

+ ( )+, , +, ( )+,  
( ), ( ), ( )

### A Study on the Inner Temperature Behaviors in the Casting Process for the Development of the Automatic Parts

Cha Young-Hoon · ung Back-Sub, Jang Hoon, Mi-ai kim, jung-Dae, Sun-jun Kim, Duck-joong Kim, Youn-sin Lee

#### ABSTRACT

The casting defects that are caused by molten metal were cold shut formation, entrapment of air, gas, and inclusion. But the control of casting defects has been based on the experience of the foundry engineers.

In this thesis, the computer simulation analyzed the flow of molten metal. The quantitative analyses which proposed the effective mold design was executed Flow patterns of 0.15-0.16m/s molten metal in 15 mm thin plate casting were investigated in order to optimize die-casting process. As increasing ingate velocity in thin plate casting, cold shot was decreased.

The parameters of runner shape that affected on the optimized conditions that was calculated with simple equation were investigated. These die casting process control techniques of automobile valve body mid-plate have achieved good agreement with the experimental data of tensile strength, hardness test, and material structure photographs satisfactory results

Key Words : Die-casting( ), Aluminium alloy( ), Valve body medium plate( ), Semi solid method( )

#### 1.

주조 공정에서 용융금속이 주입구를 통하여 주형 공간에 주입되어 응고 되는 과정은 열적, 물리적으로 매우 복잡한 현상으로서 그 과정을 정확히 규명하고 제어하는 일은 매우 어려운 문제이다.

특히 용탕의 충전이 이루어지는 동안 용탕의 유동형태는 주형 내부의 온도에 영향을 미치며, 온도 분포는 용탕의 응고 과정에 영향을 미친다. 충전이 이루어지는 동안 응고가 진행될 수도 있으며 응고된 부분이 충전되는 용탕에 의해 재용융 될 수도 있다. 이와 같이 용탕의 유동은 응고 과정과 밀접하게 상호작용하며 충전이 이루어지기 때문에 충전 과정의 해석은 주조 과정의 해석에서 가장 먼저 해석되어야 할 물리적 현상이다. , 주조에 의해 제품을 제작하기 위해서는 숙련된 기술자에 의해 제품의 원형과 주형을 제작하고 경험에 의한 주조

방안을 바탕으로 시작품을 제작하여 치수나 결함을 검사하여 주형 등을 수정하고 다시 시작품을 제작하는 과정을 통해 공정을 최적화 하고 있다. 이러한 방법은 많은 시간이 소요되며 재료의 낭비와 재사용을 위한 에너지의 소모 등 많은 비용이 들어간다. 그러나 이러한 과정을 컴퓨터를 이용한 주조 과정의 해석을 도입하면 시작품의 제작단계를 획기적으로 줄일 수 있기 때문에 많은 비용과 시간을 절감할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 다이캐스팅 공정에서 액체 금속을 주입후 응고되는 과정을 컴퓨터 시뮬레이션 을 이용한 응고온도 해석에 대하여 연구 하였다.

#### 2.

주조공정에서 가장 중요한 물리적 현상은 주위로 의 냉각을 통한 고상화(solidification)이며 이러한

액상에서 고상으로의 상변화 열전달 과정에서 많은 결함이 발생한다. 이러한 결함에는 거시적 (macroscopic ; shrinkage), (microscopic ; grain size and dendrite arm spacing) 면에서의 금속의 성질 변화뿐만 아니라 주형과 주물의 수축율의 차이에 의한 파손이나 주물 자체의 각 부분의 냉각시간의 차이에 의한 주물의 변형 등이 있다.

