

공정 Al-Si 합금의 개량처리에 따른 조직관찰 및 기계적 특성에 관한 연구*

윤지현 · 설은철 · 이광학
첨단소재공학부

<요약>

주조용 Al 합금(AC4B)을 주단조법에 적용하기 위해 먼저 Sr과 TiB를 첨가하여 주조성 및 단조성이 우수한 주단조 소재를 개발하고 그 기계적 특성을 평가하였다.

먼저, 중력주조시 조대하게 정출하는 침상의 공정 Si를 개량처리하기 위해 공정 Si 개량화제인 Sr 모합금을 0.025~0.1wt.%로 변화시켜 첨가한 결과 침상의 공정 Si이 미세한 섬유상으로 변화한 것을 관찰할 수 있었으며, 0.075wt.%일 때 가장 우수한 개량화 효과를 나타내었다. 그러나, Sr을 첨가하지 않은 상태에서 균일하게 관찰되던 α -Al상이 Sr 첨가로 인해 조대한 수지상으로 형태가 변화한 것을 관찰할 수 있었다. 따라서, α -Al 고용체상을 미세화하기 위하여 Sr이 0.075wt.% 용해된 알루미늄 합금 용탕에 AlTi₅B 모합금을 0.05~0.5wt.%로 변화시키면서 첨가한 결과 α -Al 고용체상이 미세화됨을 관찰할 수 있었으며, 0.1wt.%일 때 가장 우수한 미세화 효과를 나타내었다.

한편, 개량화 및 미세화 처리한 시편의 기계적 특성 평가를 위해 인장시험과 내마모시험을 실시한 결과 인장강도, 신율 및 내마모성이 주방상태에 비해 크게 향상되는 것으로 나타났다.

A study on the microstructural changes and mechanical properties with modification in eutectic Al-Si alloys

Ji-Hyun Yoon · Eun-Cheol Seol · Kwang-Hak Lee
School of Materials Science and Engineering

* 본 연구는 2001학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음을 밝히고 이에 감사드립니다.

<Abstract>

Recently, many studies have been carried out to process on the purpose of lightness in a transport parts because of the saving energy, the environmental problem.

The cast-forging process can be expected to lower costs without decreasing the mechanical properties.

So, the finest microstructure is needed to get for applying the cast-forging process with Al-Si alloy because the microstructure affects to the cast-forging process.

For refinement treatment of eutectic Si and α -Al solid-solution phase, Sr and TiB were added in Al-Si alloys. The finest microstructure could be observed when 0.075wt.%Sr and 0.1wt.%TiB were added respectively. In this case, tensile strength and elongation much more increased than as casting.

제 1 장 서 론

최근 에너지 절약 및 환경문제에 대한 관심이 고조되면서 특히, 각종 수송기기의 경량화를 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.

수송기기의 대표적인 자동차의 경우, 국가 산업에서 없어서는 안될 가장 비중이 높은 품목으로 자리잡고 있으며, 이를 뒷받침해 주는 것이 자동차 관련 부품산업으로 이들 부품 산업에 대한 기술 경쟁력은 곧 국가산업 경쟁력을 좌우하는 중요한 인자가 되고 있다.

자동차 부품의 경량화로 인해 기대되는 효과는 연비 향상을 통한 엔진효율의 증가와 배기가스의 발생 감소로 인한 환경문제 개선을 들 수 있다[1].

이런 추세에 따라, 최근에는 경량소재이면서 비강도와 내식성 그리고 열전도성이 우수하며, 특히 재활용 측면에서 철강재료나 기타 재료에 비해 우수한 특성을 지닌 알루미늄 합금에 대한 관심이 높아지고 있다[2~4].

자동차용 알루미늄 부품의 경우, 보통 압연, 압출, 단조 및 주조품으로 생산되는데, 주물은 자동차 중량의 15%를 점유하고 있으며, 특히 주행성능에 직접 관계되는 엔진, 미션 등의 유니트는 그 중량의 80%가 주물로 제조되고 있는 것을 볼 때[5, 6] 주조는 가장 중요한 기술 중의 하나이다.

또한 엔진, 샷시 부품에 많이 쓰이고 있는 주철부품은 Al 합금제 부품으로의 대체가 우선적으로 가능하기 때문에 Al 합금 주조 기술의 중요성이 증대되고 있다. Al 합금의 주조 기술[7]은 주형 사용 횟수에 따라 1회용과 영구주형으로 나눌 수 있는데, 자동차용 부품의 경우 생산성이 높고 제조원가가 저렴한 영구주형에 의한 주조법이 주류를 이루고 있다.

그 중에서도 알루미늄 다이캐스트법은 고정밀도, 고강도 그리고 고생산성으로 주조할 수 있어 그 사용량이 급증하고 있다. 그러나 다이캐스트법은 용탕이 고속 고압으로 금형 cavity 내에 충전되므로 가스의 혼입으로 인한 기공이나, 충전 응고 중 cavity부보다 탕도부가 먼저 응고함으로써 최종 응고부의 수축분에 대한 용탕 보충이 어렵기 때문에 이로 인하여 발생하는 수축공 등의 내부결함이 존재하기 쉬우므로 내압기밀성이 요구되는 부품에는 다소 제한을 받고 있다[8, 9].

한편, 주조와 함께 금속가공기술 중 가장 오랜 역사를 지닌 단조법은 소재의 압축가공으로 인해 기계적 성질과 기밀성 및 신뢰성 등은 향상되나, 복잡형상의 제조가 어렵고 다단 단조에 따른 금형제작비와 제품제조 비용이 높은 단점을 가지고 있다[10].

따라서, 본 연구에서는 복잡 형상의 제품생산이 용이한 주조법과 소재의 압축가공으로 인해 기계적 성질이 우수한 단조법의 장점만을 선택한 주단조법을 적용하고자 하였다.

주단조법은 주조로 최종제품형상에 가까운 예비성형체(preform)을 만들고 이를 여러 번의 단조공정을 거치지 않고, 단 한번의 마무리 단조를 행함으로써 제품을 제조하는 기술이다.

