

논문

A365 알루미늄합금의 유동도에 미치는 진공흡입조형 조건의 영향

오영진 · 김은식 · 김명한[†] · 홍영명*충북대학교 공과대학 재료공학과
*한국생산기술연구원

The Effects of Vacuum-Molding Process Conditions on the Fluidity of A356 Alloy

Youngjin Oh, Eunsik Kim, Myunghan Kim[†], and Youngmyung Hong*

Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, 12 Gaesin-dong, Cheongju 361-763, Korea

*Korea Institute of Industrial Technology, 994-32 Dongchun-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-103, Korea

Abstract

The vacuum molding process is one of the clean-foundry molding-processes that can recycle molding sands repeatedly, because molding can be accomplished by introducing vacuum only among dry molding sands in flask. The effects of molding conditions such as sand grain fineness, vacuum pressure and coating thickness on the fluidity of A356 Al alloy were studied and the results was obtained that the fluidity length was decreased as the sand grain fineness number and coating thickness were decreased and the vacuum pressure was increased. A large amount of heat removal from the molten metal resulting from the vacuum suction during the vacuum molding process was the principal cause of this decrease in fluidity.

Key words: Vacuum molding process, Fluidity, A356 alloy, Sand grain fineness, Vacuum pressure, Coating thickness.

(Received July 1, 2005; Accepted August 19, 2005)

1. 서 론

용융금속의 유동도는 주어진 크기의 단면을 갖는 주형내의 탕도 속을 용탕이 흐르면서 응고하여 정지할 때까지의 거리로 측정되며 일반적으로 유동도에 영향을 주는 요인으로는 용탕의 주입온도, 주입압력, 주형온도, 입자미세화제 첨가, 표면장력, 점도, 탕도의 두께, 불순물의 존재 등이 있다[1-5] 그러나 진공 흡입조형법(Vacuum Molding Process)[6-9]에서는 유동도에 영향을 주는 이러한 일반적인 요인 외에 진공흡입조형법이라는 특수한 프로세스에 기인하는 요인들이 추가로 존재하리라 예상되나 이에 대한 연구는 발표된 바 없다. 이러한 진공흡입조형법은 건조된 주물사에 점결제를 전혀 사용하지 않고 진공장치에 의한 감압력에 의해 주형을 제조하는 방법으로, 이때 주형은 EVA film으로 둘러싸이게 되고 주형내부는 약 500 mmHg 이하의 감압상태로 유지된다. 그러나 용탕이 주형공간에 충전될 때 그 열에 의해 주형벽의 EVA film은 소실되고 이때 소실된 film 부위를 통해 감압에 의한 흡입력이 작용하여 이에 따른 용탕의 유동도의 변화가 예상되고, 이 흡입력에 영향을 주는 요인으로 주물사입도, 진공도 및 도형체의 두께가 영향을 미치리라 본다.

본 연구에서는 주입온도, 주입압력 및 탕도의 두께를 일정하

게 고정시킨 후, 주물사입도, 감압도 및 도형체두께를 변수로 하여 이러한 변수가 A356 알루미늄합금의 주조시 유동도에 미치는 영향을 조사 분석하고자 하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 유동도시험을 위해 사용된 모형의 컷수는 10(W)×4(T)×296(L)mm이다. 여기서 탕도의 간격은 용탕이 충전될 때 인접한 주형공간에 열의 영향을 적게 주도록 하기 위해 가능한 최대로 떨어지도록 하였으며, 본 실험에서는 25 mm의 간격을 유지시켰다. 또한 용탕이 채널에 충전될 때 용탕온도를 측정하기 위해 K-type열전대(Ø0.127 mm)를 그림과 같이 위치별로 설치하였고, 이때 주형공간내의 감압의 변화를 조사하기 위해 유동패턴 말단에 압력센서를 설치하였다. 주조금속으로는 상용 A356 Al합금을 이용하였고, 전기로를 이용하여 700°C에서 용해시킨 후 고순도 Ar gas로 2분간 교반하여 탈가스처리를 하였고, 660°C의 주입온도에서 용탕을 주입하였다. 주물사는 인조규사를 사용하였고, 주물사입도가 유동도에 미치는 영향을 조사하기 위해 진공도를 450 mmHg로 고정시킨 후 도형체를 도포하지 않은 상태에서 주물사의 입도지수가 각각 AFS gfn 66, 109 및 140일 때 유동도 실험을 하였다. 진공도에 따른

