

논문

실시간 엑스레이 관찰을 통한 알루미늄 합금의 고액 공존구간내 유동도와 점성도 평가

조인성[†] · 이학주*

한국생산기술연구원 디지털설계센터(COE)

*동명대학교 공과대학 조선공학과

Evaluation of Fluidity and Viscosity of Aluminum Alloys in the Mushy Zone by Using Real-time X-ray Observation

In-Sung Cho[†] and Hagju Lee*

Center for e-Design, KITECH, Incheon, 406-840, Korea

*Department of Naval Architecture, Tongmyong University, Busan, 608-711, Korea

Abstract

In the present study the new method was proposed by using the real-time X-ray observation and metal die in order to evaluate fluidity and viscosity of the molten metal during pouring into the mold. The special mold for the present experiment was introduced since X-ray could not transmit thick mold wall and scatter the image of the molten metal during pouring. The present study also discussed for evaluation of viscosities by using the flow data from radioscopy images, and the viscosities of six commercial aluminum alloys were evaluated and compared.

Keywords: Aluminum alloys, Viscosity, X-ray, Fluidity, Die-casting.

(Received May 12, 2006; Accepted June 18, 2006)

1. 서 론

응고현상은 전반적으로 용융금속을 주형안에 주입하는 것으로 시작되어, 용탕금속의 온도가 감소되고, 여러 주조공정의 특징에 따라 유동 패턴이 달라지게 된다[1]. 이러한 유동 패턴은, 충전과정중에 외부 응고 쉘 또는 적당한 고상율을 갖는 mushy 상태에 따라서 달라지게 된다. 게다가, 특정한 열구배등이 응고 수축공 및 열적 수축에도 영향을 미쳐 이러한 응고현상은 불체의 흐름 및 응력분포등에 영향을 받는 상당히 복잡한 현상이다[2].

이러한 복잡한 응고현상을 예측하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 분야가 적용되고 있으며, 컴퓨터의 놀라운 발전과 함께 점차로 복잡한 응고현상까지도 고려하여 더욱더 정확한 응고현상을 모사하게 되었다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션은 비 숙련자도 간단히 응고현상을 모사할 수 있게끔 발전을 이룩해 왔다. 그러나 응고현상 계산시 가장 중요하다고 할 수 있는 열물성치를 구하기 위해서는 상당히 많은 시간을 투자하여야 하며, 결정하기가 힘든 계수로 알려져 있으며, 게다가 이러한 열물성치의 확보에 대해서는 아직까지도 많은 노력이 필요한 상황

이다[3,4].

특히, 열물성치 중에서 금속의 응고시 가장 영향을 줄 수 있는 점성도에 대한 열물성치 확보는 상당히 어려워 아직까지도 액체상태의 점성도 값을 사용하고 있으나, 적절한 값을 대입하고 있는 실정이다. 이는 대부분의 고액 공존상태의 점성도 측정시 회전자에 의한 stress-strain 값으로 예측하고 있고 [5], 이는 합금의 경우 수지상의 파괴등, 정확한 응고조직을 모사하지 못하여 부정확한 결과를 얻을 수 있는 위험성을 가지고 있다.

또한 용탕이 흐를 수 있는 유동한계 고상율은, 현재까지 2원계 합금에서만 연구만이 보고되었고, 상용합금에 대해서는 보고된 바 없다. 실제 주조공장에 적용하기 위해서는 상용합금의 한계 고상율의 데이터 확보도 중요하다 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 X-ray 비파괴 검사장치를 이용하여 유동과정을 실시간으로 측정함으로써, 기존의 점성도 측정방법과는 다른 방법으로 점성도를 측정하고자 하였다. 6개의 상용 알루미늄합금에 대하여 실험을 하여 용탕이 정지하는 한계온도를 측정하였으며, 이에 따른 고액 공존구간의 점성도를 측정하였다.

