

수평연속주조에 의한 반응고 알루미늄빌렛트 제조

신 돈 수, 김 병 조, 이 덕 영*, 김 기 배*, 이 호 인*

두레에어메탈(주) 기술연구소

* 한국과학기술연구원 금속공정연구센터

1. 서 론

반용융성형법은 반응고상태에서 주조된 구형의 비수지상조직을 가지는 빌렛트를 고액공존상태로 재가열하여 단조, 압출 또는 다이캐스팅을 실시하여 최종제품으로 제조하는 방법으로 near net shape(정형가공)가 가능한 제조법이다.1) 이와 같이 반용융성형용 소재가 유변학적인(thixotropic) 특성을 가질 수 있는 것은 고액공존상태에서 저용점합금의 액상기지 내에 구형의 고상입자들이 분포하고 있는 특이한 조직때문이며, 이런 구형의 비수지상조직은 금속용탕을 응고시키는 과정에서 강력한 교반력을 가하여 수지상 가치를 파괴하여 미세하고 균일한 구형의 고상입자와 액상이 혼재된 상태에서 얻어진다. 따라서 반용융성형시 유변학적 특성은 반용융성형용 소재의 조직에 커다란 영향을 받으며, 이러한 조직은 고액공존상태에서의 교반강도(전단속도), 냉각속도, 교반유지시간 및 고상입자의 구형화정도와 덩어리화정도(agglomeration) 등 공정변수에 커다란 영향을 받는다.2)-4)

따라서 반용융성형법은 미세한 등축정조직을 가지는 원재료의 상업적인 공급에 크게 의존하고 있다.5) 현재 반용융성형용 알루미늄합금 소재의 생산판매는 유럽에서는 Aluminium Pechiney와 SAG, 미주지역에서는 Ormet(Pechiney의 특허사용)와 Northwest Aluminium, 아시아권은 Pechiney 자회사인 Pechiney Japon에서 상업적으로 공급하고 있는 실정이다.6)-8) 최근에는 Alumax에서도 판매를 고려하고 있는 것으로 알려지고 있다. 그러나 소재 가격이 비싸기 때문에 반용융성형용 알루미늄합금 빌렛트를 구입하여 부품을 제조하면 채산성이 떨어지기 때문에 대부분의 해외 알루미늄주조업체에서는 자체 기술을 개발하여 반용융성형용 알루미늄합금 빌렛트를 제조하여 판매는 하지 않고 자체에서 알루미늄합금 부품제조에 사용하고 있다. 그러나 국내에서는 반용융성형용 알루미늄합금 빌렛트를 생산 판매하는 업체는 아직 없으며, KIST에서 두레에어메탈(주)과 공동으로 간접냉각방식의 전자기교반 수평연속주조장치에서 직경 70mm의 반용융성형용 알루미늄합금(Al-7%Si-0.35Mg) 빌렛트를 제조하였다고 제2회 고액공존금속 심포지움에서 보고한 바 있다.9)

이와 같이 반용융성형용 알루미늄합금 빌렛트는 전자기교반에 의한 수직 및 수평연속주조장치에서 제조되고 있으며, 전자기교반 연속주조기술을 확보하기 위한 세부기술은 전자기교반장치설계 및 제조기술, 수평 및 수직연속주조기술, 턴디시내에서의 용탕처리 및 리사이

클링기술, 연주몰드설계 및 제조기술 등이 요구된다. 한편 국외에서는 용탕교반을 효율적으로 하기 위한 전자기교반장치를 설계하여 경쟁적으로 특허권을 확보하고 있는 실정이며, 좋은 품질의 빌렛트를 제조하기 위한 양산제조기술개발 및 비스킷트, 런너 등을 재활용할 수 있는 연속주조기술의 개발에도 주안점을 두고 있다.¹⁰⁾

2회 고액공존심포지움에서 발표한 반응고 알루미늄합금 빌렛트를 제조하기 위하여 초기에 제작된 간접냉각방식의 graphite 몰드에서는 안전성은 매우 뛰어났지만 최적의 주조속도(빌렛트인출속도)가 40mm/min로 낮게 나타났다. 따라서 주조속도를 향상시키기 위하여 직접냉각방식의 주조몰드를 설계 제작하였으며, 이러한 직접냉각방식의 주조몰드를 이용하여 반응고 알루미늄합금 직경 3인치 빌렛트를 수평연속주조장치에서 제조하였다. 본 연구에서는 주조속도가 대폭 향상된 직접냉각방식의 주조몰드를 이용한 수평연속주조장치에서 반응고성형용 알루미늄합금 직경 3인치 빌렛트 제조시 주조속도 및 전자기교반조건에 따른 조직변화를 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 전자기교반 수평연속주조장치

그림 1은 본 연구에서 사용한 직접냉각방식의 주조몰드가 설치된 전자기교반 수평연속주조장치의 개략도를 보여주고 있으며, 수평연속주조장치는 고주파유도로, ladler, 런너, 턴디시, 전자기교반장치, 주조몰드, 인출기, 더미바, 절단기와 전자기교반장치용 전압조정기, 인출조절장치와 자동온도측정시스템으로 구성되어 있다.⁹⁾

고주파유도로는 알루미늄합금 200kg을 용해할 수 있으며, 전자기교반장치는 KIST에서 설계하고 국내업체에서 제작한 국산 전자기교반장치로서 최고 1000Gauss의 자속밀도를 가질 수 있다. 주조몰드는 3인치 빌렛트제조용으로 인출되는 빌렛트의 표면을 직접 냉각수에 의해 2차 냉각되도록 하는 직접냉각방식이며, 냉각속도를 극대화하기 위해 hot top을 이용하였다. 더미바는 초기 용탕이 누출되지 않도록 옹고수축을 고려하여 0.5mm의 공차를 주었으며, 전자기교반장치의 전압조정기는 출력전압이 180V, 300A가 가능하도록 제작하였다. 인출조절장치는 수동과 자동인출이 가능하며, 자동인출시에는 인출시간과 인출속도를 5단계까지 미리 설정할 수 있으며, 인출중에도 인출시간과 인출속도가 조절가능하며 인출속도는 최고 400mm/min까지 가능하다.

