

## 전자기교반에 의한 연속주조빌렛제조

김 기 배

### Fabrication of a billet in the continuous casting process by means of a electromagnetic stirring

Ki-Bae, Kim

#### Abstract

일반적으로 압출용 빌렛제조에는 빌렛상하의 품질변화로 수평연속주조법이 사용되지 않고 있지만 전자기교반법을 이용할 경우 이러한 단점이 없어진다. 따라서 전자기교반장치를 설치한 수평연속주조장치를 이용하여 연주빌렛을 제조하였다. 최대자속밀도가 1000Gauss 인 전자기교반장치를 설계 제작하였으며, 간접냉각방식의 흑연몰드에서 알루미늄합금을 사용하여 건전한 연주빌렛을 제조할 수 있는 여러 공정조건을 조사 검토하여 직경 70mm의 기포가 없고 표면이 미려한 등축정을 가진 연주빌렛을 제조하였다. 인출속도에 따른 수평연속주조 빌렛의 표면, 용탕유동라인 및 조직을 검토한 결과 평균인출속도 20mm/min에서 40mm/min까지 아주 미려한 표면특성을 가졌으며, 인출속도가 빠르면 유동라인이 표면에서 중심 쪽으로 완만한 기울기를 가지게 되어 표면응고층이 얇아져 빌렛가 고액계면에서 끊어지게 되며, 조직미세화는 인출속도가 클수록 미세화되었으나, 결정구상화정도는 인출속도가 빠를수록 악화되었다.

Key Words : 연속주조빌렛, 전자기교반, 수평연속주조장치, 반응고가공법

#### 1. 서 론

1962년 Alcoa사가 압출용 빌렛과 압연용 슬래브를 제조하기 위하여 수평식 연속주조법을 개발하였다.<sup>[1]</sup> 수평식 연속주조법은 빌렛가 수평방향으로 인출되기 때문에 수직식 연속주조법에서 요구되는 깊은 용덩이와 빌렛을 받쳐줄 크레인과 높은 건물이 불필요하여 건설비가 저렴하고, 제조된 빌렛은 절단하여 후공정과의 연속적으로 작용할 수 있어 완전연속주조가 가능하고 스크랩의 발생량이 작아 재고가 향상되는 등의 장점이 있어 오늘날 널리 이용되고 있다. 그러나 수평연주법의

경우 주조 중에 몰드내의 용탕이 중력의 영향을 받아 빌렛 상하표면이 달라지거나 내부조직이 균일하지 않는 등의 과제를 포함하고 있기 때문에 압출용 빌렛 제조에는 수평연주법이 지금까지는 사용되지 않고 있다.<sup>[2-4]</sup>

그러나 수평연속주조시 몰드내의 용탕에 외부적인 힘을 가하여 교반을 실시하면 몰드내의 용탕의 온도분포가 균일해지고 따라서 상하의 온도편차가 없어지고 고액계면이 중력방향과 일치하게 되어 상하의 응고조직의 불균일성이 없어진다. 또한 금속용탕을 응고시키는 과정에서 강력한 교반력을 가하면 수지상 가지가 파괴되고 columnar dendrite의 성장을 억제시켜 미세한 등축정조직으로 된다. 한편 이러한 소재는 재가열하여 반응용 상태로 만들면 저용점합금의 액상기저 내에 구형

\* 한국과학기술연구원 금속공정연구센터

의 고상입자들이 혼재된 특이한 조직으로 유변학적 특성을 가질 수 있어 최근 반응고성형용 소재로도 각광을 받고 있다.<sup>[5-7]</sup>

한편 교반방법에서도 기계교반자의 직접 교반으로 인한 기포, 산화물 및 비금속개재물 등이나 기계교반자의 마멸에 의해 다른 이물질이 들어가는 기계교반법의 단점을 제거하면서 생산성이 크게 향상된 간접교반법인 전자기교반법으로 소재의 고품질화가 가능하여 최근에는 주로 전자기교반장치를 이용하여 연속주조빌렛트를 제조하고 있다. 이러한 전자기교반기술은 주조시 용탕에 전자기력을 적극적으로 이용하여 전자유체역학(Magnetohydrodynamics, MHD)에 기반을 두고 있으며, 향후 초전도체가 상용화될 경우 크게 발전할 것으로 예상된다.