†E-mail : myunghan@chungbuk.ac.kr

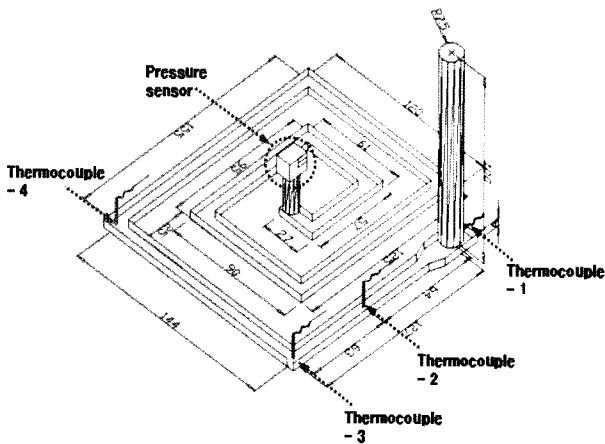


Fig. 1. A schematic drawing of the pattern for fluidity test in vacuum molding process.

유동도의 변화를 조사하기 위해서는 사용 주물사입도(AFS gfn 140)를 고정시킨 후 도형체를 도포하지 않은 상태에서 진공도를 각각 250, 450 및 650 mmHg로 변화시켜 실험하였고, 도형체두께가 유동도에 미치는 영향을 조사하기 위해 사용 주물사입도(AFS gfn 140)와 진공도(450 mmHg)를 고정시키고 도형체두께를 0, 0.05 및 0.1 mm로 변화시켜 실험을 하였다. 이때 도형체는 알콜성 올린빈계(V-Cote)를 사용하여 스프레이방식으로 도포하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 주물사입도에 따른 유동길이의 변화

Fig. 2는 진공도 450 mmHg에서 주물사입도를 변수로 하여 구조한 유동시험을 보여주고 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 유동시

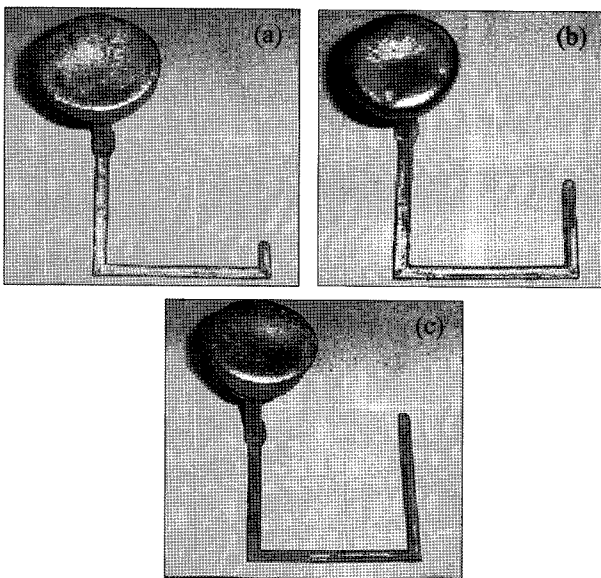


Fig. 2. Test castings for fluidity measurement according to sand grain fineness; (a) AFS gfn 66, (b) AFS gfn 109, and (c) AFS gfn 140.

편의 유동길이를 실측하여 나타난 결과로써 주물사 입도지수가 66, 109 및 140일 때 유동길이는 각각 297 mm, 348 mm 및 414 mm로 주물사 입도지수에 비례하여 유동길이가 증가함을 알 수 있다. 즉, 주물사입도가 작아짐에 따라 유동길이는 증가하는 결과를 보이고 있다. 용탕의 주입시 EVA film에 둘러싸여 형성된 주형내부의 진공이 파괴되고 이에 따른 흡입력에 의해 용탕에서 주형으로 열이 흡수되는데 이때 주물사입도가 증가함에 따라 열 흡수량도 크게 되어 이에 따른 용탕의 온도 강하가 증가하게 되고 결과적으로 용탕의 유동길이가 감소되는 것으로 판단된다. 이를 입증하기 위해 주물사 입도지수별 냉각속도를 측정하였다. Fig. 4는 Fig. 1에 나타난 유동도 패턴의 입구로부터 64 mm 떨어져 있는 열전대(Thermocouple-2)를 통해 입도지수별 시간에 따른 용탕온도의 변화를 측정된 결과이다. 여기서 주물사의 입도지수가 클수록 온도강하가 완만한 것을 알 수 있고, 평균냉각속도는 입도지수 140, 109 및 66에

