

■■■■■■■■■■  
**論 文**  
 ■■■■■■■■■■

## A357 합금에서 용탕처리가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

이정무<sup>†</sup> · 이성학 · 윤지현 · 김경현

### Effects of Melt Treatments on Microstructures and Mechanical Properties of A357 Alloy

Jung-Moo Lee<sup>†</sup>, Sung-Hak Lee Ji-Hyun Yoon and Kyung-Hyun Kim

#### Abstract

The present work was undertaken to investigate the mutual effect of the individual melt treatment commonly applied in aluminum foundries such as grain refining, modification, degassing and filtration on the microstructures and the mechanical properties. A357 alloys were fabricated through various melt treatments such as degassing by gas bubbling filtration, modification via the addition of Al-Sr master alloy, grain refining through the addition of Al-Ti-B master alloy and filtration before pouring of the melt. Each melt treatment was performed at its optimum condition reported in the literatures. The effects of each melt treatment and their interactions on the microstructures and mechanical properties of A357 alloy were examined.

(Received January 8, 2003)

**Key words** : A357, Refinement, Modification, Degassing, Filtration

#### 1. 서 론

주조용 알루미늄합금의 주류를 이루는 Al-Si-Mg계 합금은 주조성이 양호하고 기계적 성질이 우수하여 자동차, 산업기계 및 항공기 산업분야에서 구조용 주조 부품으로 널리 사용되고 있다. 산업의 고도화와 더불어 고품질, 고성능 부품들의 수요가 증가하고, 항공우주, 방산, 특수차량 등에서 고품위 제품의 필요성이 증가하면서 그에 대응하는 주조 공정 및 합금의 개발이 진행되어 왔는데, 미국에서는 이를 premium quality casting이라 부르며, 철저한 관리를 통하여 기계적 특성, 조직의 건전성, 치수안정성, 표면 조도 등을 만족시키는 고품질과 고신뢰성을 갖는 주물을 제조하고 있다[1,2].

자동차, 항공기 등 구조용 주조부품으로 사용되는 알루미늄 합금 주물의 특성을 결정하는 인자는 크게 재료 관련 인자와 제조 공정 관련 인자로 나눌 수 있다.

재료 관련 인자에는 화학조성이 있으며 A356, A357합금과 같은 경우에는 첨가되는 Si, Mg의 함량 및 불순물로 함유되는 Fe의 함량이 특성을 결정하는 중요한 성분이다. 제조 공정 면에서는 주물 제조시의 응고속도, 주물의 용탕 처리 방법, 열처리 방법, 주조 조직 등이 있다. 상기의 인자 중에서 제조 공정 인자인 주조 변수나 주조 조건 등은 주조품의 특성에 큰 영향을 미친다.

건전한 주조품을 얻기 위하여 주조 공정에서 용탕에 혼입되는 수소농도를 최소화하여 기공도를 최소화하고 비금속개재물의 양을 최소화할 수 있도록 용탕 처리를 하여야 한다. 이와 더불어 주조시에 생성되는 결정립을 미세화하고, 대표적인 주조용 합금인 Al-Si계 합금에서는 연성을 증가시키기 위하여 공정 조직을 개량화시켜야 한다. 이를 위하여, 주조 과정에서 수소농도를 최소화시키기 위한 탈가스 처리 방식에 대한 연구[3-5], 결정립을 미세화시키기 위한 Ti의 첨가에 대한 연

한국기계연구원 재료기술연구부(Dep. of Materials Engineering, Korea Institute of Machinery and Materials)

<sup>†</sup>E-mail : jmoollee@kmail.kimm.re.kr

구[6-8], 공정상을 개량처리하기 위한 Na, Sr처리 등의 개별적인 용탕 처리에 대한 연구[9-12] 등은 상당히 많이 진행되어 왔으며 개별적인 용탕처리에 대한 최적의 조건들에 대한 연구도 상당 부분 이루어져 있다.

그러나, 이와 같은 개별적인 최적 조건들을 사용하여 현장에서 작업할 경우 개별적으로 얻어진 최적조건의 효과가 완전히 발휘되지 않는 경우가 있으며, 이에 따라 현장에서는 이를 발전시키기 위하여 다분히 경험에 의존하는 경우가 많았다. 이와 같이 개별적인 최적의 조건이 실제 용탕 처리시에 발휘되지 못하는 것은 용탕 처리시에 수행하는 다양한 처리들 사이에 상호연관성이 있기 때문이며 최근에 이에 대한 연구 결과들이 활발히 보고되고 있다[13-17].

본 연구에서는 Al-Si-Mg계 합금 주조품의 제조 공정 인자 중에서 특성에 중요한 영향을 미치는 용탕 처리 방법에 대하여 검토하였다. 현장에서 적용되는 다양한 용탕처리에 대하여 개별적인 용탕처리의 상호연관성에 대하여 검토하고, 이를 바탕으로 전전한 주조품을 얻을 수 있는 최적의 용탕처리 조건을 설정하고자 하였다.

### 2. 실험 방법

Fig. 1에 A357합금 제조시에 적용한 용탕 처리를 도식적으로 나타내었다. 제조 공정중에서 실선으로 이

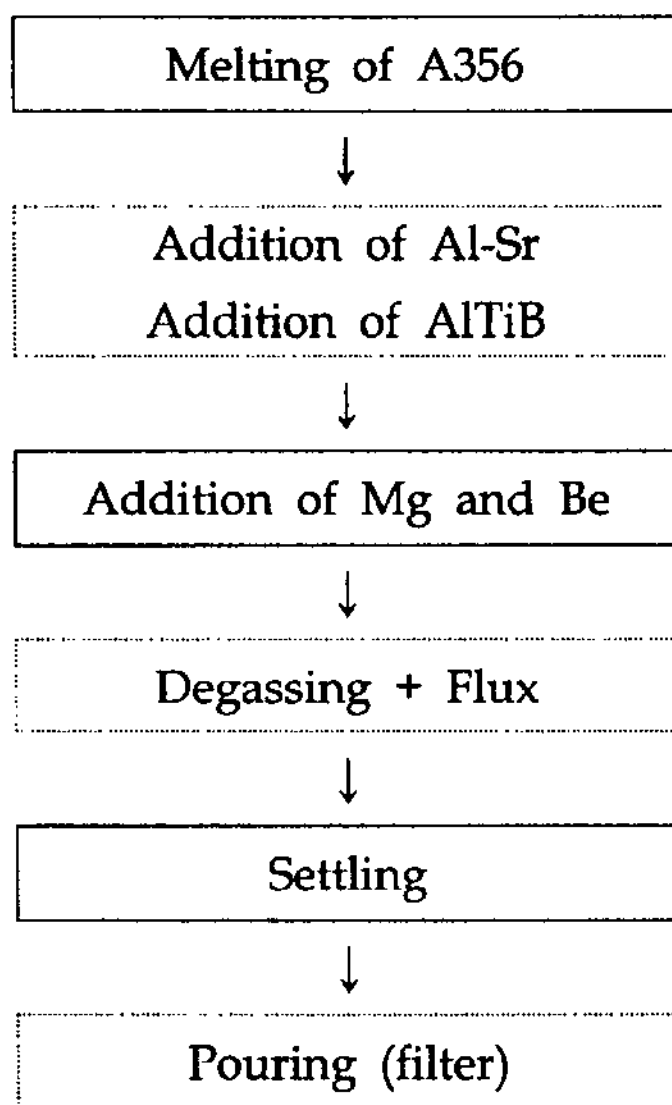


Fig. 1. Procedure for melt treatment for A357 alloy.

루어진 부분은 전 제조공정에서 공히 적용된 것이며 실선으로 표시된 부분은 용탕 처리의 효과를 보기 위해 처리 조건을 바꾸거나 처리를 생략한 부분이다. 제조공정을 보다 상세히 기술하면 다음과 같다.