2.2. 반응고 빌렛트제조

직접냉각방식의 주조몰드를 이용하여 외경 3인치 반응고 Al-7%Si-0.35%Mg(A356) 알루미늄합금 빌렛트를 제조하기 위하여 고주파유도로에서 80kg을 가열 용해한 후, 질소계와 염소계로 강력하게 탈가스처리하였다. 한편 개량처리 및 결정립미세화제 첨가효과를 조사하기 위해서는 Sb과 Al-5%Ti-5%B합금을 사용하여 용탕처리를 실시하였다. 용탕은 출탕온도 750℃

에서 ladler를 통해 filter를 통과하여 예열된 텀디시로 공급된다. Filter는 filter효과가 양호한 고밀도 ceramic foam(30counts/inch²)을 사용하였으며, 용탕이 고밀도의 foam을 통과하기 위해서는 어느 정도의 압력이 요구되어 filter는 텀디시 아래 쪽으로 이동시켜 설치하였다. 텀디시 내의 용탕의 온도는 고온의 용탕공급과 텀디시 아래의 stopper를 사용하여 저온의 용탕을 배출시키므로써 항상 일정한 온도 625-640℃를 유지할 수 있도록 하였다. 용탕이 텀디시에 공급되기 전에 1기압의 압축공기를 공급하고, 용탕이 주조몰드에 가득 채워지면 냉각수량 25ℓ/min의 냉각수를 공급하였다. 2차 냉각수구멍으로 냉각수가 출수되어 더미바를 냉각하면, 수평연속주조장치의 인출을 미리 설정된 인출속도(100 -300mm/min)로 인출과 동시에 전자기교반장치를 가동시켜 설정된 일정한 교반력으로 용탕이 회전되도록 하였다. 전자기교반장치의 교반력은 초기 응고층이 형성되는 주조몰드의 냉각챔버 내경표면에서의 자속밀도가 100-600Gauss가 되도록 조절하였다. 빌렛트는 불연속적으로 인출하였으며, 주기는 10초 인출에 3초 인출중단을 계속 반복하면서 실시하였다.

2.3. 용탕온도측정 및 조직관찰

연속주조작업의 자동화를 위한 텀디시 및 주조몰드내 용탕온도를 모니터링하기 위하여 외경 2.3mm의 스테인레스관으로 제작한 열전대를 설치하였다. 주조몰드에는 4개의 열전대를 설치하였으며, hot top쪽에는 직경이 짧은 부위의 중간위치와 직경이 짧은 부위에서 넓은 부위로 변화하는 부위의 중간위치에 세라믹 내열단열판에 구멍을 관통하여 표면 위로 열전대 끝이 약간 나오도록 하여 2개를 설치하였다. 냉각챔버 안에는 열박음된 graphite링과 접촉하는 냉각챔버의 안쪽면 사이에 주조몰드의 중심축과 나란한 방향으로 구멍을 뚫어 hot top과 냉각챔버와의 경계에서부터 20mm와 50mm 위치에 각각 열전대를 설치하였다. 또한 냉각챔버에서 나오는 냉각수의 온도도 함께 노트북컴퓨터를 사용하여 자동모니터링을 실시하였다.

제조된 빌렛트는 전자기교반조건과 인출속도에 따라 인출방향의 수직단면과 수평단면으로 절단하여 기계적 연마하여 육안조직을 관찰하였으며, 수직단면은 빌렛트의 중심부와 표면부로 나누어 미세연마후 약하게 부식시켜 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

3. 연구결과

3.1. 직접냉각방식의 수평연속주조몰드 설계 및 제작

그림 2는 주조속도를 향상시키기 위하여 본 연구에서 설계 제작한 3인치 빌렛트용 직접냉각방식의 주조몰드를 보여주고 있다. 주조몰드는 알루미늄계통 세라믹 내열단열재로 이루어진 hot top과 스테인레스강으로 제작한 냉각챔버로 구성되어 전자기교반장치 안에 설치되었으며, hot top과 냉각챔버가 접촉하는 위치는 전자기교반장치의 중심위치에 놓이게 하여 초기 응고층에 가장 강력한 교반력을 가할 수 있도록 하였다.

주조몰드의 hot top은 턴디시와 밀착되어 용탕이 틈새로 새지 않도록 하며, hot top에서 응고층이 형성되지 않도록 하기 위하여 턴디시쪽은 직경이 넓고 냉각챔버쪽은 직경이 작은 형상을 가지게 하였다. 직경이 넓은 턴디시쪽은 많은 알루미늄용탕으로 열용량을 충분히 가지게 함으로서 응고가 일어나지 않게 된다. 또한 hop top을 지나 냉각챔버쪽으로 이송된 알루미늄용탕은 냉각챔버와 닿는 표면부부터 온도가 급속히 떨어지면서 응고층이 형성되므로 용탕의 표면부는 중심부보다 용탕온도가 낮아진다. 따라서 냉각챔버쪽의 hop top의 직경을 작게 하므로써 hop top에서 응고층이 형성되기 어렵게 하였다. 냉각챔버에서 냉각이 많이 일어나서 hot top쪽에서 응고층이 형성되면 세라믹 내열단열재의 표면이 매끄럽지 못하기 때문에 윤활성이 없어 빌렛트가 끊어져서 인출이 안되거나 인출이 되더라도 빌렛트의 표면 특성이 악화되어 매끄럽지 못하게 된다. 주조몰드의 hot top과 냉각챔버 사이에는 세라믹패이퍼를 끼어서 밀착시켜 용탕이 새지 않도록 하였다.

