

논문

# 반고상 A356 합금 슬러리의 미세조직에 따른 유동특성에 관한 연구

김재민<sup>†</sup> · 이승훈 · 홍준표

연세대학교 금속시스템공학과 재료공정 모델링 연구실

## Effects of Microstructure Morphology on Fluid Flow Characteristics of A356 Commercial Alloy in Semi-Solid Slurry

Jae Min Kim<sup>†</sup>, Seung Hoon Lee, and C. P. Hong

Center for Computer-Aided Solidification Processing(CASP), Dept. of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Shinchon-dong 134, Seodaemun-ku, Seoul, Korea

### Abstract

The rheocasting characteristics are strongly influenced by the microstructural morphology such as particle size, form factor and contiguity. In this study, the effect of structural morphology on fluid flow characteristics of A356 semi-solid alloy was investigated with a vacuum suction fluidity test. Semi-solid metal slurry was made by the mechanical stirring, the liquidus casting, and H-NCM to be analysed. H-NCM could obtain uniform and fine globular microstructures of 0.9 form factor and 55 μm particle size. Inoculation was found to be effective for reducing particle size, however, for H-NCM it should be avoided due to the cause of increasing contiguity. The fluidity test indicated that the non-stirring method had higher fluidity and smaller liquid segregation in the same solid fraction of 0.4 than the stirring method, for smaller particle size and higher form factor. It was observed that liquid segregation decreased as the particle size is smaller and form factor is higher. The results of die-casting experiment were a good agreement with those of fluidity test.

**Key words :** Semi-Solid process, H-NCM, Globular structure, Inoculation, Vacuum suction test, Die-casting, Liquid segregation.

(Received October 17, 2005 ; Accepted December 21, 2005)

### 1. 서 론

현재 환경문제 해결을 위한 재료의 경량화는 전 세계적인 추세이며, 철계의 경량화나 이를 대체할 수 있는 경량합금의 개발이 시급히 요구되고 있다. Al, Mg 합금과 같은 경량재료로 대체하기 위해 요구되는 특징은 철계를 대신할만한 기계적 성질, 생산성, 제조단가 등을 들 수 있는데 이를 위한 연구는 신 제조기술의 개발과 신 경량합금의 개발로 나누어져 진행되고 있다. 알루미늄 합금의 경우 1970년대 Flemings 교수 등에 의해 기계적 교반을 이용한 반응용, 반응고 가공법이 소개된 이후, 단조품의 기계적 성질에 대응할 수 있는 최적의 기술로 평가되었으며 기계적 혹은 전자기적 교반이나, 응력, 핵생성을 이용한 방법 등으로 발전되어 왔다[1,2]. 반응용 가공의 billet 제조를 위한 장치와 재가열 등에 의한 생산비 증가 때문에 최근에는 billet 제도가 필요없는 반응고가공에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 특히 H-NCM 방법은 빠른 냉각, 다량의 핵생성을 이용하여 가장 경제적이며 간단한 방법으로 주목받고 있다.

지금까지의 연구들은 주로 슬러리와 유동 특성의 상호관계보다는 각각의 특성을 분리하여 이에 관련된 rheology와 thixotropy에 관하여 분석하여왔다. 즉, Suery 등은 반응용상태의 Sn-15%Pb 합금의 변형거동을 연구, Modigel과 Koke는 shear rate와 고상율에 따른 shear stress와 점성변화를 측정[3-5], Kumar, Perez, Brbazon 등은 반응용 재료의 유동거동 및 변형거동 분포를 입자들의 상호작용과 관련지어 수학적 모델로 제시하였다[6-8]. 또한, Alexandrou 등은 반고상 슬러리의 점성에 따른 유동패턴을 구분지어 민감한 유동변수에 의한 유동의 불안정성을 제시하였으며[9], 반고상 합금 변형 시 액상의 서로 다른 변형으로 인한 분리현상에 대해 Suery와 Zavaliangos 등은 Darcy's law로 변형에 의한 부피변화를 고상과 액상의 이동으로 설명하였다[10-12]. 그러나 이들 연구는 일정온도에서 온도를 유지한 후 rheometer를 사용하여 shear rate, 고상율, 냉각속도에 따른 반고상 합금의 점성변화에 대한 실험 값이므로 이들 점성값을 실제 공정에 적용하기 어렵다. 또한, 이들 연구가 모두 기계적 교반법을 이용한 경우의 슬러리 제조변수에 따른 유동특성이므로 liquidus casting, H-NCM 등 현재

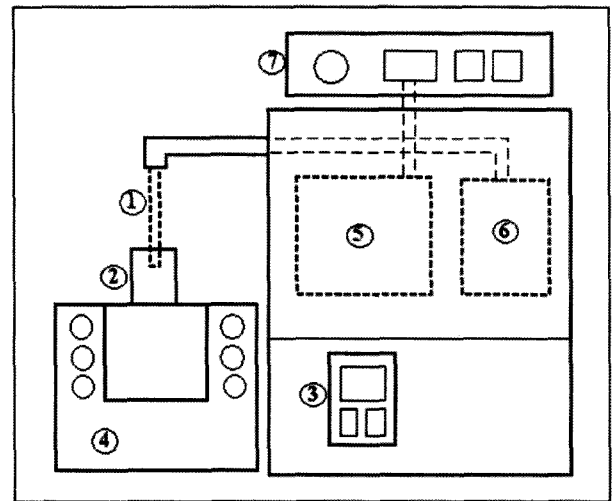
<sup>†</sup>E-mail : kimjm@yonsei.ac.kr

많이 쓰이는 무교반 반응고 법에서의 슬러리 특성 분석에 적용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 반고상 합금 슬러리의 유동특성에 영향을 주는 요인을 분석하기 위한 일반화된 연구가 필요하며 실제 주조시와 같이 연속적으로 고상율이 변화하는 상황에서의 슬러리 특성의 분석이 연구되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 실구조 적용에 가장 많이 연구되고 있는 세 가지 반응고 슬러리 제조방법을 이용하여 연속적으로 고상율이 변화할 때, 반고상 슬러리 합금 제조 방법과 제조 변수가 반고상 슬러리 조성의 형성기구 및 유동 양상에 미치는 영향을 분석하고, 잔류액상의 2차 응고 시 액상편석에 대한 형성 원인 및 개선방향을 규명하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

