논 문

전자교반에 의한 Cu-0.15wt%Zr 합금의 반응고 조직제어에 관한 연구

임성철† · 이흥복 · 김경훈 · 권혁천 · 윤의박 *

한국생산기술연구원
*한양대학교 재료공학과

The Effect of Electromagnetic Stirring on the Semi-Solid Microstructure of Cu-0.15wt%Zr Alloy

Sung-Chul Lim†, Heung-Bok Lee, Kyung-Hoon Kim, Hyuk-Chon Kwon, and Eui-Pak Yoon*

Korea Institute of Industrial Technology 994-32, Dongchun-dong, Yeonsu-Gu, Incheon 406-800, Korea
*Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul, 133-791, Korea

Abstract

Most of the work reported concerned the semi-solid processing of low melting point alloys, and in particular light alloys of aluminum and magnesium. The purpose of this paper is to develop a semi-solid microstructure of Cu alloys using electromagnetic stirring applicable for squirrel cage rotor of induction motor. The size of primary solid particle and the degree of sphericity as a function of the variation in cooling rate, stirring speed, and holding time were observed. By applying electromagnetic stirring, primary solid particles became finer and rounder relative to as-cast sample. As the input frequency increased from 30 to 40 Hz, particle size decreased. The size of primary solid particle was found to be decreased with increasing cooling rate. Also, it decreased with stirring up to 3 minutes but increased above that point. The degree of sphericity became closer to be 1 with hold time. Semi-solid microstructure of Cu alloys, one of the high melting point alloys, could be controlled by electromagnetic stirring.

Keywords: High melting point alloys, Cu alloys, Electromagnetic stirring.

(Received December 10, 2005; Accepted February 15, 2006)

1. 서 론

Semi-solid Processing[1-5]으로 통칭되는 반고상주조 또는 고액공존 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. 반고상주조는 종래의 가공법, 즉 완전 고체상태를 취급하는 소성가공 또는 완전 액체상태에서의 주조가공과는 달리 고액공존영역에서 금속 Slurry의 Rheology 및 Thixotropic특성을 이용하는 주조법으로, 현재는 Rheology 등 기초물성에 주로 응용되는 반응고주조와 Al을 중심으로 실용화되어 있는 반용융주조(Thixocasting)로 대별될 수 있다. 즉, Rheocasting에 관한 연구는 냉각 중 여러 변화에 따른 고상의 파괴, 성장, 조대화에 대한 규명 및 Slurry 유동특성의 규명을 바탕으로, 현재 고액상율 영역에 대하여 Slurry의 유동특성 파악과 더불어 실용화에 주목하고 있다.[6-8]

한편, 전기에너지를 기계에너지로 변환시켜주는 유도전동기의 효율에 큰 영향을 미치는 로터는 현재 Al 및 Cu합금이 적용되고 있다. Al합금은 소재의 가격이 저렴하고, 복잡한 형상을 제조하기가 용이하며, 용융가공 시 금형의 수명이 비교적 길어 중소형 로터에 이용되고 있으나 인장강도가 좋지 못하고 높은 열팽창계수를 가지는 단점을 가지고 있다. 반면 동합금은 인장강도가 Al합금에 비해 약 300% 이상 높아 큰 원심력에 대한 저항이 크고 열팽창계수가 28% 정도 낮아 열팽창 및 수축에 따른 피로파괴에 저항성이 크다. 따라서 전동기 로터의 효율을 증대시키고 에너지 손실을 감소시킬 수 있으며, 내구성 및 성능이 우수한 전동기의 제조를 위하여, Al합금으로 이루어진 중·소형 로터를 동합금으로 대체하는 것이 요구되고 있다. 그러나 동합금은 고융점금속으로 취급이 용이하지 못하고 조성의 변화를 초래하는 등의 문제로 부분적인 연구만 행하여져 왔다. 또한 고온의 용탕에 견딜 수 있는 다이수명(Die Life)이 해결되지 않아서 현장으로의 실제적인 적용은 어려운 상황에 있는 실정이다. 이러한 어려운 문제점들을 해결하기 위해서 종래의 가공법인 완전 고체상태를 취급하는 소성가공이나 완전 액체상태에서 행하는 주조가공과는 달리 고액공존상태에서 주조 가공하여 정밀단조 및 2차 기계가공 없이 최종제품의 제조가 가능한 반응고주조의 적용이 행하여지고 있다. 이와 같이 반응고주조기술에 의해 일반적인 다이캐스팅시의 온도 보다 낮은 온도