[†]E-mail : ischo@kitech.re.kr

2. 실험 방법

X-ray 비파괴검사장치에 사용될 자동주입장치 및 유동도 급형을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 비파괴 검사장치는 ANDREX 사의 장비를 이용하였으며, X-ray의 source voltage는 225 kV 이고, 검출단으로는 Image Intensifier 및 CCD Camera가 이용되었다. CCD Camera에는 실시간 영상 획득장치를 사용하여 1초 30frame의 영상을 얻을 수 있었다. 자동 주입장치는 도가니 tilt형식으로 주입되며 유동도 측정을 위한 급형은 5 mm두께의 판상 주물을 제조할 수 있으며, 용탕 진행방향에 3 mm간격으로 지름 0.1 mm열전대를 설치하여 주입시 온도를 측정하였다. 한편 X-ray가 투과되는 곳에는 Kaowool sheet를 이용하여 용탕을 단속하고 X-ray가 투과될 수 있도록 하였다.

실험순서는 Fig. 2에 보는 바와 같다. 비파괴 검사장치의 X-ray 측정을 시작함과 동시에 자동주입장치에서 용탕이 급형으로 자동주입하게 된다. 이와 동시에 영상획득장치 및 온도측정장치가 동시에 기동 되어 영상 및 온도를 동시에 측정하게 된다.

주물의 유동도 실험은 6종의 알루미늄 상용합금 (A390, AC4C, AC8A, AC4B, AC2B, AC7A)에 대하여 실시되었으며, 용탕이 정지하는 위치의 열전대 온도를 측정, 정지하는 위치에서의 온도를 측정하였다.

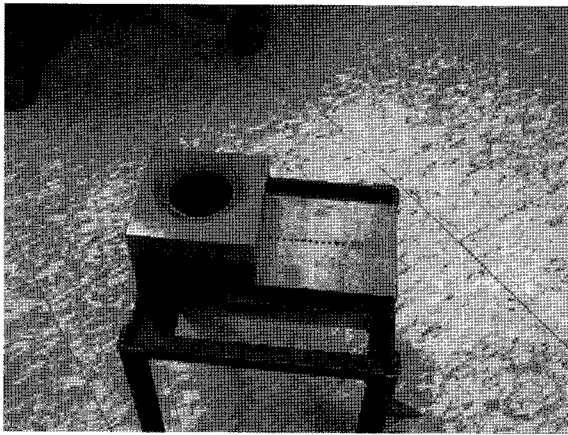


Fig. 1. Photograph of mold for the fluidity test with thermocouple holes.

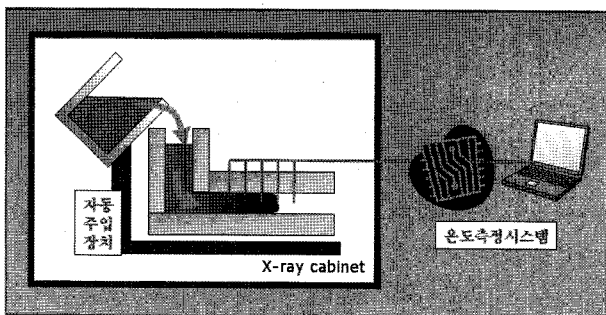


Fig. 2. Schematic diagram for X-ray fluidity test.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동도 온도 측정

실험조건이 셋업된 후 온도측정 데이터를 Fig. 3에 보였다. 시편 및 열전대의 위치를 분석하여 용탕이 정지한 곳과 가장 근접한 곳의 최대 온도를 읽어 (Ch4) 용탕정지온도가 553°C로 기록됨을 알 수 있었다. AC4C (Al-7Si-0.3Mg)의 고상선은 542°C이며 Scheil응고를 가정한다면, 2원계 합금 가정, Al-Si 평형분배계수 0.14라고 할때 553°C에서 한계고상율은 0.61이다. Al-6.2%Si의 고상율을 측정한 Takahashi의 연구[6]와 비교하여 볼때, (한계고상율 0.66) 비교적 일치함을 알 수 있다.

