

Table 1. Coefficients of various differential Eqs.

Equation Name	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Momentum	U_i	$\mu c + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + S_\mu + X_i$
Thermal energy	T	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu^t}{\sigma^T}$	$\mu \left[-\frac{2}{3} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2 \right] + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T$
Turbulent kinetic energy	k	$\mu + \frac{\mu^t}{\sigma^k}$	$\rho(P_k + G_k - \epsilon)$
Dissipation of k	e	$\mu + \frac{\mu^t}{\sigma^e}$	$\rho \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 1}(f_1 P_k + G_k) - f_2 C_{\epsilon 2} \epsilon]$
VOF	f	0	0

열 전달 현상은 질량, 운동량, 에너지 보존의 법칙으로 표현된 지배방정식으로 설명되어진다. 3차원 비압축성 유체의 유동 및 응고해석에 사용된 지배방정식들은 연속방정식, Navier-stokes 방정식, 에너지 방정식, Volume of Fluid로서 식(1)~식(4)에 나타내었고, 식(5)에 충전 해석에 이용되어진 유한 차분식(FDE, Finite Differential Equation)을 나타내었고, Table 1에 각각의 차분식에 대한 계수를 나타내었다[4].

● 연속방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

● Navier-stokes 방정식(Navier-stokes equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + g_x \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial w} + \nu \nabla^2 w + g_z \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial w} + \nu \nabla^2 w + g_z \end{aligned} \quad (2)$$

(u, v, w; x, y, z 방향속도, ν 는 동 점성계수(kinematic viscosity), p; 압력, g; 중력가속도, ρ ; 밀도)

● 에너지 방정식(Energy equation)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

● Volume of Fluid

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial uF}{\partial x} + \frac{\partial vF}{\partial y} + \frac{\partial wF}{\partial z} \quad (4)$$

(여기서, F ; 유체부피분율)

● Governing Differential Equation(FDE)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (5)$$

(left-to-right : time accumulation, convective transport, diffusive transport, source term)

2.2 해석조건의 입력

전산 해석에 의한 고압 주조 제품의 해석 결과를 실제 제품 및 공정과 비교 검토하기 위하여 양산중인 금형(SCS)과 현재 제작에 들어간 금형(FWH)을 기준으로 상용 CAD 소프트웨어인 CATIA Ver4.1.7을 이용하여 3차원 솔리드 모델링을 수행하였다.

다이캐스팅 해석의 절차는 Fig. 1과 같고, CATIA를 이용한 최종 모델링 단계의 SCS와 FWH의 3차원 솔리드 형상은 Fig. 2의 (a), (b)에 주조 전용 상용 code에서의 형상 인식을 위한 SCS의 STL 파일 형성 결과는 Fig. 3에 나타나 있다.

주조 전용 상용 code인 MAGMASoft의 전 처리기에서 STL file로부터 cast, gate, runner, side core 등의 material group을 생성하였고, cooling channel, biscuit, 고정 다이, 이동 다이 및 가상 열전대 등은 MAGMASoft의 자체 형상 모델러를 이용하여 생성하였다. 직교좌표 분할에 의해 자동요소 분할된 요소 수는 SCS의 경우 5,754,816개, 주물 cavity에 해당하는 metal cell 요소의 수는 255,560개이고, FWH의 경우 요소 수는 7,834,806개이고 metal cell의 수는

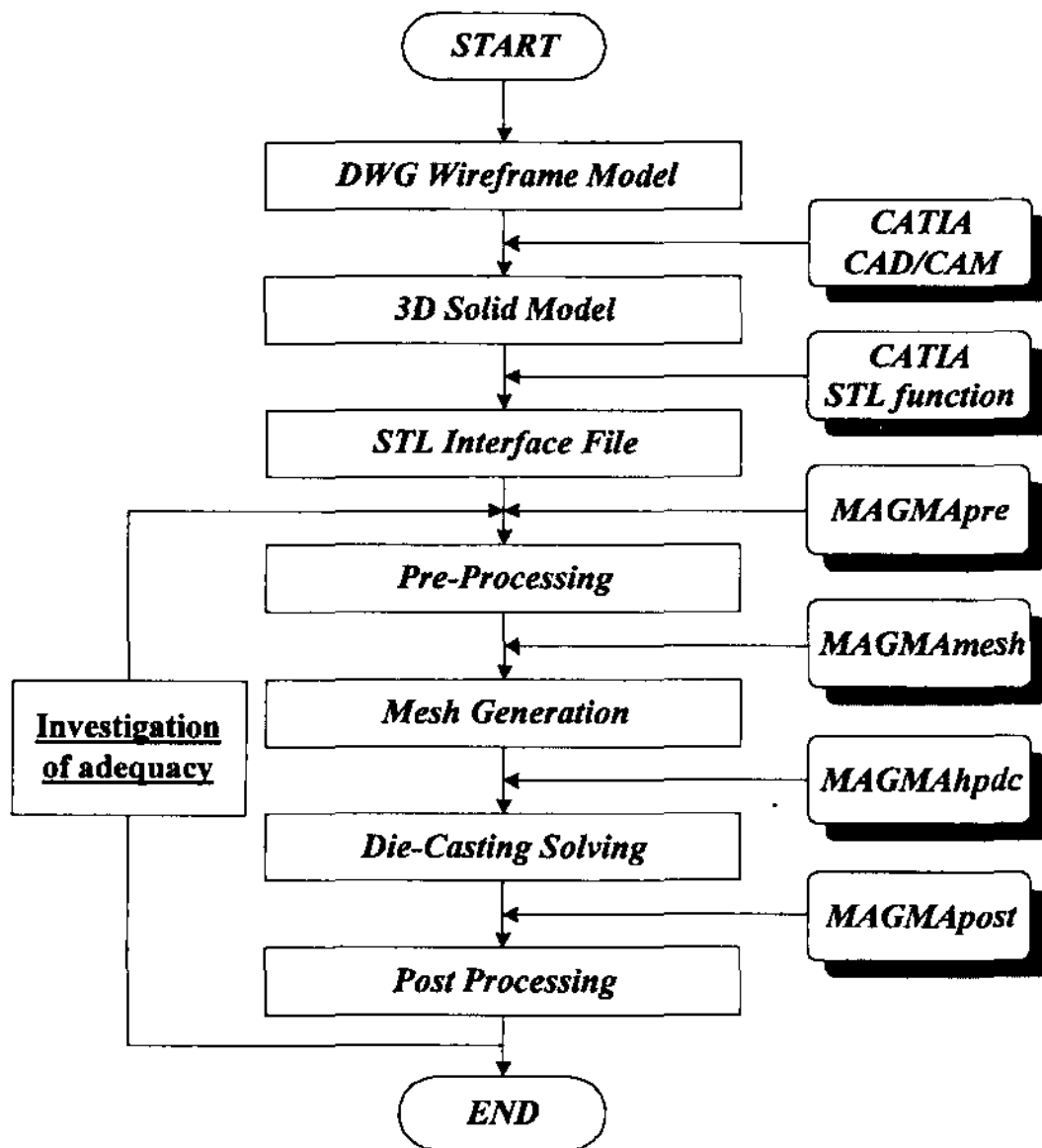


Fig.1. Flow chart of High Pressure Die Casting simulation.