슬러리 제조방법에 따른 반고상 슬러리 미세조직 및 유동특성을 관찰하기 위해서 상용합금인 A356 합금을 사용하였다. 슬러리 제조용 몰드는 내경  $\phi$  50 mm, 높이 70 mm의 stainless steel을 사용하였으며, BN 이형제로 코팅하였다. 합금을 전기저항로에서 700°C로 가열하여 용해한 후 PDI controller로 15 분간 유지시켜, 몰드 전체의 온도를 균일하게 유지하였다. 단열재인 Kao-wool을 이용하여 바닥면과 벽면을 단열시킨 몰드는 다른 전기저항로에서 600°C로 예열하였다. 용탕 및 슬러리의 정확한 온도와 고상율, 냉각속도를 측정하기 위한 열전대는 500~800°C에서  $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 의 정확도를 지닌 K-type CA를 사용하였다. 또한 열전대로부터 온도를 실시간으로 기록하기 위해 디지털 온도측정계(NIP, DT9802-EC-ISO)를 이용하여 온도 profile 및 냉각속도를 측정하였다. 반고상 슬러리 제조방법은 현재 가장 많이 쓰이고 있는 rheocasting 슬러리 제조방법인 기계적 교반법, liquidus casting, H-NCM법에 의해 슬러리를 제조하였다. 제조된 반고상 슬러리는 원하는 고상율에서 각각 켄칭하여, 흡입 유동도 시험을 시행하여 각 제조방법에 따른 미세조직과 유동특성을 분석하였다. 본 연구에서는 유동도의 측정을 위해 진공압 흡입 유동시험(vacuum suction fluidity test)법을 이용하였으며, 장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 진공 유지 챔버에 rotary vacuum pump를 사용, 목표 흡입압력까지 pumping하였으며, 디지털 압력 센서를 이용하여 흡입압력을 조절하였다. 유동도 측정 tube는 내경  $\phi$  1, 2, 4 mm, 길이 30 cm의 quartz tube를 사용하였으며, 건조로에서 수분을 완전히 제거한 후 사용하였다. 용해는 전기저항로에서 흑연도가니를 사용하여 용해하였으며, 유동도의 측정은 실험조건별 용탕 및 반고상 슬러리를 준비하여 용탕 속 10 mm의 깊이로 tube를 침적하여 흡입하였다. 반응고 슬러리를 흡입할 경우, 몰드 벽면부터 냉각이 진행되어 유동도에 불균일한 값을 나타내므로, 몰드 중앙에 열전대를 사용하여 온도를 측정하고 중앙부위에 tube를 통해 흡입하였다. 이 때 흡입압력은 80 mmHg (10.67 KPa)을 유지하였고, 진공압 유지시간은 120 ms로 하였다. 유동도 측정에서 사용되는 quartz tube가 예열되는 것을 방지하기 위해서 흡입 바로 직전에 tube를 설치하여 시험을 진행하였고, 실험의 재현성을 위해 최소 3회 이상 반복하였다. 여러 제조변수에 의해 제조된 반고상 슬러리, 용탕, 유동도 시



- ① Quartz tube
- ② Mold(stainless steel)
- ③ Control box
- ④ Electric resistance furnace
- ⑤ Vacuum chamber
- ⑥ Rotary pump
- ⑦ Manometer

Fig. 1. A schematic drawing of vacuum suction fluidity test apparatus.

험 시편을 유동도 조건에 따라 절단한 후, 마운팅(mounting) 하였다. 슬러리는 시편 상부에서 3분에 1지점을 절단하여 관찰하였다. 연마된 시편은 Keller solution 으로 30초~1분 동안 에칭하였고, 에칭한 시편은 Image analyzer(LEICA, Q500MC)를 이용하여 50배율로 미세조직을 관찰하였다.

반고상 합금 슬러리에서 미세조직의 성장, rheological 거동을 조절하는데 중요한 고상율은 온도의 함수로서 정확한 측정이 필요하다. 고상율을 측정하는 방법은 열역학 데이터 이용법과 DSC를 이용한 열분석 기술, Image analyzer를 사용한 미세조직의 정량적 분석법, ThermoCalc를 이용한 열역학적 분석 등이 있다. DSC를 이용한 측정법은 dilute 합금을 제외하면 국부적 측정에 의한 오차 가능성이 높고 일반 공정보다 느린 온도변화에 의한 측정이므로 본 실험에서는 사용하지 않았으며, 실험의 특성상 정해진 고상율에서 유동도 및 유동특성 시험을 해야 하므로, ThermoCalc의 열역학적 계산에 의해서 얻어진 data와 Scheil 식을 이용하여 설정하였으며, Image analyzer를 통해 확인하였다.

3차원 미세조직구조는 보통 2차원으로 측정될 수 있는데, Image analyzing system을 이용하여 입자수, 계면길이, 입자의 면적 등을 구할 수 있다. 여러 제조방법과 주조변수에 의해 만들어진 반고상 합금 슬러리의 미세조직 사진을 form factor, contiguity, aspect ratio, 입자 크기 등으로 분석하였다. 수지상의 입자를 2차원으로 관찰할 경우, 가지의 일부분만 나타나 구상입자처럼 보이는 경우가 있으므로, 미세조직의 정확한 분석을 위하여 한 시편에서 3개 이상의 미세조직 사진을 선택하여 평균값을 구하였다.

미세조직의 morphology를 정량화 하는 방법 중, 구상화 정도를 측정하는 방법으로 다음 식 (1)과 같이 form factor, F를 이용하였다.

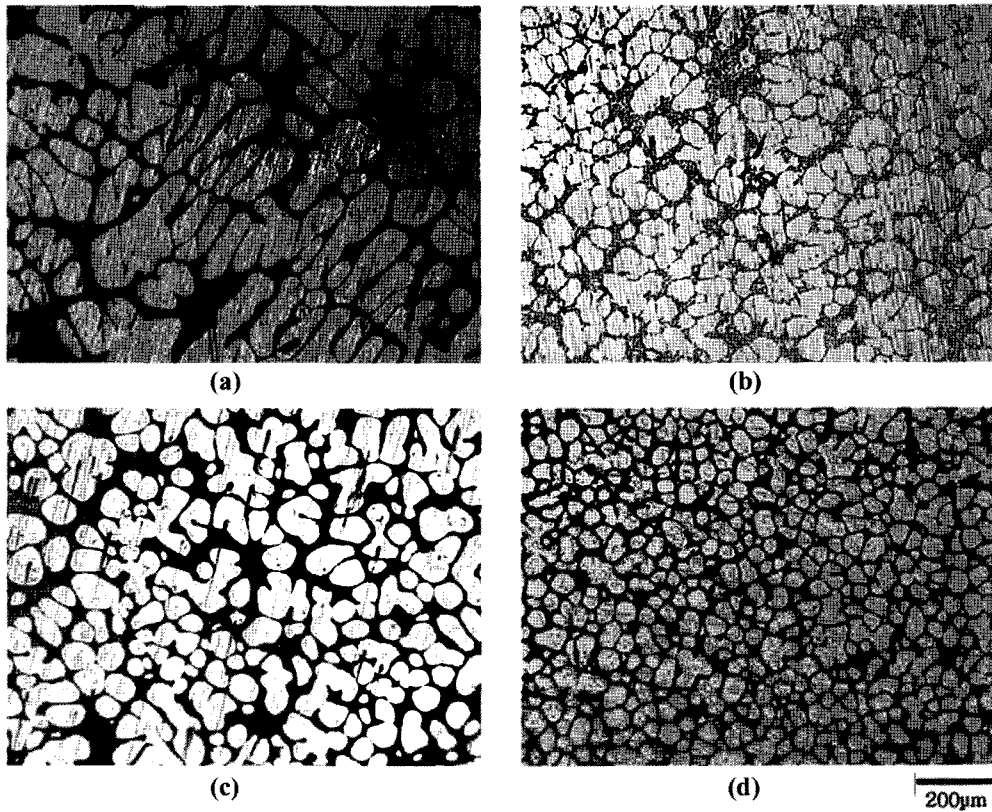


Fig. 2. The microstructures of A356 alloy for a variety of types of semi-solid feedstock: (a) Conventional casting slurry, (b) Mechanical stirring, (c) Liquidus casting, and (d) H-NCM.

