

논문

진공흡입주형 주조법에서 주강의 압탕 방안 설계

강복현 · 김기영[†] · 김명한* · 홍영명**

한국기술교육대학교 신소재공학과

*충북대학교 신소재공학과

** 한국생산기술연구원

Risering of Steel Castings 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, Cheonan, 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

General criteria for the risering design of steel castings and commercial codes for the flow and solidification analysis were used to design the optimized risering in V-process. Three type of specimens were chosen including thin plates and a thick disc. Sided riser installed in the front of a plate casting was effective to prevent the shrinkage defects and to increase the casting yield ratio. Exothermic sleeve and chill were also effective. It was possible to apply the general criteria for the risering design of steel castings to V-process. Temperature of a mold surface was expected to rise over 1,000°C in the temperature calculation considering radiation effect of molten metal in the mold. Since weakening temperature of the vinyl used in V-process is about 70°C, it should be emphasized that a proper coating of the vinyl film is necessary to prevent the possibility of burning out of the vinyl by the molten metal.

Key words : Vacuum molding process, Risering design, Radiative heat, Vinyl coating.

(Received February 10, 2007 ; Accepted March 20, 2007)

1. 서 론

진공흡입주형법에서는 주형 공간 내를 직접 감압하는 것은 아니지만, 주형 유지를 위한 감압 때문에 주입시의 용탕의 충전에 간접적으로 영향을 미치고, 또한 주형표면은 평활한 플라스틱 필름으로 덮혀 있어서 용탕의 흐름에 대한 저항이 작으므로, 주입 시 용탕의 충전성이 개선되어 얇고 넓은 주물의 제조에 적합하다고 알려져 있다[1].

진공흡입주형법으로 주조가 가능한 재질은 주강, 주철, 경합금, 동합금 등 다양하고, 두꺼운 제품이나 응고수축이 발생하는 재질의 제품 제조도 가능한데[2], 이런 경우는 압탕의 설치가 필수적이다. 이 주조법에서 용탕을 주입하게 되면 용탕이 통과하는 부위는 그 옆로 필름이 순간적으로 소실되게 되는데, 두꺼운 제품의 경우에는 주입 시 주형공간의 하부는 용탕이 주형면에 접촉하게 되나, 상부는 용탕이 충전되기 전까지는 하부 용탕의 복사열로 가열되게 된다. 이럴 경우 주형 상부를 덮고 있는 필름의 연화 또는 소실이 일어나서 주형의 부분적인 붕괴가 일어날 우려도 있다.

특히 주강은 주입온도도 높고, 응고 시의 수축으로 인하여 압탕이 필수적이므로 압탕의 설계가 매우 중요하다[3]. 전보[4]

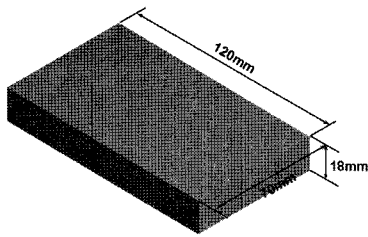
에서는 주철 주입 시의 탕구방안의 설계를 다루었으나, 본 연구에서는 주강을 대상으로 기존의 식을 이용하여 압탕방안을 설계한 후, 상용 해석 코드를 이용하여 주형 충전양상과 응고 수축 양상을 계산하고, 또한 복사를 고려한 해석을 하여 주입 시의 주형 표면온도 상승을 계산하고, 그 결과를 검토하였다.

2. 계산방법

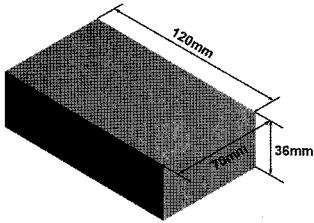
2.1 시편

시편은 Fig. 1과 같이 3종류이며, 시편에 따라 2~3가지로 압탕을 설계하였다. 1번 시편(Case 1)은 W70×L120×T18 mm이며, 압탕의 위치는 제품 중심부, 제품 앞, 제품 뒤의 3가지로 설계하였고, 주형은 제품 2개로 구성된 2 캐비티를 해석대상으로 하였다. 2번 시편(Case 2)은 W70×L120×T36 mm로, 탕구 겸용 압탕으로 설계하였다. 3번 시편(Case 3)은 디스크형상으로, D400×H120 mm 크기로 탕구겸용 압탕을 적용하였다. 3번 시편의 경우는 시편규격의 발열슬리브도 적용하여 해석하였다. 주입재질은 3종류 모두 주강(SC42)으로 하였으며 주형은 규사 주형으로 하였다.

