

논문

# A356 Al 합금의 In-Ladle Direct Thermal Control Rheocasting

이진규<sup>\*,\*\*\*</sup> · 김영직<sup>\*</sup> · 김세광<sup>\*\*</sup> · 조형호<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>성균관대학교 신소재공학과

<sup>\*\*</sup>한국생산기술연구원

## In-Ladle Direct Thermal Control Rheocasting of A356 Al alloy

Jin-Kyu Lee<sup>\*,\*\*\*</sup>, Young-Jig Kim<sup>\*</sup>, Shae K. Kim<sup>\*\*</sup>, and Hyung-Ho Jo<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Adv. Mater. Eng., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

<sup>\*\*</sup>Adv. Mater. Ctr., Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-800, Korea

### Abstract

Semisolid process is possible in any material system possessing a freezing range where the microstructure should consist of the non-dendritic globular solid phase separated and enclosed by the liquid phase, referred to as semisolid slurry. There are two primary semisolid processing routes, thixocasting and rheocasting. Especially, rheocasting process has become a new focus in the field of semisolid process because of its many advantages such as no special billet required and possibility of in-house scrap recycling, compared with the thixocasting process. In-Ladle direct thermal control (DTC) rheocasting has been developed, based on the fact that there is slurry and mush transition in every molten metal and the transition, which normally occurs in the range of liquid fraction of 0.1 to 0.6, could be controlled by controlling solid shape and relative solid-liquid interfacial energy. In this study, A356 Al alloy was investigated to verify In-Ladle DTC rheocasting for obtaining semisolid slurry. Modeling of heat transfer was carried out to investigate the effect of pouring temperature and ladle material, geometry and temperature and the simulation results were compared with the actual experiments.

**Key words :** In-Ladle DTC Rheocasting, Thermal Control, A356

(Received November 15, 2005; Accepted December 23, 2005)

### 1. 서 론

1971년 Spencer에 의한 Sn-15%Pb 합금의 열간 균열에 관한 연구 중, 고액공존 영역에서 기계적 교반실험을 통해 우연히 발견된 급속 슬러리의 이상점성 특성을 바탕으로, Flemings 등에 의한 지속적인 연구에 의해 고액공존 영역에서 가압성형할 수 있는 신가공 공정인 Rheocasting이 연구 개발되었다[1-3]. 오늘날 semisolid process로 통칭되는 반응고 가압성형(Rheocasting) 및 반응용 가압성형(Thixocasting)은 지난 수십년간 많은 연구 개발을 통해 반응고/반응용 조직제어, 반응고/반응용 성형장치 개발과 공정 최적화에 비약적인 발전을 거듭하여 왔으며, Al 합금 및 Mg 합금 등의 저융점 금속과 동합금 및 철합금등의 고용점 금속에 대한 연구가 진행 중에 있다[4,5]. 최근 일본, 미국 등을 중심으로 Al 합금과 Mg 합금에 적용 가능한 저비용 Rheocasting 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, Slurry-on-Demand (SoD)를 이용한 일본 UBE사의 New Rheocasting Process(NRC)를 시작으로 몇몇 공정은 개발단계를 넘어서 Al 합금으로 자동차 부품을 생산하고 있다. UBE사의 NRC process는 Al 합금 용탕을 급속도가 니에 담아 급속 냉각과 급속 가열을 하여 급속 도가니 내에

고상과 액상이 공존하는 Al 합금 슬러리를 슬리브에 주입하여 제품을 생산하고 있으며, Hitachi사는 용접 부근의 낮은 온도의 용탕을 급속 냉각시켜 반응고 슬러리를 제조하고 있다[6,7].

이러한 배경으로부터 본 연구에서는 기존 UBE사 및 Hitachi사의 process 보다 진일보한 기술로서 기존 다이캐스팅 장치에 냉각 및 가열장치를 부착하지 않고 래들에서의 용탕 이송 중 응고제어를 통하여 반응고 슬러리를 제작하여 슬리브에 주입하는 In-Ladle DTC(Direct Thermal Control) Rheocasting 공정을 확립하고자 하였다. 용탕 이송중 래들에서 반응고 슬러리를 제어하기 위해서는 래들의 재료, 형상 및 온도와 용탕의 온도에 따른 반응고 슬러리의 온도구배가 규명되어야 하며, 그에 맞는 공정 확립이 필요하다. In-Ladle DTC Rheocasting 공정 확립을 위하여, simulation에 의한 다양한 응고제어 변수에 따른 반응고 슬러리의 온도구배를 고찰하였으며, 이를 바탕으로 확립된 최적의 조건에서 In-Ladle DTC Rheocasting에 의한 A356 Al 합금의 조직제어를 수행하였다.

