論 文

입자미세화가 Al-4.8%Cu-0.6%Mn 합금의 유동도에 미치는 영향

권영동† · 이진형 · 김경현*

The Effect of Grain Refinement on Fluidity of Al-4.8%Cu-0.6%Mn Alloy

Young-Dong Kwon†, Zin-Hyoung Lee and Kyoung-Hyun Kim*

Abstract

A good fluidity of high strength Al-alloys is required to cast thin wall castings needed to reduce the weight of cast parts. The fluidity, measured as the length to which the metal flows in a standard channel, is affected by many factors, such as the pouring temperature, solidification type of the alloy, the channel thickness, melt head, mold materials and temperature, coating etc. Therefore the experimentally measured fluidity scatters very much and makes it difficult to estimate the fluidity of a melt with a few measurements. The effect of Ti content and grain refinement on the fluidity of high strength aluminum alloy was investigated with a test casting with 8 thin flow channels to reduce the scattering of the fluidity results. The fluidity of Al-4.8%Cu-0.6%Mn, Al-6.2%Zn-1.6%Mg-1.0%Cu and well-known commercial aluminum alloy, A356 was tested. Initial content of Ti was varied from 0 to 0.2wt% and Al-5Ti-B master alloy was added for grain refinement. The flow length varied linearly with superheat. By adding Ti and Al-5Ti-B, the fluidity increased. The grain size decreased by adding grain refiner at the same time. The fluidity depended on the degree of grain refinement. The fluidity of the alloy solidifying in mushy type is improved by grain refinement, because grain refinement increases the solid fraction at the time of flow stoppage.

(Received February 23, 2002)

Key words: grain refinement, dendrite coherency, fluidity

1. 서 론

자동차 구조재료 등의 분야에서 경량화의 필요성이 커짐에 따라 고강도 Al 합금을 써서 주물의 두께를 얇게 하려는 연구가 이루어지고 있다. 이런 얇은 주물을 주조할 때의 특성을 좌우하는 것이 합금의 유동도이다. 유동도는 주입 온도를 증가시킴으로써 향상될 수 있지만, 기공, 수축결함 등의 주조결함이 발생할 수 있다. 따라서, 주입온도를 증가시키지 않고, 유동도를 향상시키는 방법이 필요하다.

기존의 연구에서 일반적으로 Cu, Mg, Si 등의 합금원소를 알루미늄에 첨가하면 유동도는 순수한 알루미늄과 비교해서 급속하게 감소한다. 이러한 경향은, 상업적으로 많이 쓰이는 조성에서 대략적으로 가장 낮은 유동도를 보이게 된다. 그리고, 유동도에 미치는 다른 영향들로는, 채널의 두께, 용탕의 주입 압력, 주형의 온도, 과열, 응고형상, 입자미세화, 표면장력, 불순물 여부 등에 영향을 받는다[1-3].

순수한 알루미늄은 planar type으로 응고하지만, 합금원소를 첨가하게 되면 응고 형상이 mushy type이 된다. Mushy type 응고에서는 등축정의 수지상이 과냉된 flow tip에서 생성되기 시작해 성장하게 된다. 이 과정에서 고상 분율이 증가함에 따라 처음에는 독립적으로 용탕 내에 존재하던 수지상들이, 그 크기를 키워가며 서로 닿게 된다, 그로 인해 용탕의 유동도는 점차 감소하다가 어느 시점에서 용탕은 정지하게 된다.

알루미늄 합금은 일반적으로 Al-Ti 또는 Al-Ti-B 등으로 입자미세화를 하는데, 이 입자미세화는 합금의 응고형태를 바꾸어 유동도에 영향을 줄 수 있다.

