

알루미늄의 용해 및 주조 시리즈 I

홍성길[†]

전남대학교 신소재공학부

Series I : Melting and Casting of Aluminum Alloys

Sung-Kil Hong[†]

Dept. of Materials Science and Engineering Chonnam National University Gwangju, Korea

1. 서 언

알루미늄이 공업적으로 생산된 지 100년이 지난 현재 알루미늄은 철강재료 다음으로 많이 사용되는 금속재료이다. 알루미늄은 Cu, Si, Mn, Mg, Zn, Li 등의 첨가원소의 종류와 첨가량에 따라 다양한 종류의 합금을 만들 수 있으며, 합금에 따라서 그 특성이 다양하게 변화한다. 그러나 알루미늄합금은 기본적으로 다음과 같은 우수한 특성을 지니고 있어서 다방면에 걸쳐서 사용되고 있다.

- 1) 경량성(비중이 철의 1/3)
- 2) 전기 및 열전도도의 우수성
- 3) 비자성으로 전자기기에 적용
- 4) 빛과 열의 반사성
- 5) 합금에 의한 다양한 강도특성
- 6) 면심입방구조로 가공성이 풍부
- 7) 저온취성이 없음
- 8) 양극산화처리 등 표면처리성 우수
- 9) 대기중에서 자연적으로 발생하는 산화피막에 의한 우수한 내식성
- 10) 스크랩재생이 용이한 리사이클링성 등

이처럼 알루미늄합금이 갖는 우수한 특성은 주물로 하여도 사라지지 않고 유지하기 때문에 비교적 간단한 공정으로 복잡한 형상을 가공할 수 있으므로 경제적으로 우수한 특성을 갖는 부품제조가 가능하다.

알루미늄합금을 제조방법에 따라 분류하면 주조용합금과 가공용합금으로 나눌 수 있다. 주조용 알루미늄합금은 일반주조용합금과 다이캐스팅용으로 분류되며, 주조방법은 기술의 발전에 힘입어 다양하게 개발되고 있지만 일반적으로 사형주조, 금형주조(저압주조, 상압주조), 고압주조/용탕단조(squeeze casting), 다이캐스팅, 특수주조(정밀주조, 소실모형주조, 원심주조 등) 그리고 최근기술로 반응고(semi-solidification) 또는 반응용(semi-melting)주조로 구분할 수 있다. 가공용 알루미늄합금은 압연, 압출, 인발, 단조, 프레스 등과 같은 2차 가공에 적합한 합금으로 가공전후의 열처리의 활용여부에 따라 그 특성을 다양하게 조절할 수 있는 특성을 가지고 있다.

본 강좌에서는 주조용 알루미늄합금의 종류와 그 특성에 대

해서 살펴보고, 용해 및 주조기술에 한정하여 언급하고자 한다.

2. 주조용 알루미늄합금

2.1 일반주조용 알루미늄합금

2.1.1 합금의 종류, 용도 및 물리적 성질

주조용 알루미늄합금에 사용되는 합금은 기본합금계로 분류하면 Fig. 1의 상태도에 나타난 것처럼 3가지 2원계인 Al-Si, Al-Cu, Al-Mg계로 분류할 수 있으며, 이것을 기본으로 하여 몇 가지의 원소를 첨가하는 형태로 되어 있다. 그 분류방법은 첨가되는 원소의 화학적 조성에 따라서 분류되며 각국에 따라서 다르다. 예를 들면 미국의 경우는 1xx.x에서부터 9xx.x계로 분류하며, 소숫점 좌측의 두 숫자는 알루미늄합금의 최소합량을 표시하며 소숫점 이하의 한자리 수는 제품의 형태를 나타낸다. 예를 들어 0인 경우는 주조제품을 나타내며 1인 경우는 잉곳(ingot)을 의미한다. KS나 JIS의 경우는 Table 1에 나타난 바와 같이 AC1A부터 AC9B까지 다양한 합금으로 분류한다.

주조용 알루미늄합금으로는 Al-Si계 합금을 기본으로 하여, 우수한 기계적 특성을 얻기 위한 Al-Cu계 및 고내식성을 얻기 위해 개발된 Al-Mg계 합금이 있지만 다량의 Si이 함유된 Al-Si계 합금이 대부분을 차지한다. 다시 말해 주조용 알루미늄합금에서 가장 중요한 원소는 Si이다. 알루미늄에 Si를 첨가하면 유동성이 좋아지고, 주조균열을 방지하고, 응고 수축률이 낮아지며, 내마모 특성이 향상되고 열팽창계수가 저하하는 등 우수한 효과를 발휘함과 아울러 소량의 Mg첨가에 의해 현저한 석출강화, 미량의 Na, Sr, Sb의 첨가에 의한 인성향상등 많은 이점을 얻을 수 있다.

주조용 알루미늄합금의 물리적 성질을 정리하여 Table 2에 나타낸다. Al-Cu계 합금은 Al-Si계 합금에 비해서 밀도가 높고, 선팽창계수도 크다. Si농도가 높아질수록 열팽창계수가 낮아져서 Si의 농도가 가장 높은 과공정 Al-Si계 합금의 열팽창계수가 가장 낮은 값을 나타낸다. 탄성률도 전체적으로 Si농도가 높을수록 높은 값을 나타낸다. 실온에서의 열전도도는 Al-Si계 합금에서 Zn, Fe를 포함한 불순물의 농도가 높은 합금(AC2B, AC4B)일수록 낮은 값을 나타낸다.