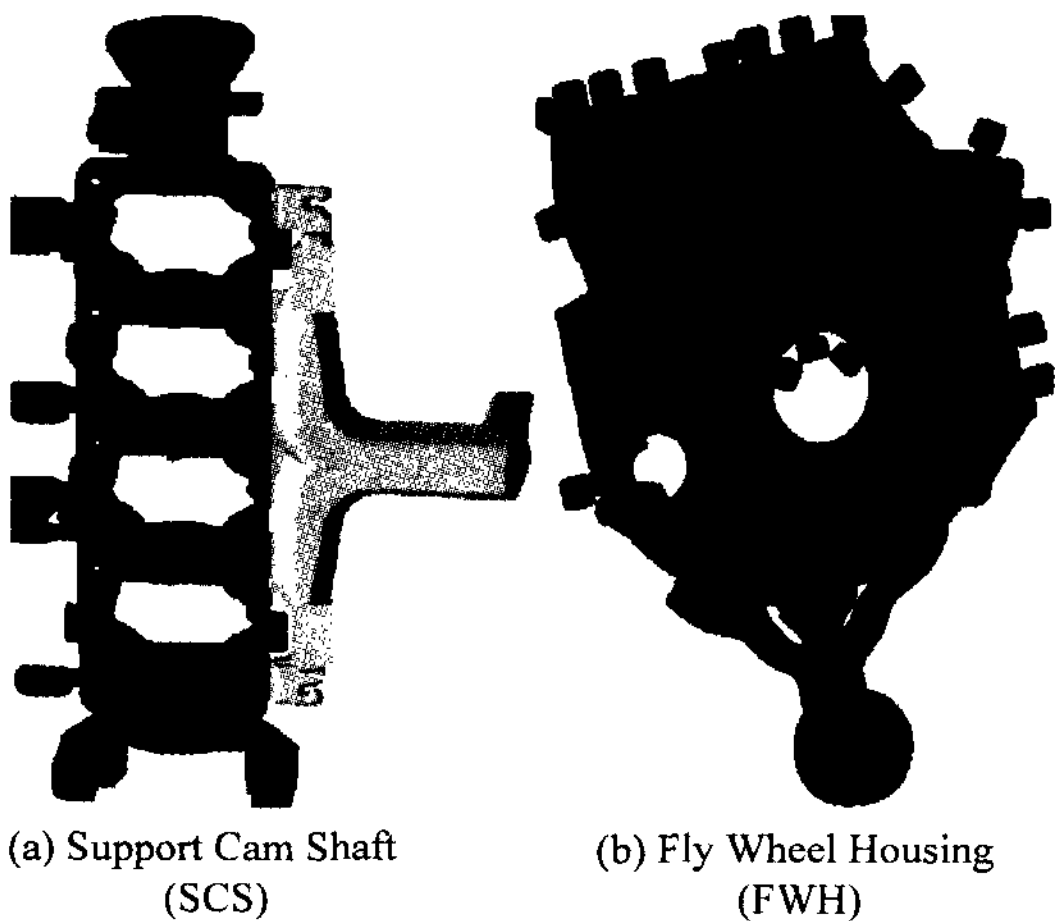


Fig. 2. Three dimensional solid model used for CATIA.

294,351개이다. 요소분할 후의 주물, 탕도, 냉각 홀, 코어 등의 형상은 Fig. 4에 나타나 있다.

해석에 이용된 대표적인 물성치는 Table 2에 나타나 있다. SCS와 FWH의 cast의 재질은 A360과 A380이고, 금형과 냉각 채널의 재질은 SKD61과 water로서 동일하다. 또한, 해석에 이용된 material group사이의 열전도도를 Table 3에 나타내었다. 주조 실험 조건의 1cycle time을 Fig. 5에 나타내었고, 개발제품인 FWH의 경우는 SCS와 유사하게 cycle time을 정의하여 해석을 수행하였다.

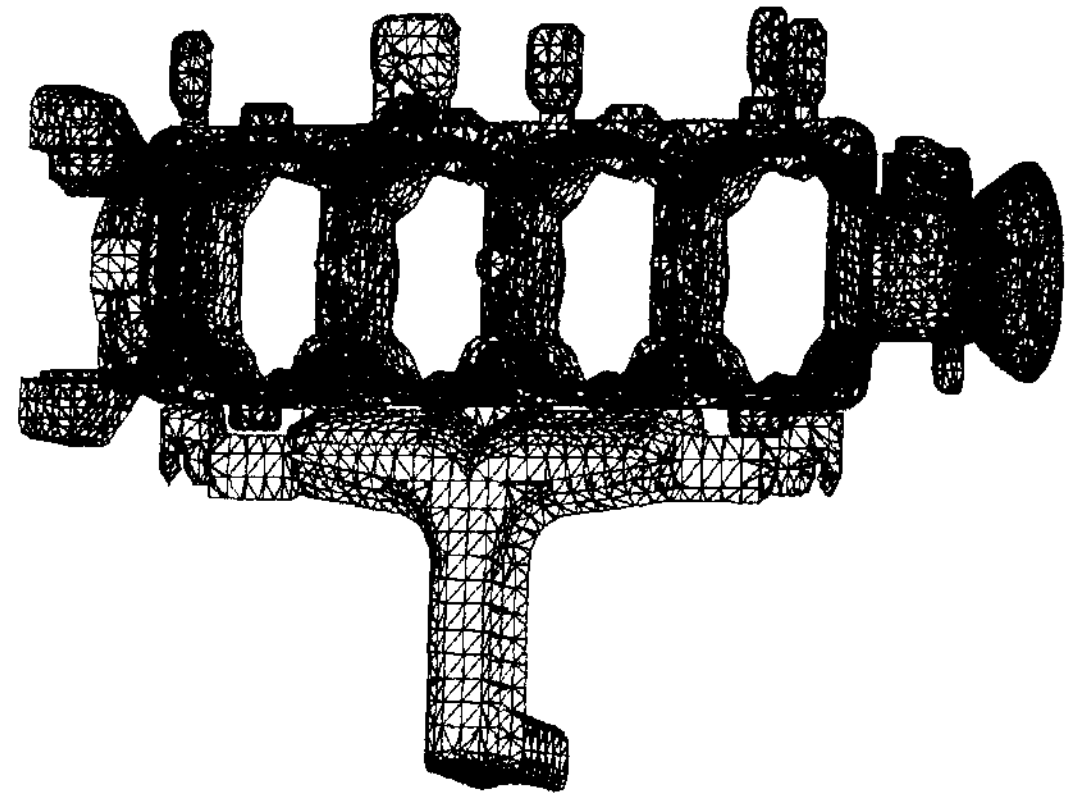


Fig. 3. Stereolithography drawing of cavity and sleeve used for geometry transfer.

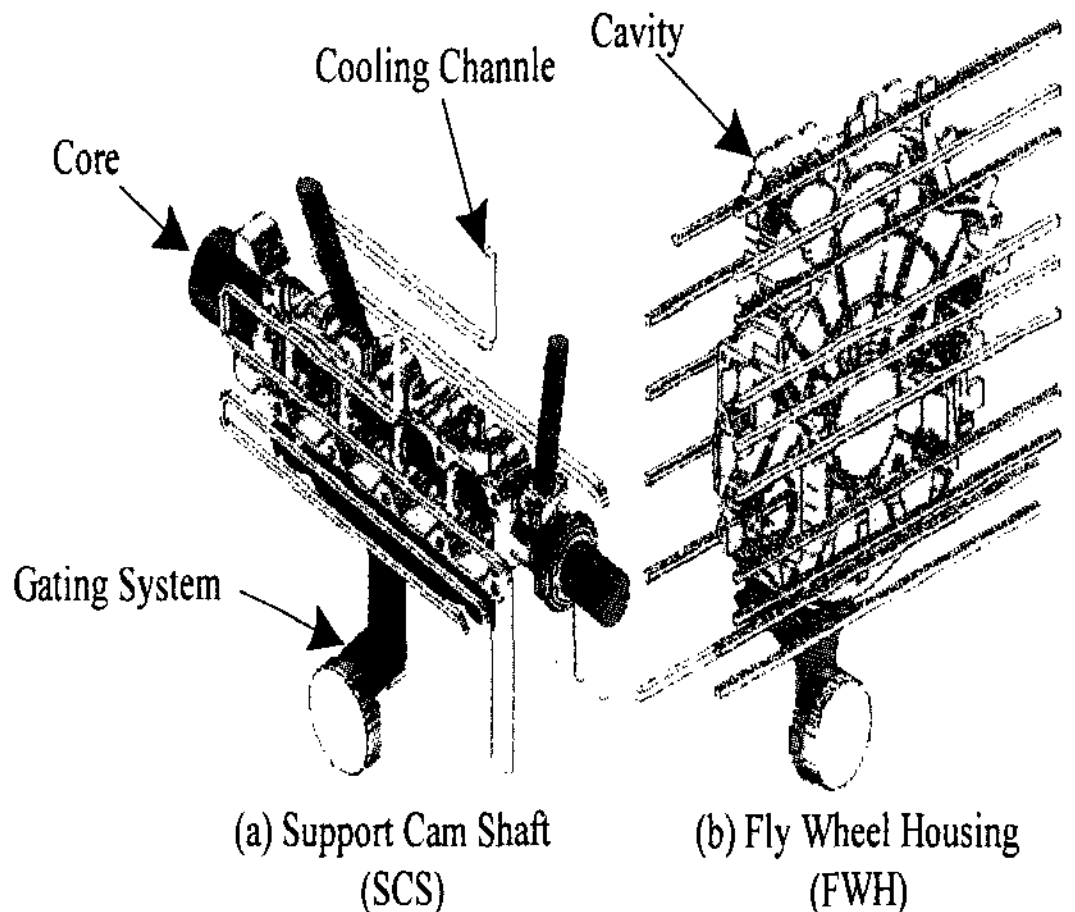


Fig. 4. Auto mesh generation of SCS and FWH.