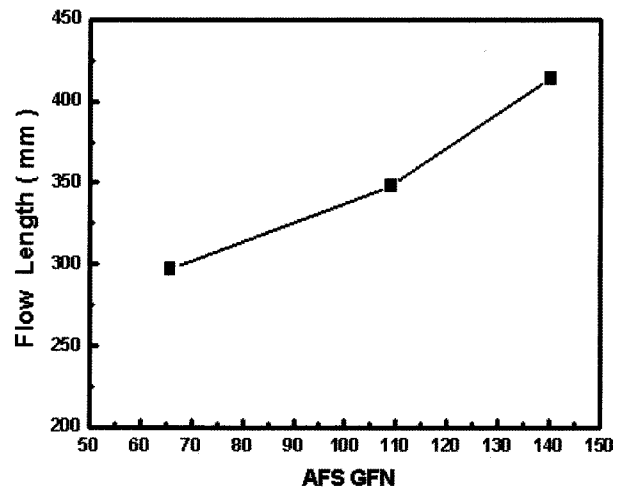


Fig. 3. The fluidity of A356 alloy according to sand grain fineness in vacuum molding process.

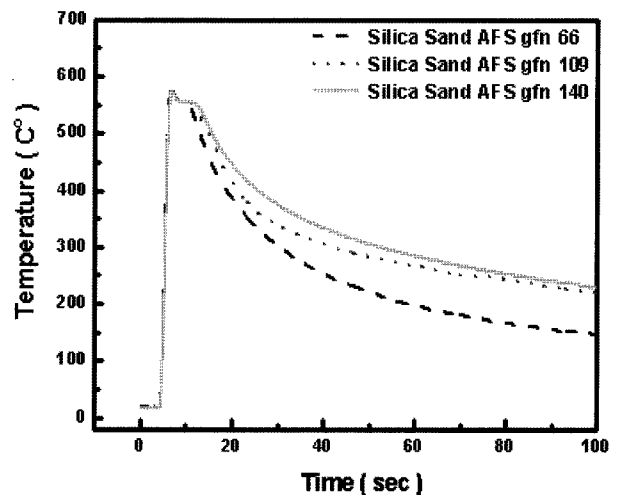


Fig. 4. Temperature profiles during casting according to sand grain fineness at the location of TH-2 in vacuum-induced sand mold.

서 각각 7.8°C/sec, 8.9°C/sec 및 9.4°C/sec로 입도가 클수록 비교적 빠른 냉각이 일어남을 알 수 있었다.

3.2 진공도에 따른 유동길이의 영향

Fig. 5는 주입온도를 660°C, 주물사입도를 AFS gfn 140으로 고정시킨 후, 진공도를 250 mmHg, 450 mmHg 및 650 mmHg로 변화시켜가며 용탕을 주입했을 때 얻어진 유동시편을 보여주고 있다. Fig. 6은 Fig. 5의 결과로부터 유동길이를 측정 한 결과이며, 250 mmHg, 450 mmHg 및 650 mmHg의 진공도에서 유동길이는 각각 249 mm, 414 mm, 533 mm이었다. 여기서 유동길이는 진공도가 250 mmHg에서 650 mmHg로 감소됨에 따라 거의 직선적으로 증가되었고, 이러한 결과는 높은 진공도(250 mmHg)에서는 소실된 film을 통한 주물사로의 흡인 압력이 낮은 진공도(650 mmHg)보다 크고 이에 따른 용탕의

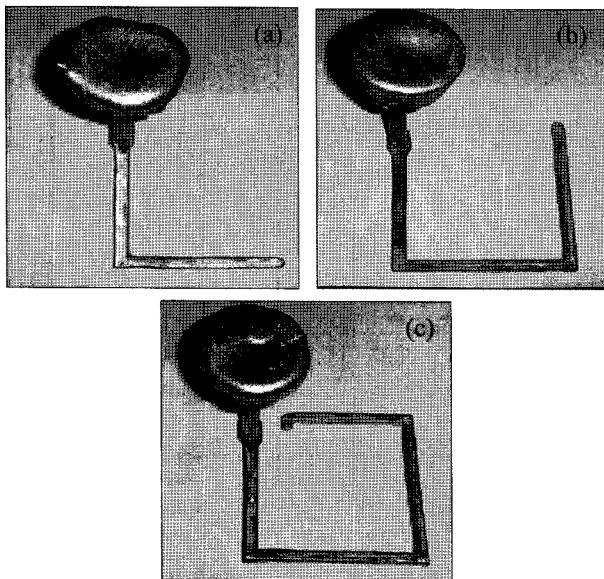


Fig. 5. Test castings for fluidity measurement according to vacuum pressure; (a) 250 mmHg, (b) 450 mmHg, and (c) 650 mmHg.