기존의 연구에서 입자미세화가 유동도에 미치는 영

한국과학기술원 재료공학과(Department of Materials Science and Engineering, KAIST)
*한국기계연구원 비철재료그룹(Non ferrous Materials Group and Korea Institute of Machinary & Materials)
†E-mail : ydkwon@kaist.ac.kr

향은 다양한 결과가 나와있다. 그 이유로는 유동도가 실험 변수에 영향을 많이 받기 때문에 오차가 발생할 여지가 많기 때문이라 생각된다. Mollard[4]는 Al-4.5%Cu 합금에 0.15%Ti를 첨가하여 입자미세화를 하고, 진공 흡입법으로 유동도를 측정했을 때 유동도가 감소한다고 보고했다. 그 이유로는 입자미세화에 의해 합금의 액상선을 증가시켰기 때문이라고 보인다.

한편 Lang[5]은 입자미세화에 의해 수지상이 균질하게 응고하므로, 유동도가 증가할 수 있다고 예측하였고, Dahle[6] 등은 Al-Si-Mg 합금에 Al-Ti-B 입자미세화제를 첨가하는 실험에서 유동도가 증가한 것을 관찰하였다.

본 실험의 목적은 Al-4.8Cu-0.6Mn과 Al-6.2Zn-1.6Mg-0.5Mn 고강도 알루미늄 합금에서 입자미세화가 유동도에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이다. 실험 변수 차이에 따른 오차를 줄이기 위하여, 8개의 채널로 이루어진 유동도 측정 주형을 사용하였고, 자동화된 유동도 측정장치로 주입온도를 정확하게 기록하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 합금

실험에 사용할 기본 합금으로 Al-4.8Cu-0.6Mn를 준비하였다. 실험 합금의 입자미세화를 위해서 0.2% Ti를 Al-5%Ti 모합금을 사용해 첨가하였고, Al-5%Ti-1%B 입자미세화제를 Ti 조성이 0.03%가 되게 첨가하였다. 그리고 각 방법의 조합으로 입자미세화의 정도를 다양하게 변화시켜 보았다. 그 조성 변화는 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용한 Al-5%Ti-1%B 입자미세화제는 FOSECO Korea에서 공급되었다.

2.2 유동도 측정장치

Fig. 1은 유동도 측정 mold(7)와 측정장치의 개략도이다. (5)번의 채널의 단면은 5 mm 높이이고, 바닥과 윗부분의 너비는 각각 3 mm와 2 mm이다. 용탕이 주입구에 주입되면, 동시에 열전대(3)에서 용탕의 온도가 측정된다. 용탕 표면이 올라가서 일정한 높이에 고정된 접촉 전극(1)에 도달하게 되면 stopper(2)를 잡고있는 arm(6)이 올라가고, 용탕은 채널로 흘러가게 된다. 이때의 용탕 온도는 온도측정장치에 기록된다. 채널은 8개이고, 각각의 길이는 16 cm이며 그 끝은 대기중에 노출되어 있다.