Table 2. Physical properties used in the HPDC simulations.

Product	Material	Initial Temp.(°C)	Latent heat (KJ/kg)	T _{liq} (°C)	T _{sol} (°C)
SCS	Cast	670	514.27	614	555
	Mold	25	278.43	.	.
	Cooling	25	.	.	.
FWH	Cast	710-720	479.23	580	520
	Mold	150	278.43	.	.
	Cooling	20	.	.	.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 Support Cam Shaft

주형(cavity)내의 충전 거동을 비교하기 위해서 SC

Table 3. Heat transfer coefficients used in the HPDC simulations.

Product	SCS : $\sim T_{sol}(555^{\circ}C)$ FWH : $\sim T_{sol}(520^{\circ}C)$	$T_{liq}(614^{\circ}C) \sim$ $T_{liq}(580^{\circ}C) \sim$
Cast/Mold	3,000 W/m ² K	7,000 W/m ² K
Mold/Mold	500 W/m ² K	
Cool/Mold	2,500 W/m ² K	

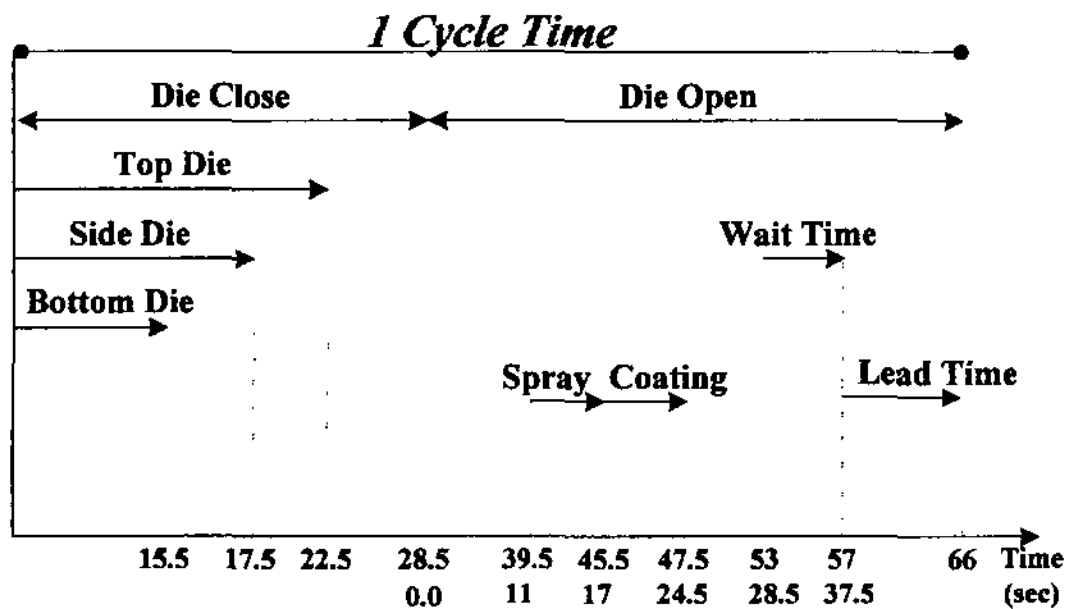


Fig. 5. Cycle time definition used in the HPDC simulations.

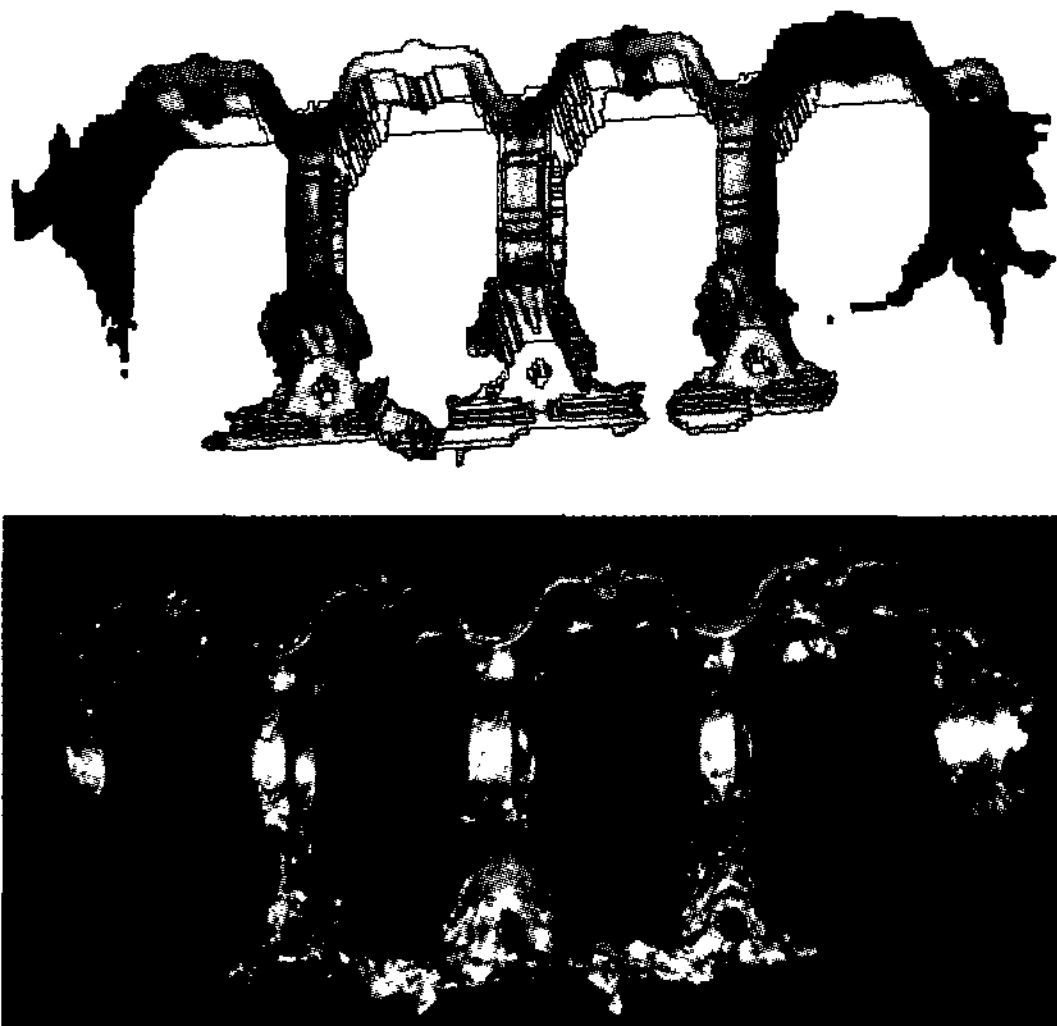


Fig. 6. The comparison of numerical simulation and experimental result at 60% filled state.

