

논문

A356 합금의 연속주조시 전자기 교반에 따른 미세조직 변화

김원배 · 권태우 * · 김종철 * · 박태호 · 예병준 †

경북대학교 금속공학과
*(주) 화신 기술연구소

The Effect of Electromagnetic Stirring on the Microstructure of A356 Al Alloy by the Continuous Casting Process

Won-Bae Kim, Tae-Woo Kwon*, Jong-Chul Kim*, Tae-Ho Park, and Byung-Joon Ye†

Dept. of Materials Science and Metallurgy, Kyungpook National University Daegu 702-701, Korea
*R&D Center, Hwashin Co. Ltd., Yeongcheon 770-130, Korea

Abstract

There are many factors that influence solidification behavior during continuous casting, e.g. include superheat, casting speed, cooling rate and holding time. However, when melt is stirred by electromagnetic force, there would be some changes in its solidification behavior compared to that of the ordinary casting process. In this study, the billets of A356 alloy with a diameter of 3 inch were fabricated with electromagnetic stirring under various conditions of superheat, casting speed and input voltage of electromagnetic stirring (EMS) device. The microstructure was also investigated under the various casting conditions and electromagnetic input voltages. When increase in input voltage, the microstructure was changed from dendritic to rosette type and finally to spheroidal. With pouring temperature, casting speed and electromagnetic input voltage were 650°C, 100 mm/min and 140 V, respectively, the billet with a diameter of 3 inch, which has a uniform dispersed spheroidal particles in the whole area of billet except for the surface area, was manufactured.

Key words : Semisolid process, Electromagnetic stirring, Continuous casting, A356 Al alloy

(Received April 19, 2005; Accepted July 28, 2005)

1. 서 론

최근, 자동차, 항공기 산업 등이 고도화 및 다양화 되고, 지구환경문제 등으로 인하여 재료의 경량화, 고강도 및 리사이클링에 대한 요구가 크게 요구되고 있으며, 이에 부응하는 기술로서 고액공존상태에서 가공하는 반응용/반응고 가공기술에 대한 기대가 높아지고 있다. 액상과 고상이 공존하는 온도영역에서 금속재료를 성형하는 기술로 반응고 금속 성형기술(semisolid process)은 1970년대 초 Flemings등에 의해 본격적으로 개발되기 시작하였다[1,2]. 합금의 응고시에 고액공존 영역에서 강력한 기계적 교반을 행할 경우 일반적으로 주조조직에서 관찰되는 수지상 조직 대신에 장미꽃 형 또는 구형의 초정입자들이 공정 기지내에 교반에 의해 형성되는 합금 슬러리는 일반적으로 주조공정에 적용할 수 있을 만큼 충분히 낮은 점성을 가지고 있다[3].

이와 같은 반응고 금속을 제조하는 방법[4-7]으로는 기계적 교반법, 전자기적 교반법이 주로 이용되고 있다. 기계적 교반법은 간단한 원리로 높은 전단력을 낼 수 있고 구형화 조직을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있으나, 교반자의 마모, 불순물의

개입, 품질의 저하, 공정제어의 난이성 등에서 제약이 있다. 이에 반해 전자기적 교반법은 불순물 및 산화물 등의 개입을 억제할 수 있고, 정확한 전단력을 제어할 수 있지만 전력소모가 크다는 단점이 있다.

본 연구에서는 실제 공정에 적용할 수 있는 기초적인 자료를 제공하고자 실험실 규모의 수직형 hottop 방식 연주기와 3상 2극의 회전자계형 전자교반장치를 제작하여 실제 A356합금의 연속주조시 전자기 교반 실험을 통해 semisolid billet의 제조가 가능한 연속주조 조건을 파악하였다. 그리고 미세조직의 형상을 제어하는 주요변수인 교반입력전압에 따른 조직의 변화를 고찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 용해부, 연속 주조부, 전자기 교반부의 세 부분으로 나눌 수 있다. 용해로는 저항가열 방식의 출탕구를 중심으로 기울일 수 있도록 제작된 유압식 경동로이다. 연속주조기는 수직형의 hottop 방식으로 직경 3 inch(76.2 mm),

