

진공흡입주형 구조법에서 탕구방안에 따른 주형 충전 양상

강복현 · 김기영[†] · 김명한* · 홍영명**

한국기술교육대학교 신소재공학과

*충북대학교 신소재공학과

**한국생산기술연구원

Mold Cavity Filling by Gating Design in Vacuum Molding Process

Bok Hyun Kang, Ki Young Kim[†], Myung Han Kim*, and Young Myung Hong**

Dept. of Materials Engineering, Korea University of Technology and Education, 307

Gajeon-ri, Byungchung-myun, Choenan, 330-708 Korea

*Dept. 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, 406-800 Korea

Abstract

Vacuum molding process(V-process) has several benefits such as a lower total production cost and a high quality casting comparing to the conventional sand molding. Influence of the gating design on the molten metal flow was investigated in this study. General criteria for the gating design of the castings and commercial codes for the flow and solidification analysis were used to attain the optimized gating design in V-process. Though mold cavity was filled smoothly under the low initial velocity of molten metal, molten metal dashed against the upper part of the mold before the completion of the mold filling with higher initial molten metal velocity and fell soon. This phenomenon may affect collapsing the mold shape, however it is thought that the possibility of burning out of the vinyl by the molten metal is not so high because vinyl is coated with refractory material.

Key words : vacuum molding process, gating design, flow analysis, initial velocity of molten metal.

(Received January 3, 2007 ; Accepted January 20, 2007)

1. 서 론

진공흡입주형법(V-process)은 주형에 점결제를 사용하지 않으므로 환경적응형의 구조공법으로 각광받고 있다[1,2]. 주입재질은 주강, 주철, 경합금, 동합금 등 모든 재질이 가능하나[3], 저탄소가 요구되는 스텐레스강은 침탄할 우려가 있으므로 주의를 요한다.

주물의 크기는 소형물에서 대형물까지 가능하며, 대형물은 중량으로 약 20t, 면적으로는 알루미늄합금으로 8m²까지 다양하게 구조할 수 있다. 또한 주물의 두께도 통상 사형보다 얇은 주물이 가능하여 종래 생형에서는 5mm이었으나, 진공흡입주형법에서는 3mm까지 가능하며, 두꺼운 주물도 제조가 가능하다. 또한 치수정밀도 및 표면정밀도가 우수한 장점을 가지고 있으나, 조형설비의 비용이 들고, 또한 모형 및 주형에의 필름 장착 등에 시간이 필요하여 사이클 타임이 약간 길어지는 단점이 있다[4].

진공흡입주형법에서는 주형 공간 내를 직접 감압하는 것은 아니지만, 주형 유지를 위한 감압 때문에 주입시의 용탕의 충전 전에 간접적으로 영향을 미치게 된다. 또한 진공흡입주형법에서

는 주형 형상 유지를 위하여 필름을 사용하고 있는데, 용탕이 흘러가면서 주형공간이 충전되기 전에 부분적으로 용탕이 필름에 닿으면 필름의 온도가 올라가게 된다. 이 필름의 융점은 낮으므로, 만일 필름이 녹게 되면, 감압효과가 감소하여 녹은 부분에서 주형사를 붙잡고 있는 모래가 붕괴되어 주형 공간 내로 떨어질 가능성이 있다. 이 경우 그 모래가 개재물로 남게 되고, 또한 형이 붕괴된 만큼 원하던 형상이 얻어지지 않으므로 불량 발생하게 된다.

본 연구에서는 진공흡입주형법에 있어서 탕구방안에 따른 용탕 충전양상을 조사하기 위하여 기존의 탕구계 설계식을 이용하여 탕구계를 설계한 후, 상용 해석 프로그램을 이용하여 주형 충전양상을 계산하고 그 결과를 검토하였다.