### 2. 실험 방법

A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 최적 조건을

<sup>†</sup>E-mail : bebecoro@kitech.re.kr

찾기 위하여 래들의 열전도도, 용탕의 온도, 래들의 온도, 래들의 형상을 변수로 상용 simulation 프로그램인 FLOW-3D를 사용하였다. Simulation에 적용된 A356 Al 합금의 기초물성은 밀도, 열전도도, 열팽창계수, 잠열, 액상선 및 고상선이며 이를 Table 1에 나타내었다. Simulation은 래들의 열전도도, 용탕 온도, 래들 온도, 래들 형상이 시간에 따른 래들내 용탕의 온도 균일성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 외부 온도는 25°C, 대기중 분위기에서 실시하였다. 래들의 열전도도는 0.057cal/cm·sec·°C, 0.18cal/cm·sec·°C 및 0.941cal/cm·sec·°C로 열전도도가 높은 재료와 열전도도가 낮은 재료에 대하여 반응고 슬러리의 온도구배를 나타내었다. 용탕 온도는 650°C, 670°C 및 700°C로 차이를 두어 최적의 용탕온도를 살펴보았다. 래들 온도는 300°C, 400°C 및 500°C로 예열하여 일정온도의 용탕을 주입 하였을때 래들내의 반응고 슬러리의 온도구배를 관찰하였다. 용탕온도보다 낮은 래들의 사용은 주입한 용탕의 초기 냉각에 중요한 변수로 작용한다. 따라서 래들의 두께를 3 mm, 5 mm 및 10 mm로 변화시켜 적정 래들 형상을 알아보았다. 이러한 simulation 변수를 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다. Simulation은 래들내에 용탕의 유동이 없고 래들내에 용탕이 가득 담겨져 있다고 설정하였으며 시간에 따른 용탕 중심부의 온도를 측정하였다. Simulation 결과는 Scheil Equation에 의한 고상율을 기준으로 검증하였다. Fig. 2에 표시된 고상율은 Scheil Equation에 의해 구한 값이다.

In-Ladle DTC Rheocasting 실험에 사용된 A356 Al 합금은 고주파 유도용해로를 사용하여 용해/주조하였다. Simulation 결과를 바탕으로 A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 조작제어 실험을 실시하였다. 전기로를 사용하여 주조한

A356 Al 합금을 용융시켰으며, 로 온도를 제어하여 용탕의 온도를 650°C, 670°C 및 700°C가 되도록 하였다. 이후 열전도도가 가장 낮은 0.057cal/cm·sec·°C인 래들을 500°C로 예열하여 670°C의 용탕을 래들에 주입하였다. 대기 분위기에서 15 초 이내로 In-Ladle DTC Rheocasting 조작제어를 행하였으며 A356 Al 합금의 고상율이 0.2인 610°C와 고상율이 0.3인 600°C에서 래들과 함께 직접 수조에 켈칭하였다. 일반 응고시 A356 Al 합금의 고상이 서로 떨어져 있는 coherency point는 D. Brabazon등이 고상율 0.23이라 발표하였으며, 본 실험에서는 simulation 결과를 바탕으로 Scheil Equation에 의한 고상율 0.2(610°C) 및 고상율 0.3(600°C)을 기준으로 실험을 행하였다[8]. 미세조직을 관찰하기 위하여 시편을 절단하였으며 연마지로 연마 후 6 μm, 1 μm 다이아몬드 입자를 사용하여 미세 연마 하였다. 연마한 시편은 질산 5 ml + 에탄올 95 ml 혼합용액으로 10초간 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 고상과 액상의 분율 및 고상의 크기, 구형화 정도를 측정하기 위하여 화상해석(Image-Pro Plus) 프로그램을 사용하여 이미지 분석을 실시하였다. 또한 기계적 특성을 평가하기 위하여 #2000 연마지로 시편을 연마한 후 로크웰 경도기 (HRF)를 이용하여 경도를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 In-Ladle DTC Rheocasting simulation

A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 최적조건을 찾기 위하여 실시한 simulation 결과를 Fig. 2에 나타내었다. In-Ladle DTC Rheocasting에서 래들내의 반응고 슬러리의 온

Table 1. Physical properties of A356 Al alloy.

