

경량합금을 위한 In-Ladle DTC Rheocasting 개발

김세광* · 이진규 · 하성호 · 조형호

한국생산기술연구원

Development of In-Ladle Direct Thermal Control Rheocasting for light alloys

Shae K. Kim[†], Jin-Kyu Lee, Seong-Ho Ha, and Hyung-Ho Jo

Adv. Mater. Div., Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-800, Korea

1. 서 론

Semisolid process (S2P)로 통칭되는 반응고 가압성형(Rheocasting) 및 반응용 가압성형(Thixocasting)은 지난 수십년간 Al 합금 및 Mg 합금등의 저용점 금속과 동합금 및 철합금 등의 고용점 금속에 대하여 많은 연구 개발을 통해 비약적인 발전을 거듭하여 왔다[1-6]. 1972년 개발된 반응고 가압성형은 응고과정 중 기계적 교반, Passive 교반, 전자기적 교반에 의하여 비수지상 조직의 반응고 슬러리를 제조하고, 반응고 슬러리를 직접 가압성형하여 최종 제품을 성형하는 방법이며, 1973년 개발되어 1990년대 이르러 semisolid process 중 처음으로 상용화된 반응용 가압성형은 상기의 교반법 이외에 SIMA(Strain Induced Melt Activated)법, 결정립미세화법, 분무성형법, 급속응고법에 의해 반응용 가압성형용 원소재를 제조하고, 적당한 길이의 Slug로 절단 후 소정의 반응용 온도로 재가열하여 최종제품을 성형하는 방법이다[7-8].

그러나 2000년대 이르러 반응용 가압성형법은 특정업체에서 생산되는 일반주조 소재보다 35~50% 비싼 고가의 원소재가 필요하고, 게이트, 탕도 및 오버플로우등 부산물을 재활용하기 위하여 반응용 원소재를 생산하는 업체로 보내어 재가공해야 하는 문제점으로 소성가공재 또는 고용점의 구리 및 철 합금에 제한적으로 이용되고 있다. 한편, 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 RheocastingProcess(NRC)를 시작으로 THT Presses의 SLC, Idra prince의 SSR 및 WPI의 CRP등의 몇몇 공정은 개발단계를 넘어서 Al 합금으로 자동차 부품을 생산하고 있다[9-12]. 이러한 배경으로부터 기존 SoD process 보다 진일보한 기술로서 기존 다이캐스팅 장치에 냉각 및 가열장치 등의 부가장치를 부착하지 않고 래들에서의 용탕 이송 중 응고제어를 통하여 반응고 슬러리를 제조하여 슬리브에 주입하는 In-Ladle DTC(Direct Thermal Control)

rheocasting 공정을 개발 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, 전산모사에 의한 다양한 응고제어 변수에 따른 반응고 슬러리의 온도구배를 기술하였으며, 이를 바탕으로 확립된 최적의 조건에서 In-Ladle DTC rheocasting에 의한 A356 Al 합금 및 AZ91D Mg 합금의 조직제어 및 유동성 평가 결과를 기술하였다.

2. Slurry-on-demand (SoD) process

대부분의 상용합금의 경우 고체와 액체가 공존하는 온도범위가 존재하며 고액공존 구간은 coherency point를 기준으로 액상에 가까운 slurry 영역과 고상에 가까운 mush 영역으로 나누어진다. 응고 중 고상 입자간 만나는 온도를 나타내는 coherency point는 합금에 따라 고상율 0.25~0.6에서 정해지며 고상의 형상을 열구배 또는 합금으로 조절하여 coherency point를 낮출 수 있다. 고액공존 영역에서 고상의 형상은 온도와 합금조성에 의해 결정되는 계면에너지에 의해 지배되고, 접축각(θ)에 의해 표현되며, 식 (1)에 의해 정의 되어지는 전체 계면에너지(G)가 최소가 되는 방향에 의해 결정되게 된다.