2. 계산방법

2.1 시편

시편은 Fig. 1과 같이 직육면체의 단순형상으로, 단면은 7.2 × 15.4 cm로 같으나, 높이는 1.8, 4, 6 cm로 3가지를 해석 대상으로 하였다. 제품 캐비티는 2개이며, 주입재질은 주철

[†]E-mail : simha@kut.ac.kr

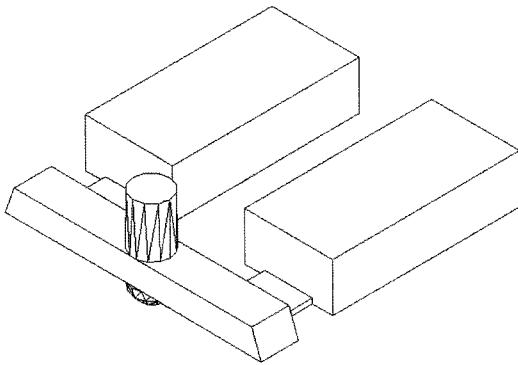


Fig. 1. Geometry of the specimen.

(GC200)로, 주형은 규사로 하였다.

유동계산 시 요소는 시편의 크기에 따라서 x방향으로 115개, y방향으로 117~125개, z 방향으로 48~58개로 절단하였다.

2.2 탕구계의 계산

일반적으로 탕구계는 가압계와 비가압계가 있다. 초기 용탕의 속도가 빠르면 용탕이 주형공간의 표면을 타고 먼저 흘러들어 가게 되는데, 진공흡입주형법에서는 이럴 경우 표면의 비닐이 먼저 연소하여 그 부분에서 주형의 붕괴가 일어날 가능성이 있으므로 용탕의 속도를 완화시킨 비가압계가 적당하다고 알려져 있다.

본 연구에서는 가압계와 비가압계 모두 고려하여 탕구계를 설계한 후 해석을 하였는데, 탕구계의 선정 → 중량계산 → 주입온도결정 → 주입시간결정 → 유효 탕구높이 결정 → 탕구계의 초크부 결정 → 탕구계 수립의 순서로 탕구계를 설계하였다.

2.2.1 주입속도

용탕의 속도(V)는 헤드의 높이와 용탕이 주형에 차 들어가기면서 방향전환을 하는 빈도수에 의존하게 되는데, 다음 식으로 계산하였다[5].

$$V = \sqrt{2gH/\eta} \tag{1}$$

여기서 g: 중력가속도, H: 유효헤드의 높이, η: 충돌계수(90도 꺾일 경우 2.8, 한번 더 꺾일 경우 2.8+1.3) 이다.

헤드의 높이는 주물이 상하형에 어떻게 위치하는가에 따라서 달라지게 되는데 유효헤드높이를 고려하여 용탕의 유속을 구하면 Table 1과 같이 된다.

2.2.2 주입시간

주입시간(t)은 (2)식을 이용하여 계산하였다[5].

$$t = K[0.95 + (0.4726T)]\sqrt{2.2W} \tag{2}$$

여기서 K: 유동계수, T: 주물의 두께(cm), W: 주물중량(kg), t: 주입시간(sec)이고, 유동계수는 다음과 같다.

$$K = \frac{\text{주입된 용탕의 유동도}}{40}$$

이 때 K는 0.35로 하여 주입시간을 구한 결과는 Table 2와 같다.

2.2.3 초크부 단면적

초크부의 단면적(A)은 속도와 유효탕구높이를 고려한 다음 식으로 계산하였다[5].

$$A = \frac{22.6W}{C\sqrt{Hd} \cdot t} \quad (\text{CGS 단위}) \tag{3}$$

여기서 W: 주입중량(kg), C: 속도계수: 0.3~0.55, H: 유효탕구높이(cm), d: 밀도(g/cm³), t: 주입시간(sec)이고, 계산결과는 Table 3과 같다.

2.2.4 탕구 설계

이상과 같이 초크부 단면적을 계산한 후 탕구비를 2.4:2:1의 가압계로 하였을 때 초크부는 인게이트가 되는데, 탕구봉, 탕도, 인게이트부의 단면적은 Table 4와 같다. 비가압계로 한 경우의 탕구비는 1:2:2 및 1:√2:1의 두가지로 계산하였는데, 이 경우에는 초크부가 탕구가 되는데, 탕구봉, 탕도, 인게이트부의 단면적은 Table 5와 같다.

2.3 감압력-유동속도

실제 진공흡입주형법에서는 주형 공간 내를 직접 감압하는 것은 아니지만, 주형 유지를 위한 감압 때문에 주입시의 용탕

Table 2. Calculated pouring time.

