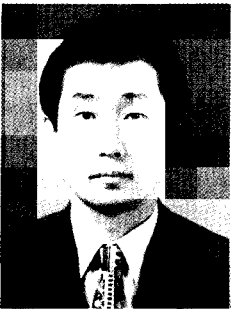


고규소 Al합금 제조기술 전망



박 원 옥

(KIMM 재료공정연구부)

- '78 서울대학교 금속공학과 (학사)
- '81 서울대학교 금속공학과 (석사)
- '85 서울대학교 금속공학과 (박사)
- '89-'90 The University of Sheffield 연구원
- '85-현재 한국기계연구원 책임연구원



류 봉 선

(KIMM 재료공정연구부)

- '89. 2 경북대학교 금속공학과 (학사)
- '91. 2 경북대학교 금속공학과 (석사)
- '91. 1-현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서론

조정 Si의 미세화와 준안정 석출물 등의 조직 제어를 통하여, 내마모성이 우수하고 열팽창계수가 작을 뿐 아니라 기계적 특성이 우수한 고규소 Al합금을 개발하려는 연구가 최근 관심의 대상이 되고 있다. 여기에 쓰이는 합금은 Al-Si합금의 공정점(12.5wt%Si)을 훨씬 상회하는 과공정(Hypereutectic) Al-Si합금으로서, 목표특성을 달성하기 위해서는 Si양을 가능한 한 많이 함유하고, 조정 Si의 크기도 미세한 상태로 조절해야 하며, 입자의 형상을 적절하게 제어해 줄 수 있어야 한다. 입자의 크기 및 형상제어에 쓰이는 방법은 ①급냉용고^[1~4], ②Na, Sr 등의 첨가에 의한 개량처리^[5~6] ③조정 Si입자 미세화를 위한 P, As, Sb 등의 첨가^[7,8]로 나뉘게 되는데, 급냉용고방법은 조정 Si 미세화와 공정조직의 개량처리에 모두 효과가 있는 것에 비해, 첨가제에 의한 Si입자의 미세화나 개량처리 만으로는 특성향상에 어느정도의 한계가 있다.

그러므로, 과공정 Al-Si합금의 제조에 있어서는 급냉용고와 함께 가스분무법(Gas Atomization) 및 분무적층법(Spray Deposition)의 분말 야금공정이 생산공정으로 채택되고 있으며, 제조공정의 단순화와 생산성향상을 위해서는 빠른 냉각속도에 의해 선재 및 판재의 제조가 가능한 수평연속주조공정이 선진국에서 이미 개발되어 실용화되어 있다.

따라서, 본고에서는 과공정 Al-Si합금의 제조를 위하여 양산기술로 채택된 가스분무법 및 분무적층법과 아울러 경쟁기술로 부각되고 있는 수평연속주조기술 등을 비교 분석함으로써, 내

마모 Al-Si합금개발의 세계적인 추세와 함께 앞으로의 연구방향을 정립해 보고자 하였다.

2. 합금의 특성 및 제조기술동향

2.1. Hypereutectic Al-Si합금의 특성

급냉응고법으로 제조된 고규소 Al-Si합금은 낮은 열팽창계수를 가지며, 내마모특성과 고온강도면에서 우수할 뿐 아니라, 탄성계수가 높고, 뛰어난 절삭성을 가지는 등 많은 장점을 보유하고 있다.

열팽창계수

Si이 소량(0.1wt%이하)첨가된 Al합금은 일반적으로 약 $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 열팽창계수를 가지나, Si첨가량이 증가함에 따라 직선적으로 계수가 감소하여 Si이 약 35wt%첨가되면 주철(cost iron)의 열팽창계수인 약 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 값과 비슷하게 된다. 따라서, Si양이 많이 첨가될수록 고규소 Al-Si합금은 주철부품과 부착된 상태에서 사용이 용이하게 된다.