전자기교반법에는 전자기력의 발생방법에 따라 교류유도전자기교반, 직류자장이용법, 회전자계이용법 등이 있으며, 이러한 전자기력을 이용한 전자기교반 연속주조장치에서 사용하고 있는 용탕의 교반방법은 그림 1과 같으며 이에 관한 많은 장치들이 최근까지도 특허로 발표되고 있다.<sup>[4]</sup>

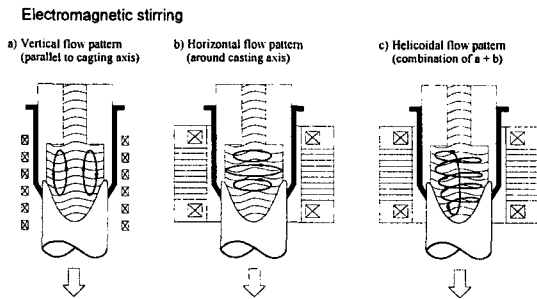


Fig. 1. Electromagnetic stirring modes in the production of thixoforming feedstock :a)circumferential stirring, b) vertical stirring, c) helicoidal stirring.

연주빌렛트의 필수적인 요구조건은 미세한 결정립의 비수지상조직과 산화물, 비금속개재물 및 기포가 없어야 되며, 주조장치는 열추출속도/용고속도 및 전단작용을 조절 가능하도록 특별한 관심을 가지고 설계되어야 한다. 이러한 전자기교반법에서의 주조공정변수는 전자기력(전단력), 용탕의 합금성분, 용탕온도, 용탕주입온도, 용탕주입속도, 냉각수온도, 냉각수유량, 윤활유유량속도, 탈가스설비, 여과기술, 금형의 열전도도 등이 있으며,

공정변수를 정확히 조절해야만 연속주조빌렛트의 품질이 일정하고 만족할 수 있는 빌렛트 특성을 얻을 수 있다. 품질검사는 금속조직학적인 검사와 화학적 검사를 통하여 합금성분, 고상형태, 결정립크기, porosity, 비금속개재물, 산화물 등이 규격검사가 이루어진다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1. 전자기교반 수평연속주조장치

수평연속주조장치의 전자기교반장치는 중심부 자장강도가 가장 크며, 축방향의 길이를 최소로 할 수 있는 돌극형 유도회전장치로 설계하였다. 용융 금속의 높은 열로 인한 전자기교반장치의 코일의 절연체가 녹지 않도록 철강의 연속주조시 사용하는 고온용 특수 절연체인 실리콘을 사용하였고, 코아재료는 자성이 클수록 좋으며, 본 연구에서는 보자력이 가장 큰 실리콘스틸 판재를 사용하였다. 또한 전자기교반장치 내경에는 원통형 냉각 jacket을 설치하였다.

수평연속주조장치의 몰드크기를 고려하여 내경 200mm, 철심돌극 높이는 150mm, 철심 폭은 50mm로 설정하였으며, 코일에는 냉각수를 흘리기 위해 내경 3.5mm의 구멍이 뚫어져 있는 6.5mm<sup>2</sup> 동튜브로 제작된 코일을 돌극당 25 turns로 권선하면 동튜브 길이가 약 14m가 되도록 하였다. 그림 2는 제조된 전자기교반장치는 보여주고 있다.

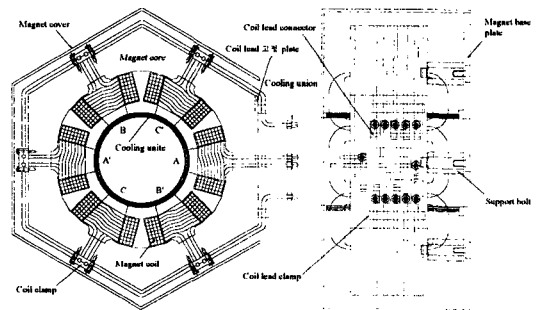


Fig. 2. Electromagnetic stirrer designed and manufactured in this study

그림 3은 본 연구에서 제작된 전자기교반 연속주조장치의 개략도를 보여주고 있다. 전자기교반 수평연속주조장치는 고주파유도로, ladler, 런너, 턴디시, 전자기교반장치, 몰드, 인출기, 더미바, 절단기와 전자기교반장치용 전압조정기, 수평연속주조 컨트롤장치와 공정변수자동측정시스템으로

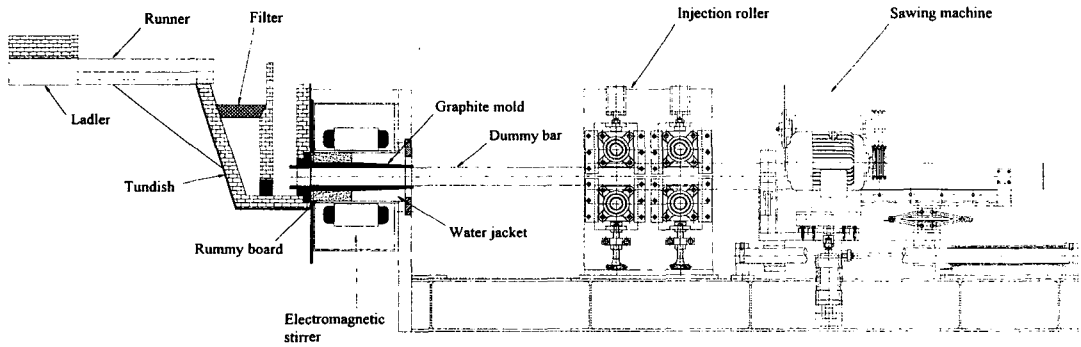


Fig. 3. Horizontally continuous casting machine manufactured in this study.