그러나, 주단조법으로 제조한 제품을 기존 단조법으로 제조한 제품과 비교시 기계적 성질은 떨어지지만, 특수 주조법으로 제조한 제품과 비교하였을 때는 전반적인 기계적 성질이 향상되는 것으로 알려져 있다[10].

한편, 주단조에 사용되는 주조 프리폼의 미세조직에 따라 단조성이 크게 변화하게 되는데, 그 주요 인자는 기지의 용질농도와 수지상 가지의 간격(DAS) 그리고 결정립의 크기 등을 들 수 있다[9].

따라서, 주단조법을 적용하여 복잡형상의 제품을 제조하기 위해서는 우선 주조재 설정이 선행되어야 한다. 즉, 최종형상에 가까운 주조소재를 단조하므로 단조시에 목표하는 기계적 특성을 얻기 위해서는 결함이 비교적 적은 고품질의 주조품 제작이 필수적이다.

이를 위하여 본 실험에서는, 주조용 Al 합금을 주단조법에 적용하고자 주조용 Al 합금으로서 현재 상용되고 있는 아공정 Al-Si합금(AC4B)에 Si를 추가로 용해하여 공정 Al-Si 합금을 제조하였다.

그러나, 이러한 공정 Al-Si 합금은 주조시 조대한 침상의 공정 Si이 정출하게 되는데, 이는 임계 응력하에서 미세응력 집중효과를 발생시켜 소재의 기계적 특성을 저하시키는 원인이 된다.

따라서, 합금의 공정 Si 개량처리와 초정 Al 고용체를 미세화하기 위해 Sr과 TiB를 첨가하였다. 그리고 개량화제 및 미세화제를 첨가한 후 미세조직을 관찰하여 그 변화를 관찰하였으며, 기계적 특성을 평가하기 위해 인장강도 시험과 내마모 시험을 실시하였다.

제 2 장 실험방법

공정 Al-Si 합금을 주단조 공정에 적용하기 위해 먼저 주조용 합금인 상용 AC4B 합금의 ingot를 사용하여 목표 조성으로 metal Si를 첨가하여 용해하였으며, 각 합금의 조성을 Spark Emission Spectrometer(Atom Comp 181, Thermo Jarrell Ash Corp., USA)로 분석하였다. 이렇게 제조된 합금에 Cu chip(99.99%)을 820℃에서 첨가하고 약 30분 동안 진정시킨 후, 용탕의 온도를 730℃로 저하시켜 Mg를 첨가한 후 약 20분 동안 진정시켰다. 그리고, 탈가스처리를 행하여 약 10분간 진정시킨 후 200℃로 미리 예열된 금형에 주탕하였다. 여기서 Cu와 Mg는 합금의 기계적 성질과 가공성 향상을 위해 첨가하였다. 이렇게 제조된 합금 및 개량화제 그리고 미세화제의 화학적 조성을 Table. 1과 Tabel. 2에 각각 나타내었으며, Fig. 1에는 본 실험에 사용된 용해로와 중력주조금형을 나타내었다.

주단조 공정에서 단조를 실시하기전 중력주조로써 preform을 제조하기 때문에, 조직 미세화를 위하여 공정 Si의 개량처리제로 Sr 모합금을, 초정 Al 고용체상의 미세화 처리제로

는 AlTi5B 모합금을 사용하였다. 공정 Si의 개량처리를 위해서는 Table. 1의 조성으로 먼저 용탕을 제조한 후, 730°C에서 Sr 모합금을 첨가하고 약 20분간 진정시킨 후 200°C로 미리 예열된 금형에 주조하였다. Sr 첨가는 Al-9.6wt.%Sr 모합금이 사용되었으며, 합금내 Sr양이 0.025, 0.05, 0.075 및 0.1wt.%가 되도록 변화시켰다.

Sr 모합금이 첨가된 합금의 미세조직을 관찰한 후 최적의 조건을 설정하고 여기에 α -Al상의 미세화를 위해 AlTi5B 모합금을 용탕에 0.05, 0.1, 0.2 및 0.5wt.%로 각각 변화시키면서 첨가하였다. 제조된 각각의 시편에 대하여 미세조직 검사와 인장시험 및 내마모 시험을 통해 Sr과 TiB의 적절한 첨가량을 결정하였다.

미세조직검사는 광학현미경(OLYMPUS, BX51M, Japan)을 사용하였으며, 인장시험은 UTM(Universal Testing Machine, UTM2001F, 대경테크(주), Korea)을 이용하여 5mm/min의 속도로 행하였고, 내마모 시험은 SUGA type(Japan) 마모시험기를 이용하여 3.92N의 하중으로 각 시편에 대해 1200회씩 왕복운동(DS:Double Stroke) 후 무게감량을 측정하였다.

Fig. 2에 인장시험을 위한 시편의 규격을 나타내었다.

Table. 1 Chemical composition of eutectic Al-Si alloys for experiment(wt.%).

parameter	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
Eutectic Al-Si alloy	10.5~11.5	0.2~0.3	0.2~0.4	0.3↓	0.5↓	0.4↓	0.1↓	bal.

Table. 2 Chemical composition of refiner and modifier(wt.%).

parameter	Ti	B	Fe	V	Al
Refiner (α -Al)	4.7~5.1	0.96~1.02	0.17	0.08	bal.
parameter	Sr	Fe	Si	P	Al
Modifier	9.61	0.17	0.02	0.001	bal.