Table 1 및 Fig. 4는 각 합금에서의 용탕정지시의 온도를 나타낸 것이다. 고상선 온도와 비교하여 볼때 측정값들이 많이 다름을 알 수 있으며, 합금의 종류에 따라서도 많은 차이를 보였다. 특히 Al-Si계 상용합금인 AC2B와 AC4B, AC8A의

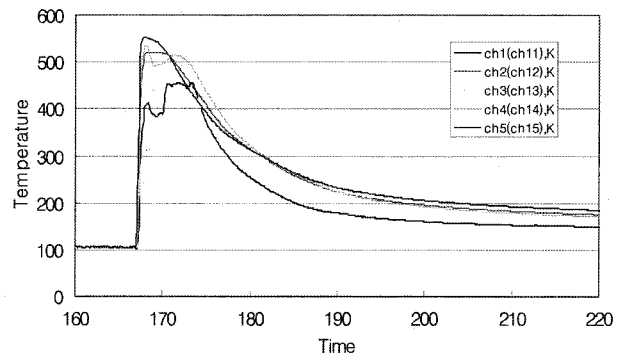


Fig. 3. Cooling curves for AC4C alloy in the present study.

Table 1. List of melt stop temperatures for six commercial aluminum alloys.

Alloy	Measured	Solidus	Measured - Solidus	Liquidus - Solidus
AC8A	520.6	495.0	25.6	67.0
AC4B	551.6	516.0	35.6	71.0
AC2B	520.1	482.0	38.1	128.0
AC7A	477.1	468.0	9.1	162.0
A390	487.3	492.0	-4.7	144.0
AC4C	553.3	542.0	9.3	71.0

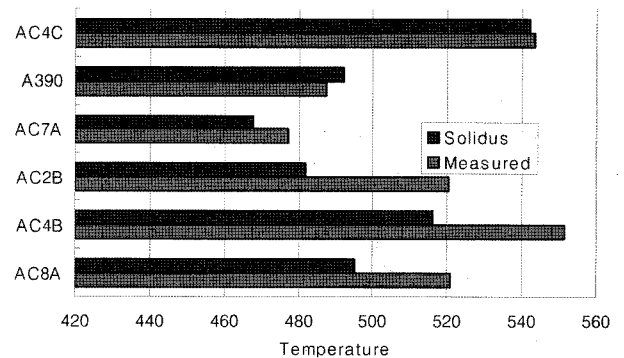


Fig. 4. Graph for melt stop temperatures for six commercial aluminum alloys.

경우 고상선 온도와 차이가 많았으며, Si함량이 더 많은 A390 합금 및 Al-Mg계 AC7A합금, AC4C합금의 경우는 큰 차이를 보이지 않았다. 고액공존구간 온도차이와 측정온도와의 관계는 뚜렷한 경향은 보이지 않았다. 또한 A390합금의 경우 용탕 정지온도가 고상선보다 더 낮은 경우를 보였는데, 이는 표에 제시한 고상선은 평형상태에서의 고상선이며, 응고가 급격히 진행되는 경우 고상선은 평형상태보다 더 낮게 형성되고, 그에 따라 용탕정지온도도 낮아져 역전현상이 보이는 것으로 사료된다.

합금종에 따른 용탕의 정지온도가 다른 이유는 합금종마다 각각의 응고양상이 모두 다르게 되고, 이에 따른 용탕 흐름의 한계고상율이 다르기 때문이다. 그러나, 현재 상용합금의 한계 고상율을 계산하는 방법으로는 열역학적인 방법으로 해석이 가능하나 열역학적인 방법은 응고 양상을 계산하기가 힘들다. 현재의 상용 주조공정 유동해석 소프트웨어는 이러한 용탕 흐름이 멈추는 온도를 고려하지 않고 있어 응고에 의한 미충전 결함 상황이 발생하였을때, 이 온도를 고려하면 더욱 정확한 미충전 양상을 예측하는데 사용할 수 있으리라 생각된다.