$$G = \int \gamma dA \quad (1)$$

액상-액상, 액상-기상의 경우 계면에너지(γ)가 결정학적 방위에 의존하지 않으며, 형상은 단위체적당 면적(dA)이 최소가 되는 방향, 즉 구형이 되게 된다. 구형의 고상이 서로 합체가 되지 않는 경우는 온도와 합금조성에 의해 결정되는 고액계면에너지(γ_{SL})와 결정입계에너지(γ_{GB})의 비가 $0.5 \geq \gamma_{SL}/\gamma_{GB}$ 이며 고액계면에너지와 결정입계에너지의 비가 $0.5 < \gamma_{SL}/\gamma_{GB}$ 인 경우에 고상은 합체되어 성장하게 된다[5-13]. 결정입계에너지는 결정간의 방위차에 의하여, 방위차가 2~3°인 소경각 결정입계의 경

[†]E-mail : shae@kitech.re.kr

우 결정입계에너지는 고경각 결정입계에너지의 10% 이하로 Cu 21 mJ/m², Ag 8 mJ/m²이며, 방위차가 10~15° 이상인 고경각 결정입계에너지는 온도가 증가함에 따라 감소하지만 Al 325 mJ/m², Cu 625 mJ/m²이다[5-14]. 고액공존 영역에서 고액계면에너지 또한 조성 및 온도에 따라 다르지만 Al-AlCu의 고액계면의 경우 163 mJ/m², Al-AlSi 168 mJ/m², Al-AlMg 149 mJ/m², Al-AlNi 171 mJ/m²인 것으로부터 Al-Cu 합금 및 Al-Si 합금은 고액계면에너지와 결정입계에너지의 비가 $\gamma_{sl}/\gamma_{gb} \approx 0.5$ 인 것을 알 수 있다[15-16].

한편, 종전의 반응고 가압성형은 기계적 교반 및 전자기적 교반 하에서 Fig. 1의 a-b-c-d 경로를 따라 구형의 고상을 형성한다. 최근, 반응고 가압성형의 공정 중 slurry-on-demand (SoD)를 이용한 공정은 Fig. 1의 b-b2 경로를 통하여 고상이 구형화되며 극단적인 경우 Fig. 1의 a-a2 경로로 고상이 구형화 된다. 고액 공존 영역내 일정온도에서 고상이 50%일때 수지상이 구형의 고상으로 성장하는데 걸리는 시간은 수지상의 크기가 180 μm 일 경우 1800초, 30 μm 일 경우 8초가 소요되며 수지상의 크기가 작을수록 SoD 공정에는 유리하다[17]. 위와 같은 이론적 배경과 더불어 SoD 공정은 액상선 직상의 낮은 용탕온도에서 결정립 미세화제 첨가 및 기계적 교반, 열 제어 등을 통하여 핵생성 site를 극단적으로 증가시켜 수지상의 크기를 더욱 작게 하여 짧은 시간에 구형의 고상을 얻을 수 있게 하였다. 또한, 낮은 용탕온도 제어로 수지상에서 분리된 fragmentation이 재용해 하는 것을 방지하며 새로운 핵생성 site로 작용하게 하여 고액공존 영역에서 주상정보다 등축정이 우선하게 되며 SoD process 구현 시 균일하고 미세한 구형의 반응고 슬러리 제조가 가능하다.

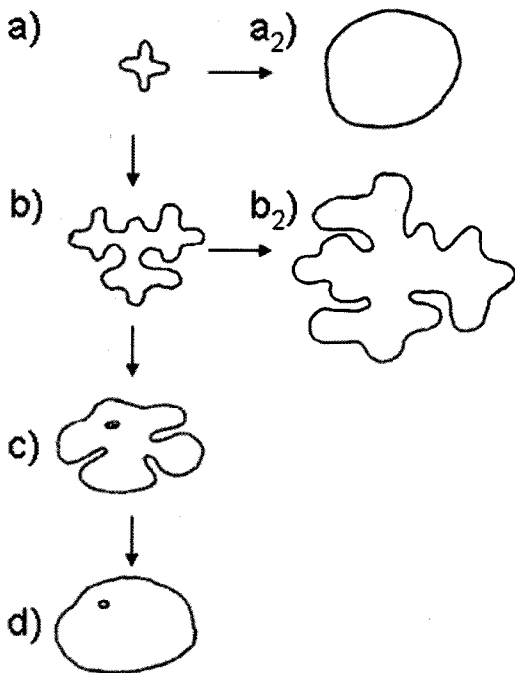


Fig. 1. Paths for growth and coarsening of a “grain nucleus”.

