論 文

수평연속주조한 과공정 Al-Si합금 소경봉의 미세조직 및 기계적성질

김완철 · 박지하 · 류봉선* · 박원욱*

Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-Si Alloy Bars Processed via Horizontal Continuous Casting

Wan-Chul Kim, Ji-Ha Park, Bong-Sun You* and Won-Wook Park*

Abstract

Hyper-eutectic Al-17.5wt%Si alloy bars of 25 mm in diameter were produced by horizontal continuous casting process. Effect of both casting speed and primary Si refiner (AlCuP) on microstructure and mechanical properties of the alloy have been investigated. With increasing a weight fraction of AlCuP, the average primary Si size decreased down to 20 μm. On the contrary, there was no notable changes of microstructure and primary Si size according to the casting speed in the experimental range of this study, indicating that the cooling rate should be increased to optimize and refine microstructure and primary Si size. The experimental results including hardness, tensile strength and wear resistance tests of the processed alloy bars showed a good possibility to develop the high performance wear resistant Al-Si alloy. (Received October 21, 1997)

1. 서 론

과공정 Al-Si합금은 조직내에 분포하는 경질의 초정Si 입자로 인해 우수한 내마모성과 높은 비강도를 나타낼 뿐 아니라 Si함량의 증가에 따라 Fe의 열팽창계수에 접근하기 때문에 철계부품을 대체하여 수송기기를 경량화시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 그러나, 과공정 합금의 주조시에는 초정Si의 조대화로 기인한 주조성, 절삭성 및 기계적성질의 저하를 방지하기 위해 초정Si을 미세화하는 공정이 필수적이다[5-7]. 초정Si을 미세화하는 방법으로는 현재 가장 많이 이용되고 있는 미세화제 첨가법[8]을 들 수 있으며, CuP나 AlCuP를 첨가하여 용탕이 응고하기전 초정 Si의 핵생성자리를 만들어 주는 공정이기 때문에 대부분의 주조법에서 적용되고 있다[9-11]. 그외 합금을 급냉응고하여 냉각속도를 증가시킴으로써 조직을 미세화하는 방법[12]인 분발야금공정도 일부 실용화되고 있다.

미세화제를 이용한 과공정 Al-Si합금의 제조공정은 선진국을 중심으로 연속주조법에 의해 활용되고 있으나, 소구경의 과공정 Al-Si합금 선재나 판재에 관한 연구결과는 지금까지 보고되어 있지 않다. 그러나 이와같은 수평연속주조법에 의해 소구경의 선재나 판재를 제조하는 공정은 일반 billet제조에 비해 2~3배 이상의 높은 응고속도를 낼 수 있기 때문에 초정Si을 보다 미세화시킬 수 있다[13]. 즉, 과공정 Al-Si합금 소단면적 소재를 수평연속주조공정에 의해 제조할 경우, 미세화제 첨가에 의한 효과에 높은 냉각속도에 의한 효과가 더해져 정출하는 Si이 보다 균일하고 미세해지기 때문에 각종 기계적특성의 향상을 기대할 수 있다[14].

이를 목표로한 본 연구에서는 수평연속주조에 의한 소구경의 과공정 Al-Si합금 제조공정을 확립하고, 확립된 공정에 의해 연속주조한 선재의 특성을 평가하였다. 선재의 특성평가는 냉각속도의 변화와 미세화제 첨가량의 변화가 초정Si의 미세화 및 내부분포에 미치는 영향을 분석하고, 이들 미세조직과 기계적특성과의 상관관계를 조사함으로써 소구경 Al-Si합금의

홍익대학교 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Eng., Hongik Univ.)
*한국기계연구원 (Korea Institute of Machinery & Materials)

선재제조 공정변수와 선재특성변화를 체계적으로 밝히고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 수평연속주조 실험

그림 1은 본 연구를 위하여 설계 · 제작한 수평연속주조 설비로, 1회 약 50 kg의 Al합금을 용해 및 정제할 수 있는 용해 · 보온로와 용탕을 응고시키기 위한 cooling system 및 취출기 등으로 구성되어 있다. 이들 중 실제 용탕의 응고가 일어나는 cooling system에서 cooling jacket은 graphite 주형에 의한 냉각능의 저하를 방지하고, 냉각수의 상하 유동편차를 줄이기 위해 열전달이 우수한 Cu합금을 사용하였다[15]. Cooling jacket내부에 조립되는 graphite재질의 주형은 연속주조에 따른 고액계면의 위치변화 및 열전달을 확인하기 위해 그림 2와 같이 주형의 길이방향으로 열전대를 삽입하였으며, 주형 내면에는 groove를 가공하여 응고하는 용탕의 온도뿐만 아니라 주형 내부 고액계면의 정확한 위치를 조사하였다.

표 1은 Al-17.5wt%Si 합금선재의 수평연속주조 조건으로, 750°C에서 용해한 후 Ar gas bubbling하여 용탕을 정제하였다. 정제된 합금용탕의 응고취출은 표 2와 같이 선재의 단락을 방지하기 위해 후진/전진/정지 3단계 cycle을 이용하였으며, 간헐취출에 따른 pitch의 크기를 변화시키면서 최종 선재의 취출속도를 조절하였다.

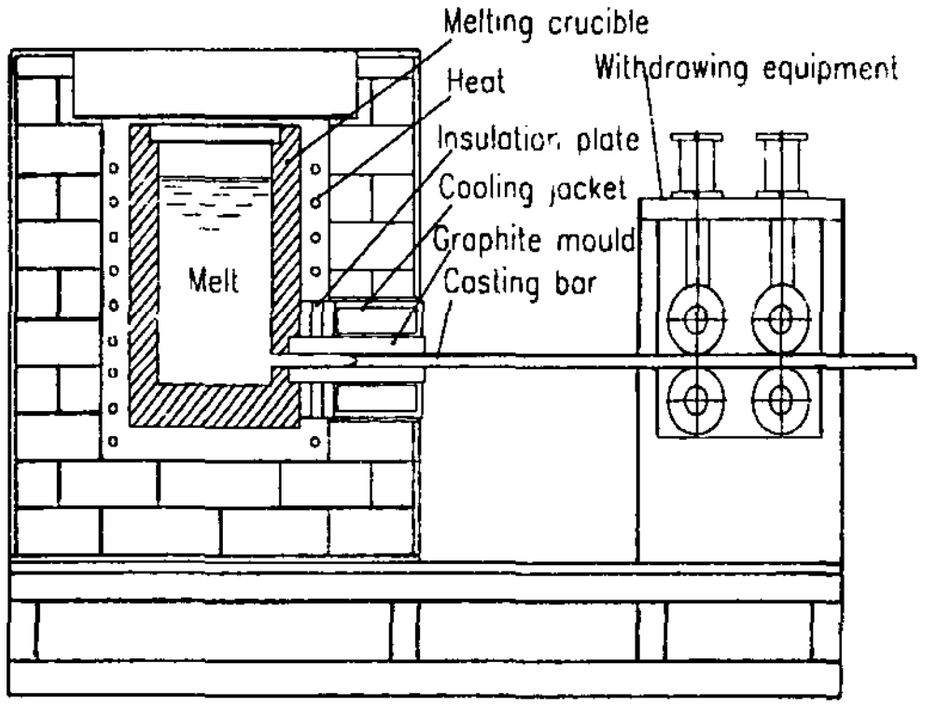

Fig. 1. Schematic drawing of continuous casting unit.

