

논문

알루미늄 합금의 소실모형주조 시 유동도에 미치는 주조 조건의 영향

신승렬[†] · 한상원 · 이경환^{*} · 이진형

The Effect of Casting Conditions on the Fluidity during Lost Foam Casting of Al Alloy

Seung-Ryoul Shin[†], Sang-Won Han, Kyong-Whoan Lee^{*} and Zin-Hyoung Lee

Abstract

The effects of casting condition and hot melt glue during Lost Foam Casting were investigated on the fluidity of Al alloy melt. The fluidity increased linearly with increasing pouring temperature in thick castings but non-linearly in thin casting due to the difference in main heat flow direction. The metal flow velocity was in range of 0.5~2.7 cm/s in no evacuation condition and the minimum value of it was measured after the melt flow through the hot melt barrier. The mold evacuation improved the metal flow velocity by around 0.5~1 cm/s. And the reaction zone layer thickness was about 1 cm in no-evacuation conditions but about 0.6 cm in mold evacuation condition of 710 torr due to the easier removal of pyrolysis product of EPS. And hot melt barrier thickness of 0.6 mm increased the reaction zone layer thickness up to about 2.5 cm. The fluidity decreased remarkably with an enlarged thickness of hot melt due to a lot of pyrolysis products.

Key words: lost foam casting, Al-alloy, fluidity, mold flask evacuation, hot melt glue, polystyrene

(Received October 4, 2003 ; Accepted February 9, 2004)

1. 서 론

소실모형주조(LFC; lost foam casting process)는 1950년 H. F. Shroyer가 발포 폴리스티렌을 이용한 주조법을 개발하여 1958년 특허화 하였고[1], 이를 미술주물제작에 활용한 것이 그 시작이었다. 1964년의 T. R. Smith가 비점결사를 이용하여 재특허화 하였으며[2], 현재 소실모형주조에 의해서 Al-base 자동차용 주물로 흡기다기관(inlet manifold), brake pump housing, cylinder head, engine block(four cycle-four stroke) 등이 생산되고 있고, 용탕의 충전 거동은 또한 자동차용 주철 주물로는 배기다기관(exhaust manifold), brake caliper, brake disk등이 생산되고 있다.

소실모형주조에서 모형 재료가 폴리스티렌과 같은 폴

리머로 구성되어 있기 때문에 사형주조와 같은 일반적인 주조와는 다르다. 소실모형주조에서 용탕의 주입 전 속도는 수 cm/sec의 범위로서 일반적인 주조에서의 수십 cm/sec의 범위와 비교가 되며 이러한 차이는 소실모형주조에서의 용탕 충전 속도가 실제적인 폴리머의 분해속도에 의해 제한되기 때문이다. 패턴분해에 대한 구동력은 오로지 금속 선단으로 부터 폴리머로 전해지는 열에너지 뿐이므로 금속 충전 속도는 금속으로부터 패턴으로 전해지는 열전달 속도에 의존하는 실제 패턴 분해 속도와 같다. 또한 용탕 흐름에 대한 유일한 구동력은 탕구(sprue)의 높이에 의한 압력(metallostatic head pressure), 즉 ρgh 뿐이며, 이 압력이 용탕 선단에 생성되는 가스압을 충분히 극복할 때만 용탕 충전이 가능하다[3]. 용탕 선단의 가스압은 가스 생성속도

한국과학기술원 재료공학과(Dept. of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-338, Korea)

*한국생산기술연구원 신소재개발본부(Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 404-817, Korea)

[†]E-mail : mascie@kaist.ac.kr

와 가스의 도형층을 통한 탈출속도에 의존하는데, 가스생성속도는 패턴밀도, 주조체의 단면적 그리고 금속의 온도에 의존하지만 가스의 탈출속도는 코팅과 모래의 투과도, 몰드 감압 압력 등에 의존한다. 그러므로 이들 변수들을 적절하게 조절함으로써 용탕의 유동도를 개선할 수 있다. 그러나 지금까지의 많은 연구들이 변수들의 한정된 범위에서 주로 이루어져 왔기 때문에 본 연구에서는 주입온도, 주조체의 두께와 몰드감압 압력과 같은 변수의 넓은 범위에 있어서 유동도에 대한 조사가 이루어졌다[4-6]. 또한 패턴의 각 부분들, 즉 탕도(gate), 탕구, 주조체 패턴들의 결합에 사용되는 접착제(i.e. hot melt glue)는 그 자체의 높은 밀도 및 분해생성물의 양 때문에 유동도에 안 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 예를 들어 가장 평범한 접착제인 GA1467의 경우 단위 그램 당 2269 cc의 가스량을 생성하는 반면, 완전하게 분해된 폴리스티렌의 경우 1700 cc의 가스를 생성한다[7]. 그러므로 본 연구에서 접착제가 유동도에 미치는 영향도 함께 조사하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1의 T형 시험주조는 소실모형주조에서 주입온도와 주조체의 두께, 몰드 감압의 효과를 조사하기 위해 만들어졌다. T형 시험주조는 세 개의 채널을 가지