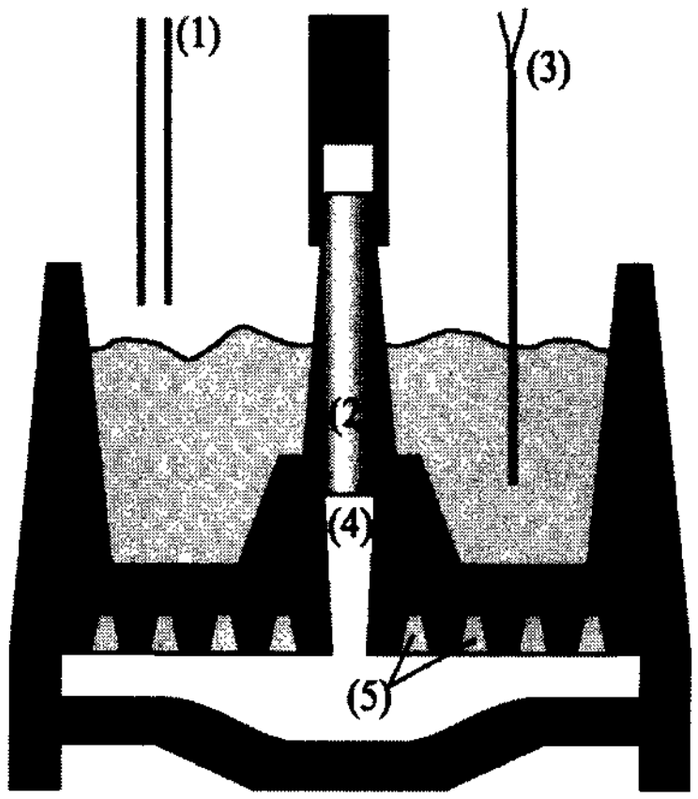


Fig. 1. Schematic diagram of fluidity testing shell mold. (1) contact electrode, (2) stopper, (3) thermocouple, (4) sprue, (5) channels, (6) arm, (7) pouring basin.

실험 합금에서 Ti은 Al-5Ti 모합금으로 Ti 조성이 0.2%가 되도록 첨가되었고, Al-5Ti-1B 입자미세화제는 780°C에서 첨가해서 섞었다. 주입 온도는 660°C와 800°C 사이였고, 유동도 채널에 흐른 길이를 측정하여 유동도를 평가하였다.

유동도 시편의 조직 관찰을 위해서 700°C의 주입온도를 가지는 시편에서, 채널 끝부분에서 10 mm 되는 곳을 절단하여 연마 후 단면을 관찰하였다.

3. 실험결과

Fig. 2는 Al-4.8Cu-0.6Mn 합금에서 Ti과 Ti-B 입자미세화제 첨가로 결정립 크기를 변화시켰을 때의 유동

Table 1. Nominal composition of alloys.

Alloy	Cu	Mn	Ti (as Al-Ti)	Ti (as Al-Ti-B)	Al
Base	4.8	0.6	0	0	Bal.
B + 0.2Ti	4.8	0.6	0.2	0	Bal.
B + g/r	4.8	0.6	0	0.03	Bal.
B + 0.2Ti + g/r	4.8	0.6	0.2	0.03	Bal.