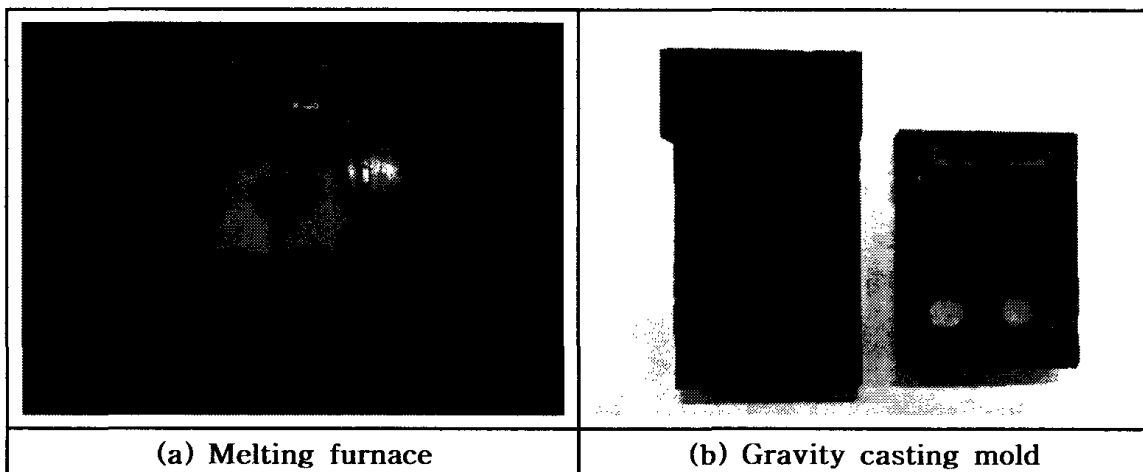


Fig. 1 Photographs of melting furnace and gravity casting mold.

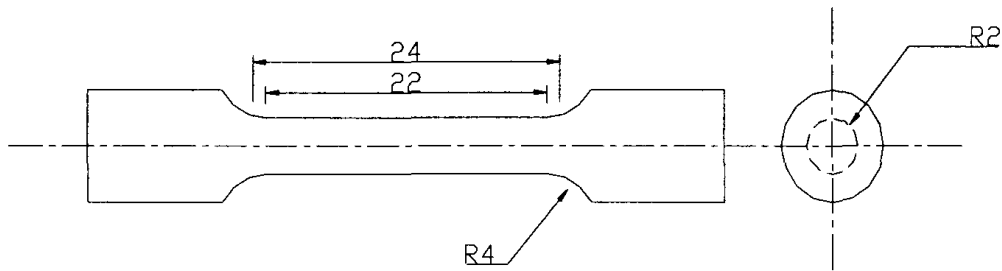


Fig. 2 Shape and dimension of tensile test(mm).

제 3 장 실험 결과 및 고찰

3. 1 공정 Al-Si 합금의 개량처리에 미치는 Sr의 영향

현재 다이캐스팅법으로 가장 많이 사용되는 알루미늄 합금은 공정계 Al-Si 합금으로, 우수한 내식성 및 내마모성, 양호한 주조성, 높은 고온강도와 경도 및 비강도 그리고 높은 열전달 계수 등의 특징을 가지고 있다. 이러한 공정계 Al-Si 합금은 현재 자동차용 알루미늄 부품인 실린더 블록, 헤드, 에어컴프레셔 및 펌프 등에 적용되고 있다[11].

그러나, 이러한 공정 Al-Si 합금을 주단조법에 적용하기 위해서는 주조시 긴 침상형으로 정출하는 공정 Si를 개량처리를 통하여 미세한 섬유상(fibrous)형태로 변화시켜 가공율과 신율을 및 인장강도 등을 향상시켜야 한다. 공정 Si의 개량화가 이루어지지 않을 경우, 공정 Si 입자는 조대한 침상으로 존재하며 이는 임계응력하에서 응력집중효과를 발생시켜 파괴의 시작점이 되기 때문이다[12].

따라서, 본 실험에서는 먼저 상용 AC4B 합금에 Si 함량을 11.5wt.%가 되도록 metal Si를 첨가하여 공정 Al-Si 합금을 제조하고 난 후, 공정 Si의 개량처리를 위하여 Sr을 Al-9.6wt.%Sr 모합금을 이용하였으며, 합금 중의 Sr 함량이 0.025, 0.05, 0.075 및 0.1wt.%가 되도록 용탕에 각각 첨가하여 주조하였다. 제조된 공정 Al-Si 합금의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 사진에서와 같이, 공정 Si이 facet한 계면으로 인해 조대한 침상형으로 성장해 있음을 볼 수 있으며, Sr 첨가량에 따른 미세조직 변화는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이, Sr의 함량이 0.025wt.%일 때는 공정 Si의 개량 효과가 일부 나타나지만 개량처리 효과가 미흡한 것을 관찰할 수 있었으며, 0.05wt.%일 때는 공정 Si의 개량화 정도가 상당히 진행되었음을 볼 수 있었다. Fig. 4의 (c)에 나타난 바와 같이 Sr의 첨가량이 0.075wt.% 이상인 경우에는 공정 Si의 형성이 매우 미세한 섬유상으로 개량처리 됨을 관찰할 수 있었으며, 그 크기는 수 μm 이하임을 알 수 있었다. 그러나, Sr을 0.075wt.% 이상 첨가시에는 더 이상의 개량효과가 나타나지 않는 것을 미세조직 관찰을 통해 확인할 수 있었다.

따라서, 본 실험에서 사용된 공정 Al-Si합금의 공정 Si의 개량화를 위한 Sr 첨가량은

0.075wt.%일 때가 가장 효과적임을 알 수 있었다.

한편, Sr을 첨가하지 않은 상태에서 균일하게 관찰되던 α -Al상이 Sr을 첨가함으로 인해 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 조대한 수지상으로 형태가 변화한 것을 관찰할 수 있었다. 이는 공정 Al-Si 합금은 응고과정에 고액공존영역이 좁아서 초정으로 정출한 α -Al 고용체가 핵성장할 여유가 없기 때문이며, Fig. 3의 미세조직에서 볼 수 있듯이 α -Al 고용체의 수지상이 관찰되지 않았다.

그러나, Sr을 첨가하면 합금의 융점은 변하지 않고 응고점이 저하되어 준고상선의 저하 현상이 일어나 고액공존영역이 넓어지게 되어 α -Al 고용체상이 수지상으로 응고하게 된 것으로 생각된다.