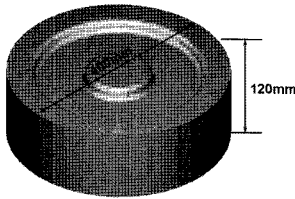
[†]E-mail : simha@kut.ac.kr



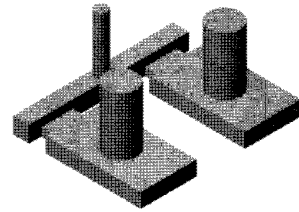
(a) Case 1



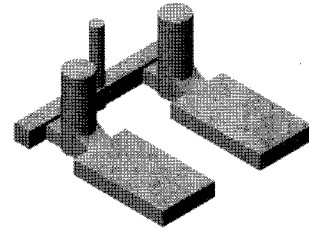
(b) Case 2



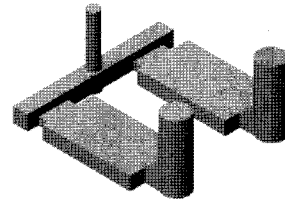
(c) Case 3



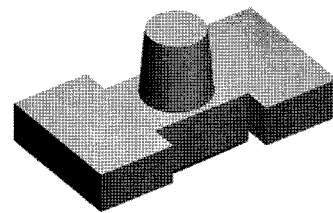
(a) Case 1(center risering)



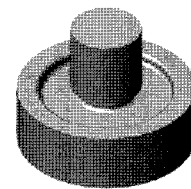
(b) Case 1(front risering)



(c) Case 1(rear risering)



(d) Case 2



(e) Case 3

Fig. 1. Specimens for analyses.

2.2 주조방안

2.2.1 탕구방안

탕구방안 설계에서 주입속도, 주입시간, 초크부 단면적의 계산식은 전보[4]와 같다. Case 1의 경우는 탕구비 1:2:4의 비가압계로 설계하여 용탕의 요동을 최소화하도록 하였고, Case 2와 3의 경우는 제품의 형상과 회수율을 고려하여 직접 게이트방식으로 설계하였다.

2.2.2 압탕방안

주강은 응고시 수축하므로 압탕과 냉금등을 사용하여 응고수축을 방지하여야 한다. 압탕은 충분한 용탕을 보유하고 주물보다 늦게 응고되어야 하며 급탕대상부의 응고수축량을 충분히 공급할 수 있어야 한다. 또 어느 정도 높이가 있어서 대기압 및 헤드에 의하여 주물본체에 용탕이 공급되어야 한다. 이와 같은 목적을 만족시키려면 압탕의 모듈러스가 주물 모듈러스의 1.2배 이상이 되어야하며 체적에 따른 수축량도 고려하여야 한다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 압탕의 위치 또는 크기를 변화시켜 급탕거리를 조절하여 최종응고부가 압탕에 존재하도록 방안을 세워 해석을 하였는데 그 계산과정은 다음과 같다.

1) 모듈러스

모듈러스는 체적을 표면적으로 나눈 것으로 압탕의 모듈러스는 주물 모듈러스의 1.2배가 되어야 한다. 여기서 주물체적은 탕구계를 제외한 체적을 말한다.

2) 압탕의 크기

압탕의 급탕률은 압탕의 형상에 따라 달라지는데 통상 원통형일

Fig. 2. Risering for various cases.

경우는 14%($H=D$, $H=1.5D$)이고 구형일 경우는 20%정도이다. 압탕의크기는

$$V_R = \frac{\text{주물수축률}}{\text{압탕의 급탕률} - \text{압탕자체수축률}} \times V_C$$

(V_R =압탕체적, V_C =주물체적) 의 식으로 구하였는데, 여기서

주물수축율과 압탕자체 수축율은 5%로 계산하였고 그 결과는 Table 1과 같다.

압탕의 형상은 원통형 압탕을 사용하였다. Case 1과 Case 2는 개방압탕을 사용하였고, Case 3의 경우는 주물이 대형품이라 일반압탕을 사용하면 압탕이 대형화되어 회수율이 크게 떨어지므로 급탕거리와 모듈러스를 고려하여 시판하는 발열슬리브를 사용하였는데, 회수를 향상을 위하여 냉금도 함께 사용하였다. 냉금을 사용하면 방열 표면적의 증가로 인하여 주물의 모듈러스가 작아지므로, 필요한 압탕의 크기도 작아지게 된다.(Table 2)

Case 1은 제품 끝부분에 냉금을 적용하였고, Case 3의 경우는 주물의 모듈러스가 3.3이었으나 주물의 밑바닥에 냉금을 적용한 결과 주물 모듈러스가 2.3으로 작아져서, 그만큼 압탕을 작게 할 수 있었고, 그 결과 주조 회수율이 높아졌다. 냉금의 재질은 저탄소강으로 하였다.