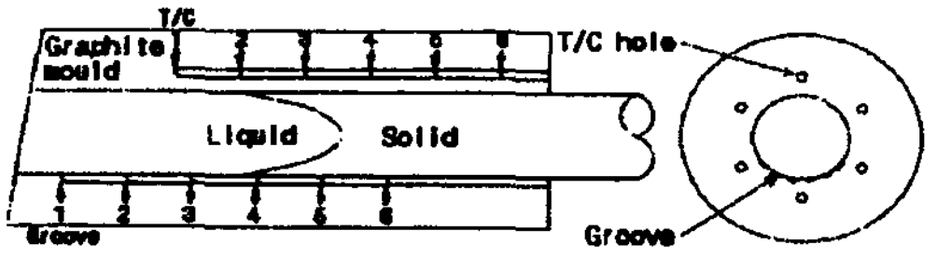

Fig. 2. Schematic drawing of graphite mould.

Table 1. Continuous casting condition of Al-17.5wt%Si alloy

Melting Temperature (°C)	Casting temperature (°C)	Gas Bubbling		Cooling Jacket (l/min)	2nd Cooling
		gas	condition		
liquidus: 670 solidus: 577	750	Ar	750°C, 10 min	10~20	water spray

Table 2. Withdrawing condition of Al-17.5%Si alloy for continuous casting

Condition	Pitch (mm)		Stop (sec)	Speed (mm/min)
	forward	back		
A	10	5	0.5	140
B	20	10	1.0	225

2.2 P첨가에 의한 초정Si의 미세화

초정으로 정출하는 Si을 미세화하기 위해 첨가하는 P의 양에 따른 미세화효과를 조사하였다. 미세화제로 사용한 AlCuP합금은 Al기지에 19wt%의 Cu와 1.4wt%의 P를 함유하고 있는 합금으로 용탕에 첨가하기전 이미 초정 Si의 핵생성자리로 작용하는 AlP화합물이 형성되어 있기 때문에 용탕처리 온도가 낮고 미세화처리후 유지시간이 짧은 장점이 있다[16].

Al-17.5wt%Si 합금의 미세화처리 온도는 750°C로 하였으며, 표 3과 같이 첨가한 P의 양은 0, 30, 60 ppm이고 첨가후 측정된 P의 양은 15, 23, 53 ppm이다. 미세화제를 첨가한 후 gas bubbler의 회전자를 용탕에 주입하여 약 5분간 stirring하면서 용해하였으며, 회전자를 제거한 후 10분간 유지한 다음에 연속주조하였다.

수평연속주조한 ϕ25 mm 크기의 Al-17.5wt%Si 합금 선재의 외관 및 미세조직의 변화를 조사하였다. 특히, 초정 Si의 크기는 선재의 상부, 중심부 및 하부에서 각각 측정하여 수평연속주조시 발생가능한 상 · 하부 조직편차를 조사하였다. 이와같은 미세조직의 변화가

Table 3. The amount of added & measured P in Al-17.5wt%si alloy

	Added P	0	30
60	Measured P	15.0	23.0

기계적특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 경도시험, 인장시험 및 마모시험을 하였다. 경도시험은 Brinell경도기를 이용하여 500kg의 하중을 30초간 유지하여 측정하였고, 인장시험은 gauge length부의 직경이 ϕ4 mm인 sub-size scale의 시편을 선재의 중심부에서 가공하여 시험하였다. 마모시험은 2-pin형의 pin-on-disk type의 마모시험기를 이용하였으며, 상온 무윤활조건에서 마모거리에 따른 pin의 중량감소를 조사함으로써 마모특성을 조사하였다. 시험편인 pin의 크기는 5×5×15 mm이며, 2개의 pin을 holder에 장착한 후 FC-25재질의 disk에 접촉시키고 100N의 힘을 부과하면서 100 rpm으로 회전하였다. 상대재인 disk는 Brinell경도 99인 주철로서, pin에 대한 disk의 상대속도는 1,160 cm/min으로 일정하게 하였다. 경도시험 및 마모시험편은 미세조직의 변화를 조사한 결과와 상호 비교하기 위하여 연속주조한 선재의 상부, 중심부, 하부에서 각각 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주조조직 관찰

그림 3은 제작한 연속주조설비의 안정화를 위해 순 Al을 예비실험한 후 선재의 단면을 조사한 사진으로, columnar형상의 결정립이 열중심선을 기준으로 방사형으로 발달해 있고, 선재의 길이방향으로는 간헐취출에 따른 탕경계부위와 정지상태에서의 미세조직이 뚜렷이 구분된다. 이와같은 순 Al의 연속주조결과를 바탕으로 취출 cycle과 속도를 조절하여 Al-17.5wt% Si 합금을 연속주조하였다.

그림 4는 수평연속주조한 Al-17.5wt%Si 합금 선재의 외관으로서, 선재의 표면은 전체적으로 매끈하고, 취출속도의 증가에 따라 매끈한 정도가 다소 증가하는 것으로 나타났으며, 취출cycle에 의한 탕경계부의

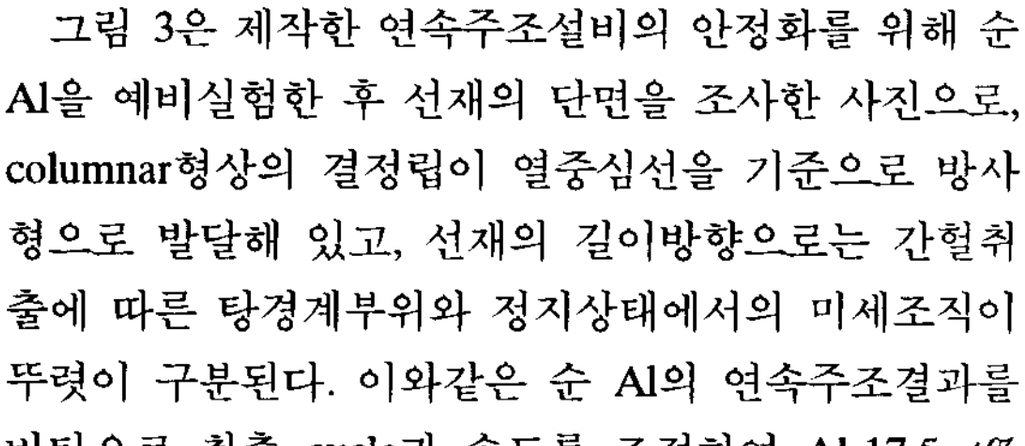

Fig. 3. Microstructure of pure Al bar produced by horizontal continuous casting.