N/66 다이캐스팅 머신의 플런저(plunger) 전진길이를 270 mm에서 30, 60, 90 mm간격으로만 충전을 진행시켜 유동 해석결과와 비교해보니 60, 75, 90% 충전 해석결과와 실험한 제품이 비슷한 충전거동을 나타내었다. 유동해석에서는 저속 사출 속도를 0.3 m/s, 중속 사출 속도를 1.2 m/s, 고속 사출 속도를 3.3 m/s로 하여 해석을 수행하였다. Fig. 6~Fig. 7에 유동해석결과

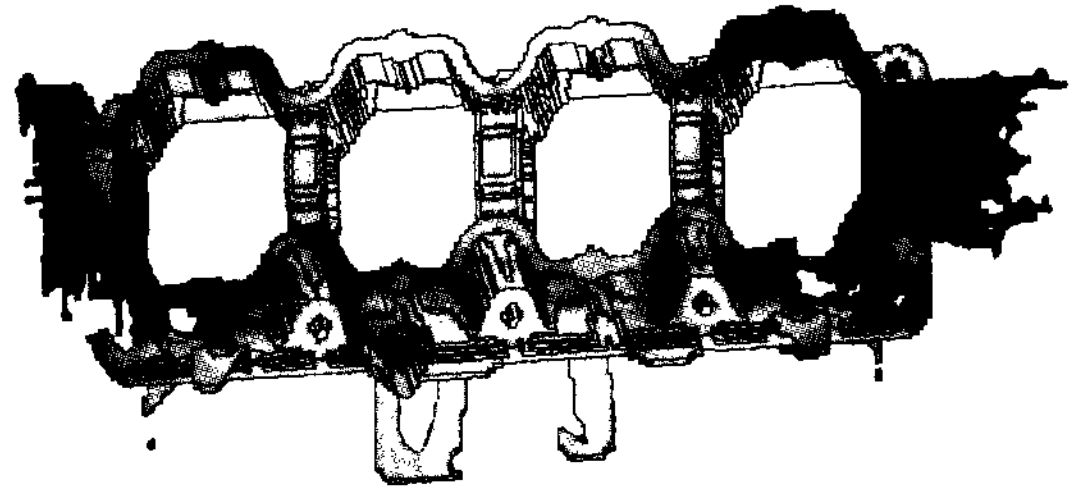


Fig. 7. The comparison of numerical simulation and experimental result at 75% filled state.

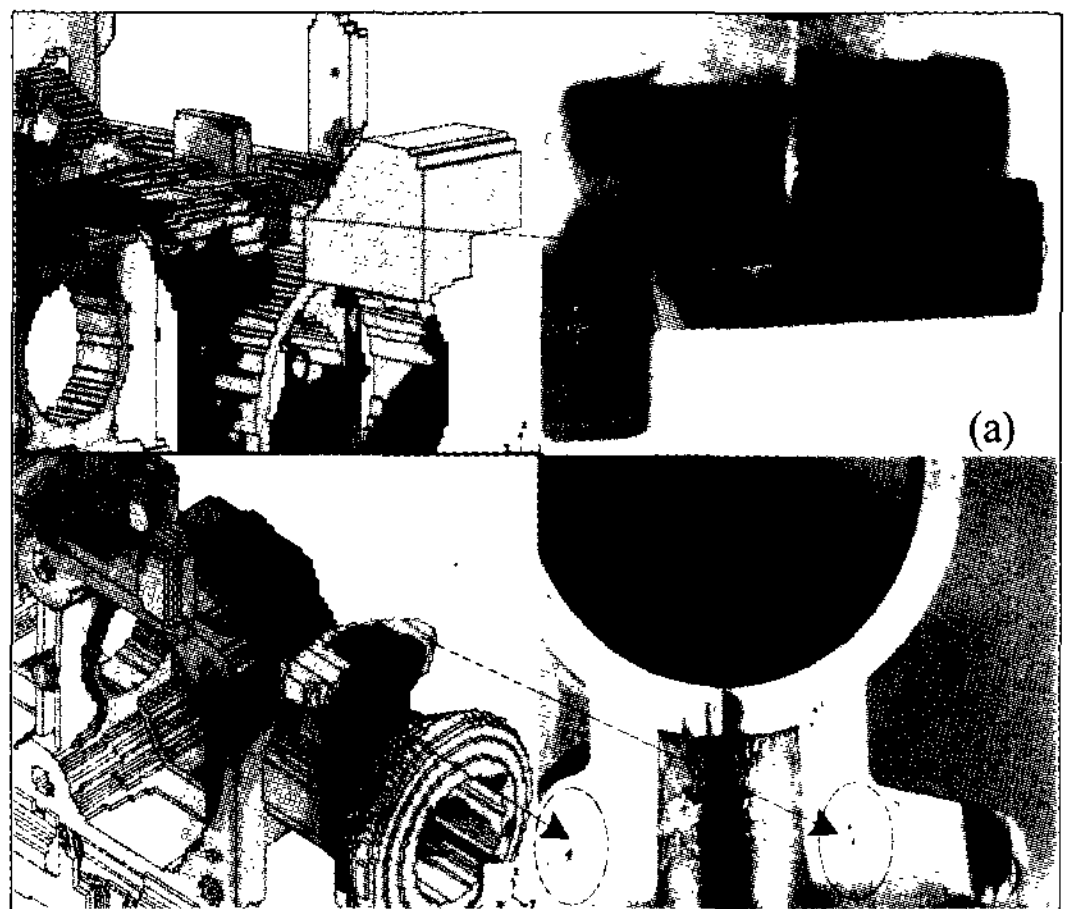


Fig. 8. The comparison result of predicted defect zone and SCS product by filling simulation. (a) 75% filled state, (b) 85% filled state

와 실제 제품과의 비교결과를 나타내었다.

충전 해석결과와 실제 제품의 결함예상 부위를 비교한 것은 Fig. 8에 나타나 있다. 실제 제품의 결함 부를 해석결과와 비교해보니 해석상에서 용탕이 휘돌아가면서 공기를 혼입하는 충전 결함예상 부위에서 실제 제품의 기포결함이 발생함을 알 수 있었다. 해석상의 결함예상 위치와 실제제품의 결함 위치가 유사하게 나타났다.

응고해석은 소프트웨어 자체의 X-ray 기능(응고 발

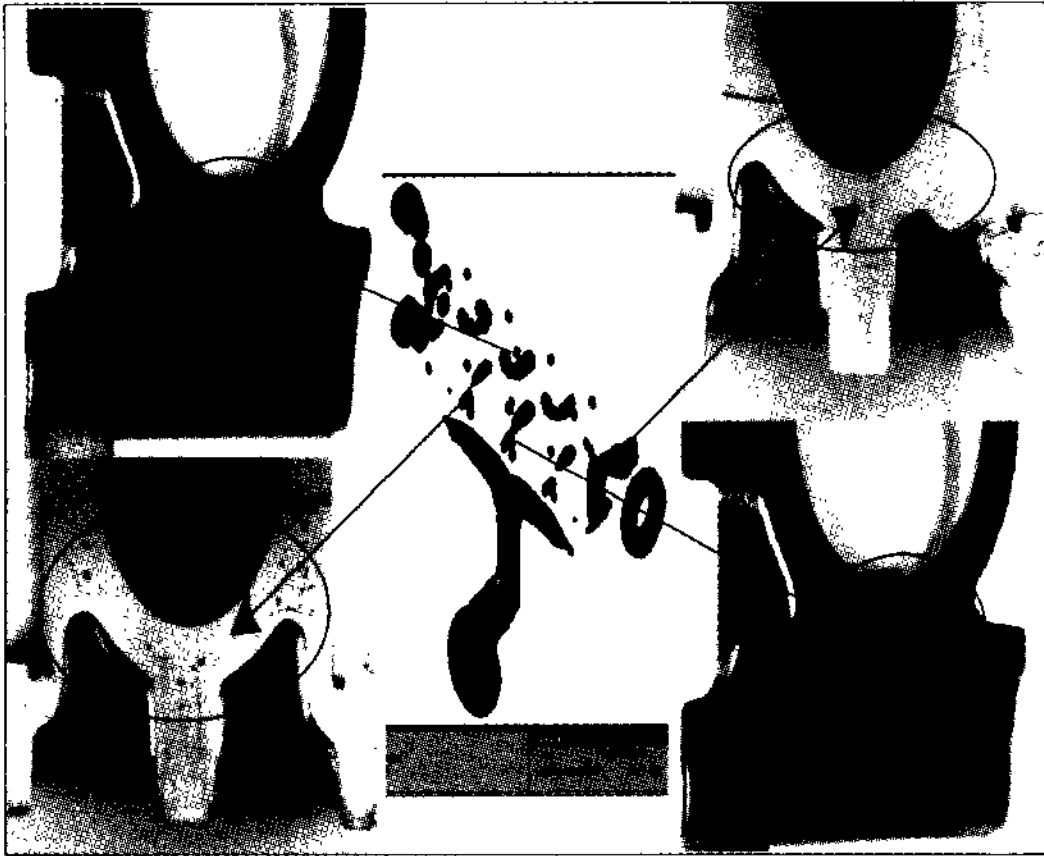


Fig. 9. The comparison result of predicted defect zone and SCS product at 80% solidification state.

