

금형주조한 Al-Si 과공정합금의 초정 Si 입자거동에 따른 기계적 성질 변화

김 역 수[#]

(2004년 5월 10일 접수)

Effect of Primary Si on Mechanical Properties in Hypereutectic Al-Si Alloy Produced by Gravity Die Casting

Eok-Soo Kim

Abstract

Mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloy are influenced by the size and distribution of primary Si. To investigate the effects of P addition and holding time, hypereutectic Al-Si alloys with various amount of P content were produced in the lab. Then, the size and distribution of primary Si were examined respectively. Mechanical properties of hardness, tensile strength and wear resistance were analyzed in conjunction with the microstructural variations in alloys.

Key Words : Hypereutectic Al-Si Alloy, Refinement, P Addition, Fading

1. 서 론

과공정 Al-Si 합금은 유동성이 뛰어나고 비강도가 높아서 자동차 및 항공산업의 경량화에 필요한 주물용 재료로 널리 이용되고 있다. 특히, 경질의 초정 Si에 의한 우수한 내마모성과 높은 열전달계수 및 낮은 열팽창계수 등의 우수한 성질을 갖고 있어 내마모성이 요구되는 자동차 실린더 블록, 에어 컴프레셔와 펌프 등에 이용된다.⁽¹⁻²⁾

한편, 과공정 합금은 공정기지에 단단한 비금속 Si 초정 입자가 박혀있는 천연의 복합재료조직을 가지고 있다. Si은 비중이 2.33으로 Al의 비중 2.7보다 더 가벼우므로 합금 경량화에도 중요한 역할을 하는 원소이다. Si은 높은 경도 때문에 합금의 내마모성을 증가시키므로 Si의 함량이 많아 질수록 합금의 내마모성은 증가하게 되며 열팽창계수는 감소하는 경향이 있다. 또한, Si은 합금 용탕의 유동성을 증가시키는 효과도 가지고 있는데, 그 이유는 같은 부피의 Al의 잠열에 비하여

Si의 잠열이 약 4.5배정도 더 크기 때문이다. 이러한 양호한 성질에도 불구하고 12.7%이상 Si을 첨가하게 되면 조대하게 성장한 초정 Si 입자가 생성되어 제품의 기계적 성질 및 절삭성에 악영향을 미치므로 기능성 소재로의 역할을 하기 위해서는 초정 Si 입자의 미세화처리가 필수적으로 요구된다.

따라서 초정 Si를 미세화하기 위하여 냉각속도의 증가⁽³⁾ 및 미세화제의 첨가⁽⁴⁻⁶⁾ 등의 방법들이 사용되어 왔으며, 냉각속도의 증가를 통한 미세화 기구는 냉각속도의 증가가 응고시에 용탕의 과냉도를 증가시켜 초정 Si의 균일 핵생성을 촉진시켜 초정 Si의 미세화가 이루어지는 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾. 이러한 냉각속도의 증가를 통한 미세화는 기술적으로 다소 어려움이 있어 미세화제 첨가법이 주로 사용되고 있다.

미세화제 첨가법에서는 P, S, As, Ti, Se 등과 같은 여러 가지 미세화제가 있으나 첨가의 용이함, 적은 사용량, 오랜 지속성, 저렴한 가격 등의 장

[#] 교신저자: 동남정밀(주) 생산기술연구소

점을 가지는 P가 가장 널리 사용되고 있으며,⁽⁷⁾ 그 기구는 P가 용탕에 첨가되어 AIP를 형성하고 이 AIP가 불균일 핵생성 자리로서 작용하기 때문인 것으로 보고되어 있다.⁽⁸⁻⁹⁾

그러나, 많은 용탕첨가제와 마찬가지로 P도 시간이 지남에 따라 fading되고, P가 fading됨에 따라 초정 Si은 점차 조대해진다. P의 fading 기구는 생성된 AIP핵의 응집으로 알려져 있으며, 이로 인해 P가 fading이 되면서 초정 Si의 핵생성 자리가 감소되고 그 결과로 Si의 조대화가 일어난다.^(3,10)