A357합금을 제조하기 위하여 모합금으로 A356합금을 사용하여 750°C에서 완전히 용해한 후, 공정Si의 조직을 개량화하기 위하여 Sr을 첨가하였다. Sr의 첨가량은 최적조건으로 알려진 0.015%로 하였으며, 첨가효과를 알아보기 위해 첨가한 것과 첨가하지 않은 것 두 조건으로 제조하였다. 또한, 입자 미세화 효과를 조사하기 위하여 Al-5Ti-1B를 총 Ti함량이 0.15%, 0.25% 되게 첨가하였다. Sr/TiB의 첨가 후 용탕을 15분 가량 유지한 후 순Mg과 Al-2.5%Be모합금을 합금조성에 맞게 용탕에 첨가하였다. 첨가원소가 완전히 용해된 후 출탕직전에 탈가스 처리를 하였다. 탈가스 처리는 크게, 탈가스처리 생략, GBF법에 의한 Ar gas bubbling, 그리고 비염소계 flux를 사용하여 탈가스와 flux처리를 병행하는 3가지 방법을 사용하였다. 탈가스 및 flux처리는 Fig. 2에 나타내 보인 장비를 사용하였다. 탈가스가 완료되면 용탕을 20분 정도 진정시킨 후, Fig. 3에 나타낸 것과 같은 ASTM B108-87 규격의 금형에 출탕하였다. 출탕시에 응고속도를 동일하게 하기 위하여 출탕온도와 금형온도를 각각 740°C, 300°C로 고정하였다. 출탕시에 filter의 효과를 보기 위하여 20ppi의 ceramic foam filter를 사용하였다. 제조된 A357 합금의 성분을 Table 1에 나타내었다.

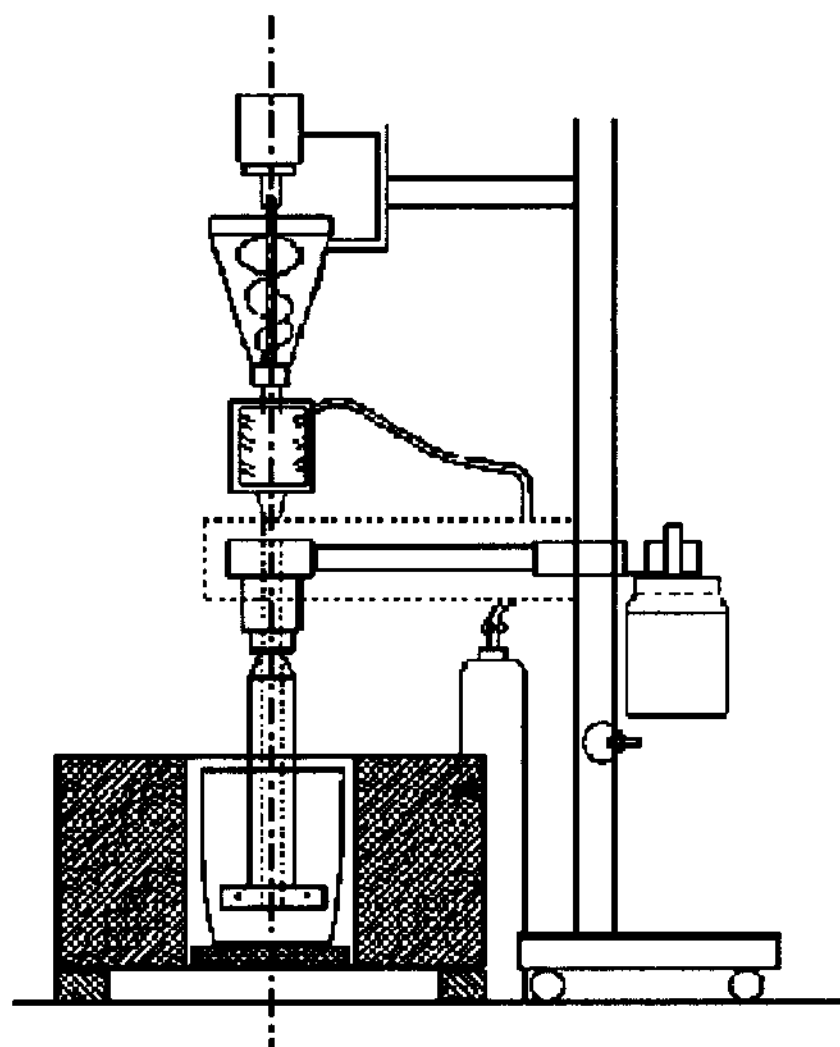


Fig. 2. Schematic diagram showing the degassing equipment.

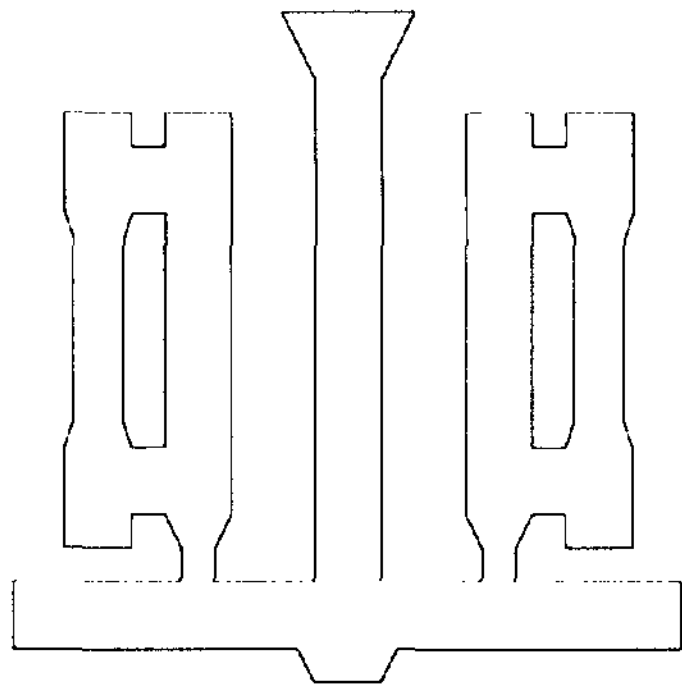


Fig. 3. Schematic drawing of permanent mold (ASTM B 108-87).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 미세조직

Fig. 4는 여러 가지 공정으로 제조한 시험편의 마크로 조직사진을 공정별로 분류하여 나타낸 것이다. 시험편 내부에 생성된 결정립의 크기는 Ti의 함량에 따라 달라지는 것을 알 수 있는데, Ti의 함량이 증가함에 따라 결정립이 미세화 되는 것을 볼 수 있다. 그러나, 탈가스처리, Sr의 첨가 또는 filter의 사용에 따라서는 결정립의 크기에 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 여러 가지 공정으로 제조한 시험편의 미세 조직을 보여주는 것으로, Sr 첨가로 침상의 공정조직이 섬유상의 조직으로 개량 처리된 것을 알 수 있다. 반면, 탈가스처리, Ti의 함량 또는 filter의 사용에 따라서는 공정 조직의 개량화에 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

#### 3.2. 수소농도 및 기공도

다양한 용탕처리에 의해 제조된 합금의 건전성을 평가하기 위하여 수소농도와 기공도를 조사하였다. 수소농도는 LECO사의 RH-402수소농도 분석장치를 이용하여 분석하였으며, 기공도는 아르키메데스 원리를 이용하여 시험편의 밀도를 측정 후 이를 이론 밀도값으로 나누어 구하였다.