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (1)$$

여기서  $A$ 와  $P$ 는 각각 고상입자의 면적과 둘레길이를 나타낸다.  $F=1$  일 때, 슬러리의 고상입자는 완벽한 구형화가 이루어졌다고 하며,  $F$ 가 0에 가까울수록 매우 복잡한 수지상 형태임을 의미한다.

각 슬러리의 고상율을 고정시킨 후, 고상입자의 분포도를 분석하였다. 고상입자 분포도를 측정하는 방법 중, Uggowitzer 등에 의해 응용된 3차원 공간적 변수(contiguity volume),  $f_{sc}$ 를 구하는 방법을 사용하였다[17,18].

$$f_{sc} = C_s f_s \quad (2)$$

여기서  $C_s$ 는 고상의 접촉도(contiguity) 이다.

Gurland에 의해 정의된 이 측정법은 같은 상에 의해 공유된 총 면적의 분율을 구하는 방법으로,  $\beta$ -기지에  $\alpha$ -입자가 존재하는 구조의 경우, 입자의 접촉도(contiguity),  $C_s$ 는 다음과 같이 구한다[19].

$$C_s = \frac{2(S_v)_{\alpha\alpha}}{2(S_v)_{\alpha\alpha} + (S_v)_{\alpha\beta}} \quad (3)$$

여기서  $(S_v)_{\alpha\alpha}$  와 은 각각  $\alpha$ - $\alpha$ ,  $\alpha$ - $\beta$  상의 단위 부피당 접촉된 면적을 의미한다.

이 밖에 고상입자의 면적을 구하여 동일한 면적의 원으로

환산한 뒤 그 원의 지름의 평균값을 구하여 고상입자의 평균 크기를 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 반고상 슬러리의 주요변수에 따른 응고조직특성

현재 반응고 슬러리 제조방법 중 가장 많이 사용되는 기계적 교반법, liquidus casting, H-NCM에 의한 슬러리의 고상율을 0.4에서의 미세조직 사진과 분석 결과를 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 반응고 슬러리는 일반 주조에서 사용되는 액상 슬러리보다 상대적으로 미세하고 구상화된 초정입자를 보인다. Fig. 2(a)와 같이 일반 중력주조에서는 높은 주입온도, 몰드벽면과 중심부의 용탕 간 온도차에 의한 국부적 과열로 인해 생성된 핵들이 재용융되며, 남아있는 핵들이 수지상으로 성장하여 조대화 된다. 이에 반해 Fig. 2(b)의 기계적 교반법은 강력한 교반력에 의해, 응고 초기에 성장하는 수지상 가지의 절단과 가지 root 부분의 재용해로 인해 새로운 핵들이 생성되고 이는 교반으로 인해 용탕 중심부로 이동하게 되는데, 몰드 벽면과 중심부에 용탕간의 온도차가 적기 때문에 고상입자들의 균일한 성장을 도울 수 있다. 그러나 강력한 교반과 빠른 냉각을 통하여 Ostwald ripening 과 coalescence에 의한 조대화를 방지해야 하므로 용탕전체에 균일한 교반을 작용하지 못하는 경우에는 균일한구상화 분포를 갖기 어렵다. 일반적으로 기계적 교반법은 교반기의 용탕 삼입

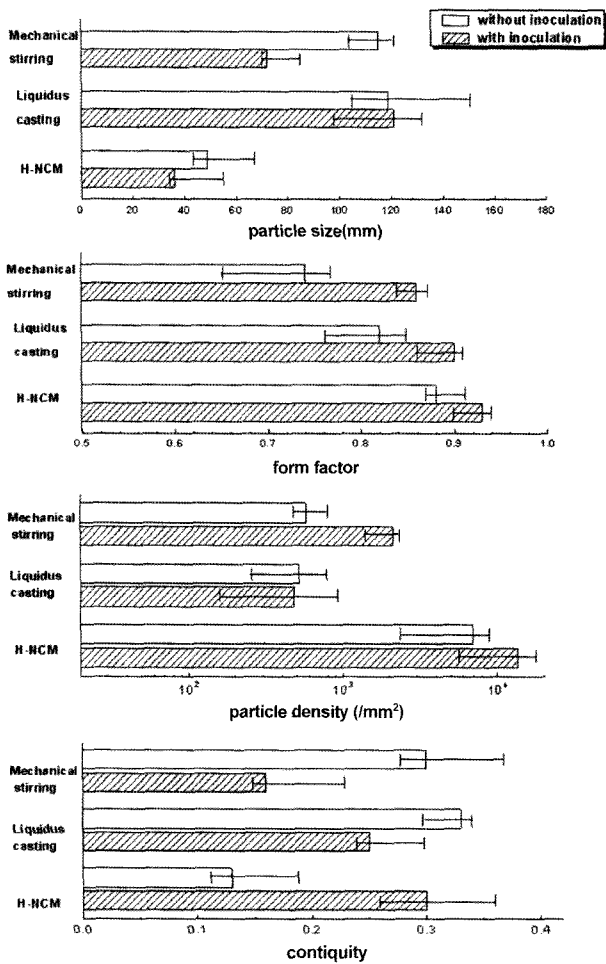


Fig. 3. Quantitative analysis of morphological factors for a variety of types of semi-solid feedstock.

시 교반에서의 과냉에 의한 핵생성과 고액공존구간에서 교반을 통한 입자의 절단과 분리에 의해 미세화시키는 방법이기 때문에 교반의 온도, 냉각속도가 초정형상과 크기를 결정하는 중요한 요인으로 알려져 있다. 그러나 교반자 주변의 강한 교반력을 받는 부분의 입자는 분리 및 변형에 의해 비교적 미세하나, 교반자로부터 떨어진 부분의 초정은 비교적 조대한 장미상을 형성하게 된다. 이러한 불균일한 교반력과 온도구배는 구형으로 성장하기 위한 계면 안정성을 저해하는 요인이 되며, 이러한 불안정성을 줄이기 위해 낮은 냉각속도를 필요로 하게 되지만 이는 용질장에서 입자의 조대화에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 기계적 교반법을 이용한 반고상 슬러리의 경우, 입자미세화제 첨가와 같은 핵생성 밀도를 높이기 위한 방안을 병행하여 인접 결정립과 확산장이 중첩되어 계면 불안정성의 원인이 되는 농도 및 온도구배를 감소시켜 안정한 계면의 구형으로의 성장을 유도하는 것이 필요하다. 무교반법 중 하나인 Liquidus casting법에 의한 반고상 슬러리(Fig. 2(c))의 경우, Fig. 3에서 보는 것과 같이 기계적 교반법보다 비교적 높은 form factor를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 기계적 교반법보다 높은 핵생성 밀도에 의해 미세하고 구상화된 입자를 갖게 되는데, 낮은 주입온도로 인해 용탕 전체에 균일한 핵이 다량