[†]E-mail : skhong@chonnam.ac.kr

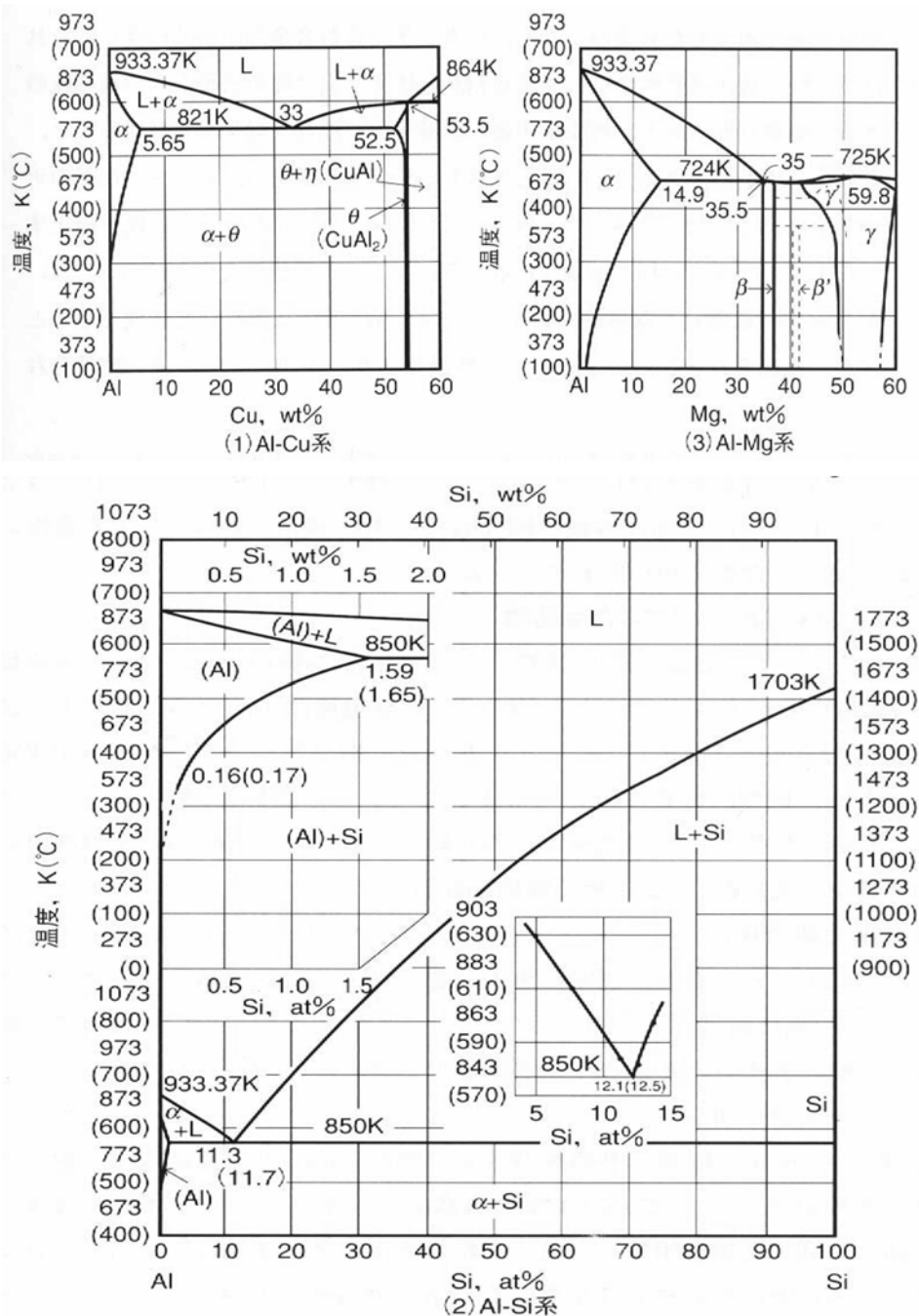


Fig. 1. Al-Cu, Al-Si, Al-Mg 2원계 합금 상태도

주조용 알루미늄합금의 주요 용도를 살펴보면 1970년대의 원유파동 이후 에너지위기를 겪으면서 가정용 주방제품이나 건축용소재로부터 우수한 비강도 특성에 기인하여 자동차, 항공기, 고속열차와 같은 수송 분야로 대부분의 용도가 변화되고 있으며 최근 모바일기기의 수요확대로 정보통신용으로도 그 수요가 매년 크게 증가하고 있다.

2.1.2 열처리

주조용 알루미늄합금의 열처리특성을 살펴보면 Table 3에 나 타낸바와 같이 주조 후 용체화처리만 하여 사용하는 경우가 있고, 합금계에 따라서 용체화처리 후 시효경화처리로 조직을

제어하여 기계적 특성을 조절하여 사용한다. 일반적으로 알루미늄은 액상상태에서 수소가스의 용해도가 높아서 응고를 시키면 주물속에 가스가 다량으로 함유되어 열처리가 불가능하지만 요즘은 탈가스처리, 진공주조, 반응고 등 신기술이 개발되어 용탕 내의 수소가스 함유량을 저하시킬 수 있어서 용체화처리, 시효 경화처리 등의 열처리가 가능해졌다.

Al-Cu, Al-Si-Mg, Al-Zn-Mg 계 등의 알루미늄합금의 대부분은 시효처리를 함으로써 석출현상을 발생시키므로 열처리에 의한 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 시효 석출을 위한 열 처리 과정은 다음과 같다.

Table 1. 주조용 알루미늄합금의 화학조성에 따른 분류

| 합금 | Cu | Si | Mg | Zn | Fe | Mn | Ni | Ti | Pb | Sn | Cr | Al |
|-------|----------|-----------|-----------|--------|--------|----------|----------|-----------|--------|--------|--------|------|
| AC1A | 4.0~5.0 | 1.2이하 | 0.20이하 | 0.30이하 | 0.50이하 | 0.30이하 | 0.05이하 | 0.25이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | bal. |
| AC1B | 4.2~5.0 | 0.20이하 | 0.15~0.35 | 0.10이하 | 0.35이하 | 0.10이하 | 0.05이하 | 0.05~0.30 | 0.05이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | bal. |
| AC2A | 3.0~4.5 | 4.0~6.0 | 0.25이하 | 0.55이하 | 0.8이하 | 0.55이하 | 0.30이하 | 0.20이하 | 0.15이하 | 0.05이하 | 0.15이하 | bal. |
| AC2B | 2.0~4.2 | 5.0~7.0 | 0.50이하 | 1.0이하 | 1.0이하 | 0.50이하 | 0.35이하 | 0.20이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.20이하 | bal. |
| AC3A | 0.25이하 | 10.0~13.0 | 0.15이하 | 0.30이하 | 0.8이하 | 0.35이하 | 0.10이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | 0.15이하 | bal. |
| AC4A | 0.25이하 | 8.0~10.0 | 0.30~0.6 | 0.25이하 | 0.55이하 | 0.30~0.6 | 0.10이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.05이하 | 0.15이하 | bal. |
| AC4B | 2.0~4.0 | 7.0~10.0 | 0.50이하 | 1.0이하 | 1.0이하 | 0.50이하 | 0.35이하 | 0.20이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.20이하 | bal. |
| AC4C | 0.25이하 | 6.5~7.5 | 0.20~0.45 | 0.35이하 | 0.55이하 | 0.35이하 | 0.10이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.05이하 | 0.10이하 | bal. |
| AC4CH | 0.20이하 | 6.5~7.5 | 0.25~0.45 | 0.10이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.05이하 | 0.20이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | bal. |
| AC4D | 1.0~1.5 | 4.5~5.5 | 0.40~0.6 | 0.30이하 | 0.6이하 | 0.50이하 | 0.20이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.05이하 | 0.15이하 | bal. |
| AC5A | 3.5~4.5 | 0.6이하 | 1.2~1.8 | 0.15이하 | 0.8이하 | 0.35이하 | 1.7~2.3 | 0.20이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | 0.15이하 | bal. |
| AC7A | 0.10이하 | 0.20이하 | 3.5~5.5 | 0.15이하 | 0.30이하 | 0.6이하 | 0.05이하 | 0.20이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | 0.15이하 | bal. |
| AC8A | 0.8~1.3 | 11.0~13.0 | 0.7~1.3 | 0.15이하 | 0.8이하 | 0.15이하 | 0.8~1.5 | 0.20이하 | 0.05이하 | 0.05이하 | 0.10이하 | bal. |
| AC8B | 2.0~4.0 | 8.5~10.5 | 0.50~1.5 | 0.50이하 | 1.0이하 | 0.50이하 | 0.10~1.0 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | bal. |
| AC8C | 2.0~4.0 | 8.5~10.5 | 0.50~1.5 | 0.50이하 | 1.0이하 | 0.50이하 | 0.50이하 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | bal. |
| AC9A | 0.50~1.5 | 22~24 | 0.50~1.5 | 0.20이하 | 0.8이하 | 0.50이하 | 0.50~1.5 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | bal. |
| AC9B | 0.50~1.5 | 18~20 | 0.50~1.5 | 0.20이하 | 0.8이하 | 0.50이하 | 0.50~1.5 | 0.20이하 | 0.10이하 | 0.10이하 | 0.01이하 | bal. |