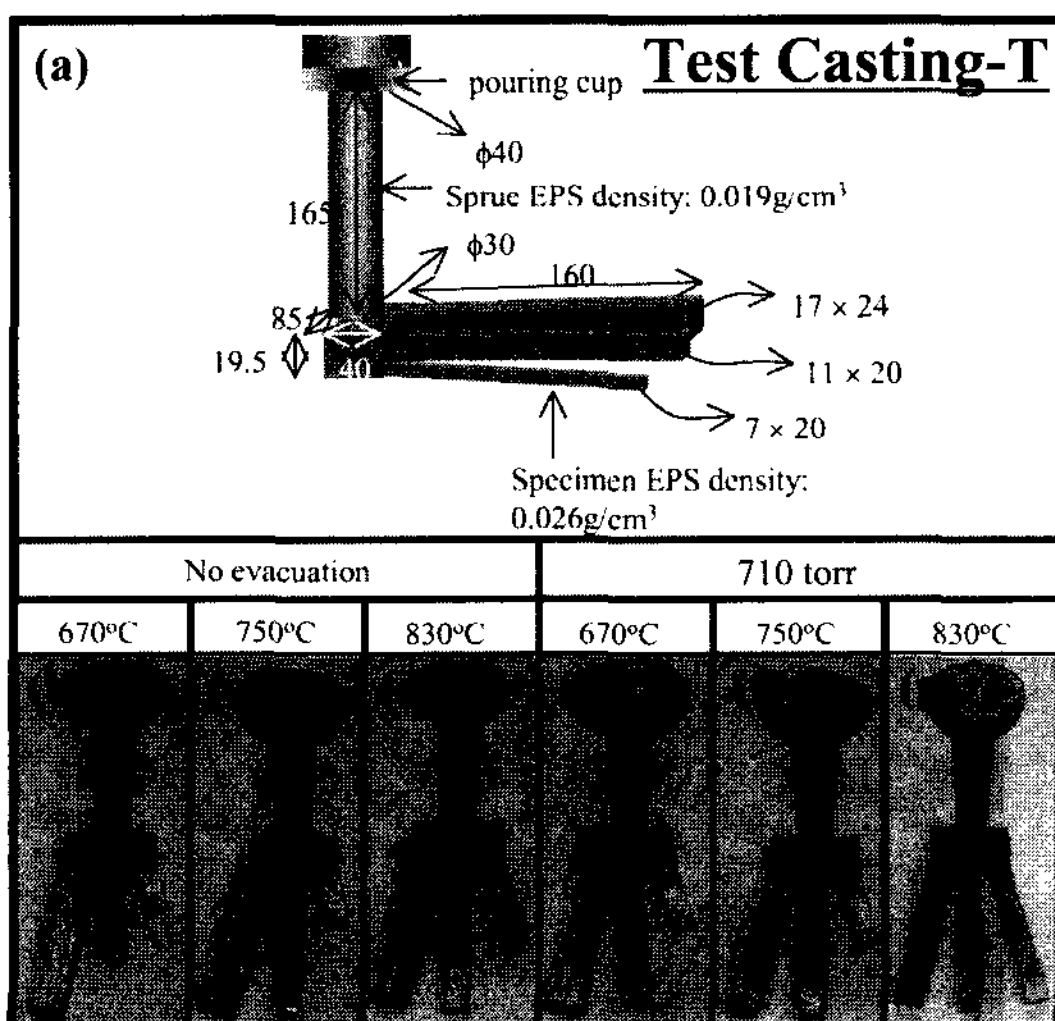


Fig. 1. Test casting-T for the investigation of effects of pouring temp., casting thickness and mold flask evacuation on the fluidity of Al alloy melt; coating thickness = 0.18 mm.

며, 각각 17, 11, 7 mm의 두께를 갖도록 제작되었다. 이들은 탕구저(sprue base)에 hot melt glue를 사용하여 결합되었고, 상용 알루미늄 합금용 코팅 재료인 EBACOTE로 두께가 0.18 mm가 되도록 코팅하였다. 코팅된 패턴은 24시간 동안 건조되었고, 플라스크 내에 비점결사와 함께 진동을 가하면서 충전되었다. 플라스크의 상단은 진공의 손실을 막기 위해 비닐로 밀봉되었고, 용탕이 튀어 녹지 않도록 다시 모래로 그위를 덮었다. 그 후 주입은 장치 상단의 주입컵을 통해 이루어졌고, 몰드 내를 감압하는 경우에는 플라스크 내부가 710 torr로 유지되도록 하였으며, 주입된 금속은 A356 알루미늄 합금이었다.

또한, T형 시험주조에 비해 비교적 긴 채널길이를 가지는 Fig. 2의 N형 시험주조는 유동도에 대한 감압과 패턴의 영향을 조사하기 위해 만들어졌다. Fig. 2에 패턴의 밀도 값이 경우 1과 경우 2의 경우로 나뉘어