Fig. 6은 탈가스 처리 방식에 따른 수소농도 및 기공도의 양을 조사한 것으로 탈가스 처리를 하지 않은 경우 상당히 높은 수소농도와 기공도를 가지고 있으나 탈가스 처리를 하게 되면 이 양이 많이 줄어들며 탈가스 처리와 더불어 flux 처리를 하게 되면 더 효과가 있음을 알 수 있었다. 이러한 효과는 Sr/Ti를 첨가하는 경우에도 동일하게 나타났다.

Fig. 7은 공정조직의 개량화를 위하여 첨가하는 Sr 및 입자미세화제로 투입하는 Ti의 첨가에 따른 수소농

Table 1. Chemical compositions of the specimen (wt.%).

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Be	Al
0.003	0.66	0.003	6.50	0.13	0.001	0.16	0.064	bal.

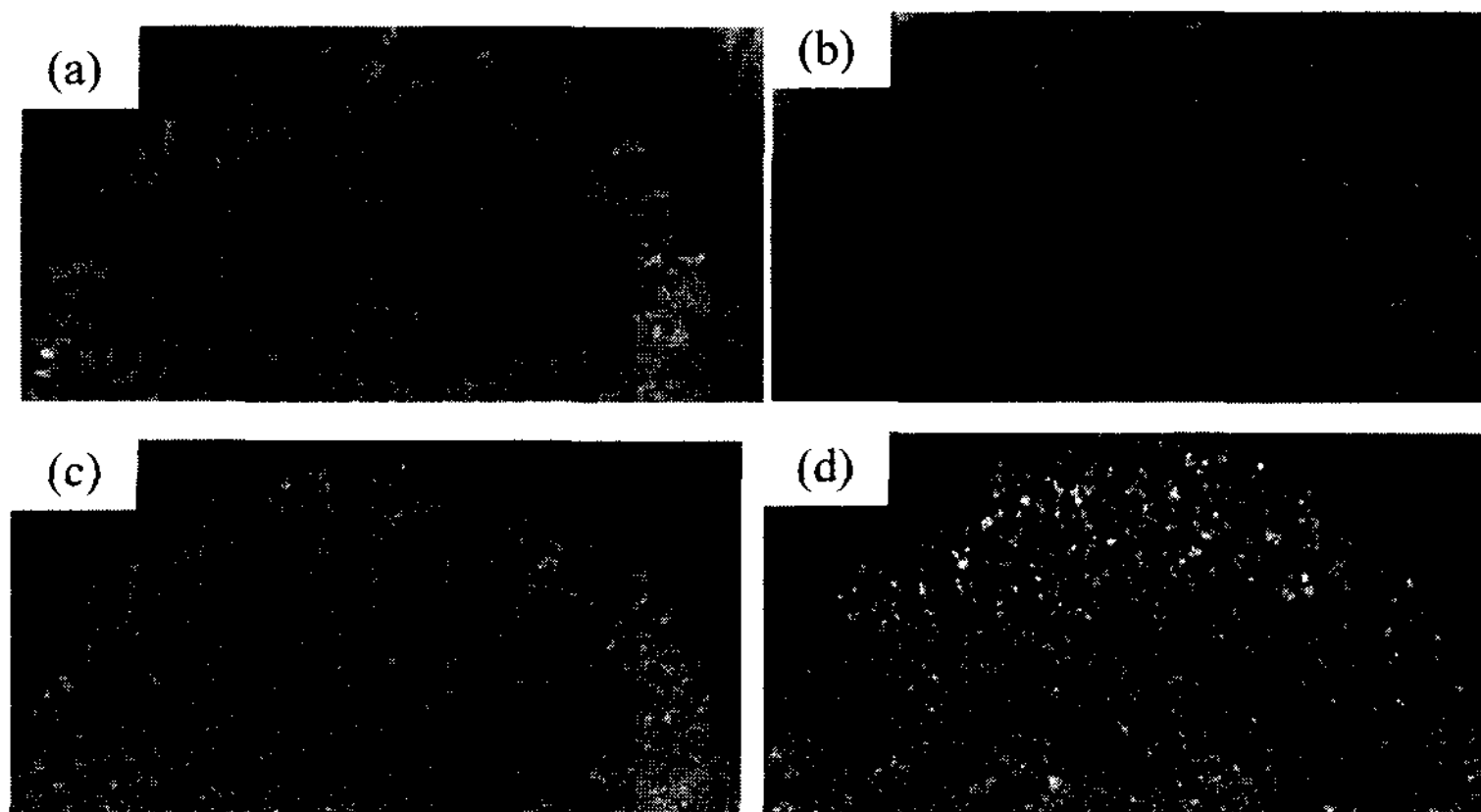


Fig. 4. Macrostructures of the alloys with various melt treatment. (a) addition of 0.15%Ti, no degassing, modification, no filter (b) addition of 0.15%Ti, degassing, no modification, filter (c) addition of 0.25%Ti, degassing, no modification, filter (d) addition of 0.25%Ti, degassing, modification, filter

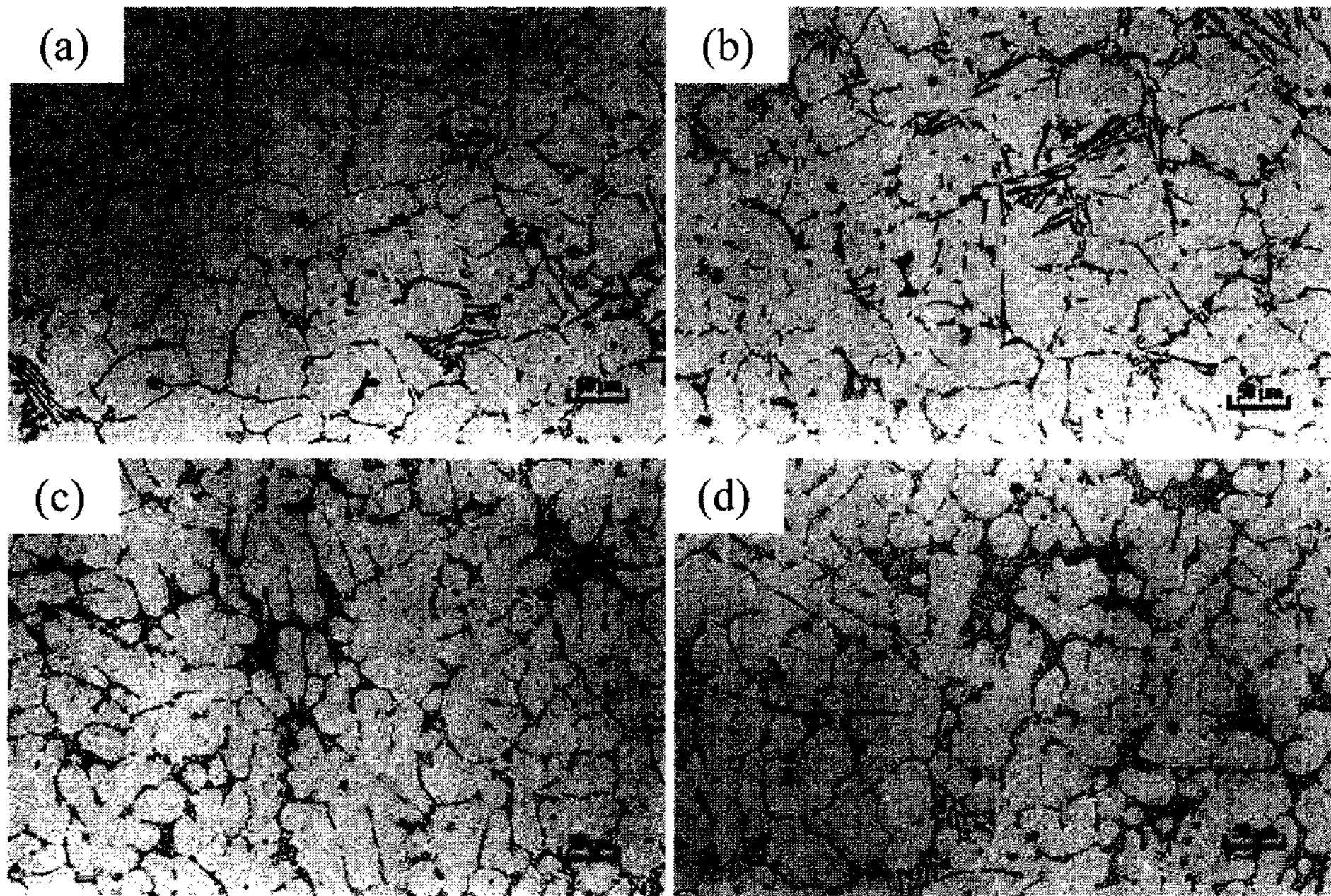


Fig. 5. Microstructures of the alloys with various melt treatment. (a) no modification, no degassing, 0.15%Ti, no filter (b) no modification, degassing, 0.15%Ti, filter (c) modification, degassing, 0.25%Ti, filter (d) modification, degassing, 0.15%Ti, filter