Table 2. 주조용 알루미늄 합금의 물리적 성질

| 합금종류 | 밀도 (20°C) Mg/m ³ | 액상온도 (°C) | 고상온도 (°C) | 선팽창계수(×10 ⁻⁶ /°C) | | | 탄성율 (kN/) | | 열전도도 (25°C) W/m · °C |
|-------|-----------------------------------|--------------|--------------|------------------------------|-------------|-------------|-----------|------|----------------------------|
| | | | | 20-100 (°C) | 20-200 (°C) | 30-300 (°C) | 종 | 횡 | |
| AC1A | 2.81 | 645 | 550 | 23.0 | 24.0 | 25.0 | 70.1 | 26.0 | 138 |
| AC1B | 2.80 | 650 | 535 | 23.0 | - | - | - | - | 140 |
| AC2A | 2.79 | 610 | 520 | 21.5 | 22.5 | 23.0 | 73.8 | 24.0 | 142 |
| AC2B | 2.78 | 615 | 520 | 21.5 | 23.0 | 23.5 | 74.1 | 24.5 | 109 |
| AC3A | 2.66 | 585 | 575 | 20.5 | 21.5 | 22.5 | 77.0 | 25.0 | 121 |
| AC4A | 2.68 | 595 | 560 | 21.0 | 22.0 | 23.0 | 75.0 | 25.0 | 138 |
| AC4B | 2.77 | 590 | 520 | 21.0 | 22.0 | 23.0 | 76.0 | 25.0 | 96 |
| AC4C | 2.68 | 610 | 555 | 21.5 | 22.5 | 23.5 | 73.6 | 24.0 | 159 |
| AC4CH | 2.68 | 610 | 555 | 21.5 | 22.5 | 23.5 | 72.6 | 24.0 | 159 |
| AC4D | 2.71 | 625 | 580 | 22.5 | 23.0 | 24.0 | 72.6 | 24.0 | 151 |
| AC5A | 2.79 | 630 | 535 | 22.5 | 23.5 | 24.5 | 72.6 | 23.5 | 130 |
| AC7A | 2.66 | 635 | 570 | 24.0 | 25.0 | 26.0 | 67.7 | 20.6 | 146 |
| AC8A | 2.70 | 570 | 530 | 20.0 | 21.0 | 22.0 | 80.9 | 25.5 | 125 |
| AC8B | 2.76 | 580 | 520 | 20.7 | 21.4 | 22.3 | 77.0 | 25.0 | 105 |
| AC8C | 2.76 | 580 | 520 | 20.7 | 21.4 | 22.3 | 76.0 | 24.5 | 105 |
| AC9A | 2.65 | 730 | 520 | 18.3 | 19.3 | 20.3 | 88.3 | 27.0 | 105 |
| AC9B | 2.68 | 670 | 520 | 19.0 | 20.0 | 21.0 | 86.3 | 26.5 | 110 |

1) 용체화처리: 주조재를 527°C전후의 고온으로 가열하여 주조시의 편석을 제거함과 동시에 정출상, 석출상 등을 모상에 충분히 고용시켜 과포화고용체를 얻음. 용체화처리시 주물속에 가스가 다량함유 된 경우에는 용체화처리 과정에서 내부에 존재하는 가스가 표면으로 이동함으로써 표면에 기포가 발생하거나 수포처럼 발생함(blister).

2) 소입(quenching)처리: 용체화처리에 의해 고온의 과포화고용체를 물이나 기름속에 투입하여 급속냉각시킴으로써 고온의 과포화고용상태와 고온에서의 공공농도가 상온에서 그대로 유지

되는 불안정한 비평형상태를 유지시킴.

3) 시효경화처리: 2)상태는 불안정한 비평형상태이므로 167°C 전후의 비교적 저온으로 재가열, 유지시키면 안정한 평형상태가 되기 위하여 조직내부에서 아주 미세한 석출물이 균일하게 석출하여 재료를 강화시킴. 상온에서의 자연시효에서는 석출하는데 장시간 소요되므로 인공적으로 온도를 높임으로써(인공시효) 석출시간을 단축시킬 수 있음.

위와 같은 과정을 거치면서 주물내부에서는 시간이 경과함에 따라 과포화고용체 → GP zone(coherence) → 중간상(semi-coherence)

Table 3. 주조용 알루미늄합금의 열처리에 의한 조직제어

| 합금 | 열처리 | 기호 | 용체화처리 | | 시효경화처리 | | 합금의 특색 |
|-------|-------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|
| | | | 온도(°C),시간(h) | 온도(°C),시간(h) | 온도(°C),시간(h) | 온도(°C),시간(h) | |
| AC1A | -용체화처리 | AC1A-T4 | 515 | 10 | - | - | 우수한 기계적성질, 피삭성 주조성 나쁨 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC1A-T6 | 515 | 10 | 160 | 6 | |
| AC1B | -용체화처리 | AC1B-T4 | 515 | 10 | - | - | 우수한 기계적성질, 피삭성 주조성 나쁨 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC1B-T6 | 515 | 10 | 160 | 4 | |
| AC2A | -용체화처리후 시효경화처리 | AC2A-T6 | 510 | 8 | 160 | 9 | 주조성우수,고강도,저연성 |
| AC2B | -용체화처리후 시효경화처리 | AC2B-T6 | 500 | 10 | 160 | 5 | 주조성우수,고강도,저연성, 일반주조용 |
| AC4A | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4A-T4 | 525 | 10 | 160 | 9 | 주조성우수,고강도,고인성, 대형주물용 |
| AC4B | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4B-T4 | 500 | 10 | 160 | 7 | 주조성우수,고강도, 저연성 |
| AC4C | -시효경화처리 | AC4C-T5 | - | - | 225 | 5 | 주조성우수, 내압성 및 내식성 우수 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4C-T6 | 525 | 8 | 160 | 6 | |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4C-T61 | 525 | 8 | 170 | 7 | |
| AC4CH | -시효경화처리 | AC4C-T5 | - | - | 225 | 5 | 주조성우수, 기계적성질 우수, 고급주물용 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4C-T6 | 535 | 8 | 155 | 6 | |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4C-T61 | 535 | 8 | 170 | 7 | |
| AC4D | -시효경화처리 | AC4D-T5 | - | - | 225 | 5 | 주조성우수, 기계적성질 우수, 내압성 부품에 적용 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC4D-T6 | 525 | 10 | 160 | 10 | |
| AC5A | -어닐링 | AC5A-O | 515 | 10 | - | - | 고온강도우수, 주조성 나쁨 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC5A-T6 | 515 | 10 | 160 | 6 | |
| AC8A | -시효경화처리 | AC8A-T5 | - | - | 200 | 4 | 내열성우수, 내마모성우수, 저열팽창계수, 고강도 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC8A-T6 | 510 | 4 | 170 | 10 | |
| AC8B | -시효경화처리 | AC8B-T5 | - | - | 200 | 4 | 내열성우수, 내마모성우수, 저열팽창계수, 고강도 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC8B-T6 | 510 | 4 | 170 | 10 | |
| AC8C | -시효경화처리 | AC8C-T5 | - | - | 200 | 4 | 내열성우수, 내마모성우수, 저열팽창계수, 고강도 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC8C-T6 | 510 | 4 | 170 | 10 | |
| AC9A | -시효경화처리 | AC9A-T5 | - | - | 250 | 4 | 내열성우수, 저열팽창계수, 내마모성우수, 주조성 및 피삭성 나쁨 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC9A-T6 | 500 | 4 | 200 | 4 | |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC9A-T7 | 500 | 4 | 250 | 4 | |
| AC9B | -시효경화처리 | AC9B-T5 | - | - | 250 | 4 | 내열성우수, 저열팽창계수, 내마모성우수, 주조성 및 피삭성 나쁨 |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC9B-T6 | 500 | 4 | 200 | 4 | |
| | -용체화처리후 시효경화처리 | AC9B-T7 | 500 | 4 | 250 | 4 | |