†E-mail : bjye@knu.ac.kr

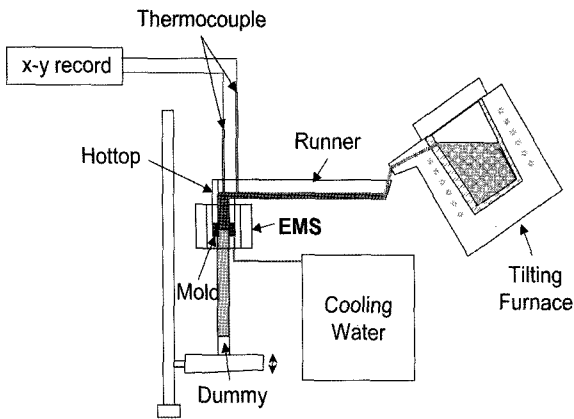


Fig. 1. Schematic diagram of the continuous casting and electromagnetic stirring device.

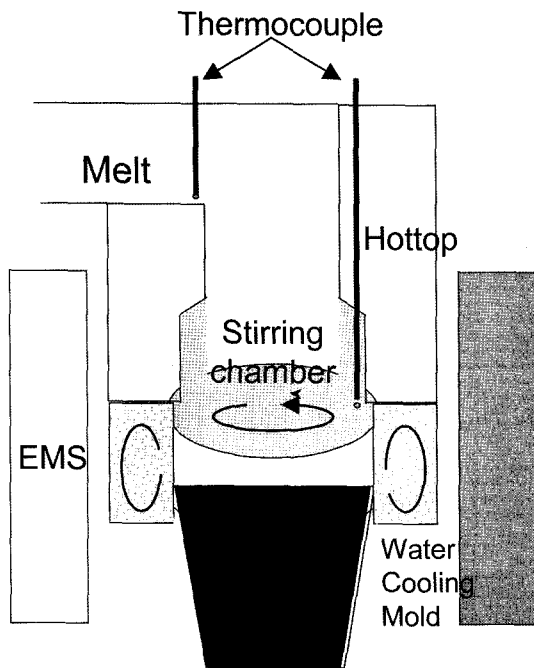


Fig. 2. Schematic diagram of the mold.

1 hole로 이루어져 있다. 유압장치의 총 행정길이는 1500 mm 이고 실제 주조 가능한 빌렛의 최고 길이는 약 1400 mm 정도이다. 금형부를 좀더 자세히 살펴보면 Fig. 2와 같다. 금형의 재질은 자속의 투과가 우수한 오스테나이트계 스테인레스강을 사용하였다. 용탕이 전자기력의 영향을 더 받을 수 있도록 hottop 하단부의 내경을 넓혀서 교반실(stirring chamber)을 만들어 용탕과 전자기 교반장치(Electromagnetic stirrer, EMS)간의 거리를 줄였다. 온도 이력의 측정 및 연주상태의 확인을 위해 용탕 주입구 및 금형 내부에 열전대를 설치하였고 열전대 표면의 산화를 방지하기 위해 내화제로 피복 하였다. EMS는 수평회전방식의 3상 유도전동기의 고정자를 사용하였으며, 몰드 중심부에서 높은 자속밀도를 얻기 위하여 극수를 6극에서 2극으로 변화시켰다. EMS의 냉각을 위해 수냉 장치를 부착하였고 사용되는 코일과 절연재도 비교적 고온에서 견딜 수 있

도록 제작하였다. EMS의 교반력의 조절은 슬라이다스를 부착하여 전압 조절을 통하여 가능하도록 하였다. 실험에 사용된 합금은 주조용 Al-Si-Mg계 상용합금인 A356 합금을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 적정 주조 조건의 설정

전자기 교반력을 인가한 hottop 방식의 수직 연속주조공정에 있어서의 공정변수로는 용해온도, 출탕온도, 주입온도, 인출속도, 탕도 예열온도, 냉각수 온도, 냉각수량 등과 같은 상당히 많은 공정변수를 가지고 있다. 이러한 공정변수들의 최적의 조건을 설정하기 위하여, A356 합금을 이용한 반복실험을 통해 연속주조기의 특성을 파악하고, 전자기 교반 조건과 인출속도, 주입온도를 제외한 다른 공정변수는 거의 일정하게 유지하면서 실험을 실시하였다.