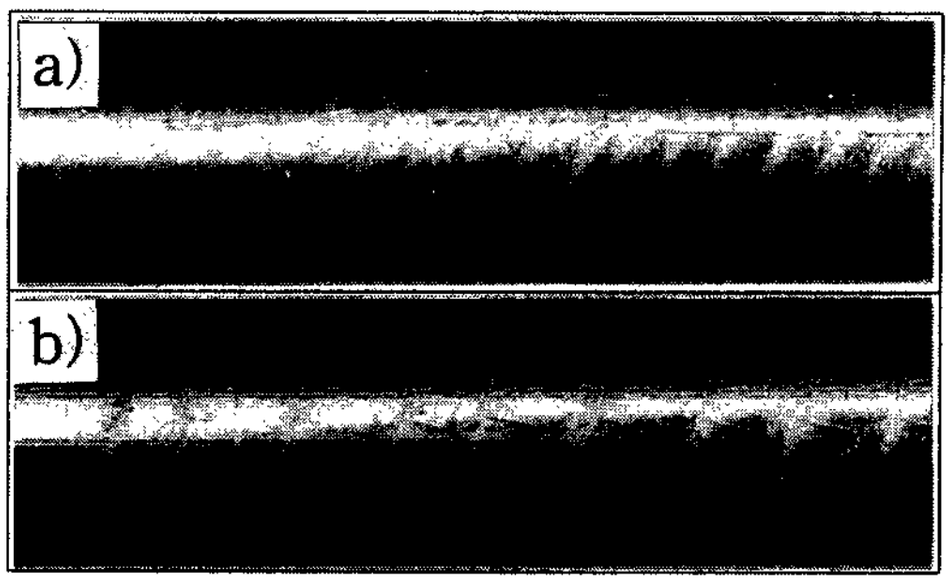

Fig. 4. Surface appearances of Al-17.5%Si alloy bars produced by horizontal continuous casting. a) condition A b) condition B.

흔적은 나타나지만 탕경계부의 crack이나 불순물의 편석은 확인되지 않았다.

수평연속주조한 Al-17.5wt%Si 합금선재의 취출조건에 따른 미세조직과 AlCuP 미세화제 첨가량에 따른 초정 Si의 크기변화는 그림 5 및 6과 같다. 그림 5는 표 2의 조건 A로 연속주조한 Al-17.5wt%Si 합금의 P 첨가량에 따른 각 부위별 미세조직으로, 미세화제 P의 첨가량 및 선재의 상하부 위치에 따라 초정 Si의 크기는 큰 차이를 나타내었다. 전체적으로 볼 때, 첨가한 P의 양이 증가함에 따라 초정 Si의 미세화경향은 뚜렷하며, 미세화처리의 효과는 선재의 중심부에서 보다 크게 나타났다. 이는 선재의 표면부가 주형과의 접촉에 의해 높은 냉각속도로 응고하기 때문에 냉각속도에 의한 초정 Si의 미세화 효과가 이미 존재했기 때문으로 생각된다. 즉, 미세화제를 첨가하지 않은 0 ppm 선재의 중심부에서는 조대한 100 μm전후의 초정 Si이 확인되지만 미세화제 첨가량의 증가에 따라 초정 Si의 편석이 일부 확인되며, 선재 중심부의 초정 Si은 현저하게 미세화되는 경향을 나타내었다. 미세화제를 첨가하지 않은 0 ppm시편의 경우, 가장자리부의 초정 Si은 중심부의 초정 Si에 비해 미세한 경향을 보이며, P첨가량의 증가에 따라 미세화되는 경향은 가장자리부와 중심부가 동일하지만 미세화의 정도는 가장자리부가 중심부에 비해 현저히 줄어들기 때문에 미세화제 첨가량이 약 60 ppm일 경우에는 선재 가장자리의 초정 Si과 중심부의 초정 Si의 크기 차이가 육안으로 구분할 수 없을 정도로 줄어드는 것이 확인되었다.