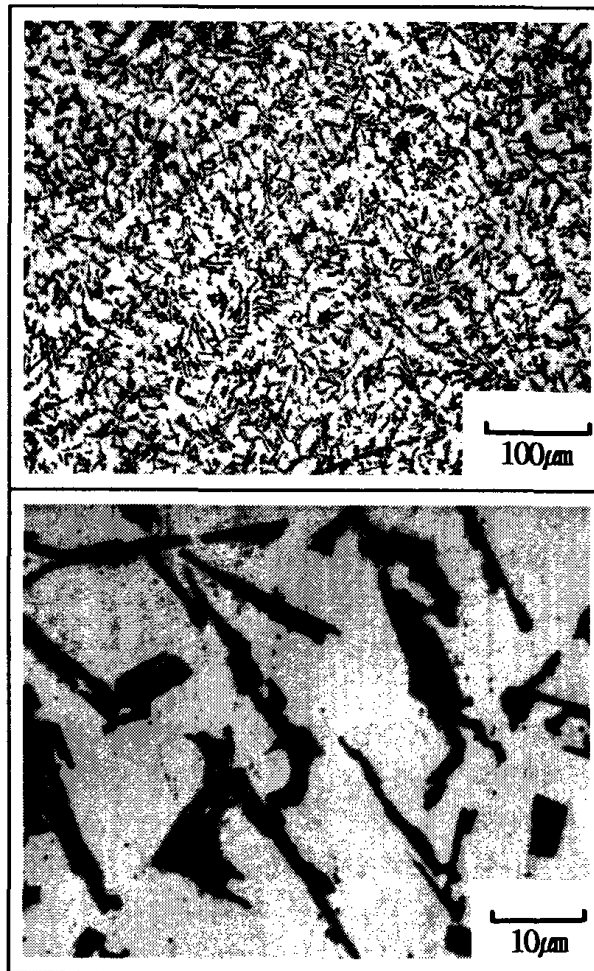


Fig. 3 Microstructures of eutectic Al-Si alloy at as casting.

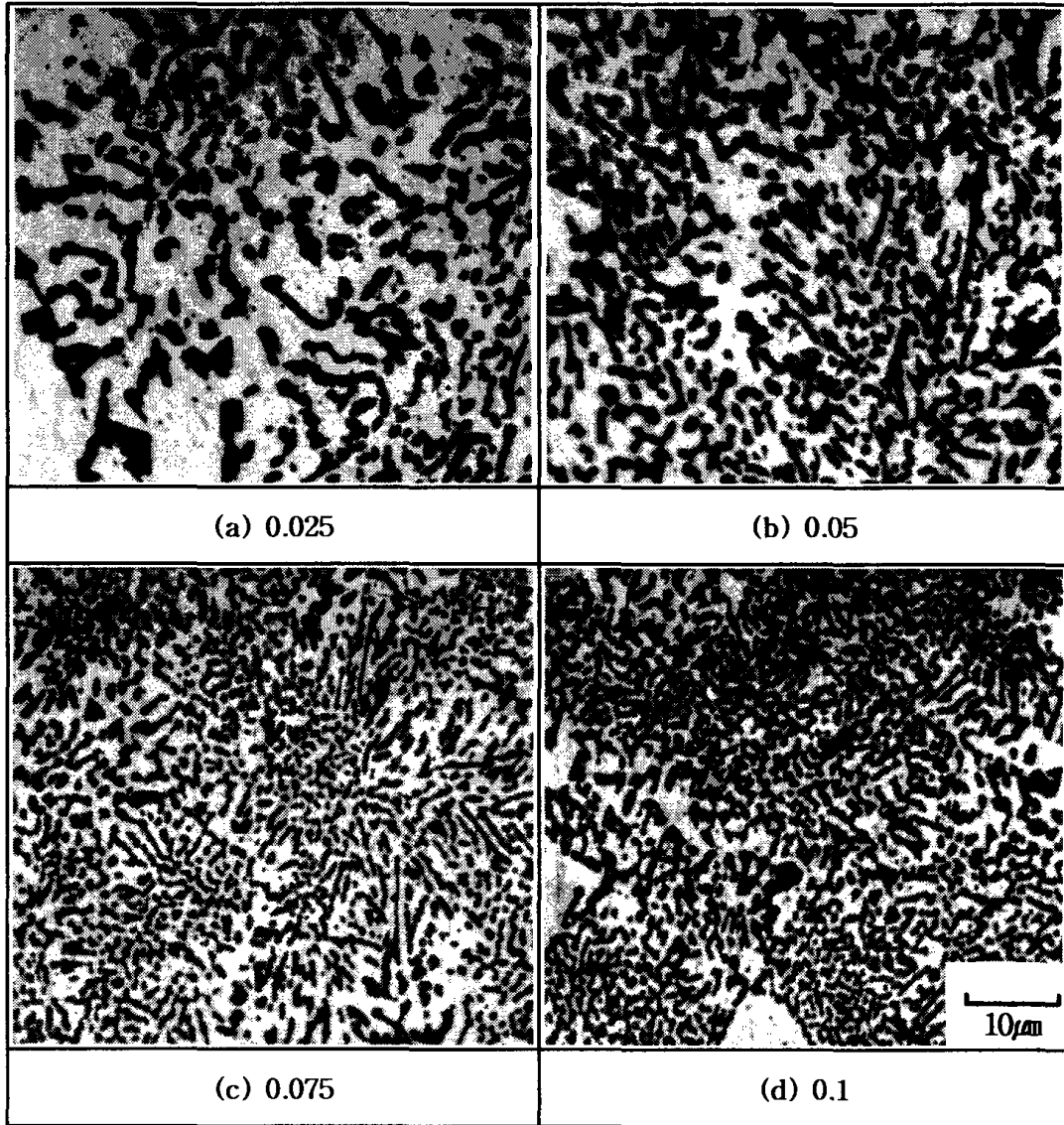


Fig. 4 Microstructures obtained with Sr addition(wt.%).
(refinement of eutectic Si)