본 실험에서 연주주조 조건인 주입온도와 인출속도의 변화는 결과적으로 응고시의 응고계면의 진전에 따른 단위시간당 입열량의 변화를 가져오게 된다. 또 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다[8,9].

$$\frac{dQ_{inner}}{dt} = \frac{dq}{dT} \cdot \frac{dT}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} + \Delta H \cdot \frac{df_s}{dT_{l-e}} \tag{1}$$

$$= \left(C_p + \Delta H \cdot \frac{df_s}{dT_{l-e}} \right) \cdot \frac{dT}{dz} \cdot \frac{dz}{dt}$$

식 (1)에서 고액계면을 평면으로 단순화하고 hottop부에서 용탕의 연주방향(z축)으로의 온도기울기가 일정하다고 가정할 경우 금형 내에서의 연주방향으로 단위길이만큼의 열 유속은 식 (2)과 같이 간략하게 바꿀 수 있다.

$$q_{inner} = \left(C_p + \Delta H \cdot \frac{\Delta f_s}{\Delta T_{l-e}} \right) \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot R \cdot \rho \cdot A \tag{2}$$

Q_t : heat flow [J/cm s]

C_p : specific heat, 0.963 [J/g · K]

ΔT : super heat [K]

ΔT_{l-e} : temperature gap between liquidus and solidus temperature, 38 [°C]

ΔH : latent heat, 389 [J/g]

ρ : density, 2.685 [g/cm³]

A : cross section area, 45.6 [cm²]

R : casting speed [cm/s]

L : length of hottop, 11 [cm]

Δf_s : solidus volume fraction at the ΔT_{l-e} , 0.65

또한 입열량의 변화는 냉각능(qouter)의 상대적 변화와 같은 의미로도 볼 수 있다. 따라서 이러한 조건들이 바뀌게 되면 실제로 금형 내부에서의 온도분포가 바뀌게 되어, 고액 계면의 위치, 형상 등이 바뀌게 될 것이다. Fig. 3은 주조 속도와 주입온도, 입열량의 관계를 나타낸 것으로서 계산된 입열량은 초

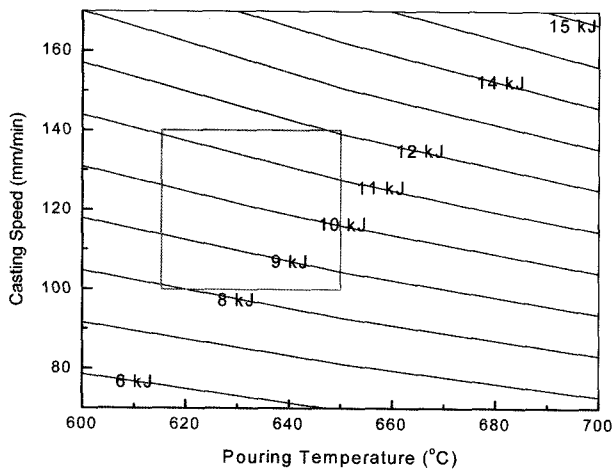


Fig. 3. Variation of Heat flux with casting speed and pouring temperature.

기 과열량(ΔT)이 상대적으로 클 경우에 주조속도에 더욱 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다.

연주시 입열량이 큰 경우에 제한된 냉각능으로 인해 고액계면이 하강하고, 급형에 의한 초기 응고층이 점점 얇아져 용탕이 흘러내리는 breakout 현상이 발생한다. 반대로 입열량이 적을 경우에는 고액계면이 상승하여 hottop부까지 응고가 진행되어 연주시가 막히는 현상이 발생한다. 이상의 결과로부터 본 실험에서 도출한 적정 온도와 주조속도를 Table 1에 나타내었다. 이를 종합해보면 다른 공정변수를 일정하게 유지하였을 때 주입온도 645~655°C, 인출속도 100~120 mm/min, 급형과 hottop부 경계에서의 온도가 615~625°C 인 조건에서 안정한 빌렛을 제조할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 조건에서 Fig. 4에서 보이는 3 inch 직경의 연주 빌렛을 제조할 수 있었다.