기존의 많은 연구자들은 용고 과정을 연구하면서 주형내부가 균일한 온도의 용탕으로 채워져 있다고 가정하였다. 그러나 실제 주조 공정에서는 주형내부의 충전 시간의 차이나 주물의 두께의 차이, 각 주형부의 냉각율의 차이 등에 의해 충전이 완료된 후의 주형내부의 온도는 균일하지 않다. 따라서 균일한 온도라는 가정하에 용고 과정을 해석하는 것은 실제 물리적 사실과 부합되지 않으며, 올바르게 결함을 예측할 수 없다. 주형이나 탕구계의 설계가 잘못되면 주형의 어떤 부분이 용고가 진행되어 나머지 주형부분이 채워지지 못하는 경우도 있다. 탕경(cold shut or misrun)이라 부르는 이러한 현상은 특히 티타늄 합금과 같이 낮은 과열상태에서 큰 문제가 된다. 이러한 결함은 실제 주조 과정 이전에 반드시 예측하여야 하는 중대한 문제이다. 따라서 최근에는 주조 과정의 해석에 충전 과정을 포함하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 주형의 충전이 이루어지는 동안 충전되는 용탕의 유동 형태는 주형내부의 온도에 영향을 미치며 온도분포는 용탕의 용고 과정에 영향을 미친다.

또한 충전 과정에 기인하는 여러 가지 결함은 충전 과정의 해석을 통해 예측할 수 있다. 충전 과정에서 발생할 수 있는 결함에는 앞에서 언급한바 있는 주형이 완전히 채워지지 못하는 불량, 표면난류와 같이 정숙하지 못한 충전이나 주형의 통기성 불량 등에 의한 공기나 가스의 함입, 용탕표면 금속의 산화 등이 있으며 높은 용탕의 속도와 온도에 의한 주형의 부식이나 파손이 일어날 수도 있다. 이러한 결함을 예측하기 위해서는 주형의 충전단계의 유동해석과 열전달 해석이 이루어져야 한다.

사형이나 금형주조에서 주형내 가스 유입을 방지하는 원칙은 용탕의 흐름이 난류로 되지 않게 층류한계 내에서 주입 되도록 하여 용탕의 최선단에서 가스를 순차적으로 밀어내는 것이다. 이와 같은 개념으로 저속충진 다이캐스팅법이 개발되어 실용화되고 있다. 이러한 저속충진 다이캐스팅의 대표적인 것이 초저속 주조법이다.

Fig.1 서와 같이 초저속 주조방법에 의해 생산된 벨브바디 중간 플레이트 부품은 강도편차가 적고, 내열성이 향상되어 열처리가 가능하여 강도가 향상 된다.

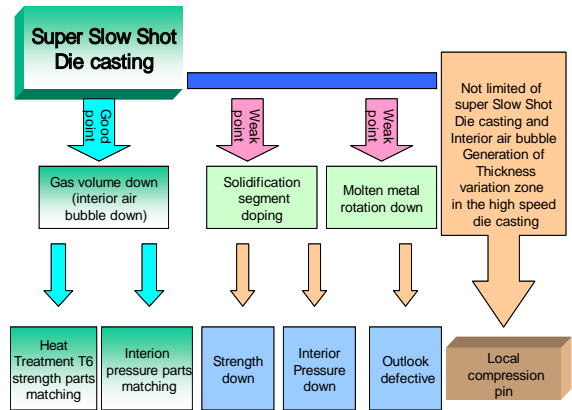


Fig. 1 Strong and defect point analysis of supper slow shot die casting

### 3. 열전달의 기본 미분방정식

열은 고온부에서 저온부로 흐르므로 열전도에 의한 열이동은 Fourier 1칙을 따르게 된다<sup>(31-4)</sup>. 1차원의 경우

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial X} \quad (1)$$

이 된다. 위 식에서  $q$ 는 열유속( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ),  $k$ 는 열전도도( $\text{cal}/\text{C m}$ ),  $\frac{\partial T}{\partial X}$ 는 온도구배( $\text{C m}$ )이다. 식에서 (-) 2칙을 만족시키도록 한 것이다.