†E-mail : lsc2001@kitech.re.kr

에서 주조를 행함으로써 고융점 금속인 동합금의 가압공정시의 다이에 가해지는 열충격을 완화시키고 다이수명을 향상시키는 것이 가능할 것으로 예상되어진다. 나아가 반응고주조의 경우 전통적인 주조방법에 의해 제조된 주물보다 더 얇고 복잡한 Al 다이캐스팅제품과 같은 형상의 제품을 제조하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 고액공존영역이 넓고 온도가 낮은 영역의 조성을 갖는 동합금을 이용하여 Rheocasting을 위한 Slurry를 제조하기 위해 전자교반시 미세조직에 미치는 냉각속도의 영향과 교반속도, 교반유지시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰하여 Semi-Solid온도 구역에서의 다양한 교반의 변화를 통해 초정입자크기 및 분포상태, 구형화정도를 고찰하였다.

2. 실험 방법

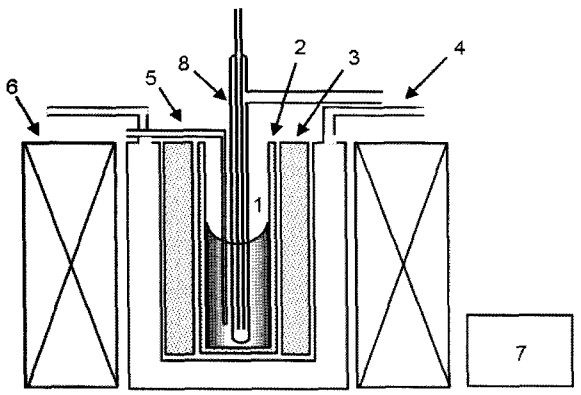
2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 전자기 교반장치는 Fig. 1에서 회전자계를 발생시키는 교반자와 스테인리스(Stainless) 도가니로 이루어져 있으며, 교반자로의 열흐름을 방지하기 위해 교반자 안쪽에 수냉장치를 설치하였고 공기, 수냉에 의한 강제냉각을 위해 직접 제작한 스테인리스 Cooling System을 사용하였다.

2.2 교반실험

Cu-0.15wt%Zr 동합금 500 g를 전기로에서 용해한 후, 1150°C로 과열처리하여 1100°C까지 유지하여 이 온도에서 전기로로부터 꺼내어 전자기 교반장치에 넣고 교반을 실시하였다. 교반조건으로는 냉각속도를 달리하기 위하여 자연냉각, 공기에 의한 강제냉각, 수냉 등으로 나누어 실험을 행하고, 고상율과 교반력(Hz)을 각각 0.4~0.5, 30~40 Hz로 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 고상율(fs)은 다음과 같이 Scheil Equation에 의해 예측을 하였다.

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



1.melt 2. crucible 3. furnace 4. cooling jacket 5. thermocouple
6. induction motor 7. transformer 8. cooling system

Fig. 1. Schematic diagram of E. M. S. apparatus.

여기서, T_M은 순금속 용융온도, T_L은 모합금의 액상선 온도, k는 평형분배계수이다. 용탕을 계속 교반을 하면서 냉각시키고 Scheil equation으로 얻은 고상율에 해당하는 온도에 이르렀을 때, 수조에 급랭 후 조직을 관찰하였다.