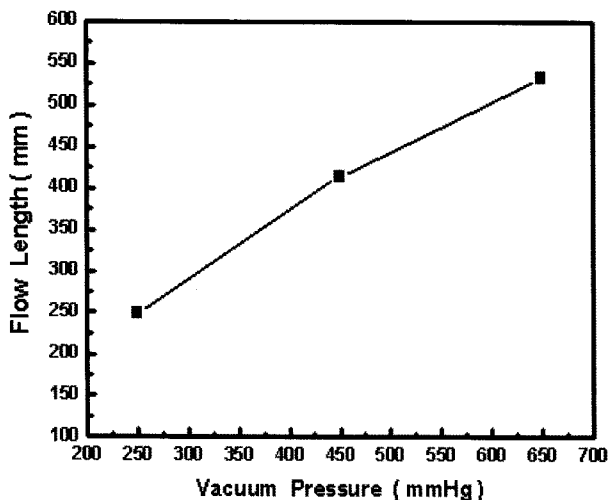


Fig. 6. The fluidity of A356 alloy according to vacuum pressure.

냉각속도가 크게 되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7은 각 진공도에서 냉각속도의 차이를 알아보기 위해 Fig. 1의 Thermocouple-2의 위치에서 시간에 따른 온도변화를 측정 한 결과이며, 예상대로 높은 진공도(250 mmHg)에서의 냉각속도(11.8°C/sec)가 낮은 진공도(650 mmHg)에서의 냉각속도(6.7°C/sec)보다 약 2배 정도의 빠름을 알 수 있다. Fig. 8은 Fig. 1에 나타난 총 4개의 열전대위치에서 용탕 주입 후 위치별 최고온도를 보여주고 있다. 여기에서 진공도가 클수록 용탕의 온도는 탕도를 이동하면서 급격히 강하됨을 알 수 있었다. 진공도가 250 mmHg일 때는 온도강하가 커서 이로 인한 짧은 유동 길이로 인해 유동패턴의 입구로부터 271 mm의 거리에 있는 열전대(Thermocouple-4)에서는 온도가 측정되지 않았다.

3.3 도형제두께에 따른 유동길이의 변화

Fig. 9는 도형제두께에 따른 유동길이의 변화를 조사하기 위

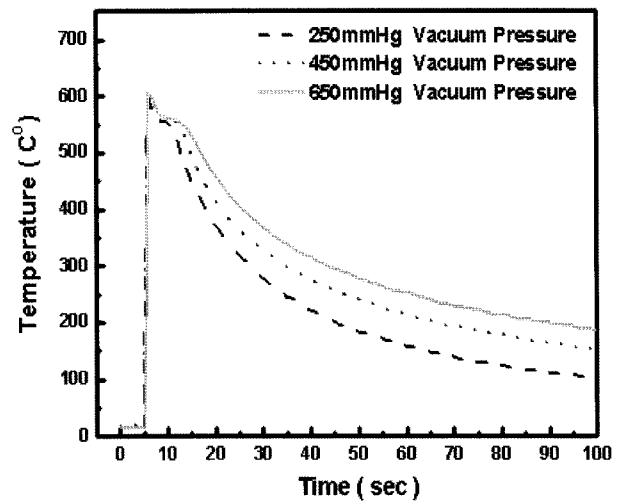


Fig. 7. Temperature profiles during casting according to vacuum pressure at a location of TH-2 in vacuum-induced sand mold.

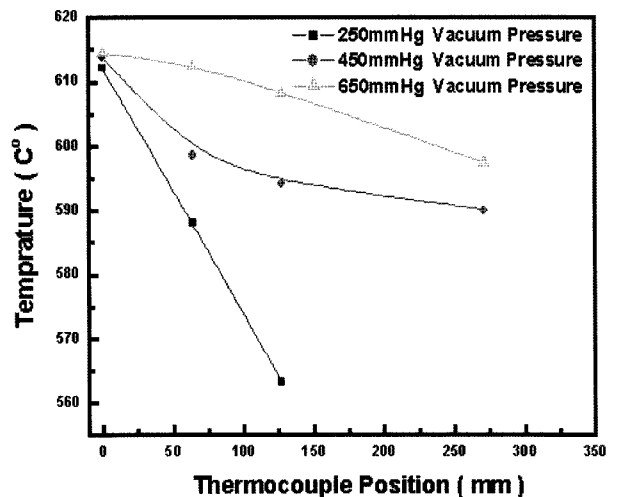


Fig. 8. The maximum temperature change during casting according to the position in fluidity channel at given vacuum pressures of 250, 450, and 650 mmHg.