내마모특성

고규소 Al-Si합금에서 Si양이 증가할수록 내마모특성이 일반적으로 증가한다. 그러나, 이 경우 초정 Si입자의 크기와 타첨가 원소에 따른 석출상의 특성에 따라 내마모성이 크게 변화하므로 초정 Si입자와 석출상의 입자를 작게 조정해주는 것이 바람직하다.

고온인장강도

Al-Si 이원계합금은 150°C 이상의 온도에서는 인장강도 및 경도의 값이 급격히 감소한다. 따라서, 고온에서 사용하기 위해서는 Fe, Ni, Mn 등의 철이금속원소를 약 10wt%범위까지 첨가하여 고온특성을 증가시켜야 한다.

기타

Si의 첨가량이 증가함에 따라 합금의 탄성계수는 증가하나, 냉각속도가 낮아져서 Si입자가 조대화되면 탄성계수가 오히려 감소하게 된다. 또한, 성형후 기계가공에 있어 중요인자로 평가되는 절삭성에 있어서는 주조된 Al-Si합금에 비해 급냉응고 및 조직 미세화처리된 합금이 더 우수한 절삭성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

2.2. 국내외 기술동향

고규소 Al합금은 자동차산업 및 가전제품에의 활용이 증가되고 있는 합금으로 일본에서 주로 기업화되어 소재 및 부품으로 생산되고 있다. 주 생산품은 자동차용 Cylinder Sleeve, Piston, Spring Retainer, Swash Plate와 동력전달 부품들이며, 이외 Compressor의 Vane 및 Rotor, VCR Cylinder, Heat Sinks 등으로도 제조되어 기존제품을 대체하고 있다. 일본 Sumitomo 금속에서는 가스분무법(Gas Atomization)으로 분말을 제조한 후 압출하여 단조성과 고온강도가 우수한 합금을 기업화하였으며, Sumitomo electric에서는 Al-20Si-5Fe합금을 가스분무법으로 제조한 후 약 3wt.SiC 분말을 섞어 제조한 금속기 복합재료 제조공정을 실용화하였다. 이는 금속 및 ceramic분말을 혼합한 후 CIP로 성형한 소재를 다시 고온에서 압출하는 공정으로 자동차 및 가전용 내마모부품제조에 활용하였다. 한편, 이러한 가스분무법이 대부분 CIP 또는 canning-degassing 등의 복잡한 공정을 거치게 되는 반면, 분무적층법(Spray Deposition)으로 직접 성형체를 제조하여 압출 또는 단조공정으로 최종 성형하는 방법이 실용화되었는데 이 역시 Sumitomo사 계열인 Sumitomo중공업에서 개발에 성공하였다.

그러나 대부분의 경우에는 연속주조방법을 이용하여 Al-Si합금을 제조하게 되는데, 최근 압

용 6063-Al합금의 수평연속주조공정을 개발한 YKK(吉田)사^[9]에서는 직경 9 inch의 Al합금 billet를 240mm/min.의 속도로 생산하는 설비를 가동중에 있으며, 상기 공정기술을 고규소 Al합금에 적용하고자 하는 연구를 수행중에 있다. 또한 Showa Denko K.K. 계열의 Shotic Co.에서는 mould내에 용탕을 수평으로 공급하는 Hot-Top방식의 연속주조법^[10,11]을 개발하였다. Hot-Top방식은 float를 사용하지 않기 때문에 용탕공급이 안정되고 산화의 가능성이나 개재물의 혼입이 적다는 특징이 있다. 또한 mould에 고압의 가스를 주입함으로써 응고하는 용탕과 mould와의 접촉을 줄이는 Air-Slip Casting법을 적용하기 때문에, 용탕과 mould와의 접촉으로 인해 발생하는 표면결함을 줄여 제반특성이 우수한 소재의 제조가 가능하게 되었다. 이와같이 고압의 가스를 이용하는 수직 및 수평방식의 연속주조법에 의해 Shotic사에서는 $\phi 20\sim 106\text{mm}$ 의 소단면적 고규소 Al합금 선재를 생산하고 있으며, Si이 약 17wt%첨가된 A370 합금선재의 경우 수십 strand씩 동시에 수평연속주조하고 있다.