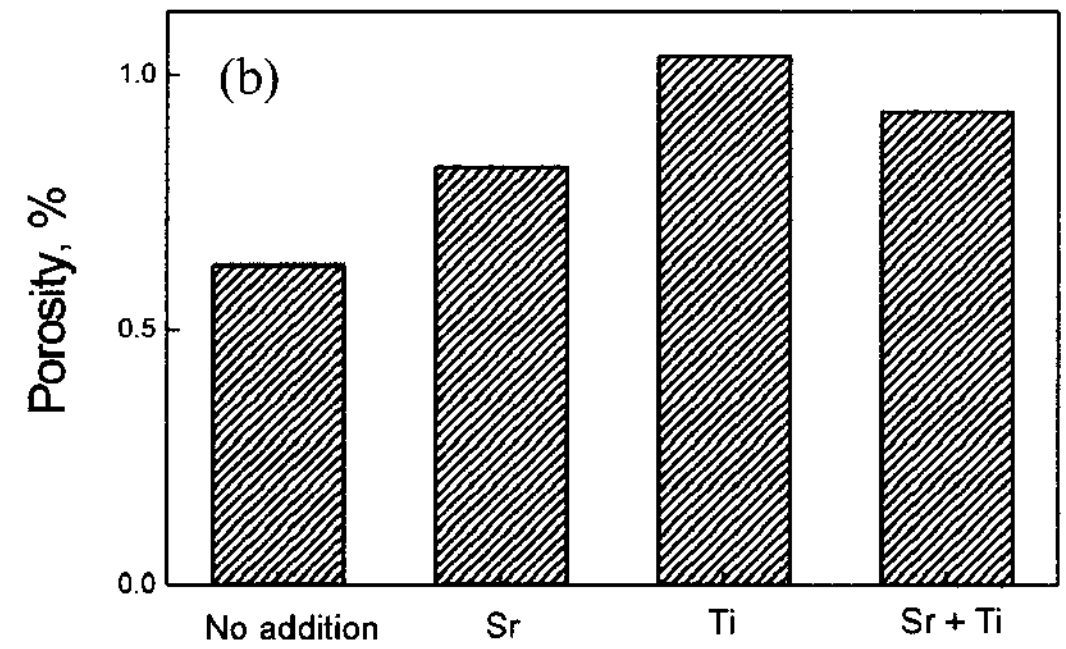
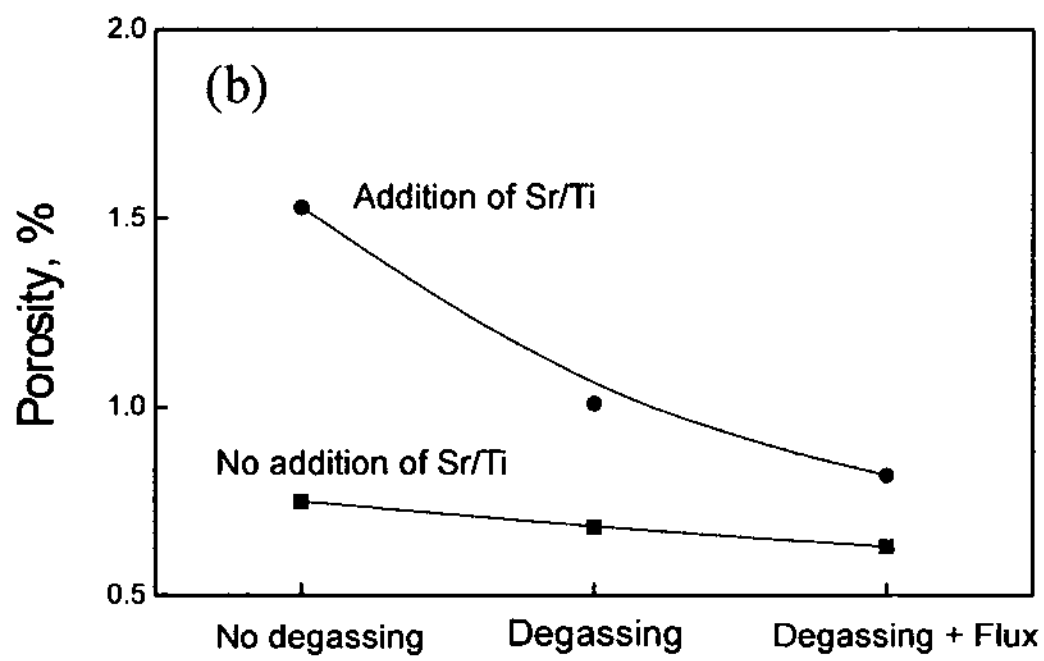
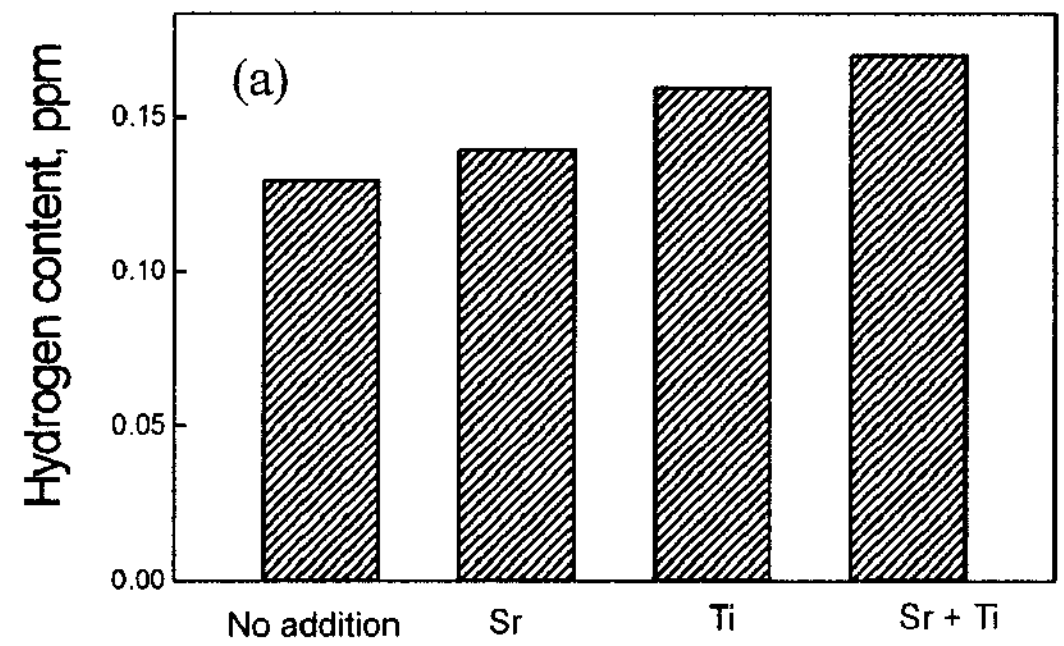
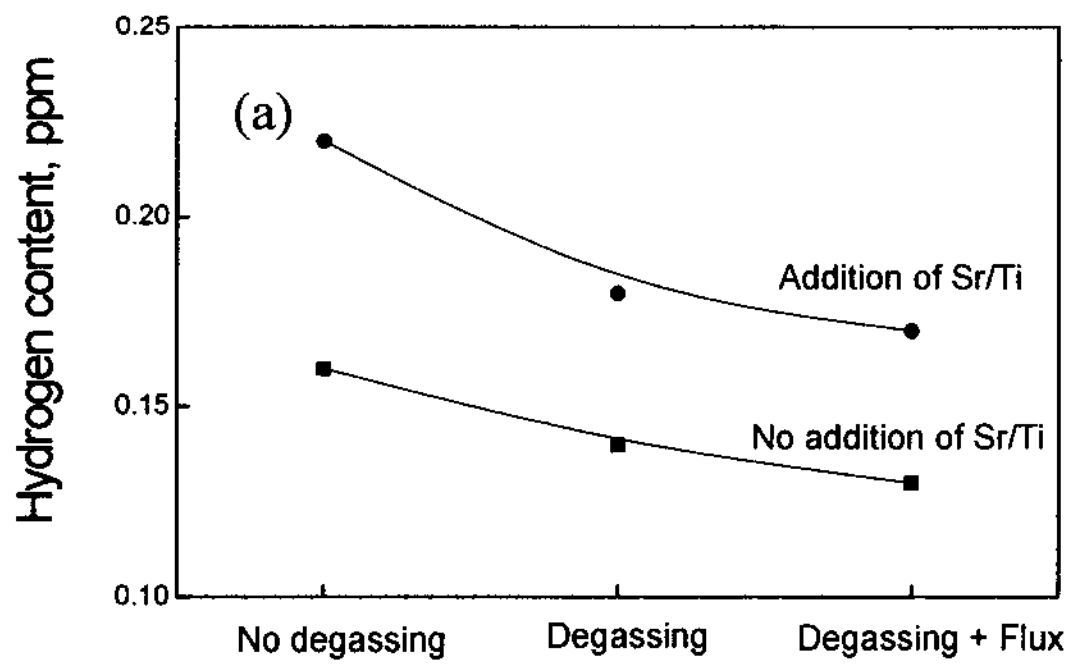