→ 안정상(incoherence)과 같은 석출과정을 거친다. 이 과정에서 석출과정의 중간단계인 GP zone과 중간상이 혼합된 석출상태 일 때 결정격자의 변형이 발생하여 재료가 크게 경화된다. 안정상으로 되면 더 이상 재료는 경화되지 않는다.

위에서 언급한 기계적 성질의 향상을 목적으로 하는 열처리

이외에도 주조변형, 열처리변형 또는 사용 중의 미소한 치수변화의 발생을 방지위한 열처리, 단조 등과 같은 소성변형을 하기위해 재료를 연화시킬 목적으로 행하는 열처리 등 다양하다. 이런 열처리종류에 대해서 다음과 같은 기호로 나타낸다.

F: 주조한 그대로

O: 소성가공의 전처리로 연성개선, 치수안정화, 주조변형, 가공변형, 용접변형 등 잔류응력을 제거할 목적으로 350°C, 2 h 가열하여 서냉시키는 어닐링한 상태

T4: 용체화처리 후 충분히 안정한 상태까지 자연시효한 상태

T5: 주조 후 실온까지 냉각하여 강도향상, 치수안정화를 위해 인공시효한 한 상태

T6: 용체화처리 후 소입시켜 인공시효경화처리 한 상태

T7: 용체화처리 후 소입시켜 특별히 성질을 조절하려고 내부응력을 감소시켜 강도는 저하되지만 고인성, 치수안정화, 내식성개선을 목적으로 과시효처리 한 상태

2.1.3 기계적 성질

Table 4에 나타난 주물용 알루미늄합금의 기계적 특성은 양호한 조건에서 주조, 열처리한 시편을 가지고 측정된 기계적 성질의 하한값을 나타낸 것이다. 실제 주물의 제조에 있어서는 주물의 기계적 성질이 시험편에서의 값과 가깝게 되도록 노력하여야 한다. 일반적으로 실제 주물의 기계적 성질(실체강도)은 냉각속도의 차이, 각종 결함의 존재로 인해 표준값보다 낮다. 주물의 강도는 일반적으로 압연, 압출, 단조 등의 소성가공을 한 제품의 강도에 비교하여 결함발생 등으로 시험편채취 위치에 따라서 변동이 심하므로 충분히 고려할 필요가 있다. 주물의 기계적 성질은 다음과 같은 재료본래의 특성과 결함 등에 의한 마이너스요인과의 조합으로 결정된다고 생각할 필요가 있다.

【주물의 기계적 성질을 지배하는 요인】

(가) 재료본래의 특성에 미치는 요인

- [합금조성] · 주요합금조성
- 불순물, 개량성분
- [조직 거칠기] · 사용주형, 주조조건
- 냉각속도
- [열처리] · 용체화조건
- 소입, 실온방치조건
- 인공시효조건

(나) 결함 등에 의한 마이너스 요인

- [기공(porosity)] · 용탕가스함유량, 용탕처리
- 냉각속도
- [수축결함] · 주조방안
- 주조조건
- [개재물] · 원재료
- 용탕처리
- [편석] · 주조조건

2.1.4 주조성

알루미늄합금 주물의 제조에 있어서는 합금이 가지는 주조성의 좋고 나쁨의 척도가 아주 중요한 의미를 갖는다. 기계적 성질을 운운하기 전에 결함이 없는 건전한 주물을 제조할 수 있는지 없는지가 우선 문제가 된다. 주조성이 나쁜 합금을 사용한 경우에는 주조결함이 발생하기 쉬워서 건전한 주물로서 인정받기가 쉽지 않다. 외관, 기계적 성질 등의 품질 면에서의 저하뿐 만이 아니고 불량률의 증가에 의해 경제적으로 큰 부담을 갖는 경우가 많다. 합금 선택은 기계적 성질, 물리적 성질, 화학적 성질 등을 중심으로 검토하므로 반드시 주조성을

우선적으로 고려해야만 하는 것은 아니지만 알루미늄합금의 주조성을 충분히 이해하여 가능한 한 건전한 주물을 만들 수 있는지 염두 해 두어야한다. 주조용 알루미늄합금의 주조성 및 제특성에 대하여 정리한 것을 Table 5에 나타낸다.

주조성을 나타내는 구성요인과 그 지배요인을 살펴보면, 다음과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다.

(1) 유동성(주형에의 충전성)

- ① 용탕의 직선적인 흐름성으로 주형에의 용탕의 전체적인 충전성
 - ② 용탕의 미세부분에의 충전성으로 세밀한 부분의 재현성
 - ③ 압탕효과와 같은 용탕 보급성
- ①, ②은 주로 합금의 응고양식에 대한 영향을 나타내고 ③은 점성이나 표면장력 또는 표면산화의 영향을 받기 쉽다. 위와 같은 것들이 불충분한 경우 여러 종류의 주조결함이 발생한다.

(2)체적수축특성

알루미늄합금은 약 3~6% 응고수축 하는데 응고양식에 따라서 외부 및 내부의 수축흡 기공(porosity) 등의 결함이 발생한다. 일반적으로는 주조방안, 압탕, 형온도제어 등으로 지향성응고를 시켜 제품밖으로 결함부위를 유도하지만 주물제품 부위에 남는 경우 결함이 된다.

(3)주조균열

응고진행과 더불어서 발생하는 선(線)수축으로 인해 주물자체 또는 주형에 의해 구속되어 발생하는 수축응력에 주물이 견딜 수 없을 때 주조균열이 발생한다. 주조균열의 종류는 ①고상선 이상의 온도에서 발생하는 열간취성 ②고상선이하의 저온에서 발생하는 냉간취성이 있다.