g/r: Al-5%Ti-1%B 입자미세화제

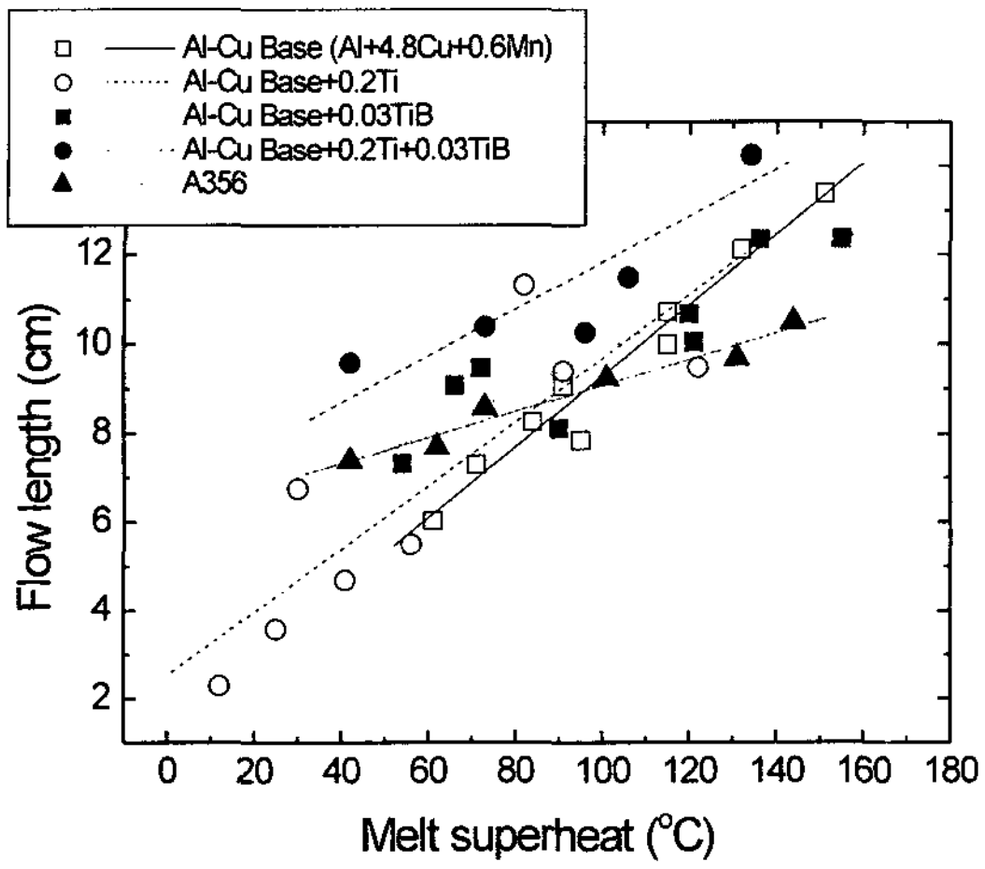


Fig. 2. Flow length vs. melt superheat of each samples.

도와 주입온도의 관계를 나타낸 그림이다. 각 합금에서의 유동도는 비교적 선형으로 나온 것을 알 수 있다. 유동도 실험에 오차가 많이 생긴다는 점을 고려하면 타당한 결과로 보인다. Al-Cu계 기본 합금에서는 주입온도를 50°C 정도 증가시킴으로써 약 4 cm의 유동도를 증가시킬 수 있다. Al-Cu계 기본 합금에 0.2% Ti와, 0.03%TiB 를 각각 첨가함으로써 유동도는 점진적으로 증가하였다. 그리고, 0.2% Ti와, 0.03%TiB 를 함께 첨가하였을 때 유동도가 가장 향상되었음을 알 수 있다.

특이한 점은 일반적으로 주조성이 좋다고 알려진 A356합금의 유동도가 나쁘게 나타난 점이다. 이는 Si가 주 합금원소의 A356의 응고잠열과 응고 도중 생성상이 Al-Cu계 합금과는 상이한데서 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 3은 700°C에서 주입한 각 시편들의 채널 단면의 조직사진이다. Al-Cu계에서는 기본 합금의 결정립 크기가 가장 크고, 서로 맞물려서 복잡한 형상을 하고 있다. 0.2%Ti의 첨가로 결정립 크기는 약간 감소하였고 0.03%Ti 의 TiB 입자미세화제 첨가로, 더욱 감소한 것을 알 수 있다. 그리고 0.2%Ti와 0.03%TiB를 같이 첨가했을 때, 결정립 크기는 가장 작았고, 결정립 자의 형태도 둥근 형태로 나타났다. 유동도 결과와 비