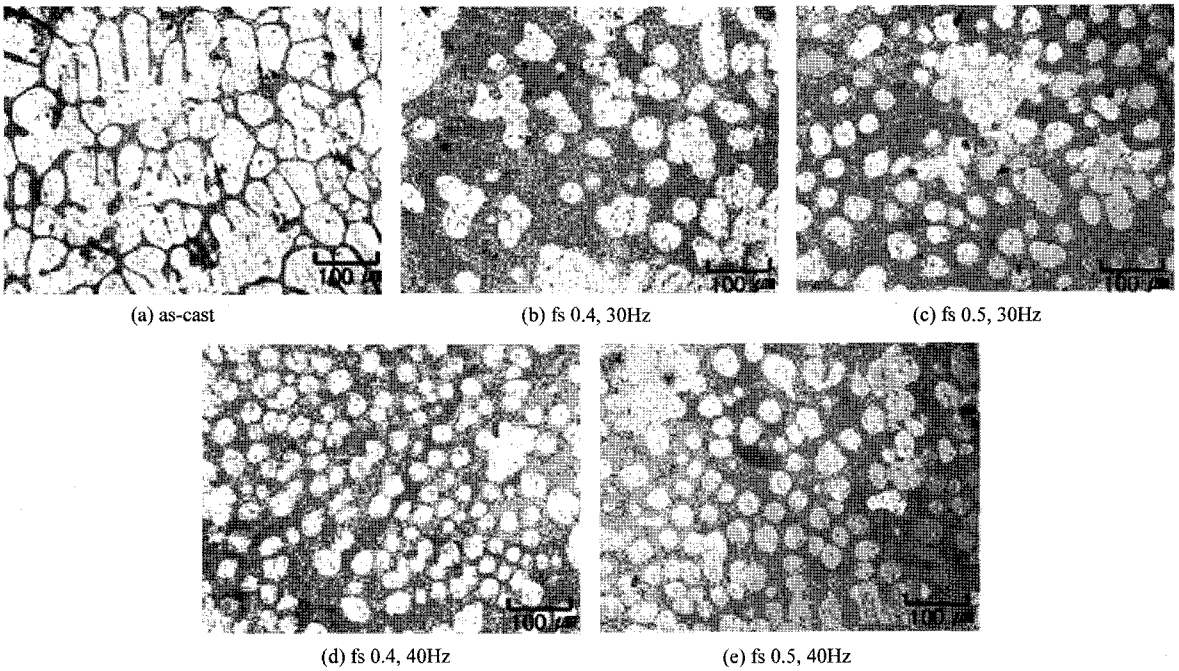
2.3 조직관찰

미세조직의 변화를 관찰하기 위하여 교반에 의해 제조된 시편을 하단부로부터 25 mm 되는 높이에서 횡단방향으로 절단한 후 Mounting하여 미세 연마하여 관찰하였다. 초정고상입자를 관찰하기 위해 Klemm's reagent를 사용하여 부식(Etching)한 후 광학현미경을 사용하여 조직변화 과정을 관찰하였다. 또한, 각 교반조건에 따른 조직에서의 고상율과 고상입자의 크기, 구상화 정도를 알아보기 위하여 화상분석기(Image Analyzer)를 사용하여 측정하였으며, 측정방법은 각각의 시편조직을 3회 이상 광학현미경으로 촬영한 후 각 조직 사진에서 5회 이상 무작위로 측정하였다. 입자의 평균크기는 각 입자의 면적을 측정하여 원으로 환산한 후, 원의 직경을 구하여 평균값을 취하였다. 또한, 단축과 장축의 길이를 측정한 다음, (장축/단축)값을 구하여 구상화 정도(Degree of Sphericity)를 알아보았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 교반세기에 따른 반응고 Slurry 고상입자의 유동특성 고찰