Casting thickness (cm)	Weight(kg)	Pouring time(sec)
1.8	2.99	1.62
4	6.65	3.80
6	9.98	6.21

Table 3. Calculated area of the choke.

Casting thickness (cm)	Weight (kg)	Velocity (cm/sec)	Density (g/cm ³)	Pouring time (sec)	Area of the choke (cm ²)
1.8	2.99	56.2	7.5	1.62	4.39
4	6.59	56.3	7.5	3.80	4.55
6	9.89	55.7	7.5	6.21	3.84

Table 4. Calculated areas of the pressurized gating system (Gating ratio 2.4 : 2 : 1).

Casting thickness (cm)	Sprue area (cm ²)	Runner area (cm ²)	Ingate area (cm ²)
1.8	10.54	8.79	4.39
4	10.92	9.10	4.55
6	9.23	7.69	3.84

Table 1. Calculated velocity of the molten metal.

Sprue height (cm)	Casting height in the cope (cm)	Effective head height (cm)	Velocity (cm/sec)
7.5	1.8	6.6	56.2
7.5	4	5.5	51.3
9.5	6	6.5	55.7

Table 5. Calculated areas of the non-pressurized gating system.

Gating ratio	Casting thickness (cm)	Sprue area (cm ²)	Runner area (cm ²)	Ingate area (cm ²)
1 : 2 : 2	1.8	4.39	8.79	8.79
	4	4.55	9.10	9.10
	6	3.84	7.69	7.69
1 : $\sqrt{2}$: 1	1.8	4.39	6.21	4.39
	4	4.55	6.43	4.55
	6	3.84	5.44	3.84

의 충전에 간접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 용탕의 유동속도가 빨라지게 되는데, 유동해석에서는 주형공간 내의 간접적인 감압의 고려가 불가능하므로 Fig. 2와 같은 장치를 사용하여 감압도와 유체의 이동속도를 미리 측정하였다. 유체는 물을 이용하여 일정한 감압, 일정 시간 하에서의 유동길이를 측정 후 이를 시간으로 나누어서 유동속도로 하였다. 감압도는 -0 ~ -400 mmHg까지 하였는데, 감압도에 따른 유동거리는 Fig. 3과 같고, 감압도에 따라서 흡인된 거리는 100~350 cm 이었다. 그러나 이 실험은 투명한 비닐호스를 이용하여 하였는데 내부 저항이 작아서 감압에 매우 민감하게 결과가 나타났

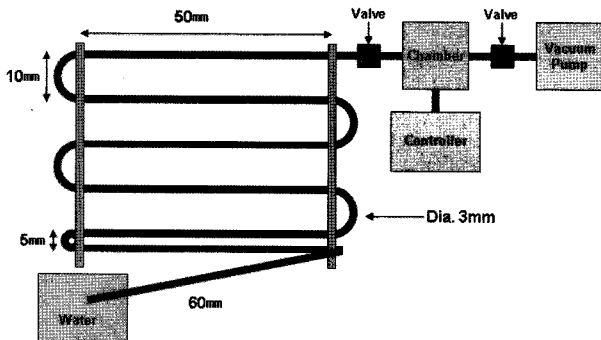


Fig. 2. Measurement of the flowing distance with reduced pressure.

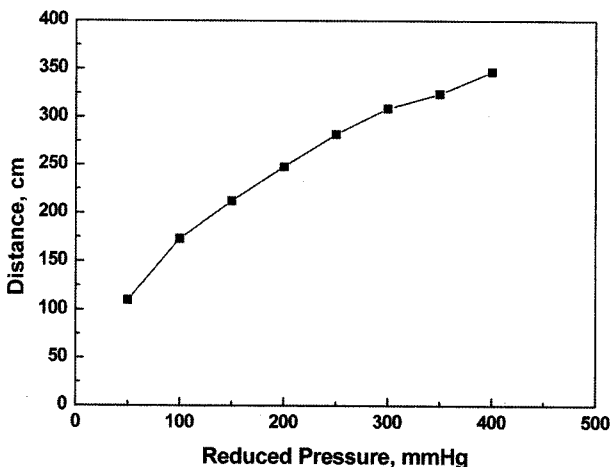


Fig. 3. Flowing distance with reduced pressures.