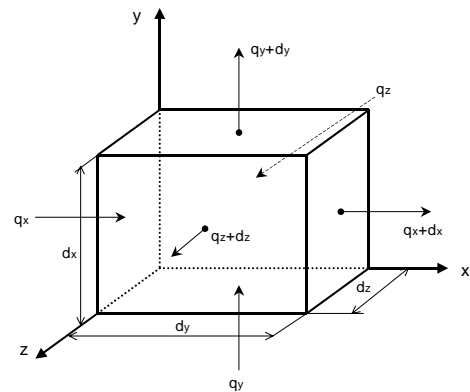


Fig. 2 A control volume in a 4-dimensional mesh cell

시스템이 정상상태, 즉 온도분포가 시간에 대해서 변화하지 않는 경우에는 문제를 단순하게 하여 식에 필요한 값을 대입하여 적분하면 되지만 주조품 응고의 경우처럼 물체내의 온도 분포가 시간과 함께 변화를 하고 응고잠열이 발생하는 경우에는 물체내의 미소요소  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ 에 대해서 다음의 열에너지 보존식이 성립한다.

Fourier 2칙에서는 열전도에 의해 미소 요소내에 유입되는 열량과 미소 요소내에 발생하는 응고잠열 합은 미소 요소내의 내부에너지 변화와 열전도에 의해 미소 요소로부터 유출되는 열량과 같다.

3차원의 좌표계에 설정된 단위 미소요소에 대해서 Fourier 2칙을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_x + dx + q_y + dy + q_z + \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

위의 식에서  $q_x$ 는 x 방향으로,  $q_x + dx$ 는 x 방향으로 유출되는 열량이고,  $q_y + dy$ 는 y 방향으로 유출되는 열량이다.  $q_z + dz$ 는 z 방향으로 유출되는 열량이다.

위 식의 각항은 다음과 같다.

$$q_x = -kdydz \left( \frac{\partial T}{\partial X} \right) \quad (3)$$

$$q_x + dx = - \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left( k \frac{\partial T}{\partial X} \right) dx \right] dydz \quad (4)$$

$$q_y = -kdx dz \left( \frac{\partial T}{\partial Y} \right) \quad (5)$$

$$q_y + dy = - \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( k \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dy \right] dx dz \quad (6)$$

$$q_z = -kdx dy \left( \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (7)$$

$$q_z + dz = - \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) dz \right] dx dy \quad (8)$$

$$Q_{gen} = \rho L \left( \frac{df_s}{dt} \right) \quad (9)$$

$$\frac{dE}{dt} = \rho C_p dx dy dz \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (10)$$

여기서  $\rho$  : 밀도,  $L$  : 잠열,  $fs$  : 응고율,  $C_p$ 는 비열이다.

내부 열에너지의 변화는 위의 각항을 정리하면

다음과 같이 나타난다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( k \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( k \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \rho L \left( \frac{df_s}{dt} \right) \quad (11)$$

#### 4. 실험

자동차 밸브바디 중간 플레이트 부품을 제작하기 위하여 사용된 재질은 A1DC(S)8.1 합금으로 용접이 낮고 유동성, 주조성 및 기계 가공성의 특성이 우수하여 일반 다이캐스트 주조에 가장 많이 이용되는 합금이며, Al-10Si 합금은 과공정 합금으로 고강도, 내마모성 및 내열성이 우수하여 고강도 부품에 적용되고 있다. 변속기 부품인 밸브바디 중간 플레이트 부품 역시 고강도와 내마모성을 요구하는 부품으로서 이러한 고강도 부품에 있어서도 알루미늄 합금으로 다이캐스팅 공정에 의해 생산이 시도되고 있다.