이러한 용탕의 유지시간에 따른 P의 fading 현상은 P의 첨가량에 따라 변화⁽⁶⁾하는 것으로 보고되고 있으나 이에 관한 객관적이고 체계적인 연구는 아직 보고되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 과공정 Al-Si 합금의 P 첨가에 의한 미세화의 최적조건을 알아보고 체계적으로 연구 보고되지 않았던 P첨가량에 따른 P의 fading의 변화에 따른 영향을 초정 Si의 미세조직 관찰을 통하여 정량적으로 밝히고자 하였다. 또한, 초정 Si 입자거동에 따른 기계적 성질에 미치는 영향 및 변화⁽¹¹⁻¹²⁾에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용된 주조용 Al 합금은 Si 이 약 11% 함유된 상용 ADC12(JIS)합금이며, 여기에 Si의 함량이 14.5~15.5wt.%가 되도록 Si 함량을 증가시켜 과공정 Al-Si 합금을 제조하였다. 첨가한 Si은 850℃에서 용해시켰으며 각 실험조건별 화학 조성을 동일하게 하기 위하여 Cu를 동시에 첨가한 후 750℃에서 유지하였다. 이 합금의 조성을 Spark Emission Spectrometer(Atom Comp 181, Thermo Jarrell Ash Corp., USA)로 분석하여 목표 조성을 위한 Si 및 Cu의 첨가량을 결정하였다.

이 과공정합금에서 조대하게 정출하는 초정 Si을 미세화하기 위한 미세화제로서 P를 사용하였으며, Cu-6.8-7.5wt.%P의 합금형태로 첨가하였다. 이렇게 제조된 합금의 화학 조성을 Table. 1에 나타내었다.

과공정 합금의 초정 Si을 미세화처리하기 위한 최적의 P 첨가량을 알아보기 위해 합금 내 P 함량을 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 및 0.2wt.%로 변화시키면서 첨가하고 약 30분간 진정시킨 후 200℃로 예열된 금형에 주탕하여 시편을 제조하였

다. 또한 과공정 Al-Si 합금에서 미세화제로 사용된 P의 fading 현상을 알아보기 위해 P 첨가량에 따라 제조한 용탕에 대해 100시간의 유지시간을 설정한 후 10, 20, 50 및 100시간대에 시편을 채취하였다.

제조된 합금의 입자거동상태를 관찰하였고, P첨가와 유지시간에 따른 P의 fading에 의한 초정 Si의 조대화가 소재의 기계적 성질에 미치는 영향을 알아보기 위해 인장, 경도 및 마모시험을 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of hypereutectic Al-Si alloy (wt.%)

Element	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
Hypereutectic	14.5~	4.0~	0.2~	0.7~	0.5~	0.1~	0.1↓	bal.
Al-Si Alloy	15.5	4.5	0.3	0.8	0.7	0.2		

3. 실험결과 및 고찰

3.1 P 첨가 및 fading에 따른 초정 Si 입자거동

제작된 과공정 합금의 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 미세화처리 전 P 무첨가 과공정 합금은 매우 조대한 초정 Si이 나타남을 관찰할 수 있었다.

이 초정 Si를 미세화하기 위하여 P의 함량을 각각 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 및 0.2wt.%가 되도록 첨가한 후 미세조직을 관찰하였고, 각각의 초정 Si의 크기를 측정하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 보듯이 P의 첨가량이 0.001wt.%일 경우 미세화처리가 제대로 이루어지지 않았으며, 0.005wt.%가 첨가되었을 경우 크지 않으나 미세화 효과가 있음이 관찰되었다. 첨가량이 0.01wt.%일 때 초정 Si 크기는 20 μ m 이하로 아주 우수한 미세화효과를 보이며 그 이상 첨가하여도 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다.

이러한 P 첨가에 의한 초정 Si의 미세화 효과는 용탕에 첨가된 P가 Al과 반응하여 AIP를 형성하게 되며, 형성된 AIP가 초정 Si의 핵생성 자리를 제공함으로써 그 미세화가 이루어지는 것으로 알려져 있다.^(7,10,13)

또한, 과공정 Al-Si 합금에 미세화제를 투입하여 미세화처리를 하여도 용탕상태에서 시간이 지남에 따라 fading 현상이 일어나게 되며, 이에 따라 초