3. In-Ladle DTC rheocasting

SoD process를 구현하기 위해서는 슬러리를 제조하기 위한 고가의 특수한 장치가 필요하며 슬러리를 제조하는데 걸리는 시간이 다이캐스팅 등의 주조 공정보다 길어 생산성이 낮다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 배경으로부터 기존 다이캐스팅 장비에 추가적인 장치를 부착하지 않고 래들에서의 용탕 이송 중 응고제어를 통하여 반응고 슬러리를 제조하여 슬리브에 주입하는 In-Ladle DTC rheocasting 공정을 개발하였다. Fig. 2의 (a)는 In-Ladle DTC rheocasting 장치를 나타내며 (b)는 시간에 따른 래들내 슬러리 응고제어에 관하여 나타내었다. 용탕 이송 중 래들에서 반응고 슬러리를 제어하기 위하여 열전도도가 다른 래들 재료, 형상 및 온도에 따른 반응고 슬러리의 온도구배 규명하여 Fig. 1의 a-a2 경로를 통한 구형의 고상을 얻고자 하였다.

In-Ladle DTC rheocasting 최적 조건을 찾기 위하여 래들의 열전도도, 래들의 온도, 래들의 형상을 변수로 상용 전산모사 프로그램인 FLOW-3D를 사용하였다. 전산모사는 래들의 열전도도, 래들 온도, 래들 형상이 시간에 따른 래들내 용탕의 온도 균일성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 사용 재료는 A356, 외부 온도는 25°C, 대기 중 분위기에서 실시하였다. 래들의 열전도도는 0.057, 0.18 및 0.941 cal/cm²·sec·°C로 열전도도가 높은 재료와 열전도도가 낮은 재료에 대하여 반응고 슬러리의 온도구배를 나타내었다. 래들 온도는 300, 400 및 500°C로 예열하여 일정온도의 용탕을 주입 하였을 때 래들내의 반응고 슬러리의 온도구배를 관찰하였다. 용탕온도보다 낮은 래들의 사용은 주입한 용탕의 초기 냉각에 중요한 변수로 작용한다. 따라서 래들의 두께를 3, 5 및 10 mm로 변화시켜 적정 래들 형상을 알아보았다. 전산모사는 래들내에 용탕의 유동이 없고 래들내에 용탕이 가득 담겨져 있다고 설정하였으며 시간에 따른 용탕 중심부의 온도를 측정하였다. 전산모사 결과

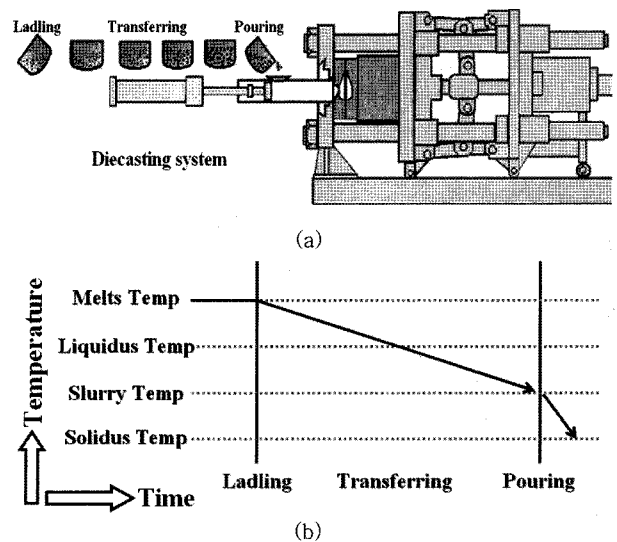


Fig. 2. Schematics of (a) In-Ladle DTC rheocasting process in diecasting machine and (b) In-Ladle DTC rheocasting thermal procedure.