발생하게 되며, 냉각속도가 느리기 때문에 고액 계면이 낮은 온도구배를 통해 느린 고상의 성장속도는 Gibbs-Thomson 효과에 의한 계면 안정성을 이룰 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 용질 배출로 인한 고액 계면 전방의 높은 용질 농도로 인해 과냉이 생겨 핵생성을 유발하게 되고 성장속도를 더욱 떨어뜨리게 된다. 낮은 냉각속도로 인한 균일한 온도장 형성은 입자 성장의 또 다른 구동력으로 작용하여 수지상 성장을 억제하게 된다. 이 경우, 핵의 성장에 있어서 열적과냉 보다 농도나 곡률 과냉에 의한 영향이 더욱 우세한 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3(c)에서 보는 것과 같이 다량의 핵생성에도 불구하고 낮은 냉각속도로 인해 조대화된 경향을 보임으로써 기계적 교반법과 입자크기는 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 결과는 ripening에 의해 인접한 초기 핵들이 성장하면서 결합하여 입자의 합체에 의한 장미상 형성뿐만 아니라 응고가 진행되면서 낮은 냉각속도로 인한 coalescence가 주된 원인으로 보인다. 이는 초정간의 가까운 입자간 거리가 초정 주위에 균일한 용질 분포를 이루게 하여 확산속도를 감소시켜 구형이 입자를 얻을 수 있지만, 용질확산에 의한 조대화를 방지하기 위해서 응고 초기의 핵생성 밀도를 증가시키기 위한 주입온도와 냉각속도의 정밀한 조절이 매우 중요함을 보여준다. Fig. 2(d)와 Fig. 3에서 보는 것과 같이 H-NCM법에 의한 슬러리의 미세조직은 다른 방법에 비해 작은 particle size와 높은 particle density와 form factor를 보이는데, 이는 용탕에 다량의 핵생성을 유발함으로써 많은 수의 미세한 고상입자로 인한 인접한 결정립과 확산장이 중첩되어 계면 불안정성의 요인이 되는 농도구배를 감소시키므로 안정한 구형의 계면으로 계속 성장할 수 있기 때문인 것으로 보인다. 이러한 결과는 기계적 교반법에 의한 수지상 가지의 분리나 변형, Liquidus casting법에 의한 낮은 주입온도와 냉각속도로 인한 방법보다 더욱 높은 핵생성 밀도를 나타냄으로써 균일하고 미세한 조직을 형성함을 보여준다. 초정의 분포와 초정간의 거리는 동시적으로 다량의 핵이 유발되면 일정하게 유지되며 거리도 짧아진다. 따라서 용질분포가 일정하게 유지되기 때문에 용탕에서의 수지상 성장이 억제된다. 이는 비교적 높은 냉각속도에서도 높은 핵생성 밀도에 의한 균일한 입자의 분포에 의해 형성된 낮은 온도구배에 의해 계면 안정성을 유지하여 평활계면으로 성장할 수 있음을 알 수 있다.

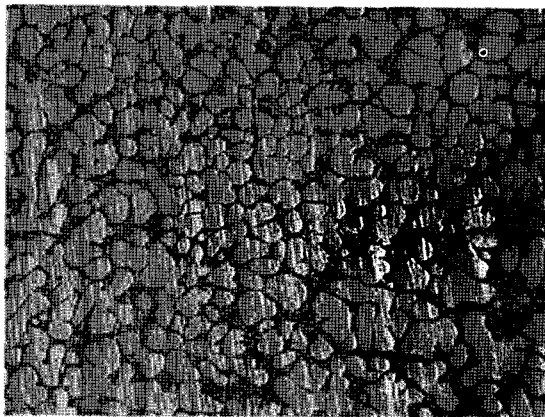
### 3.2 입자 미세화제 첨가유무의 영향

응고 시 초정의 입자크기는 핵생성처의 수가 증가할수록 감소할 것이다. 일반적으로 핵생성을 유발하는 방법은 여러 가지가 알려져 있다. 핵생성 속도는 과냉도에 따라 증가하여 최대 임계수치에 도달한 다음 감소한다. Clausius-Clapeyron 법칙에 의하면, 진동, 유체의 교반에 의한 흐름과 같이 국부적인 압력을 증가시켜 응고점이 상승하므로 과냉도를 증가시켜, 핵생성 속도가 증가된다[13]. 입자미세화제의 경우, 액상의 일부 성분과 입자미세화제가 반응하여 불균일 핵생성처로 작용하는 화합물을 만드는 것으로 알려져 있다[14]. Fig. 3은 서로 다른 반고상 슬러리의 제조방법에 의한 A356합금 슬러리의 입자미세화제를 첨가한 경우의 미세조직 형상을 분석한 결과이며, Fig.

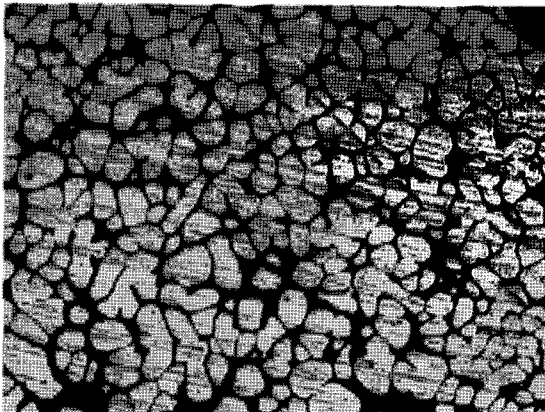
4는 그에 따른 미세조직 사진이다. Particle size는 기계적 교반법의 경우 현저한 감소효과를 보였으며, H-NCM법도 입자미세화 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 A356에 첨가한 TiB<sub>2</sub>가 핵생성처로 작용하여 핵생성 밀도를 증가시켜 용질의 양이 증가하게 되므로 균일하고 미세한 초정이 나타난 것으로 보인다. 그러나 Liquidus casting법의 경우 입자미세화제 첨가에 따른 미세화 경향이 적은 것을 알 수 있는데, 낮은 주입온도로 인한 동시다발적 핵생성을 유발하는 경우 입자미세화제의

영향이 적으며, 낮은 냉각속도로 인해 과열에 인한 핵의 재용해는 없으나, 조대화로 인해 성장한 핵들이 결합하는 경향이 뚜렷함을 보여준다. 즉, 낮은 냉각속도로 인해 다량의 핵이 성장하면서 ripening된 후 coalescence되어 조대한 입자로 성장하게 된다.