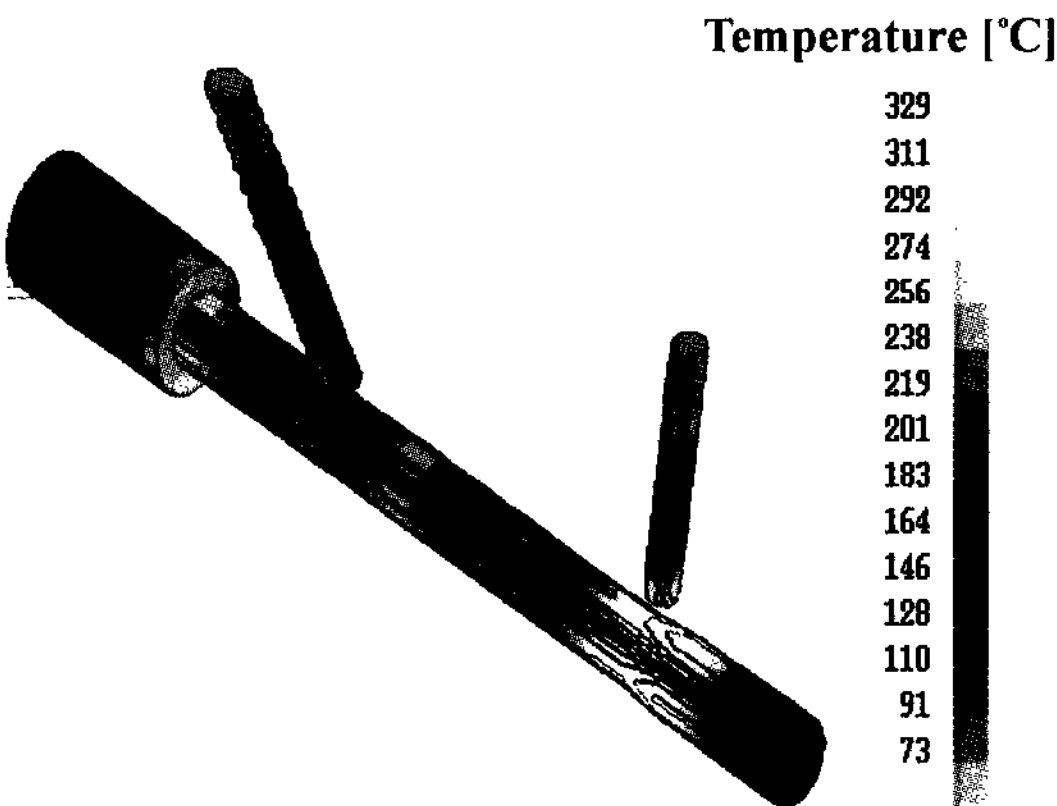


Fig. 10. Temperature distribution of side core after casting at 7 cycle.

생부위는 보이지 않고 미 발생 부위만 보이는 기능)에 의하여 응고된 부분이 보이지 않도록 설정하여 응고가 늦게 일어나는 부위를 확인하였다. Fig. 9는 80% 응고 시 아직 응고가 발생하지 않은 부위와 실제 제품의 단면을 비교하여 수축공과 같은 응고 수축결함의 여부를 확인해보니 응고 해석결과와 실제 제품이 잘 일치함을 보여주고 있다. 이와 같은 결함 발생의 원인으로 주형 내를 관통하고 있는 side core의 냉각이 불충분하기 때문에 이 부위의 고온으로 인하여 이를 중심으로 해서 응고결함이 발생하였다고 판단하였다. 응고결함의 원인으로 판단되어지는 주형 내의 side core의 온도분포를 살펴보기 위하여 7번째 cycle에서 제품 취출 직후의 side core의 온도분포를 Fig. 10에 나타내었다.

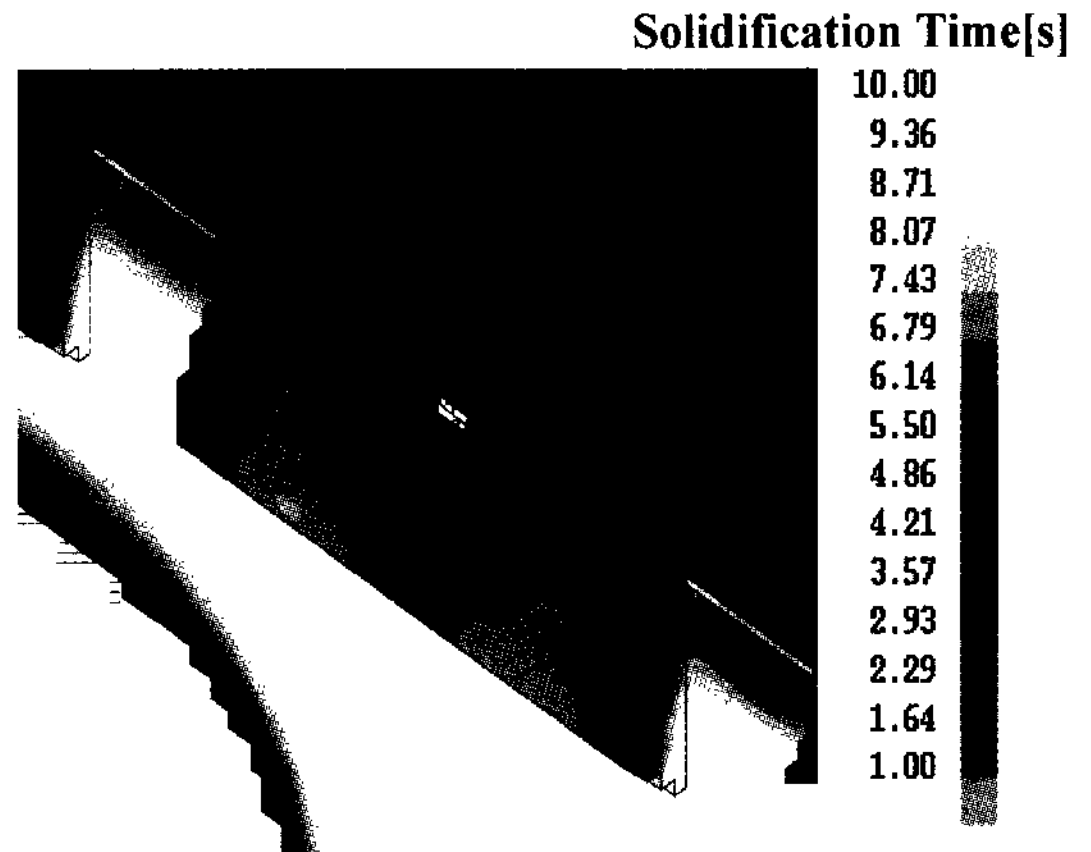


Fig. 11. Solidification time of gate zone.

주입구 부위의 응고 시간을 살펴보면 (5~6)초 사이에서 주입구 부의 응고가 완료되므로 가압 유지시간의 측면에서 약 6초 이후에의 주입구의 응고로 말미암아 주형 내로의 가압력이 전달되기 힘들기 때문에 6초를 추가한 가압력은 불필요하다고 판단된다. 주입구의 응고 시간을 고려하여 최적의 가압 유지시간을 설정함으로써 제품의 공정시간(1cycle time)의 단축에 의한 생산성의 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료되어 진다.

금형의 각 부위에 가상 열전대를 설치하여 시간의 변화에 따른 금형의 온도분포를 살펴보니 6cycle까지는 금형의 온도가 계속적으로 증가하나 7cycle이후로는 금형의 온도가 안정상태에 접근하고 있음을 나타내고 있다. 이에 근거하여 금형의 예열(preheating)이 없을 경우에는 약 7번 정도의 사탕(cold shot)작업이 필요하다고 판단되어 진다. 주입구 부위의 응고시간은 Fig. 11에 금형의 열적 안정성을 파악하기 위한 가상 열전대 부근의 cycle별 온도분포를 Fig. 12에 나타내었다.