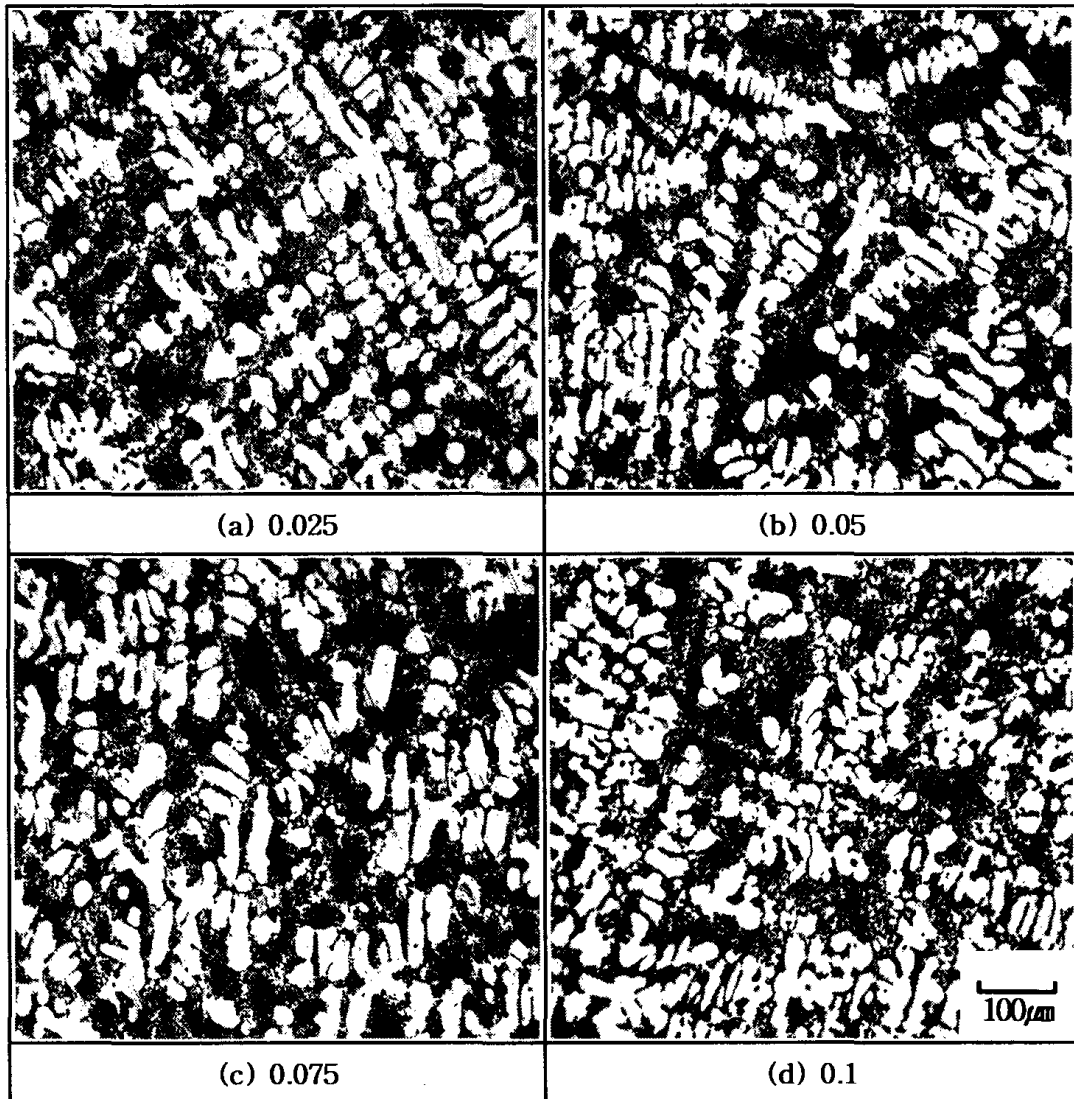


Fig. 5 Microstructures obtained with Sr addition(wt.%).
(dendrite of α -Al)

3. 2 공정 Al-Si 합금의 미세화에 미치는 TiB의 영향

공정 Al-Si 합금을 이용하여 주조 후 단조를 실시하기 위하여는 조대한 침상으로 정출하는 공정 Si의 형태를 미세한 섬유상(fibrous)으로 개량처리 해야 하며, 또한 초정 Al 고용체상의 입자크기도 미세화 시켜야 한다.

따라서, 본 연구에서는 Sr 첨가 후 비교적 조대한 수지상을 가지는 α -Al 고용체상을 미세화하기 위하여 TiB를 첨가하였다. 합금 용탕에 첨가된 TiB는 $AlTi_5B$ 모합금 형태로서, 공정 Si 개량화제인 Sr이 0.075wt.% 용해된 알루미늄 합금 용탕에 0.05, 0.1, 0.2 및 0.5wt.%로 변화시키면서 각각 첨가하였다.

TiB 첨가량에 따른 미세조직의 변화를 관찰하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 (b)에서와 같이 초정 Al 미세화제 첨가량이 0.1wt.%일 때 초정 Al 고용체상의 수지상 간격이 미세화됨을 관찰할 수 있었으며, Fig. 6의 (c)와 같이 TiB첨가량이 0.2wt.%인 경우 더 이상의 미세화 효과는 나타나지 않았고, 0.5wt.% 첨가한 경우는 수지상 간격이 오히려 다소 조대해지는 것으로 관찰되었다. 이는 Ti 첨가량이 많아지면 액상 Al 중에 Ti의 확산이 느려지므로 수지상 가지의 선형적인 성장이 억제되어 α 상의 형상이 꽃잎형상(petal-like)으로 되는 현상에 기인하여 결정립은 조대해지며, 이 현상은 냉각속도가 느릴수록 핵으로 작용하는 상이 조대해지고, 그 분포도 균일해지기 때문에 더욱 현저해진다는 Akihiko[13]의 보고와 일치하는 것으로 판단된다.

따라서, 본 실험에서는 초정 α -Al 고용체상의 입자미세화를 위해 TiB를 첨가하여 미세조직을 관찰한 결과 적절한 TiB첨가량은 0.1wt.%로 설정하였다.

Fig. 7에는 지금까지의 미세조직 관찰을 통해 최적 조건으로 판단하였던 Sr 0.075wt.%와 TiB 0.1wt.%를 첨가한 공정 Al-Si합금의 미세조직을 저배율과 고배율로 나타내었다. 사진에서 볼 수 있듯이, 조대한 침상형으로 정출하던 공정 Si상이 미세한 섬유상으로 개량처리가 되었고, 비교적 조대하게 관찰되던 α -Al 고용체상의 수지상 간격 또한 매우 좁아지는 것으로 나타났다.