Fig. 2는 Cu-0.15wt%Zr 동합금 반응고 Slurry 고상입자의 교반세기에 의한 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. 전자교반에 의해 수지상조직이 파괴되고 구상의 미세한 조직, 혹은 장미꽃 형상의 비수지상으로 변화하였다. 또한, 교반세기 30 Hz, 고상율 0.4~0.5의 동합금 반응고 Slurry 고상입자보다 40 Hz, 고상율 0.4~0.5에서 더욱더 미세하고 구상의 고상입자를 얻을 수 있었다. Cu-0.15wt%Zr 동합금의 교반세기에 의한 미세조직으로 이미지분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 교반세기가 증가하면서 Cu-0.15wt%Zr 동합금 반응고 Slurry의 크기는 작아지고 고상율이 0.4에서 0.5로 변화하면서 증가함을 알 수 있었고 교반세기 40 Hz, 고상율 0.4, 냉각속도 0.7°C/s에서 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자의 크기는 40 μm이었다. Flemings[4]에 따르면 입자의 구상화는 입자들 간의 마멸과 조대화의 결과로 점진적으로 나타나고 또 고상입자는 다른 것과 완전히 독립되어 존재하는 것이 아니라 응집되어 존재하며 이 응집의 정도는 전단변형속도와 전단변형이 가해지는 시간에 의존한다고 보고하였다. Tsao[11] 등에 따르면 교반효과에 의해 고상입자의 파괴와 용질확산 증가에 의한 입자들의 조대화가 동시에 일어나며, 이에 따라 입자의 크기와 형태가 영향을 받는다고 제안하였다. 즉, 높은 전단변형속도에서는 입자 소결이나 조대화 기구에 비해 파괴기구가 우세하여 입자의 크기는 작아지고, 입자가 구형화되는 구동력은 입자와 액상간의 계면에너지이며, 또한 입자들간의 전단변형과 충돌에 의한 마멸 효과 등에 의해서도 고상입자들이 구상화된다고 제안하였다. 또 교반에 의해 촉진되는 용질확산의 영향과 Gibbs-Thomson Effect에 의해 작은 입자에서 큰 입자로 용질



(a) as-cast (b) fs 0.4, 30Hz (c) fs 0.5, 30Hz

(d) fs 0.4, 40Hz (e) fs 0.5, 40Hz

Fig. 2. Microstructures of the Cu-0.15wt%Zr alloy with the various solid fraction. (cooling rate=0.7°C/s; Hz=30~40; fs=0.4 ~0.5)

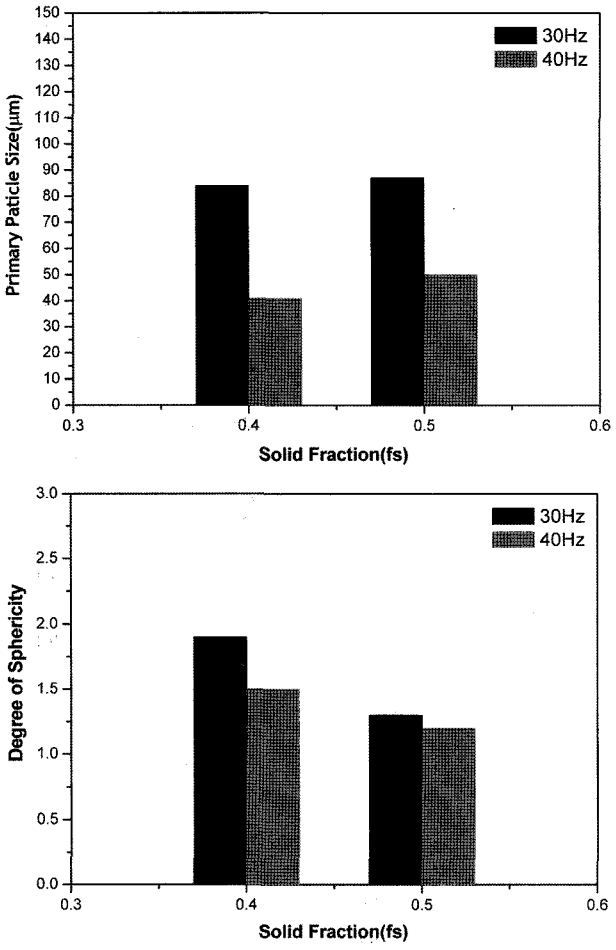


Fig. 3. Variation of average size of primary particle and degree of sphericity with the various Hz. (Cooling rate=0.7°C/s, Hz=30~40, fs=0.4~0.5)