해 도형제두께를 각각 0 mm, 0.05 mm 및 0.1 mm로 변화시켜가며 주조한 시편을 보여주고 있다. 유동길이를 측정된 결과 (Fig. 10) 도형제두께가 0 mm, 0.05 mm, 0.1 mm일 때 유동 길이는 각각 414, 496, 856 mm로 증가하였다. 여기서, 도형제를 도포하지 않은 경우보다 0.05 mm로 도포하였을 때 유동 길이는 82 mm 증가하였고, 또한 0.1 mm로 도포하였을 때는 유동 길이가 무려 442 mm만큼 크게 증가되었음을 알 수 있었다. 이는 도형제의 두께가 두꺼울수록 주형으로의 열전달속도가 감소되는데 기인하는 것으로 사형 또는 금형주조등에서도 같은 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 본 연구결과의 이와 같은 도형제에 의한 영향은 사형 또는 금형주조에서 보다 훨씬 크며 이는 진공흡입조형법에서는 용탕의 주입시 소실된 film을 통한 강한 흡인력이 작용하고, 도형제가 이러한 흡인력을 차단시키는 역할을 하기 때문이다.

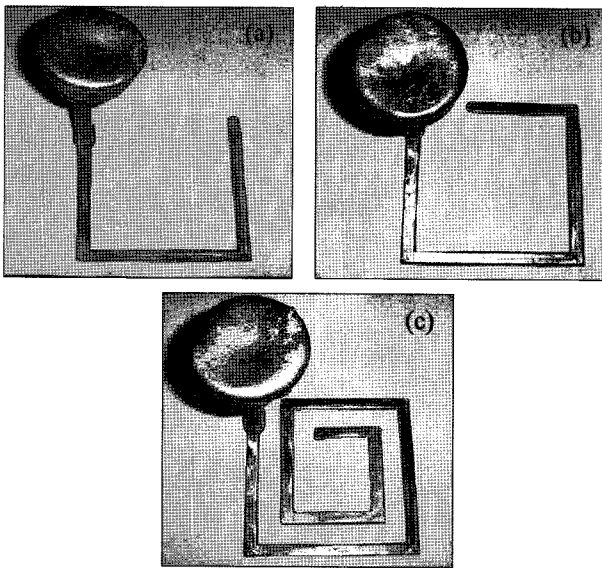


Fig. 9. Test castings for fluidity measurement according to coating thickness; (a) 0 mm, (b) 0.05 mm, and (c) 0.1 mm.

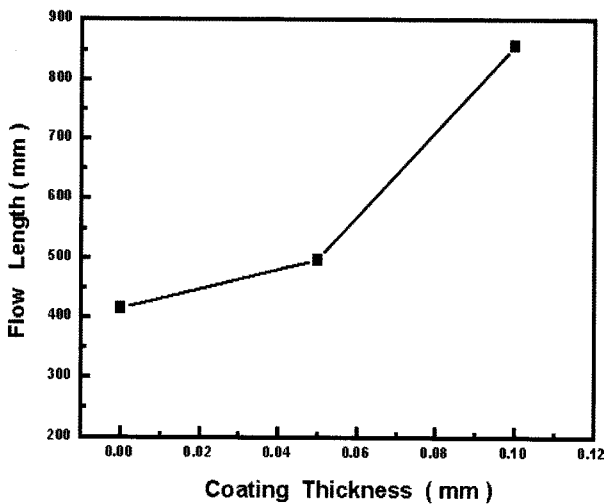


Fig. 10. The fluidity of A365 alloy according to the coating thickness.

Fig. 11은 도형제두께에 따른 냉각속도의 변화를 보여주고 있다. 여기서 냉각속도는 Thermocouple-2의 위치에서 측정되었으며, 도형제를 도포하지 않은 경우에 7.8°C/sec의 냉각속도는 도형제두께가 0.1 mm일 때 4.7°C/sec로 감소되었다. Fig. 12는 도형제두께에 따른 열전대의 위치별 최고온도를 보여주고 있으며, 도형제두께가 두꺼울수록 열전대위치별 온도강하가 감소되고 있음을 알 수 있다.