2.1.5 주조 조직

알루미늄합금 주물의 조직관찰은 주물의 응고상태, 결정립도, 덴드라이트의 크기, 금속간화합물의 크기와 분포상태, Al-Si계 합금의 개량처리 상태, 열처리 상태 등을 검토하고, 아울러서 불순물, 하드 스폿트(hard spot), 비금속개재물, 기공(porosity), 균열 등의 결함검출을 위해 실시한다. 주물의 조직에는 거대조직(macro-structure) 과 미세조직(micro-structure)이 있다. 거대조직은 주물의 광범위한 시료면을 연마, 부식조직을 출현시켜 육안이나 10배 정도 이하의 저배율로 관찰하는 조직으로 응고형태나 결정립도를 측정한다. 미세조직은 좁은 범위의 시료면을 연마, 부식하여 광학현미경으로 20~1,000배의 배율로 관찰하여 덴드라이트, 금속간화합물, 불순물 등의 크기나 분포상태 및 열처리 상태 등을 조사한다. 개재물이나 기공 등의 검출에는 연마후 부식하지 않고 관찰하는 것이 좋은 경우도 있다. 대표적인 주조조직을 Fig. 2, 및 Fig. 3에 나타낸다.

Fig. 2는 Al-5%Mg합금에 결정립미세화제인 Ti양을 달리하여 첨가한 주괴의 조직을 나타낸다. Ti을 첨가하지 않은 경우와 비교하여 Ti을 첨가한 주괴에서는 결정립미세화가 현저히 나타난다. Fig. 3은 Al-7%Si합금의 응고과정중에서의 α-덴드라이트의 생성과 성장의 형태를 나타낸다. 액상선 온도로부터의 온도저하가 진행되면서 덴드라이트가 성장함을 알 수 있다.

미세조직관찰에서는 수치상으로 발달한 덴드라이트조직의 가지 간격인 DAS(dendrite arm spacing)을 측정하여 냉각속도를 추정할 수 있다. 동시에 공정의 크기, 금속간화합물의 존재 여부, 편석유무, 개재물, porosity 유무 등등 여러 정보를 얻어

서 주물의 건전성을 평가하고 문제발생시의 원인규명 등 다방면으로 이용할 수 있다.

2.2 다이캐스팅용 알루미늄합금

2.2.1 합금의 종류 및 물리적 성질

다이캐스팅용 합금은 주물용합금의 일종이지만 다이캐스팅이라는 주조방법이 사형, 금형, 저압주조 등과는 성격이 다르기 때문에 합금조성에 있어서도 다른 주조용합금과는 조금 다르다. 그 요점은 다음과 같다.

1) 고속, 고압으로 용융금속을 다이스 내에 압입하지만 제품의

이 있어서 합금으로서는 양호한 용탕흐름성이 요구된다. 그러므로 용탕의 흐름성이 우수한 Al-Si계, Al-Si-Cu계가 주가 된다.

2) 고속, 고압주조를 하므로 다이스에 용융금속이 용착하기 쉽기 때문에 이것을 방지할 목적으로 철 성분을 많이 함유한다.

3) 다이캐스팅주물은 냉각속도가 크기 때문에 미세한 결정조직을 얻는다. 그러므로 다른 주조방법의 경우처럼 결정립 미세화제를 첨가하지 않는 것이 일반적이다.

4) 냉각속도가 빠르고 조직이 미세화 되어 불순물성분의 영향이 완화되며, 경제적으로도 불순물 허용량이 큰 쪽이 유리하기 때문에 규격적인 면에서나 실제적인면에 있어서도 2차합금

Table 4. 알루미늄합금 주물의 기계적성질(실온)

| 합금종류 | 조질기호 | 금형 | | | | | | 사형 | | | | |
|-------|------|---------------------------|-----------------------------|---------|----------|---------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|---------|----------|--|
| | | 인장강도 N/mm ² | 0.2%내력 N/mm ² | 신율 % | 경도 HB | 충격치 kJ/mm ² | 피로강도 N/mm ² 2×10 ⁷ 회 | 인장강도 N/mm ² | 0.2%내력 N/mm ² | 신율 % | 경도 HB | |
| AC1A | F | 185 | 75 | 10.8 | 52 | 98 | 75 | 160 | 85 | 5.0 | 49 | |
| | T6 | 285 | 250 | 12.3 | 80 | 137 | 85 | 270 | 175 | 4.5 | 75 | |
| AC1B | T4 | 400 | 250 | 21.0 | 110 | - | 130 ⁽⁵⁾ | 400 | 265 | 14.0 | 110 | |
| | T6 | 420 | 380 | 8.0 | 125 | 121 | - | 420 | 395 | 3.0 | 125 | |
| AC2A | F | 225 | 140 | 2.6 | 79 | 20 | 95 | 195 | 150 | 1.5 | 67 | |
| | T6 | 345 | 280 | 1.6 | 116 | 19 | 95 | 310 | 290 | 0.5 | 88 | |
| AC2B | F | 220 | 85 | 0.8 | 61 | 50 | 100 | 170 | 90 | 0.6 | 56 | |
| | T6 | 305 | 200 | 0.9 | 81 | 42 | 90 | 245 | 165 | 0.4 | 58 | |
| AC3A | F | 195 | 75 | 11.6 | 52 | 108 | 65 | 165 | 75 | 7.4 | 46 | |
| AC4A | F | 215 | 115 | 6.0 | 64 | 54 | 90 | 155 | 80 | 4.2 | 53 | |
| | T6 | 300 | 250 | 3.2 | 94 | 34 | 90 | 265 | 225 | 1.6 | 86 | |
| AC4B | F | 270 | 180 | 2.2 | 84 | 25 | 95 | 180 | 145 | 1.1 | 63 | |
| | T6 | 345 | 205 | 1.6 | 106 | 34 | 115 | 260 | 215 | 1.1 | 79 | |
| AC4C | F | 200 | 105 | 8.2 | 60 | 59 | 75 | 145 | 85 | 3.7 | 57 | |
| | T6 | 285 | 225 | 7.3 | 95 | 44 | 90 | 230 | 190 | 2.8 | 81 | |
| AC4CH | F | 160 | 95 | 10.7 | 55 | 37 | >80 ⁽⁶⁾ | 160 | 95 | 3.8 | 58 | |
| | T6 | 260 | 260 | 16.8 | 70 | 60 | >80 ⁽⁶⁾ | 230 | 165 | 5.2 | 80 | |
| AC4D | F | 225 | 130 | 3.9 | 74 | 33 | >80 ⁽⁶⁾ | 180 | 140 | 2.0 | 78 | |
| | T6 | 320 | 240 | 4.1 | 98 | 25 | >80 ⁽⁶⁾ | 270 | 230 | 1.9 | 101 | |
| AC5A | F | 250 | 170 | 2.6 | 91 | 20 | 90 | 300 | 180 | 1.0 | 91 | |
| | T6 | 356 | 265 | 1.1 | 119 | 20 | 105 | 275 | 225 | 0.8 | 109 | |
| AC7A | F | 245 | 105 | 25.3 | 64 | 421 | 80 | 210 | 110 | 10.0 | 61 | |
| AC8A | F | 220 | 140 | 1.3 | 88 | 10 | 105 | 155 | 130 | 1.0 | 79 | |
| | T5 | 260 | 220 | 1.0 | 100 | - | 120 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| | T6 | 335 | 310 | 1.0 | 121 | 12 | 120 ⁽⁶⁾ | 215 | - | 0.5 | 116 | |
| AC8B | T7 | 295 | 275 | 1.0 | 107 | - | 120 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| | F | 250 | 200 | 1.2 | 95 | 29 | 100 | 175 | 145 | 1.0 | 84 | |
| | T5 | 260 | 235 | 1.0 | 107 | - | 115 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| | T6 | 335 | 315 | 1.0 | 124 | 12 | 100 ⁽⁶⁾ | 280 | 265 | 0.6 | 124 | |
| AC8C | T7 | 280 | 255 | 1.0 | 107 | - | 121 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| | F | 230 | 230 | 0.9 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T5 | 280 | 230 | 1.0 | 102 | - | 100 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| AC9A | T6 | 390 | 255 | 1.0 | 128 | 12 | 100 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| | T7 | 300 | 260 | 2.0 | 101 | - | 105 ⁽⁶⁾ | - | - | - | - | |
| AC9B | T5 | 150 | 150 | 0.2 | 110 | - | 85 | - | - | - | - | |
| AC9B | T5 | 185 | 155 | 0.5 | 108 | - | 95 | - | - | - | - | |