이 확산하여 조대화 되어 입자크기가 커진다고 보고하였다. 즉, 주어진 고상율에서 빠른 냉각속도는 작은 입자를 만들며, 큰 전단변형속도에서는 작고 좀더 구상화된 고상입자들을 형성하게 된다. 또한 일정 고상율에서 구상화된 고상입자들은 수지상에 비하여 그 크기가 비교적 균일하고, 고상율이 높아짐에 따라 입자간 간격이 작아지며, 교반시간이 증가함에 따라 고상입자들은 조대화 현상에 의해 그 크기가 증가하고 더욱 매끄러운 입자표면이 얻어진다고 보고하였다. 위의 Flemings와 Tsao등의 연구에 의해 본 연구에서는 교반세기가 증가하면서 Cu-0.15wt%Zr 동합금 반응고 Slurry 고상입자의 크기는 작아지고 고상율이 0.4에서 0.5로 변화하면서 입자의 크기가 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 교반유지시간에 의한 반응고 Slurry 고상입자의 구형화

Fig. 4는 교반세기 40 Hz, 냉각속도 0.7°C/s, 고상율 0.5 되는 온도에서 교반유지시간 1~5 min의 시간변화에 의한 반응고 Slurry 고상입자의 미세조직 변화를 나타낸다. 교반유지시간이 경과하면서 1 min이었을 때 고상입자의 수지상 조직이 파괴되고 3 min이 되면서 구상의 미세한 조직으로 변화하면서 5 min일 때 구상의 입자가 응집되어 고상입자가 커져가는 것을 알 수 있었다. 교반유지시간이 증가함에 따라 고상입자의 크기는 조대화 되고 구형화정도는 향상되어 구형에 가까운 입자 형태를 얻을 수 있었다. 또한, 교반유지시간이 3 min이 지나면서 다시 고상입자들이 합체되는 현상이 일어났으며 합체되는 입자들 사이에 액상이 포획되는 현상이 나타났다. 이것은 초정입자의 구상화는 입자들 간의 마멸과 조대화의 결과로 점진적으로 나타나고 또 고상입자는 다른 것과 완전히 독립되어 존재하는 것이 아니라 응집되어 존재하며 이 응집의 정도는 전단변형속도와 전단변형이 가해지는 시간에 의존한다는