가장자리부의 초정 Si중에서도 선재하부의 초정 Si이 상부의 초정 Si에 비해 전체적으로 미세한 경향을

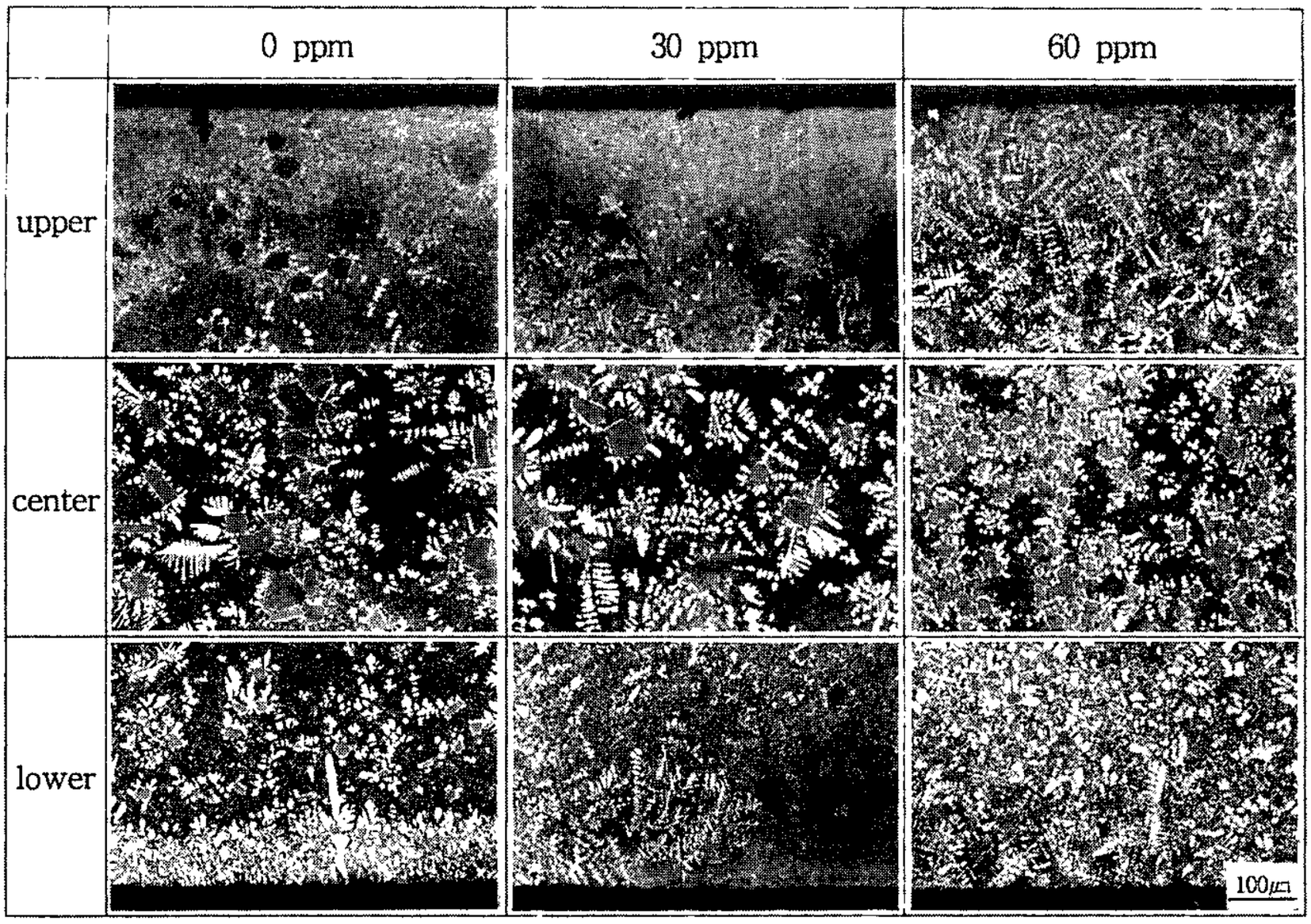

Fig. 5. Microstructures of Al-17.5%Si alloy produced on the condition of A.

나타내었다. 이와같이 선재 하부의 초정 Si이 미세한 경향은 첨가한 미세화제 P의 양에 관계없이 모든 조건에서 같은 양상을 나타내었다. 이는 용탕의 주형내 응고양상에 기인한 것으로 판단된다. 수평연속주조에서 주형내의 용탕은 응고에 따른 부피축소에 의해 미세조직의 상하편차가 동반된다고 보고[17]되어 있다. 즉, cooling jacket의 냉각효과가 주형으로 전달되면서 용탕의 응고에 따른 고액계면은 sump형상으로 변하

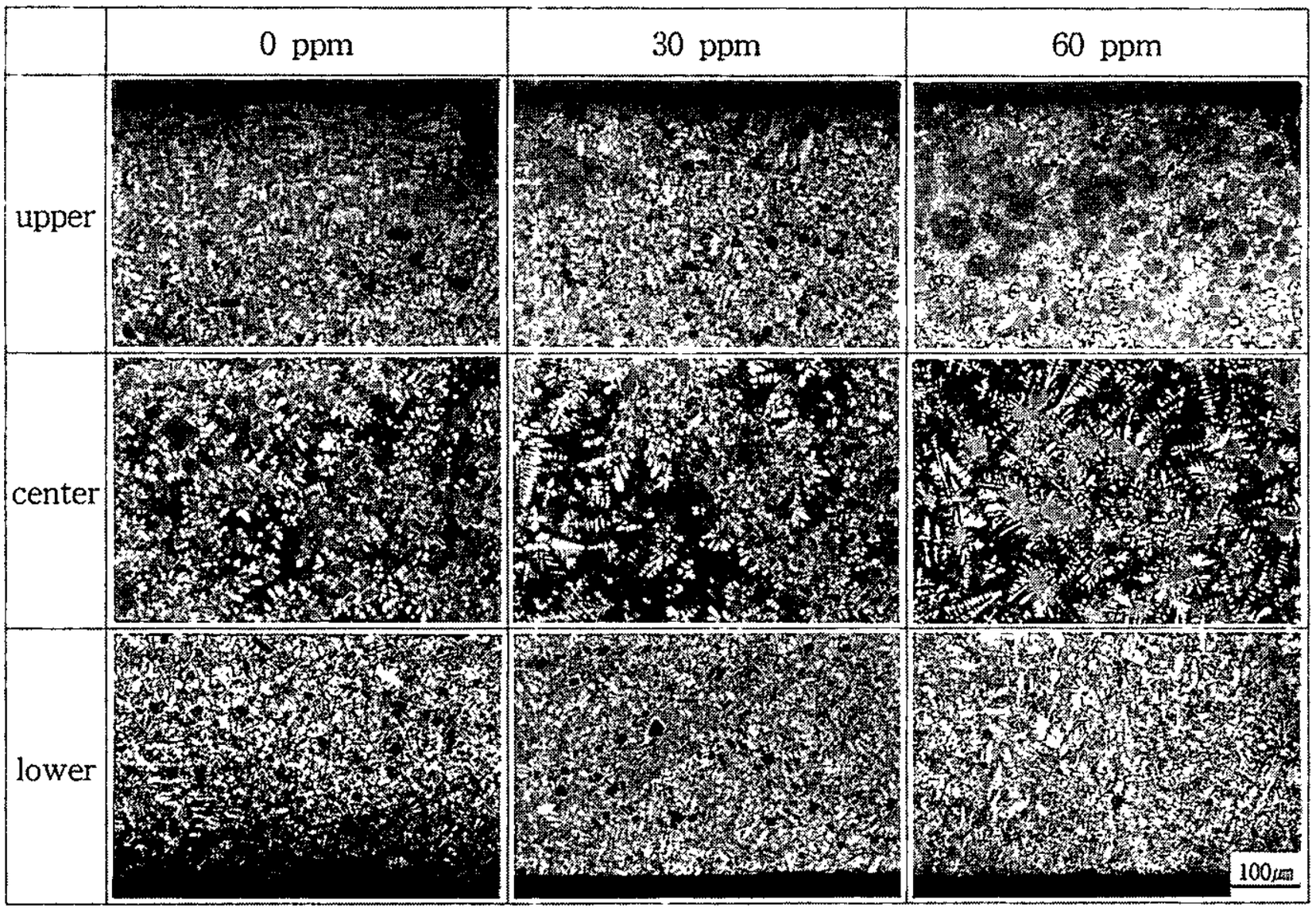

Fig. 6. Microstructures of Al-17.5%Si alloy produced on the condition of B.