이외에 미국과 유럽, 러시아 등에서도 일부제품을 항공기 및 자동차 부품으로 사용하려는 개발 연구가 활발히 진행되고 있는 상태이다. 한편, 국내의 경우는 서울대, 충남대, 포항공대 등의 대학과 KIMM을 비롯한 출연연구소에서 기초 및 응용 연구를 수행하고 있으나, 아직 양산화단계에는 이르지 못했기 때문에 앞으로 실용화를 위한 연구노력과 지원이 한층 요구되는 실정이다.

3. 대표적 제조공정 기술

3.1. 분말야금공정

가스분무법(Gas Atomization)

급냉응고의 일종인 가스분무법으로 용융합금을 미세한 분말상태로 제조한 후 혼합공정을

통하여 hardening phase(SiC 등)와 윤활제 등을 섞어, 이를 성형함으로써 최종 bulk상태의 소재를 얻는 방법이다. 성형법은 주로 canning-degassing-welding후 압출하는 공정을 활용하고 있는데, 분말을 냉간등압성형(CIPping)하여 압출하기도 한다. 성형온도는 요구특성에 따라 400~500℃ 구간에서 선택되며, 분말입자의 완전한 결합을 위하여 압출비를 20:1 이상으로 설정하기도 한다.

분말제조시 사용되는 가스는 실험실에서 쓰이는 Ar, N₂ 등이 매우 고가이므로 실 작업에서는 공기를 사용하는 것이 일반적인데, 냉각속도와 특성면에서 큰 차이가 없이 약 40wt%Si까지 첨가할 수 있으므로 고기능 내마모부품제조에 앞으로 주로 Air Atomization공정이 활용될 것으로 예상된다.

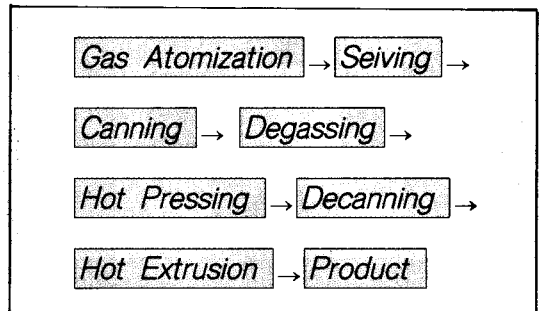


그림 1. 분말야금법에 의한 고규소 Al합금소재 제조공정 흐름도

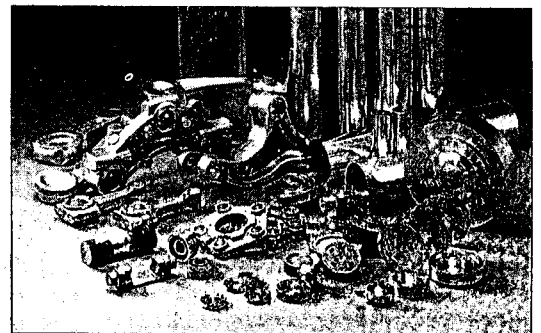


그림 2. 실용화된 과공정 Al-Si합금 부품

분무적층법(Spray Deposition)

이 방법은 가스분무된 용융입자를 냉각 substrate에 적층시킴으로써 직접 bulk상태의 합금을 얻을 수 있기 때문에, 가스분무법에서와 같이 canning공정 등이 불필요하게 되어 성형공정이 간소화되며 대량생산에 적합하다. 또한, 반용융상태의 분말입자가 적층될 때 dendrite입자가 파쇄되면서 응고핵으로 작용하므로, 응고후 계면부근의 용점이 가장 낮게되어 반응고단조(thixoforging)가 가능한 특징을 갖게된다. 그러나, 냉각속도는 $10^3\text{C}/\text{sec}$ 이하로 가스분무법보다 떨어져 적절한 Si의 첨가가 약 20wt%내외로 제한된다.