는 Scheil 식에 의한 고상율을 기준으로 검증하였다. In-Ladle DTC rheocasting에서 래들내의 반응고 슬러리의 온도구배는 상당히 중요하며 반응고 슬러리 내부와 외부의 온도차가 발생하지 않고 시간이 흐름에 따라 반응고 슬러리의 온도차가 발생하지 않는 조건을 조사하였다. 전산모사 결과 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어 실험을 하기 위해서는 $0.057 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ 의 열전도도가 낮은 재료를 사용하여 래들을 제작해야 하며 용탕의 온도는 670°C , 래들의 예열온도는 500°C 가 적당하며, 특히 래들의 형상에 있어서 두께를 얇게 만들어야 한다[18].

4. A356 Al 합금의 In-Ladle DTC rheocasting

전산모사에서 최적의 조건으로 나타난 열전도율이 $0.057 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ 인 재료로 두께가 3 mm인 래들을 제작하였으며 래들은 500°C 로 일정하게 예열하여 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어를 실시하였다. Fig. 3은 용탕온도 650, 670 및 700°C 에서 래들에 주입하여 공냉 한 후 전산모사 결과를 바탕으로 Scheil 식에 의한 이론 고상율이 0.3인 600°C , 이론 고상율이 0.2인 610°C 가 되었을 때 퀴칭한 시편의 미세조직을 나타낸 것이다.

Fig. 3의 (a), (b) 및 (c)는 반응고 슬러리의 온도가 600°C 일 때 퀴칭한 시편으로 (a)는 용탕온도 650°C , (b)는 용탕온도 670°C , (c)는 용탕온도 700°C 로 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°C 일

때 퀴칭한 시편으로 (d)는 용탕온도 650°C , (e)는 용탕온도 670°C , (f)는 용탕온도 700°C 로 주입 하였을 때 조직사진을 나타낸다. 전체적으로 등근고 균일한 고상이 관찰되었으며 용탕온도가 높을수록 고상은 미세하였다.

Fig. 4는 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어 후 퀴칭한 미세조직을 화상해석한 결과를 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 용탕온도 650, 670 및 700°C 에서 주입하고 반응고 슬러리 온도가 600 및 610°C 일 때 퀴칭한 조건에서의 고상율을 나타내었다. 용탕온도가 650°C 에서 0.65의 고상율이 측정되었고 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. Brabazon 등에 의해 보고된 일반 응고시의 A356 Al 합금의 coherency point인 고상율 0.23보다 매우 낮음을 알 수 있다 [19]. 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 $25\text{-}40 \mu\text{m}$ 의 미세한 고상 입자를 형성함을 알 수 있으며 용탕온도 670°C , 퀴칭온도 600°C 의 실험 조건을 제외하고, 용탕온도가 높아질수록 평균입경은 낮아졌다. $25\text{-}40 \mu\text{m}$ 의 미세한 반응고 슬러리는 Fig. 1의 a-a2 경로를 통하여 수지상이 단시간에 구형의 고상을 형성하였음을 알 수 있다.