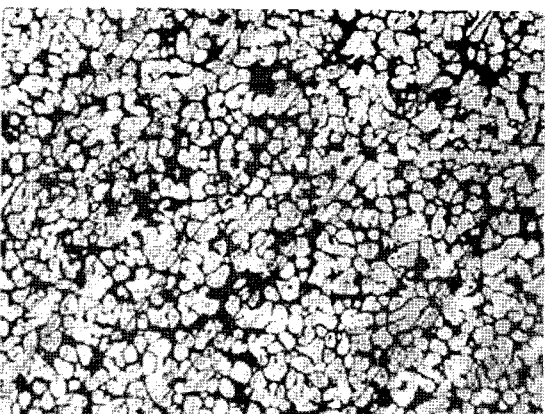
Form factor의 경우, 세 가지 반고상 슬러리 제조방법 모두 입자미세화제의 영향을 받아 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 기계적 교반법의 특성상 수직상 가지 파괴와 분리에 의해 생겨난 핵생성처의 성장에 의한 조대화의 영향으로 장미상의 입자가 많이 분포하는 입자불균일이 보이기도 한다. Particle density의 경우 입자미세화제 첨가에 의해 세 가지 슬러리 제조방법 모두 증가하는 것을 볼 수 있는데, 기계적 교반법에서 가장 확연한 증가를 보였다. Contiguity는 기계적 교반법과 Liquidus casting법에서 모두 감소하였지만, H-NCM법의 경우 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 기계적 교반법과 Liquidus casting법의 경우, 입자미세화제 첨가를 통해 다량의 핵을 생성하여 균일한 입자분포를 갖을 수 있음을 말해준다. 그러나 H-NCM법에 입자미세화제를 첨가할 경우, 구상화된 초정입자들의 agglomeration 경향이 뚜렷함을 볼 수 있는데, 이는 매우 높은 핵생성밀도에 의한 것으로 보인다. 매우 많은 양의 핵이 동시다발적으로 생성되면서, 주변의 입자간의 거리가 짧아지고, 구상으로 성장하는 동안 주변의 입자와 접촉하여 합체된다. 이를 통해 매우 많은 양의 핵이 동시다발적으로 생성될 경우, 입자의 성장에 의한 ripening에서 입자의 크기와 성장속도를 조절하는 것이 중요할 것으로 사료된다.



(a)



(b)



(c)

200µm

Fig. 4. The microstructures of A356 alloy for a variety of types of semi-solid feedstock with inoculation: (a) Mechanical stirring, (b) Liquidus casting, and (c) H-NCM.

### 3.3 미세조직 형상이 유동도에 미치는 영향

유동도 측정 시험은 각각의 반응고 슬러리 제조방법에 의한 슬러리를 정해진 고상율에서 진공압 흡입 유동도 시험기를 통해 측정하였다. Fig. 5에서는 각각 반고상 합금 슬러리 제조방법 중 기계적 교반법, Liquidus casting, H-NCM에 의한 슬러리의 유동도를 고상율과 quartz 지름에 따라 그래프로 나타내었다. 측정결과와 같이 각각의 반응고 슬러리 제조방법 모두 quartz 지름이 증가함에 따라 유동도도 증가하는 것을 알 수 있다. Hiratsuka와 Anzai 등의 연구결과에 따르면, 액상 용탕을 이용한 진공압 흡입 유동도 시험에서의 유동도는 tube의 직경이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다는 결과를 발표하였는데 반응고 슬러리의 경우도 일치함을 볼 수 있다[15]. 모든 반응고 슬러리는 고상율이 증가함에 따라 유동도가 감소하는데, 이는 고상율이 증가함에 따라 응고하는 시간이 짧아짐으로 생기는 경향으로 보인다. 고상율이 증가함에 따라 유동도가 감소하다가 고상율 약 0.3~0.5에서 유동도의 감소율이 적은 것을 볼 수 있다. 이를 통해 반응고 슬러리의 초기 응고시 생성된 미세조직이 성장하는 과정 중 0.3에서 0.5까지 고상율에서의 미세조직 변화는 유동도에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 고상율이 0.5 이상으로 증가하면, 구상으로 자라던 고상입자들은 조대화를 통해 성장하거나 주위의 입자와 접촉하여 합체되어 유동에 방해가 되는 요인으로 작용하므로 고상율이 급격히 떨어지는 것으로 보인다. 따라서 박육 주물을 rheo-casting으로 성형할 경우, 반고상 합금의 고상율을 최대 0.5이

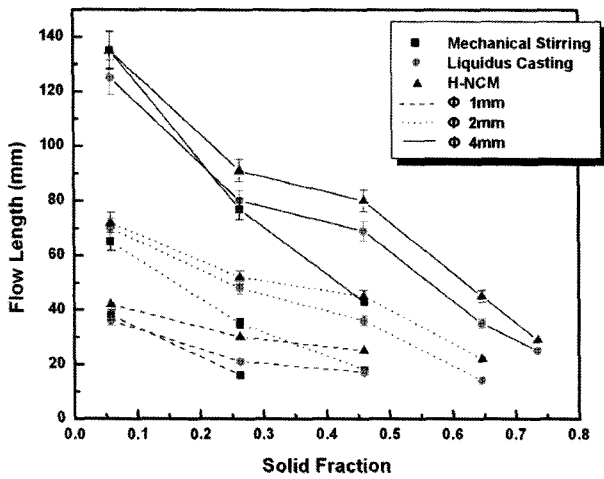


Fig. 5. Fluidity analysis of various semi-solid slurries in A356 alloy for quartz diameters and the solid fractions.

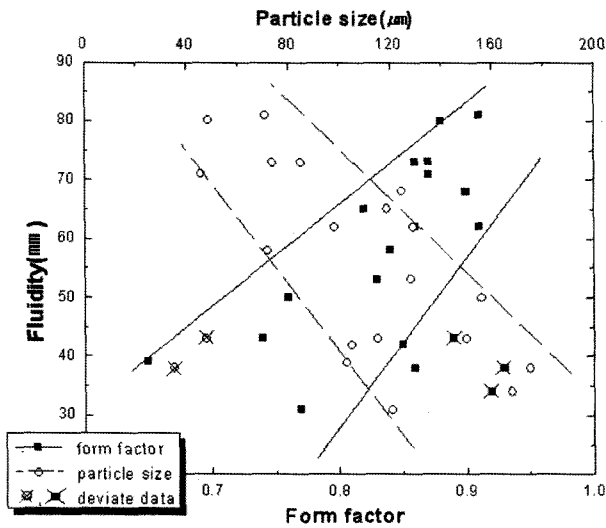
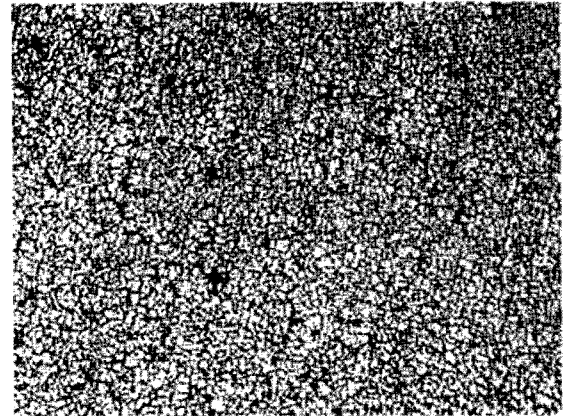


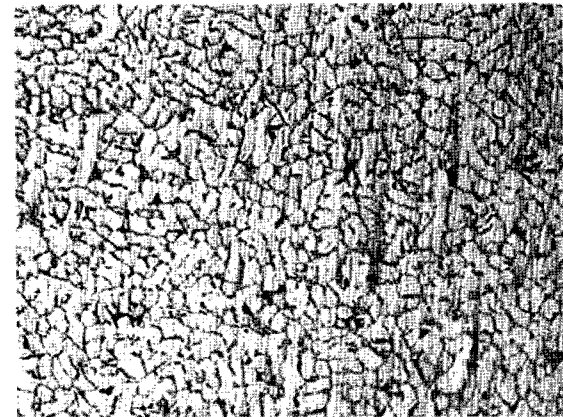
Fig. 6. Fluidity analysis of semi-solid slurries plotted as function of form factor and particle size.