두께가 얇아야하며, 우수한 치수정밀도를 얻기 위하여 금형주조처럼 단열성 도포제를 사용하지 않는 등 주형 충전의 저해요인

등 불순물이 조금 많은 원료를 사용하기가 쉽다. 다이캐스팅합금의 선택에 있어서는 제품의 용도 및 2차 가공

Table 5. 주조성 및 제 특성 비교

| 합금 | 적응성 | | 압탕효과 | 수축균열경향 | 내기밀성 | 충진성충진성 | 가주성가주성 | 응고수축 | 피삭성 | 연마성 | 용접성 | 양극산화외관 | 양극산화성 |
|--|-----|----|------|--------|------|--------|--------|------|------------------|------------------|-----|--------|-------|
| | 사형 | 금형 | | | | | | | | | | | |
| AC1A-F AC1A-T4 AC1A-T6 | 가 | 열 | 가 | 열 | 가 | 양 | 가 | 대 | 양 우 우 | 가 양 양 | 가 | 우 | 양 |
| AC1B-F AC1B-T4 AC1B-T6 | 가 | 열 | 가 | 열 | 가 | 양 | 가 | 대 | 양 우 우 | 가 양 양 | 가 | 우 | 양 |
| AC2A-F AC2A-T6 | 우 | 양 | 양 | 가 | 우 | 양 | 가 | 소 | 양 양 | 가 가 | 양 | 양 | 가 |
| AC2A-F AC2A-T6 | 우 | 양 | 양 | 양 | 양 | 양 | 양 | 소 | 양 양 | 열 가 | 양 | 양 | 가 |
| AC3A-F | 양 | 양 | 우 | 우 | 가 | 우 | 우 | 중 | 열 | 열 | 우 | 열 | 열 |
| AC4A-F AC4A-T6 | 우 | 우 | 우 | 양 | 양 | 우 | 우 | 중 | 가 양 | 가 가 | 양 | 열 | 열 |
| AC4B-F AC4B-T6 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 중 | 가 양 | 열 가 | 양 | 열 | 가 |
| AC4C-F AC4C-T5 AC4C-T6 AC4C-T61 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 중 | 열 가 양 양 | 열 열 가 가 | 우 | 열 | 양 |
| AC4CH-F AC4CH-T5 AC4CH-T6 AC4CH-T61 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 우 | 중 | 열 가 양 양 | 열 열 가 가 | 우 | 열 | 양 |
| AC4D-F AC4D-T5 AC4D-T6 | 양 | 양 | 양 | 우 | 양 | 양 | 양 | 중 | 가 가 양 | 열 열 가 | 우 | 열 | 양 |
| AC5A-O AC5A-T6 | 가 | 가 | 열 | 열 | 가 | 가 | 가 | 대 | 양 우 | 가 양 | 열 | 양 | 양 |
| AC7A-F | 가 | 열 | 열 | 열 | 열 | 가 | 열 | 대 | 우 | 우 | 열 | 우 | 우 |
| AC8A-F AC8A-T5 AC8A-T6 | 양 | 양 | 양 | 우 | 양 | 우 | 우 | 중 | 가 가 양 | 열 열 열 | 가 | 열 | 가 |
| AC8B-F AC8B-T5 AC8B-T6 | 양 | 우 | 양 | 우 | 양 | 양 | 양 | 중 | 가 가 양 | 열 열 열 | 가 | 열 | 가 |
| AC8C-F AC8C-T5 AC8C-T6 | 양 | 우 | 양 | 우 | 양 | 양 | 양 | 중 | 가 가 양 | 열 열 열 | 가 | 열 | 가 |
| AC9A-T5 AC9A-T6 AC9A-T7 | 열 | 양 | 열 | 가 | 가 | 열 | 열 | 소 | 열 열 열 | 열 열 열 | 열 | 열 | 열 |
| AC9B-T5 AC9B-T6 AC9B-T7 | 열 | 양 | 열 | 가 | 가 | 가 | 가 | 소 | 열 열 열 | 열 열 열 | 열 | 열 | 열 |

방법에 맞는 합금을 선택하여야 한다. 그런데 다이캐스팅합금의 기계적 특성은 일반적으로 합금성분보다는 오히려 주조방안이나 주조조건에 의한 영향이 크다고 알려져 있으므로 그러므로

본래의 합금성능을 최대한으로 발휘할 수 있도록 다이캐스팅 주조기술에 대한 검토를 면밀히 하여야 한다.