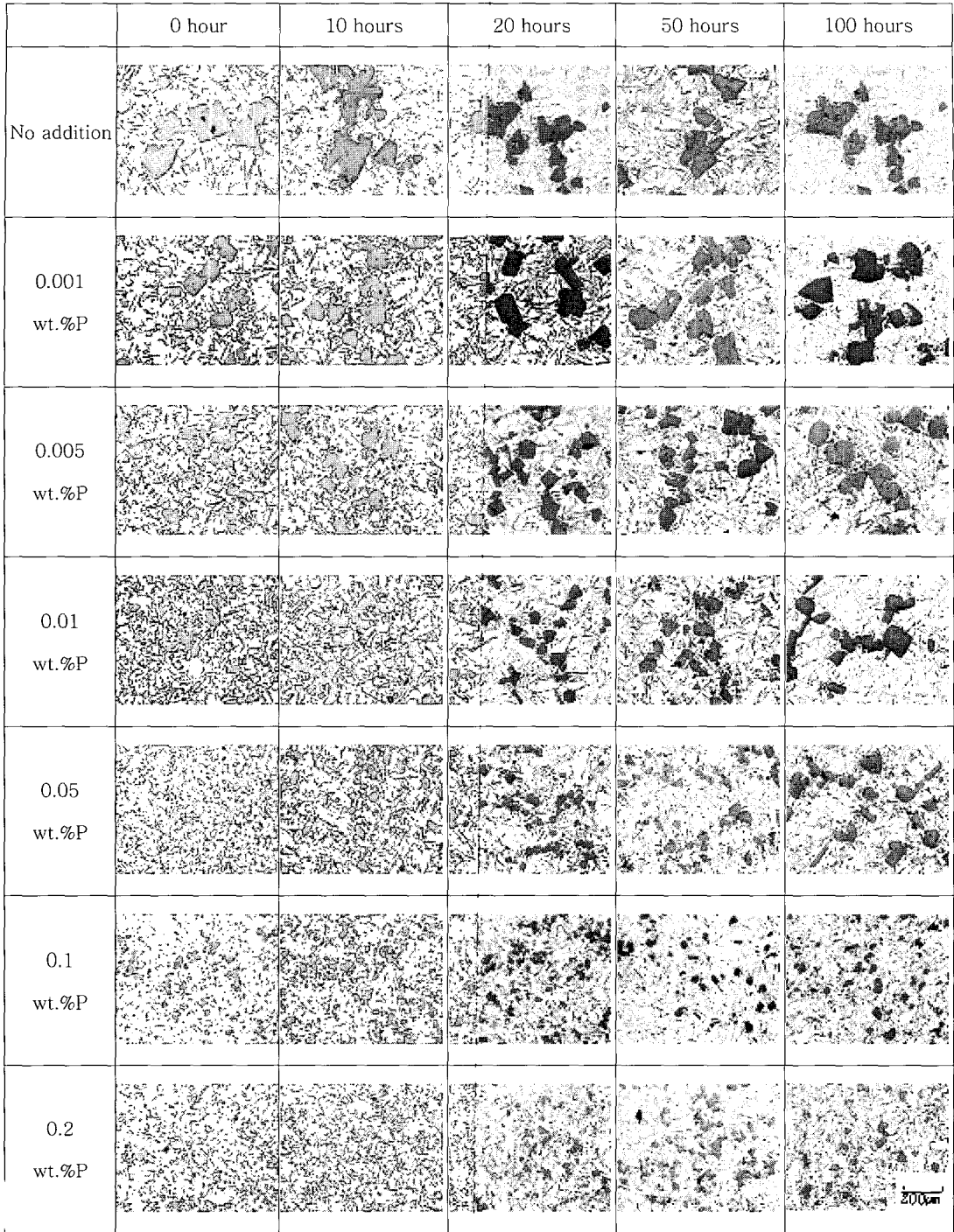


Fig. 1 Optical microstructures of specimens obtained with the variation of fading time and P addition

정 Si 는 조대해진다. P 의 fading 기구는 P 의 첨가로 인하여 생성된 AIP 핵의 응집이며, 이로 인해 초정 Si 의 가능한 핵생성자리가 감소되고 그

결과로 Si 의 조대화가 일어난다.⁽⁴⁾ P 의 fading 과 P 의 첨가량 및 유지시간의 상관관계를 알아보기 위해, P 용해직후, 10시간, 20시간,

50시간 및 100시간후에 각각의 시편을 채취하고 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 보듯이 P를 0.01wt.% 첨가하였을 때 양호한 미세화 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었으나 10시간 경과후 P의 fading 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 0.05wt.%의 P첨가에서도 20시간 이상 유지시 fading이 서서히 진행되어 100시간에서는 매우 조대한 초정 Si의 입자를 관찰할 수 있었다. 그러나, 0.1wt.%P를 첨가하였을 경우 100시간 동안의 holding 이후에도 미세화 효과가 유지됨을 알 수 있었다.