하에서 성형하는 것이 효과적일 것으로 사료된다. 또한 반고상 슬러리 제조방법에 따른 유동도를 보면, 기계적 교반법보다 무교반법인 Liquidus casting와 H-NCM을 이용하여 제조한 반고상 슬러리의 유동도가 각각의 고상율에서 비교적 높은 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 교반법에 비해 동시 다발적인 핵생성을 유발하는 무교반법의 경우, 높은 핵생성밀도 증가로 잠열방출에 의한 온도구배의 저하가 슬러리의 유동성을 유지시켜주는 것으로 보인다. Fig. 6은 반고상 합금 미세조직의 특성에 따른 유동도 양상을 분석한 것이다. 앞서 제시한 제조방법별 미세조직 형상 차이가 유동도에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그림에서와 같이 비교적 구상화율이 높고, 입자의 크기가 작은 고상들로 이루어진 반고상 슬러리의 유동도가 높게 나타난 것을 볼 수 있는데, 이는 미세하고 구상화된 입자들 주위에 액상으로 구성된 반고상 슬러리가 유동하는데 유리하므로 높은 유동성을 갖기 때문이다. Fig. 6에서 일반적인 경향에서 다소 벗어난 결과들이 관찰되는데, 이는 모두

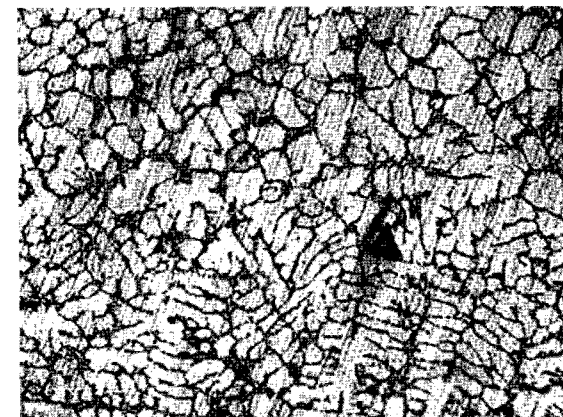
contiguity가 0.34 이상의 미세조직으로 이루어진 슬러리의 유동도 결과이다. contiguity의 경우, 핵생성 밀도, 입자의 크기와 연관되어 유동에 영향을 주는 주요 요인으로 보이는데, 입자의 크기가 작고 핵생성 밀도가 높은 경우, 고상입자들끼리 엉겨 붙어있는 형상은 유동에 크게 방해가 되는 것으로 보인다. 또한 입자의 크기가 아주 조대한 경우도 contiguity는 박육에서의 유동성에 영향을 미치는 중요한 변수로 사료된다. Fig. 7은 일반용탕을 진공압 흡입 유동시험으로 행한 후, 시편의 미세조



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Solidified structures of A356 alloy in fluidity test for a molten metal slurry with a suction temperature of 640°C: (a) tip, (b) middle and (c) bottom.

적을 촬영한 사진이며, Fig. 8과 Fig. 9는 각각 일반용탕과 반고상 슬러리의 고상을 0.4에서의 흡입한 후의 미세조직 사진이다. 그림에서의 미세조직과 같이 진공흡입 유동도 시험에서의 유동의 정지기구는 액상용탕과 반고상 슬러리가 다른 양상을 보임을 알 수 있다. Fig. 7에서의 액상 용탕의 경우, 유동도 시편 하부는 비교적 조대한 수지상이 분포한 반면, 상부 침단 부분은 매우 미세한 고상 분포를 보인다. Niyama등에 의하면, 진공압 흡입 유동도 시험에서 액상 용탕의 경우 여러 구조의

zone을 형성하는데, 같은 합금과 용탕처리에서 유동 시편의 미세구조는 튜브와 같은 몰드가 용탕 흐름이 지남에 따라 가열되는 시간에 의존하며, 이 시간은 응고 동안 냉각속도와 시편 구조에 큰 영향을 미친다고 하였다[15,16]. 따라서 액상 용탕의 진공압 흡입 유동시험에서의 유동 정지기구는 용탕의 흐름으로 가열된 튜브에 의한 서로다른 냉각속도에 따른 응고 때문으로 보인다. Fig. 8과 같이 고상이 진행된 상태에서의 슬러리는 액상선 이상의 용탕과 다른 양상을 갖는데, 액상 용탕을 고상을 0.4까지 응고 시킨 후에 흡입하였을 경우, 시편 하부의 조직은 액상선 이상의 고온에서의 액상과 같이 조대한 수지상을 보이지만, 상부로 가면서 슬러리 내에 성장한 수지상이 성장하여 유동을 막는 것을 볼 수 있다. 특히 시편 중심부부터 거대한 수지상에 의해 유동이 방해받아 고상입자와 액상의 뿔뿔현상이 보이는데, 이는 유동성을 저해하는 주요 요인이 될 것으로 보인다. 실제의 주조 공정에서 몰드에 주입되는 액상 용탕은 충전되는 과정동안 응고되어 수지상으로 성장하여 network를 형성하므로 유동을 방해하게 되는데, 이는 박육제품이나 복잡 형상 제품의 침단에 큰 결함을 유발하게 된다. 따라서 액상선 이하의 슬러리는 미세하고 구상화된 고상입자로 이루어지지 않고, 거대한 수지상의 고상입자로 구성되었을 경우, 유동에 방해가 되는 network를 형성하게 되어 급격한 유동도의 감소를 보이게 된다. Fig. 9(a)와 (b)는 각각 Liquidus casting법과 기계적 교반법으로 제조된 반고상 슬러리의 진공흡입 유동시험 시편의 미세조직 사진이다. 그림에서 시편하부에 고상입자의 분율이 높으며, 상부 침단에서는 고상입자의 분포를 거의 볼 수 없다. 이러한 결과는 반고상 슬러리 성형에서 생기는 액상편석(liquid segregation)으로 보인다. Suery 등은 반용융(thixocasting) 슬러리는 변형중 큰 yield stress가 존재하며, 고상입자의 cracking과 액상 분리현상이 일어난다는 것을 밝혀냈다[10,11]. 슬러리의 변형이 일어나면 고상입자는 정수압(hydrostatic pressure)을 받아 입자가 재배열되거나 인접 입자들 간의 접촉부위의 변형으로 인해 조밀해지는데, 감소한 틈새의 부피는 액상의 정수압을 더욱 증가시키고, 이러한 공간에서의 정수압의 구배는 액상의 분리현상을 유발한다고 하였다. 따라서 고상입자가 미세하고 구상화된 반고상 슬러리의 진공압 흡입 유동시험에서의 유동정지 기구는 이와 같은 고상입자들의 변형과 조밀해짐으로 인한 유동의 방해 때문으로 여겨지며, 이는 결과적으로 액상의 정수압을 증가시켜 액상편석을 유발하게 된다. Fig. 10은 각각 반고상 슬러리의 미세조직 형상의 form factor, 입자크기, contiguity에 따른 유동도 시편에서의 액상편석 비율이다. 그래프에서와 같이 구상화율이 낮고, 입자크기가 조대한 경우 액상편석의 비율이 높은 것을 알 수 있다. 특히 입자크기가 160 μm 이상에서 액상편석비율의 급격한 증가를 보였다. 앞서 유동도의 경향과 마찬가지로 contiguity도 입자밀도가 높은 경우 액상편석 비율에 큰 영향을 주는 것으로 나타났는데, 입자밀도가 높고 입자의 크기가 작다고 하더라도 contiguity가 0.35 이상일 경우, 액상편석의 비율이 매우 높은 것을 볼 수 있다. 즉, 구상화율은 높지만, 입자가 매우 조대한 경우와 마찬가지로 입자가 매우 미세하지만 입자의 밀도가 매우 높고, contiguity가 높은 경우도 높은 액상 편석비율을 보