Table 6. Thermal properties for the flow and solidification analyses.

Property	Casting	Mold	
Thermal conductivity (cal/cm · s · °C)	0.285	0.001	
Density (g/cm ³)	6.846	2.750	
Specific heat (cal/°C)	0.297	0.200	
Latent heat (cal/g)	51.352	0	
Heat transfer coeff. (cal/cm ² · s · °C)	air-mold	0.0014	
	air-casting	0.0014	
	casting-mold	0.024	
Flow Analysis	Pouring velocity (cm/sec)	25	
		Pressurized system	25
		28	
		Non-pressurized system	60
		60	
		68	
		g (cm/sec ²)	980

으므로 실제 유동해석 시에는 헤드의 높이, 충돌계수 및 감압 등을 고려하여 입구의 속도를 입력하였다.

2.4 유동 및 응고계산

유동 및 응고계산은 ZCAST를 이용하였고, 용탕 및 주형의 온도는 각각 1,290°C와 25°C로 하였다.

계산변수로는 용탕의 초기속도 및 탕구계를 가압계 및 비가압계로 하는 것을 고려하여 탕구계의 단면적으로 하였다. 용탕의 초기속도(용탕이 탕구부에 유입되는 속도)는 2.2절에서 계산한 결과에 감압을 고려하여 입력하였다.

계산에 사용한 대상모델은 Fig. 1과 같고, 계산에 사용한 열물성치 및 계면 열전달계수는 Table 6과 같다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 충전시간

가압계 및 비가압계로 한 경우 유동해석 결과 충전시간은 Table 7과 같다. 2.1절에서 유효헤드높이를 고려하여 용탕의 유속을 구한 결과, 세가지 시편에 대하여 각각 56.2, 51.3,

Table 7. Mold filling time for the pressurized and non-pressurized system.

Gating system	Gating ratio	Casting height (cm)	Mold filling time (sec)
Pressurized system	2.4 : 2 : 1	1.8	2.69
		4	4.99
		6	7.32
Non-pressurized system	1 : 2 : 2	1.8	2.67
		4	4.99
	1 : $\sqrt{2}$: 1	6	7.18
		1.8	2.33
		4	4.75
		6	6.89

55.7 cm/sec이었다. 그러나 실제 유동계산에서는 용탕의 초기 속도는 가압계인 경우 21~23 cm/sec, 비가압계인 경우는 51~56 cm/sec로 하였다. 이와 같이 가압계와 비가압계에서 용탕의 초기속도가 다른 이유는 탕구계 설계 시 용탕의 유속은 초크부를 기준으로 하기 때문이다. 즉 초크부의 단면적은 비가압계이든 가압계이든 모두 같으므로 실제로는 용탕이 주입되는 탕구부의 단면적이 달라지게 되는데, 따라서 유동해석에서 입력의 기준이 되는 탕구부 상부의 단면적이 달라지기 때문이다. 즉 가압계인 경우는 탕구비가 2.4 : 2 : 1인데, 인게이트가 초크부가 되므로 탕구부의 단면적은 이의 2.4배가 되고 따라서 주입속도(초기 용탕속도)는 그만큼 느려지게 된다. 한편 비가압계인 경우는 탕구비가 초크부이므로 주입속도가 빠르게 된다.

Table 7의 유동해석 결과를 보면, 유동해석한 결과 충전완료 시간은 2.2절의 탕구계 설계 시의 주입시간과 차이가 있는데, 이는 탕구계 설계 시는 충전되는 중량을 주물만으로 하여 계산하기 때문이다. 그러나 유동해석에서는 탕구부에서부터 탕도, 인게이트 및 주물을 포함한 공간을 대상으로 하였기 때문이다. 주입시간은 탕구계 설계 시 2.2절의 식으로 계산한 결과 세가지 시편에 대하여 각각 1.62, 3.80, 6.21 sec이었으나, 유동해석한 결과는 가압계의 경우 세가지 시편에 대해서 각각 2.69, 4.99, 7.32 sec이었고, 비가압계의 경우는 탕구비가 1:2:2인 경우는 2.67, 4.99, 7.18 sec, 탕구비가 1 : $\sqrt{2}$: 1인 경우는 2.33, 4.75, 6.89 sec이었다.