Table 1. Proper conditions for continuous casting.

| P.R. | P.T. | 625 | 635 | 645 | 655 | 665 | 675 |
|---------------|------|----------|-----|-------------------------|-----|-------|-----|
| | 70 | | | | | | |
| 80 | | × | × | | ○ | | × |
| 90 | | | | | | ○ | |
| 100 | | × | | ○ | ○ | | × |
| 110 | | | | | | | |
| 120 | | × | | ○ | ○ | | × |
| 130 | | | | ○ | | | |
| P.R. | M/H | 605 | 610 | 615 | 620 | 625 | 630 |
| | 80 | | | | | ○ | × |
| 100 | | × | | ○ | ○ | ○ | × |
| 120 | | × | ○ | | | | |
| cooling water | | 26 l/min | | runner preheating temp. | | 350°C | |

P.R. : Pulling rate(mm/min)

P.T. : Pouring temperature(°C)

M/H : Temperature of mold-hottop interface(°C)

3.2 전자기교반에 따른 미세조직 변화

전자기 교반이 미세조직에 미치는 영향을 살펴보기 위해 동일한 주입온도와 인출속도 하에서 실험하여 전자기 교반의 영향이 가장 잘 나타날 것으로 보이는 빌렛의 중심부를 중심으로 미세조직을 관찰해 보았다.

Fig. 5는 주입온도 650°C, 인출속도 100 mm/min, 그리고 전압이 각각 0, 24, 60, 100, 140 V일 때의 미세조직을 나타낸다. 전자기 교반을 인가하지 않은 (a)의 경우 전형적인 주상정 수지상 조직이 보였고, 비교적 입력전압이 낮은 (b)의 경우에는 주상정 수지상 조직이 연속적으로 성장하지 못하고, 전자기 교반에 의한 내부 용탕의 강제유동에 의하여 주상정 수

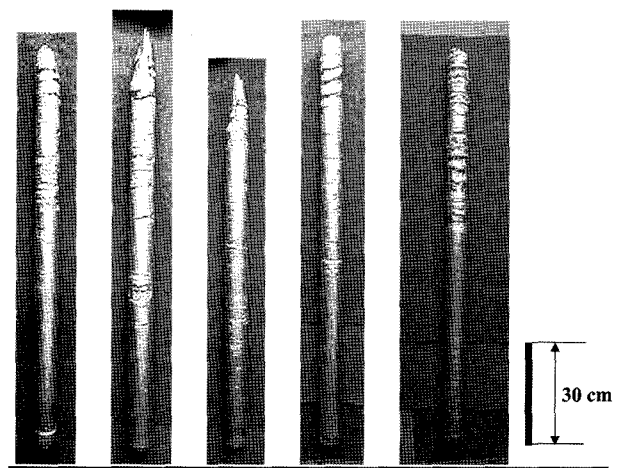


Fig. 4. Billets with a diameter of 3 inch, which manufactured by continuous casting.

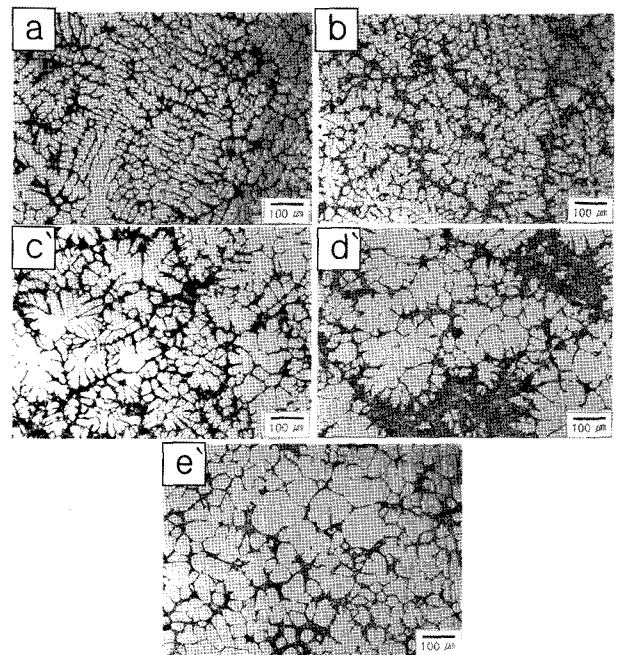


Fig. 5. Effect of EMS input voltage on the microstructures of as-cast A356 alloy billets. (a) 0 V, (b) 24 V, (c) 60 V, (d) 100 V, (e) 140 V (pouring temp : 650°C, pulling rate : 100 mm/min).