2.2.3 유동 및 응고계산

유동 및 응고계산은 시판되고 있는 ZCAST를 이용하였다. 용탕 및 주형의 온도는 각각 1,600°C와 25°C로 하였다.

계산변수로는 압탕의 위치와 크기를 달리하여 최종응고부와 수축결함의 발생여부를 조사하였다. 용탕의 초기속도는 앞절에서 계산한 주입속도를 입력하여 계산하였고 계산에 사용한 열물성치 및 계면 열전달계수 등 입력치는 Table 3과 같다.

2.3 복사를 고려한 계산

진공흡입주형법에서는 주형 형상 유지를 위하여 필름을 사용

하고 있는데, 용탕이 들어가면서 주형공간이 충만되기 전에 복사열에 의하여 주형표면을 덮고 있는 필름의 온도가 올라가게 된다. 이 필름의 용점은 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.

복사를 고려한 계산은 Case 3의 디스크형상의 두꺼운 제품을 대상으로 하였다. 범용 유한요소해석 코드인 MSC-MARC를 이용하여 충전 중인 용탕의 복사열에 의한 주형의 표면온도상승을 계산하였는데, 해석 시 요소는 Fig. 3과 같이 나누었고 그 계산에 사용한 물성치는 Table 3과 같다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 충전양상

진공흡입주형법은 필름을 이용하므로 충전양상이 중요하다.

Table 2. Calculated riser volume.

| Specimen | Casting volume, cm ³ | Riser volume, cm ³ |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|
| Case 1 | 151 | 84 |
| Case 2 | 912 | 170 |
| Case 3 | Sleeve | 13,984 |
| | Sleeve + Chill | 3,215 |
| | | 2,154 |

Table 1. Calculated modulus of the specimens.

| Specimen | Casting volume, cm ³ | Surface area of casting, cm ² | Casting modulus, cm | Riser modulus, cm |
|----------|---------------------------------|--|---------------------|-------------------|
| Case 1 | 151 | 232 | 0.65 | 0.78 |
| Case 2 | 912 | 740 | 12.3 | 14.8 |
| Case 3 | 13,984 | 4,270 | 3.27 | 3.93 |

Table 3. Thermal properties for the flow and solidification analyses.

| Property | Casting | Mold | |
|--|-------------------------|--------|--------------|
| Thermal conductivity, W/m · °C | 25.1 | 0.63 | |
| Density, kg/m ³ | 7,200 | 1,520 | |
| Specific heat, J/kg · °C | 753.6 | 1004.8 | |
| Latent heat, J/kg | 2.75 × 10 ⁵ | - | |
| Liquidus temp., °C | 1,519 | - | |
| Solidus temp., °C | 1,412 | - | |
| Heat transfer coeff., W/m ² · °C | air-mold | 35.17 | |
| | casting-mold | 1004.8 | |
| Emissivity | mold | 0.9 | |
| | casting | 0.3 | |
| Stephan-Boltzmann constant, W/m ² · °C ⁴ | 5.67 × 10 ⁻⁸ | | |
| Input for flow analysis | pouring velocity, m/s | Case 1 | 0.64 |
| | | Case 2 | 0.095 |
| | | Case 3 | 0.048 / 0.06 |
| | g, m/s ² | 9.8 | |

용탕의 요동이 심할 경우 용탕이 주형 벽에 닿았다가 다시 떨어지는 현상이 발생하여 필름의 손상 가능성이 있으므로 용탕이 바닥부분에서부터 위쪽으로 차분하게 채우고 들어가는 것이 중요하다. Case 1의 세 종류 시편은 차분히 충전이 되었는데,

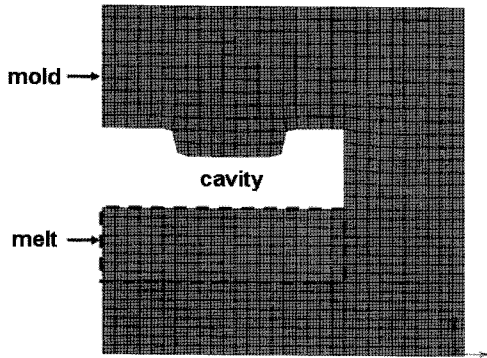


Fig. 3. Simulation model of case 3 specimen to investigate the effect of radiative heating.