그림 3은 분무적층법에 의한 합금제조공정 중 수직식(a)에 의한 분재제조와 수평식(b)에 의한 판재제조를 나타낸 개략도로서, 냉간 및 열간단조, 열간압출, 압연공정 등을 통하여 내마모부품의 대량생산이 머지않아 실현될 것으로 전망되나, 아직까지는 생산설비 설치비가 크고 제조공정제어의 어려움으로 인하여 기업화를 위한 집중투자가 지연되고 있는 실정이다.

3.2. 연속주조공정

수평연속주조(Horizontal Continuous Casting)

가스를 이용하는 분말법과 경쟁상태에 있으며, 생산성의 측면에서는 우위를 점하고 있는 수평연속주조공정은 최근 관심의 대상이 되고 있는 기술이다. 그러나 대부분의 경우 연속주조기술은 대량생산에는 적합하나, 냉각속도가 금형주조보다도 훨씬 낮으므로 고규소 Al합금 제조에 적용하기는 적절하지 않다. 이는 지금까지 개발된 다양한 연속주조공정중 Al합금의 연속주조에는 고정형 주형방식의 수직연속주조가 당연시되어 왔기 때문이다. 그러나 최근 비철합금을 중심으로 수직공정으로는 제조가 불가능한 소구경이나 소단면적 형상의 제조에는 수평연속주조의 장점이 다시 부각되고 있는데, 이는 생산성 및 회수율이 높을 뿐 아니라 mould의 단면적크기나 형상에 제약을 받지 않고 다양한 형상의 strip, tube, wire, rod 등을 제조할 수 있는 특징이 있기 때문이며, 이와같은 수평연속주조공정의 적용추세는 가속화되고 있

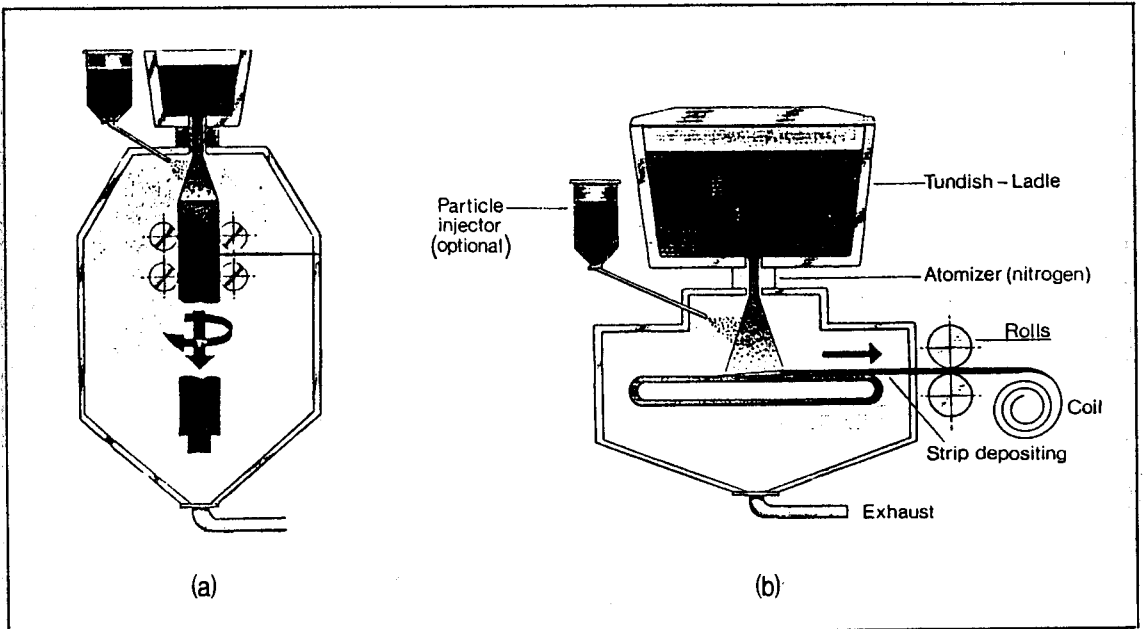


그림 3. 수직(a) 및 수평(b)방식의 분무적층공정 모식도

는 실정이다.