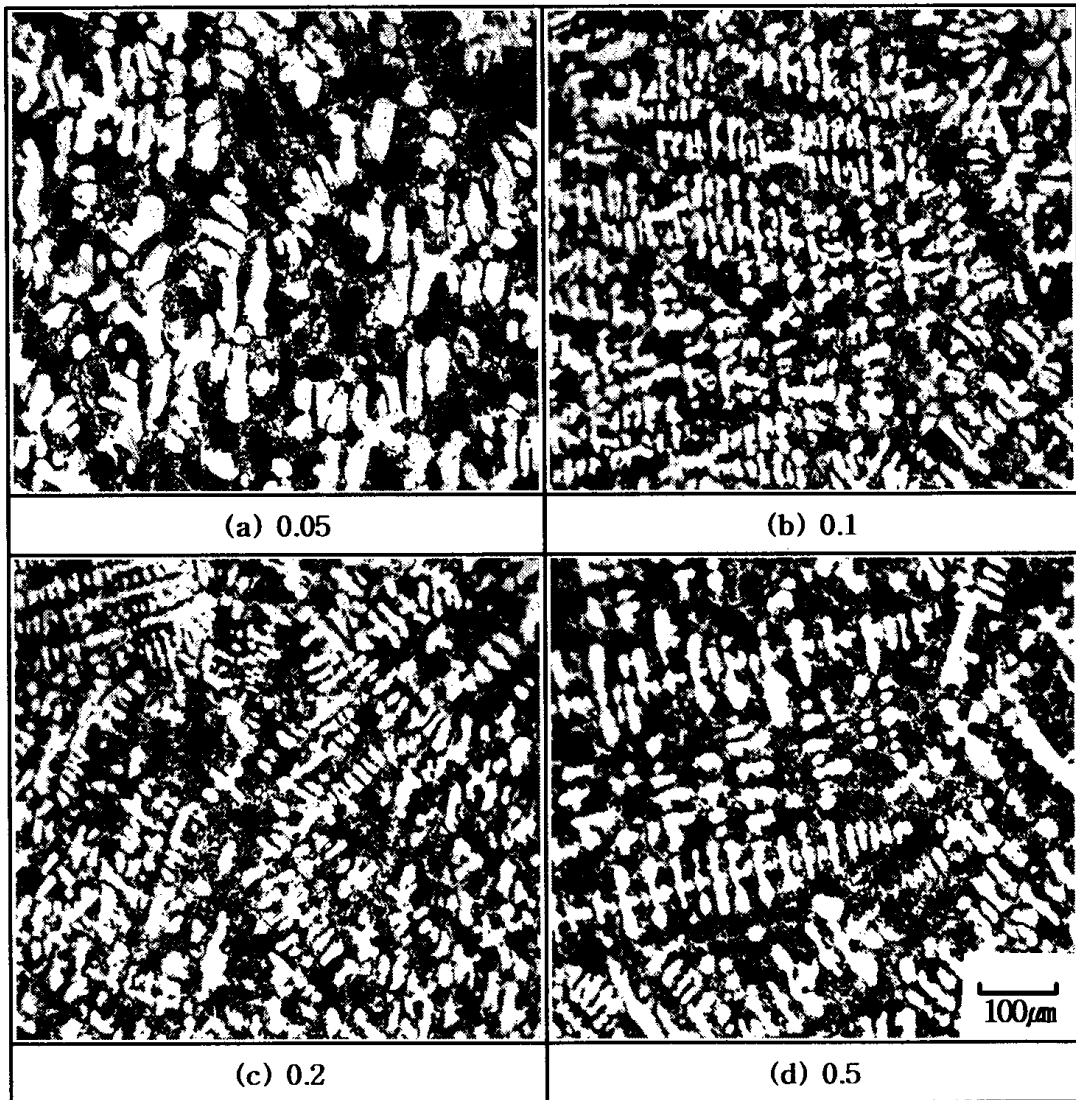


Fig. 6 Microstructures obtained with TiB addition(wt.%).

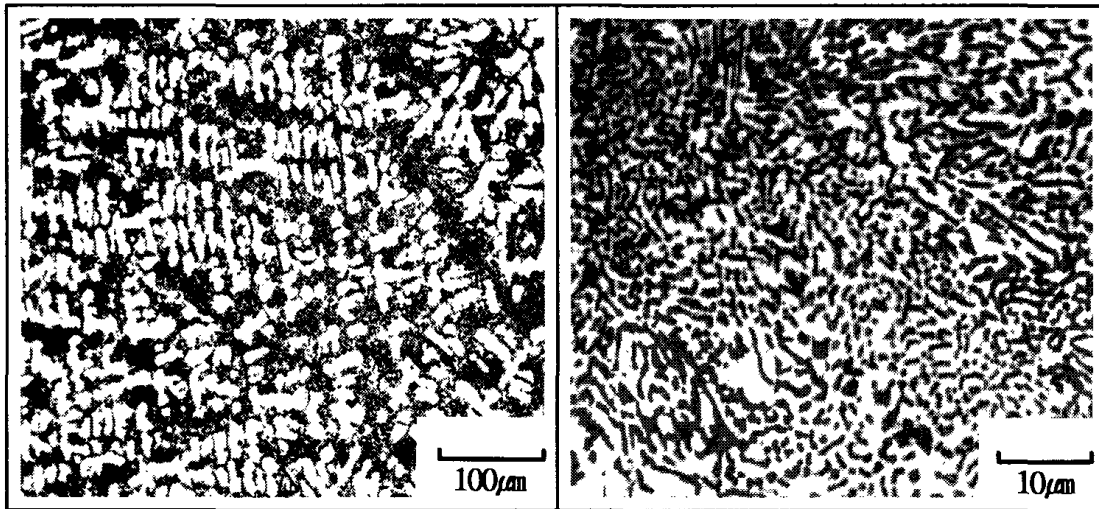


Fig. 7 Microstructures obtained with 0.075% Sr and 0.1% TiB added(wt.%).