제품의 앞쪽에 압탕을 설치하여 용탕이 압탕을 통하여 충전된 경우의 충전양상은 Fig. 4와 같다.

Case 2의 경우는 Fig. 5의 O표 부분에서 용탕의 약간의 요동이 발생하였는데 이것은 Fig. 6의 초기용탕의 유동방향을 보면 확인할 수 있는데, 이러한 부위는 가스결함으로 남을 가능성이 매우 높다. Fig. 6을 보면 탕도를 채운 용탕이 주물로 곧바로 유입되는 것으로 보이지만, Fig. 6은 초기용탕(최선단)의 이동양상만을 본 것으로 실제의 유동양상은 Fig. 5와 같이 용탕은 탕도를 먼저 채운 후 주물로 유입된다. Case 3도 상부에서 직접 주탕한 경우이지만 Fig. 7과 같이 대체로 조용히 충전되고 있다.

냉금을 사용한 경우와 사용하지 않은 시편은 비슷한 충전양상을 가지지만 주입완료 시의 용탕온도에서 차이가 났는데 Case 1은 50°C정도의 차이가 생겼지만 Case 3의 경우는 큰 차이는 생기지 않았다. 이는 주물이 대형품이고 직접게이트 방식이라 용탕이 계속해서 유입되어 냉금의 일시적인 온도상승으로 큰 차이가 발생하지 않는 것인데 응고 시에는 사형보다 열방출속도가 빨라서 결과적으로 응고는 냉금이 있는 쪽이 먼저 응고하였다.

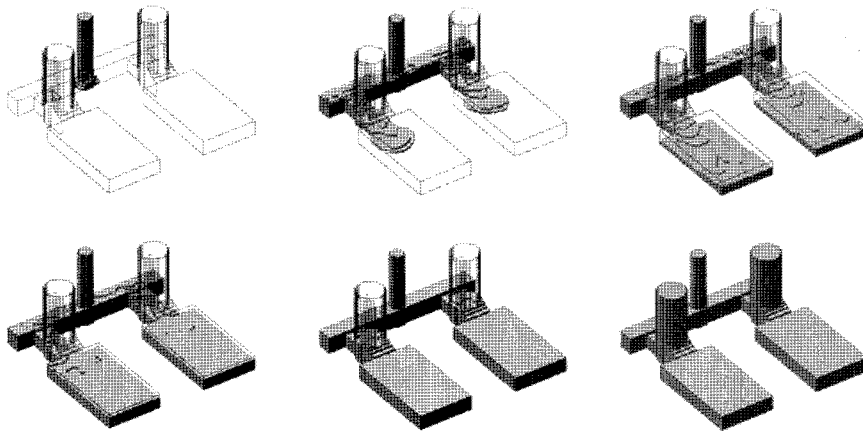


Fig. 4. Flow behavior during mold filling with time for front risering of case 1 specimen.

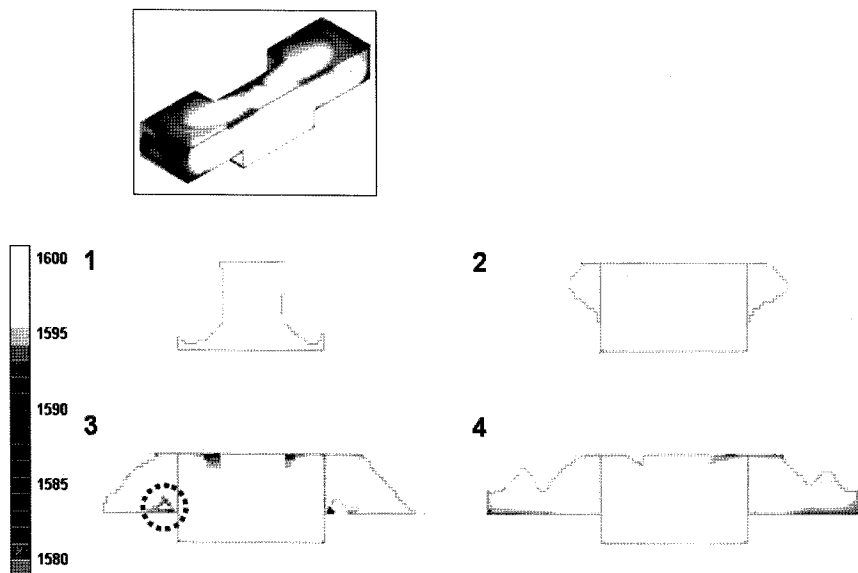


Fig. 5. Flow behavior during mold filling with time for case 2 specimen.