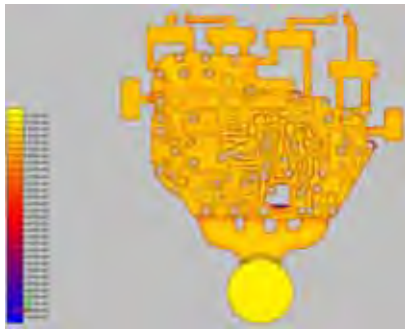
본 해석에서는 전산해석을 위한 소재물성 데이터로서 밸브바디 중간 플레이트를 Z-CAST 1 데이터베이스에 내장되어 있는 A1DC(S)8.1합금의 열적 물성치를 사용하였다. 대체소재를 공정합금으로 선택한 이유는 공정조성 합금의 경우 주조재로서 유동성이 좋으며, 응고중 등온변태에서 나타나는 현상으로 급랭으로 인해 조직이 미세화 되는 등의 특성을 가지고 있어 정량적인 해석이 아닌 전형적인 유동 및 응고패턴을 보여주는 정성적인 해석에 적절한 소재라고 판단하였다. 따라서 본 해석에서는 자동차 밸브바디의 정밀한 응고거동 보다 충전 및 응고시 결함생성 현상과 가압 공정시 가압의 영향 등을 위주로 평가하였다.

#### 5. 응고 온도분포

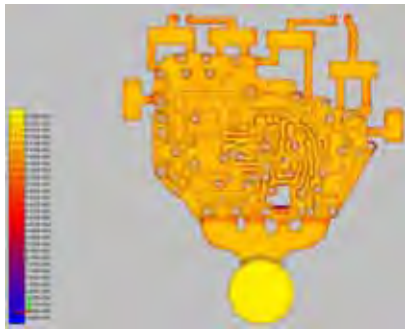
다이캐스팅 알루미늄 용융상태가 응고 시작 시 온도분포는 최대온도가 약 680℃, 예열된 금형 온도가 250℃. 비교적 안정적인 결과를 보여주었다. Fig. 3에서와 같이 부품의 유동속도 벡터에서 분석한 결과에 따르면, 2 mm 깊이의 부위에 가상 열전대를 설치한 후 10 마이크로의 공정을 실행하는 동안 열전대의 변화를 나타낸 것으로 1 마이크로 7 마이크로를 비교해 보면 온도변화에 뚜렷한 차이가 나타났으며, 7 마이크로 이후 일정한 온도를 유지하였다. 최고온도와 최저온도와의 차이를 나타내는  $\Delta T$  : 유사한 양상을 보이는 것으로 볼 때, 7 마이크로 이후에 열적 안정화에 도달하므로 금형의 예열이 필요하다는 것을 알게 되었다. 또한 그림에서와 같이 4 마이크로에서 부터 표면의 온도가 하강하기 시작하여 7 마이크로 사이에서 급격히 온도가 떨어졌으며 9 마이크로, 10 마이크로에서는 일부

온도가 중심부에 내재 되어 있는 것을 볼 수 있다.

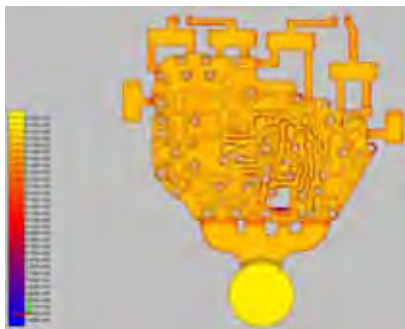
Fig. 4 Fig. 5 |서는 각 사이클에서 분포된 응고온도 상태를 보여 주고 있다. 그림에서와 같이 주조폼에서 열이 금형으로 빠져 나오지 못하고 내재 되어 있으나, 주조폼의 조직변화에는 큰 영향을 미치지 못했다. Fig. 6 |서는 주조폼의 중심부를 절단하여 내부에 존재하는 열을 체크하여 보았다. 그림에서 알 수 있듯이 부품 가운데 부분에서 열이 빠져 나오지 못하는 현상을 볼수 있으나 최종 주조방안에서 이러한 문제점을 최소화 하였다.