Fig. 6. Hydrogen content(a) and porosity(b) of the alloy with degassing treatment.

Fig. 7. Hydrogen content(a) and porosity(b) of the alloy with addition of Sr and Ti.



도와 기공도의 변화를 관찰한 것으로 Sr 첨가나 Ti의 첨가에 따라 수소농도 및 기공도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Sr/Ti를 동시에 처리한 경우에도 수소농도 및 기공도는 증가하였다.

Fig. 8은 필터사용시의 수소농도 및 기공도를 조사한 것으로 필터사용에 따라 수소농도 및 기공도는 약간 증가하는 결과를 보였다. 필터 사용에 따라 수소농도 및 기공도가 증가하는 것은 용탕이 필터를 통과할 때 필터의 hole을 따라 갈라졌다 필터를 통과한 이후 다시 합쳐지게 되므로 이 과정에서 용탕의 외류에 의해 공기가 혼입되었기 때문으로 판단된다.

### 3.3. 인장특성

다양한 용탕처리로 제조된 시편의 인장특성을 알아보기 위하여 T6처리후에 인장시험을 행하였다. SAE-AMS-A-21181규격에서는 A357합금의 표준 T6 열처리 조건으로 용체화처리의 경우 527~549°C/8~20 hrs, 시효처리의 경우 149~160°C/10~12 hrs로 규정하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 용체화 처리는 538°C/8 hrs으로 실시하였으며, 시효처리는 152°C에서 행하였다. 시효처리 시간에 따른 변화를 보기 위하여 최대 12시간

까지 시간을 변화시키며 경도 변화를 측정하였다. 측정 결과 최대경도값은 10시간 시효처리에 얻어졌으며(Fig. 9), 이 조건에서 인장시험을 수행하였다.

Fig. 10은 여러 가지 용탕처리에 따른 인장시험의 결과를 나타낸 그림이다. 탈가스 처리와 필터사용에 따라 인장강도와 연신율이 증가하는 것을 알 수 있으며

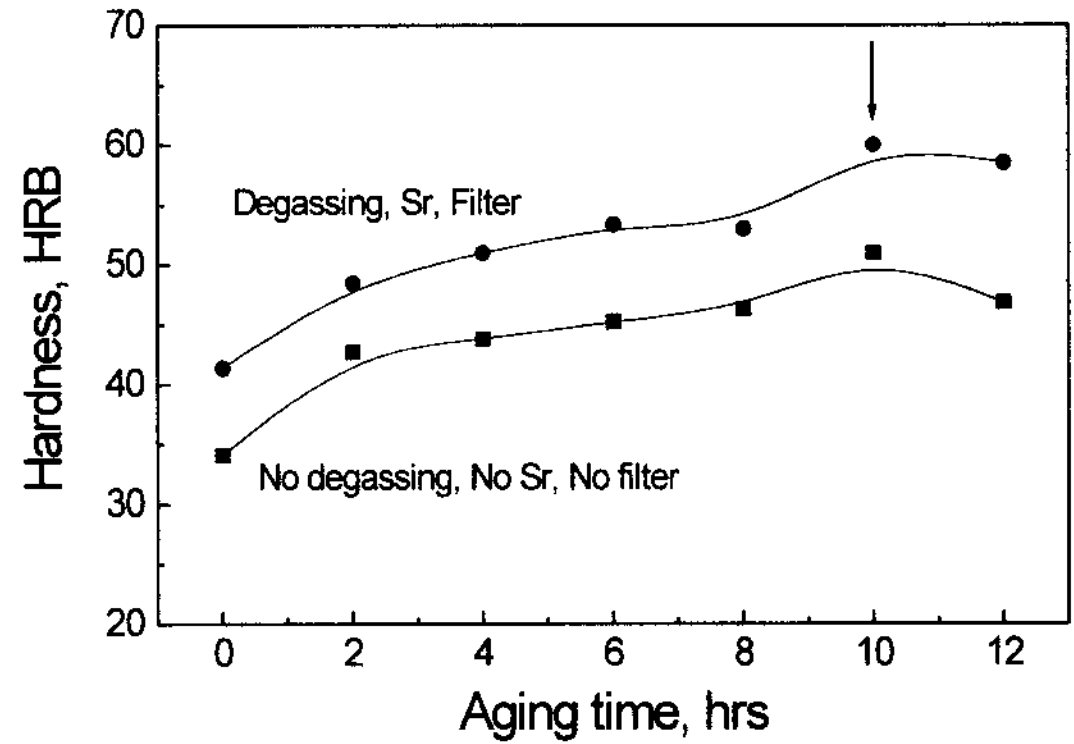


Fig. 9. Variation of hardness with aging time.