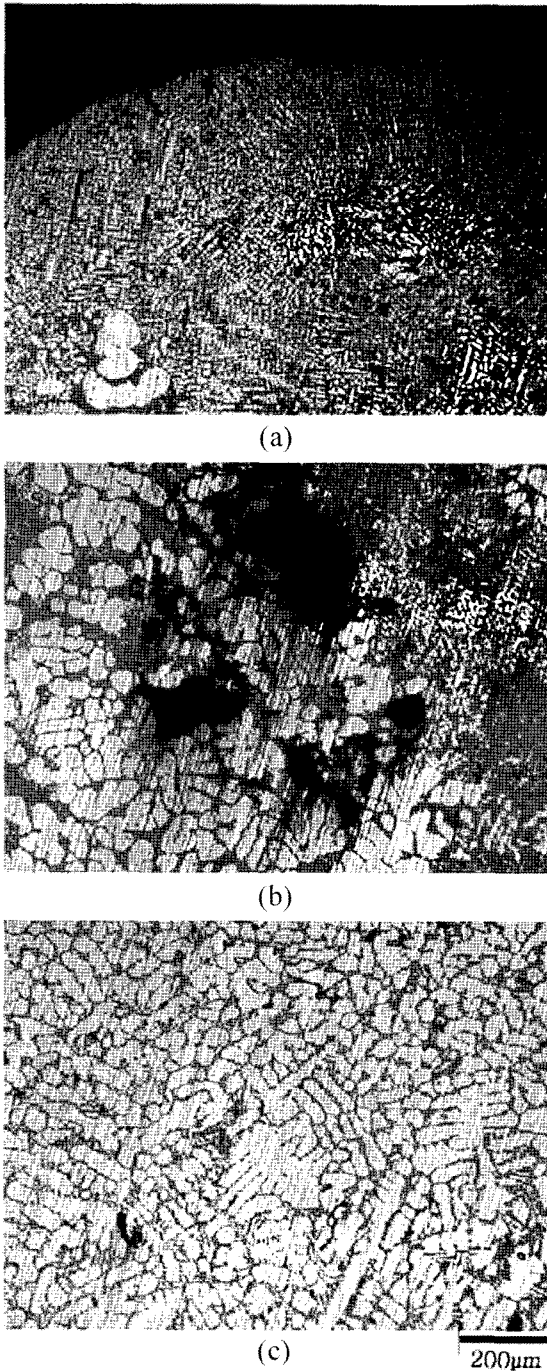


Fig. 8. Solidified structures of A356 alloy in fluidity test for a molten metal slurry with a suction temperature of 586°C (fs=0.4); (a) tip, (b) middle and (c) bottom.

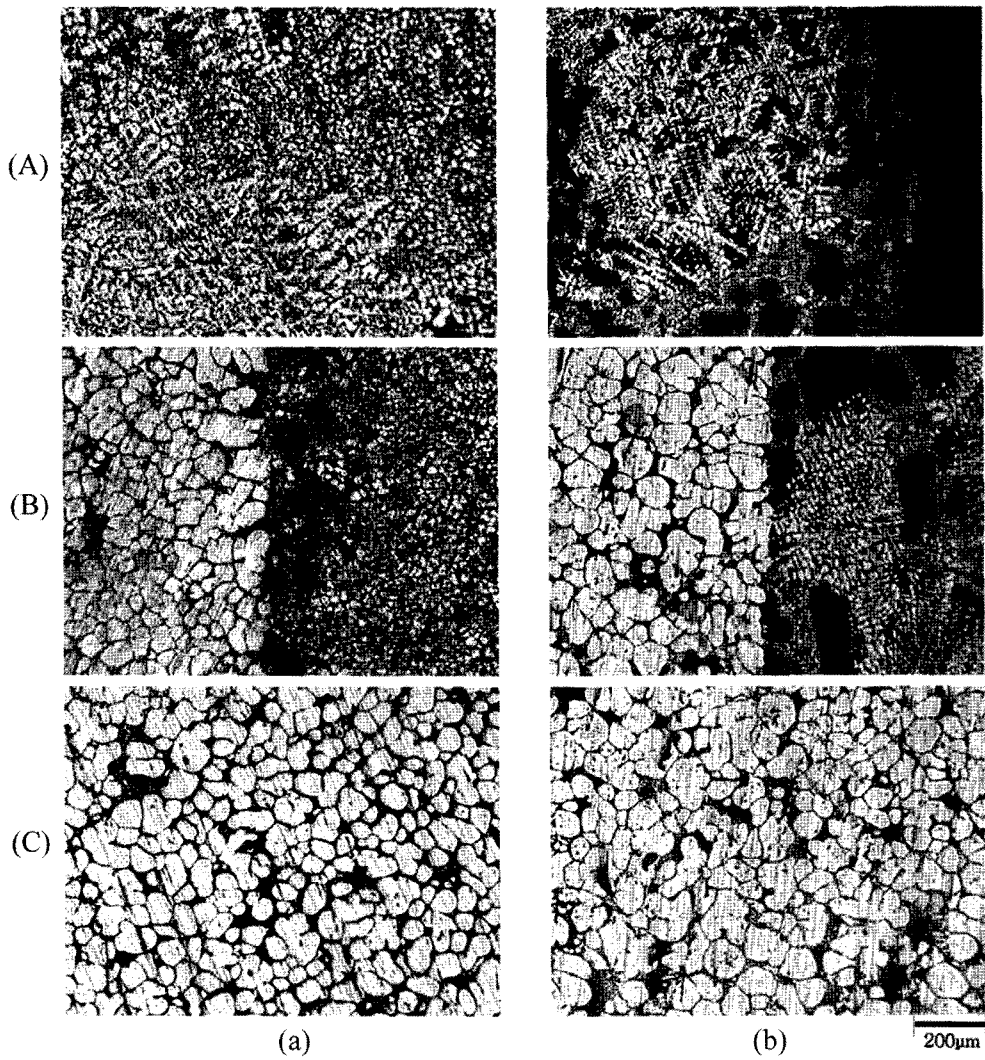


Fig. 9. Solidified structures of semi-solid slurry in fluidity test with a suction temperature of 586°C( $f_s=0.4$ ) for (a) Liquidus casting, and (b) Mechanical stirring: (A) tip, (B) middle, and (c) bottom.