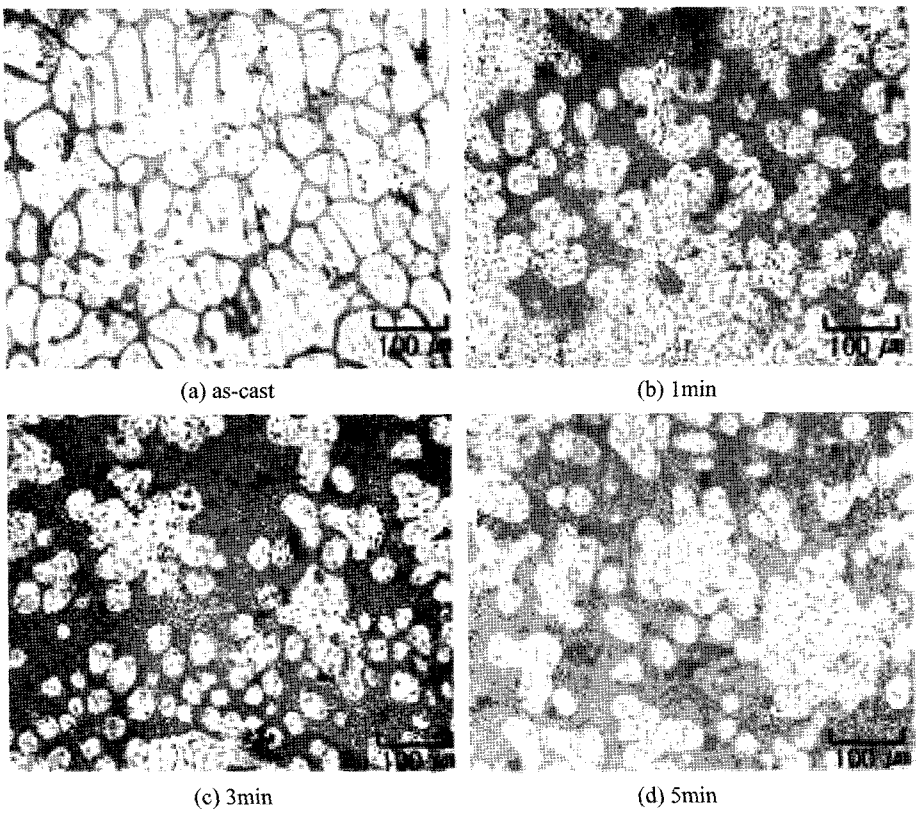


Fig. 4. Microstructure of the Cu-0.15wt%Zr stirred to various holding time. (Cooling rate=0.7°C/s, Hz=40, fs=0.5)

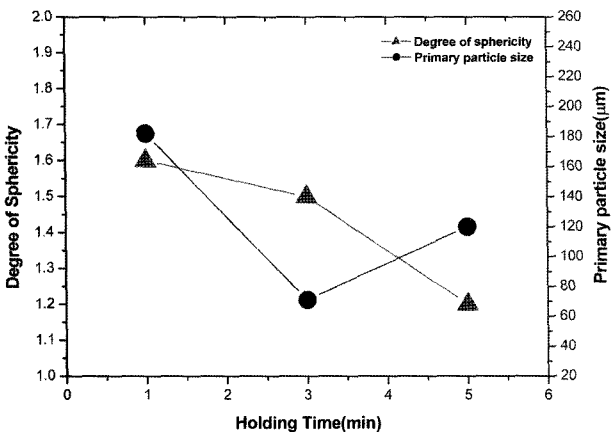


Fig. 5. Variation of average size of primary particle and degree of sphericity with the various holding time. (Cooling rate= 0.7°C/s, Hz=40, fs=0.5)