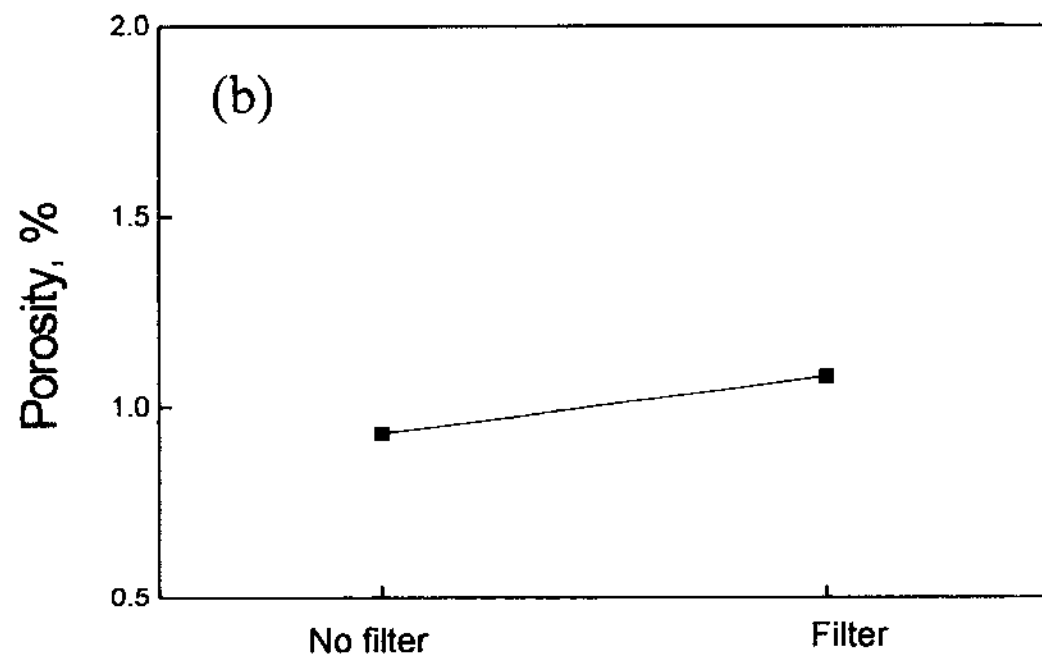
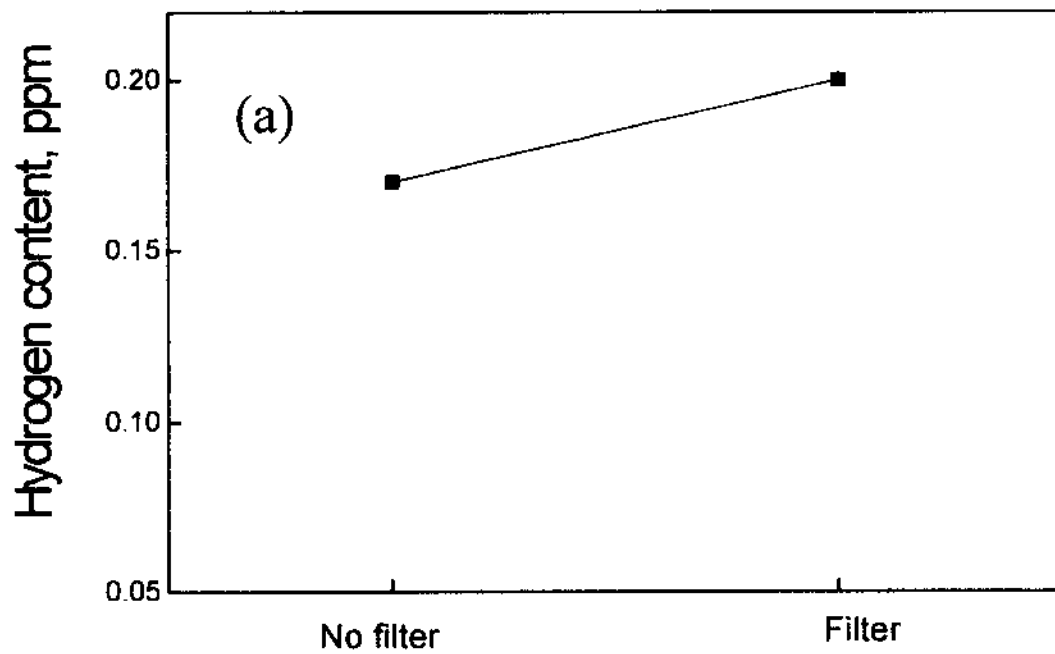


Fig. 8. Hydrogen content(a) and porosity(b) of the alloy with and without filter.

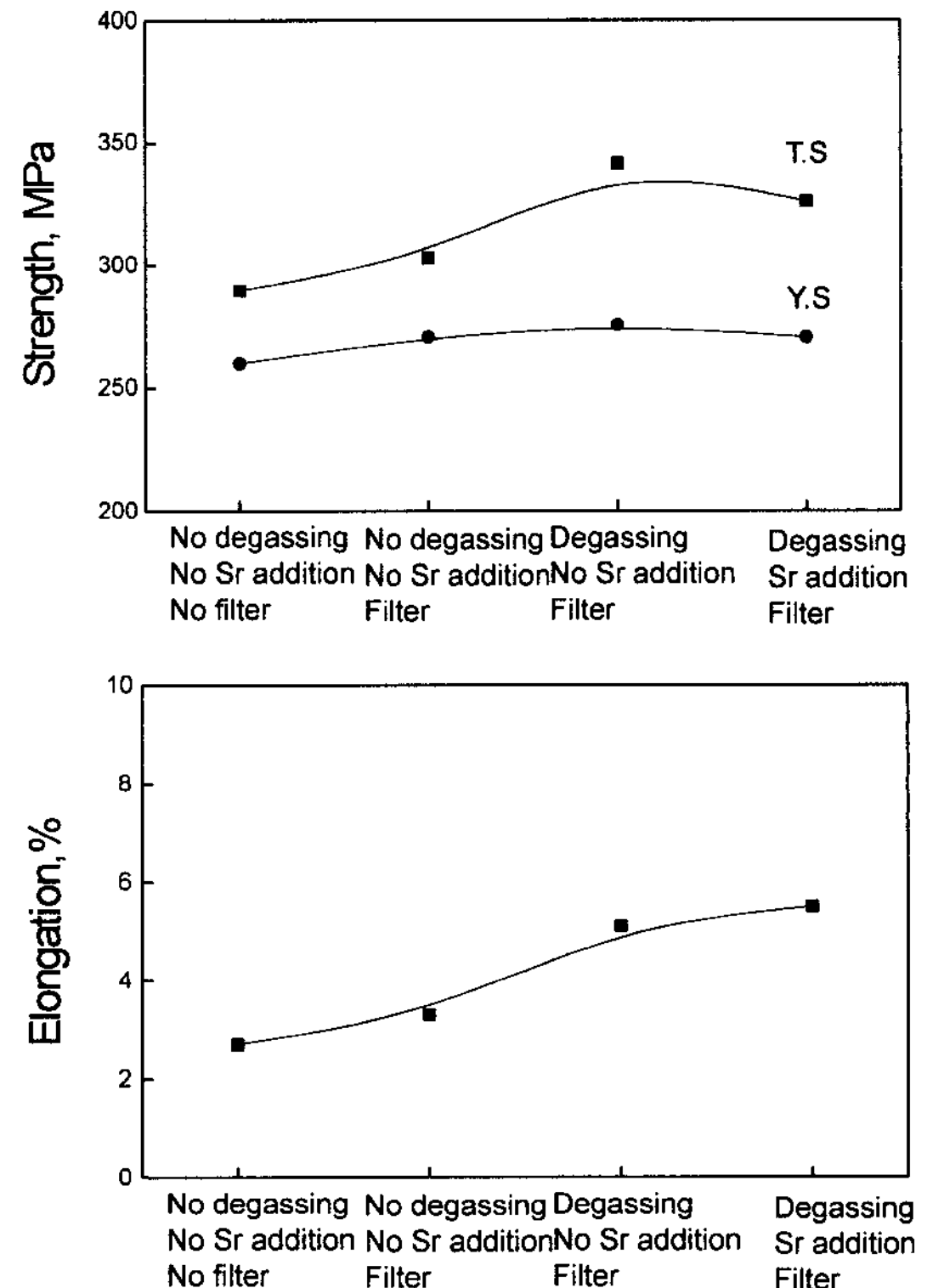


Fig. 10. Tensile properties of the alloy with melt treatment.