3.2 Fly Wheel Housing

FWH 제품은 사형주조 시 무게가 약 30 Kg에 가깝고 runner부 등을 제외한 제품의 실제 크기만 하더라도 가로, 세로가 650, 700 mm나 되는 상당히 큰 제품이므로 주입구 부에서 가장 멀리 떨어져 있는 곳의 충전여부가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 2가지 사출 조건에 따른 충전해석 및 응고해석을 수행하여 결함 예상부위를 예측하고 최적의 사출 조건을 찾고자 하였다. Multi-step(1st condition)과 Two-step(2nd condition)의

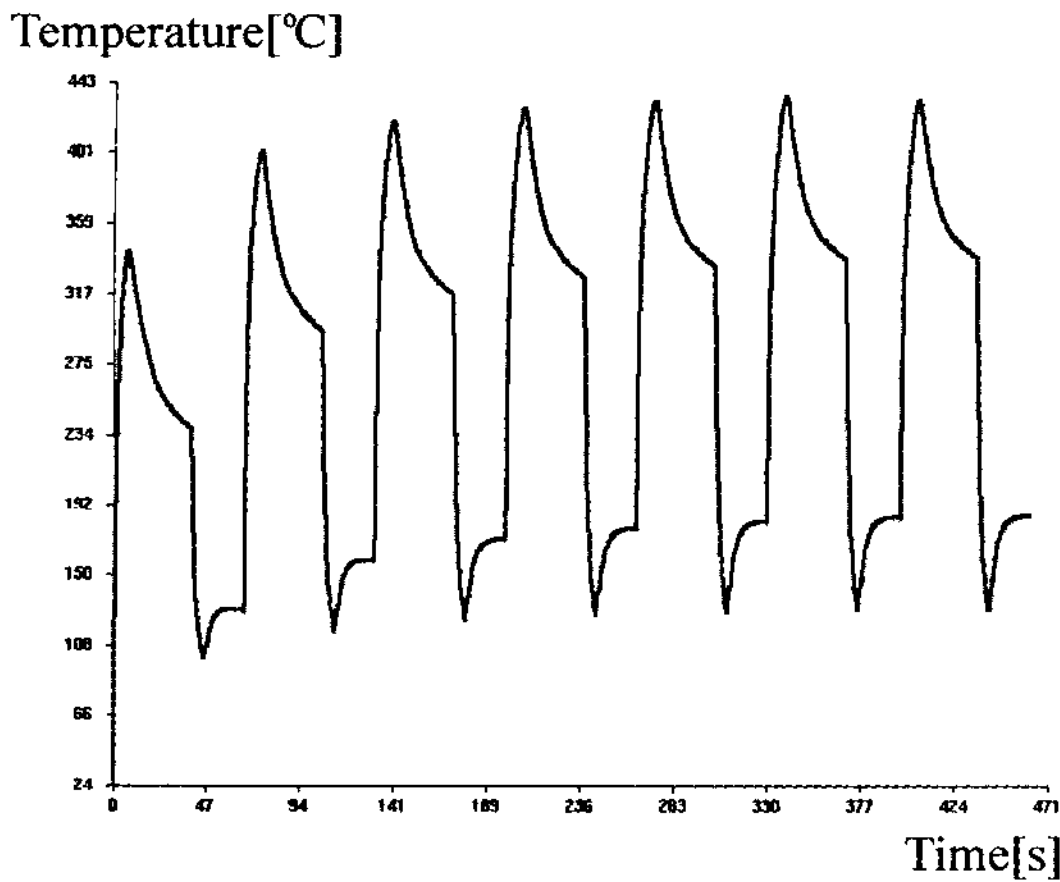


Fig. 12. Temperature distribution of each cycles in the die.

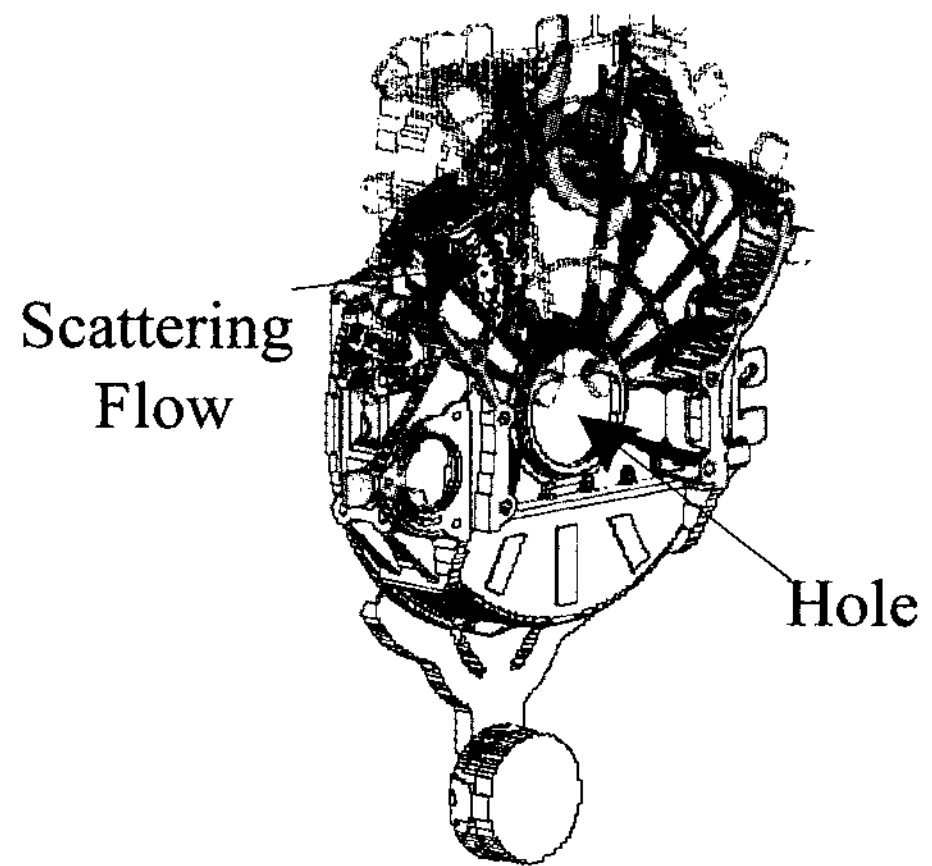


Fig. 14. Filling simulation result by simple pouring rate.(FWH)