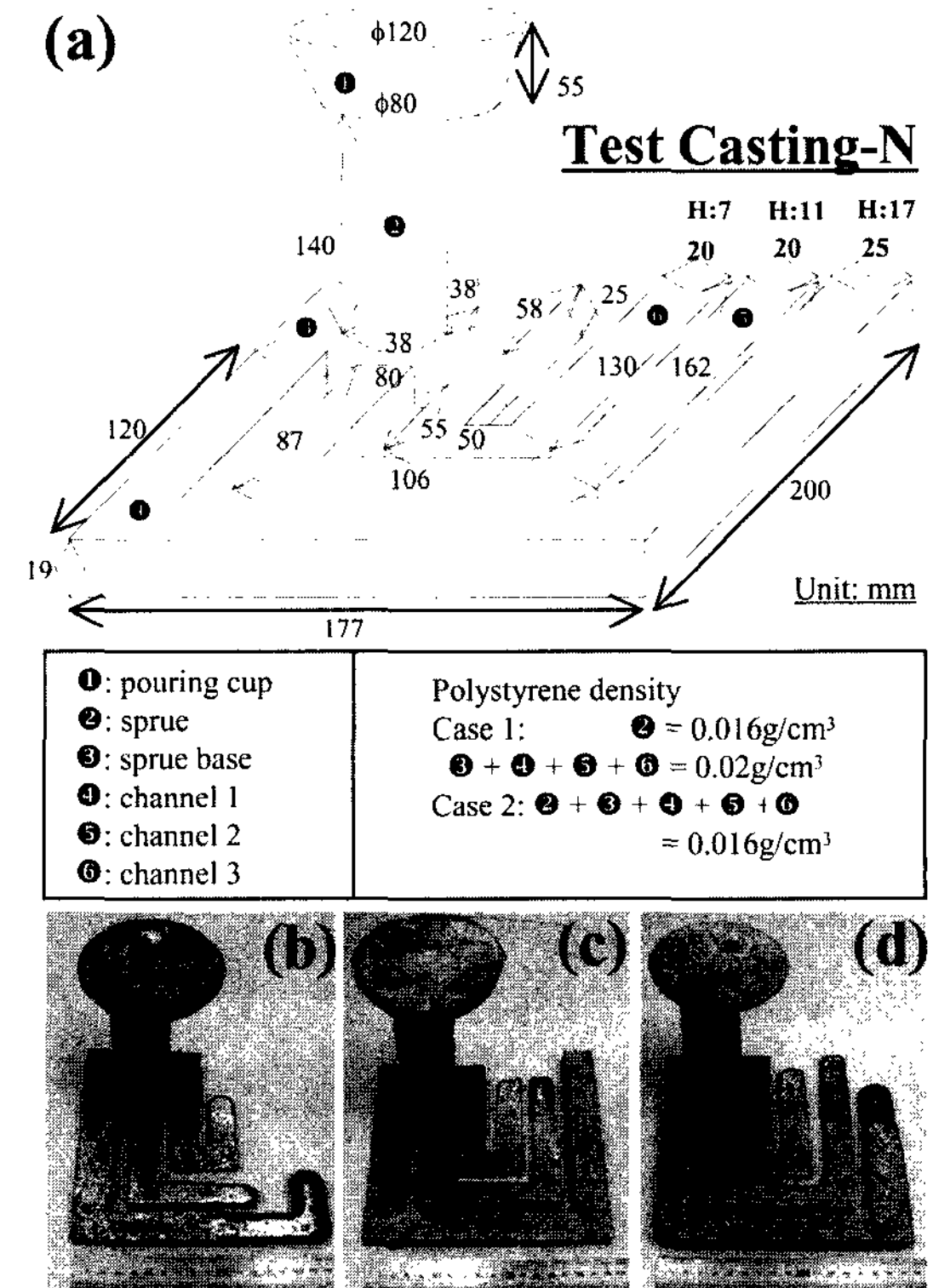
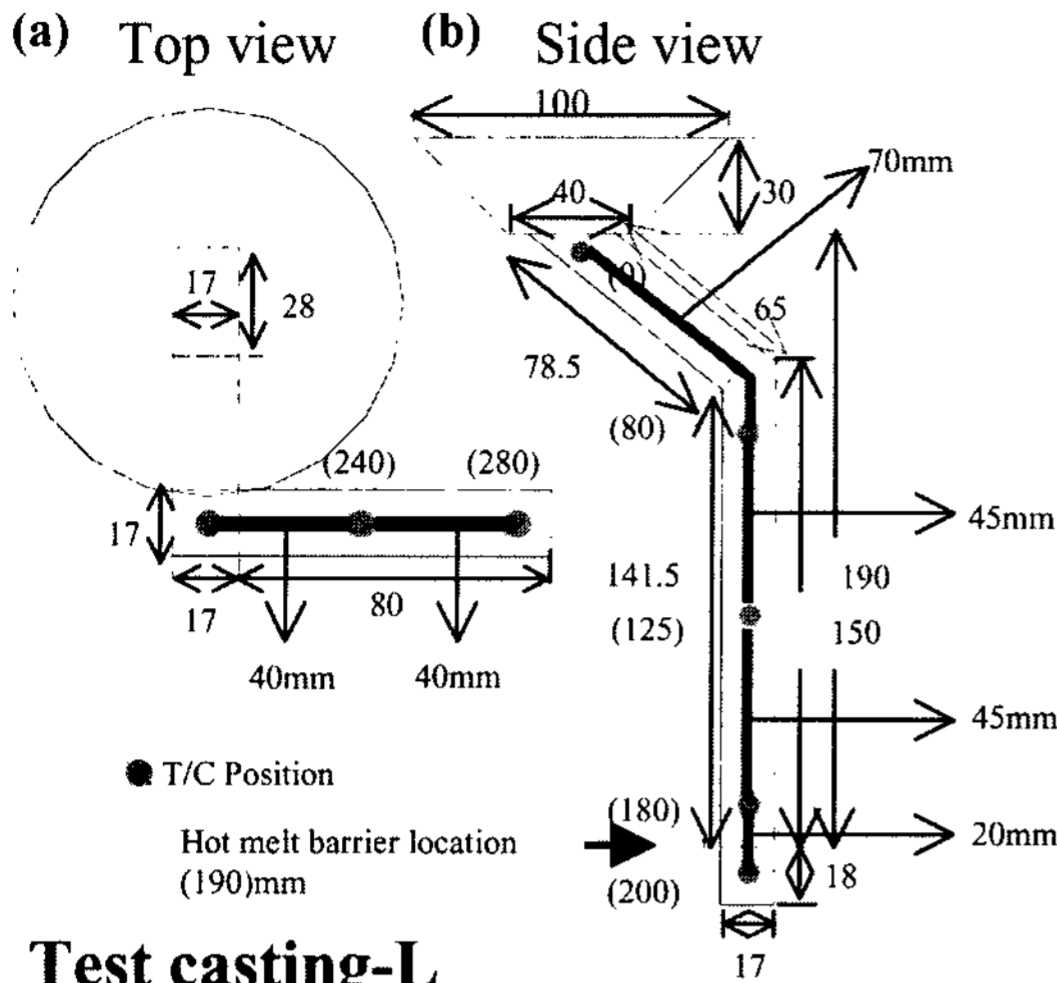


Fig. 2. (a) apparatus of test casting-N to test the effect of evacuation and pattern density, and those castings, (b) pattern density of case 2, no evacuation, (c) pattern density of case 2, 685torr evacuation, (d) pattern density of case 1, no evacuation.



Test casting-L

Fig. 3. The shape of the test casting-L for the investigation of hot melt effect on the fluidity; (a) side view, (b) top view.

주어져 있으며, 코팅의 두께는 약 0.3 mm였다.

각각의 온도측정 용 열전대의 위치를 함께 보여주고 있는 Fig. 3의 L형 시험주조는 hot melt glue의 영향을 살펴보기 위해 만들어졌다. 1 mm의 두께를 갖는 각각의 열전대는 모두 채널의 중심 깊이까지 삽입되었으며, Fig. 3에서 (190)로 표시된 위치에서 hot melt의 두께를 0.6 mm를 기본으로 하여 1.2 mm와 2.3 mm로 증가시켰다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 4는 Fig. 1의 T형 시험주조에서 주입온도와 감압조건에 따른 유동도의 변화를 보여준다. 가장 두꺼운 채널(17 mm)의 경우 모든 조건에서 채널이 용탕으로 채워졌고, 중간 두께의 채널(11 mm)의 경우 감압을 한 조건에서는 670°C의 주입조건에만 불완전한 충전 을 보였다. 감압을 하지 않은 조건에서는 유동도가 주입온도에 따라 비교적 직선적으로 증가하였으며, 최소 자승법에 의해서 유동길이, $L_f = -8.36 + 0.03 T_p$, ($R^2 = 0.92$)의 함수를 가졌다. 단, T_p 는 주입온도를 나타내며, R^2 은 Coefficient of Determination 값으로서 Correlation coefficient(R)의 자승값이다. 이 값은 fitting된 값에 근접할수록 1에 가까워지는 값을 갖는다. 그러나 가장 얇은 채널(7 mm)의 경우 유동도는 주