Sr첨가에 따라 연신율은 증가하지만 강도는 약간 감소하였다. 인장시험 결과는 수소농도 분석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있는데, Sr첨가로 공정 조직은 개량되지만 수소농도의 증가로 오히려 강도적인 면에서는 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 Ti첨가량에 따른 인장특성의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Ti의 함량을 규격이내인 0.15%와 규격을 벗어난 0.25% 첨가하였는데, 첨가량이 규격을 벗어나 과잉으로 첨가된 경우 인장특성은 오히려 저하되고 있음을 알 수 있다. 다량의 Ti를 첨가하는 경우 입자미세화 효과는 있지만 Ti첨가로 인해 수소농도 및 기공도가 증가하며, 주조시에 생성되는 생성상에 변화를 초래하여 인장특성이 저하되는 것으로 판단된다.

#### 4. 고찰

건전한 주조품을 얻기 위하여 주조 공정에서 다양한 용탕 처리를 실시한다. dross 제거, 입자미세화제 투입, 개량처리제 투입, 탈가스 처리, 용탕의 진정, 주입시의 filter 사용 등과 같은 처리들이 용탕에 행하여지는 대표적인 처리들이다. 다양한 용탕 처리는 조직을 치밀화시키고, 내부에 함유된 수소농도나 개재물의 농도를 최소화하여 미세조직을 건전하게 만들어서 궁극적으로 기계적 특성을 향상시키는데 그 목적이 있다.

Table 2에 본 연구에서 수행한 용탕 처리와 그에 따른 효과를 분류하여 나타내었다. 여기서, 용탕 처리에 따른 효과는 크게 미세조직적 특성과 기계적 특성으로 분리하여 나타내었다.

우선, 입자미세화의 경우 Table 2에서 보는 바와 같이 Ti의 첨가에 크게 의존하며, 탈가스 처리나 개량처리(Sr 첨가), filter의 사용 유무에 따라 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Ti에 의한 입자미세화 기구는

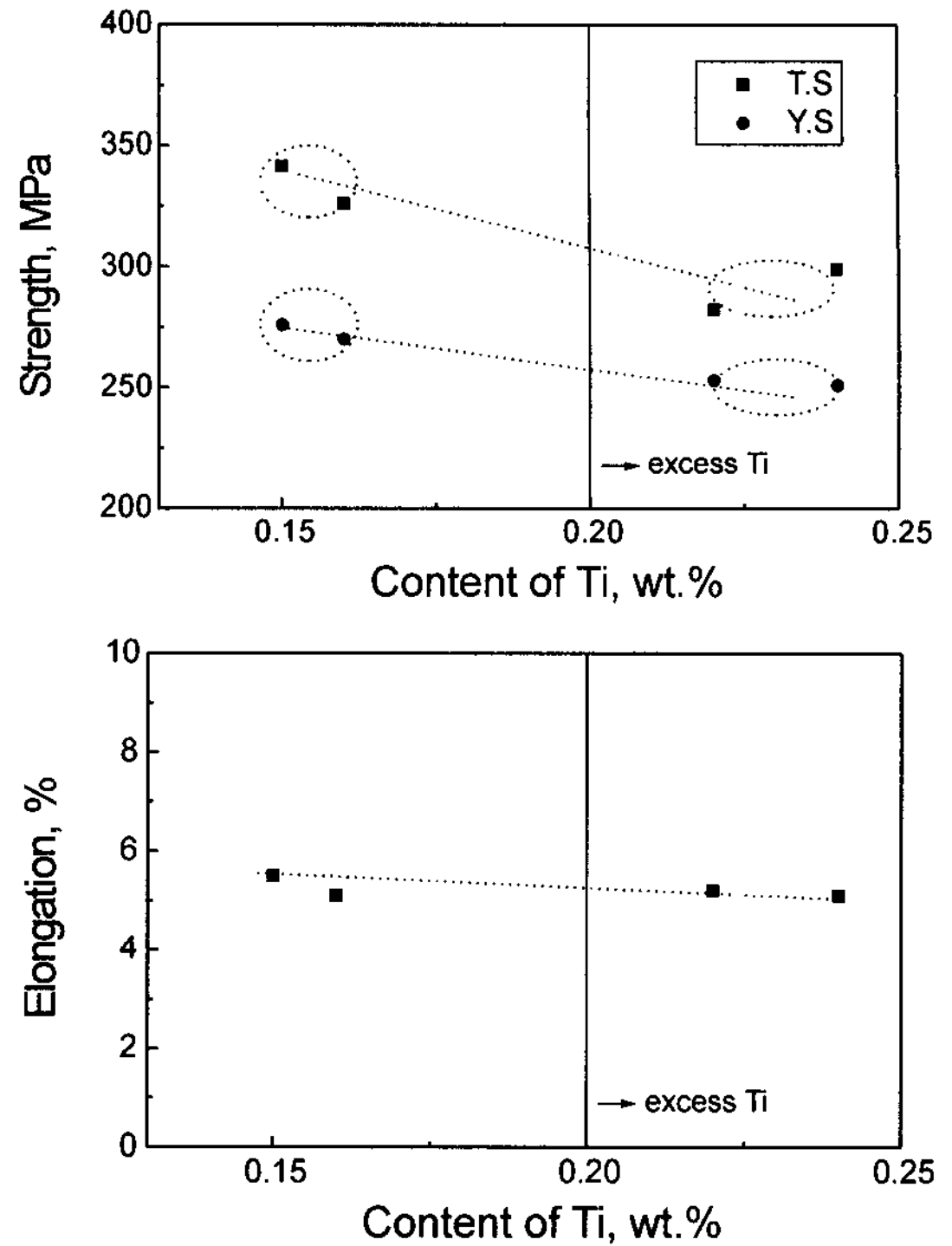


Fig. 11. Tensile properties of the alloy with Ti content.

크게, carbide설과 포정반응설로 설명되는데[18], carbide설은 첨가된 Ti이 알루미늄 용탕에 존재하는 carbon과 반응하여 TiC를 형성하고 이것이 핵생성제의 역할을 한다는 이론이며, 포정반응설은 Ti이 Al 용탕과 반응하여 Al<sub>3</sub>Ti를 생성하여 이것이 핵생성제 역할을 한다는 이론이다. 포정반응설에 따르면 적절한 Ti의 첨가량은 포정점 이상인 0.15%이다. Ti를 첨가하게 되면 기본적으로 결정립 미세화 효과를 가지며, 인장특성에는 큰 영향을 주지 않고, 피로 수명을 증가시키고, 주물 특성의 균일성을 확보할 수 있다는 장점이 있으며, 결정립 미세화로 주조시에 주입성이 향상되는 것

Table 2. Relationships between the melt treatments and their effects.

Treatment	Effect	microstructural factors			tensile properties
		grain refinement	modification	hydrogen content	
Ti addition		○(↑)	—	△(↓)	△(↑)
Sr addition		—	○(↑)	△(↓)	△(↑)
degassing		—	—	○(↑)	○(↑)
Filter		—	—	△(↓)	△(↑)

○ : strong dependence, △ : weak dependence, — : no relationship  
 ↑ : improvement ↓ : degradation

으로 보고되고 있다. 그리고 필터를 사용하게 되면 필터에서 핵생성제를 걸러내는 효과로 미세화 효과가 감소된다는 보고도 있으나 이와 상반된 연구 결과도 보고되고 있다[18]. 본 연구의 결과에서도 필터 사용이 미세화 효과를 감소시키지는 않는 것으로 보인다.