이상의 조직사진으로부터 초정 Si의 크기를 측정하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. P첨가량과 P의 fading현상은 매우 밀접한 상관관계가 있음을 관찰할 수 있었고, P 첨가량이 0.1wt.% 전후에서 유지시간 증가에 따른 P의 fading에 의한 초정 Si 입자거동이 매우 현격한 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

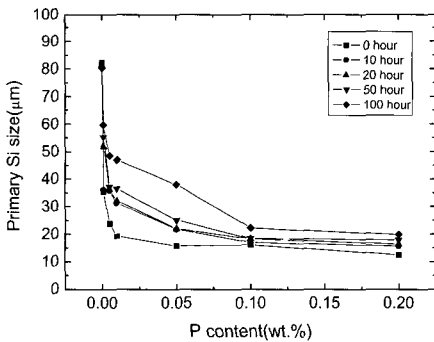


Fig. 2 Variations of primary Si size with P addition

3.2 초정 Si 입자 거동에 따른 기계적 성질 변화

P의 fading에 의한 초정 Si의 크기변화에 따른 과공정 Al-Si 합금의 기계적 성질의 변화를 알아보기 위해 경도시험, 인장시험, 내마모시험을 실시하였다.

3.2.1 경도시험

내마모성의 주요 평가척도가 되는 경도시험의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. P의 fading에 의한 초정 Si의 크기 변화에 따른 경도의 변화를 관찰한 결과, 만족할만한 미세화 효과가 얻어졌을 때의 경도는 약 120HB 정도였고, 초정 Si의 조대화

에 따라 약 90HB 까지 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 P 첨가량이 0.01wt.% 미만일 경우 경도의 저하가 현저한데, 이는 초정 Si의 조대화와 그로 인한 Si의 편석 때문인 것으로 판단된다.

하지만 Fig. 3에서 보듯이 P의 첨가량이 0.1wt.% 이상일 경우 유지시간에 관계없이 경도가 일정한 것을 알 수 있는데 이는 P의 fading 현상이 미미하여 초정 Si이 시간에 따라 응집되는 효과가 작으므로 합금 전체에 걸쳐 초정 Si를 균일하게 분산시키기⁽¹⁴⁾ 때문인 것으로 사료된다.

3.2.2 인장시험

과공정 Al-Si 합금계에서 일반적인 인장강도는 합금의 Si 함유량이 많을수록 감소하게 되지만 초정 Si의 미세화를 통해서 극복할 수가 있다.

초정 Si의 미세화는 취약한 Si 상을 미세하고 고르게 분포시켜 합금의 인장특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾

Fig. 4에 P의 fading에 의한 초정 Si의 크기 변화에 따른 인장강도의 변화를 나타내었다. P의 첨가량이 최적으로 판단될 때의 인장강도는 약 30kgf/mm²였으며, 유지시간이 지남에 따라 약 23kgf/mm²까지 인장강도가 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 P 첨가량이 0.1wt.% 이상일 경우 약 30kgf/mm²의 인장강도를 유지하며 100시간에 걸친 유지시간에 관계없이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 5에 연신율의 변화를 나타내었다. 최적으로 판단되는 P 첨가량에서의 연신율은 약 4%이며, 초정 Si의 조대화에 따라 약 2%까지 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 기계적 특성을 크게 좌우하는 인장강도 및 연신율 역시 초정 Si의 입자크기 거동에 매우 민감함을 알 수 있었고 P 미세화 효과가 유지되는 0.1wt.% 이상의 조건에서 경도시험의 결과와 유사하게 인장특성에도 탁월한 효과를 나타내었다.