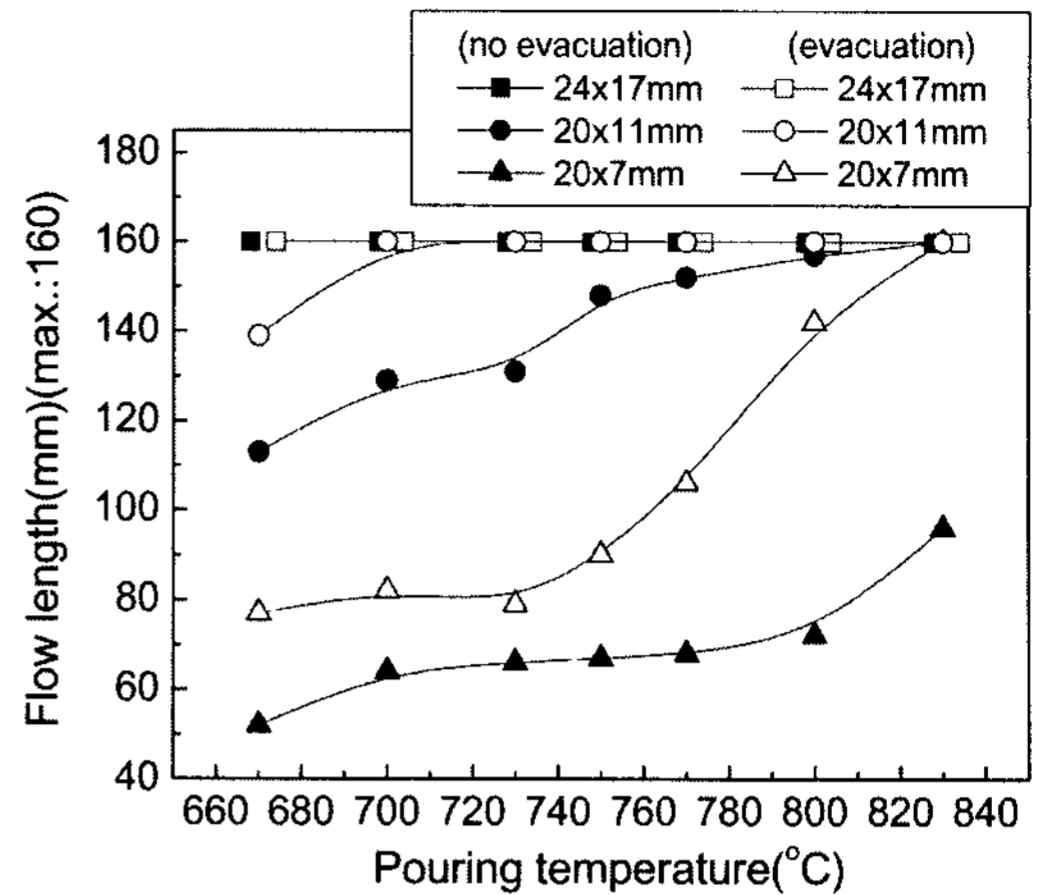


Fig. 4. The fluidity of the test casting-T at different casting condition.

입온도에 따라 비선형적인 경향성을 보였으며, 몰드 내 감압을 하지 않은 경우와 감압을 한 경우 각각 $L_f = 6.047 + 2.065 \times 10^{-8} \times \exp(T_p/43.93)$, ($R^2 = 0.947$)와 $L_f = 74.47 + 5.2 \times 10^{-6} \times \exp(T_p/49.69)$, ($R^2 = 0.936$)의 함수를 가졌으며, 용탕의 유동도에 있어서 급격한 증가를 보이는 임계주입온도가 감압에 의해 감소하는 것처럼 보인다. 즉 감압을 하지 않은 경우에는 임계주입온도가 800°C에서 관찰되지만 감압을 한 경우에는 730°C로 감소하였다. 이들의 채널 두께에 따른 유동도의 다른 경향성은 주조체의 두께에 따라 열의 중요한 흐름의 방향이 다르기 때문이다. 두꺼운 패턴의 경우 금속으로부터 패턴으로의 열 손실이 주형벽으로의 손실보다 크며, 임계 이하의 두께를 갖는 패턴의 경우에는 금속의 충전 길이가 패턴의 두께가 감소함에 따라 급격히 감소하는데 이는 금속으로부터 주형벽으로의 열 손실이 패턴으로의 열손실보다 크기 때문이다[3]. 그러므로 Fig. 4의 7 mm 두께 패턴의 유동길이 측정결과에서 저온영역에서 주입온도를 증가시켜도 유동도가 크게 개선되지 않는 것은 용탕에서 주형 벽으로의 열손실이 패턴으로의 열손실보다 상대적으로 커서 이 열손실을 극복할 만큼의 열량을 가진 용탕, 즉 고온의 용탕이 주입되어야 유동도가 개선되는 것 같다. 그리고 유동도가 크게 증가하는 임계주입온도가 감압에 의해 감소하는 것은 몰드 내의 감압이 패턴 분해물을 코팅을 통해 용이하게 제거하여 용탕의 유동속도를 증가시킨 결과로 보인다. 이는 나중에 보여질 Fig. 6(b)의 결과에서 알 수 있으며 증가된 용탕의 유동속도 때문에

용탕의 열손실속도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 이렇게 패턴분해물의 제거속도가 유동도에 영향을 미치기 때문에 비슷한 맥락에서 패턴분해물의 제거가 용이한 작은 Casting Modulus 값이 유리할 수 있다고 볼 수 있다. 그러므로 주조패턴의 두께가 17 mm, 11 mm, 7 mm로 감소함에 따라 Casting Modulus가 4.946 mm, 3.537 mm, 2.4 mm로 감소하기 때문에 본 실험에서는 두께가 얇아질수록 유동도가 더 증가하여야 하겠지만 이러한 반대의 결과는 주형으로 혼입되는 용탕의 양과 주요 열전달 방향에 대한 영향이 Casting Modulus보다 유동도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 그러나 동일한 체적에 있어서 다른 Casting Modulus 값을 갖는 경우에는 앞에서 설명한 이론에 의한 결과가 기대된다.