3.2 충전양상

높이 6 cm의 시편에서 세가지 모델의 가압계 및 비가압계의 시간에 따른 충전상황은 다음과 같다. 가압계에서 용탕 초기속도가 23 cm/s인 경우 충전양상은 Fig. 4와 같다. 전체적으로 용탕이 바닥부분부터 채우고 들어가는 감을 알 수 있는데 이 경우의 충전시간은 7.32 sec이었다. Fig. 4-Fig. 10의 그림은 일정시간 간격별로 충전양상을 나타낸 것이 아니고 충전 시 변화가 명확히 보이는 시간에서의 충전 양상을 나타낸 것이다.

Fig. 5는 가압계에서 용탕 초기속도가 40 cm/s인 경우의 충전양상으로 용탕이 주입구의 맞은 편 쪽으로 빨리 전진하여 충전되나 주형벽에 용탕이 닿았다가 다시 떨어지는 현상은 나



Fig. 4. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 23 cm/s, Pressurized system).

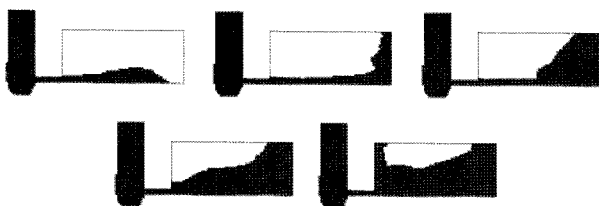


Fig. 5. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 40 cm/s, Pressurized system).

타나지 않았다.

Fig. 6은 가압계에서 용탕 초기속도가 50 cm/s인 경우의 충전양상인데 용탕의 선단이 바닥 표면을 흐른 후 높이 방향으로 벽을 타고 올라간 후 다시 아래로 내려오는 현상이 그림의 O부위에서 나타남을 알 수 있다.

이보다 속도가 빠른 70 cm/s인 경우도 역시 주형 상부의 벽에 닿았다가 다시 떨어지는 현상이 아주 짧은 순간이지만 그림의 O부위와 같이 나타났다. Fig. 7에서 오른쪽 위 그림에서 왼쪽 아래 그림까지 걸리는 시간은 0.8~0.9초로 짧은 시간에 용탕이 주형 상부에 닿았다가 떨어지고 다시 전체적으로 충전이 되고 있다. 그러나 용탕의 초기속도가 75 cm/s 이상이 되면 용탕이 주형상부에 닿은 후 떨어지는 현상은 나타나지 않았고 후속 용탕이 계속하여 충전되었다.

비가압계에서 용탕의 초기속도가 56, 75, 100 cm/s까지는 차분하게 용탕이 충전되었고, 이보다 속도가 빠른 200 cm/s에서도 용탕이 주형 벽에 닿았다가 떨어지는 현상은 나타나지 않았다(Fig. 8). 그러나 Fig. 9를 보면 240 cm/s에서는 Fig. 7의 O부위와 같이 용탕이 주형 벽에 닿았다가 떨어지고, 다시 전체적으로 충전되는 현상이 나타남을 알 수 있다. Fig. 9에서

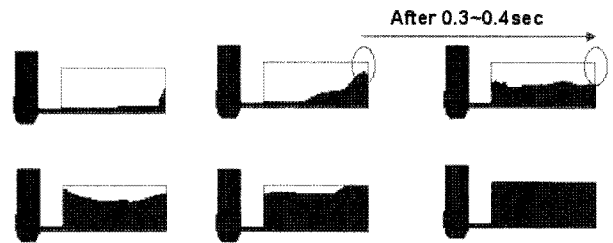


Fig. 6. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 50 cm/s, Pressurized system).