주조몰드의 냉각챔버에는 직접냉각을 위하여 2차 냉각수구멍을 설치하여 인출되는 빌렛트 표면에 직접 냉각수를 분사할 수 있게 하였다. 2차 냉각수구멍은 전자기교반장치 안에 설치된 냉각챔버의 외부로 노출되는 면 상에 직경 90mm의 원형으로 인출되는 빌렛트의 중심선과 30도의 각도로 지름 2.5mm의 60개의 2차 냉각수구멍을 뚫었다. 이와 같은 직접냉각은 냉각속도의 대폭 향상으로 주조속도가 증가하게 된다. 그러나 연속주조 초기에 직접냉각으로 냉각수가 인출되는 빌렛트의 표면을 따라 주조몰드 안쪽으로 스며들어가면 주조몰드와 턴디시내에서의 용탕폭발이 일어날 우려가 있기 때문에 2차 냉각수가 주조몰드로 스며들어가지 못하도록 방지하기 위하여 2차 냉각구멍의 위치보다 주조몰드 안쪽으로 30mm 들어간 위치에 지름 1mm의 구멍을 원주면을 따라 뚫었으며, 이 압축공기구멍들은 냉각챔버 안쪽 벽 속에 실린더링 모양의 빈 공간으로 모두 연결시켜 모든 구멍에서 동일한 압력으로 압축공기를 분사될 수 있도록 하였다. 한편 냉각수가 압축공기실로 유입되는 것을 막기 위하여 오링을 사용하였다.

한편 응고된 빌렛트의 인출을 원활하게 하기 위하여 자기윤활성을 가지고 있어 윤활이 좋은 고순도 graphite를 실린더링형태로 가공하여 hot top과 연결되는 냉각챔버의 안쪽에 열박음하여 설치하였다. 3인치 빌렛트를 제조하기 위한 graphite 링의 크기는 응고수축을 고려하여 내경을 78mm로 하였으며, 두께는 열응력으로 깨지지 않도록 5mm로 가공하여 사용하였다. 주조몰드는 턴디시 쪽과 연결되는 세라믹 내열단열재에 턱을 가지게 하여 밀착시켰으며, 냉각챔버의 끝면이 수평연주장치의 조방과 일치하도록 하여 조방에서 볼트로 채울 때 전혀 빈틈이 없도록 치수가 정확하게 가공하여, 주조몰드의 중심축이 수평연속주조장치의 중심축과 정확하게 일치하고 움직임이 없도록 고정시켰다.

이와 같은 직접냉각방식의 주조몰드를 이용하여 3인치 알루미늄합금 빌렛트를 냉각수량 25l/min에서 인출속도 250mm/min로 성공적으로 제조할 수 있었으나, hot top과 냉각챔버가 분리되어 있어 전자기교반장치 안에 주조몰드를 정확하게 중심축에 설치하기가 어려웠다. 또

한 냉각챔버 안에서 반응고층이 전자기교반력에 의해 회전함에 따라 graphite ring에 scraч가 많이 발생하여 장기적으로 사용하지 못하였다. 따라서 일체형 주조몰드의 설계와 보다 더 강력한 운환이 요구되었다.

3.2. 3인치 반응고 빌렛트제조

직접냉각방식의 연속주조몰드를 사용하여 3인치 반응용성형용 알루미늄합금 빌렛트를 제조하였으며, 제조시 제조조건은 표 1과 같다. 전자기교반 수평연속주조는 표에서 보는 바와 같이 상당히 많은 공정변수를 가지고 있다. 따라서 각 공정변수들의 최적 조건을 설정하기 위하여 많은 예비실험을 실시하였으며, 이러한 예비실험결과 전자기교반조건과 인출속도를 제외한 다른 공정변수는 거의 일정하게 유지하면서 빌렛트를 제조하였다.

먼저 인출되는 빌렛트의 표면을 따라 2차 냉각수가 냉각챔버 안으로 스며드는 것을 방지하기 위한 압축공기압력은 4기압으로 높은 경우 압축공기가 주조몰드의 벽을 따라 턴디시로 스며들어 턴디시내의 용탕이 역류하는 현상이 나타났다. 이러한 턴디시내의 용탕이 역류하는 현상은 1기압으로 낮추면서 없어졌지만 연속주조시 계속 압축공기를 사용하면 이 압축공기가 주조몰드의 벽을 따라 턴디시 쪽으로 이송되어 빌렛트의 기공발생의 원인이 되었다. 따라서 본 연구에서는 연속주조초기와 종료시에만 안전사고 방지를 위하여 사용하고 빌렛트인출시에는 사용하지 않았다.

냉각수량은 본 연구에서 사용한 수평연속주조장치의 냉각수배출용량이 작아 냉각수량을 25l/min로 일정하게 유지시켰으며, 냉각수량을 확대할 수 있도록 수평연속주조장치의 보완이 요구되었다. 한편 빌렛트의 연속인출을 위해 여러 인출속도에서 시도한 결과 50mm/min의 낮은 인출속도에서도 연속인출시 빌렛트가 끊어졌다. 이것은 2차 냉각이 초기 응고층이 형성되는 곳에서 약 150-200mm가 떨어진 곳에서 일어나기 때문에 응고셀이 냉각챔버의 벽을 따라 길게 형성되어 얇은 응고층이 있는 구간이 길게되므로 응고층의 인장강도가 상당히 약하게 되어 연속인출시 약한 고액공존구간에서 끊어지게 되는 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 연속인출을 위해서는 간접냉각에 의한 초기응고층과 직접냉각인 2차 냉각위치와의 거리를 짧게 유지하거나 냉각챔버와 응고층과의 운환성을 증대시켜야 될 것으로 고려되었다. 또한 인출속도를 300mm/min이상으로 증대할 경우 인출되는 빌렛트가 끊어져 빌렛트인출이 중단되었다. 따라서 본 연구에서 사용한 직접냉각방식의 주조몰드에서는 최고인출속도는 250mm/min으로 나타났다.

