

기술자료

전자교반에 의한 Rheocasting 기술 개발

임성철[†] · 이흥복 · 권혁천

한국생산기술연구원

The Rheocasting Engineering Development
by the Electromagnetic StirringSung-Chul, Lim[†], Heung-Bok Lee, and Hyuk-Chon Kwon

Korea Institute of Industrial Technology 994-32, Dongchun-dong, Yeonsu-Gu, Incheon 406-800, Korea

1. 서 론

Semisolid Processing으로 통칭되는 반고상주조 또는 고액 공존 주조기술은 1971년 MIT의 Spencer에 의해 우연히 발견된 Sn-15%Pb합금의 이상점성 특성을 바탕으로, 지속적인 연구에 의해 1990년경 반응고주조(Rheocasting)에 의한 실용화 노력이 먼저 가시화 되었다[2,10,12,13]. 반고상주조는 종래의 가공법, 즉 완전 고체상태를 취급하는 소성가공 또는 완전 액체상태에서의 주조가공과는 달리 고액 공존영역에서 금속 Slurry의 Rheology 및 Thixotropic 특성을 이용하는 주조법으로, 현재는 Rheology등 기초물성에 주로 응용되는 반응고주조(Rheo-casting)와 AI을 중심으로 실용화 되어 있는 반용융주조(Thixocasting)로 대별될 수 있다[1,4,7-9]. 즉, Rheocasting에 관한 연구는 냉각 중 여러 변화에 따른 고상의 파괴, 성장, 조대화에 대한 규명 및 Slurry의 유동특성의 규명을 바탕으로, 현재 고액상용 영역에 대하여 Slurry의 유동특성 파악과 더불어 실용화에 주목하고 있다[3,5,6,11,14]. 마그네슘합금은 진동, 충격 등에 대한 흡수성이 탁월하고, 전기 및 열전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특성 등이 우수하여 구조용 재료로서 그 적용범위가 나날이 확대되고 있다. 또한, 마그네슘합금은 주조성이 우수하고, 응고범위가 넓은 뿐만 아니라, 용융상태에서 철과의 반응성이 매우 작으므로, 특수한 장비 없이 쉽게 반응고 가공공정을 적용할 수 있다.

본 연구에서는 기계적 특성과 주조특성이 우수하며 가장 널리 사용되어지고 있는 AZ91D마그네슘합금으로 Rheocasting을 위한 Slurry를 제조하기위해 전자교반시 미세조직에 미치는 냉각속도의 영향과 교반속도, 교반유지시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰하여 Semi-Solid 온도 구역에서의 다양한 교반의 변화를 통해 초정입자크기 및 분포상태, 구형화정도를 관찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 전자기 교반장치는 회전자계를 발생시키는 교반자와 스테인리스(Stainless) 도가니로 이루어져 있으며, 교반자로의 열흐름을 방지하기 위해 교반자 안쪽에 수냉장치를 설치하였고 공기, 수냉에 의한 강제냉각은 직접 제작한 스테인레스 Cooling System를 사용하였다. 또한, 용융상태에서 산화, 발화 방지를 위해 약 350°C에서 CO₂:SF₆=125:1의 비율로 보호가스를 주입하였다.

AZ91D 마그네슘합금 250 g를 전기로 및 전자장교반장치에서 용해한 후, 690°C로 과열처리하여 670°C까지 유지하여 이 온도에서 교반을 실시하였다. 교반조건으로는 냉각속도를 달리하기 위하여 로냉, 공기에 의한 강제냉각, 수냉 등으로 나누어 실험을 행하고, 일정한 고상율, Hz의 세기로 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 고상율(f_s)은 다음과 같이 Scheil equation에 의해 예측을 하였다.

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_M - T_L}{T_M - T} \right)^{\frac{1}{1-k}}$$

여기서, T_M 은 순금속 용융온도, T_L 은 모합금의 액상선 온도, k 는 평형분배계수이다. 용탕을 계속 교반을 하면서 냉각시키고 Scheil equation으로 얻은 고상율에 해당하는 온도에 이르렀을 때, 수조에 급랭 후 조직을 관찰하였다.