	Density (g/cm <sup>3</sup> , at 20°C)	Thermal Conductivity (cal/cm·sec·°C)	Coefficient of thermal expansion (μm/m·K at 20-300°C)	Latent heat (Kcal/kg)	Solidus temperature (°C)	Liquidus temperature (°C)
A356	2.685	0.38	23.5	92.971	555	615

Table 2. Experimental conditions for In-Ladle DTC Rheocasting simulation.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
Ladle Thermal Conductivity (cal/cm·sec·°C)	0.057	0.18	0.941	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057
Melt temperature (°C)	670	670	670	650	700	670	670	670	670
Ladle temperature (°C)	500	500	500	500	500	400	300	500	500
Ladle geometry	A	A	A	A	A	A	A	B	C

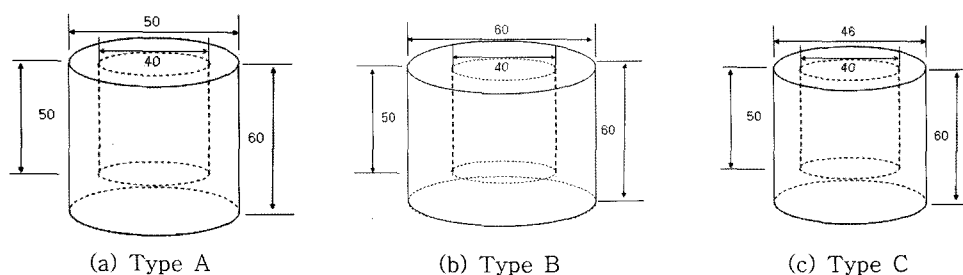


Fig. 1. Schematic shape of ladle geometry for In-Ladle DTC Rheocasting: (a) thickness: 5 mm, (b) thickness 10 mm and (c) thickness: 3 mm.

도구배는 상당히 중요하다. 반응고 슬러리 내부와 외부의 온도차가 발생하지 않으며 시간이 흐름에 따라 반응고 슬러리의 온도차가 발생하지 않는 조건을 찾기 위하여 simulation을 행하였다. Fig 2의 (a)는 용탕온도 670°C, ladle 온도 500°C, ladle 두께 5 mm이며, 래들의 열전도도가 0.057cal/cm·sec·°C, 0.18cal/cm·sec·°C 및 0.941cal/cm·sec·°C로 서로 다른 재료로 simulation을 행한 결과를 나타낸다. 켈칭온도 610°C 지점에서는 세 재료 모두 큰 차이를 나타내지 않았으나, 켈칭온도 600°C까지 걸린 시간은 열전도도가 0.057cal/cm·sec·°C (Case1)인 재료의 경우 60초로 나타났으며 0.18cal/cm·sec·°C (Case2)인 재료와 0.941cal/cm·sec·°C(Case3)인 재료는 30초로 나타났다. 60초 이후에는 Case 1과 Case2/Case3간에 온도 차이가 약 15°C로 더이상의 차이는 발생하지 않았다. 용탕 주입 후 60초 동안 열전도도가 높은 래들일수록 용탕의 온도를 빼앗아 대기 중으로 방출하면서 큰 폭으로 용탕의 온도가 떨어졌음을 알 수 있다. Fig. 2의 (b)는 래들로 주입된 용탕의 온도를 650°C, 670°C 및 700°C로 변화시킨 simulation 결과이다. 켈칭온도 600°C까지 냉각되는데 걸리는 시간은 용탕온도가 650°C(Case4)일때 50초이며 670°C(Case1)일 때 60초, 700°C(Case5)일 때 70초로 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 초기 온도구배에서는 용탕 주입 후 10초 만에 Case1, Case4 및 Case5 모두 용탕온도가 615°C로 용융온도까지 떨어졌으나 용탕온도가 700°C인 Case5의 경우 점차 냉각곡선이 완화됨을 관찰 할 수 있었는데, 이는 잠열방출에 의해 냉각곡선은 둔화된 것으로 사료된다. Fig. 2의 (c)는 용탕온도