3.2 고액 공존구간의 점성도 측정

3.2.1 용탕 전진속도에 의한 점성도 계산 모델링

X-ray 유동도 실험으로는 온도뿐만 아니라 용탕의 응고시 그 전진속도를 실시간으로 관찰할 수 있는 잇점이 있다. 이 전진속도를 이용 용탕의 흐름을 Poiseuille flow로 가정하면 간접적으로 용탕 응고시의 점도, 즉 고액공존구간의 점도의 변화를 계산할 수 있다. 이는 다음의 방법으로 계산된다.

Fig. 5와 같이 유동도 실험을 모델링 할 수 있으며, 용탕의 흐름속도와 금형(주형)벽과의 마찰에 의한 전단응력 τ 는

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = -4\mu \frac{u_0}{d} \tag{1}$$

으로 표시된다. 용탕이 금형(주형)내를 흐를 수 있는 힘은 주입구로부터의 금속수두압(metallostatic pressure, ΔP)이며 이와 전단응력과의 관계는

$$w \cdot d \cdot \Delta P + 2(w+d)l\tau = 0 \tag{2}$$

으로 표시가능하다.

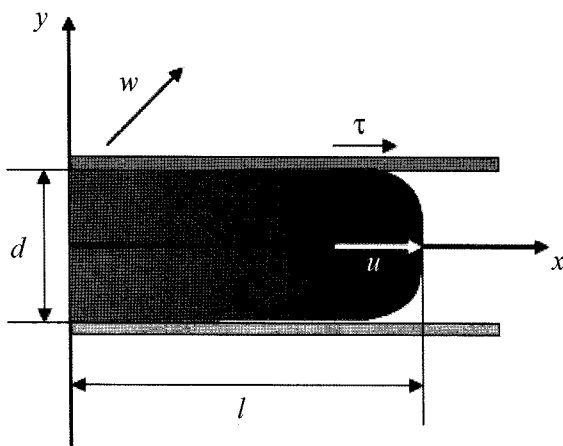


Fig. 5. Schematic drawing for melt flow in the metal die.

또한 위의 식을 정리하고, 금속수두압에 대하여 다음과 같은 적용하면, 용탕의 점도를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta P = \rho g \Delta h \tag{3}$$

$$u_m = 2u_0/3$$

$$\mu = \frac{\rho g \Delta h}{16} \frac{d^2}{u_m \cdot l} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

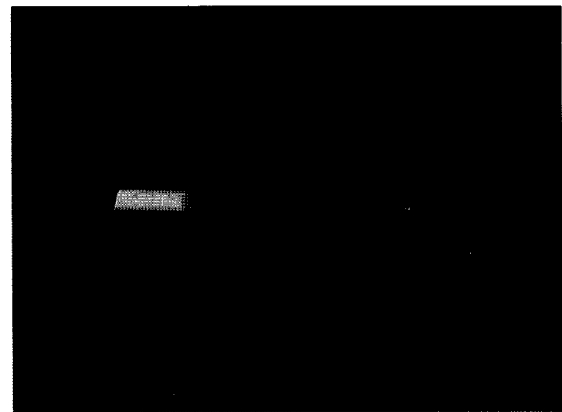
이때, μ 는 점성계수, Δh 는 수두, ν 는 동점성계수, ρ 는 밀도이다.

용탕의 시간에 따른 점성계수를 계산하기 위하여 다음과 같은 과정으로 계산하여 점성계수를 얻었다.