미세조직의 변화를 관찰하기 위하여 교반에 의해 제조된 시편을 하단부로부터 25 mm 되는 높이에서 횡단방향으로 절단한 후 mounting하여 미세연마 하였으며, 지름이 76 mm의 크기를 갖는 교반용고 된 빌렛을 절단하여 거시조직(macro-structure)을 관찰하였다. 초정고상입자를 관찰하기 위해 Nital 시약을 사용하여 부식(etching)한 후 광학현미경을 사용하여 조직변화 과정을 관찰하였다. 또한, 각 교반조건에 따른 조직

[†]E-mail : lsc2001@kitech.re.kr

"본 기술자료는 2005년도 하계기술강연대회에서 발표된 내용임"

에서의 고상율과 고상입자의 크기, 구상화 정도를 알아보기 위하여 화상분석기(image analyzer)를 사용하여 측정하였다. 단축과 장축의 길이를 측정한 다음, (장축/단축)값을 구하여 구상화 정도(degree of sphericity)를 알아보았다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 교반세기에 따른 마그네슘합금의 반응고 Slurry 미

세조직의 변화를 나타낸 것이다. 전자교반에 의해 수지상조직이 파괴되고 구상의 미세한 조직, 혹은 장미꽃 형상의 비수지상으로 변화하였다. 또한, 고상율 0.4에서 교반세기가 증가(10 → 14 Hz)할수록 더욱더 미세하고 구상의 초정입자를 얻을 수 있었다. AZ91D 마그네슘합금의 교반세기에 의한 반응고 Slurry의 미세조직을 이미지분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 교반세기 14 Hz, 고상율 0.3, 냉각속도 0.12°C/s에서 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자의 크기는 58 μm이었다.

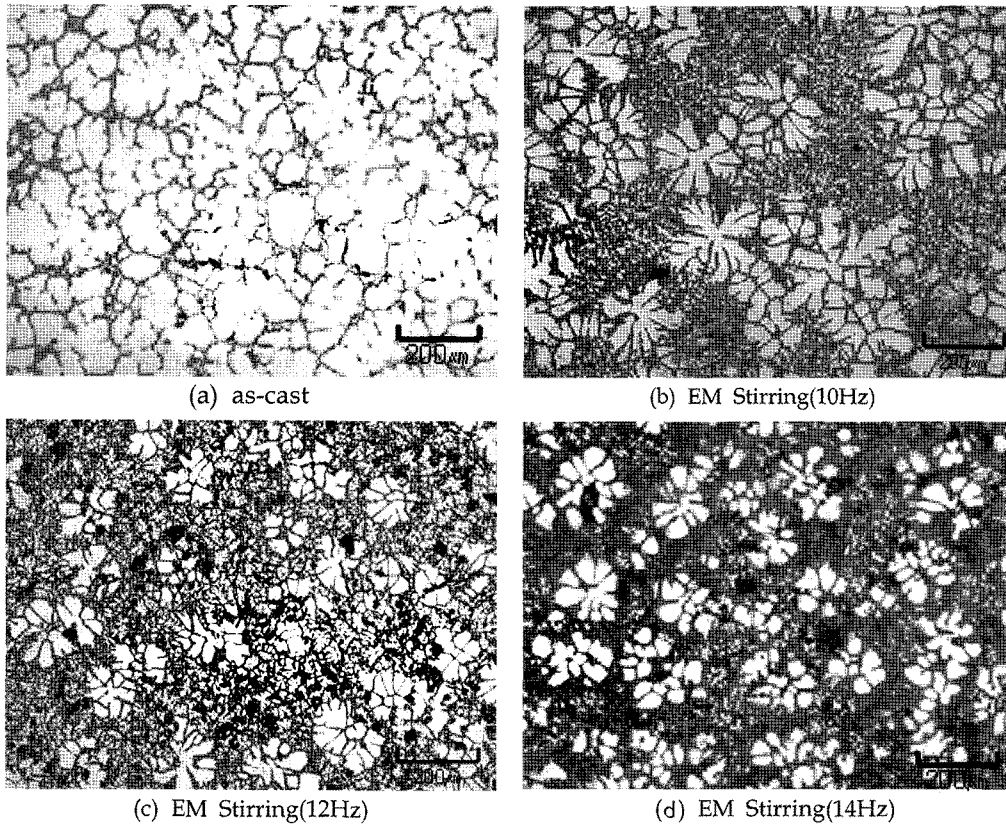


Fig. 1. Microstructures of the AZ91D Mg alloy with the various solid fraction. (cooling rate=0.12°C/s; Hz=10~14; fs=0.4)