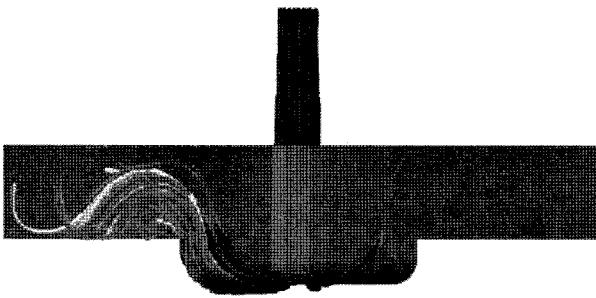


Fig. 6. Initial movement of molten metal in case 2 specimen.

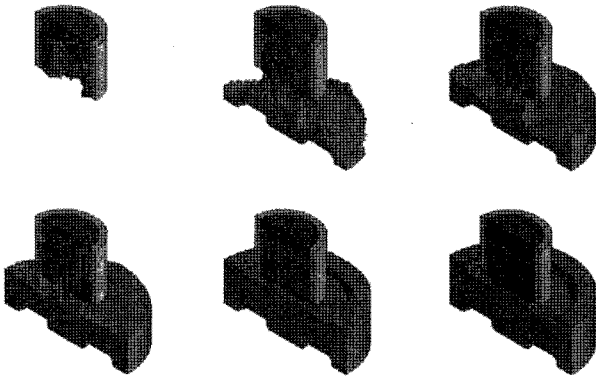


Fig. 7. Flow behavior during mold filling with time for case 3 specimen.

3.2 응고시간

응고해석은 유동해석을 먼저 수행한 후 그 결과를 이용하여 응고해석을 수행하였다. 시편별로 응고시간을 측정해본 결과 압탕의 종류에 따라 차이가 났고, 동일한 종류의 압탕일 때도 그 위치에 따라 차이가 났으며 그 결과는 Table 4와 같다. 주입속도가 다르면 유동온도가 틀려져 응고시간이 달라지는데 Table 3에서와 같이 Case 1, Case 2의 경우는 주입속도를 동일하게 하였고, Case 3은 주물의 체적에 따라서 주입속도를 다르게 적용하였다.

Case 1에서는 압탕이 제품 중앙에 위치한 시편이 응고시간이 가장 길었으며, 측면압탕 시편 중에서는 압탕이 제품 뒤에 있는 시편이 제품 앞에 압탕을 설치한 시편 보다 응고시간이 10초정도 짧게 나타났는데 이는 압탕이 제품 뒤에 있는 것이 앞에 있는 것보다 먼저 충전되어 용탕 유동온도가 낮아지기 때문이다. Case 3은 비교적 두꺼운 제품이어서 응고시간이 1

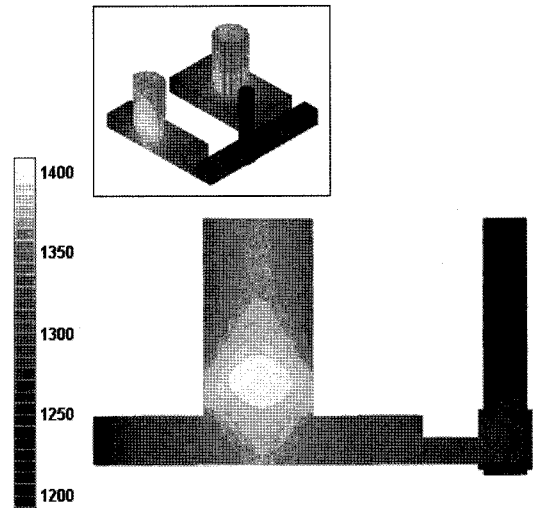


Fig. 8. Solidification time for case 1 specimen(center risering).

시간이 넘게 걸렸으며 유동온도는 크게 영향을 미치지 않았다.

3.3 최종응고부위

주조품은 응고 중에 제품 내외부의 온도차이로 인하여 열변형을 하거나 수축결함이 발생할 수 있는데 규사주형인 경우 제품이 급냉되지 않아서 내외부의 온도 차이는 크지 않으므로 열변형 발생은 감소하게 된다. 최종응고부위가 주물에 존재하면 응고수축이 발생하여 제품결함이 되지만 최종응고부위가 압탕에 존재하게 하면 건전한 제품을 만들 수 있다. 본 연구에서는 압탕을 설치하지 않은 시편을 해석하여 최종응고부위의 위치를 확인한 후 최종응고부위까지 급탕가능한 압탕을 설계하여 최종응고부위가 압탕에 존재하도록 주조방안을 설계하였다.