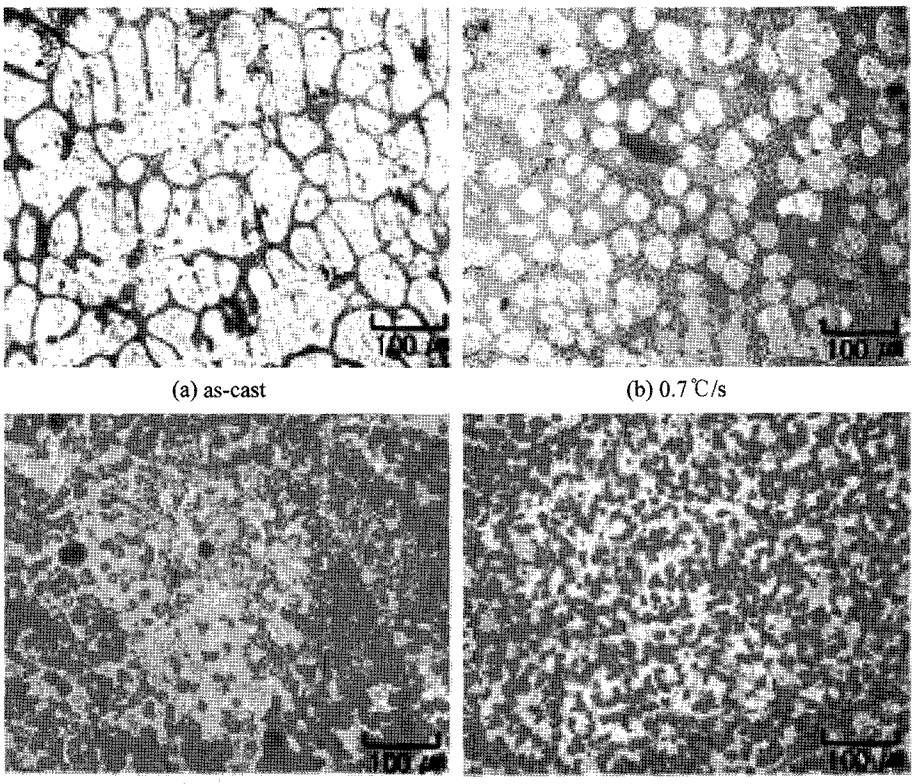
Flemings 등의 보고와 같은 경향을 나타내었다. Fig. 5는 이미지분석의 결과로 반고상 Slurry 고상입자의 구형화정도는 1.6에서 1.3으로 향상되고 고상입자의 크기는 1 min일 때 180 μm, 3 min일 때 70 μm이었으며, 5 min이 되면서 120 μm이었다. 이 같은 결과는 교반유지시간이 증가함에 따라 수지상의 고상입자가 파괴되어 다소 구상의 미세한 입자가 되었다가 다시 응집되어 커져가는 현상으로 Flemings 등의 보고와 같은 경향을 나타내었다. 즉, 낮은 냉각속도에서는 교반세기(Hz)와 유지시간이 증가할수록 구형화 되고 입자간 합체에 의한 조대화현상을 보여주고 있다.

3.3 냉각속도에 따른 반응고 Slurry 고상입자의 조직미세화

Fig. 6은 교반세기 40 Hz, 고상율 0.5에서 냉각속도에 따른 반응고 Slurry 고상입자의 미세조직변화를 나타낸다. 냉각속도를 0.7, 2.8, 3.7°C/s로 변화하여 고상율이 0.5가 되는 온도에서 수조에 급랭하였다. Fig. 6의 (a)는 전자교반을 하지 않은 미세조직으로 전형적인 수지상 조직의 형상을 나타내고 있다. 냉각속도가 증가할수록 (0.7→3.7°C/s) 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자는 매우 미세한 조직으로 변화하였다. Fig. 7은 냉각속도의 변화에 따른 이미지분석 결과를 이용하여 국부응고시간(local solidification time)에 따른 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자의 크기 변화를 나타낸 그래프이다. 본 연구에서는 응고개시에서부터 수조에 수냉하는 고상율 온도까지를 국부응고시간으로 간주하였다. 냉각속도가 증가하여 국부응고시간이 짧아지면 전자교반된 반응고 Slurry 고상입자는 미세화됨을 알 수 있었다. 즉, Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 Rheocasting을 위한 전자교반 응고 시 반응고 Slurry 고상입자의 크기는 냉각속도 -1/3승에 비례하여 작아진다는 보고와 일치하는 경향이 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

반응고주조를 위한 동합금 Slurry를 제조하기 위해 전자교반에 의한 동합금의 고상입자크기와 구형화정도를 제어하는 냉각



(a) as-cast　　(b) 0.7℃/s

(c) 2.8℃/s　　(d) 3.7℃/s

Fig. 5. Variation of average size of primary particle and degree of sphericity with the various holding time. (Cooling rate=0.7°C/s, Hz=40, fs=0.5)