지상 조직들의 가지가 절단되어 등축정 수지상 조직이 나타남을 볼 수 있다. 교반입력전압을 보다 더 증가시킨 (c)의 경우 주상정 수지상 조직에서 분리되어 조대하게 성장한 장미형상 (rosette type)의 조직이 관찰되었고, 교반입력전압이 100 V인 (d)의 경우 장미형상의 조직이 파괴되어 보다 더욱더 구형화되는 경향을 보였으며, 가장 높은 교반입력전압인 (e)의 경우 전체적으로 초정 결정립 크기가 균일하고 구형화된 조직을 얻을 수 있었다. 교반입력전압을 100 V 이상 인가한 (d)와 (e)를 비교해보면 그 조직적인 변화가 매우 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 연속주조시 용탕에 인가되는 교반시간이 제한되고, 이로 인해 필연적으로 높은 교반력이 요구되게 되는데, 이 때의 교반력에 의해 형성된 용탕 내부의 강제 유동으로 주상정 수지상들을 절단하여 조직을 구형화 시키기 위해서는 일정 전압 이상의 임계값이 요구되어짐을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 Fig. 5의 교반입력전압 140 V에서 제조된 빌렛의 미세조직을 중심에서부터 외부까지 거리에 따라 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 중심에서부터 30 mm까지는 매우 균일하고 구형화된 조직을 얻을 수 있었으며, 표면부에서는 Fig. 5(b)와 유사한 미세한 등축정 수지상 조직이 나타났다. 따라서 표면부에서는 원활한 전자기 교반력의 작용이 일어나지 않는 것으로 생각된다. 이러한 이유는 연속주조시 냉각수로 간접 냉각되고 있는 몰드와의 직접적인 접촉에 의해 가장 빨리 응고가 일어나기 때문이다. 연속주조에서 이러한 영역이 나타나는 것을 완전히 제거하는 것은 어렵지만, 보다 강력한 교반력을 인가하고 인출속도를 증가시키면 그러한 영역을 최소화시켜 상대적으로 구형화된 조직의 영역을 증가시킬 수 있을 것이다.

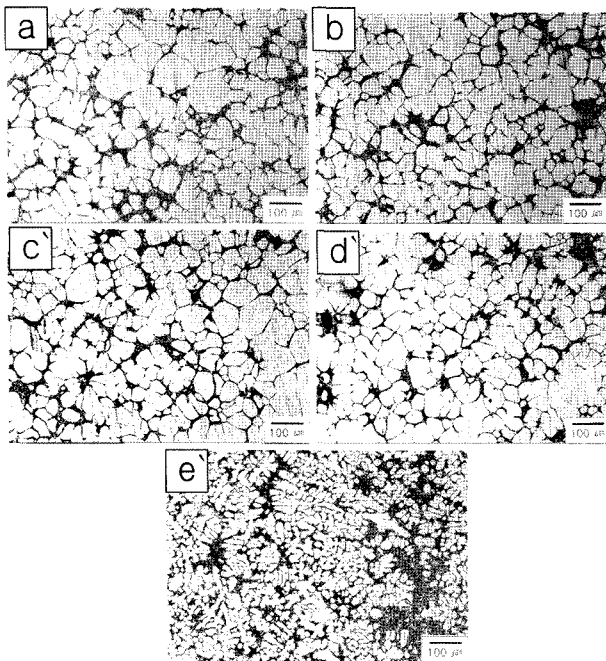


Fig. 6. Changes in as-cast microstructure of A356 alloy in different radial positions. (a) center, (b) 10 mm, (c) 20 mm, (d) 30 mm, (e) surface (billet diameter: 76.2 mm, EMS input voltage: 140 V, pouring temp.: 650°C, Pulling rate: 100 mm/min).

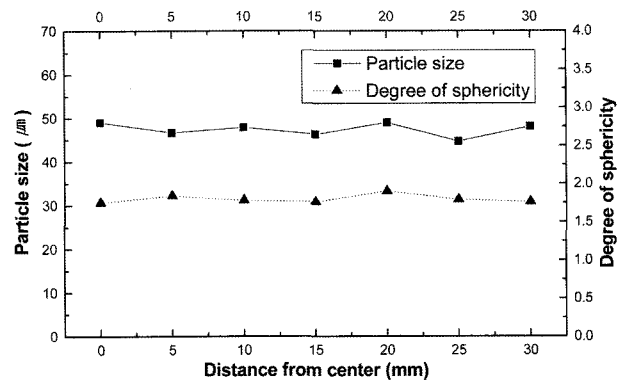


Fig. 7. Particle size and degree of sphericity in different radial positions.