3.4 주형공간내 진공도의 변화

진공흡입조형법에서 주형의 제조, 주형의 형상 및 강도 유지는 EVA film 안의 사립자 사이에 가해지는 대기압이하의 진공에 의한 힘에 의해 이루어진다. 그러나, 용탕의 주입전 주형내의 빈공간은 일반 사주형등에서와 같이 대기압 상태이다. 주조시 용탕은 주형을 유지시키고 있던 film을 소실시키면서 주형의 빈 공간에 유입되는데, 이때 용탕이 유입되지 않은 주형내

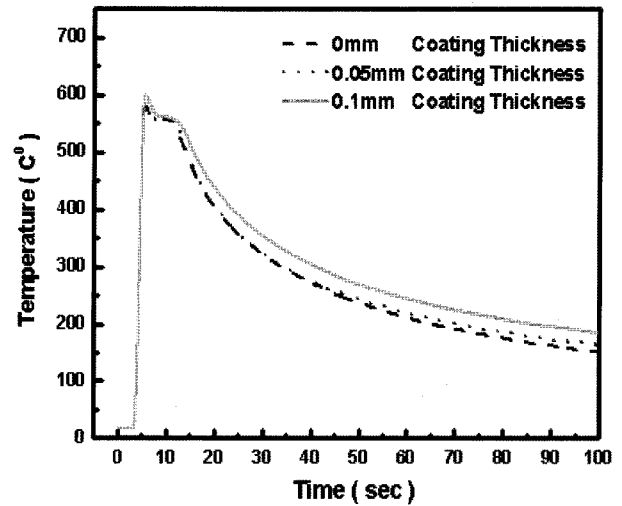


Fig. 11. Temperature profiles during casting according to coating thickness at the position of TH-2 in vacuum-induced sand mold.

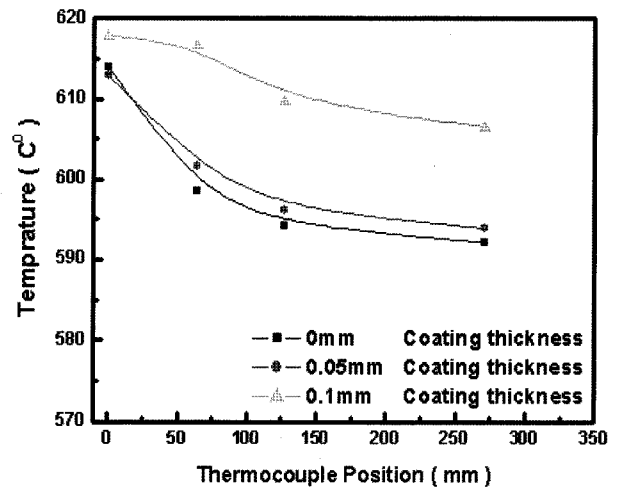


Fig. 12. The maximum temperature change during casting according to the position in fluidity channel at given coating thicknesses of 0, 0.05, and 0.1 mm.

빈공간은 크던 작던 주형에 가해진 진공의 영향을 받게 되리라 판단된다. 그러나 지금까지 진공흡입조형법에서 이에 대한 연구는 진행된 바 없었고, 본 연구에서는 진공도, 주물사입도 및 도형제두께에 따른 주조시 주형공간에서의 진공도의 변화를 조사하여 이에 따른 용탕의 유동도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. Fig. 13(a-c)는 각각 주물사입도, 진공도 및 도형제두께에 따른 주조시 주형공간내 진공도의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 13(a) 및 (c)에서 용탕주입 후 경과시간에 따른 주형내부의 진공도의 변화는 주물사입도 및 도형제두께에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있다. 즉, 진공도는 주입 후 약 25초가 경과하면 설정진공도(450 mmHg)에 근접한 수치까지 급격히 떨어지다가 이후 큰 변화없이 일정한 결과를 모두 보여주고 있다. 단, Fig. 13(c)에서 도형제두께가 0.1 mm일 때 설정진공도에 근접되는 시간이 다소 길어지는 것을 알 수 있고, 이는 도형제의 두께가 두꺼워질수록 주형내 대기의 방출이 느려지는 데서 기인된다. Fig. 13(b)에서 주형내 진공도는 Fig. 13(a) 및 (c)에서와 같이 주입 후 경과시간에 따라 급격히 감소되고 있고 경과시간 20-50초 사이에서 설정진공도에 근접한 값을 보인 후 거의 일정하게 되거나 매우 완만한 감소를 보이고 있다. 여기서 주형내 진공도는 설정진공도에 좌우되는 것을 알 수 있고, 설정진공도에 근접되는 시간은 진공도가 클수록 길어지는 것을 알 수 있고, 이는 진공도가 클수록 주형내 대기방출에 그만큼 시간이 더 요구되기 되기 때문이다. 상기의 결과로 진공흡입조형법에서는 일반사형주형등과는 달리 주형내 진공