670°C에서 열전도도 0.057cal/cm·sec·°C, 두께 5 mm일때, 래들온도를 300°C, 400°C 및 500°C로 변화시킨 후 래들내 용탕의 시간에 따른 온도구배를 나타내었다. 켈칭온도 610°C에서는 예열에 따른 큰 차이점을 발견할 수 없었지만 켈칭온도 600°C까지 도달하는데 걸린 시간은 래들 예열온도 500°C (Case1)는 60초, 래들 예열온도 400°C(Case6)는 42초, 래들 예열온도 300°C(Case7)는 30초가 소요되었다. 래들 예열온도가 500°C가 넘어서면 래들 재료가 급격히 산화되어 실험에서 배제되었으며 300°C 이하로 예열하면 급격히 응고되어 실험에서 배제되었다. Fig. 2의 (d)는 용탕온도 670°C, 래들온도 500°C, 열전도도 0.057cal/cm·sec·°C일때, 래들의 두께를 3 mm, 5 mm 및 10 mm로 변화시킨 후 래들내 용탕의 시간에 따른 온도구배를 나타내었다. 켈칭온도 610°C까지 냉각되는데 걸리는 시간은 래들 두께 3 mm(Case9)일 경우 35초, 5 mm (Case1)일 경우 22초, 10 mm(Case8)일 경우 17초가 소요된다. 래들 두께가 3 mm와 10 mm 간에는 18초의 차이가 나며, 시간이 지남에 따라 그 격차는 더 크게 벌어졌다. 켈칭온도 600°C까지 도달하는데 걸린 시간은 래들두께 3 mm는 85초, 5 mm는 60초, 10 mm는 27초가 소요되었다.

이상의 결과로 In-Ladle DTC Rheocasting 조직제어 실험을 하기 위해서는 0.057cal/cm·sec·°C의 열전도도가 낮은 재료를 사용하여 래들을 제작해야 하며 용탕의 온도는 670°C, 래들의 예열온도는 500°C가 적당할 것으로 판단되며, 특히 래들의 형상에 있어서 두께를 얇게 만들어야 함을 알 수 있었다.

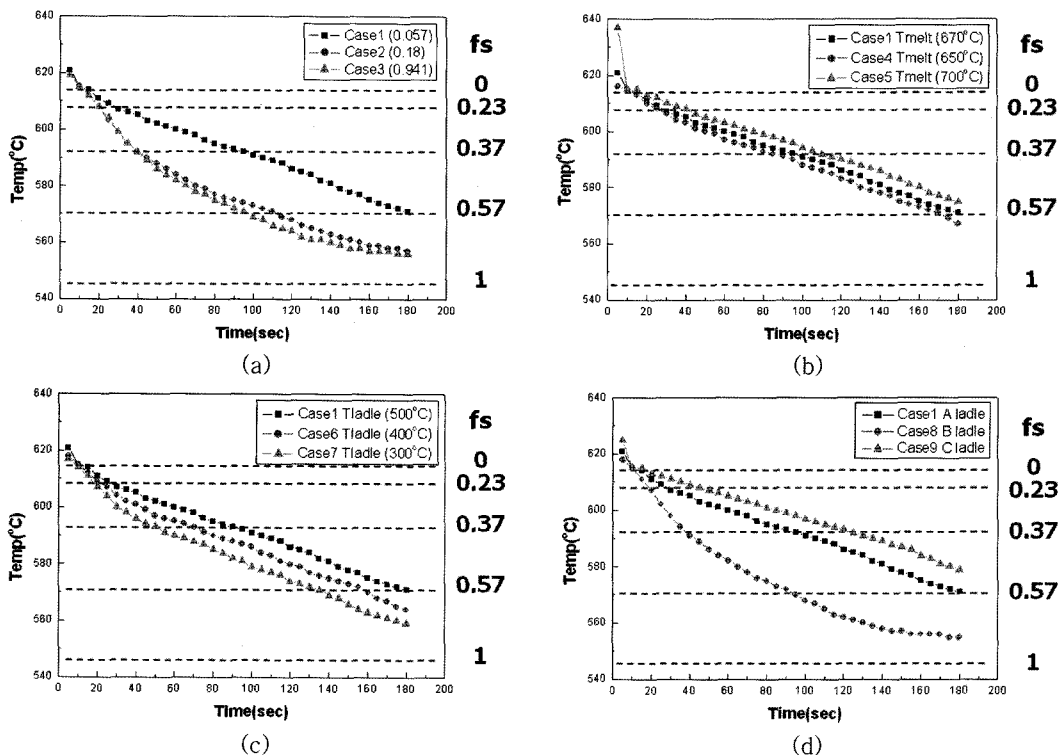


Fig. 2. Results of heat patterns for In-Ladle DTC Rheocasting of A356 Al alloy as a function of (a) ladle thermal conductivity, (b) melt temperature, (c) ladle temperature and (d) ladle geometry.