개량처리의 경우 표에서 보는 바와 같이 Sr의 첨가에 크게 의존하며, 탈가스 처리나 입자미세화처리(Ti 첨가), filter의 사용 유무에 따라 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Sr을 첨가하여 개량처리에 적절한 효과를 얻기 위해서는 0.01% 이상 첨가해야하며 첨가 후 일정한 유지시간이 필요한 것으로 알려져 있으며, Na에 비하여 용탕 유지시에 소실 현상이 적다. 그러나, 탈가스 처리를 하면 급격한 소실 현상이 일어나므로 주의를 요하는데, 본 연구에서는 탈가스 처리 시간이 길지 않았기 때문에 소실 현상은 일어나지 않은 것으로 판단된다.

한편, 수소농도의 경우 앞의 두 처리와는 달리 주요한 인자인 탈가스 처리 이외에 개량처리, 입자미세화처리, filter의 사용 유무에 따라 영향을 받았다. 수소 농도는 기본적으로 탈가스 처리 또는 탈가스+flux 처리에 따라 감소하지만, Sr의 첨가, Ti의 첨가 또는 filter의 사용에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. Sr이나 Ti 첨가시에 수소농도가 증가하는 것은 첨가 형태가 모합금 형태로서 모합금에 내재된 수소농도의 상승 효과에 기인하는 경우가 있고, 용탕의 표면장력 감소와 개재물 양의 증가로 공공의 핵생성이 용이함에 기인하는 것으로 판단된다[18].

인장 특성의 경우, 탈가스 처리에 가장 큰 영향을 받으며 적절한 탈가스 처리에 따라 인장 특성이 현저히 증가하는 것을 알 수 있으며, Sr 첨가, Ti 첨가, filter의 사용에도 약간씩 영향을 받으며 인장 특성이 약간씩 향상됨을 볼 수 있다. Sr이나 Ti의 첨가는 수소 농도의 상승, 개재물의 증가와 같은 단점이 있지만 기본적으로 미세조직의 치밀화를 유발하여 최종적으로 기계적 특성을 향상시키는 것으로 보인다. Filter의 사용은 입자미세화나 개량 처리에 영향을 주지 않으며 수소 농도를 다소 증가시키기도 하지만, 기계적 특성은 향상시켰다. 이는 본 연구에서 고려하지 않은 용탕 청정도의 중요한 지표중 하나인 개재물의 농도를 저하시켰기 때문으로 판단된다.

따라서, 주조 공정에서 수행하는 다양한 용탕 처리 중에서 입자미세화 처리, 개량 처리, filter의 사용은 그

다지 큰 상호 연관성이 없으나 수소 농도에는 연관성이 있는 것으로 보이며, 이들 처리에 따라 수소 농도는 다소 증가하였다. 그러나, 이들 처리에 따라 기계적 특성은 개선되는데, 이는 수소 농도의 증가에 따른 특성의 감소분보다 개별적인 처리가 갖는 고유의 효과, 즉, 입자미세화 효과, 개량 처리 효과, 개재물의 감소 등이 발생되었기 때문으로 판단된다. 반면, 탈가스 처리의 경우, 수소 농도를 현저히 감소시키며, 또한, 특성을 향상시킨다. 따라서, 보다 건전한 주조품을 제조하기 위해서는 탈가스 공정에 보다 많은 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

A357합금에 대하여 다양한 용탕처리를 한 후 동일한 응고 속도로 금형 주조한 시험편을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 입자미세화 처리, 개량 처리, filter의 사용은 상호 연관성이 없었다. 그러나 이들 처리는 수소농도와는 큰 연관성을 보였다. 탈가스 및 Flux 처리시 수소농도는 감소하며 Sr 및 Ti 첨가시에는 수소농도가 증가하였으며 필터 사용시에도 수소농도는 증가하였다.
- 2) 적절한 용탕처리로 인장강도 344MPa, 항복강도 276 MPa, 연신율 5%의 소재를 제조할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Shivkumar, L. Wang and D. Apelian : J. Met., "Molten Metal Processing of Advanced Cast Aluminum Alloys", 1 (1991), 26-32.
- [2] Y. S. Han and H. I. Lee : J. Kor. Foundrymen's Soc., "Development of New Al Alloys for Premium Quality Casting", 19(1999), 384-392.
- [3] W. S. Lee and B. J. Ye : J. Kor. Foundrymen's Soc., "The Variation of Pore Distribution Behavior According to Melt Treatments for Al Alloys", 19(1999), 134-141.
- [4] J. C. Terrier : Light Metal, "ALPUR TS, Pechiney's New Global Concept for Molten Aluminium Treatment", (1998), 779-783.
- [5] Y. Ohno, D. T. Hampton and A. W. Moores : Light Metal, "The GBF Rotary System for Total Aluminum Refining", (1993), 915-921.
- [6] P. C. van Wiggan and J. K. Belgraver : Aluminum, "From AlTiB to AlTiC-Developments in Aluminium Grain Refiners", 75(1999), 989-994.
- [7] A. Kamio : J. Jpn. Foundrymen's Soc., "Mechanical Proper-

ties in Aluminum Alloy Castings Grain Refined by Titanium", 51(1979), 408-413.

[8] D. Apelian and J. J. A. Cheng : AFS Trans., "Al-Si Processing Variables: Effect on Grain Refinement and Eutectic Modification", 94(1986), 797-808.

[9] F. Paray and J. E. Gruzleski : AFS Trans., "Factors to Consider in Modification", 102(1994), 833-842.

[10] S. Jacob, M. Garat, G. Laslaz, P. Meyer, P. H. Guerin and R. Adam : Hommes et Fonderie, "The Actual Situation in the Use of Sodium, Strontium, and Antimony in Aluminum-Silicon Castings", 258(1995), 45-54.

[11] B. Closset and D. Fay : AFS Trans., "Strontium Modification of Aluminum Investment Casting Alloys", 98(1990), 505-509.

[12] B. Closset and J. E. Gruzleski : AFS Trans., "Mechanical Properties of A356.0 Alloys Modified with Pure Strontium", 90(1982), 453-464.

[13] L. Siaminwe and A. J. Clegg : Mat. Sci. & Tech., "Effect of Processing Variables on Structure and Tensile Properties of Investment Cast Al-Si-Mg Casting Alloy", 15(1999), 812-820.

[14] L. Siaminwe and A. J. Clegg : Foundryman, "Optimisation of the Mechanical Properties in an Investment Cast Aluminium Alloy", 89(1996), 233-238.

[15] L. Liu and F. H. Samuel : J. Mat. Sci., "Assessment of Melt Cleanliness in A356.2 Aluminium Casting Alloy Using the Porous Disc Filtration Apparatus Technique. I. Inclusion Measurements", 32(1997), 5901-5925.

[16] L. Liu and F. H. Samuel : J. Mat. Sci., "Assessment of Melt Cleanliness in A356.2 Aluminium Casting Alloy Using the Porous Disc Filtration Apparatus Technique. II. Inclusion Analysis", 32(1997), 5927-5944.

[17] L. Liu and F. H. Samuel : J. Mat. Sci., "Effect of Inclusions on the Tensile Properties of Al-7%Si-0.35%Mg (A356.2) Aluminium Casting Alloy", 33(1998), 2269-2281.

[18] W. B. Kim, J. H. Kim and B. J. Ye : J. Kor. Foundrymen's Soc., "Solidification of Al Alloys (IV) - Characteristics of Modification in the Hypoeutectic Al-Si Alloys", 18(1998), 604-612.

### 國內外鑄物關聯行事

2003

5월 30일 ~ 6월 2일  
제142회 전국강연대회  
일본, 동경

6월 16일 ~ 6월 21일  
NEWCAST(GIFA)  
독일, Dusseldorf

6월 2일 ~ 6월 4일  
40th FOUNDRY DAYS with accompanying  
exhibition  
체코

6월 16일 ~ 6월 21일  
10th International Foundry Trade Fair with WFO  
Technical Forum  
독일, Dusseldorf