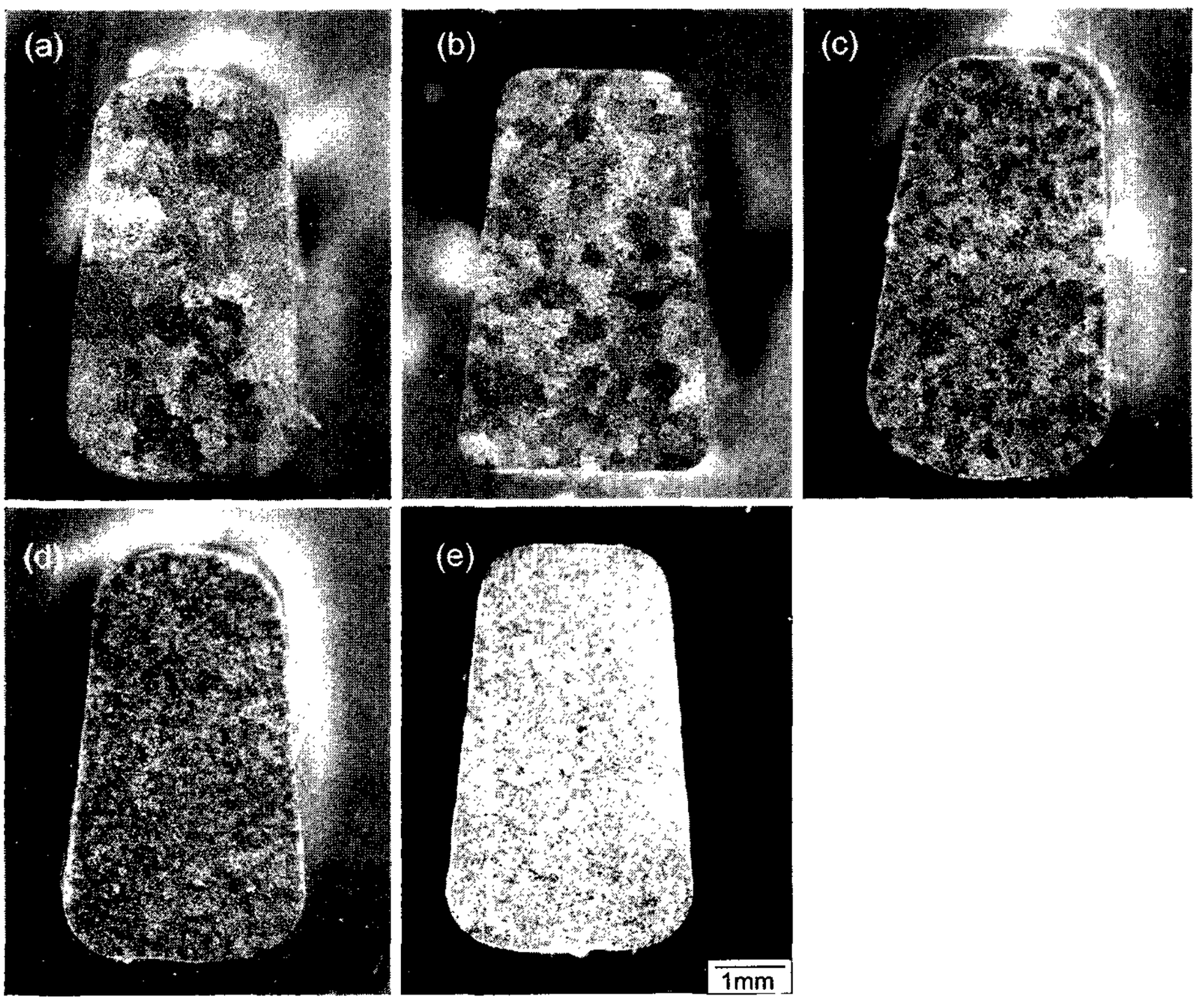


Fig. 3. Optical micrographs of the transverse sections at 10 mm from the end of the flow channels poured at 700°C. (a) Base, (b) Base+0.2Ti, (c) Base+0.03Ti as Al5Ti1B, (d) Base+0.2Ti+0.03Ti as Al5Ti1B, (e) A356