Table 6에 다이캐스팅용 알루미늄합금의 화학조성에 따른 중

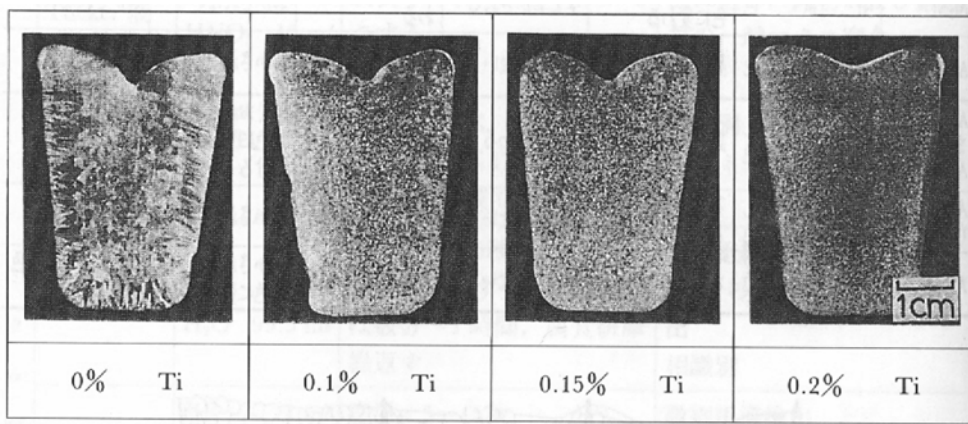


Fig. 2. Al-5%Mg합금에 결정립미세화제인 Ti양을 달리하여 첨가한 주괴의 조직

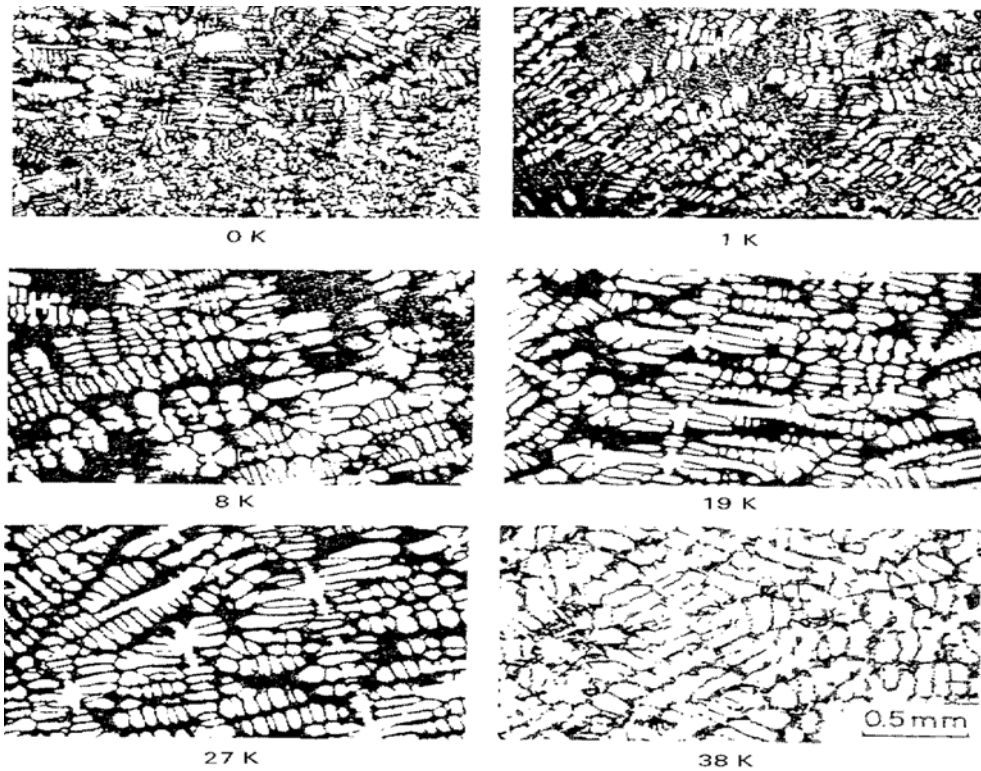


Fig. 3. Al-7%Si합금의 응고중 고상선으로부터의 온도저하에 따른 α -텐드라이트의 생성과 성장

류를 나타낸다. 일반용 다이캐스팅합금은 ADC10, ADC10Z, ADC12, ADC12Z이고 나머지는 특수용 다이캐스팅 합금이다.

Table 7에 다이캐스팅용 알루미늄합금의 물리적 성질을 나타낸다. 용점이나 비열 등은 비교적 다이캐스팅주물의 건전성에 미치는 영향이 적지만 비중(밀도), 열전도도, 열팽창계수 등은 기계적 성질과 마찬가지로 결합이나 조질의 영향을 받기 쉬우므로 엄밀한 값을 필요로 하는 경우에는 그때 그때 실제 대상이 되는 다이캐스팅주물을 측정 할 필요가 있다.

Al-Si 2원계 합금의 Si양과 열팽창계수와의 관계에서는 Si양의 증가와 더불어 열팽창계수가 직선적으로 감소한다. Si이 첨가되지 않은 ADC5,6은 열팽창계수 값이 크다. Si양은 영률과

의 관계도 깊은데 Si 양이 많은 쪽이 높은 영률을 나타낸다.

2.2.2 다이캐스팅용 알루미늄합금의 기계적 성질(표준)

각종 다이캐스팅주물의 기계적 성질은 일반적으로 제품과는 별도로 주탕하여 제작한 시편을 가지고 측정한 결과이다. 별도로 제작한 표준시편의 측정값은 이상적인 조건에서 제조된 것이기 때문에 실제 다이캐스팅 제품의 기계적 성질 값과는 큰 차이를 보인다. Table 8에 표준시편으로 측정된 다이캐스팅용 알루미늄합금의 기계적 성질을 나타낸다. 인장강도의 예를 보면 실제 값은 표준값에 비하여 30%정도 작은 값을 나타낸다. 기계적 성질에 미치는 인자의 영향을 구체적으로 나타내면

- 1) 성분의 영향(합금성분, 불순물 등)

- 예: Cu 및 Mg의 증가는 인장강도, 항복강도, 경도 값을 증가시킴
 Fe의 증가는 인장강도를 증가시키지만 연신율, 충격값을 저하시킴
 Zn의 증가는 기계적 성질을 약간 변화시키지만 비교적 작음
- 2) 열처리영향(용체화 온도 및 시간, 시효온도 및 시간 등)
 - 3) 냉각속도 및 조직의 영향(제품두께, 주조조건 등)
 예: 냉각속도가 큰 표면은 아주 미세한 chill 층이 생성되어 강도가 높고 중심부는 조직의 조대화, 강제고용도의 감소, 공기함유 등의 결함도 많아서 강도가 저하함
 - 4) 결함의 영향(편석, 가스함유량, 기공, 체적수축률, 개재물, 탕주름 등의 영향)
 예: 결함이 많을수록 강도 저하함. 특히 다이캐스팅시 공기 유입으로 인해 기공발생과 개재물의 영향이 기계적 성질 저하의 가장 주된 요인임
 - 5) 기타
- 일반적으로 표준 기계적 성질은 1)~3)까지의 영향을 받고, 4)의 영향이 아주 적은 상태의 시험편에서 측정된다. 실제의

기계적 성질 값의 저하요인은 4) 즉 “결함의 영향”을 아주 크게 받아서 저하하는 것이 가장 큰 요인이며 일부에서는 두께가 두꺼워지고 요인3)에 해당되는 냉각속도의 저하와 이에 동반하는 조직의 변화도 요인이 된다.

2.2.3 다이캐스팅용 알루미늄합금의 주조성

Al-Si2원계 합금에서는 Si양의 증가와 함께 유동장(유도성의 척도)이 증가하며 과공정인 16%Si 부근에서 가장 유동장이 길다. 일반적으로 공정점에서 유동성이 제일 우수하지만 Al-Si 합금의 경우는 공정응고의 특징 및 편석의 영향으로 약간 공정점보다 Si 함유량이 높은쪽으로 유동성의 최고점이 이동한다.