3.2.3 마모시험

과공정 Al-Si 합금은 마모저항이 요구되는 부분에 많이 적용된다. 이러한 과공정 합금의 마모특성에 대한 설명은 크게 2가지로 분류된다. 하나는 마모특성을 결정하는 것이 초정 Si의 형상보다는 Si의 전체 함유량이라는 것, 즉 Si을 많이 함유한 합금일수록 내마모성이 향상된다는 것이며, 또 다른 하나는 내마모성에 주요한 영향을 주는 것이

초정 Si 의 미세화라는 것이다.^(7,10)

먼저 본 실험에 사용된 기지금속인 ADC12와 실험을 위해 제조한 A-15wt.%Si 과공정 합금의 마모량을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Si 첨가량의 증가에 따라 마모량이 약 65%까지 감소하여 내마모성이 우수해진 것을 알 수 있었다. 또한, 과공

정 Al-Si 합금의 초정 Si 을 미세화하기 위해 P를 첨가할 때 P의 첨가량에 따라 내마모성이 향상되는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있으며, 특히 최적의 미세화조건으로 판단하였던 P 첨가량이 0.01 wt.% 이상일 경우 미세화처리를 하지 않았을 경우보다 약 60%정도 마모량이 감소한 것을 알 수 있었다. 이는 내마모성에 초정 Si 의 미세화 효과가 상당한 관계성이 있음을 입증하는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 7에 P의 fading에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. P의 fading에 따라 마모량의 증가를 관찰할 수 있으며, P 첨가량이 0.1wt.% 이상일 경우 유지시간에 영향을 덜 받는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 Si의 전체 함유량이 마모특성에 크게 영향을 미치는 것은 물론, 같은 조건의 Si 함유량에서도 초정 Si의 미세화 효과 즉 입자크기 및 분포도 등의 초정 Si 입자거동이 합금의 내마모성에 크게 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

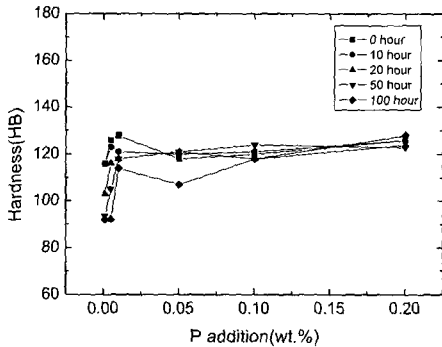


Fig. 3 Variations of hardness with P addition

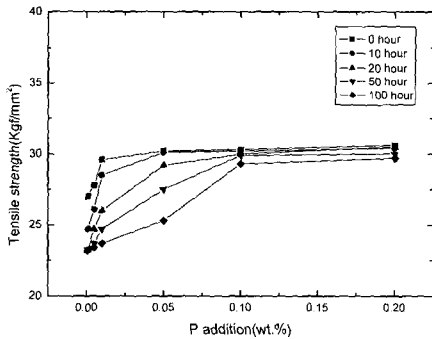


Fig. 4 Variations of tensile strength with P addition

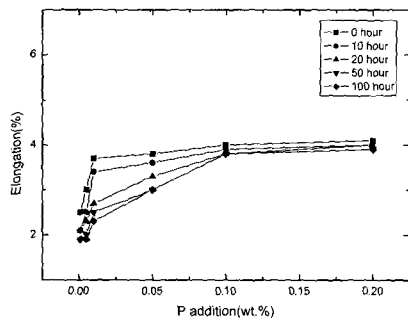


Fig. 5 Variations of elongation with P addition

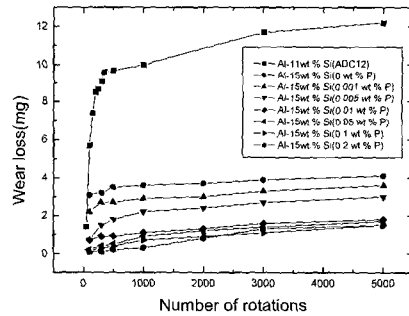


Fig. 6 Variations of wear resistance property with Si content and P addition

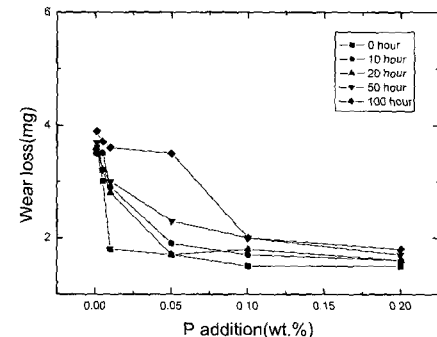


Fig. 7 Variations of wear resistance property with P addition

4. 결 론

과공정 Al-15wt.%Si 합금의 P 첨가와 fading 시간의 영향에 대한 실험을 행한 후 미세조직을 관찰하고 초정 Si 입자 거동에 따른 기계적 성질을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 과공정 Al-15wt.%Si 합금에서 조대하게 정출하는 초정 Si 을 미세화하기 위해 P 를 첨가한 결과 P의 첨가량이 약 0.01wt.%일 때 초정 Si의 크기가 약 20 μ m정도인 효과적인 미세조직을 얻을 수 있었다.