이와 같이 연속주조시 냉각챔버안의 고액공존구간에서 고액계면이 끊어져서 나타나는 빌렛트 인출중단은 수평연속주조시 주조몰드의 냉각능과 턴디시내의 용탕온도 및 인출속도에 따라 고액계면위치가 달라지게 되기 때문이다. 인출속도가 느려지면 고액계면이 턴디시내의 hop top 쪽으로 이동하여 빌렛트의 운환성이 악화되어 빌렛트의 고액공존구간에서 마찰에 따른 인장응력의 발생으로 고액계면이 끊어지게 되어 인출이 중단된다. 또한 더욱 응고층이

진행되어 hop top의 직경이 작은 구간을 지나 넓은 구간에 까지 진행되면 빌렛트가 고액공존구간에서 끊어지게 된다. 또한 반대로 인출속도가 빠르면 빌렛트 중심부의 고액계면이 인출장치쪽으로 이동하게 되어 고액계면이 주조몰드와 이루는 각도가 급하게 되어 다시 말해 각도가 커지게 되어 얇은 응고셀이 길게 주조몰드를 따라 형성하게 되어 쉽게 끊어지게 된다. 끊어진 위치가 주조몰드 바깥쪽에서 일어나면 용탕이 주조몰드 밖으로 쏟아져서 폭발이 일어나게 되므로 각별한 조심을 하여야 한다. 따라서 연속주조시 고액계면의 위치를 모니터링할 수 있는 시스템을 갖추어야 하며 본 연구에서는 주조몰드의 graphite ring 뒤에 열전대를 삽입하여 연속자동모니터링하면서 빌렛트가 주조몰드 안에서 끊어졌는지를 판단할 수 있었다.

그림 3은 전자기교반 수평연속주조기에서 자동모니터링된 각종 온도분포를 보여주고 있다. 그림 3에서의 번호는 각 열전대를 나타내고 있으며, 1번은 턴디시 내의 용탕온도, 2번과 3번은 hot top에 설치된 열전대에서 측정된 온도이며, 4번과 5번은 graphite ring에 설치된 열전대에서 측정된 온도로서 그 위치는 그림 상에 표시된 바와 같다. 또한 냉각수의 온도도 측정하였으며, 냉각수의 온도는 오른쪽 좌표에 나타내었다. 각 온도는 주조시간에 대해 나타내었다.

연속주조의 빌렛트제조시 각 공정의 순서도 함께 나타내었으며, 수평연속주조시 주조초기는 건전한 빌렛트제조 및 안전사고에 매우 중요하다. 그림에서 보는 바와 같이 주조몰드를 용탕이 가득 채워진 후 냉각수공급, 압축공기공급중단, 인출시작 및 교반이 거의 동시에 이루어져야 하며, 2차 냉각수가 더미바를 냉각한 후의 시간지체는 이미 냉각챔버는 물론 hop top내의 용탕까지 응고층이 형성되어 건전한 빌렛트를 제조할 수 없었다. 특히 graphite ring의 온도인 4번과 5번의 온도차이는 매우 중요하다. 이 온도차이는 아래에 다시 나타내었지만 50-80℃의 온도차이에서 건전한 빌렛트가 제조되었다. 이것은 hot top과 냉각챔버가 만나는 곳에서부터 graphite ring의 50mm 안쪽에서 초기 응고층이 생성된다는 것을 알 수 있으며, 따라서 운환성이 양호한 graphite ring에서 응고가 시작된다는 것을 의미한다. 그러나 온도차이가 점점 줄어들게 되면 빌렛트의 인출중단이나 표면이 매우 좋지 않은 상태로 인출이 되었다. 이것은 초기 응고층이 graphite ring을 벗어나서 생성되었기 때문으로 사료되었다. 또한 빌렛트가 주조몰드 내에서 끊어진 경우에는 4번과 5번의 온도가 갑자기 급강화하게 된다. 이것은 온도가 높은 용탕공급이 되지 않고 응고된 빌렛트는 인출됨에 따라 빈공간이 발생한 상태에서 계속 냉각이 이루어지기 때문에 graphite ring의 온도가 급강화하였다. 한편 인출속도가 증가하면 hot top 및 graphite ring의 온도가 점점 증가하게 되며, 너무 빠르게 되면 4번과 5번의 온도가 일치하게 되었다.

3.3. 인출속도 및 전자기교반조건에 따른 조직변화

그림 4는 600Gauss의 전자기교반을 실시하여 제조한 연속주조 빌렛트의 인출속도에 따른

미세조직을 보여주고 있다. 그림 4의 (a)부터 (d)까지는 빌렛트 중심부의 조직이며, (e)는 인출속도 250mm/min에서의 표면부의 조직이고, (f)는 Sb로 용탕처리하여 250mm/min로 인출하였을 때의 빌렛트의 중심부의 조직을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 인출속도가 증가할수록 초정 알루미늄의 크기는 작아졌으나 그 차이는 크지 않았으며, 초정의 구형화 정도는 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 초정의 크기는 냉각속도에 밀접한 관계가 있기 때문에 인출속도가 증가하면 냉각속도가 증가하게 되어 초정이 미세화된다. 그러나 본 연구의 수평연속주조장치에서는 2차 냉각위치가 초기 응고층에서 멀리 떨어져 있어 빌렛트 중심부에서 용탕이 완전히 응고되는 위치도 표면의 초기 응고위치와는 상당한 거리를 가지게 된다. 따라서 인출속도에 따른 영향이 크지 않게 나타난 것으로 사료된다.