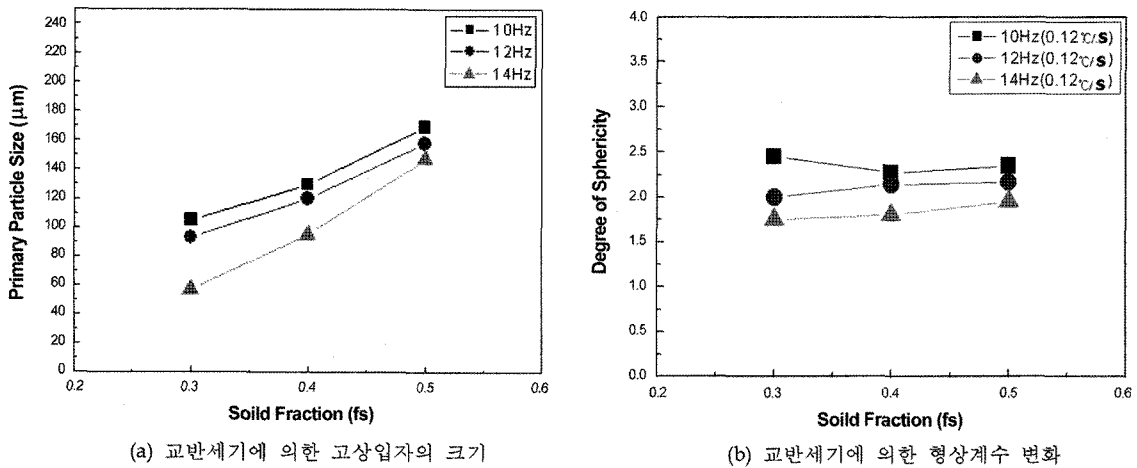


Fig. 2. Variation of average size of primary particle and degree of sphericity with the various Hz, Cooling rate. ; AZ91D Mg alloy (Cooling rate=0.12°C/s, Hz= 10~14, fs=0.3~0.5)

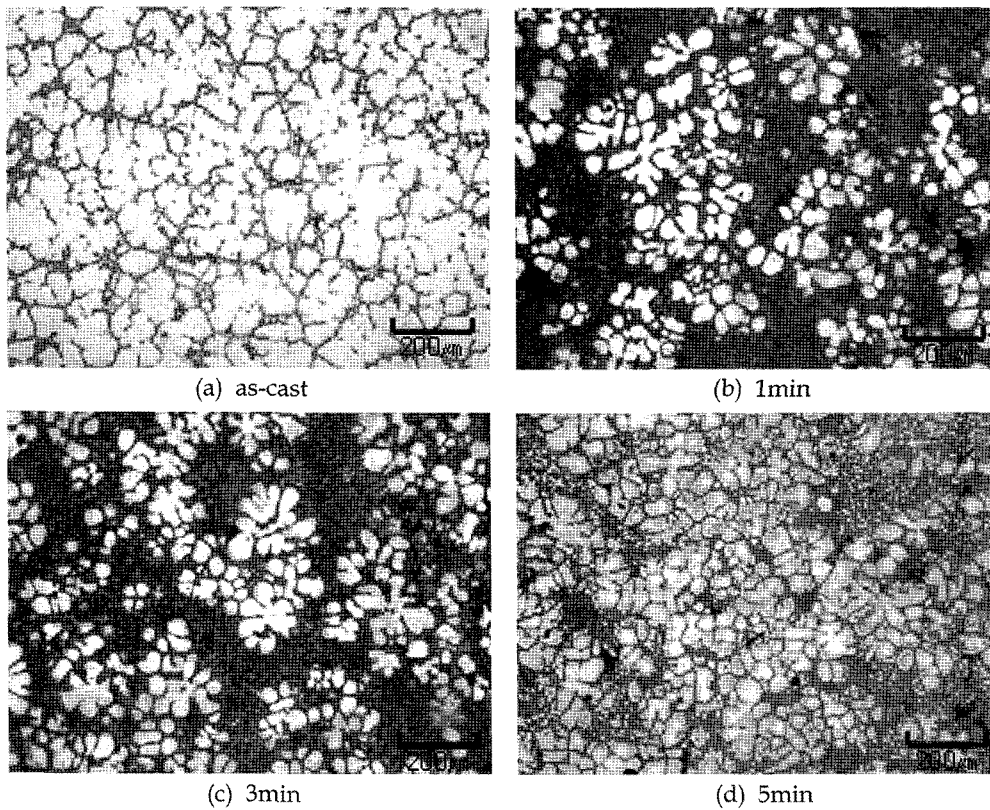


Fig. 3. Microstructure of the AZ91D Mg alloy stirred to various holding time. (Cooling rate=0.12°C/s, Hz=10, fs=0.5)