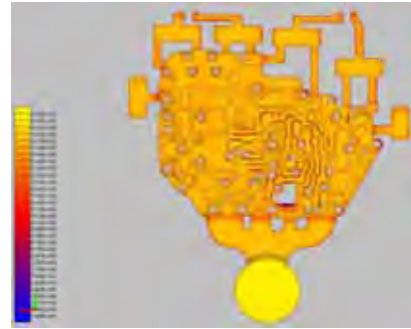
(a) 1 cycle



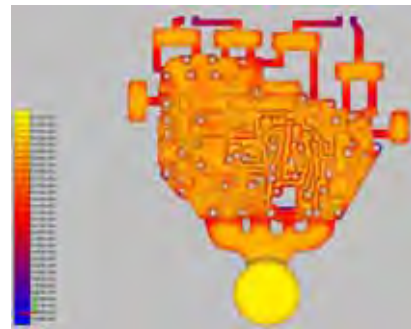
(b) 2 cycle



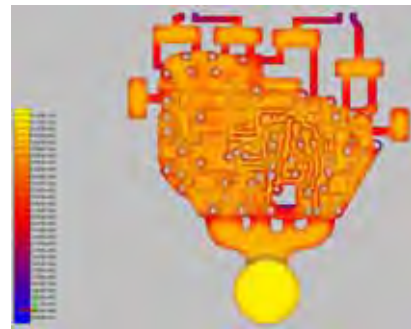
(c) 3 cycle



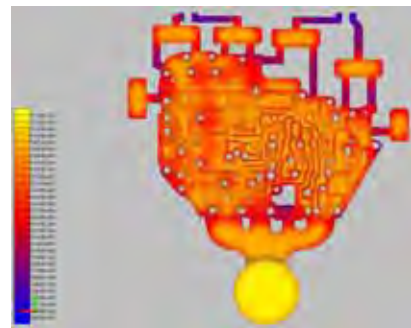
(d) 4 cycle



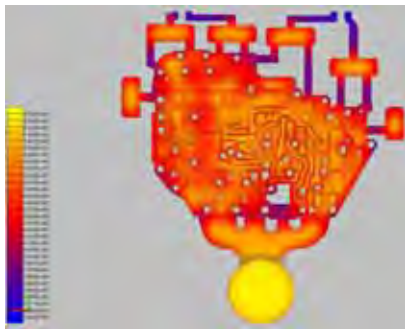
(e) 5 cycle



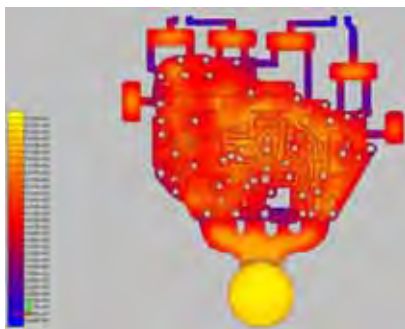
(f) 6 cycle



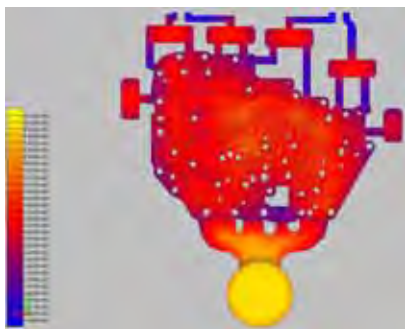
(g) 7 cycle



(h) 8 cycle

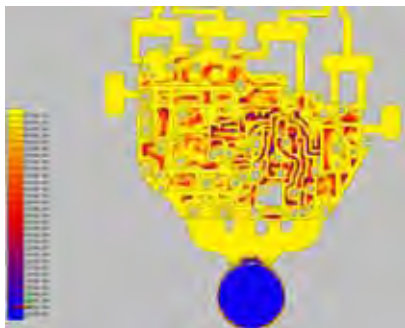


(i) 9 cycle

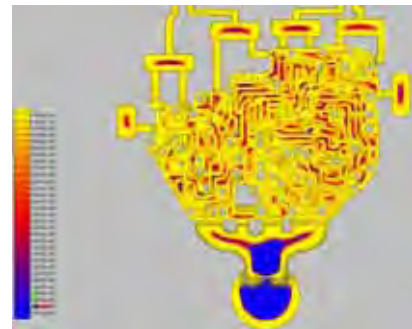


(j) 10 cycle

Fig. 3 Solidification temperature results on the solidification time



(a) Part temperature of valve body on the solid time(4s)