Case 1에서 압탕을 설치하지 않고 해석을 수행한 결과 제품의 중심부에 최종응고부가 존재하였다. 압탕을 설치한 경우는 압탕의 위치에 따라 최종응고부위가 달라졌는데 제품 중앙에 설치한 것은 Fig. 8과 같이 최종응고부위가 압탕 쪽으로 올라갔는데 해석결과에서는 제품에서 많이 떨어지지 않았지만, 실제 조업시 압탕 상면에 보온재를 사용하면 압탕쪽으로 더 많이 올라갈 것으로 보인다. 이 경우 회수율은 52%로 가장 높지만 후처리가 힘들다는 단점이 있다. 측면 압탕은 제품의 앞부분과 뒷부분에 설치하였는데 먼저 앞부분에 압탕을 설치한 것은 Fig. 9와 같이 최종응고부위가 압탕에 존재하는데, 제품중앙부도 온도가 높아서 압탕이 급탕할 수 있도록 압탕과 제품을 연

Table 4. Solidification time for various specimens.

| Specimen | Riser | Pouring velocity, cm/sec | Pouring temp., °C | Solidification time, sec | |
|----------|-------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------|
| Case 1 | center | 64 | 1,600 | 259.79 | |
| | front | 64 | 1,600 | 193.94 | |
| | rear | 64 | 1,600 | 184.15 | |
| Case 2 | direct gate | 9.5 | 1,600 | 667.89 | |
| Case 3 | sleeve | dia. 160 mm | 4.8 | 1,600 | 4,888 |
| | | dia. 140 mm +chill | 6.0 | 1,600 | 3,848 |

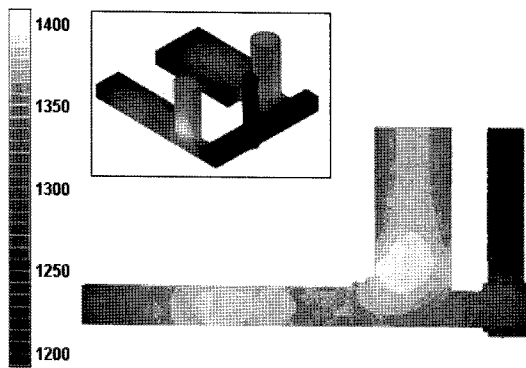


Fig. 9. Solidification time for case 1 specimen(front risering).

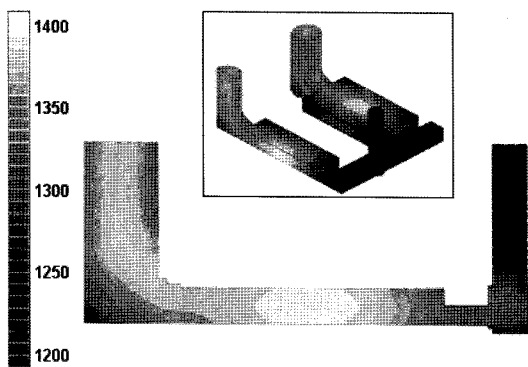


Fig. 10. Solidification time for case 1 specimen(rear risering).

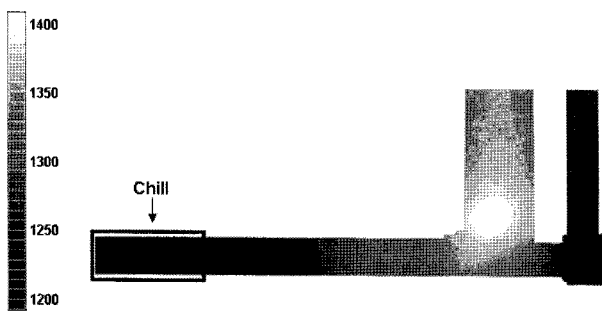
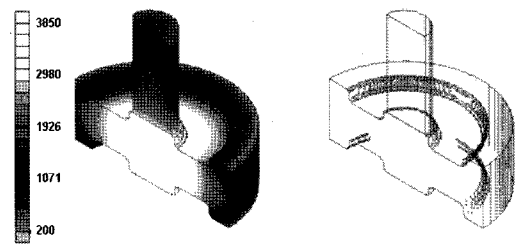


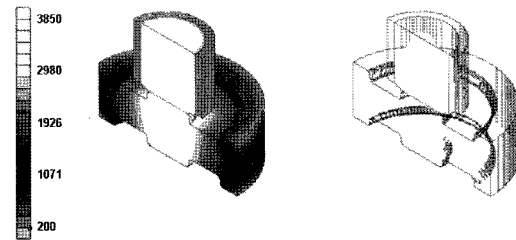
Fig. 11. Solidification time for case 1 specimen(front risering and chill).