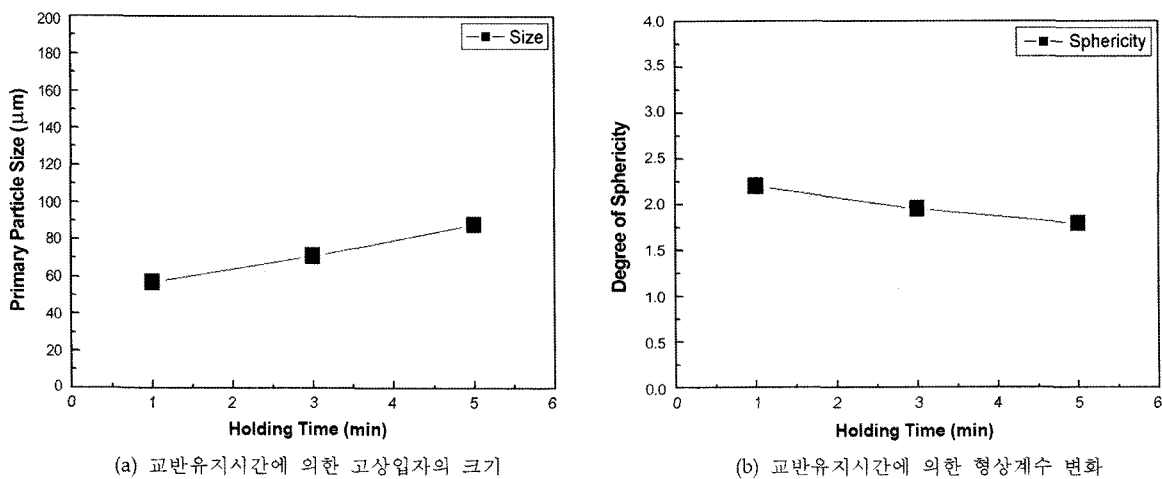


Fig. 4. Variation of average size primary particle and degree of sphericity with the various holding time. (Cooling rate= 0.12°C/s, Hz=10, fs=0.5)

Fig. 3은 교반유지시간에 따른 반응고 Slurry 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. 교반유지시간을 1, 3, 5 min으로 변화시켰다. 교반유지시간이 길어질수록(1→5 min)으로 반응고 Slurry의 고상입자의 크기는 조대화되고 구형화정도는 향상되어 구형에 가까운 입자 형태를 나타내었다. Fig. 4는 이미지분석의 결과이다. 교반세기 10 Hz, 냉각속도 0.12°C/s, 고상율 0.5 되는 온도에서 전자교반한 결과, 교반유지시간을 1 min에서 5 min으로 증가함에 따라 반응고 Slurry 고상입자의 구형화정도는 2.2

에서 1.6으로 향상되었다.

Fig. 5는 교반세기 10 Hz, 고상율 0.5에서 냉각속도에 따른 반응고 Slurry 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. 냉각속도를 각각 0.12, 0.53, 2.7°C/s으로 변화시켰다. Fig. 5(a)는 전자교반 하지 않은 미세조직으로 전형적인 수지상 조직의 형상을 나타내고 있다. 냉각속도가 증가할수록(0.12→2.7°C/s) 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자는 매우 미세한 조직으로 변화하였다. Fig. 6은 냉각속도의 변화에 따른 이미지분석기 결과를