### 3.2 In-Ladle DTC Rheocasting 조직제어

주조한 A356 Al 합금의 응고시 상변태 및 응고개시, 응고 완료 온도를 구하기 위하여 냉각속도 5°C/min, Ar 가스 분위기 하에서 DSC로 열분석 하였다. 이때 측정된 응고개시 온도는 617°C였으며, 응고 완료 온도는 552°C였다. 응고개시 온도 및 응고 완료 온도는 Table 1에 나타난 액상선 및 고상선과 큰 차이를 띄지 않았다.

Simulation에서 최적의 조건으로 나타난 열전도율이 0.057 cal/cm·sec·°C인 재료로 두께가 3 mm인 래들을 제작하였으며 래들은 500°C로 일정하게 예열하여 In-Ladle DTC Rheocasting 조직제어를 실시하였다. Fig. 3은 용탕온도 650°C, 670°C 및 700°C에서 래들에 주입하여 공냉 한 후 Simulation 결과를 바탕으로 Scheil Equaiton에 의한 이론 고상율이 0.3인 600°C, 이론 고상율이 0.2인 610°C가 되었을 때 퀴칭한 시편의 미세조직을 나타낸 것이다.

Fig. 3의 (a), (b) 및 (c)는 반응고 슬러리의 온도가 600°C일 때 퀴칭한 시편으로 (a)는 용탕온도 650°C, (b)는 용탕온도 670°C, (c)는 용탕온도 700°C로 주입하였을 때 미세 조직사진을 나타낸다. 전체적으로 등근 고상의 반응고 조직을 얻을 수 있었으며, 용탕온도가 높을수록 고상이 미세함을 관찰할 수 있다. Fig. 3의 (d), (e) 및 (f)는 반응고 슬러리의 온도가 610°C일 때 퀴칭한 시편으로 (d)는 용탕온도 650°C, (e)는 용탕온도 670°C, (f)는 용탕온도 700°C로 주입 하였을 때 조직사진을 나타낸다. 전체적으로 등글고 균일한 고상이 관찰되었으며 용탕 온도가 높을수록 고상은 미세하였다.

Fig. 4는 In-Ladle DTC Rheocasting 조직제어 후 퀴칭한 미세조직을 화상해석한 결과를 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 용탕온도 650°C, 670°C 및 700°C에서 주입하고 반응고 슬러리 온도가 600°C 및 610°C일 때 퀴칭한 조건에서의 고상율을 나

타내었다. 용탕온도가 650°C에서 0.65의 고상율이 측정 되었고 용탕온도가 높아질수록 고상율 0.7로 약간 증가하는 경향을 보였으며 퀴칭 온도에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 시편 전체적으로 0.65~0.7의 높은 고상율이 측정되었고, 높은 고상율에서도 Fig. 3의 미세조직에서 알 수 있듯이 고상과 고상이 떨어져 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 공정에서의 coherency point는 D. Brabazon등에 의해 보고된 일반 응고시의 A356 Al 합금의 coherency point인 고상율 0.23보다 매우 낮음을 알 수 있다[8]. 이는 A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 공정 활용면에서 큰 장점으로 작용할 것으로 사료된다. 즉, A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting시 더 넓은 반응고 슬러리 온도구간(반응고 성형 가능 구간)을 형성할 것으로 판단된다. Fig. 4의 (b)는 각 조건에서의 평균입경을 나타낸다. 평균입경은 전체적으로 25~40 μm의 미세한 고상 입자를 형성함을 알 수 있으며 용탕온도 670°C, 퀴칭온도 600°C의 실험 조건을 제외하고, 용탕온도가 높아질수록 평균입경은 낮아졌다. Fig. 4의 (c)는 In-Ladle DTC Rheocasting 미세조직의 고상형성계수를 나타낸 것이다. 고상형성 계수가 1일 경우 완전 구형이며, 조직제어 시편에서는 1.25~1.4의 균일한 고상형성 계수를 얻을 수 있었다. 용탕온도 670°C, 퀴칭온도 600°C의 실험 조건을 제외하고, 용탕온도가 낮아질수록 고상형성 계수는 낮아져 구형에 가까워지는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting의 최적조건을 알아보기 위하여 simulation을 행하였고, 이를 바탕으로 In-Ladle DTC Rheocasting 조직제어를 수행하여 다음과 같은