고, 응고에 따른 부피축소에 의해 소재의 단면적은 주형의 내경에 비해 작아지면서 주형의 일부와 소재는 비접촉상태로 발전한다. 주형의 단면적보다 단면적이 작은 주조재는 자중에 의해 주형의 하부와 밀착되고, 따라서 주형 상부와는 비접촉상태가 되므로 하부의 냉각속도가 상부의 냉각속도에 비해 커지기 때문에 소재의 중심선을 기준으로 미세조직은 상하 비대칭조직이 형성되는 것으로 알려져 있다. 한편 선재의 중심부에서는 cooling jacket의 냉각효과가 선재의 표면을 통해 전달되기 때문에 가장자리의 응고가 일어난 후 중심부의 응고가 시작되므로 냉각속도가 느리며, 고액계면은 sump형상이 된다. 이와같은 기구에 의해 수평연속주조한 Al-Si합금에서 그림 5와 같이 냉각속도가 큰 선재 가장자리의 초정 Si이 중심부의 초정 Si에 비해 미세한 경향을 나타내었으며, 선재 가장자리 중에서도 냉각효과의 전달이 용이한 하부의 초정 Si이 상부의 초정 Si에 비해 미세하게 응고한 것으로 판단된다. 이와같은 초정 Si의 크기변화는 표 2의 조건 A보다 취출속도를 증가시킨 조건 B로 연속주조한 선재(그림 6)의 미세조직에서도 동일한 양상을 나타내었다. 그러나 그림 5와 6을 비교했을 경우, 취출속도의 증가에 따른 미세조직의 변화나 초정 Si의 크기 차이는 육안으로 확인할 수 없었다. 취출속도의 증가에 따라 냉각속도가 증가하고 따라서 초정 Si의 크기는 미세해질 것으로 기대되나, 본 실험의 범위에서 변화시킨 취출속도변화는 초정 Si의 크기를 결정하는 Al-Si 합금의 액상선에서부터 고상선까지의 온도변화에 걸리는 시간에 큰 영향을 미치지 못했음을 의미한다.

3.2 P첨가에 의한 영향

그림 7은 조건 A로 연속주조한 Al-17.5wt%Si 합금의 응고에 따른 선재의 각 부위별 초정Si의 크기를 측정한 결과로서 미세화제인 AlCuP를 30 ppm 및 60 ppm첨가한 시편의 초정 Si이 미세화제를 첨가하지 않은 0 ppm시편의 초정 Si보다 평균크기가 작으며 선재의 단면적 전체에 걸쳐 크기가 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 따라서 과공정 Al-Si합금의 수평연속주조시 공정조건과 미세화제인 AlCuP의 첨가량을 상호조절함으로써 단면적 전체에 걸쳐 균일한 크기의 초정 Si을 가진 미세조직을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

그림 8은 조건 A 및 B로 연속주조한 Al-17.5wt%Si 합금의 P첨가량에 따른 초정 Si의 크기를 선재의 각

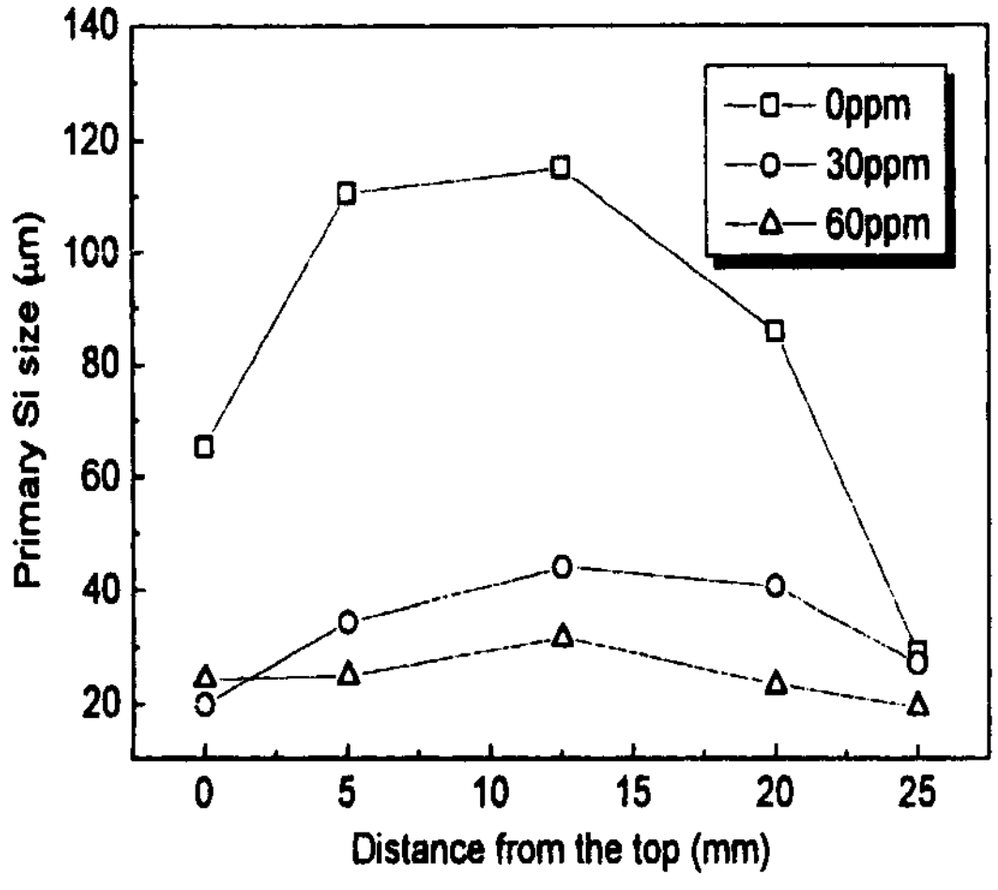

Fig. 7. Primary Si size variation with the distance across the cross-section.