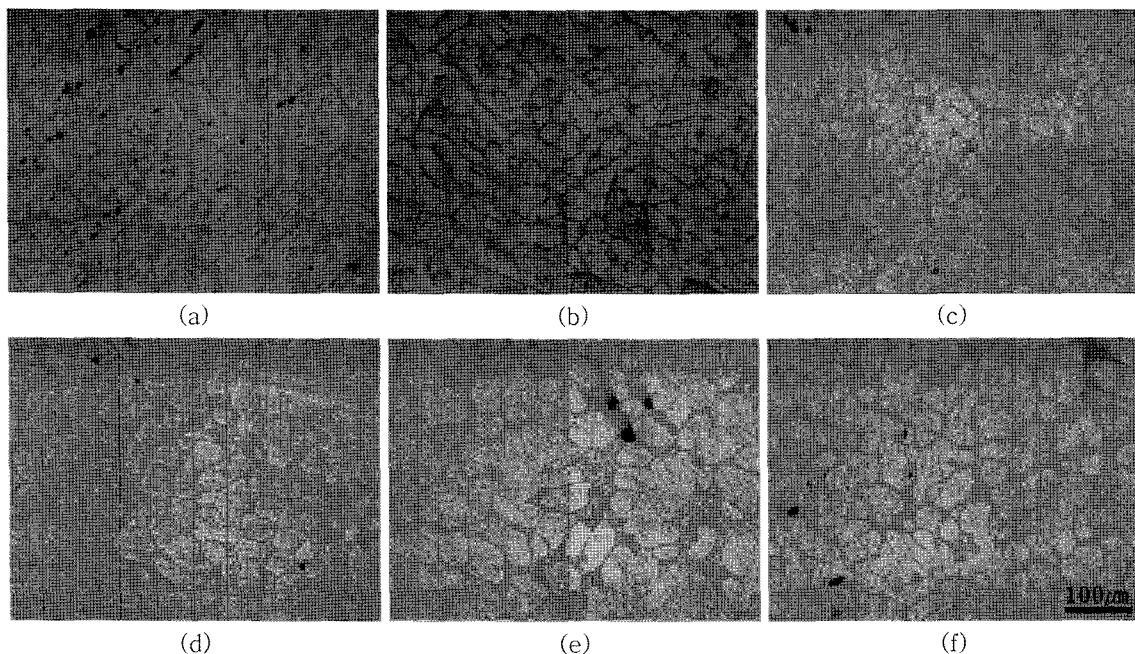


Fig. 3. As-quenched microstructures of In-Ladle DTC rheocasting as a function of (a) melt temperature: 650°C and quenching temperature: 600°C , (b) melt temperature: 670°C and quenching temperature: 600°C , (c) melt temperature: 700°C and quenching temperature: 600°C , (d) melt temperature: 650°C and quenching temperature: 610°C , (e) melt temperature: 670°C and quenching temperature: 610°C , melt temperature: 700°C and quenching temperature: 610°C [18].

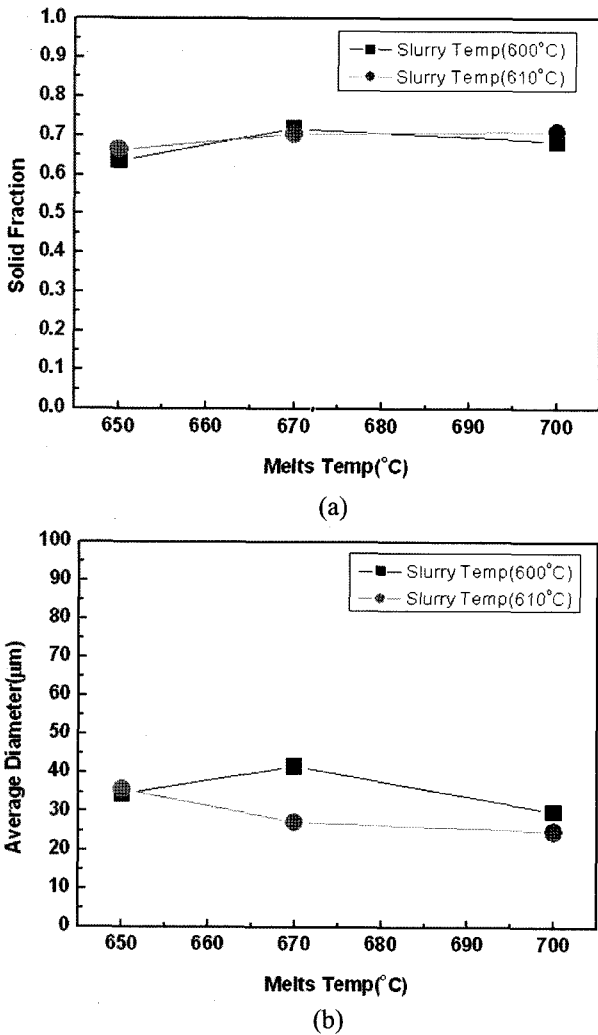


Fig. 4. Results of image analysis on evolution of microstructure of A356 Al alloy by In-Ladle DTC rheocasting as a function of (a) solid fraction and (b) average diameter[18].