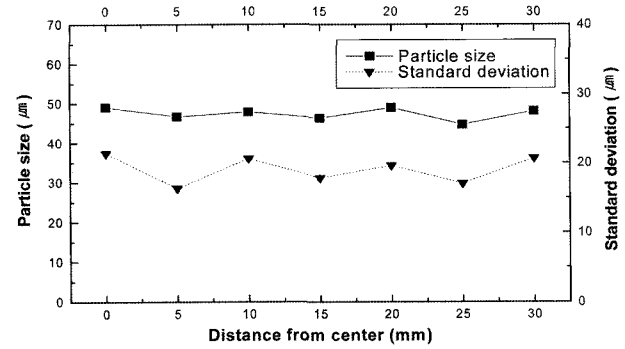


Fig. 8. Particle size and standard deviation in different radial positions.

Fig. 6의 조직사진을 이미지 분석장치(Image analyzer)로 분석하여 초정 고상입자의 크기와 구형화도, 표준편차를 Fig. 7과 8에 나타내었다. 초정입자의 크기는 44~49 μm 정도로 중심부에서 30 mm지점까지 비슷한 값을 나타내었으며, 구형화도는 1.7~1.9, 표준편차는 17~21 μm 정도로 역시 큰 차이를 나타내지 않았다. 이상의 이미지 분석 결과로 볼 때 표면부를 제외한 중심부에서 반경 30 mm 지점까지는 상당히 균일하게 구형화된 조직임을 알 수 있다. 이는 전자기 교반에 의한 강제 대류가 용탕의 고상과 액상사이에서 존재하고 있는 mushy zone의 형상을 아래로 불룩한 포물선의 형태에서 상당히 평형한 형태로 변화시켰기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 A356합금의 연속주조 공정에서 3상 2극의 회전자기형 유도전동기를 이용하여 전자기 교반 실험을 실시하였다. 실험을 통해 연속주조 조건을 설정하였고, 교반 입력전압이 A356합금의 미세조직에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) A356합금을 이용한 반복실험을 통하여 연속주조기의 특성을 파악하고, 기타의 공정 변수는 거의 일정하게 유지하면서 적정 연속주조인 주입온도 645~655°C, 인출속도 100~120 mm/min이다.

- 2) 동일한 주입온도와 인출속도 하에서, EMS 입력전압을 증가시킴에 따라 미세조직은 수지상 조직에서 장미형상의 조직을 거쳐 구상화 조직으로 변화하였다.
- 3) 교반입력전압이 140 V가 되었을 때 표면부를 제외한 빌렛의 전 영역에서 구형화된 형태의 미세조직을 얻을 수 있었다.
- 4) 직경 3 inch의 반응고 성형용 빌렛은 주입온도 650°C, 인출속도 100 mm/min, EMS 입력전압 140 V 이상의 조건에서 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Flemings, R. C. Rier and K. P. Young : Mater. Sci. & Eng., "Rheocasting", 25 (1976) 103-117.
- [2] P. A. Joly and R. Mehrabian : J. Mater. Sci., 11 (1976) 1393.
- [3] J. C. Lee, S. C. Lim and E. P. Yoon : J. Kor. Foundrymen's Soc., "The microstructural change of aluminum alloy by the electromagnetic stirring", 16 (1996) 76-85.
- [4] D. H. Kirkwood : Int. Mat. Rev., "Semisolid metal processing", 39 (1994) 173-189.
- [5] D. H. kim, Y. S. Han and H. I. Lee : J. Kor. Foundrymen's Soc., "Development of semi-solid state process (I)-basic principles and characteristics", 12 (1992) 108-116.
- [6] K. B. Kim and E. P. Yoon : Bull. Kor. Met. & Mater., "Raw materials production for semi-solid process", 10 (1997) 113-128.
- [7] J. C. Lee and H. I. Lee : Bull. Kor. Met. & Mater., "Recent R & D trend in thixoforming process", 10 (1997) 129-138.
- [8] D. R. Poirier, E. J. Poirier : Heat Transfer Fundamentals for Metal Casting, TMS, Warrendale, (1992).
- [9] M. C. Flemings : Solidification Processing, McGraw-Hill, New York (1974).