그림 4 (e)의 표면부의 조직은 미세하게 나타났으며, 공정조직이 거의 없어 빠르게 냉각된 것으로 생각되었다. 한편 공정조직을 개량화처리한 (f)인 경우는 동일한 제조조건인 (d)와 비교해서 초정의 크기도 작아졌으며, 또한 초정 구형화도 상당히 진전된 것을 알 수 있었다. 이것은 응고시 생성된 초정 알루미늄의 계면 밖에 있는 공정 Si이 개량화처리로 미세하고 구형화되면서 초정 알루미늄들이 교반에 의한 합체를 저지하기 때문에 초정알루미늄의 크기가 작아지고 교반에 의해 더욱 구형화된 것으로 사료된다.

그림 5는 인출속도 250mm/min에서 제조된 알루미늄합금 빌렛트의 전자기교반조건에 따른 조직변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전자기교반강도를 200Gauss에서 600Gauss로 증가하게 되면 초정 알루미늄의 크기는 큰 차이는 없으나 초정의 구형화는 상당히 개선된 것으로 나타났다. 이것은 초정의 크기는 냉각속도가 큰 영향을 가지지만 교반력의 증가는 파단된 덴드라이트가 합체되는 것을 방지하여 구형화가 상당히 진전된 것으로 사료되었다.

이와 같이 수평연속주조시 전자기교반강도와 인출속도가 증가하므로써 초정 알루미늄의 미세화와 구형화는 동시에 이루어지며, 그림 6은 무교반시, graphite mold와 직접냉각방식의 주조몰드를 사용하여 각각 제조한 빌렛트의 중심부에서 나타난 미세조직을 보여주고 있다. graphite mold인 경우는 교반강도 250Gauss에서 인출속도 50mm/min로 제조된 빌렛트이며, 직접냉각방식의 주조몰드는 교반강도 500Gauss에 인출속도 250mm/min로 제조된 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 교반강도와 인출속도를 모두 증가시키므로써 초정 알루미늄의 크기가 감소되고 구형화도 상당히 개선된 것으로 나타났다.

4. 결 론

주조속도의 향상을 위하여 직접냉각방식의 주조몰드를 사용한 전자기교반 수평연속주조장치에서 3인치 반응용성형용 알루미늄합금 빌렛트를 제조하여 인출속도와 전자기교반조건에 따른 조직을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2차 냉각이 가능한 직접냉각방식의 주조몰드를 이용하여 냉각수량 25l/min에서 인출속도를 250mm/min로 증가할 수 있었으며, 전전한 3인치 알루미늄합금 빌렛트를 제조하였다.
- (2) 각종 온도를 연속자동모니터링을 실시한 결과 주조몰드의 graphite ring의 온도변화가 빌렛트의 인출중단을 예측할 수 있었다.
- (3) 인출속도에 따른 영향을 조사한 결과 본 연구에서 설계한 직접냉각방식의 주조몰드에서는 인출속도가 증가할수록 초정 알루미늄의 크기는 작아졌으나 그 차이는 크지 않았으며, 초정의 구형화정도는 별 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (4) 직접냉각방식의 주조몰드에서는 표면부와 중심부의 조직차이는 크게 나타났으며, 공정조직을 개량화처리할 경우 초정 알루미늄의 미세화와 구형화가 상당히 진전되는 것으로 나타났다.
- (5) 전자기교반강도에 따른 영향을 검토한 결과 교반력이 증가하게 되면 초정 알루미늄의 크기는 큰 차이는 없으나 초정의 구형화는 상당히 개선된 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 선도기술(G7)과제의 일환으로 진행되었으며, 연구비지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) D.B.Spencer, R.Mehrabian, and M.C.Flemings : Metallurgical Transactions, 3(1972), p.1925-32.
- 2) D.H.Kirkwood and P.Kapranos : Proc. 4th Int. Conf. on Semi-solid processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, 19-21 June(1996), Sheffield, England, Ch.4, p.153-202.
- 3) K.B.Kim and E.P.Yoon : Bulletin of Korean Institute of Metals, Vol.10(2), 1997, p.113-128.
- 4) K.B.Kim, E.P.Yoon, and H.K.Moon : Symposium on Semi-solid forming technology, Nov. 14, 1997, Korean Institute of Met. & Mater., Pusan National University, Korea, p.36-51.26.
- 5) A.I.Nussbaum : Light Metal Age, June(1996), p.6-22.
- 6) S.P.Midson : Proc. 4th Int. Conf. on Semi-solid processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, 19-21 June(1996), Sheffield, England, p.252-255.
- 7) 難波 明彦 : 輕金屬, 45, 6(1995), p.346-354.
- 8) 茂木 徹一 : 金屬, 65, 7(1995), p.650-651.
- 9) Ki-Bae Kim : '99 Symposium on extrusion and drawing technology, May 13, 1999,

Korean Society for Technology of Plasticity, Pusan National University, Korea, p.66-74.

10) F.Niedermaier et. al:Proc. 4th Int. Conf. on Semi-solid processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, June 23-25, 1998, p.407.