5. AZ91D Mg 합금의 In-Ladle DTC rheocasting

AZ91D Mg 합금에 대하여 열전도율이 0.057 cal/cm·sec·°C 인 재료로 두께가 3 mm인 래들을 500°C로 일정하게 예열한 후 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어를 실시하였다. Fig. 5는 650°C의 용탕을 래들에 주입하여 공냉 한 후 전산모사 결과를 바탕으로 Scheil 식에 의한 이론 고상율이 0.24인 590°C가 되었을 때 켄칭한 시편의 미세조직을 나타낸 것이다. AZ91D Mg 합금의 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어 실험에서는 장미상형 반응고 조직이 관찰되었다. 응고 초기 생성된 고상은 수지상 조직으로 성장을 하게 되며 이후 고액 공존 영역에서 유지 시간에 따라 고상은 장미상조직을 거쳐 구상화된 비수지상으로 성장을 한다. Fig. 5에서와 같이 100 µm이상으로 성장한 장미상형 반응고 조직은 구상으로 성장하기 위해서는 수분 이상이 소요되며 15초 이내에 조직제어를 수행하는 In-Ladle DTC rheocasting에서는 구현 할 수 없다. 따라서

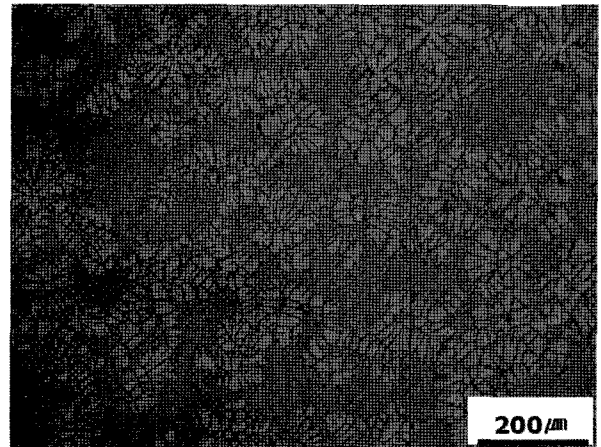


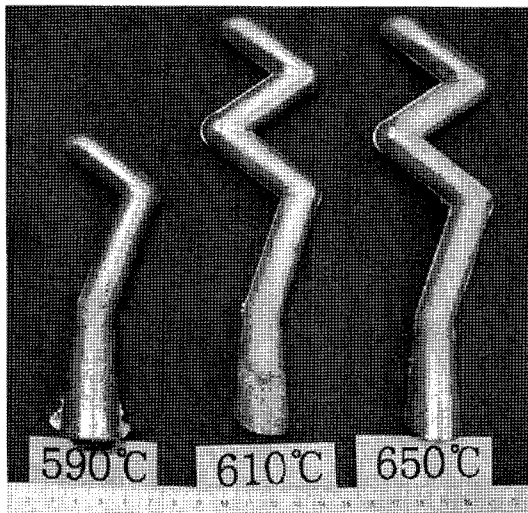
Fig. 5. As-quenched microstructures of AZ91D Mg alloy by In-Ladle DTC rheocasting as a function of melt temperature: 650°C and quenching temperature: 590°C.

AZ91D Mg 합금의 In-Ladle DTC rheocasting 적용을 위해서는, 590°C 이상의 온도에서 조직제어를 수행하여야 하며, 50 µm 이하의 장미상 수지상이 형성 되는 슬러리 온도에서 유지 하여야 구형의 반응고 조직의 형성을 기대할 수 있을 것이라 사료된다.