(b) Part temperature of valve body on the solid time(7s)

Fig. 4 Part temperature of valve body on the solid time

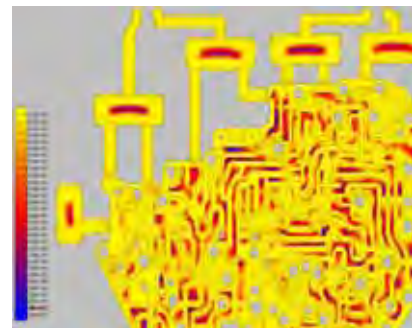


Fig. 5 Left position of valve body on the solid time



Fig. 6 Inside temperature of valve body on the solid time

Fig. 7 |서는 충전 과정에서 열의 안정상태로 유지됨을 알 수 있으며, Fig. 8 0.12~.14 s에서 냉각에 의해서 급격히 하강하고 있음을 알 수 있다.



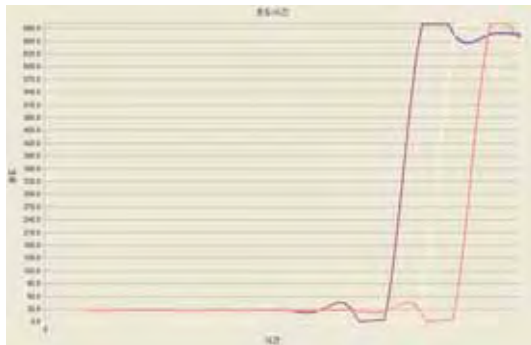


Fig. 7 Flow thermocouple

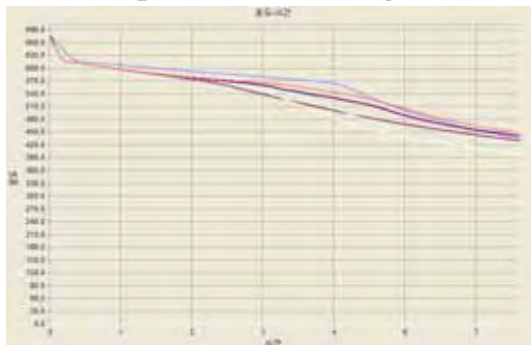


Fig. 8 Solidification transfer thermocouple

6.

본 연구는 초저속 신공정 주조방법을 이용하여 자동차 부품에 대한 연구를 하였으며, 그 결과 최적의 다이캐스팅 조건을 선정하여 실제 제품 형상의 주조에 적용하였으며, 660℃ · 650℃ 서 시작 되었으나 최대 압력 종료시에도 부품 중심부에 640℃ · 50℃ 또한, 금형의 열적 안정은 가상 열전대를 이용한 해석결과로부터 7 사이클 이후에 안정상태로 되는 것으로 보아 금형의 예열이 필요하며, 본제품의 예열온도는 250℃ 하는 것이 최적임을 알 수 있었다.

1. C. Mitterer , F. Holler , F. Üstel, D. Heim, "Application of hard coatings in aluminium die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour ", surface and Coatings Technology Vol.125, pp. 233, 2000.
2. G. Bar-Meir, E. R. G. Eckert, R. J. Goldstein, "Pressure Die Casting: A Model of Vacuum Pumping", Journal of Manufacturing Science

& Engineering - Transactions of the ASME , Vol.118, pp. 259, 1996.

3. J. Cambell, Mat. Sci. & Tech, Vol.17 885, 1991.
4. E. Niyama, K. Oda, K. Anzai, " A cyclic steady model for heat flow in die casting dies", Proceedings of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, pp. 1, 1996.