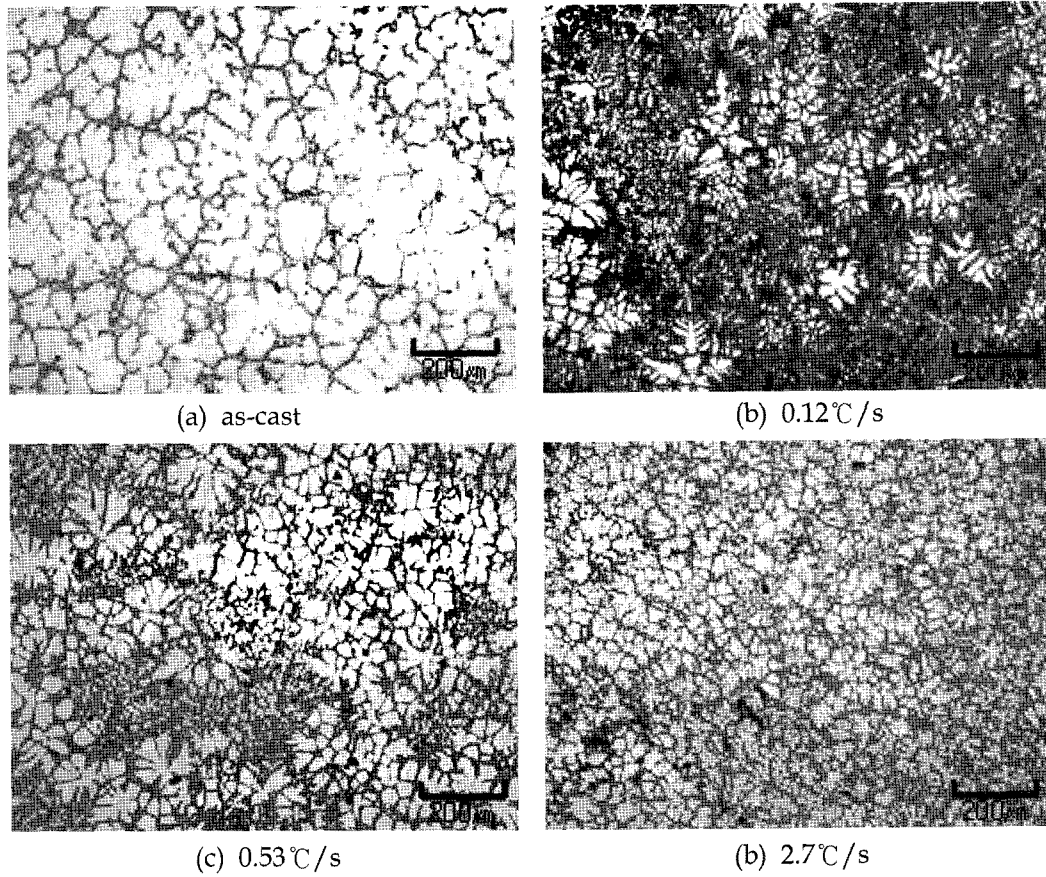


Fig. 5. Microstructure of AZ91D Mg alloy stirred to various cooling rate. (Hz=10, fs=0.4)

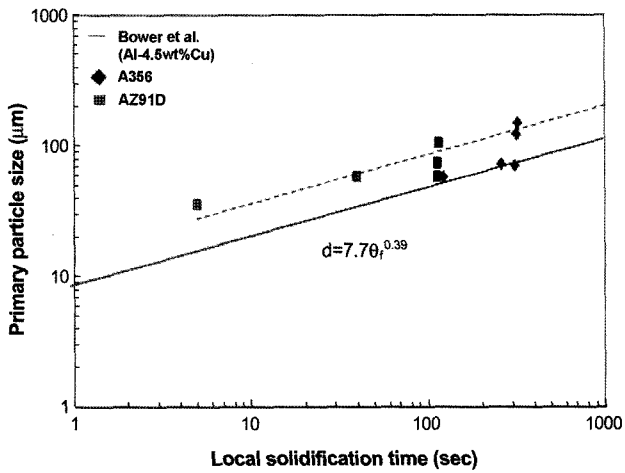


Fig. 6. Variation of secondary arm spacings(Primary particle size) as a function of local solidification time for AZ91D Mg alloy and Al-4.5wt%Cu.

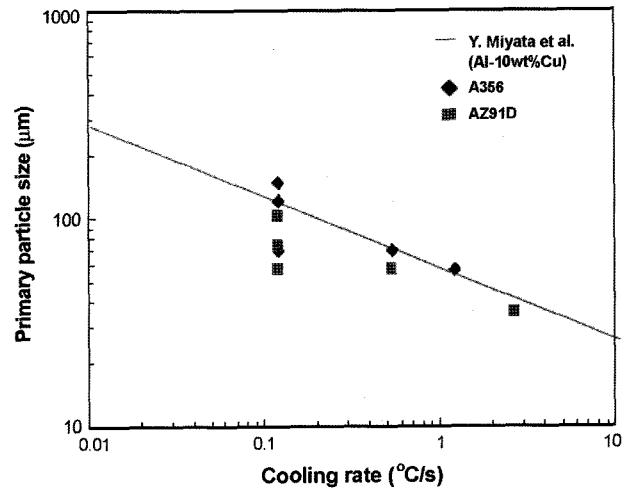
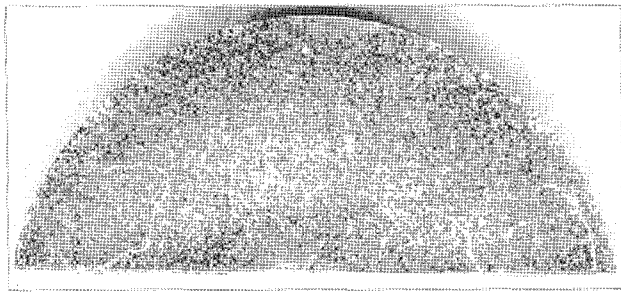