도가 용탕 주입 전에 대기압상태로부터 소정의 경과시간 후 (20-50초) 대기압보다 작은(진공도는 큰) 설정진공도에 근접한 진공도를 갖게 되는 소위 감압주조시의 상태가 되는 것을 알 수 있고, 주형제조를 위해 적용된 설정진공도가 주형내 진공도를 좌우하는 주요인자임을 알 수 있다. 그러나 이러한 주형내 진공도의 증가는 유동도에 영향을 주지 못한다. 3.2절에서 유동도는 설정진공도가 증가함에 따라 증가하는 것이 아니고 오히려 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 주형내 진공상태보다 설정진공도(또는 주물사입도 및 도형제두께)에 따른 주형냉각효과가 유동도에 지배적인 효과가 있음을 입증하는 것이다.

식 (1)은 Engler 등[10]에 의해 유도된 식으로, 여기서 용탕의 유동길이 L_f 는 용탕의 유동속도 V , 용탕의 온도, 비열 및 잠열에 의해서 결정되는 $\rho(C_p + \Delta T_p + \phi H)$ 및 용탕채널의 응고모듈 $M(=부피/표면적)$ 에 비례하며, 열이동속도 $h(T-T_0)^{0.5}$ 에 반비례한다. 한편 유동속도 V 는 용탕기둥높이 H , 용탕이 주입되는 부위에서의 압력 P_0 와 주형공간내의 압력 P_f 와의 차이 ΔP , 손실계수 ζ (또는 discharge coefficient C_D) 및 밀도 ρ 에 의해서 결정된다.

$$L_f = V \cdot \left[\frac{\rho(C_p \Delta T + \phi H)}{h(T_m - T_0)^{0.5}} \cdot M \right] \quad (1)$$

$$\text{여기서, } V = C_{D_N} \sqrt{2gH - \frac{P_i - P_o}{\rho}}$$

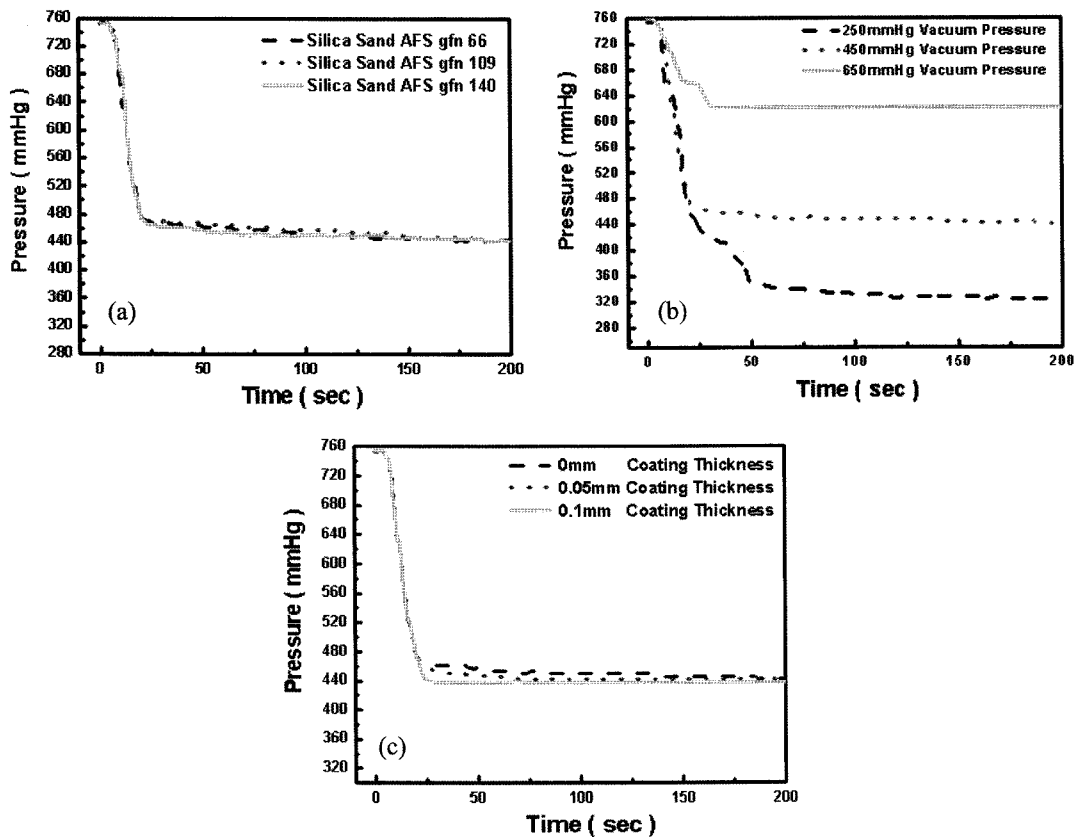


Fig. 13. The pressure change in the mold cavity during casting according to (a) sand grain fineness, (b) vacuum pressure, and (c) coating thickness.