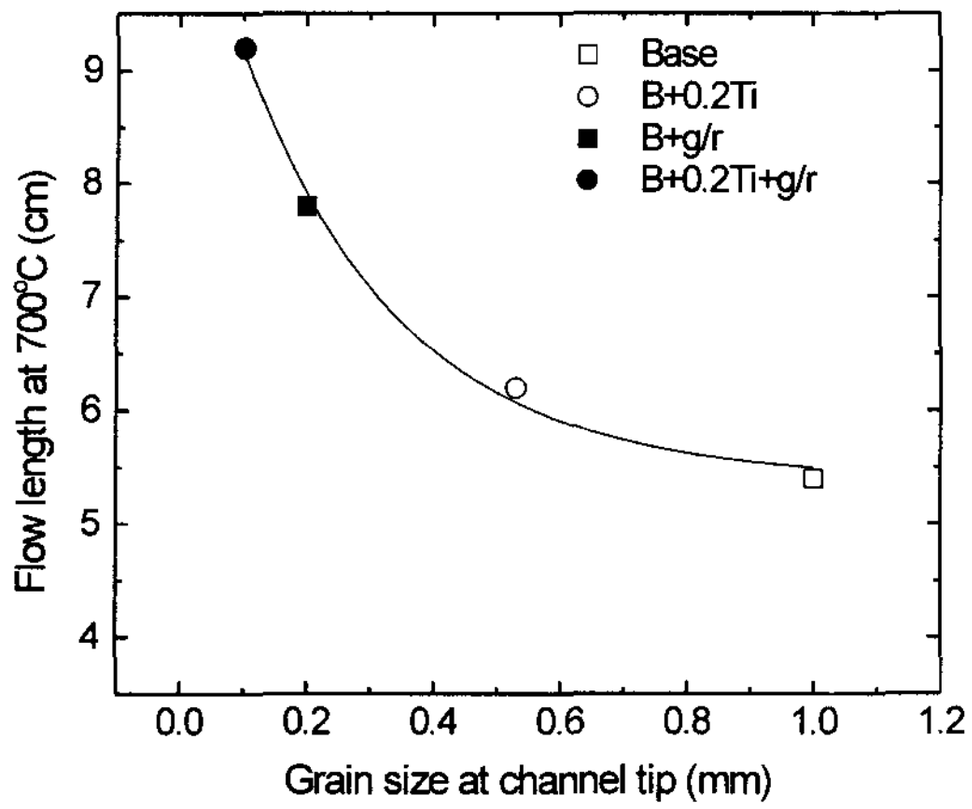


Fig. 4. Flow length vs. grain size of samples at pouring temperature near 700°C.

교할 때, 결정립 크기가 줄어들수록 유동도가 증가했다는 것을 알 수 있다.

입자크기와 유동도 사이의 관계를 Fig. 4에 정리하였다. 입자크기가 1.0 mm인 경우 유동도는 5.5 cm이고 입자크기가 0.1 mm인 경우 유동도는 9.2 cm 정도로 약 67% 정도 향상되었다.

4. 고　찰

유동도는 주어진 크기의 단면을 갖는 주형내의 채널 속을 용탕이 흐르면서 응고하여 정지할 때까지의 거리를 의미하기 때문에 유동도 L_f에 영향을 미치는 인자는 크게 유속 V와 흐르는 시간의 영향인자로 대변되고 이 관계를 정리하면 다음과 같다.[3]:

$$L_f \approx V \cdot \left(\frac{\rho(C_P \Delta T_P + \varphi \Delta H)}{h(T - T_0)^{0.5}} \cdot M \right) \qquad V \approx \left(\frac{2\Delta P}{\rho(1+\zeta)} \right)^{0.5} \tag{1}$$

여기서 $V \approx C_D \sqrt{2gZ - \frac{P_i - P_o}{\rho}}$

따라서 $\Delta P = \rho g Z - (P_i - P_o)$

속도는 용탕 기둥의 높의 Z와 용탕이 주입되는 부위에서의 압력 P_0와 주형내 공간내의 압력 P_i에 의하여 결정되는 ΔP와 탕구계의 모양과 주입속도에 의해서 결정되는 손실계수 ξ (또는 discharge coefficient C_D) 및 밀도 ρ에 의해서 결정된다. 주형내 공기가 잘 빠지지 않거나 주형내 개스 발생량이 많아서 주형내 압력 P_i가 커지면 주입속도가 떨어지고 특히 용탕의 밀도 ρ가 작은 금속이면 더욱 문제가 된다.