Fig. 5는 Fig. 2의 N형 시험주조에서 몰드 내 감압 압력(0, -50, -75, -120 torr)에 따른 유동길이를 보여준다. 패턴의 밀도가 높은 경우 1의 경우를 살펴볼 때, 감압한 정도가 커질수록 유동길이가 직선적으로 증가하며 특히 두꺼운 채널의 경우 그 효과가 더 큰 것처럼 보인다. 그림에서 점선은 채널의 입구부분으로부터 끝부분까지의 총길이를 나타낸다. 그러나 패턴의 밀도가 낮은 경우 2의 경우 유동도가 급격히 증가하는데, 이것은 용탕 충전 중에 용탕 선단에 생성되는 패턴 분해물이 적게 생성되기 때문이다.

Fig. 6(a)는 Fig. 3의 L형 시험주조에서 각각의 열전대에서의 온도 변화를 보여준다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 각각의 열전대에 용탕이 닿는 시간을 토대로 계

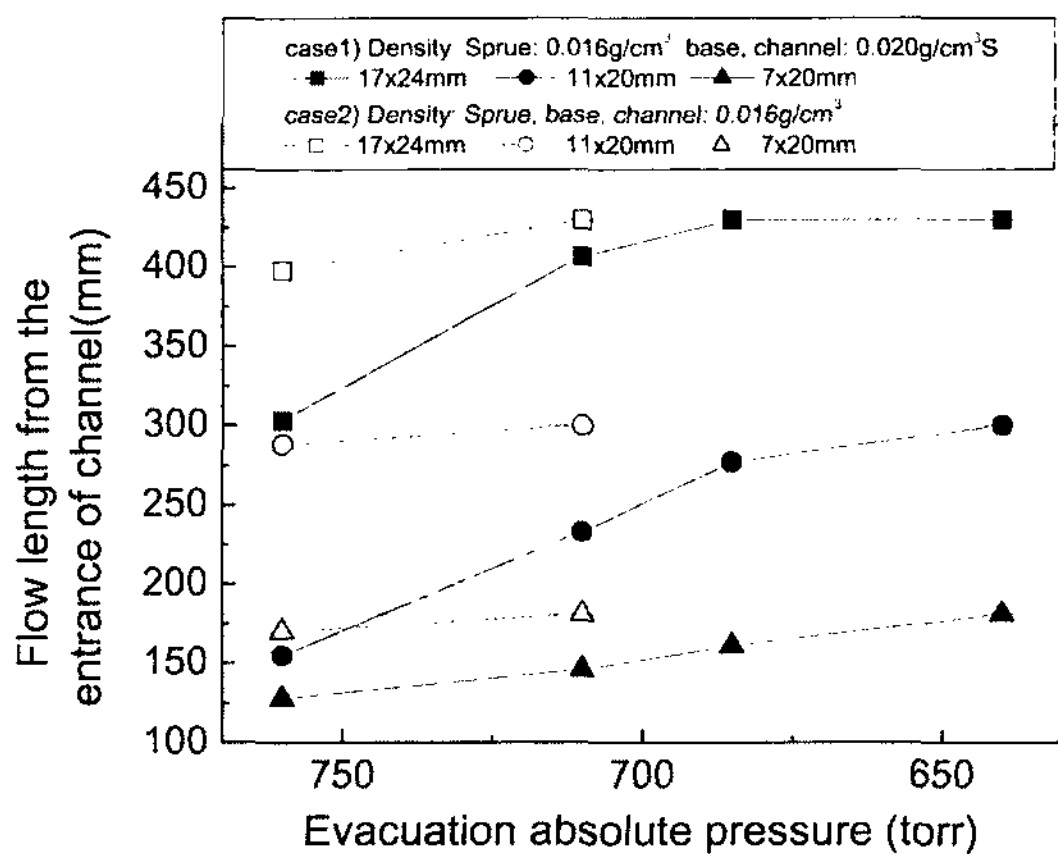
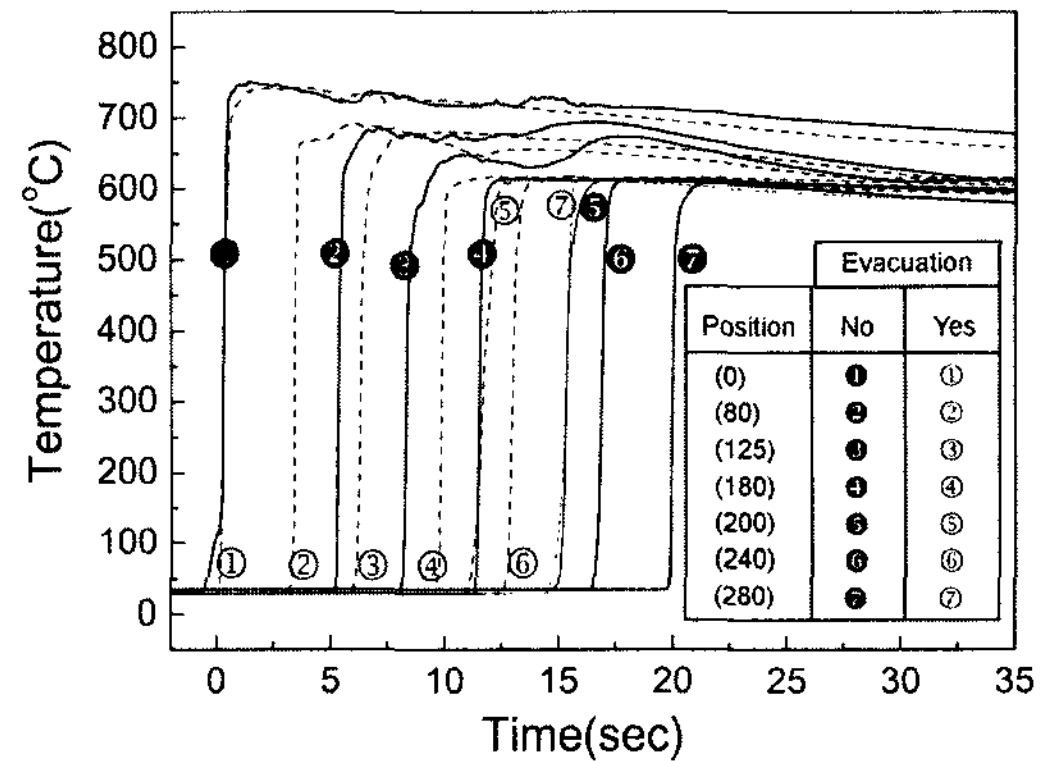
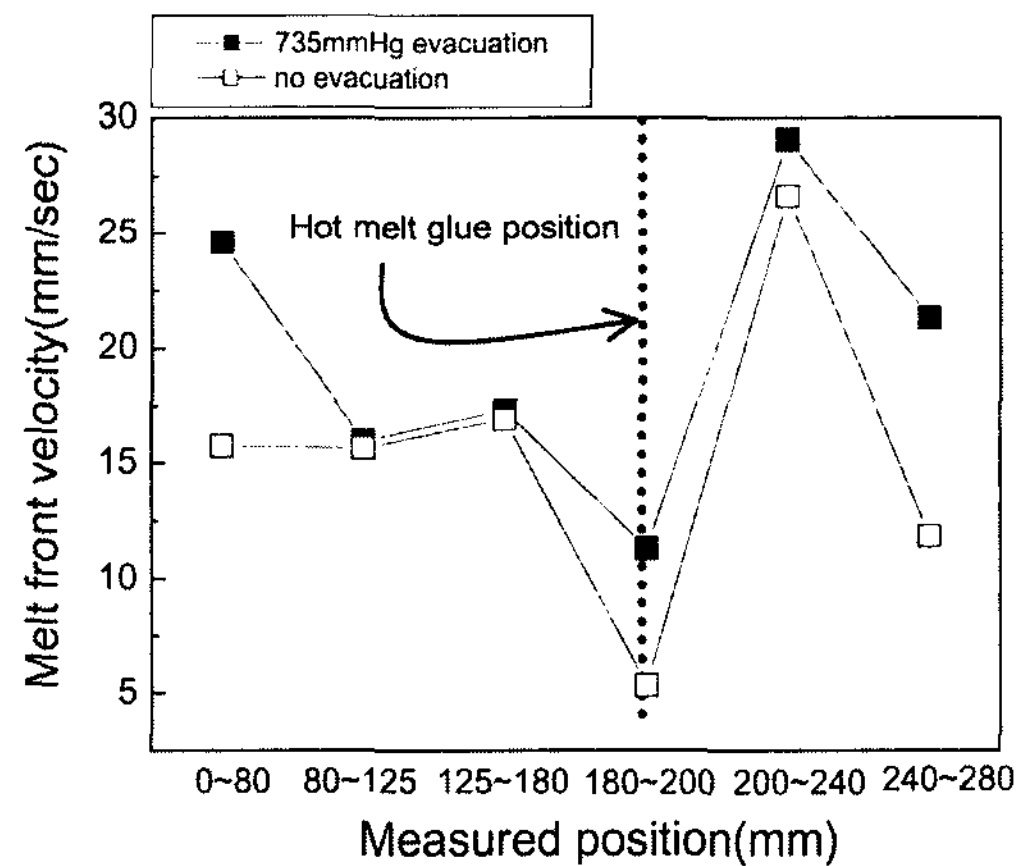