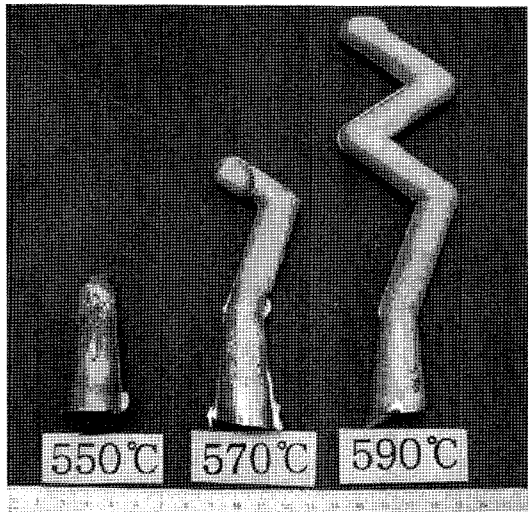
6. A356 Al 합금 및 AZ91D Mg 합금의 In-Ladle DTC rheocasting에 의한 유동성 평가

A356 Al 합금과 AZ91D Mg 합금에 대하여 In-Ladle DTC rheocasting에 의한 유동성 평가를 실시하였다. 유동성 평가를 위해서 지그재그 모양의 금형을 제작하였으며 유동성 평가 실험 시 280°C로 예열 하였다. A356 Al 합금의 유동성 평가를 위해서 래들은 두께가 3 mm이며 열전도율이 0.057 cal/cm·sec·°C인 재료를 사용하였고, 500°C로 예열하였다. 예열된 래들에 670°C의 용탕 주입하였으며 650°C의 용융상태, Scheil 식에 의한 이론 고상율 0.2인 610°C의 슬러리 및 이론 고상율이 0.4인 590°C의 슬러리 세 조건에서 가압성형 하였으며 유동성 측정된 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 용융상태의 유동성 평가 시편의 길이는 177 mm이며 610°C 슬러리의 유동성 평가시편은 176 mm로 큰 차이를 보이지 않았으며 층상 유동(laminar flow)을 형성하며 충전함을 알 수 있었다. 반면 590°C 슬러리의 유동성 평가시편은 89 mm로 큰 차이를 나타내었다.

A356 Al 합금과 동일한 조건으로 AZ91D Mg 합금의 유동성 평가 실험을 실시하였다. 500°C로 예열된 래들에 650°C의 용탕을 주입하였으며 Scheil 식에 의한 이론 고상율 0.24인 590°C의 슬러리, 이론 고상율 0.47인 570°C 슬러리 및 이론 고상율 0.6인 550°C 슬러리 세 조건에서 가압성형 하였으며 유동성 측정된 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 590°C 슬러리의 유동성 평가시편은 177 mm로 층상유동을 형성하며 충전 하였으며 용융상태와 같은 유동성을 나타내었다. 반면 슬러리 온도 570°C 및 슬러리 온도 550°C의 유동성 평가시편은



(a)



(b)

Fig. 4. Fluidity results with respect to pouring temperature; (a) A356 Al alloys and (b) AZ91D Mg alloys.

85 mm 및 3 mm로 슬러리 온도가 낮아짐에 따라 슬러리의 흐름은 큰 폭으로 떨어짐을 알 수 있었다.

7. 결 론

기존 SoD 공정에 비하여 다이캐스팅 장치에 냉각 및 가열 장치 등의 부가장치를 부착하지 않고 래들에서의 용탕 이송 중 응고제어를 통하여 반응고 슬러리를 제조하여 슬리브에 주입하는 In-Ladle DTC rheocasting 기구를 고찰하였으며 공정을 확립하였다. 전산모사를 통한 Al 및 Mg 합금의 In-Ladle DTC rheocasting의 최적 열 제어 조건을 확립하였고, 이를 통한 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어 및 유동성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고액 계면에너지(γ_{SL})와 결정입계에너지(γ_{GB})의 비가 0.5

$\geq \gamma_{SL}/\gamma_{GB}$ 인 합금을 선택하고, 응고과정 중 고액공존 영역에서 래들 내에 용탕의 균일한 열 구배를 실현시켜 미세하고 구형의 고상을 제조할 수 있는 In-Ladle DTC rheocasting을 개발하였다.