구성되어 있다. 턴디시는 용탕의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 내열성이 좋은 세라믹내열보드로 제작되었으며, 잔탕제거 및 턴디시내의 용탕을 제거할 수 있도록 턴디시 바닥에 수직 상하이동이 가능한 스톱퍼가 설치되었다. 몰드는 고순도 graphite로 제작되었으며, 흑연몰드의 내면은 정삭가공이 되어 경면이 되도록 하였으며 턴디시와는 턱을 가진 세라믹 내열단열재인 루미보드로 연결되어 수평연속장치의 조방에서 볼트로 채울 때 전혀 빈틈이 없도록 치수가 정확하게 가공을 하였다. 또한 graphite mold와 전자기교반장치사이에는 수냉 water jacket과 고온내열보드로 채워지며, 수냉 water jacket의 내면의 경사각과 graphite mold의 외면의 경사각을 동일하게 주어 정확하게 일치되도록 하였고, graphite mold가 tundish와 수평연속조장치의 조방사이에서 정확하게 중심 축에 놓여 움직임이 없도록 설치하였다.

빌렛 인출을 위한 더미바는 외경 70mm 파이프에 용탕이 닿는 앞부분은 흑연몰드 내에서 자유롭게 이송이 가능하고 응고수축을 고려하여 직경 69.5mm, 길이 약 60mm정도의 철강 봉재로 제작하여 접착시키고, 더미바 앞쪽의 용탕이 닿는 부위는 나사 램을 내어 14mm 볼트를 끼울 수 있도록 하여 볼트머리에 용탕이 응고되어 더미바가 인출되면서 함께 인출되도록 하였다. 더미바의 길이는 약 2m로 인출기까지 연결되도록 하였다. 흑연몰드에는 몰드온도를 측정하기 위하여 상하좌우에 위치를 달리하여 모두 10개의 열전대와 냉각수 및 용탕온도 측정용 열전대 등 모두 15개의 열전대를

설치하여 온도를 측정하였다.

## 2.2. 연속주조빌렛제조

전자기교반 수평연속주조장치를 이용하여 외경 70mm의 알루미늄합금 빌렛트를 제조하였다. 알루미늄합금은 고주파유도로에서 용해시킨 후 일정온도로 유지하여  $C_2Cl_6$ 으로 탈가스를 하고 미리 설정된 출탕온도가 되면 고주파유도로를 기울어서 ladler로 출탕된다. 출탕된 용탕은 런너를 통해 턴디시로 공급되어 턴디시 상부에 설치된 filter를 통과하게 된다. Filtering된 용탕은 턴디시에 일정량으로 모아지게 되고 용탕의 온도가 떨어지지 않도록 상부에서 가스로 계속 열을 공급한다. 용탕이 공급되기 전에 미리 턴디시는 두 개의 가스 불을 이용하여 일정온도까지 예열하였다.

턴디시를 예열할 때에는 전자기교반장치에 냉각수를 공급한다. 초기에는 흑연몰드에도 미리 냉각수를 공급하였으나, 공기 중에 습도가 높은 경우 흑연몰드에 이슬이 맺히게 되어 흑연몰드의 냉각수공급은 출탕하기 바로 전에 실시하였다. 한편 고주파유도로에서 용탕을 출탕할 때 초기에는 많은 용탕이 공급되게 하여 흑연몰드 안으로 빠른 시간 내에 용탕이 가득 차도록 유도하였다. 용탕이 가득 채워지면 전자기교반장치를 가동시켜 용탕이 회전되도록 하였다. 초기에는 용탕을 흑연몰드에 채워지기 전에 미리 가동시킨 결과 흑연몰드에 있는 용탕이 가득 채워지기 전에 회전을 하게 되기 때문에 흑연몰드 안에 있던 기체와 함께 섞여져서 빌렛트 안에 상당히 많은 기포를 발생시키게 되었다. 미리 설정된 일정시간이 경과되면 인

출기를 가동시켜 설정된 인출속도로 더미바를 인출시킨다. 이때 더미바 냉각기에 냉각수를 공급하여 더미바를 냉각하면서 인출한다.