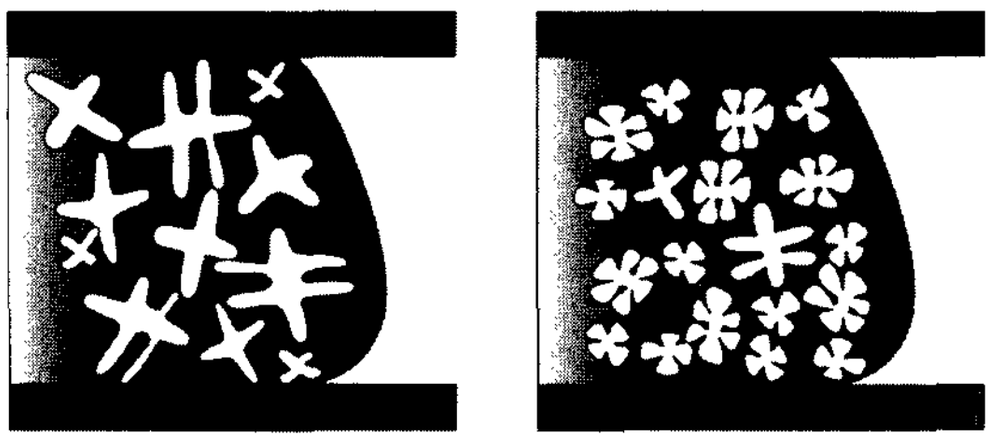
용탕이 흐르는 시간은 용탕의 온도, 비열, 잠열에 의해서 결정되는 용탕에서 흐름이 정지될 때까지 빠져나갈 열량 $\rho(C_p\Delta T_p + \phi\Delta H)$에 비례하고, 주형으로 열이 이동되는 속도 $h(T - T_0)^{0.5}$에 반비례하고 흘러가는 채널의 응고 모듈 M = (부피/표면적)에 비례한다.

흐르는 속도는 최초는 V이지만 응고가 시작됨에 따라 감소하여 고상분율이 ϕ에 도달하면 0이 된다. 따라서 실제로 흘러간 길이 L_f는 식 (1)보다 좀 작지만 열전달 계수 h의 불확실성이 너무 크기 때문에 유동도를 식 (1)로 근사적으로 표시하는 것에는 무리가 없다.

Fig. 2의 결과에서 주입온도에 따른 유동도의 증가 기울기는 식 (1)에서 ΔT_p 앞의 계수인, 용탕의 비열 C_p에 해당한다. A356과의 유동도 비교에서 나타나는 기울기 차는, 다른 합금계이므로 비열이 달라서 나타나는 것이다. 입자미세화제를 첨가한 합금과 기본 합금에서의 기울기 변화는 주입온도가 고온일 때는 mushy zone에서의 입자미세화제의 유동도 증가 효과가 줄어들기 때문으로 보인다.

순수한 금속은 smooth wall type으로 응고하여 용탕이 채널 벽부터 안쪽으로 응고하여 완전히 응고함에 따라 유동이 정지하게 된다. 그러나 합금원소를 첨가하면 응고구간이 넓어지게 되어 수지상를 형성하며 mushy type으로 성장하게 되고, 이때는 선단에서 응고한 미세한 수지상들이 성장하며 고상 분율이 어떤 임계값 (ϕ = 0.2~0.4)이 되면 겉보기 점도가 급격히 증가하여 더 이상 흐름이 이루어지지 않게 되는 것이다.

본 실험에서는 입자미세화를 함으로써 유동도가 향상되었다. 입자미세화가 영향을 미칠 수 있는 요인은 흐름이 정지할 때의 고상분율 ϕ이다. 이렇게 흐름이 정지할 때 용탕 내에서는 등축정의 수지상들이 성장하며 서로 닿게 되어 network를 형성하게 된다. 이것을 dendrite coherency라고 부르고, 그때의 고상분율을 f_{coh}라고 할 수 있다. f_{coh}는 대략 0.2~0.4의 값을 가지는데 그 값을 변하게 하는 요인으로는 냉각속도와 입자크기 등이 있다. L.Arnberg 등은[7] Al-4Cu 합금에서 Ti함량을 변화시켜 가며, 용탕을 냉각시키며 용탕을 저을 때의 토크를 측정하여 f_{coh}를 측정하였다. 그 결과에 따르면, Ti 함량을 증가시켜 입자 크기를 감소시킬



(a) (b)

Fig. 5. Schematic diagram of flow tip with similar solid fraction, (a) without grain refinement, (b) with grain refiner addition.[10]

경우 토크가 급격히 증가하는 dendrite coherency point는 $f_{coh}=0.25$에서 0.55까지 변화하였다. 입자미세화로 인해 수지상이 생성되는 시점은 더 낮은 고상 분율로 변하지만, 입자가 더 조밀하고, 구형의 형태로 성장하기 때문에 높은 고상 분율에서 dendrite coherency가 일어나게 된다.