2) 전산모사 결과를 바탕으로 A356 Al 합금 및 AZ91D Mg 합금의 In-Ladle DTC rheocasting 조직제어를 수행하였으며 A356 Al 합금에서 균일한 구상의 고상을 얻을 수 있었지만 AZ91D Mg 합금은 구형의 고상이 아닌 장미상형 반응고 조직이 관찰되었다.

4) AZ91D 합금의 In-Ladle DTC rheocasting 적용을 위해서는 590°C 이상의 온도에서 조직제어를 수행하여야 하며, 50 μm 이하의 장미상 수지상이 형성되는 슬러리 온도에서 유지하여야 구형의 반응고 조직의 형성이 가능하다.

6) A356 Al 합금 및 AZ91D Mg 합금에 대하여 In-Ladle DTC rheocasting에 의한 유동성 평가를 실시하였으며, 두 합금 모두 이론 고상율 0.2 내외의 슬러리 온도에서 층류유동을 형성하였으며 액상과 유사한 유동성을 나타내었다.

참고문헌

- [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] 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.
- [5] S. K. Kim and Y. J. Kim : J. Jor. Inst. Met.&Mater., "Control of liquid fraction and microstructure of semisolid AZ91D Mg alloy slurry", 38 (2000) 620-1625.
- [6] S. K. Kim : Ph. D. Thesis, Sungkyunkwan University, Korea, "Microstructural evolution and thixoforming behavior of magnesium alloys, magnesium composites and tool steels" (2001).
- [7] P. W. Willson, T. Z. Kattamis and Y. Shiohara : Mater. Sic., "Coarsening during solidification of aluminium-copper alloys", 23 (1998) 2882-2892.
- [8] W. R. Lone and M. Suery : Mater. Sci. Eng A "Microstructural evolution during partial remelting Al-Si7Mg alloys" A203 (1995) 1-13.
- [9] Ube Industries Ltd., Japan : European patent, #EPO 745 694 A1, Dec. 4 (1996).
- [10] J. Jorstad, M. Thieman and R. Kamm : Proc. of 8th Int'l Conf. of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Fundamental requirements for slurry generation in the sub liquidus casting process and the economics of SLCTM processing" (2004) paper# 07-1.
- [11] J. A. Yurko, R. A. Martinez and M. C. Flemings : Proc. of 8th Int'l Conf. of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "SSRTM: The spheroidal growth route to semi-solid forming" (2004) paper# 02-1.
- [12] Q. Y. Pan, M. Findon and D. Apelian: Proc. of 8th Int'l Conf. of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "The

- continuous rheoconversion process (CRP) : A novel SSM approach" (2004) paper# 02-4.
- [13] G. A. Chadwick, T. J. Hughel and G. F. Bolling : ASM, Metals Park (1969) 99.
- [14] D. A. Porter and K. E. Easterling : Phase Transformation in Metals and Alloys (1981) 133.
- [15] M. Gunduz and J. D. Hunt : Acta Metall., 33 (1985) 1651-1672.
- [16] M. Gunduz and J. D. Hunt : Acta Metall., 37 (1989) 1839-1845.
- [17] M. C. Flemings and R. A. Martinez : Solid State Phenomena, "Principles of Microstructural Formation in Semi-Solid Metal Processing", 116-117 (2006) 1-8.
- [18] J. K. Lee, Y. J. Kim, S. K. Kim and H. H. Jo : J. Kor. Foundrymen's Soc., "In-Ladle Direct Thermal Control Rheocasting of A356 Al alloy", 25 (2005) 254-258.
- [19] 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.