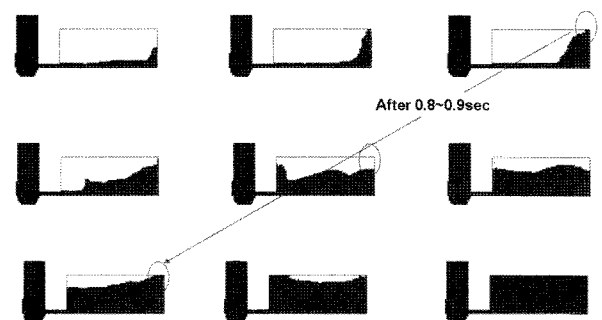


Fig. 7. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 70 cm/s, Pressurized system).

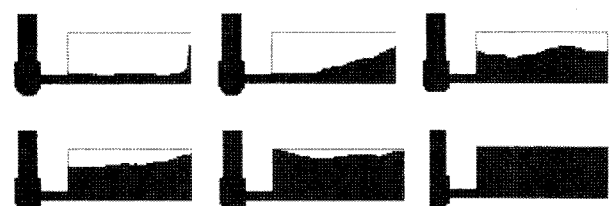


Fig. 8. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 200 cm/s, Non-pressurized system).

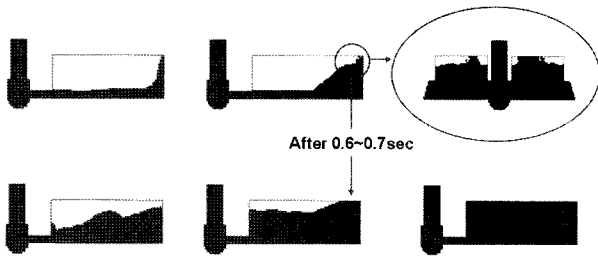


Fig. 9. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 240 cm/s, Non-pressurized system).

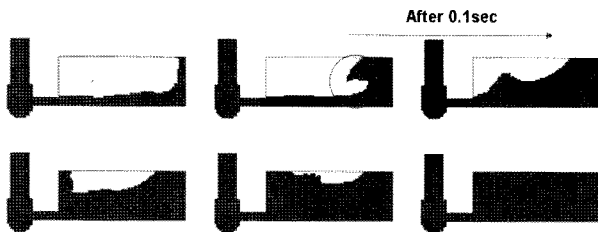


Fig. 10. Flow behaviour during the mold filling (Initial velocity of the molten metal: 300 cm/s, Non-pressurized system).

○부위를 확대한 것은 y방향에서 본 그림으로, 용탕 일부가 주형 상부에 닿은 것을 확인할 수 있다. 속도가 더 빠른 300 cm/s에서도 이러한 현상이 나타났으나(Fig. 10), 후속 용탕이 계속하여 충전되는 양상을 나타내었다.

전술한 바와 같이 가압계, 비가압계 세가지 모델에 대해서 모두 탕구계 설계에서 계산한 용탕의 주입속도 하에서는 바닥을 채운 후 차분하게 높이 방향으로 점진적으로 충전되었다.

즉 용탕이 주형공간의 높이방향으로 표면을 타고 먼저 꼭대기까지 흘러간 후 거꾸로 아래 부분이 채워지는 현상은 거의 나타나지 않았다. 이러한 경우는 주형공간을 덮고 있는 비닐이 순차적으로 타면서 용탕으로 채워지기 때문에 주형사의 낙하 등의 문제가 발생하지 않게 된다.

진공흡입주형법에서 주형상자를 진공흡인하는데 주형공간에서도 진공배기의 영향이 있다고 가정하면, 용탕의 주입속도는 빨라지게 된다. Fig. 7~Fig. 10은 진공흡인의 영향이 있다고 가정하여 용탕의 초기속도를 빠르게 한 경우이다. 속도가 빨라지면서 용탕의 선단이 바닥 표면을 흐른 후 높이 방향으로 벽을 타고 올라간 후 다시 아래로 내려오는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 먼저 벽면을 타고 올라간 용탕이 비닐을 태우고 다시 아래로 떨어지므로 비닐이 탄 부분에서 주형상자의 진공이 새므로 주형사가 떨어질 가능성이 매우 높게 된다.