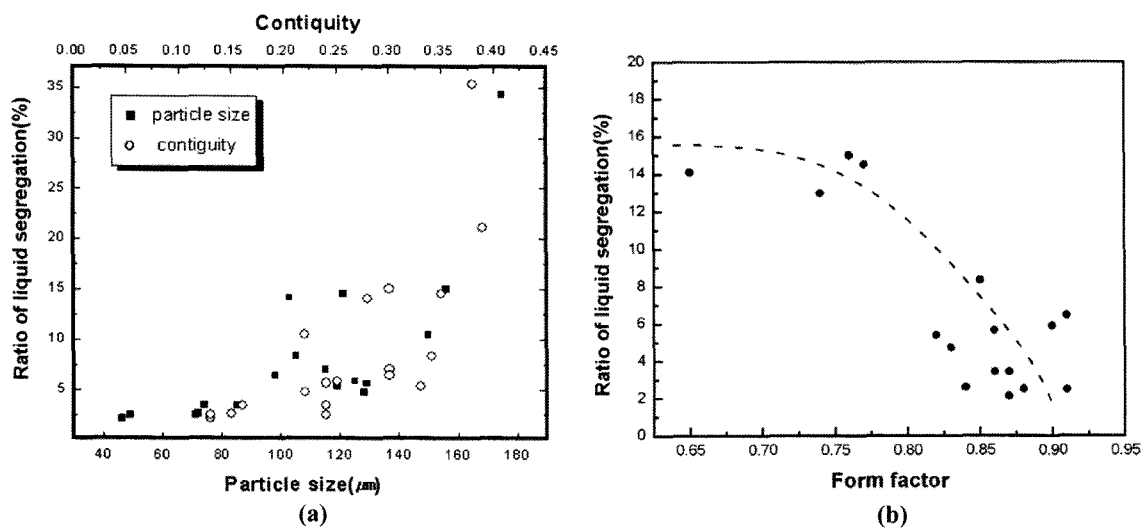


Fig. 10. The liquid segregation ratio of semi-solid slurry in fluidity test plotted as function of (a) particle size and contiguity, and (b) form factor.



이게 된다. 이러한 결과는 매우 높은 핵생성 밀도를 유발하여 매우미세한 입자를 생성하여도 그 입자들 간의 접촉과 합체로 인해 유동흐름에 방해가 되는 network가 형성되었음을 보여준다.

#### 4. 결 론

A356 상용합금에서 반응고 슬러리 제조방법과 입자미세화 첨가유무 등의 주조변수를 변화시켜 진공흡입 유동도 시험을 통해 미세조직 형상이 유동특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 그에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 기계적 교반법, liquidus casting, H-NCM법 중에서 다량의 핵생성 유발을 이용하는 H-NCM법에 의한 반응고 슬러리의 경우가 미세하고 구상화율이 높은 초정으로 이루어진 미세조직을 얻을 수 있었다.

2. 입자미세화제 첨가를 통해 기계적 교반법이 입자미세화와 구상화율 향상효과를 얻을 수 있었다. Liquidus casting의 경우에는 약간의 구상화율의 증가를 보였으며, H-NCM법은 입자미세화와 구상화율의 향상을 보였지만, contiguity가 높아지는 경향을 보였다.

3. 반응고 슬러리의 제조방법 중, 미세하고 구상화율이 높은 고상입자로 이루어진 H-NCM에 의한 반응고 합금 슬러리가 가장 높은 유동도와 낮은 액상편석 결함을 나타내었다. 입자미세화제 첨가의 경우, 기계적 교반법에서 가장 큰 유동성 향상 효과를 볼 수 있었으며, H-NCM은 미세조직의 contiguity 증가로 인해 유동도 감소와 액상편석의 증가를 보였다.

#### 참고문헌

[1] M. C. Flemings: Metall. Trans., "Behavior of metal alloys in the semi-solid state", 22B (1991) 269-293.

[2] R. Mehrabian and M. C. Flemings: Trans. AFS, "Die casting of partially solidification Al-alloys", 80 (1972) 173-182.

[3] M. Suery and M. C. Flemings: Metall. Trans., "Effect of strain rate on deformation behavior on semi-solid dendritic alloys", 13A (1982) 1809-1819.

[4] M. Modigell and J. Koke: J. of Mater. Proc. Tech., "Rheological modelling on semi-solid metal alloys and simulation of thixocasting process", 111 (2001) 53-58.

[5] J. Koke and M. Modigell: J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, "Flow behavior of semi-solid metal alloys", 112 (2003) 141-160.

[6] P. Kumar, C. L. Martin, and S. Brown: Proc. 3rd Int. Conf. on 'Semisolid processing of alloys and composites', "Constitutive modeling and characterization of the flow behavior of semi-solid metal alloy slurries", (1994) 37-46.

[7] M. Perez, J. C. Barbe, Z. Neda, Y. Brechet, and L. Salvo: Acta Mater., "Computer simulation of the microstructure and rheology of semi-solid alloys under shear", 48 (2000) 3773-3782.

[8] D. Brabazon, D. J. Browne, and A. J Carr: Mater. Sci. Eng., "Ex-perimental investigation of the transient and steady rheological behavior of Al-Si alloys in the mushy state", A356 (2003) 69-80.

[9] A. N. Alexandrou, P. L. Menn, G. Georgiou, and V. Entov: J. Non-Newtonian Fluid Mech., "Flow insatabilities in Herschel-Bulkley Fluids", 116 (2003) 19-32.

[10] C. L. Martin, D. Favier, and M. Suery: Int. J. Plast., "Viscoplastic behavior of porous metallic materials saturated with liquid part I: Constitutive equations", 13 (1997) 215-235.

[11] M. Suery and A. Zavaliangos: Proc. 6th Int. Conf. on 'Semisolid processing of alloys and composites', "Key problems in rheology of semi-solid alloys", Turin, Italy, (2000) 129-135.

[12] A. Zavaliangos and A. Lawley: J. Mater. Eng. Perform., "A numerical simulation of thixoforiming", 4 (1995) 40-47.

[13] V. Laxmanan, R. N. Smith, and M. E. Glickman: Metall. Trans., "Deformation of semi-solid Sn-15Pb metal alloy", 11A (1980) 1927-1937.

[14] W. Kurz and D. J. Fisher: "Fundermantals of solidification", 3th edn., Trans Tech Publications (1989) 45-51.

[15] S. Hiratsuka, E. Niyama, T. Funakubo, and K. Anzai: Trans Jpn. Foundrymen's Soc., "Effects of mold coating and mold atmosphere on the fluidity of an aluminum alloy", 13 (1994) 18-24.

[16] E. Niyama, K. Anzari, S. Hiratsuka, and T. Funakubo: J. Mater. Proc.Tech., "Some basic research for thin-wall casting technology", 63 (1997) 779-783.

[17] W. M. Mullins and R. F. Sekerka: J. Appl. Phys., "Morphological stability of a particle growing by diffusion and heat flow", 34 (1963) 323-329.

[18] P. A. Joly and R. Mehrabian: J. of Mat. Sci., "The rheology of a partially solid ", 11 (1976) 1393-1418.

[19] J. Gurland, Trans. AIME, "The measurement of grain contiguity in two-phase alloys", 212 (1958) 452-459.