Fig. 5. Flow length of each channel with different casting thickness and pattern density in various reduced pressures.

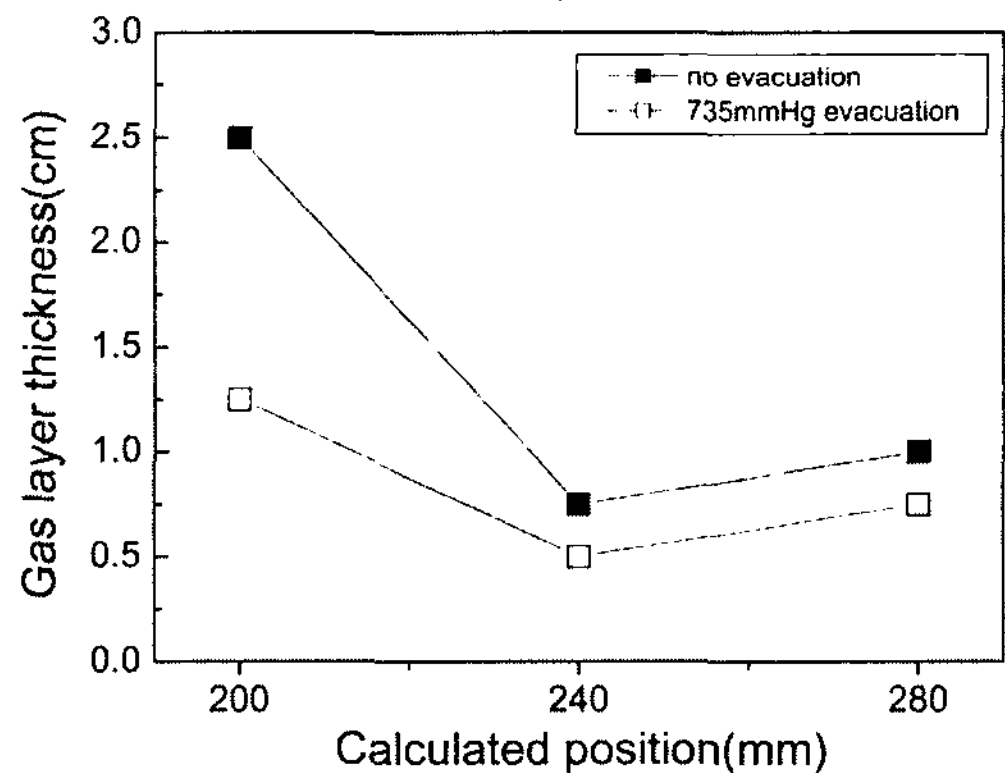
산된 용탕의 유동속도를 나타낸다. 감압을 하지 않은 경우의 유동속도는 0.5~2.7 cm/s이었으며, hot melt 로 접착된 부위(두께 0.6 mm)를 통과할 때 최소유동속



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. (a) Temperature profiles at each thermocouple position, (b) calculated melt front velocity from Fig. (a), (c) calculated reaction zone layer from Fig. (a) and (b).