가압계에서 주입되는 용탕의 선단이 높이방향까지 먼저 올라간 후 다시 떨어지는 속도를 구해보면 50 cm/sec이었고, 비가압계에서는 240 cm/sec이었다. 비가압계는 속도를 높여도 탕구계 설계 시의 속도보다 4배 정도 증가한 속도까지는 용탕이 바닥부터 채우고 올라가는 경향을 나타내었으나, 가압계에서는 탕구계 설계 시의 속도보다 2.5배 정도의 속도 이상이 되면 용탕이 높이방향의 벽면을 채우고 다시 아래로 떨어지는 현상이 일어났다.

Table 8. Solidification time for the pressurized and non-pressurized system.

Gating system	Gating ratio	Casting height mm	Solidification time(I) sec	Solidification time(II) sec
Pressurized system	2.4 : 2 : 1	18	335	275
		40	562	406
		60	812	581
Non-pressurized system	1 : 2 : 2	18	267	219
		40	568	414
	1 : √2 : 1	60	820	589
		18	238	176
	1 : √2 : 1	40	562	407
		60	808	582

이러한 경우 주형을 덮고 있는 비닐의 연화점이 70°C 정도이므로 이 정도의 온도이면 비닐이 연화 또는 연소되어 형의 부분적인 처짐 또는 주형사의 낙하가 일어날 수 있으나, 실제로는 비닐표면에 도형재를 도포하여 사용하므로 주입 시에 비닐의 연화 또는 연소에 의하여 그 부분에서 주형사의 낙하 가능성은 적을 것으로 보인다.

3.3 응고시간

Table 8에서 응고시간(I)은 주물의 초기온도를 전 요소에서 동일하게 하여 응고해석한 경우이고, 응고시간(II)는 용탕이 초기에 주입될 때부터 온도를 해석하여 주형공간이 전부 충전되었을 때에는 주물 내의 각 요소의 온도가 달라지게 하여 응고해석한 결과이다.

표를 보면 응고시간(I)과 응고시간(II)의 차이가 꽤 큼을 알 수 있다. 또한 시편이 클수록 그 차이가 커지고 있는데, 이는 시편이 클수록 충전에 시간이 소요되므로 응고시작이 초기온도를 일정하게 한 경우보다 그만큼 빠르기 때문으로 보인다.

4. 결 론

1) 탕구계를 기존의 방법을 이용하여 가압계와 비가압계로 설계한 후 계산변수로는 용탕의 초기속도를 고려하여 계산한 결과, 가압계에서 주입되는 용탕의 선단이 높이방향까지 먼저 올라간 후 다시 떨어지는 속도를 구해보면 50 cm/sec이었고, 비가압계에서는 240 cm/sec 이었다. 비가압계는 속도를 높여도 탕구계 설계 시의 속도보다 4배 정도 증가한 속도까지는 용탕이 바닥부터 채우고 올라가는 경향을 나타내었으나, 가압계에서는 탕구계 설계 시의 속도보다 2.5배 정도의 속도 이상이 되면 용탕이 높이방향의 벽면을 채우고 다시 아래로 떨어지는 현상이 일어났다.

2) 주형 충전 시 부분적으로 용탕이 전부 주형공간을 충전시키기 전에 주형상부의 비닐에 닿는 경우가 발생하였다. 주형을 덮고 있는 비닐의 연화점이 70°C 정도이므로 이 정도의 온도이면 비닐이 연화 또는 연소되어 형의 부분적인 처짐 또는 주형

사의 낙하가 일어날 수 있으나, 실제로는 비닐표면에 도형재를 도포하여 사용하므로 주입 시에 비닐의 연화 또는 연소에 의하여 그 부분에서 주형사의 낙하 가능성은 적을 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] L. Karlsson: Modern Casting, "Computer Simulation Aids V-Process Steel Casting" (1996) 49-51
- [2] P. Kumar and J. L. Gaindhar: AFS Transactions, "Effect of process variables on surface finish and soundness of Al-11%Si alloy V-Process castings" (1996) 1143-1150
- [3] P. Kumar, J. L. Gaindhar and S. Holi: Trans. ASME, "Effect of flyash addition on the quality of Al-11%Si alloy castings produced by V-Process", 120 (1998) 722-727
- [4] Japan Foundry Engineering Society: Handbook of Foundry Engineering, Maruzen (1986)
- [5] Foundry Technology Center: Gating System, Korea Institute of Science and Technology (1980)