표 1. 전자교반 수평연속주조 3인치 빌렛 제조조건(Metal mold)

차례	모합금		전자교반조건 (EM Stirring Condition)				용해 온도 (°C)	슬탕 온도 (°C)	탄디 사용 온도 (°C)	인출 속도 (mm/min)	인출 interval ON/OFF (sec)	냉각수		공기 압력 (MPa)	비고	
	종류	용해량 (kg)	단계	전압 (V)	전류 (A)	교반 강도 (Gauss)						회전수 (RPM)	유량 (l/min)			온도 (°C)
No. 3	A356	80 (탈가스)	2	50	90	220	500	800	770	670	100 → 150	불연속 10/5	20	20	1	285cm 빌렛제조 (빌렛인출시 에어사용안함)
No. 4	A356	80 (탈가스)	2	50	90	220	500	800	770	640	150 → 200 → 250	불연속 10/5	20	18	1	7M이상 빌렛제조
No. 5	A356	80 (탈가스)	3	75	130	330	650	750	740	620	150 → 200 → 250	불연속 10/5	20	15	1	3.5M 빌렛제조
No. 6	A356	80 (탈가스)	4	105	155	390	780	750	750	640	150	불연속 10/5	20	20	1	Graphite ring(3개) 새로가공, 인출안됨(인출초기에 깨진 흑연주형에 용탕이 검)
No. 7	A356	80 (탈가스)	4	110	162	400	790	800	790	630	100 → 150 → 200 → 250	불연속 10/5 → 연속	25	20	1	3.3M 빌렛제조 (물드온도측정용 열전대 메탈몰드쪽으로 위치변경)
No. 8	A356	80 (탈가스)	5	140	205	500	860	760	760	640	100 → 150 → 200 → 250	불연속 10/5 → 10/3 → 연속	25	20	1	3.0M 빌렛제조 (Graphite ring 깨짐, 2군데, 연속인출중 끊어짐)
No. 9	A356	80 (탈가스)	6	163	237	600	950	750	750	630	100 → 150 → 200 → 250	불연속 10/3	27	20	1	2.5M 빌렛제조 (인출중 과부하로 power off로 인출 중단됨)
No.10	A356	80 (탈가스)	5	138	209	500	860	750	750	630	100 → 150 → 200 → 250	불연속 10/3	25	20	1	5.0M 빌렛제조, (루미보드 직경 70mm로 확대)

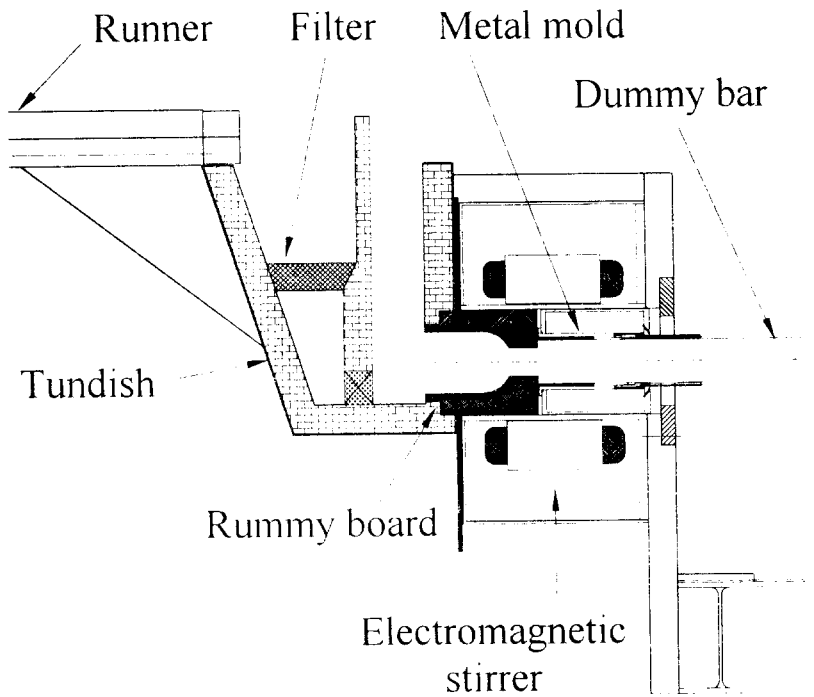


Fig. 1. Schematic of horizontally continuous casting machine with an EM stirrer and a metal mold for s semi-solid billet.

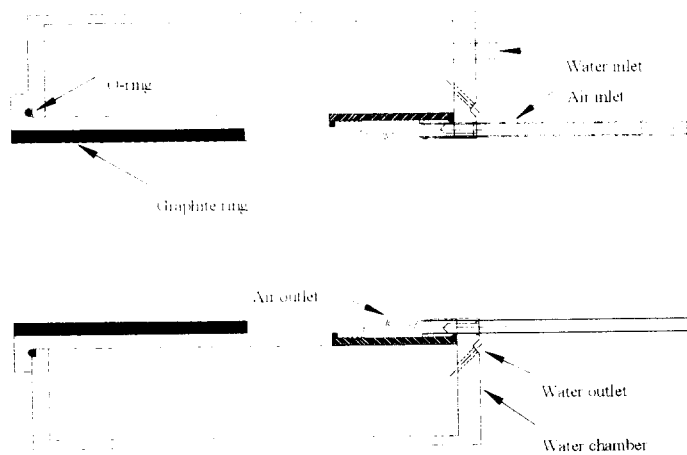


Fig. 2. Schematic of the metal mold for horizontally continuous casting using in this experiment.