도를 나타내었다. 그리고 710 torr의 몰드 내 감압은 유동 속도를 약 0.5~1 cm/s 정도 증가시켰다. Fig. 6(c)는 Fig. 6(a)의 온도측정결과로부터 계산된 용탕 선단에서의 반응층의 두께를 나타낸다. 이것은 용탕이 열전대에 닿을 때의 온도증가 시작점부터 그 온도증가가 직선으로부터 벗어나는 지점까지의 시간과 Fig. 6(b)의 속도 측정결과와의 곱에 의해 결정된다. 이 때, 온도변화곡선에서 반응층의 끝점을 직선으로부터 벗어나기 시작하는 지점으로 잡는 이유는 용탕 선단이 열전대에 닿을 때 용탕 선단은 패턴의 흡열반응으로 인해 어느 정도 열을 빼앗긴 상태이고 그 이후에 닿는 용탕의 온도가 더 높기 때문이다. 그래서 소실모형주조에서 열전대에 기록되는 온도 변화곡선의 모양은 일반적인 주조에서의 날카로운 곡선대신에 최대 용탕온도점의 끝이 둥근 형태가 얻어진다[8]. Fig. 6(c)에서 감압을 하지 않은 경우 반응층의 두께는 약 1 cm 정도이고, 감압을 한 경우에는 약 0.6 cm로 감소하였다. 감압을 한 경우에 유동속도가 더 큰 이유는 패턴 분해생성물이 감압으로 인해 코팅을 통해 용이하게 빠져나가서 반응층이 두께가 얇아졌기 때문이라고 볼 수 있다. Fig. 6(c)의 200 mm에서의 두꺼운 반응층은 Fig. 3에서 (190) 위치에 놓인 hot melt barrier의 반응생성물의 양이 폴리스티렌의 반응생성물보다 많았기 때문이다[7]. 그리고 Fig. 6(a)에서 ①~②, ①~③의 경우에서 온도 profile에서의 fluctuation은 열전대가 위치한 부분이 탕구봉(sprue)에 해당되기 때문에 먼저 주입된 용탕이 흘러 들어가서 식는 과정과 뜨거운 용탕이 열전대를 다시 통과하는 과정이 반복되기 때문에 이러한 영향이 나타난 것으로 사료된다. 즉 불연속한 주입특성이 열전대에 의해서 감지된 것으로 사료된다.

Fig. 7은 접착부위에서 hot melt의 두께를 0.6 mm로부터 1.2와 2.3 mm로 증가시켰을 때, 유동도에 미치는 영향을 나타낸다. Hot melt의 두께가 두꺼워질수록 급격한 유동도의 감소를 보였으며, 특히 Fig. 7(d)의 깊은 dimple은 반응생성물 중 다량으로 생성된 가스가 유동 용탕 침단의 표면을 통해서 빠져 나왔기 때문에 생성된 것으로 사료된다.

Fig. 8은 Fig. 7의 주조에서 기공도의 변화를 나타내고, 시편을 절단한 방법을 함께 보여준다. 용탕이 hot melt 장벽을 통과한 후에 기공도가 크게 증가하는 것이 관찰되며, hot melt의 두께의 증가는 급격한 기공도의 증가를 초래하였다. 이것은 hot melt의 분해물의

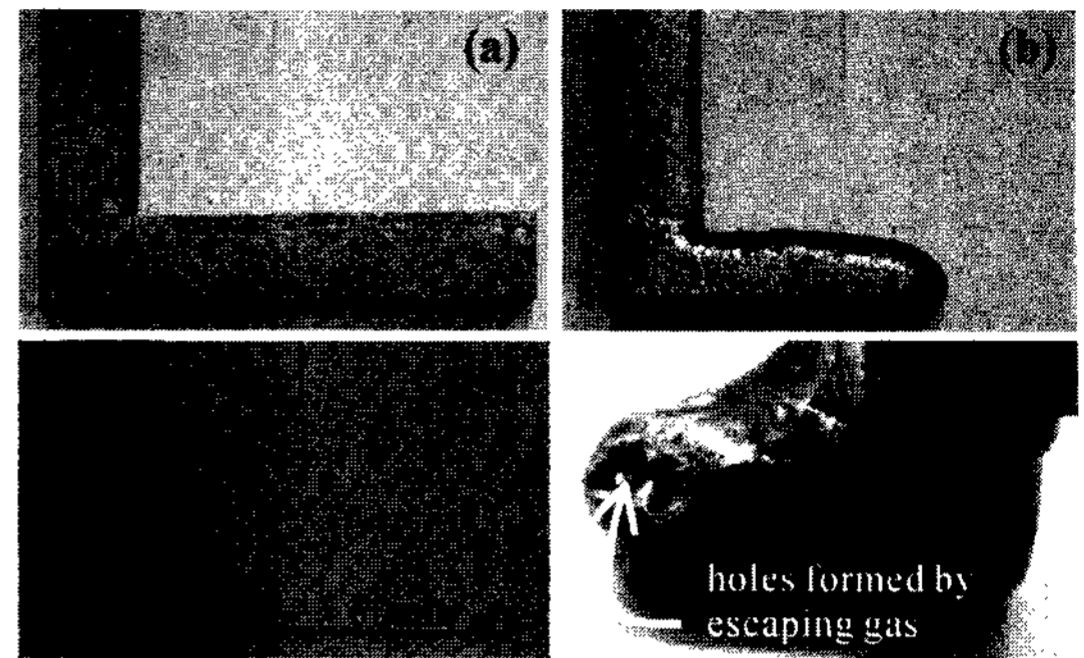


Fig. 7. Shapes of the castings with different hot melt barrier thickness:(a) 0.6 mm, (b) 1.2 mm, (c) 2.3 mm, (d) 2.3 mm, viewed from the tip side; (poured at 770°C and without evacuation).