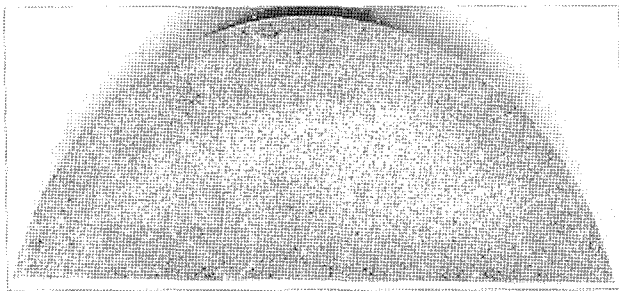
Fig. 7. Relation between cooling rate and the size of primary particle.

이용하여 국부응고시간(local solidification time)에 따른 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자의 크기 변화를 나타낸 그래프이다. 본 연구에서는 응고개시에서부터 수조에 수냉하는 고상온도까지를 국부응고시간으로 간주하였다. 냉각속도가 증가하여 국부응고시간이 짧아지면 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자는 미세화됨을 알 수 있었다. 즉 Fig. 7에서 나타낸 것과

같이 Rheocasting을 위한 전자교반응고시 반응고 Slurry 고상입자의 크기는 냉각속도 -1/3승에 비례하여 작아진다는 보고와 일치하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 본 연구에서 얻어진 AZ91D 합금의 전자교반된 반응고 Slurry의 거시조직사진이다. 교반하지 않은 경우 Fig. 9(a)에서 크고 굵은 조직과 중앙부에 수축공을 관찰할 수 있었다. Rheocasting



(a) As-cast



(b) Electromagnetic Stirring

Fig. 8. Macrostructure of no stirring and electromagnetic stirring AZ91D Mg alloy. (cooling rate=0.12°C/s ; fs 0.4; 10 Hz)

을 위해 전자교반된 AZ91D합금의 반응고 Slurry 시편인 Fig. 9(b)의 경우 크고 조대한 조직은 보이지 않고 작고 미세한 조직을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] W. Kurz and D. J. Fisher, Fundamentals of Solidification, Trans Tech Publication, Aedermannsdorf, Switzerland, (1984).
- [2] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young, Mat. Sci. Eng., 25 (1976) 103.
- [3] M. H. Rovert, "Partial Melting as Efficient Method to produce Rheocast Alloy Slurries" (1993) 45.
- [4] M. C. Flemings, Met. Trans., 22A (1987) 957.
- [5] P. J. Ward, H. V. Atkinson, D. H. Kirkwood and G. Starr : Proc. of 4nd Int'l Conf. of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites (1996) 270.
- [6] E. J. Zoqui, M. T. Shehata, M. Paes, V. Kao, E. Es-Sadiqi ; Morphological evolution of SSM A356 during partial remelting ; Materials Science and Engineering A325 (2002) 38-53.
- [7] T. Z. Kattamis, J. C. Coughlin and M. C. Flemings, Trans. Met. Soc. AIME, 239.
- [8] T. F. Bower, H. D. Bordy and M. C. Flemings, Trans. Met. Soc. AIME, 236.
- [9] I. A. Sekhar, M. Mohan, C. Divakar and A. K. Singh, Scripta Metall 18.
- [10] M. Tsunoi, N. Kawada and Yasuo Fujikawa, Tec. Rev. 10 (1979) 202.
- [11] P. W. Wilson, T. Z. Kattamis and Y. Shiohara, J. of Mat. Sci. 23 (1988) 2882.
- [12] D. B. Spencer, Ph. D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, (1971).
- [13] S. B. Brown and M. C. Flemings, Adv. Mat. & Proc. (1993) 36
- [14] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young : Mater Sci. & Eng., "Rheocasting", 25(1976) 103-117.