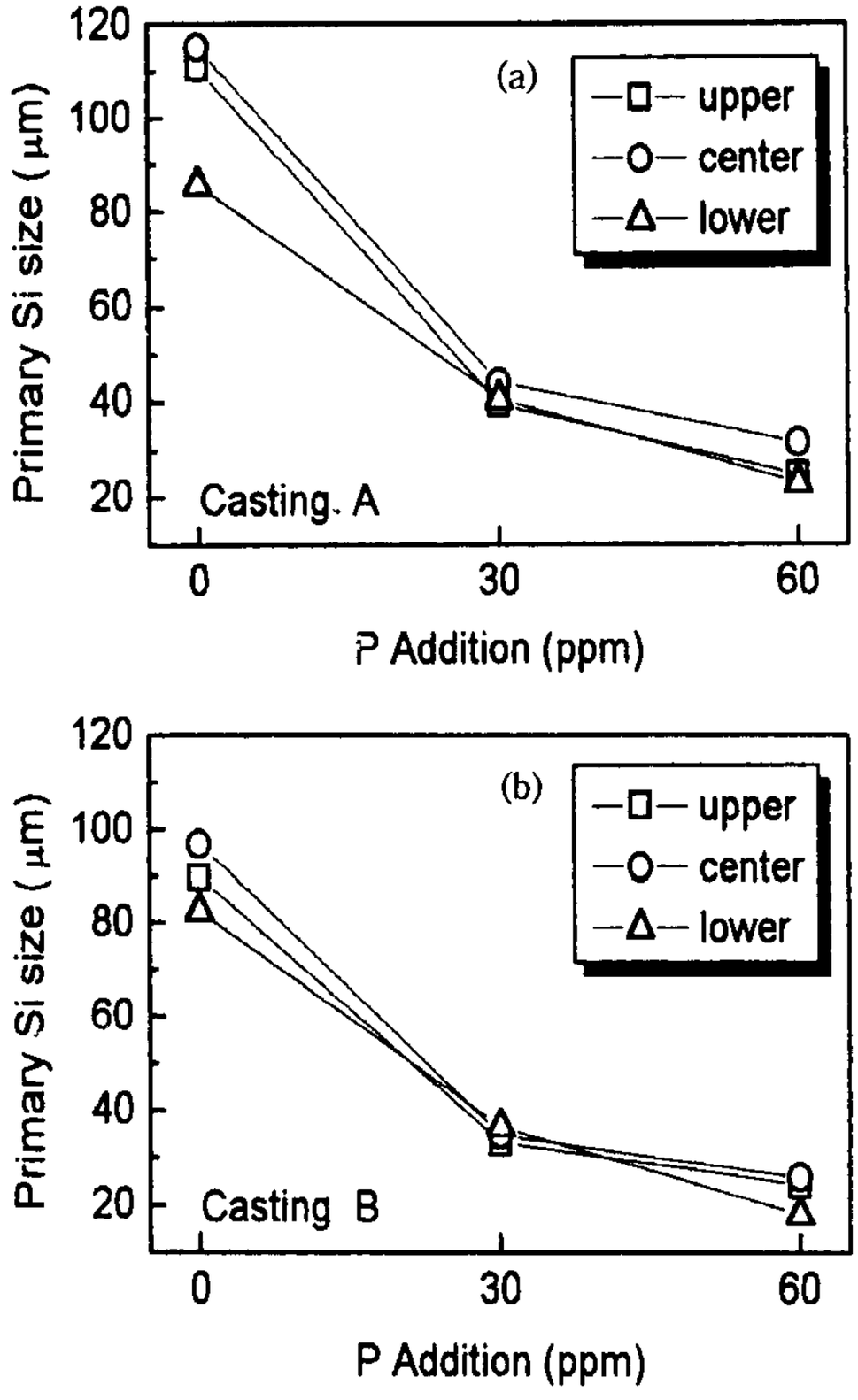

Fig. 8. Effect of P addition on the average primary Si size.

부위별로 도식한 결과이다. 그림 5 및 6의 미세조직에서 확인되었던 경향과 같이 선재중심부의 초정 Si은 P첨가량 증가에 의해 큰 폭으로 감소하며, 표면부위의 초정 Si은 P의 첨가량에 관계없이 중심부에 비해 미세한 경향을 보이고, 미세화제 첨가에 의해서 초정 Si의 크기가 감소하는 폭은 중심부에 비해 작은 것으로 나타났다. 또한 주조속도가 빠른 조건 B의 초정 Si의 크기는 주조속도가 상대적으로 느린 조건 A의 초정 Si의 크기에 비해 미세화제를 첨가하지 않은 시편의 상부 및 중심부에서는 미세한 경향을 보이지만 P첨가량이 증가함에 따라 그 차이는 줄어들고 첨가량이 60 ppm에서는 거의 동일한 크기의 초정Si이 형성되었다. 취출속도 증가에 따른 선재 중심부와 가장자리부의 초정 Si의 크기 차이가 줄어드는 원인은 취출속도의 증가에 의해 선재 중심부의 냉각속도가 가장자리부의 냉각속도보다 큰 폭으로 증가했음을 의미한다. P첨가량의 증가에 따른 초정 Si의 미세화효과는 미세화제 첨가량 60 ppm에서 둔화되면서 선재 상 · 하부 및 중심부에서 균일해지며 약 15~40 μm사이의 크기를 나타내었다.

3.3 기계적 특성

그림 9는 조건 A 및 B로 연속주조한 선재의 미세화제 첨가량에 따른 경도값의 변화를 선재의 상부, 중심부 및 하부를 구분하여 조사한 결과이다. 경도값은 미세화제 P첨가량에 따른 차이를 나타내지 않고 전체적으로 HB60 전후의 값을 나타내었으며, 또한 주조조건을 변화시킨 경우 주조속도에 따른 경도값의 차이는 확인되지 않았다. 이와같이 일정한 경도값의 결과는 미세조직 분석결과 초정 Si의 평균크기에 있어 선재의 상 · 하부 및 중심부에서 큰 차이가 확인되었으며, 또한 미세화제의 P첨가량에 따라 초정 Si이 큰 차이를 나타낸 결과와는 상이한 결과이다. 즉, 본 실험에서 확인된 초정 Si의 변화폭인 15~120 μm정도의 크기변화에서의 경도값은 조직내에 분포하는 경질의 초정 Si의 크기에는 크게 의존하지 않음을 알 수 있다.

한편 미세조직 및 초정 Si의 크기가 선재의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과는 그림 10과 같다. 그림 9의 경도값이 변하지 않았던 결과와 같이 최대인장강도 및 항복강도는 첨가한 미세화제 P의 양에 의존하지 않고 최대인장강도 17 kgf/mm^2, 항복강도 10 kgf/mm^{2}의 일정한 값을 나타내었다. 이와같은 결과로부터