전자기교반 수평연속주조작업에는 많은 공정변수에 의해 조절된다. 특히 텀디시 안의 용탕온도와 흑연몰드에서의 냉각속도 다시 말해 흑연몰드 수냉 jacket으로 인입되는 냉각수량, 빌렛트인출속도 및 흑연몰드 안의 용탕의 회전속도 다시 말해 전자기교반장치로 들어가는 전력량이 가장 중요한 공정변수이다. 이러한 공정변수들은 흑연몰드 안에서의 열적 평형을 가하도록 하는 것이 매우 중요하며, 따라서 흑연몰드 안의 용탕상태를 조사하기 위해서 흑연몰드에 10개의 열전대를 삽입하여 측정하였다. 또한 각종 냉각수온도도 함께 측정하였다. 온도측정은 노트북용 Data Acquisition 프로그램을 사용하여 채널 15개를 이용하여 측정 기록하였다.

흑연몰드 수냉 jacket으로 인입되는 냉각수량은 최고 200l/min까지 조절이 가능하였으며, 디지털로 측정하였다. 또한 빌렛트 인출속도는 최고 400mm/min까지 조정하여 미리 설정된 속도로 자동 혹은 수동으로 조절하였다. 전자기교반장치로 들어가는 전압은 최고 180V로 조절할 수 있도록 전압조정장치를 제작하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 전자기교반장치의 자속밀도

그림 4는 본 연구에서 제작된 전자기교반장치에서 측정된 자속밀도를 보여주고 있다. 또한 Latvia에서 제작된 봉형 전자기교반장치의 자속밀도를 보여주고 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 동일한 자속밀도 1000Gauss를 나타내는데 본 연구에서 제작된 전자기교반장치는 대략 전류 200A인 반면에 Latvia에서 제작된 전자기교반장치는 500A이었다. 따라서 전기효율이 본 연구는 약 0.25인 반면에 Latvia는 약 0.11을 나타내 약 2배의 효율이 향상되어 적은 전기량에서도 동일한 자장유도효과를 나타내는 것으로 나타났다.

#### 3.2 전자기교반 수평연속주조 빌렛트 제조

본 연구에서 제조한 전자기교반 수평연속주조장치를 사용하여 A356(액상선온도: 615℃, 고상선온도: 555℃) 알루미늄합금으로 빌렛트를 제조하였다. 텀디시내의 용탕온도를 640℃로 일정하게 유지되도록 하였으며, 이때에는 공정변수 중에서 인

출속도가 가장 중요한 변수이다. 따라서 본 연구에서 사용한 흑연몰드에서의 가장 건전한 수평연주 빌렛트를 제조하는 인출속도를 조사하기 위하여 인출속도에 따른 수평연속주조 빌렛트의 표면 및 조직변화를 조사하였다.

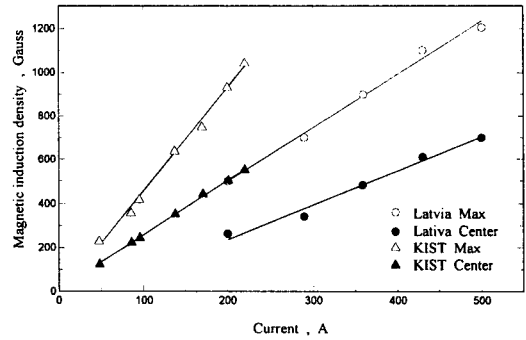


Fig.4 Magnetic induction density of electromagnetic stirrer as a function of input current

대상합금은 개량화처리가 안된 A356 Al 합금을 사용하여 (C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>+N<sub>2</sub>)로 탈가스처리를 850℃에서 실시하고, ceramic foam으로 filtering처리를 실시하여 텀디시에 용탕을 공급하였다. 고주파용해 출탕온도는 850℃이었으며, 전자기교반조건은 60V로 하였다. 흑연몰드의 냉각수유량은 35l/min으로 하였으며, 빌렛트 인출속도는 20에서 120mm/min으로 변화시키면서 인출하였다. 단속간격은 ON/OFF를 10초/10초씩 실시하였으며, 따라서 평균 인출속도는 10에서 60mm/min으로 평가되었다.

그림 5는 인출속도를 달리하여 전자기교반 수평연속주조기에서 알루미늄합금 빌렛트를 제조하였을 때 측정된 각종 온도분포를 보여주고 있다. 초기 인출속도를 20mm/min으로 평균 인출속도는 10mm/min으로 인출하였으며, 이때의 흑연몰드의 온도가 일제히 하강하였다. 텀디시 내의 용탕온도는 크게 하강하지 않았는데 흑연몰드의 온도가 하강한 것은 흑연몰드의 수냉 jacket에서 빠져나가는 열량이 인출로 인하여 새롭게 공급되는 용탕의 열량보다도 많았기 때문으로 생각되었다. 다시 말해 공급되는 열량보다 빠져나가는 열량이 많게 되면 고액계면 위치가 일정한 곳에 있게 되는 열적 정상상태를 유지하지 못하기 때문에 고액계면이 텀디시 쪽으로 이동하게 되고 흑연몰드의 온도가 하강하게 된다.

