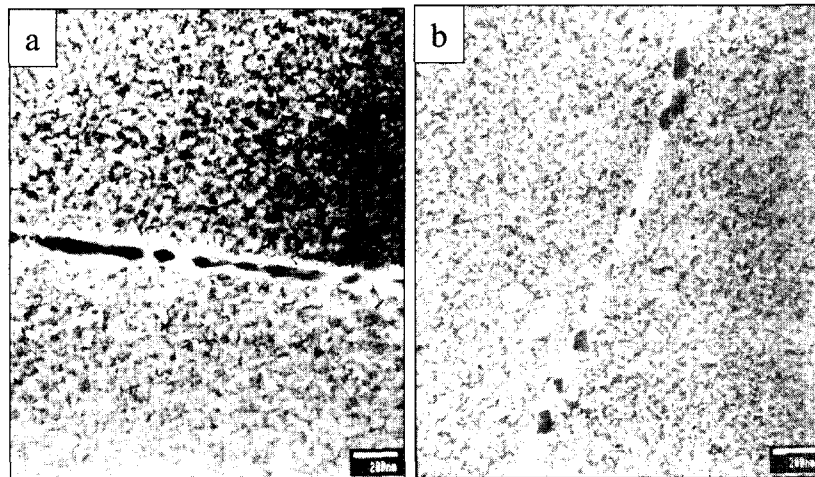


Fig. 5. TEM micrographs of 0.1%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy show PFZ and coarse particles distribution along the grain boundary a) peak aged (170°C, 12hrs) b) over aged (170°C, 30hrs).

Table 2. Comparison of fatigue strength and fatigue ratio of 0.05%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy with commercial wrought Al alloys.

	Fatigue strength (MPa)	Fatigue ratio
0.05%Cd Al-Cu-Mn cast alloy	115	0.31
2024(T3)	151	0.32
2024(T4)	175	0.37
7075(T6)	176	0.30

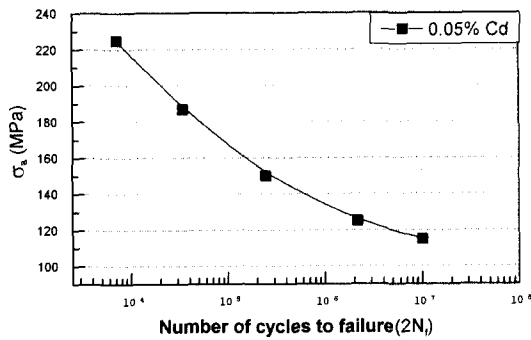


Fig. 6. S-N curve of 0.05%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy.



Fig. 7. Fatigue crack initiation and propagation path of 0.05%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy (a) surface crack initiation (b) crack propagation path along the grain boundary.

피로균열의 발생이 상대적으로 용이하기 때문이다.<sup>12)</sup>

파단면 관찰 및 피로균열 성장특성

피로시험시 압축과 인장의 반복적인 사이클을 받는 봉상의 시편부위에서 균열이 발생하여 결국 파단에 이르게 된다. 이때의 균열이 발생하는 시점에서 응력이 감소하기 시

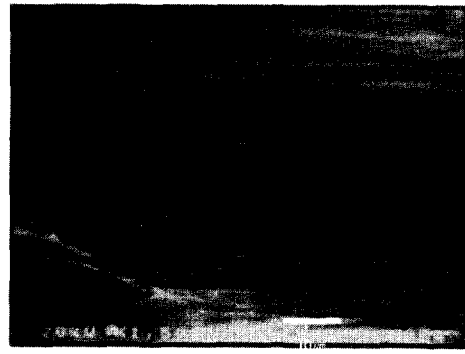


Fig. 8. Fatigue striation of 0.05%Cd containing Al-Cu-Mn cast alloy.

작하여 균열의 전파로 인한 완전 파단이 일어나게 되는데 완전 파단이 일어나기 전에 축방향으로 시편을 절단 후 균열의 발생과 전파mode을 관찰하였다. 그림 7은 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 집중요소가 있을 경우에는 시편의 내부에서 피로파괴가 시작되기도 하지만 시편 내부에 큰 응력 집중요소가 없이 즉 조직이 시편의 전단면에 걸쳐 균일하게 분포되었다면 시료의 표면에서 피로균열이 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구 합금의 경우 피로파괴가 표면에서 시작된 것으로 보아서 시효 석출강화상이 시편의 전단면에 걸쳐 균일하게 분산분포 되었다는 것을 간접적으로 확인 할 수 있었다.

그림 8은 2단계 피로균열 전파과정에서의 전형적인 고주기 피로파면의 특징인 striation을 나타낸 것으로 striation 간의 간격은 본 연구합금의 경우 대략 1.6μm 정도이었다.

4. 결 론

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

- 1) 저주기 피로시험 결과 Cd을 첨가하지 않은 경우보다 Cd을 첨가하였을 경우 Cd에 의한 석출상의 석출이 촉진되고 석출 밀도가 증가하여 피로수명이 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>사이클 정도 증가하였으며 과시효 처리보다 최대경도 시효처리하였을 경우 피로수명이 750사이클정도 증가되었다.
- 2) 고주기 피로시험 결과 피로강도는 115MPa이었으며 피로비는 0.31이었다.
- 3) 피로균열은 표면에서 발생하여 입계를 따라 전파하였는데 균열의 전파는 입계를 따라 형성된 무석출대의 존재에 기인한다고 판단된다.
- 5) 인장시험 결과 Cd을 첨가하지 않은 경우 인장강도값이 330MPa이었으나 Cd의 첨가에 의해 인장강도값이 401MPa까지 증가하였다.

### 감사의 글

본 연구는 1999년도 민간접용과제 연구비에 의하여 수행 되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. I. J. Polmear : Trans. Met. Soc. AIME, **230**, 1331 (1964)
2. J. T. Viez and I. J. Polmear : J. Inst. Met., **94**, 410 (1966)
3. 김경현 · 이태호 · 박정규 · 김인배, 대한금속학회지 **37** (2), 142 (1999)
4. R. Sankaran and C. Laird : Mat. Sci. Eng., **14**, 271 (1974)
5. J. M. Silcock, T. J. Heal and H. K. Hardy : J. Inst. Met., **84**, 23 (1955)
6. J. D. Boyd and R. B. Nicholson : Acta Met., **19**, 1101 (1971)
7. A. H Sulley, H. k. Hardy and T. Heal : J. Inst. Metals, **76**, 269 (1949-1950)
8. 박정규 : 석사학위논문., 부산대학교 (1998)
9. T. H. Sanders, Jr. E. A. Ludwiczak and R. R. Sawtell, Mat. Sci. Eng., **43**, 247 (1980)
10. R. B. Nicholson, J. Inst. Met., **95**, 91 (1967)
11. H. O. Fuchs and R. I. Stephens : Metal Fatigue in Engineering. Wiley & Sons, Inc. p.298 (1980)
12. 이동녕, 금속강도학. 문운당 p.309 (1986)