2.2.4 다이캐스팅용 알루미늄합금의 주조조직

Fig. 4에 ADC12합금 다이캐스팅의 관두께와 조직의 관계를 나타낸다. 이 합금의 조직은 주로 알루미늄에 약간의 Si, Cu, Mg 등이 고용된 α-덴드라이트상으로 발달한 초정과 초정α와 Si으로 이루어진 공정조직의 두가지 조직으로 구성되어 있다. 모든 조직이 냉각속도의 영향을 크게 받으며 냉각속도가 클수록 조직은 미세하게 된다. 또한 표면부에서는 아주 치밀한 침정이 생성되어 있으며 중심부로 갈수록 조직이 조대화 됨을

Table 6. 다이캐스팅용 알루미늄합금의 화학조성(mass%)에 따른 분류

| 합금 | Cu | Si | Mg | Zn | Fe | Mn | Ni | Sn | Al |
|--------|---------|-----------|-----------|-------|-------|---------|-------|-------|------|
| ADC1 | 1.0이하 | 11.0~13.0 | 0.3이하 | 0.5이하 | 1.3이하 | 0.3이하 | 0.5이하 | 0.1이하 | bal. |
| ADC3 | 0.6이하 | 9.0~10.0 | 0.4~0.6 | 0.5이하 | 1.3이하 | 0.3이하 | 0.5이하 | 0.1이하 | bal. |
| ADC5 | 0.2이하 | 0.3이하 | 4.0~8.5 | 0.1이하 | 1.8이하 | 0.3이하 | 0.1이하 | 0.1이하 | bal. |
| ADC6 | 0.1이하 | 1.0이하 | 2.5~4.0 | 0.4이하 | 0.8이하 | 0.4~0.6 | 0.1이하 | 0.1이하 | bal. |
| ADC10 | 2.0~4.0 | 7.5~9.5 | 0.3이하 | 1.0이하 | 1.3이하 | 0.5이하 | 0.5이하 | 0.3이하 | bal. |
| ADC10Z | 2.0~4.0 | 7.5~9.5 | 0.3이하 | 3.0이하 | 1.3이하 | 0.5이하 | 0.5이하 | 0.3이하 | bal. |
| ADC12 | 1.5~3.5 | 9.6~12.0 | 0.3이하 | 1.0이하 | 1.3이하 | 0.5이하 | 0.5이하 | 0.3이하 | bal. |
| ADC12Z | 1.5~3.5 | 9.6~12.0 | 0.3이하 | 3.0이하 | 1.3이하 | 0.5이하 | 0.5이하 | 0.3이하 | bal. |
| ADC14 | 4.0~5.0 | 16.0~18.0 | 0.45~0.65 | 1.5이하 | 1.3이하 | 0.5이하 | 0.5이하 | 0.3이하 | bal. |

Table 7. 다이캐스팅용 알루미늄합금의 물리적 성질

| 합금 | 밀도 (20°C) Mg/m ³³ | 액상온도 (°C) | 고상온도 (°C) | 선팽창계수(×10 ⁻⁶ /°C) | | | 비열 (20°C) J/kg°C | 열전도도 (25°C) W/m°C |
|-------|---------------------------------|-----------|-----------|------------------------------|-------------|-------------|---------------------|----------------------|
| | | | | 20-100 (°C) | 20-200 (°C) | 30-300 (°C) | | |
| ADC1 | 2.66 | 585 | 574 | 20.5 | 21.5 | 22.5 | 963 | 121 |
| ADC3 | 2.66 | 590 | 560 | 21.0 | 22.0 | 23.0 | 963 | 113 |
| ADC5 | 2.56 | 620 | 535 | 25.0 | 26.0 | 27.0 | 963 | 88 |
| ADC6 | 2.65 | 640 | 590 | 24.0 | 25.0 | 26.0 | 963 | 146 |
| ADC10 | 2.74 | 590 | 535 | | 22.0 | 22.5 | 963 | 96 |
| ADC12 | 2.70 | 580 | 515 | | 21.0 | | 963 | 92 |

Table 8. 표준시험편으로 측정된 다이캐스팅용 알루미늄합금의 기계적 성질

| 합금종류 | 인장강도 N/mm ² | 0.2%내력 N/mm ² | 신율 % | 충격치 kJ/m ² | 피로강도 N/mm ² 2×10 ⁷ 회 |
|-------|------------------------|--------------------------|------|-----------------------|---|
| ADC1 | 240 | 145 | 1.8 | 56 | 130 |
| ADC3 | 295 | 170 | 3.0 | 144 | 125 |
| ADC5 | 280 | 185 | 7.5 | 202 | 140 |
| ADC6 | 280 | - | 10.0 | - | 125 |
| ADC10 | 295 | 170 | 2.0 | 85 | 140 |
| ADC12 | 295 | 185 | 2.0 | 81 | 140 |

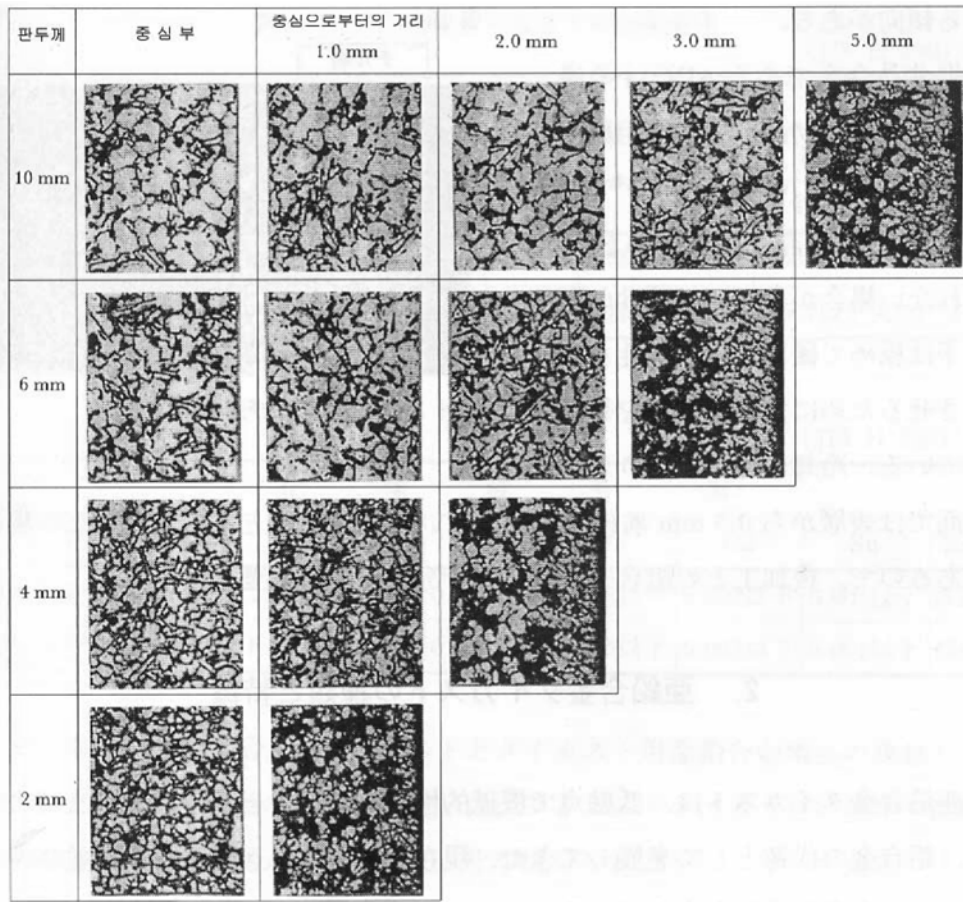


Fig. 4. ADC12 다이캐스팅합금의 판두께에 따른 표면부에서 중심부의 주조조직

알 수 있다. 칠(chill) 층이 생성된 표면부는 응고속도가 빨라서 Cu, Fe가 강제 고용되어 있고 조직도 치밀하여 가장 큰 강도를 나타낸다. 냉각속도가 느린 중심부에서는 공정 Si이 칩

상으로 발달함과 동시에 Fe가 많은 경우에는 칩상의 Al-Fe-Si 화합물이 생성되어 있다. 이 3원계 화합물의 생성은 기계적 성질을 저하시킨다.