특히 소구경의 선재제조는 billet제조에 비해 2~3배 이상의 주조속도를 낼 수 있으므로, 높은 냉각속도에 의해 조직이 미세하고 정출하는 상들이 균일하게 조직내에 분포하는 등 일반적인 주조제품과는 달리 압출한 제품에 상당하는 기계적특성을 나타낼 수 있기 때문에, 소단면적의 고구소 Al합금을 제조하는데 아주 적합한 특징을 보유하고 있다.

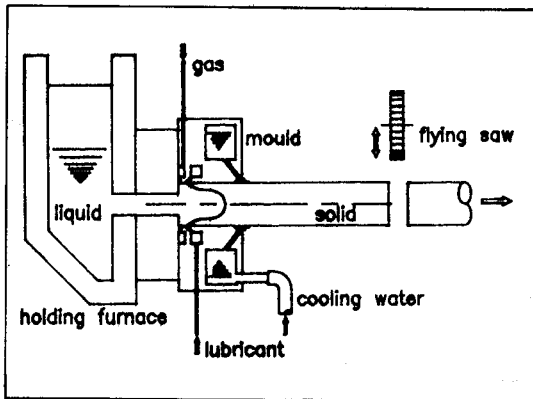


그림 4. Gas가압방식의 수평연속주조

그러나 수평연속주조에서는 합금용탕이 응고하면서 고상-액상천이에 따라 부피가 수축하기 때문에 연속주조한 제품의 냉각속도가 mould의 상하에서 편차가 생길 수 있다. Mould내의 표면부터 응고 및 냉각하기 시작하는 선재나 판재는 부피가 수축하고, 자중에 의해 mould의 하부에 밀착하므로 mould의 상부와는 비접촉상태가 되어 cooling jacket의 냉각효과가 직접 전달되지 못해 냉각속도가 늦고, 따라서 고액계면의 sump형상 또한 mould의 하부에서 먼저 시작되는 비대칭응고가 일어나서 미세조직의 차이를 동반하게 된다. 이와같은 차이 외에도 일반적인 연속주조에서 발생할 수 있는 cold shut, ripple 등의 결함을 줄임과 아울러 표면상태를 개선하고 후공정에서 표면가공을 줄이기 위해 수평연속주조공정은 지속적으로 개선되고 있다.

전자장주조(EMC : Electromagnetic Casting)

용탕이 주형내에서 응고할 때 주형면과 용탕의 접촉으로 인해 발생하는 재용출이나 역편석을 근본적으로 방지하는 또다른 방법으로 그림 5와 같은 원리의 전자장주조^[12]가 있다. 전자장주조는 개발초기 고정형 수직연속주조에 적용되었으나 그 후 수평연속주조 및 상향식 연속주조에도 적용을 위한 연구가 수행되고 있다. 전자장주조의 기본원리는 용탕에 전자기력을 주어 용탕을 구속하는 것으로, 주형을 빠져나오는 용탕에 고주파전류에 의한 자장을 가함으로서, 용탕 표면에 와전류가 형성되고 발생하는 전자기력에 의해 용탕을 일정한 형상으로 구속하는 방법이다. 구속된 용탕에 직접 냉각수를 분사하기 때문에 냉각속도가 크며, 주형에서 표면응고한 후 취출되는 기존의 공정과는 달리 표면결함을 없앨 수 있는 연속주조법으로 60년대 중반 소련에서 개발된 후 Kaiser사 및 Alusuisse사 등에서 80년대에 실용화한 방법이다. 그러나 이와같이 우수한 소재의 생산이 가능하지만 전자장 발생 장치의 설치에 따른 설비비가 높고 설비의 치밀화가 어렵다는 단점이 공정의 저변화를 억제하는 최대 단점이다.