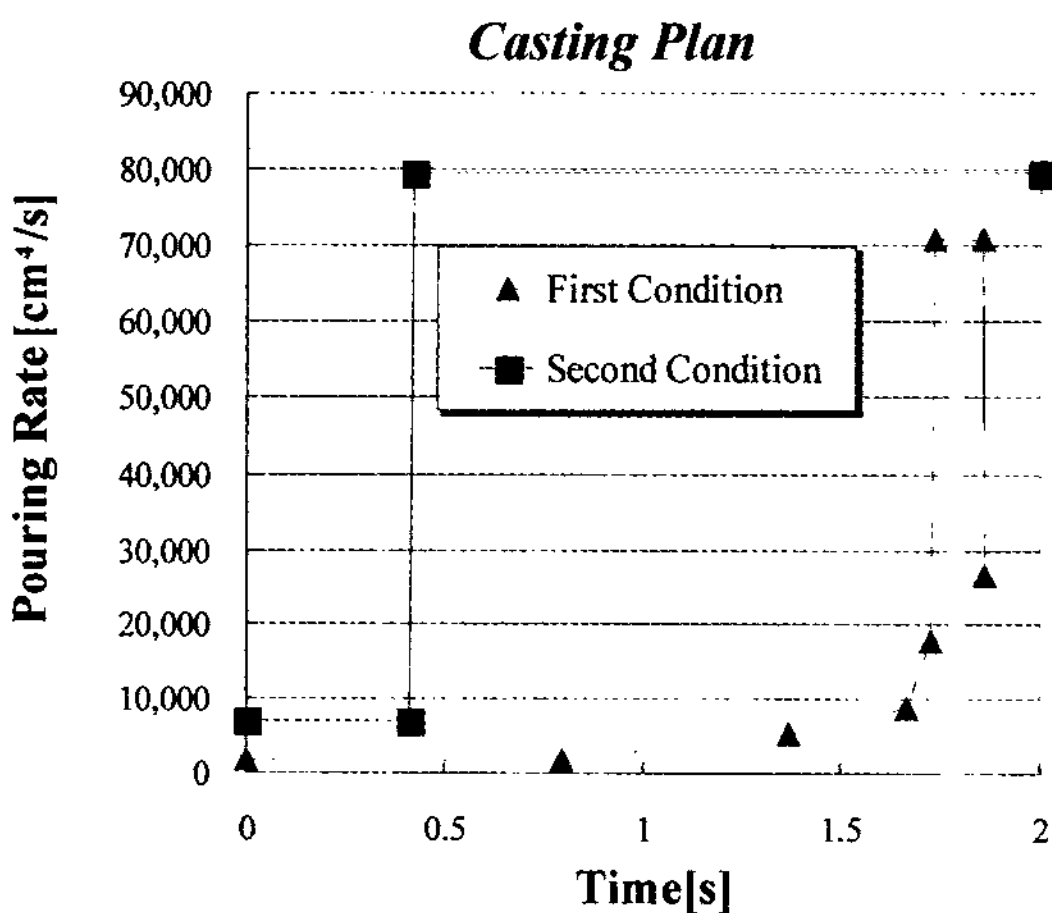


Fig. 13. Filling controlled by pouring rate.[first(multi-step) and second(two-step) pouring rate]

2가지 경우의 사출 조건을 Fig. 13에 나타내었다.

초기의 충전 양상을 파악하기 위하여 주입구 통과 직전까지는 저속, 그 이후는 고속으로 충전되는 가장 일반적인 2단 사출 조건으로 해석한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에서 보여주는 바와 같은 사출 조건일 경우는 cavity내의 용탕이 비산할 뿐만 아니라 가운데 홀의 영향으로 용탕이 휘돌아서 충전되는 양상을 뚜렷이 나타내고 있다. 따라서 Fig. 13에 나타낸 사출 조건들을 건전한 충전을 위하여 가운데 부위의 홀을 overflow 형식으로 변환하여 전산해석을 수행하였다.

Fig. 13에 나타낸 사출 조건 중에서 첫 번째 사출 조건을 적용하여 충전 및 응고해석을 수행하였다. 충전시간 1.140초(20% filled)부터 1.789초(충전 완료)까

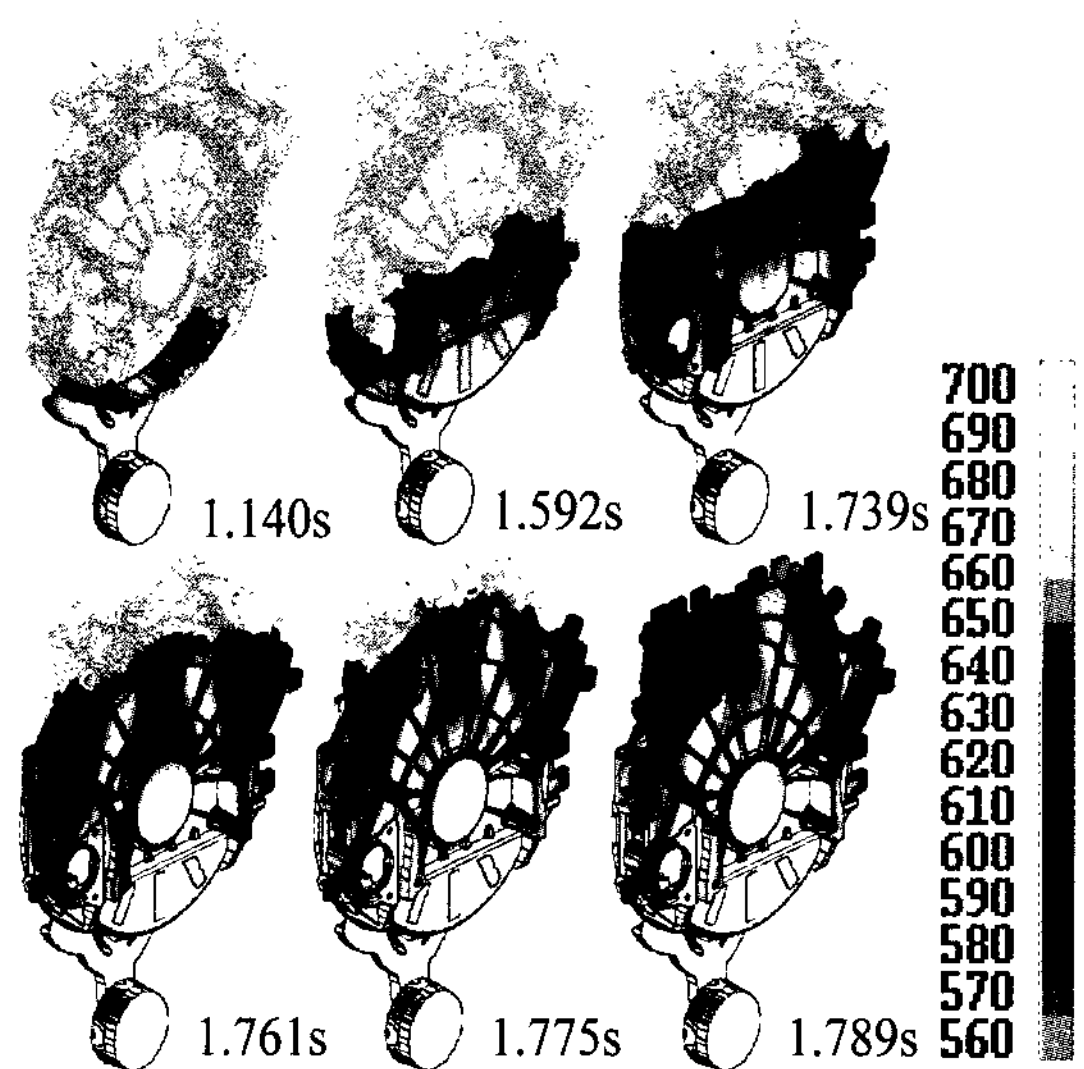


Fig. 15. Successive filling behavior used for multi-step (first condition) pouring rate.

지의 순차적인 충전패턴 및 그때의 충전시간과 온도분포를 Fig. 15에 나타내었다.

주입구 통과 직후부터 용탕이 순차적으로 충전이 진행되며 Fig. 14에 나타난 현상과 같은 용탕의 비산 등의 충전 결함은 나타나지 않았으나 충전시간은 약 1.789초로 너무 길기 때문에 충전 완료 이전에 용탕의 온도손실이 상당히 많이 발생하여 건전한 주물을 얻기 어려울 것으로 사료된다. 충전 선단 부의 온도손실이 용탕 초기온도와 비교해보면 약 100°C정도의 차이가 나며, 이미 액상선에 가까운 온도에 도달한 부분들도 나타났다.