3. 3 개량화제 및 미세화제 첨가량에 따른 기계적 특성 변화

단조 가공시 재료의 미세조직은 실제 단조시 중요한 인자로 작용하므로 공정 Al-Si 합금의 공정 Si 개량화와 α -Al 고용체상의 미세화를 위해 Sr과 TiB 합금을 첨가하여 조직을 미세화하기 위한 실험을 먼저 진행하였으며, 그에 따른 기계적 특성 평가를 위해 인장 시험과 내마모 시험을 실시하였다.

먼저 Sr 첨가량의 변화에 따른 인장 강도 값과 신율을 Fig. 8와 Fig. 9에 각각 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이, Sr을 첨가하지 않은 경우 인장강도 값은 20kgf/mm^2 , 신율은 4%로 나타났으나 Sr을 첨가하여 공정 Si를 개량처리함에 따라 인장강도 값과 신율이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 Sr을 0.075wt.% 이상 첨가하여 공정 Si를 개량처리한 경우에는 인장강도가 30kgf/mm^2 , 신율은 7% 증가하여 비교적 우수한 기계적 성질을 갖는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4에 나타난 미세조직의 변화와 비교해 볼 때 Sr 첨가로 인한 공정 Si의 개량화가 공정 Al-Si 합금의 기계적 성질 향상에 큰 영향을 미치는 것을 의미하는 것이다.

한편, Sr의 첨가량을 최적조건으로 판단하였던 0.075wt.% 첨가하고, TiB의 첨가량을 변화시켰을 경우의 인장강도 값과 신율의 변화를 Fig. 10와 Fig. 11에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, TiB 첨가에 의해 α -Al 고용체상의 수지상 가지 간격이 좁아질수록 인장강도 값과 신율이 증가함을 알 수 있었으며, 가장 미세한 조직을 나타내었던 TiB 첨가량이 0.1wt.%인 경우 그 인장강도 값은 33kgf/mm^2 , 그리고 신율은 8%로 가장 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

또한, 마모시험을 행한 후 내마모 정도를 Fig. 12에 나타내었으며, 그림에서 볼 수 있듯이, 무첨가의 경우 내마모 정도는 약 32.18DS/mg 이었으나, Sr을 0.075wt.% 첨가한 경우 내마모성이 약 33.12DS/mg 로 향상됨을 알 수 있었으며, Sr과 TiB를 0.075wt.%와 0.1wt.%씩 각각 첨가하여 공정 Si와 α -Al 고용체를 동시에 미세화한 경우 내마모성이 약 34.60DS/mg 로 가장 우수하게 나타났다.

이러한 결과는 미세조직의 변화와 밀접한 관계가 있으며, α -Al 고용체의 입자미세화와 더불어 공정 Si이 미세한 섬유상으로 개량화됨에 따라 응력집중현상이 나타나지 않고 동시에 다수의 결정립계 형상으로 인하여 표면장력이 증가되어 그 마모량이 감소한 것으로 사료된다[14].

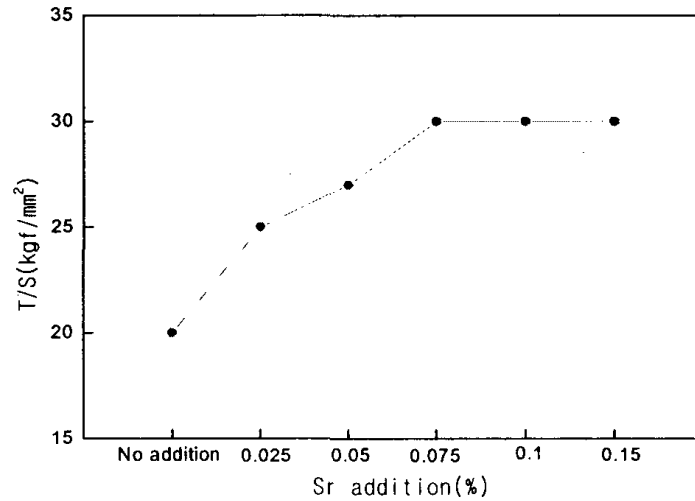


Fig. 8 Variation of tensile strength with Sr addition.

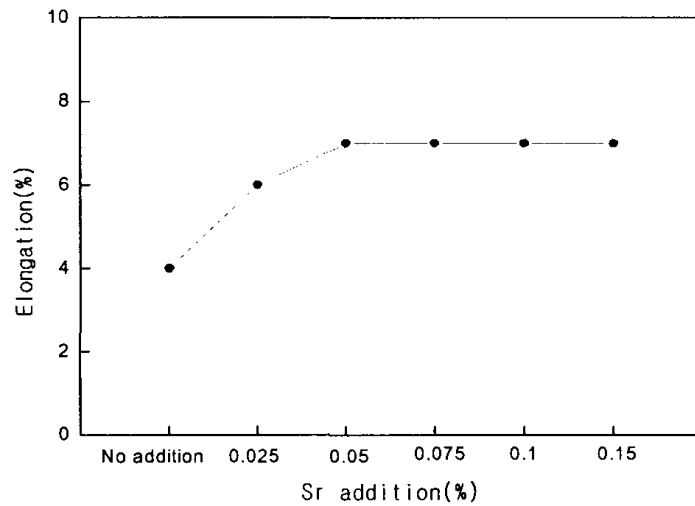


Fig. 9 Variation of elongation with Sr addition.

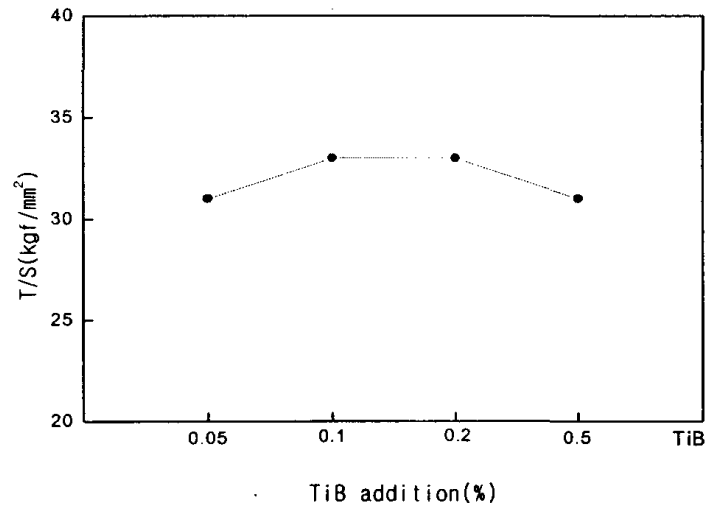


Fig. 10 Variation of tensile strength with TiB addition.