그리고 유동도는 응고중인 용탕의 반고상 거동에도 영향을 받는다. O. J. ilegbusi와 M. D. Mat[8]은 용탕의 고상분율이 f_{coh}보다 작을 때는 반 응고상 slurry로 거동하고, f_{coh}보다 클 경우에는 porous medium, 그리고 $0.2<f_{coh}<0.625$에서는 non-Newtonian slurry 로 거동한다고 하였다. 그리고 M. Ferrante와 E. de Freitas는[9] Al-4wt%Cu 합금의 반고상 상태에서의 점성을 입자미세화를 하지 않은 용탕과 TiB 입자미세화제를 첨가한 용탕에서 비교하였는데, 반고상 상태를 변형시키는데 드는 힘이 입자 미세화를 하였을 때 훨씬 작게 나타났다. 이는 입자미세화에 의해서 결정의 형태가 서로 맞물린 조대한 수지상에서, 둥글고 조밀한 입자들로 변했기 때문으로 보인다. 유동의 끝 부분에서 등축정 수지상이 생기는 과정에서의 그 차이를 Fig. 5에 도식적으로 묘사하였다. 입자미세화를 하지 않은 경우(a)에는 입자미세화를 한(b) 경우와 고상 분율은 비슷하나, 크게 성장한 수지상들이 이미 맞닿아서 유동을 방해하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 입자미세화를 한 경우에는 고상분율이 더 높을 때 까지 흘러갈 수 있기 때문에 유동도가 향상되는 것이다.

5. 결 론

유동도 측정 실험에서 발생하는 다양한 오차들을 자동화된 유동도 측정장치와 다채널의 유동도 측정 주형을 사용하여 최소화 할 수 있었다. 또한 유동도 채널 내부의 입자 크기가 작아질수록 유동도가 크게 향상된다는 것을 알 수 있었다. 이것은 mushy type으로 응고하는 합금에서, 입자미세화를 통해 응고하는 수지상의 형태를 미세하게 바꿈으로써 dendrite coherency 시점을 늦출 수 있기 때문으로 설명된다.

입자 미세화를 통하여 채널 내부의 입자크기가 0.6 mm에서 0.1 mm로 될 경우 향상되는 유동도 길이는 약 50%가 증가하였으며 이것은 주입온도를 40°C 올려준 것에 해당하였다. 이러한 결과를 이용하여 유동도를 향상시키기 위하여 과도하게 주입온도를 올리기 전에 효과적인 입자미세화가 이루어졌는지 검토할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 민군겸용기술사업 연구개발과제와 BK21 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] Francois R. Mollard, Merton C. Flemings and Eisuke F. Niyama, J. of Metals, Nov. (1987) 34
[2] Merton C. Flemings, Solidification Processing, McGraw-hill (1974) 214
[3] Von Siegfried Engler and Zin-Hyoung Lee, Giesserei Forschung, 30 Jan. (1978) 107
[4] F. R. Mollard, M. S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1960)
[5] G. Lang, Aluminum part I, 48 (1972) 664
[6] A. K. Dahle, P. A. Tondel, C. J. Raradies and L. Arnberg, Met. and Mat. Trans. A, 27A (1996) 2305
[7] L. Arnberg, G. Chai and L. Backerud, Mat. Sci. Eng., A173 (1993) 101
[8] O. J. Ilegbusi and M. D. Mat, Mat. Sci. Eng. A247 (1998) 135
[9] M. Ferrante and E. de Freitas, Mat. Sci. Eng. A271 (1999) 172
[10] Y. D. Kwon, K. H. Kim and Z. H. Lee, In Proc. 130th TMS annual conference, New Orleans, Louisiana (2001) 1281