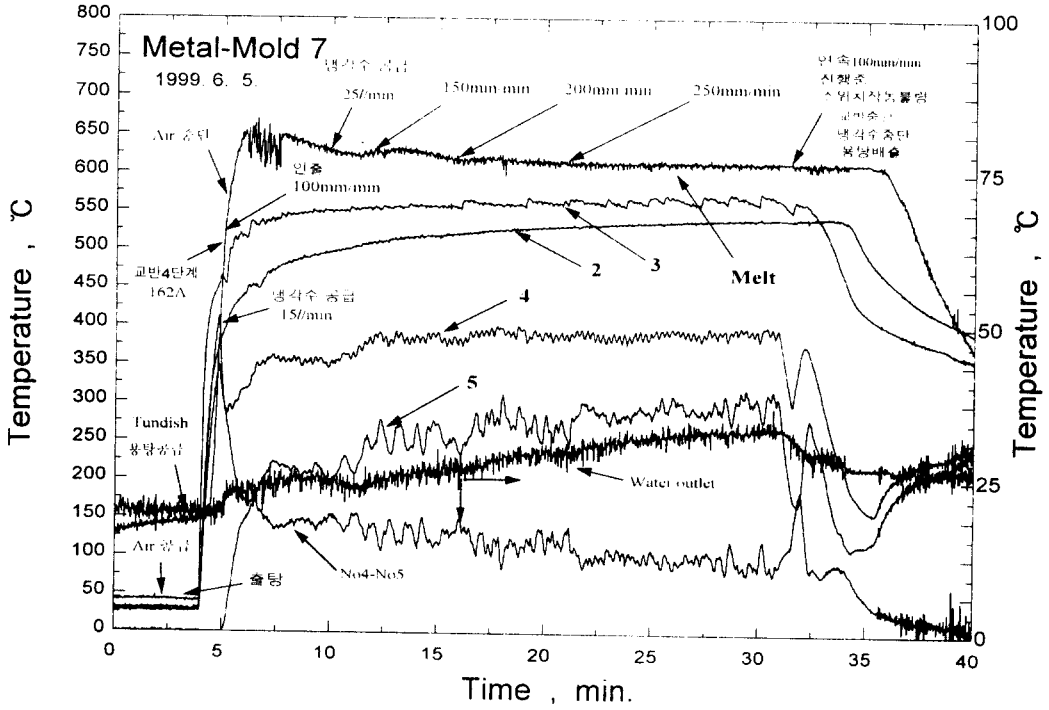
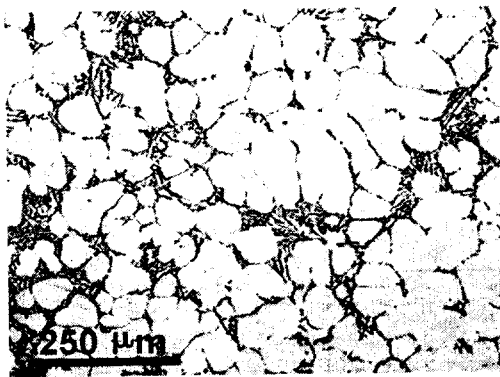
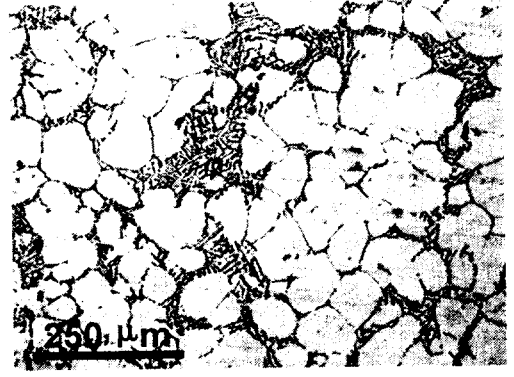


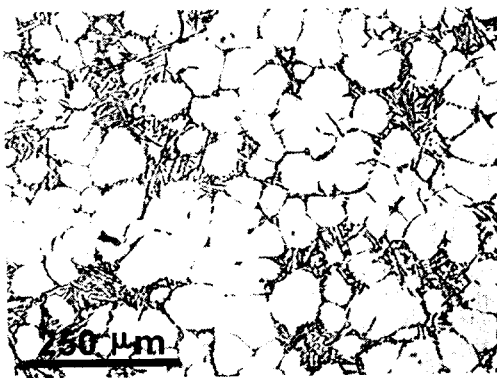
Fig. 3. Temperatural profile of melts in the metal mold and the tundish and of a cooling water during the experiment.