결하는 압탕목부가 먼저 응고되지 않도록 설계하여야 한다. Fig. 10은 압탕을 제품 뒤쪽에 설치한 것으로 용탕이 압탕에 먼저 채워지므로 압탕부의 온도가 떨어져서 결과적으로 압탕부 온도보다 제품 중앙의 온도가 더 높아 최종응고부위는 제품에 존재할 위험이 크므로 이 방식은 효과적이지 않다. Fig. 11은 압탕을 제품 앞쪽으로 하고 제품 뒤쪽으로 W70×L50×T18 mm 크기의 냉금을 설치한 것으로 최종응고부가 확실하게 압탕 쪽으로 옮겨가는 것을 확인할 수 있다.

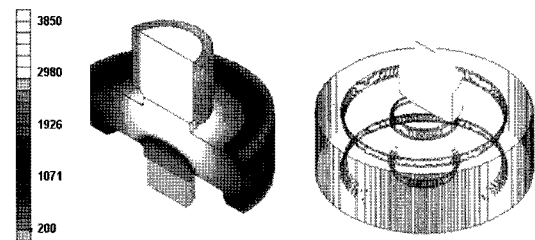
Case 2는 단순히 건전한 주물을 만들어 보기 위해 한 것으로 직접게이트 방식으로 하였고 제품에 수축이 없도록 탕구와 탕도는 최적크기보다 크게 설계하여 회수율은 매우 낮다. 해석 결과 주물보다 탕도가 아래에 있어 탕도에서 주물로 옮겨갈



(a) Sand riser



(b) Sleeve



(c) Sleeve and chill

Fig. 12. Solidification time(left) and final solidified spot(right) for case 3 specimen.

때 약간의 용탕 요동이 발생하였다. 최종응고부위는 주입완료 시까지의 유동온도가 가장 높았던 탕도 중간에 존재하였다.

Case 3은 디스크제품으로 제품이 대형품이라 회수율과 설비를 고려, 시판하는 발열슬리브를 적용하여 해석하였다. 압탕을 설계하기 전 탕구만 설치하여 직접게이트 방식으로 해석을 수행한 결과 Fig. 12(a)와 같이 최종응고부위가 제품의 중앙에 존재하는 것이 확인되었다. Fig. 12(b)는 발열슬리브를 설치한 결과로 최종응고부위가 압탕 쪽으로 올라갔고, Fig. 13에서 표시한 위치에 열전대를 설치하여 냉각곡선을 측정하여 본 결과 압탕 부위의 냉각이 늦음을 알 수 있다. 발열슬리브와 냉금을 함께 사용한 계산에서는 최종응고부위인 압탕부와 제품부의 응고시간의 차이가 커짐을 알 수 있었다. 냉금을 같이 사용한 경우에는 압탕크기가 줄어들어 회수율이 82%에서 87%로 5%정도 올라갔다.

3.4 복사의 영향

통상의 응고해석에서는 주형-주물, 주물-대기, 주형-대기 계면에서는 대류 열전달 경계조건만을 고려하는데 이러한 경우 계산 결과를 보면 용탕이 아직 차지 않은 주형 표면의 온도변화가 전혀 없다. Fig. 14(a)는 복사를 고려하지 않은 경우로, 용탕이 주형공간

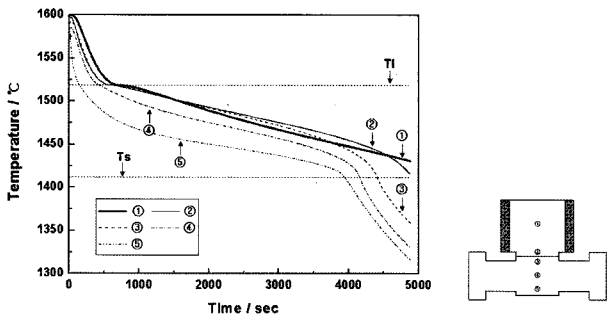
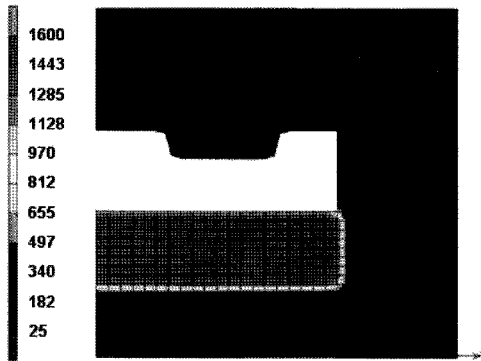
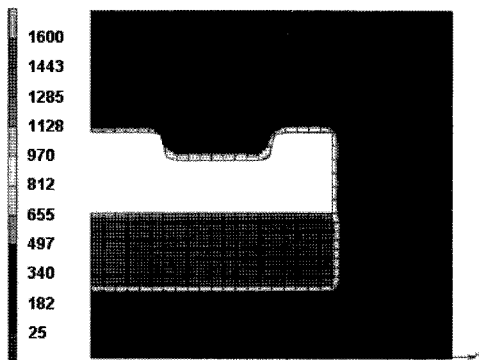