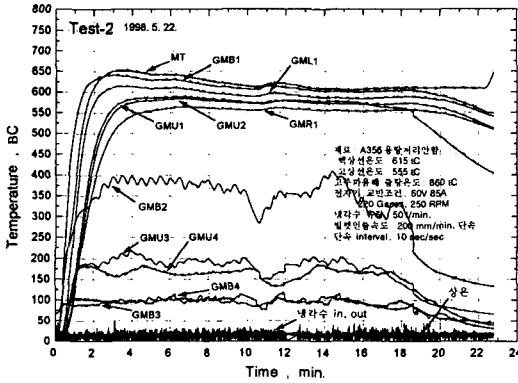


Fig. 5. Temperatural profile in the graphite mold, the tundish, and a cooling water during the experiment

따라서 이러한 흑연몰드 내의 용탕에서의 인출로 인한 냉각속도와 인출속도가 열적 균형을 이루도록 하는 것이 매우 중요하며, 평균 인출속도 10mm/min으로는 건전한 수평연속주 빌렛트를 제조할 수 없을 것으로 판단되었다. 따라서 곧바로 인출속도를 40mm/min으로 즉 평균인출속도를 20mm/min으로 증가시켰으며, 그림에서 보는 바와 같이 흑연몰드의 온도가 증가하여 일정한 온도를 유지하는 열적균형을 이루었다. 그러므로 본 연구에서 제작한 전자기교반 수평연속주조기에서는 평균인출속도 20mm/min이상에서 안정한 빌렛트인출이 가능한 것으로 나타났다.

또한 평균인출속도 60mm/min에서 인출간격을 5초/5초로 줄이자 고액계면이 분리되면서 빌렛트가 끊어졌다. 따라서 인출간격을 줄이면 연속주조조건에 변화가 일어나 빌렛트가 끊어졌다고 생각할 수도 있으나, 일반적으로 인출간격을 줄인다고 해서 흑연몰드 내의 용탕의 열적 균형을 깬다고는 생각되지 않는다. 따라서 인출간격에 관한 연구는 계속 검토하여야 될 것으로 생각되며, 또한 턴디시내의 용탕량도 중요할 것으로 생각된다. 다시 말해 턴디시내의 용탕량이 많아 빠른 인출속도에도 불구하고 또는 용탕의 점도에도 불구하고 인출로 인해 발생하는 빈공간으로 새로운 용탕이 빠르게 채워지면서 열적 균형만 이루어진다면 빠른 인출도 가능할 것으로 생각되었다.

### 3.3. 연속주조빌렛트의 표면특성

그림 6은 여러 인출속도에서 제조한 알루미늄합금 수평연속주조 빌렛트의 표면상태를 자세히 확인하기 위하여 확대한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 빌렛트 평균인출속도가 20mm/min에서 40mm/min인 경우는 빌렛트 표면이 아주 미려하고 표면이 전혀 뜨기지 않고 smooth하였으며, 인출시 고액공존영역인 반응고상태와 완전 용탕과의 분리되어 나타나는 표면분리층도 나타나지 않았다. 따라서 본 수평연속주조장치에서는 빌렛트 평균인출속도가 20mm/min에서 40mm/min인 경우가 가장 건전한 빌렛트를 제조할 수 있는 조건으로 생각되었다.

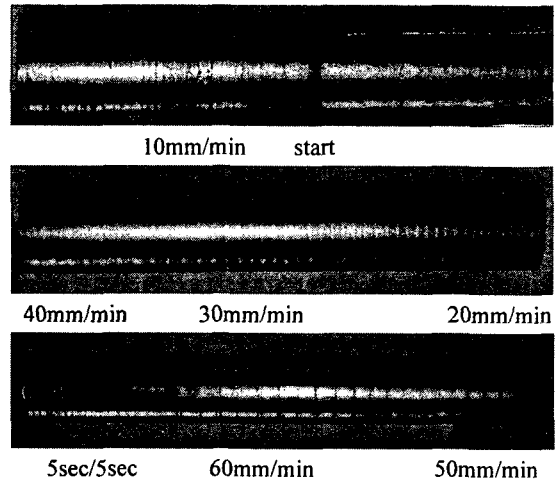


Fig. 6. Surface shape of a billet as a function of injection speed

한편 상부표면은 깨끗한 반면에 하부쪽은 뜬긴 자국이 나타났으며, 이것은 응고수축으로 상부는 흑연몰드와 분리가 되는데 하부는 빌렛트의 하중으로 인해 고액계면전방의 반응고구간이 흑연몰드와 밀착되면서 인출되기 때문에 뜬기는 것으로 생각되었다. 이러한 현상은 가장 안정한 인출조건인 평균인출속도 20mm/min, 30mm/min과 40mm/min에서도 동일하게 나타났다.