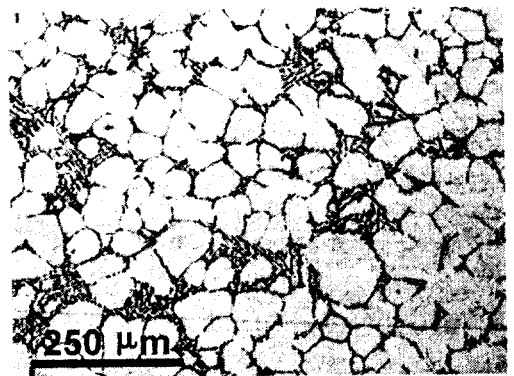
(a) 100mm/min, center area



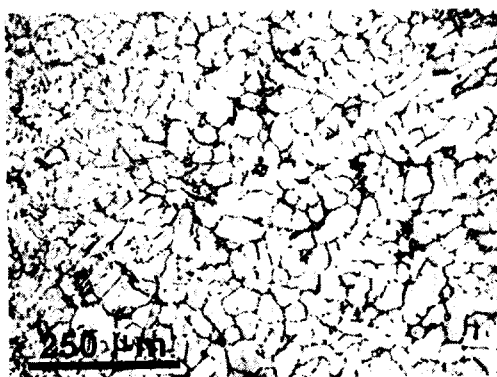
(b) 150mm/min, center area



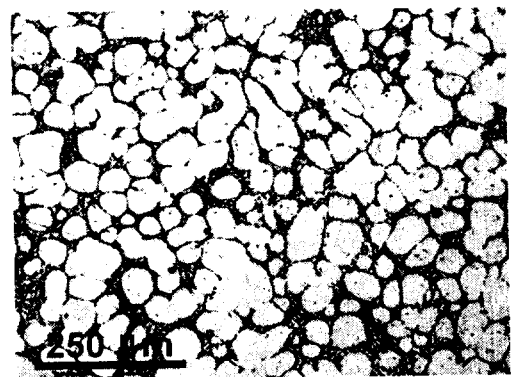
(c) 200mm/min, center area



(d) 250mm/min, center area

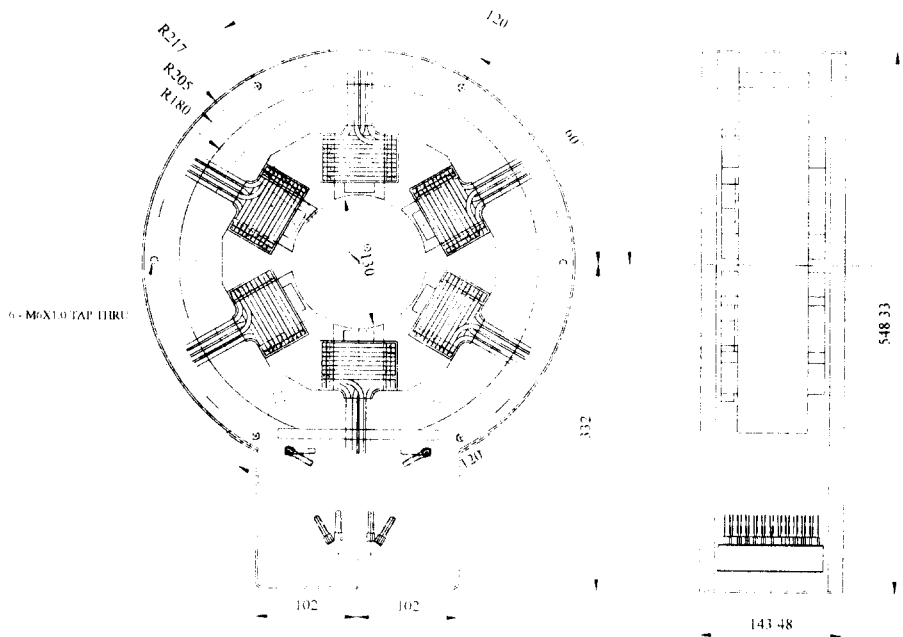


(e) 250mm/min, surface area



(f) 250mm/min, Sb modification

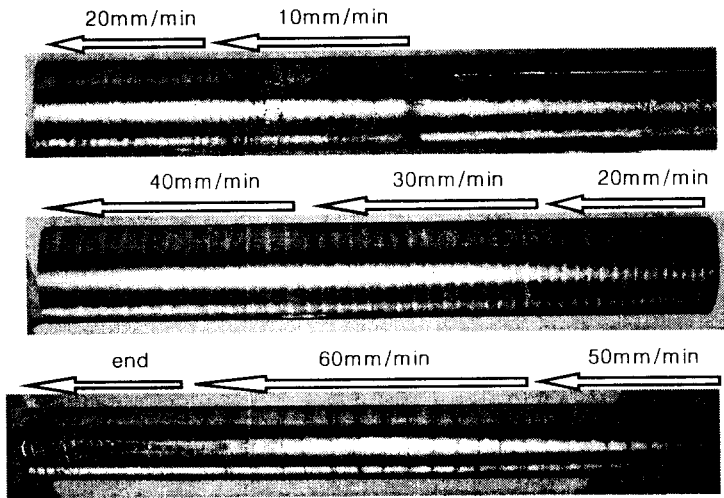
Fig. 4. Microstructures of semi-solid Al alloy billets continuously casted under the electromagnetic strength of 600Gauss at a different casting speed.



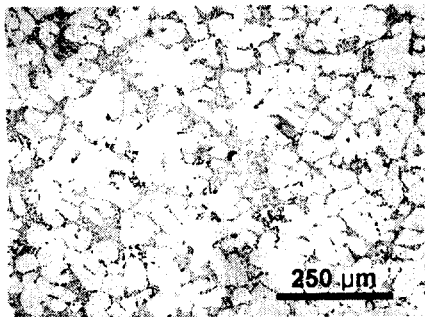
전자교반장치의 자장강도에 따른 용탕의 회전속도

STEP	Input voltage (V)	Coil current (A)	Maximum Magnetic induction density at the EM stirrer (Gauss)	Maximum induction density at the inner mold wall (Gauss)	Rotation speed of melt (RPM)	
					Measured	Calculated
1	30	45	230	100	220	240
2	57	85	360	200	450	650
3	87	130	620	310	650	890
4	114	170	750	400	790	970
5	142	210	1000	500	860	1040
6	172	250	1200	600	950	1100

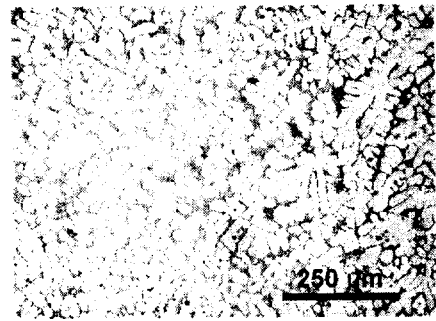
Fig. 5. Microstructures of semi-solid Al alloy billets continuously casted at a casting speed of 250mm/min and at a various electromagnetic strength of from 200Gauss to 600Gauss.



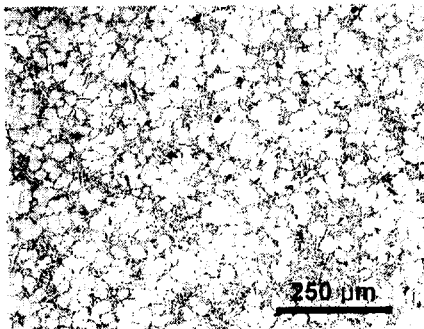
Al 합금 (Al-7%Si-0.35%Mg) 빌렛트 (Graphite mold, 3 inch dia.)



No-stirring, Graphite mold



50mm/min, 250 Gauss,
Graphite mold



250mm/min, 500 Gauss,
Metal mold

Fig. 6. Microstructures of the horizontally and continuously casted Al alloy billets.
(a) No stirred, (b) Graphite mold(250Gauss, 50mm/min),
(c) Metal mold(500Gauss, 250mm/min)