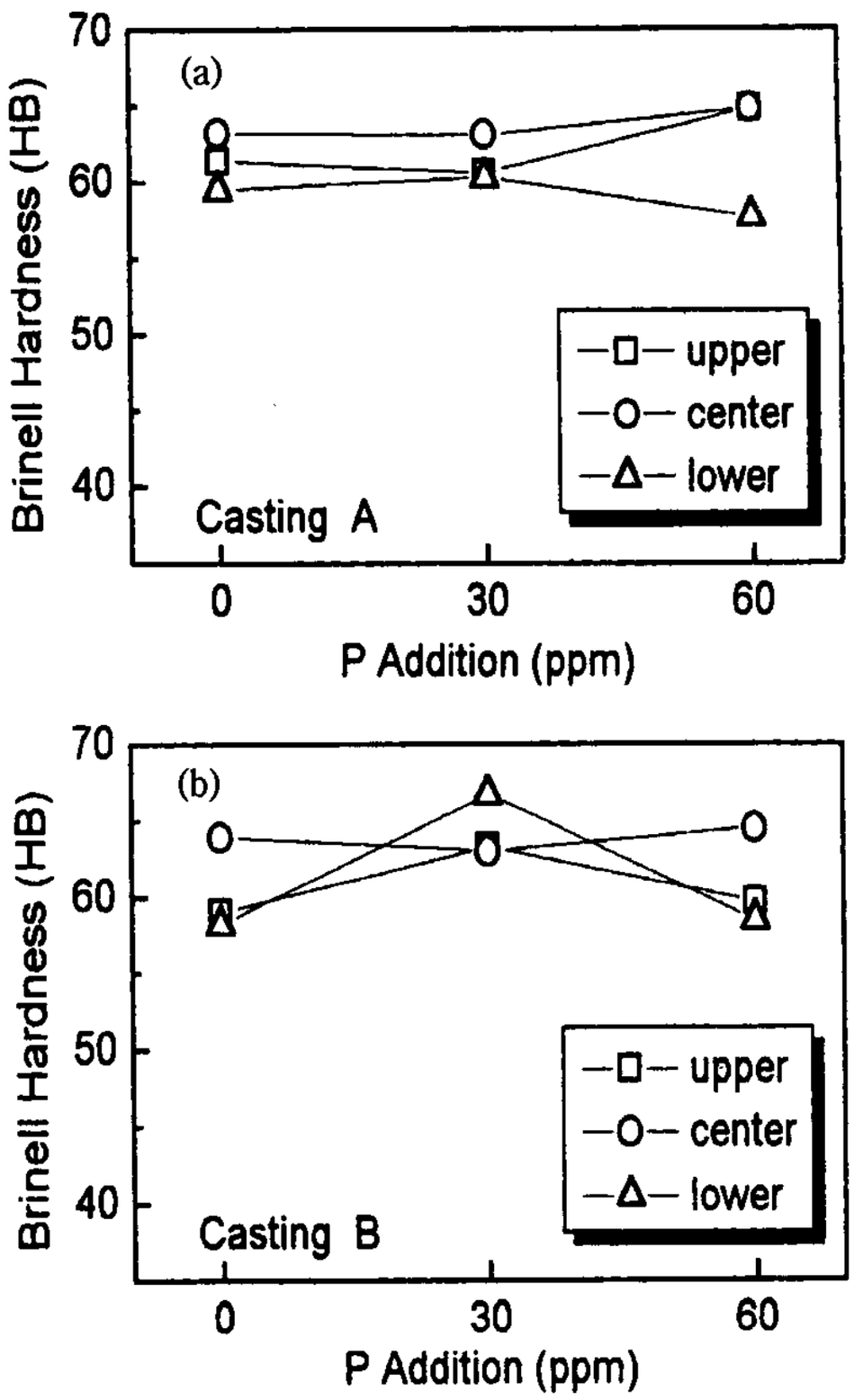

Fig. 9. Effect of P addition on Brinell hardness change.

내마모특성이 우수한 것으로 알려진 과공정 Al-Si합금의 경우 일반적인 기계적특성인 경도 및 인장강도

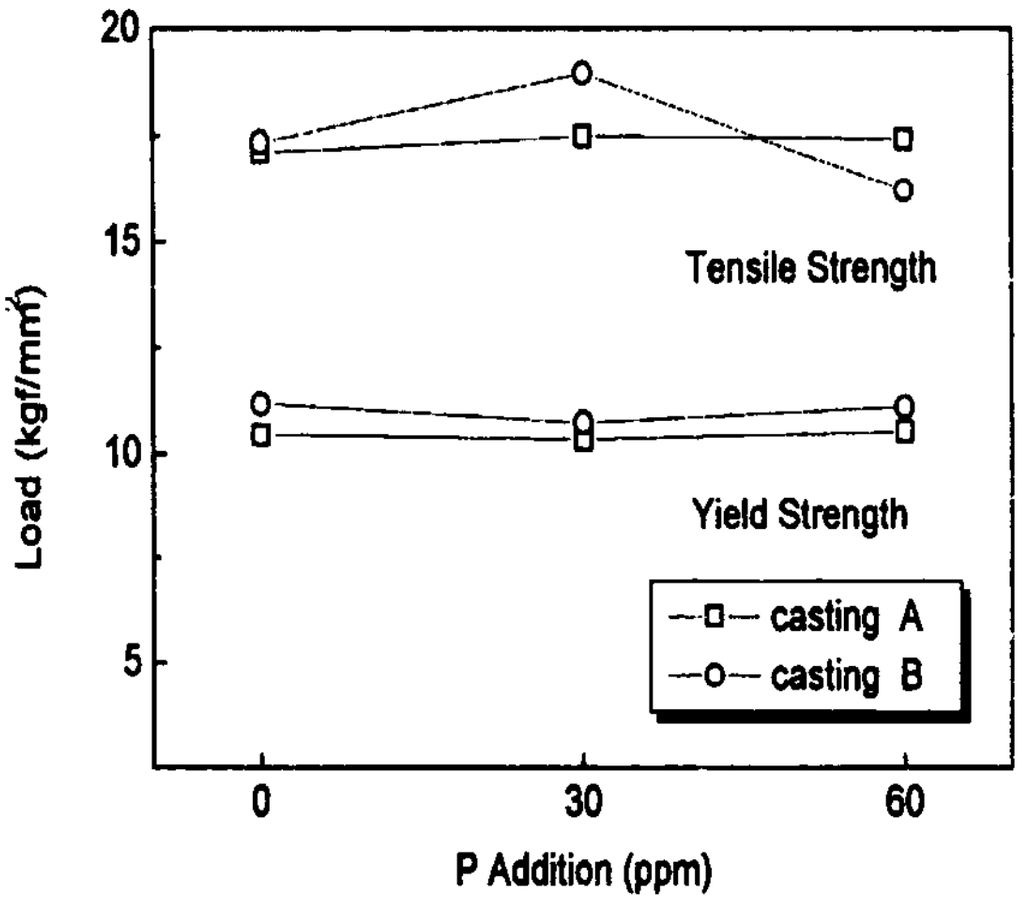

Fig. 10. Effect of P addition and casting condition on the change of ultimate tensile strength and yield strength.