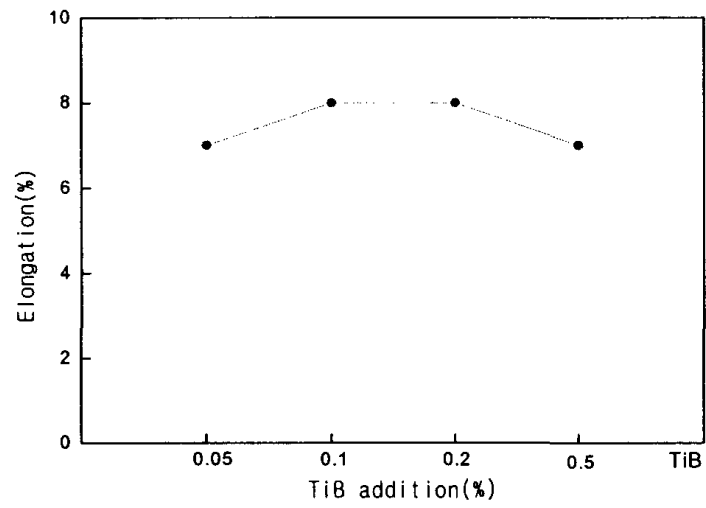


Fig. 11 Variation of elongation with TiB addition.

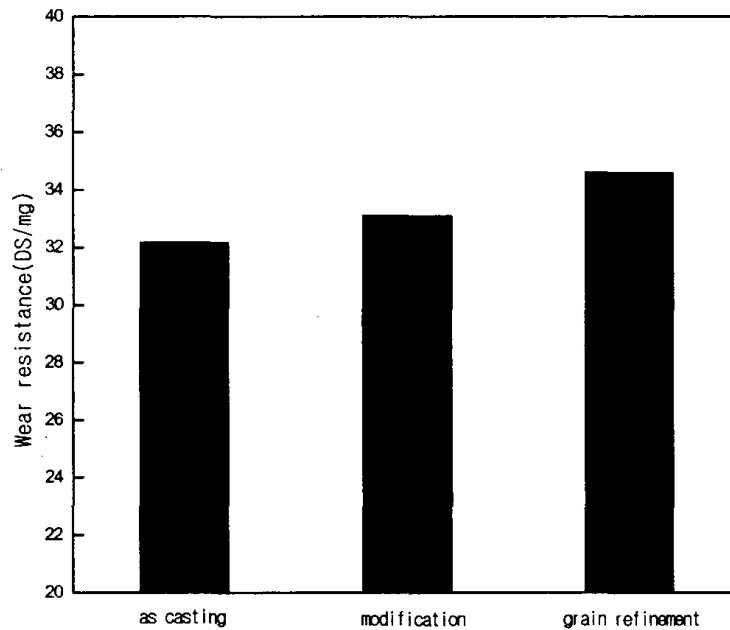


Fig. 12 Comparison of weight loss with respectively parameters.

제 4 장 결 론

공정 Al-Si 합금의 개량화와 미세화처리를 위해 Sr과 TiB를 첨가하여 주단조 소재를 제조하고 미세조직과 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공정 Si의 개량화제로 Sr 모합금을 첨가한 결과 0.075wt.%일 때가 가장 우수한 개량화 효과를 나타내었으며, 그 이상 첨가시 개량화 효과의 증대에는 큰 영향이 없음을 확인하였다.
2. 공정 Si의 개량화제인 Sr 모합금의 첨가량을 0.075wt.%로 고정하고 초정 Al의 미세화제로 AlTi₅B 모합금을 첨가한 결과, 0.1wt.%일 때가 가장 우수한 미세화효과를 나타내었으며, 그 이상 첨가시 오히려 초정 Al이 조대해지는 현상을 나타내었다.
3. 공정 Al-Si 합금을 개량화 및 미세화 처리한 시편에 대한 인장시험 결과 Sr 0.075wt.%, TiB 0.1wt.%일 때 인장강도 값은 약 33kgf/mm², 신율은 약 8%로 가장 우수하게 나타났다.

참고문헌

1. Toshihiro Chikada, "Light Alloy Parts for Automobile", 輕金屬(1990), 40, 12, P.944
2. T. Uno and Yoshida, "Recent Development in Auto Body Sheet Aluminum", 住友輕金屬技報(1986), 27, 4, P.22
3. H. Hosomi, "Process and Trend of Aluminum Application to Automobiles", 住友輕金屬技報(1991), 32, 1, P.1
4. 최현규, "자동차의 알루미늄 이용현황", 월간 신기술(1990), 4권, 6호 P.1
5. H. Ichimura : paper No. 18, 57th World Foundry Congress, Osaka, Sep. (1990)
6. K. Fukizawa and H. Shiina : 自動車技術, No. 5. Vol. 46, (1992), P. 66
7. ASM, Metals Handbook : No. 9, Vol. 15, (1998), P. 204
8. 山本善章, 岩田靖, 中村元志 : 輕金屬, No. 1, Vol. 39, (1989), P. 21
9. 山本秀雄, 關口常久, "各種 Al合金의 鑄造, 鍛造", 第 12回 アルミニウム鍛造技術 講座, P. 1-8, 1992
10. 김기영 : 주조 제 20권 제 4호 (2000, 8)
11. 藤田雅人 : 輕金屬, No. 9, Vol. 39, (1989), P. 664
12. C. H. Caceres, J. R. Griffiths : Acta. Meter., 44, 1(1960), P. 25
13. Akihiko, Hiroyasu : 鑄物, 51, 7, (1978), P. 34
14. 대한금속학회 편 : 금속조직학, 회중당(1992), P. 51