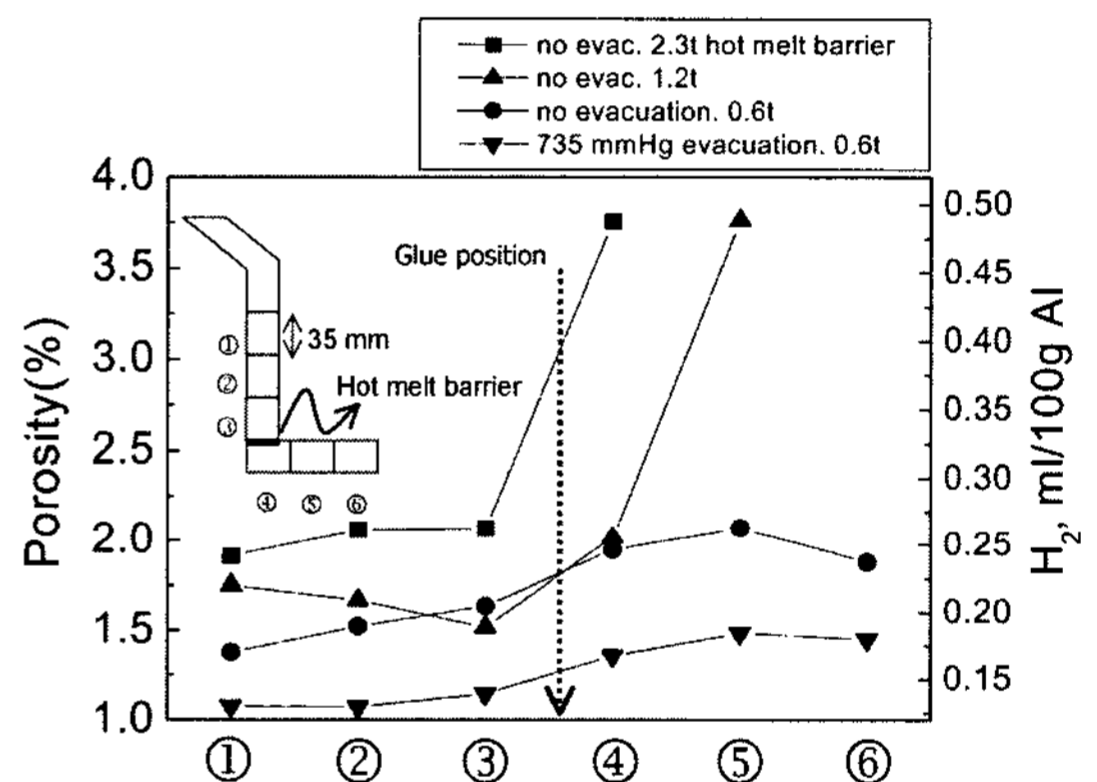


Fig. 8. Porosity variations at different hot melt barrier thickness.

양이 상대적으로 패턴분해물의 양보다 많기 때문이며, 몰드 내 감압은 전체 패턴에 균일하게 작용하여 주조체의 기공도를 균일하게 감소시켰다. 즉 분해물의 코팅을 통한 배출이 용이하였다[9].

4. 결 론

1. 시편이 두꺼워질수록 유동길이는 증가하였고, 11 mm의 두께를 갖는 패턴의 경우 유동길이가 주입온도에 따라 직선적으로 증가하였으며 $L_f = -8.36 + 0.03TP$, ($R^2 = 0.92$)의 함수를 가졌다.

2. 얇은 채널(7 mm)의 경우 유동도는 주입온도에 따라 비선형적인 경향성을 보였으며, 주형 내 감압을 하지 않은 경우와 감압을 한 경우, 각각 $L_f = 6.047 +$

$2.065 \times 10^{-8} \times \exp(T_p/43.93)$, ($R^2 = 0.947$)와 $L_f = 74.47 + 5.2 \times 10^{-6} \times \exp(T_p/49.69)$, ($R^2 = 0.936$)의 함수를 가졌으며, 유동도에 있어서 급격한 증가를 보이는 임계 주입온도가 감압에 의해 감소하였다.

3) 몰드 내 감압도가 증가할수록 유동길이는 직선적으로 증가하였으며, 두께가 두꺼운 채널일수록 감압에 더 영향을 받는 것으로 보이며, 패턴의 밀도가 낮을수록 유동길이는 증가하였다.

4) 몰드 내 감압은 용탕의 유동속도를 증가시켰으며 접착부위에서 hot melt의 사용은 용탕의 유동에 장애물 역할을 하였다. 반응층의 두께는 감압을 하지 않은 경우 약 1 cm 정도의 길이를 가졌고, 감압을 한 경우에는 약 0.6 cm로 감소하였다. 그러므로 감압한 경우에서의 빠른 유동속도는 용탕 선단에 생성된 패턴 분해 생성물의 용이한 배출 때문이었다.

5) hot melt의 두께가 증가함에 따라 용탕의 유동성이 저하되었고, 주조체 내부에 형성되는 기공결함의 양도 증가하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 2002년도 국가청정생산기술사업과 BK21사업 및 NRL의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. F. Shroyer, "Cavityless Casting Mold and Method of Making Same", U.S. Patent No. 2,830,343, April 15 (1958).
- [2] T. R. Smith, "Method of Casting", U.S. Patent No. 3,157,924, November 25 (1964).
- [3] H. L. Tsai and T. S. Chen, Transactions of the AFS, "Modeling of Evaporative Pattern Process, Part I: Metal Flow and Heat Transfer During the Filling stage", 96 (1988), 881-890.
- [4] E. N. Pan and K. Y. Liao, Transactions of the AFS, "Study on Flowability of EPC A356 Alloy", 106 (1998), 233-242.
- [5] X. Liu, C. W. Ramsay and D. R. Askeland, Transactions of the AFS, "Study on Mold Filling Control Mechanisms in the EPC Process", 102 (1994), 903-914.
- [6] J. Fu, H. L. Tsai and D. R. Askeland, Transactions of the AFS, "Mold Filling in Thin Section Castings produced by the Expandable Pattern Casting Process", 103 (1995), 817-828.
- [7] C. E. Bates, J. Griffin and H. Littleton, "Expandable pattern Casting, vol. 1: Process Manual" edited by AFS Publication, (1994), 49.
- [8] S. I. Bakhtiyarov, R. A. Overfelt and A. Alagarsamy, Proceeding of Lost Foam Casting in AFS 100TH Casting Congress, "Measurements of Decomposed EPS Gases Pressure and Molten Metal-Polymeric Foam Interface Velocity During Counter Gravity Lost Foam Casting", Dallas, Texas, USA, (2001), 3-16.
- [9] S. R. Shin, H. J. Choi, K. W. Lee and Z. H. Lee; J. of the Korean Foundrymen Society, "Hydrogen gas pick-up of Al-alloy Melt during Lost Foam Casting", 22 (2002), 167-173.