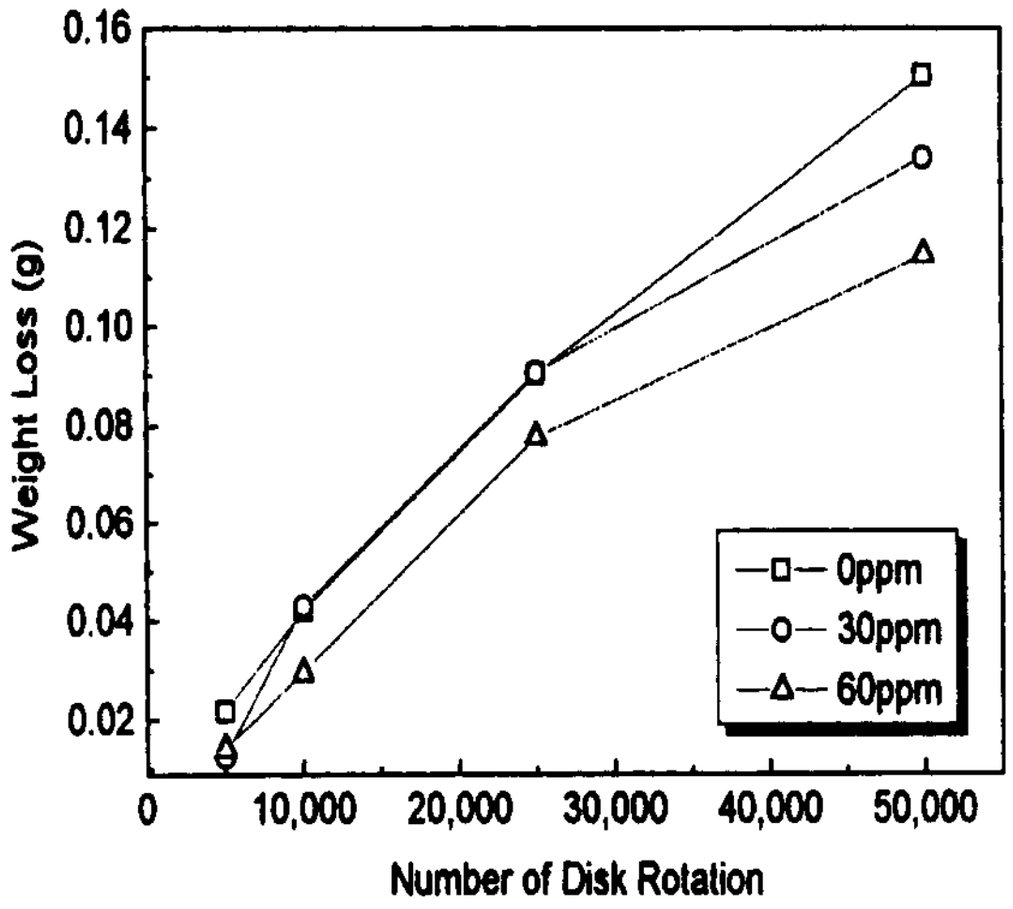

Fig. 11. Wear resistance of refined Al-17.5%Si alloy bars tested by pin-on-disk type wear tester.

는 초정 Si의 미세화를 위해 첨가한 P의 영향, 즉 초정 Si의 크기에는 의존하지 않으며, 합금의 강도 및 경도를 변화시키기 위해서는 시효경화성 원소인 Cu나 Mg을 첨가하여 석출경화 시키는 공정이 필요함을 알 수 있다.

반면, 초정 Si의 미세화에 의한 과공정 Al-Si합금의 마모특성은 현저한 차이를 나타내었다. 그림 11은 미세화제 P의 첨가량에 따른 마모특성을 disk의 회전수와 pin의 중량손실로 나타낸 그림이다. 회전수의 증가에 따라 마모되는 pin은 중량이 감소하여 마모량이 증가하지만, 마모량의 변화폭(기울기)이 미세화제 첨가량의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 미세화제 첨가량의 변화에 따른 평균 초정 Si의 크기를 측정한 그림 8과 관련지어 볼때, 조직내에서 정출한 초정 Si의 크기가 감소함에 따라 내마모특성은 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

과공정 Al-Si합금 선재를 수평연속주조 공정에 의해 제조하고 P첨가량(AlCuP type)에 따른 미세조직의 변화와 기계적특성을 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) ϕ25 mm 크기의 Al-17.5wt%Si 합금 선재를 후진/전진/정지의 3-cycle 취출공정을 이용하여 ~225 mm/min의 속도로 수평연속주조하였다.

2) 연속주조한 Al-17.5wt%Si 합금 선재에서 P가 첨가되지 않은 경우, 초정 Si의 크기는 선재의 중심부에 비해 표면부위가 미세하였으나 P를 약 60 ppm 첨가한 경우에는 초정 Si의 크기가 전체 선재 단면에 걸쳐 비교적 균일한 조직을 얻을 수 있었으며, 평균 초정 Si의 크기는 15~40 μm로 확인되었다.

3) 연속주조한 선재의 경도는 약 HB60, 인장강도는 17~18 kgf/mm^{2}으로 초정 Si의 크기에 의존하지 않는 경향을 나타냈으나, 미세화처리에 의한 내마모특성은 현저히 증가하였다.

참 고 문 헌

[1] J. B. Andrews and M. V. C. Senerviratne : AFS Trans., 92 (1984) 209.
[2] ASM Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 2 (1979) 171
[3] F. J. Kissling and O. Tichy : AFS Trans., 67 (1959) 347
[4] J. L. Jorstad : AFS Trans., 92 (1984) 573
[5] P. B. Crosely and L. F. Mondolfo : AFS Trans., 74 (1966) 53
[6] P. H. Shingu and J. L. Takamura : Met. Trans., 1 (1970) 2339
[7] H. Chuyo and N. Tsukasa : Light Metals, 71 (1965) 25
[8] P. A. Tondel and L. Arnbery : The 3rd International Conference on Aluminum Alloys, 1 (1992) 129
[9] P. B. Crosely, A. W. Douglas and L. F. Mondolfo : The Solidification of Casting of Metals. The Metals Society (1979) 161
[10] G. K. Sigworth : AFS Trans., 82 (1987) 303
[11] 安達 充 : 輕金屬, (1984) 430
[12] S. Das, A. H. Yegneswaran and P. K. Rohatgi : J. Mat. Sci., 22 (1987) 3173
[13] 한상봉 · 김지훈 · 류봉선 · 박원욱 · 예병준 : 주조, Vol 17, No. 4 (1997) 347
[14] 류봉선 · 지무성 · 박원욱 : 주조, Vol 16, No. 2 (1996) 116
[15] J. C. Attwood and D. W. Davies : Foundry Trade Journal, 10 (1983) 365
[16] G. A. Colligen and M. A. Gunes : AFS Trans., 73 (1965) 359
[17] E. F. Emley : Inter. Metals Rev., June (1976) 75