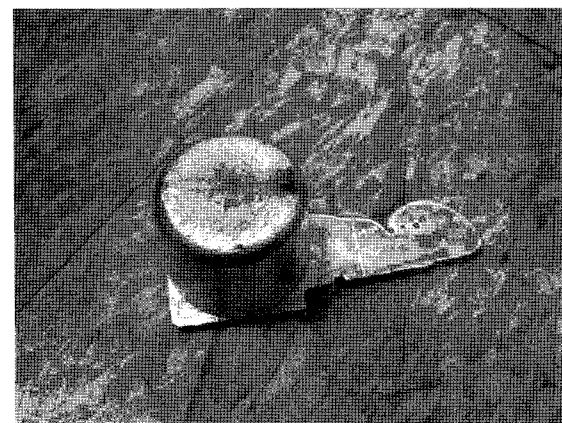
- (가) X-ray 동영상 검색을 통한 시간에 따른 용탕 전진 거리 측정
- (나) 전진거리를 바탕으로 한 용탕 속도 측정
- (다) 열전대 온도 측정을 바탕으로 한 냉각속도 계산 → 용탕 온도와 용탕 속도의 관계 그래프 도시
- (라) Hagen-Poiseuille 식을 바탕으로 한 용탕온도와 점성계수와의 관계 계산

3.2.2 점성측정 결과

Fig. 6은 X-ray 유동도 실험과정을 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 용탕은 오른쪽에서 왼쪽으로 흐르며



(a)



(b)

Fig. 6. (a) X-ray radiograph during X-ray fluidity test in A390 alloy and (b) the specimen.

어느순간 정지하게 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)는 실험후의 시편 사진을 보여주고 있다.

Fig. 7~Fig. 9는 각 알루미늄 합금의 용탕전진거리, 온도에 따른 속도, 온도에 따른 동점성계수의 변화를 나타내고 있다. 3.2.1절의 Hagen-Poiseuille flow를 가정하여 동점성 계수 계산시 용탕전진거리를 구하고, 이에 따른 속도를 구하며, 또한

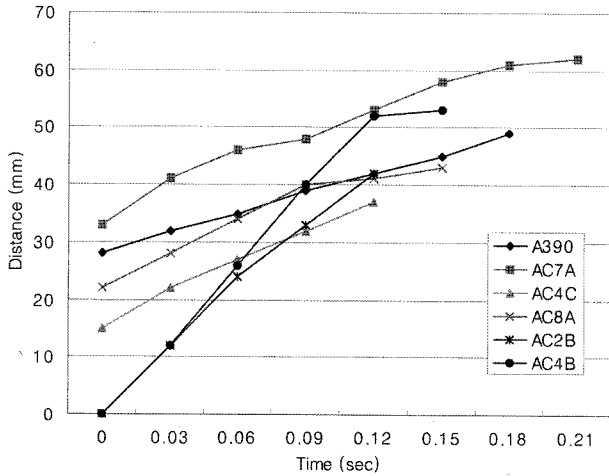


Fig. 7. Distance of melt run with time.

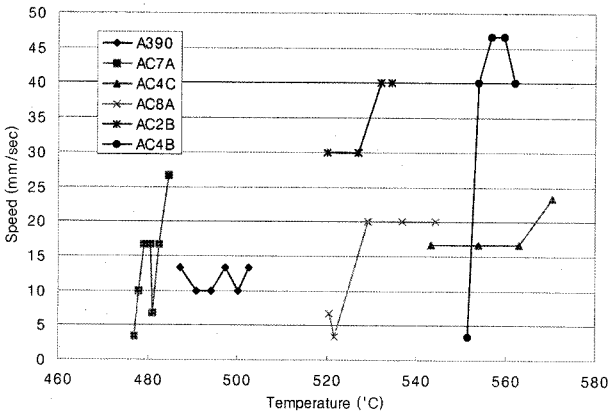


Fig. 8. Graph for melt temperature with melt front speed.