인출속도에 따른 흑연몰드내의 용탕유동의 변화를 조사하기 위하여 수평연속주조 빌렛트의 수직 절단면의 조직을 통해 유동라인을 관찰하였으며, 그림 7은 평균인출속도가 60mm/min인 경우에서의 유동라인을 보여주고 있다. 이러한 유동라인은 응고양상의 변화로 공정상과 알루미늄 단상과의 부피분율의 차이로 나타나게 된다. 따라서 이러한 유

동라인은 고액계면의 형상과 동일하다고 생각된다.

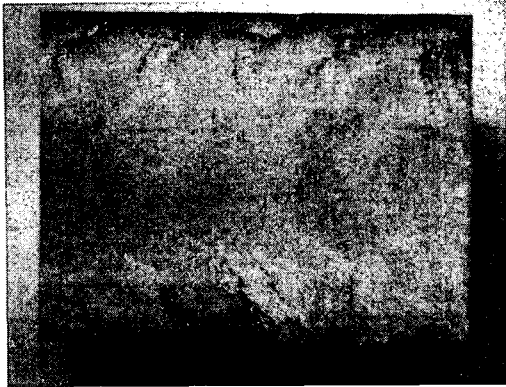


Fig. 7. Macrostructure of a vertical section of a billet fabricated at a casting speed of 60mm/min. Melt flow line can be showed.

그림에서 보는 바와 같이 인출속도에 따라 유동라인이 변화하였으며, 인출속도가 빠를수록 유동라인은 표면에서 중심 쪽으로 완만한 기울기를 가졌으며, 인출속도가 낮을수록 기울기는 급하였다. 다시 말해 고액계면의 위치가 표면부에서 중심부까지의 위치변화인 거리차이가 인출속도에 따라 달라졌으며, 표 1에 종합적으로 나타내었다.

Table. 1. Distance gap of flow line between side and center as a function of average casting speed.

Average casting speed (mm/min)	10	30	40	50	60
Distance gap of low line (mm)	32	not observed		50	60

평균인출속도를 60mm/min으로 인출한 경우 고액계면형상이 표면에서 중심 쪽으로 매우 완만하게 기울어져 표면용고층의 두께는 2-3mm로 매우 작았다. 표면층의 두께가 작아지면 인출시에 표면용고층에서 분리가 일어나게 되고 연주빌렛트가 끊어지게 되어 연속주조작업이 멈추게 된다. 그러므로 이 표면층의 두께를 인출시 작용되는 마찰력에 대응하여 어느 정도의 강도를 유지할 수 있는 두께를 가지도록 하여야 한다. 본 전자기교반 수평연속주조장치에서 평균인출속도 60mm/min으로 인출

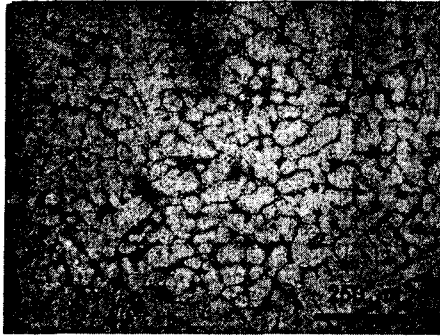
한 경우에 연주빌렛트가 끊어진 것은 냉각속도가 뒷받침이 안되는 상황에서 표면용고층의 두께가 작아져서 표면용고층이 분리된 것으로 판단되며, 따라서 본 연구장치에서의 최고인출가능속도는 평균인출속도 50mm/min인 것으로 생각되었다. 한편 표면상태가 아주 양호한 평균인출속도 20mm/min에서 40mm/min에서는 유동라인을 관찰할 수 없었다. 이것은 고액계면이 존재하나 인출속도와 냉각속도가 균형을 이루었기 때문으로 생각되었다.

#### 3. 4. 연속주조빌렛트의 조직변화

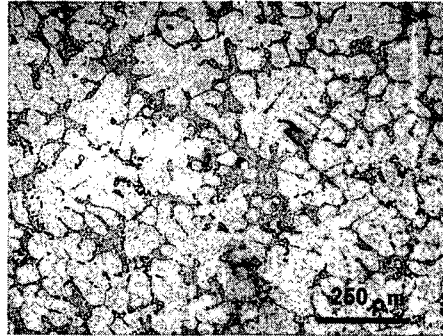
수평연속주조 빌렛트의 미세조직은 중심부와 표면부의 조직편차, 조직 미세화정도, 결정구상화정도 등에 주안점을 두고 검토하였으며, 그림 8은 각 평균인출속도로 수평연속주조된 빌렛트의 대표적인 표면과 중심부와의 중간부위에서의 조직과 중심부에서의 조직을 보여주고 있다.