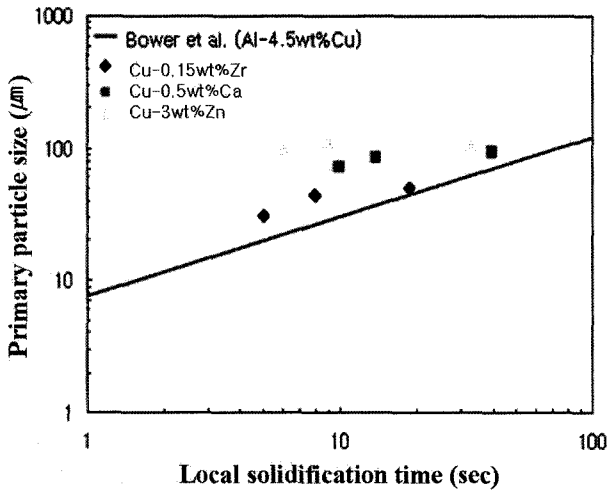


Fig. 7. Variation of secondary arm spacing(Primary particle size) as a function of local solidification time for Cu-0.15wt%Zr, Cu-0.5wt%Ca, Cu-3wt%Zn alloys and Al-4.5wt%Cu.

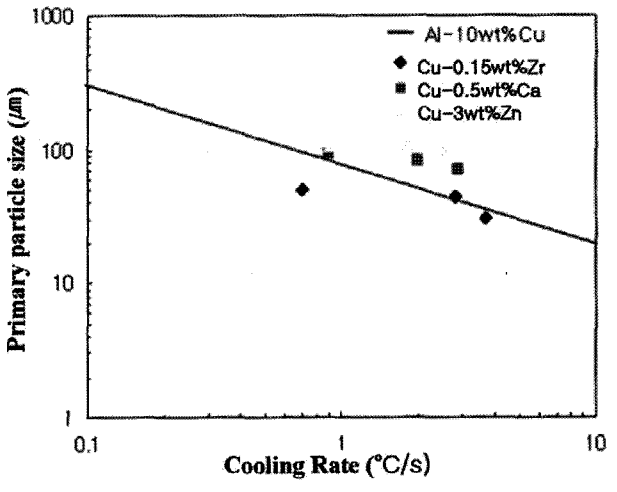


Fig. 8. Relation between cooling rate and the size of primary particle.

속도, 교반세기, 유지시간의 변화를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전자교반시 동합금 Slurry에 미치는 용탕유동의 영향을 알아보기 위해 냉각속도 0.7°C/s, 고상율 0.4~0.5, 교반세기를 30~40 Hz로 변화시킨 결과, 고상율이 증가함에 따라서 동합금 Slurry 고상입자의 크기는 41~50 μm로 증가하였으며, 이미지분석 결과 구형화정도는 고상율이 증가할수록 향상되었음을 알 수 있었다.

2) 교반유지시간이 따른 동합금 Slurry 고상입자의 변화를 관찰한 결과, 교반유지시간이 1 min에서 3 min까지 증가함에 따라 고상입자는 미세화되며 구형화정도는 향상되어 구형에 가까운 입자형태를 얻었다. 하지만 교반유지시간이 5 min이 되면서 미세화되었던 고상입자들이 응집되어 커져가는 현상이 나타났다.

3) 냉각속도가 0.7°C/s, 고상율 0.5되는 온도까지 전자교반

응고시킬 경우 고상입자의 평균크기는 50 μm이었으며, 냉각속도가 3.7°C/s에서 그 평균크기는 31 μm이었다. 구상화정도는 냉각속도와 고상율에 따라 크게 변화가 없는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] R. T. Southin : "J. of the Inst. of Metals", 94 (1966) 401.

[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 and 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] M. Tsunoi, N. Kawada and Yasuo Fujikawa : "Tec. Rev.", 10 (1979) 202.

[10] P. W. Wilson, T. Z. Kattamis and Y. Shiohara : "J. of Mat. Sci.", 23 (1988) 2882.

[11] Y. S. Yang and C. Y.A. Tsao: "Scripta Metall", 30 (1994) 1541.

[12] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young : Mater Sci. & Eng., "Rheocasting", 25 (1976) 103-117.