(2) 용탕의 유지시간에 따른 초정 Si의 조대화를 방지하기 위한 최적의 P 첨가량을 알아본 결과, P 첨가량이 0.1wt.%일 때 100시간의 유지시간에서도 P의 fading 현상이 없음을 알 수 있었고 그 이상의 첨가는 뚜렷한 fading에 대한 효과의 변화가 없는 것을 확인하였다.

(3) P의 fading에 따른 경도의 변화를 시험한 결과, P의 fading 시간의 증가에 따라 초정 Si의 조대화와 편석으로 인하여 경도의 저하가 뚜렷이 나타났다. 그러나 P 함량이 0.1wt.% 이상일 경우에는 P의 fading에 의한 경도의 저하는 나타나지 않았다.

(4) 기계적 성질의 변화를 알아보기 위해 인장시험을 실시한 결과 0.01wt.% 첨가의 경우 인장강도가 약 30kgf/mm², 연신율이 약 4%로 우수하게 나타났다지만 P가 fading 됨에 따라 인장강도가 약 23kgf/mm², 연신율이 약 2%까지 낮아졌다. 그러나 0.1wt.% 이상 첨가될 경우 fading 시간에 영향을 받지 않았다.

(5) 초정 Si의 입자 크기가 내마모성에 미치는 영향을 알아보기 위해 마모시험을 실시하였으며, 그 결과 초정 Si의 미세화처리에 의해 마모량이 약 60% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 이 마모량은 fading에 따른 초정 Si의 조대화로 인해 증가하지만 P 첨가량이 0.1wt.% 이상일 경우 fading 시간에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 한상봉, 김지훈, 류봉선, 박원욱, 예병준, 1997, “과공정 Al-Si 합금의 초정 Si 미세화에 미치는 냉각속도와 P첨가량의 영향”, 한국주조공학회지 제 17권 4호, pp. 347~355.
- (2) 박재영, 이재상, 나형용, 1995, “기계적 합금화법에 의한 과공정 Al-Si 합금 미세화제 개발 및 개량효과에 관한 연구”, 한국주조공학회지 제 15권 4호 pp. 120~125.
- (3) S. Das, A. H. Yegneswaran and P. K. Rohatgi, 1987, J. Mat. Sci., 22 3173.
- (4) Adachi, M., 1984, Journal of Japan Institute of Light Metals Vol. 34, No. 4 430.
- (5) G. K. Sigworth, 1987, AFS Trans., 82 303.
- (6) P. A. Tondel and L. Arnbery, 1992, The 3rd International Conference on Aluminium Alloys, 1 129.
- (7) 주대현, 김명호, 1995, “P에 의한 과공정 Al-Si 합금의 미세화처리”, 한국주조공학회지 제 15권 5호 pp. 21~30.
- (8) G. A. Colligen and M. A. Gunes, 1965, AFS Trans., 73 359.
- (9) P. B. Crosley and L. F. Mondolfo, 1966, AFS Trans., 74 53.
- (10) 한상봉, 김지훈, 예병준, 1998, “Al 합금의 응고(III)-과공정 Al-Si 합금의 개량화 특성-”, 한국주조공학회지 제 18권 5호, pp. 86~93.
- (11) T.S.Kim, K.H.Kim, W.T.Kim, C.W.Won, S.S.Cho and B.S.Chun, 1998, “Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Solidified Al-20Si-xFe-3Cu-1Mg(x=0 and 5 wt.%) Extrudates”, METALS AND MATERIALS, Vol.4, No.6, pp. 1163~1169.
- (12) Jung-Moo Lee, Suk-Bong Kang and Sang-Chul Yoon, 1999, “Role of the Primary Silicon Particle on the Dry Sliding Wear of Hypereutectic Aluminium-silicon A390”, METALS AND MATERIALS, Vol.5, No.4, pp. 357~362.
- (13) 정운재, 김기태, 김상훈, 1993, “주조용 과공정 Al-Si 합금”, 한국주조공학회지 제 13권 1호 pp. 17~24.
- (14) H. Yamata, T. Tanaka and E. Okomu, 1987, Journal of Japan Institute of Light Metals, 37 83.
- (15) J. L. Jorstad, 1984, AFS Trans., 92 573.