조직미세화는 빌렛트인출속도가 클수록 미세화되었으며, 이것은 빌렛트 인출속도가 클수록 냉각속도가 더 커졌음을 의미한다. 한편 빌렛트중심부와 표면부의 조직미세화정도는 큰 차이는 없었지만 중심부에는 구상화가 안된 덴드라이트조직이 많이 관찰되었다. 이것은 앞의 유동라인에서 확인한 바와 같이 인출속도가 빨라지면 표면부와 중심부의 고액계면 위치편차가 커지게 되고, 따라서 중심부에 존재하는 액상용탕은 표면용고층이 자장차폐 역할을 하기 때문에 자장에 의한 교반효율이 급격하게 감소하게 된다. 특히 알루미늄합금의 자장차폐는 상당히 크기 때문에 약 10mm의 표면용고층이 존재하면 자장강도는 표면에서의 자장강도의 50%로 감소하며, 다시 표면용고층이 10mm가 더 생기면 그 위치에서의 자장강도는 다시 50% 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 유동라인이 완만한 기울기를 가져 표면과 중심에서의 고액계면 위치편차를 가능한 한 줄이는 것이 좋다.

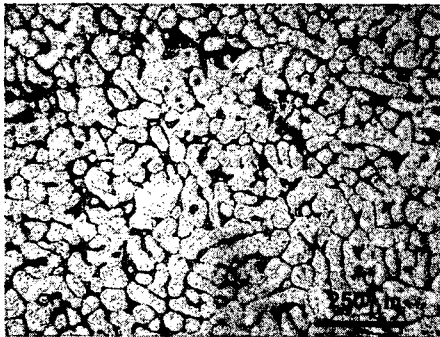
한편 결정구상화정도는 빌렛트인출속도가 빠를수록 나빠져서 길게 성장된 덴드라이트가 관찰되었다. 이것은 표 1에서 보는 바와 같이 인출속도가 빠를수록 전자기교반장치에 교반시간은 상대적으로 감소하기 때문으로 생각되었다. 이러한 중심부에서의 덴드라이트조직은 평균인출속도 30mm/min부터 관찰할 수 있었다. 따라서 인출속도가 빠를수록 냉각속도는 크기 때문에 조직은 미세화되었지만 교반시간은 적기 때문에 구상화는 덜 일어났다. 빌렛트인출속도는 열균형과 교반시간과 관계



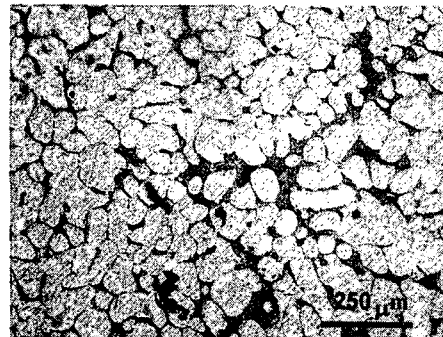
No-stirring(Center)



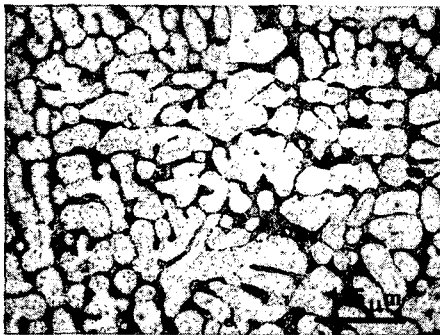
No-stirring(medium)



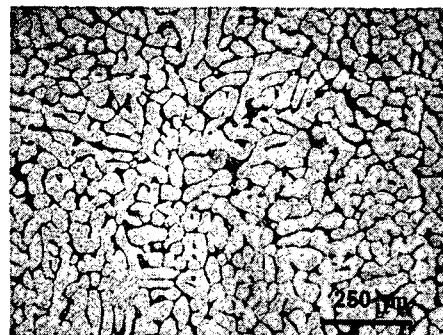
20mm/min(Center)



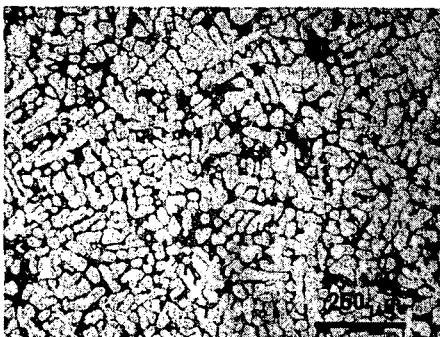
20mm/min(medium)



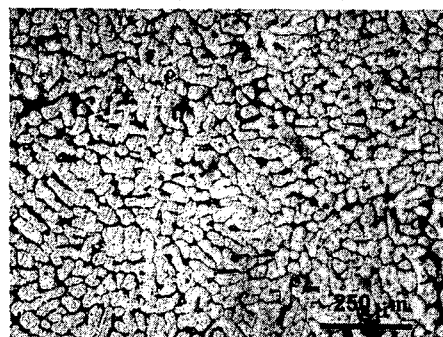
30mm/min(Center)



30mm/min(medium)



40mm/min(Center)



40mm/min(medium)

Fig. 8. Continued.