[L_f : 유동도, V : 유동 속도(mm/sec), C_p :비열(J/g·°C), ΔT : 과열도, T_m : 액상금속온도, T_0 : 주형온도, ϕ : 고상분율, M : 응고모듈(부피/면적), h :열전달계수(W/mm·°C), C_D : 손실계수, g : 중력가속도, H : 탕구높이, P_i : 주형내 공간에의 압력, P_0 : 주입되는 부위압력, ΔP : 용탕이 주입되는 부위에서의 압력, ρ : 밀도(g/cm³)]

상기의 식을 진공흡입조형법에 적용해 볼 때, 진공흡입조형법에서는 식 (2)의 P_i 가 P_0 보다 크게 되므로 이에 따른 유동속도의 증가를 예상할 수 있으나, 실제로는 유동속도의 감소가 일어났는데, 이는 이미 설명된 바와 같이 P_i 의 감소와 함께 보다 큰 냉각속도의 증가효과가 발생되었기 때문이다. 진공흡입조형법에서 진공도, 주물사입도 및 도형제두께의 변화는 주형으로의 열전달속도 $h(T-T_0)^{0.5}$ 의 항과 관련을 갖고 유동길이에 영향을 주는 것으로 판단되고, 진공흡입조형법에서는 용탕의 열, 발생가스 등이 진공에 의한 강한 흡인작용에 의해 주형을 통해 제거시키기 때문에 열전달속도항의 수치가 기존 일반사형주물에 비하여 매우 크리라 예측된다.

4. 결 론

A356 Al합금의 유동도에 미치는 진공흡입조형 조건에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 진공흡입조형법에서 용탕의 유동길이는 주물사입도 및 진공도가 증가할수록, 그리고 도형제 두께가 감소할수록 짧다.
2. 진공흡입조형법에 의한 주물 제조시 주형내 빈 공간은 소정시간(25-50초) 경과 후 대기 압보다 낮은 진공도에 도달된다.
3. 주물제조시 주형내 진공도는 설정진공도에 주로 영향을

받고 주물사입도 및 도형제에는 거의 영향을 받지 않는다.

4. 주조시 주형내 빈공간의 압력 하락(또는 진공도의 증가)은 유동길이 증가에 큰 영향을 주지 못하며, 진공흡입에 의한 냉각효과가 유동길이를 좌우하는 주요인이다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Flemings: Solidification Processing, McGraw-Hill, (1974) 214-224.
- [2] A. H. Zadeh and J. Campbell: Int. J. Met. Res., "Fluidity of eutectic grey iron and Al-Si alloys in thin sections", 17(3) (2004) 162-165.
- [3] W. S. Lee and B. J. Ye: J. of the Korea Foundrymen's Society, "Variation of fluidity in Al alloys with the addition of Si, Mg and melt treatments", 19(4) (1999) 22-29.
- [4] Y. D. Kwon, Z. H. Lee, and K. H. Kim: J. of the Korea Foundrymen's Society, "The effect of grain refinement on fluidity of Al-4.8%Cu-0.6%Mn alloy", 22(3) (2002) 3-7.
- [5] F. R. Mollard, M. C. Flemings, and E. F. Niyama: J. Met., "Aluminum fluidity in casting", 39(11) (1987) 4-35.
- [6] Z. H. Lee: J. of the Korea Foundrymen's Society, "Heat transfer from cast metals to mold", 1(1) (1981) 11-22.
- [7] C. S. Gang: J. of the Korea Foundrymen's Society, "Moulding method by V-process", 2(2) (1978) 21-30.
- [8] Y. J. Choi: J. of the Korea Foundrymen's Society, "Vacuum sealed molding process", 8(1) (1976) 9-13.
- [9] P. Kumar, N. Singh, and P. Goel: Robotics and computer intergrated manufacturing, 15 (1999) 413-422
- [10] V. S. Engler and Z. H. Lee: Giesserei Forschung, "Fließvermögen und Warmrißverhalten von Blei-Antimon-Legierungen", 3(30) (1978) 107-116.