Fig. 13. Cooling curves in various locations for sleeve risering of case 3 specimen.



(a) without radiation



(b) with radiation

Fig. 14. Effect of radiation on the surface temperature of the mold.

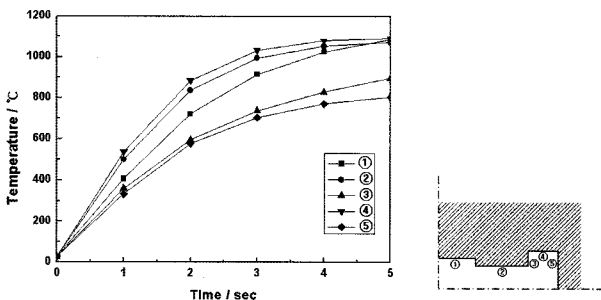


Fig. 15. Surface temperature with time due to the radiative heat of the molten metal during mold filling.

을 1/2 채웠을 때의 주입 5초 후의 주형 및 주물의 온도 분포를 나타낸 것인데 주형의 온도변화는 전혀 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 14(b)는 복사를 고려한 경우로, 용탕이 주형공간을 1/2 채웠을 때의 주입 5초 후의 주형 및 주물의 온도 분포를 나타낸 것인데 주형의 온도가 상승함을 알 수 있다. 온도가 상승한 부위를 관찰하여 본 결과, 주형표면의 온도가 순간적으로 1000°C까지 올라가는 것과 모퉁한 열집중부(Fig. 15의 ④부분)가 온도상승이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

주형을 덮고 있는 비닐의 연화점이 70°C정도이므로 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 낙하는 없을 것으로 보인다. 그러나 온도상승으로 인한 비닐의 연화에 의하여 부분적으로 처짐의 발생 가능성은 배제할 수 없다.

4. 결 론

진공흡입주형법으로 주강을 주조할 때의 주조방안을 기존의 식을 이용하여 탕구계와 압탕을 설계한 후, 상용 해석 코드를 이용하여 계산한 결과를 검토하였는데, 다음의 결론이 얻어졌다.

1) 판상주물의 경우 압탕의 위치를 주물 중심에 설치하는 것보다 측면 압탕으로 주물의 앞부분에 탕구계쪽 압탕을 설치하는 것이 후처리와 회수율을 고려해볼 때 더 효과적이다. 측면 압탕을 사용할 경우 냉금을 함께 사용하면 회수율을 더욱 높일 수 있고 최종응고부위가 압탕쪽으로 옮겨가는 것을 확인할 수 있었다.

2) 탕도가 주물보다 더 낮은 위치에 있으면 탕도에서 주물로 용탕이 유입될 때 요동이 발생하는 것이 확인되었다. 이 경우 탕도아래 코너부분에 라운드를 주어 용탕이 요동치는 것을 최대한 방지하여야한다.

3) 두꺼운 주물의 경우 발열슬리브와 냉금을 함께 사용하면 발열슬리브만 사용한 경우보다 회수율은 약 50% 증가시킬 수가 있었다.

4) 복사를 고려한 계산에서는 충전 시 충전량에 따라 주형표면의 온도가 1000°C이상으로 상승할 수 있고, 고립되는 부분의 온도상승이 큰 것으로 나타났다. 비닐의 연화점이 70°C정도이므로 특히 두꺼운 주물을 주입 시에는 도형재를 잘 도포하여 주입 시에 비닐의 연화 또는 연소에 의한 형의 부분적인 처짐 또는 주형사의 낙하를 방지하여야한다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Japan Foundry Engineering Society : Handbook of Foundry Engineering, Maruzen(1986)
- [3] L. Karlsson: Modern Casting, "Computer Simulation Aids V-Process Steel Casting", (1996) 49-51.
- [4] B. H. Kang et al: J. of KFS, "Mold cavity filling by gating design in vacuum molding process", 27(2007) 42-47.