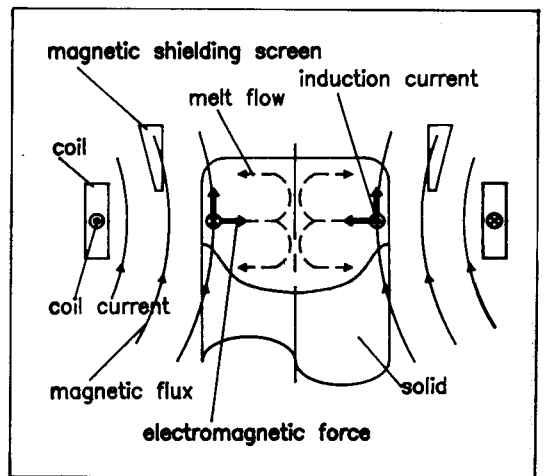


그림 5. 전자장 주조의 원리

이와같은 공정에 의해 연속주조한 합금은 생산성과 제조원가에서 분말법보다 유리한 반면, 기계적특성이 떨어지고, 합금성분의 선택범위가 제한되는 단점을 갖고 있다. 그러나, 새로운 소재의 채택에 있어 기존의 분말성형재의 수요를 상당량 대체하고 있으며, 실제 응용범위가 확대되고 있으므로, 앞으로는 분말야금법은 특수 고기능재료의 경우에 적용하고, 수평연속주조한 고규소 Al합금은 경량이면서 고강도·내마모성 재료로서 분리적용되면서 상호 보완적으로 이용될 것으로 보인다.

3. 결론

분말야금 및 급냉응고법에 의해 제조되는 고규소 Al합금은 자동차 및 가전제품의 성능향상과 경량화추세에 힘입어 그 수요가 점증할 것으로 분석되며, 이에따라 합금설계, 초정 Si의 미세화, 제조공정의 최적화 뿐만 아니라 복합적인 특성향상방안 및 상관관계 규명에도 많은 개발투자가 지속될 것으로 예상된다. 또한, 지금까지 활용된 분말야금법의 공정이 복잡하고 까다로운 특징이 있으므로 이를 단순화하여 생산공정에 응용하려는 노력이 배가될 것으로 분석된다.

이와 아울러 생산성의 측면에서 훨씬 유리한 연속주조공정의 적용은 고규소 Al합금의 응용분야 확대에 크게 기여할 것으로 예상되며, 이는 최근 대두되는 환경오염으로 인한 자동차의 경량화 추세와 맞물려 보다 가속화될 것으로 전망된다. 그의 반응고주조 및 단조, 용탕단조 등

응고제어를 중심으로한 신기술과의 경쟁 또는 기술접목에 의해 제조기술의 실용화 등의 새로운 시도가 향후 기술동향을 주도하게 될 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] M. Adachi : Light Metals, Vol.34, No.6 (1984)361
- [2] S. Kitaoka, C. Fujikura and A. Kamio : Vol. 38, No.7(1988)426
- [3] N. Apaydin and R. W. Smith : Mat. Sci. Eng., Vol.98(1988)149
- [4] Y. Takeda, Y. Odani, T. Hayashi and K. Akechi : J. Mater. Eng., Vol.12, No.4 (1990) 311
- [5] H. Fredriksson, M. Hillert and N. Lange : J. Inst. Met., 1019(1973)286
- [6] F. Yilmaz and O. A. Atasoy : J. Crystal Growth, 118(1992)377
- [7] P. B. Crosely and L. F. Mondolfo : AFS Trans., 74(1966)53
- [8] G. A. Colligam and M. A. Gunes : AFS Trans., 73(1965)359
- [9] 新瀬誠, 大皇紀夫, 永井嘉隆, 田中一生 : アルトピア, 10(1990)9
- [10] 廣渡正明, 廣田千彦 : 輕金屬, 32(6)(1982) 311
- [11] 柳本 茂 : アルトピア, 4(2)(1989)17
- [12] 大園智哉, 林典史, 長江光司 : アルトピア, 4(1989)9