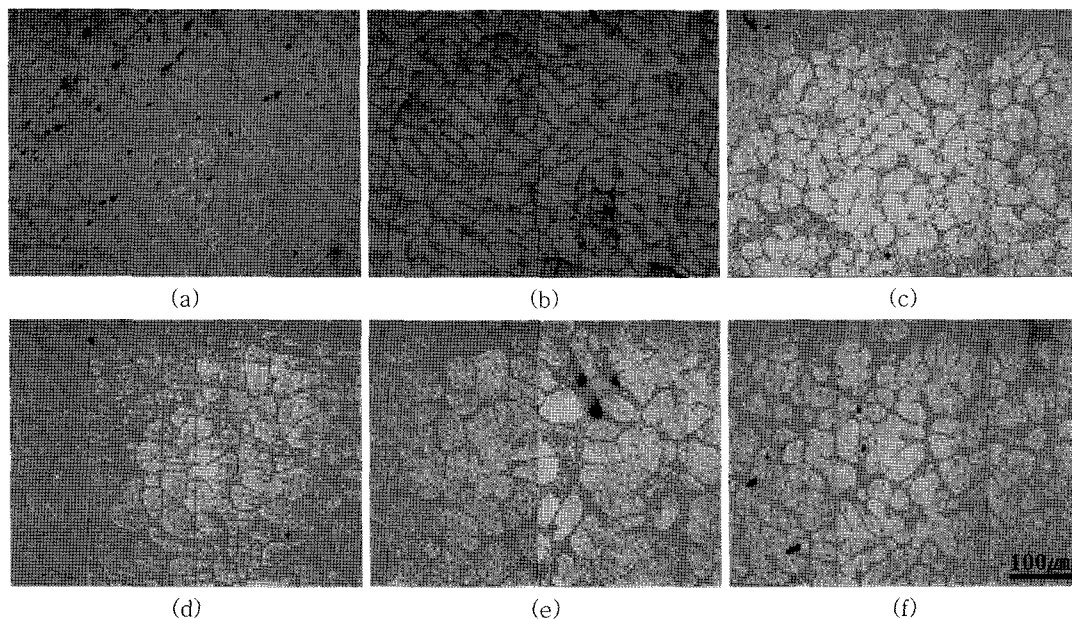


Fig. 3. As-quenched microstructures of In-Ladle DTC Rheocasting as a function of (a) melt temperature: 650°C and quenching temperature: 600°C, (b) melt temperature: 670°C and quenching temperature: 600°C, (c) melt temperature: 700°C and quenching temperature: 600°C, (d) melt temperature: 650°C and quenching temperature: 610°C, (e) melt temperature: 670°C and quenching temperature: 610°C, melt temperature: 700°C and quenching temperature: 610°C.