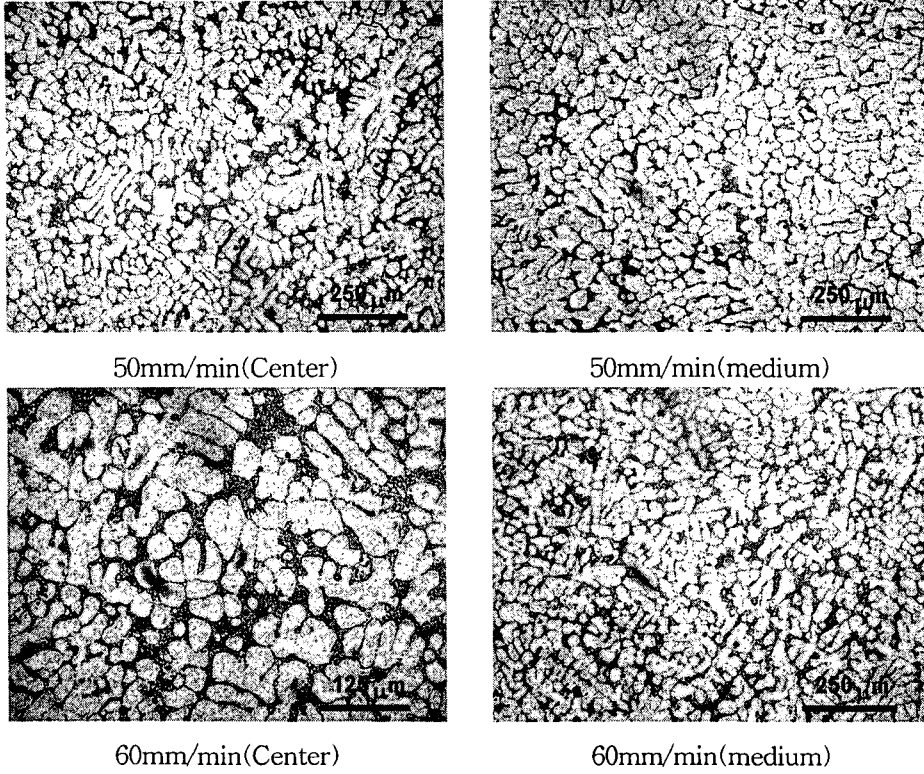


Fig. 8. Microstructures of a central and medium area in a no-stirred and EM-stirred billet fabricated at a various average casting speed of from 20 to 60 mm/min.

있으며, 냉각수량은 인출속도에 따른 열평형과 조직미세화에 관계가 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

전자기교반 수평연속주조장치를 설계 제작하여 건전한 연주빌렛트를 제조할 수 있는 여러 공정조건을 조사 검토하여 직경 70mm의 기포가 없고 표면이 미려한 등축정을 가진 연주빌렛트를 제조하였다.

(1) 등축정을 가진 빌렛트를 제조하기 위하여 덴드라이트를 파단시킬 수 있는 최대 자속밀도가 1000Gauss이며, 중심부에서는 500Gauss인 전기효율이 0.25인 돌극형 전자기교반장치를 설계 제작하였다.

(2) A356 알루미늄합금을 사용하여 전자기교반 수평연속주조 빌렛트를 제조하면서 여러 가지 공정변수를 측정 조사한 결과 텀디시 내의 용탕온도가 연주빌렛트가 끊어지지 않고 안정하게 인출되는데 가장 중요한 것으로 나타났다.

(3) 인출속도에 따른 수평연속주조 빌렛트의 표면, 용탕유동 및 조직을 검토한 결과 흑연몰드를 사용하고 간접냉각방식인 경우 인출속도 20mm/min에서 40mm/min까지 아주 미려한 표면특성을 가졌으며, 인출속도가 빠르면 유동라인이 표면에서 중심 쪽으로 완만한 기울기를 가지게 되어 표면응고층이 얇아져 빌렛트가 고액계면에서 끊어지게 되며, 조직미세화는 인출속도가 클수록 미세화되었으나, 결정구상화정도는 인출속도가 빠를수록 악화되었다.

후 기:

본 연구는 두레어메탈(주)이 보유하고 있는 수평연속주조장치를 이용하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.



참 고 문 헌

- 1) Robert B. Powers: *ibid.*, (1975), III-4.
- 2) H.S. Spaulding : *ibid.*, (1975), III-5.
- 3) R.E.Spear, R.T.Craig and C.R.Howle: *J. Metals*, 10(1971), 42.
- 4) Y.Ishii: *Light Metals*, *Trans. AIME*, (1989), 673.
- 5) D.B.Spencer, R.Mehrabian, and M.C.Flemings : *Metallurgical Transactions*, 3(1972), p.1925-32.
- 6) A.I.Nussbaum : *Light Metal Age*, June(1996), p.6-22.
- 7) 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.