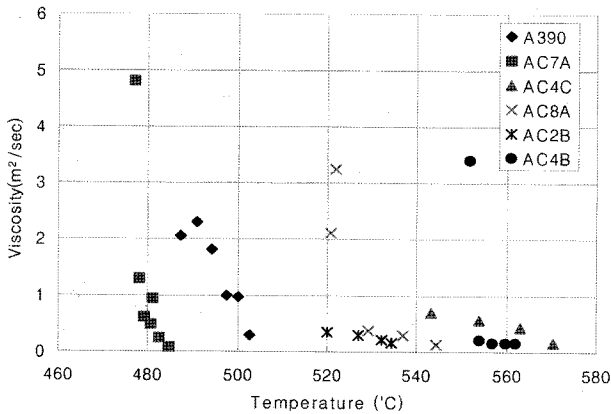


Fig. 9. Graph for kinematic viscosity with melt temperature.

여러위치에 설치한 열전대의 온도를 바탕으로 온도에 따른 속도의 변화를 구할 수 있다. 이에 동점성 계수 계산식을 적용하면, Fig. 9와 같은 온도에 따른 동점성 계수 변화의 그래프를 얻을 수 있다. 일반적으로 합금응고시 수지상 network의 생성 및 성장으로 인하여 용탕의 점성이 증가하게 되는데, 그래프는 이러한 경향을 보여주고 있으며, 동점성계수의 급격한 상승곡선을 관찰할 수 있었다. Al-Si계에서 비교적 낮은 Si함유량을 가지고 있는 AC2B, AC4B, AC4C, AC8A합금에 대해서는 동점성계수가 완만하게 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있으나, 일반적으로 유동도가 불량하다고 알려진 Al-Mg계의 AC7A합금의 경우와 높은 Si함유량을 가진 A390합금의 동점성계수는 온도 변화에 따라 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있었다. 이는 A390합금의 경우 유동도가 아주 좋은 것으로 알려져 있으나, 점도에서는 급격한 상승을 보였는데, 이는 유동도는 동점성계수를 직접적으로는 관련지어 생각할 수 없다는 것을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 직접적인 X-Ray 관찰을 통하여 고액 구간의 점성도를 계산하는 새로운 방법을 제시하고 상용 알루미늄 합금에 대하여 그 점성도를 측정하였으며, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주조시 용탕이 응고되어 정지하는 때의 온도를 측정하였으며, 기존의 연구 결과와 비교하여 비교적 비슷한 경향의 결과를 얻었다.
- 2) 주조시의 용탕 흐름의 유동 모델링을 통하여, 고액 공존 구간에서의 상용 알루미늄 합금의 점성도를 계산할 수 있었으며, 알루미늄 합금의 종류에 따라 서로 상이한 점성도의 변화를 얻을 수 있었다.
- 3) 본 연구결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 열유동해석의 열물성치 데이터로 이용함으로써 좀더 정확한 용탕흐름을 예측할 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Elliott, "Eutectic Solidification Processing", Butterworths, London, (1983) 137.
- [2] J. Cambell, "Castings", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, (1991) 250.
- [3] A. K. Dahle and D. H. StJohn, "Rheological behaviour of the mushy zone and its effect on the formation of casting defects during solidification", Acta Mater., 47 (1999) 31-41.
- [4] R. H. Davies, A. T. Dinsdale, J. A. Gisby, J. A. J. Robinson and S. M. Martin, "MTDATA - thermodynamic and phase equilibrium software from the national physical laboratory", CALPHAD 2002, 26 (2002) 229-271.
- [5] D. R. Poirier, K. Yeum and A. L. Maples, "A thermodynamic prediction for microporosity formation in Aluminum-rich Al-Cu alloys", Metall. Trans. A, 18A (1987) 1979-1987.
- [6] T. Takahashi, M. Kudoh and K. Yodoshi, "A Study on the Fluidity of the Liquid in the Solid-Liquid Coexisting Zone", J. Japan Inst. Metals, 43 (1979) 1086-1091.