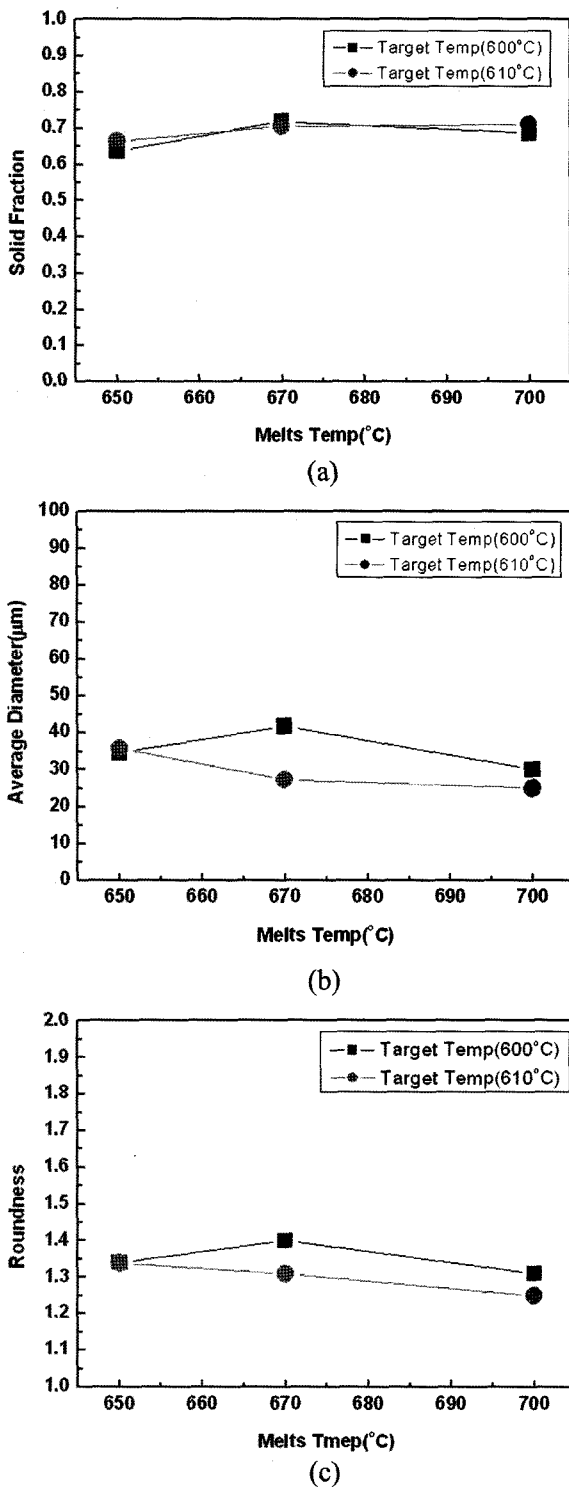


Fig. 4. Results of image analysis on evolution of In-Ladle DTC Rheocasting microstructure of A356 Al alloy as a function of (a) solid fraction, (b) average diameter and (c) roundness.

결론을 얻을 수 있었다.

1) In-Ladle DTC Rheocasting을 하기 위한 최적의 조건은 열 전도율이 낮은 재료의 래들을 사용하여야 하며 래들의 두께를 얇게 제작해야 한다. 또한, 래들은 500°C로 예열되어야 함을 알 수 있었다.

2) Simulation 결과를 바탕으로 A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 조직제어를 수행하였으며 모든 실험에서 균일한 구상의 고상을 얻을 수 있었다. 이는 상용 합금도 간단한 응고제어에 의해 반응고 가압성형이 가능함을 확인 할 수 있었다.

3) A356 Al 합금의 슬러리/mush 변이 지점이 In-Ladle DTC Rheocasting을 통하여 0.65~0.7의 고상율로 낮아짐을 이미 분석을 통하여 확인 할 수 있었다. 이는 A356 Al 합금의 In-Ladle DTC Rheocasting 시 더 넓은 슬러리 온도구간(반응고 성형 가능 구간)을 형성할 것으로 판단된다.

4) 기존 다이캐스팅 장비에 냉각/가열 장치를 하지 않더라도 용탕의 이송 중에 래들내 용탕의 온도제어만으로 반응고 슬러리를 얻을 수 있는 In-Ladle DTC Rheocasting 개발 할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. B. Spenser, R. Mehrabian and M. C. Flemings : Metall. Trans., "Rheological Behavior of Sn-15 pct Pb in the Crystallization Range", 3 (1972) 1925-1932.
- [2] M. C. Flemings : Metall. Trans., "Behavior of Metal Alloys in Semi-Solid State", 22A (1991) 957-980.
- [3] D. H. Kirkwood : Inter. Met. Rev., "Semisolid Metal Processing", 39 (1994) 173-189.
- [4] P. J. Ward, H. V. Atkinson, D. H. Kirwood and G. Starr : Proc. of 4th Int'l Conf. of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Semi-solid Processing of Copper Alloys for Electric Motor Components", (1996) 269-273.
- [5] S. K. Kim, C. H. Shin, T. W. Hong, H. G. Yoo, G. D. Kim and Y. J. Kim : Proc. of 3rd Symp. on Semisolid Forming Technology, "High Temperature Semi-solid Forming of Fe alloys", (1999) 185-192.
- [6] Ube Industries Ltd., Japan :European patent, #EPO 745 694 A1, Dec. 4 (1996).
- [7] Ryoichi Shibata, Takao Kaneuchi, Tomomi Soda and Yasuo Iizuka : Proc. of 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "New Semi Solid Metal Casting Process", (1994) 296-300.
- [8] D. Brabazon, D. J. Browne and A. J. Carr : Mater. Sci. Eng., "Experimental Investigation of the Transient and Steady Rheological Behaviour of Al-Si Alloys in the Mushy State", 356 (2003) 69-80.