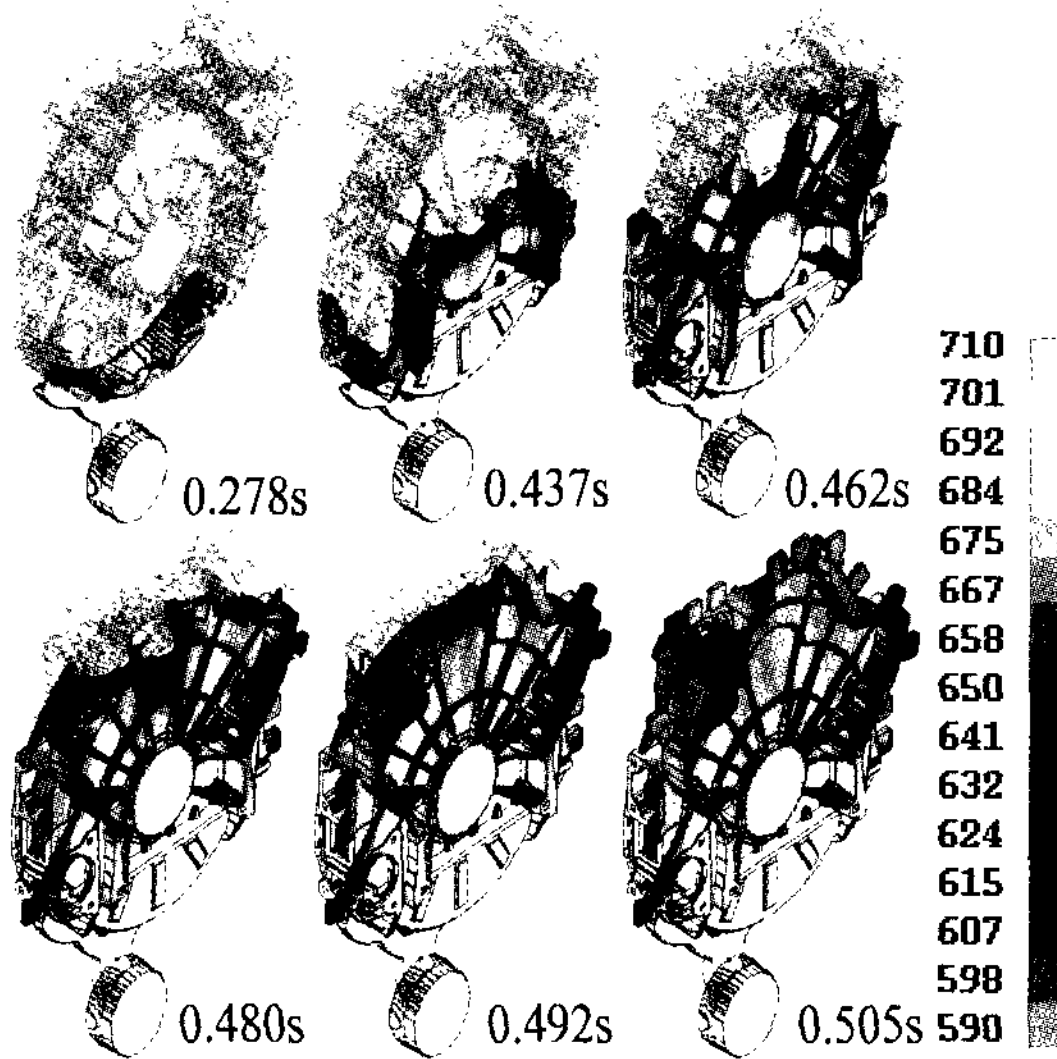


Fig. 16. Successive filling behavior used for two-step(second condition) pouring rate.

다음으로 두 번째 사출 조건을 적용하여 충전 및 응고해석을 수행하였다. Fig. 14의 해석조건과 마찬가지로 2단 사출 조건으로 주조조건을 선정하여 해석을 수행하였다. 이번 조건은 앞서의 2단 사출 조건과는 다르게 저속, 고속절환위치를 주입구 통과 직후로 선택하지 않고 용탕의 비산을 방지하기 위하여 중앙 홀 부위까지는 어느 정도 충전이 진행된 후 고속으로 절환되는 사출 조건으로 해석을 수행하였다. 충전 해석결과를 Fig. 16에 나타내었다. 첫 번째와 두 번째 사출 조건을 서로 비교해보면 충전양상은 거의 유사하게 나타났으나 두 번째 2단 사출 조건이 다단 사출 조건과는 달리 충전시간이 상당히 짧으므로 온도손실을 현격히 줄일 수가 있을 것으로 판단된다.

또한, 두 가지 사출 조건 모두다 Cavity 말단부인 좌측 상부의 스타트 모터 조립부가 최종 충전부가 되며 용탕의 고립부 등의 충전 결함의 형성으로 미성형부의 발생이나 기포결함이 상당히 많을 것으로 예상되어진다. 좌측 상부의 스타트 모터 조립부의 overflow단면사진과 고립부 형성이 예상되는 부위의 해석결과를 Fig. 17에 나타내었다. 성형은 되었으나 그림에서 알 수 있듯이 상당히 큰 결함들이 나타났으며 표면도 좋지 않았다.

두 가지 경우의 사출 조건으로 응고해석을 수행한 결과가 Fig. 18에 나타나 있다. 90% 응고가 진행된 해석 결과로서 보이지 않는 부분은 이미 응고가 진행

SECTION VIEW



Fig. 17. Photographs of defect zone and appearance of product.



(a) Multi-Step Pouring Rate. (b) Two-Step Pouring Rate.
(1st Condition) (2nd Condition)

Fig. 18. Temperature distribution at 90% solidification state. (a) first condition(multi-step pouring rate) and (b) second condition(two-step pouring rate)

되었고 보이는 부분이 아직까지 응고가 진행중인 것으로 이때의 온도분포도 함께 나타나있다. 응고가 진행되지 않고 아직까지 남아있는 부위에서 응고 수축결함이 발생할 가능성이 높는데, 두 가지 사출 조건 중 Fig. 18의 (b)인 2단 사출 조건이 최종적으로 응고가 일어나는 부분이 더 작으므로 (a)에 비하여 응고결함이 발생할 가능성이 더 작을 것으로 판단되었다. 90% 응고 시까지 응고시간은 2단 사출 조건이 온도손실이 없이 빠르게 충전되었기에 cavity내가 고온의 상태이므로 다단 사출 조건에 비해 약 2초 정도 더 긴 19초 정도의 응고시간이 걸림을 알 수 있었다.

지금까지 사형주조로 제조되어진 Fly Wheel

Housing을 High Pressure Die Casting 공정으로 전환할 경우 약 30%에 가까운 제품중량 감소를 기대할 수가 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 2번째 조건인 2단 사출 조건이 다단 사출 조건 보다 더 양호한 충전 및 응고 해석결과를 가져다 줄 것으로 판단되었지만, 스타트 모터 조립부의 미충전 등의 충전결함을 방지하기 위해서 사출 조건을 변경하여 전산해석 및 filling test를 수행할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

자동차 부품의 High Pressure Die Casting(HPDC) 공정 해석을 위하여 상용 소프트웨어를 이용한 주조공정 해석과 제품결함 예측은 생산성 향상 및 제품개발 기간의 단축 등이 가능한 과학적이고 효율적인 주조기술이라 말할 수 있다. 이러한 상용 Code를 이용한 전산해석으로 cavity내의 용탕 유동의 가시화 및 응고 양상을 파악함으로써 주조품의 결함예측 및 불량감소, 품질 향상, 생산성의 향상, 금형의 설계 및 수정의 용이함 등의 효과가 기대된다.

자동차 부품인 SCS(Support Cam Shaft)와 FWH(Fly Wheel Housing)을 주조전용 상용 소프트웨어로 전산해석을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) SCS의 경우 전산해석상에 나타난 충전해석결과와 플런저 전진 길이의 변화에 따른 실제 제품의 충전양상이 일치하였으며, 공기의 혼입에 의한 충전 결함 예상부위 및 응고 결함이 side core부를 따라 발생하는 해석상의 응고 수축결함 예상부위와 실제제품과 잘 일치하였다.

2) 금형의 열적 안정성 해석결과도 실제와 동일하게

7번째 Cycle부터 금형의 열적 안정화가 이루어지는 것으로 나타났다. 또한, 주입구의 응고 완료시간이 약 6초 정도이므로 실제 제품 성형 시 생산성의 증대를 위한 적절한 가압 유지 조건을 선정할 수 있었다.

3) 기존의 사형주조로 양산되던 제품의 개발에 앞서 전산해석을 수행하여 주조방안 및 금형 설계의 신뢰성을 확보하였고, 충전 실험을 수행한 결과 전산해석의 직접적인 현장 적용이 가능한 것으로 판단되었다.

4) 다이캐스팅시 금형 설계와 주조방안을 최적화하기 위하여 지금까지는 양산 중에 여러 차례의 시행착오 및 경험에 의한 금형 수정을 통하여 최적의 주조방안을 수립하였으나 전산해석에 의한 유동 및 응고해석으로 금형의 설계와 주조방안을 확립함으로써 정확하고 명확한 원인규명과 대책방안의 수립에 의한 생산성의 향상 및 금형 설계 시간의 단축 등을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] G.P.Backer and C.W.Kim, "Cyclic Casting Simulations: Is Mold Filling Necessary?", Advances in Aluminum Casting Technology (Conference Proceedings from Materials Solutions'98), (1998) 79-84.
- [2] N.Yamauchi, N.Iwakuni, H.Kuno, M.Nakagawa, "Computer Aided Engineering Design of Inner Cooling in Design Dies", 1996 JAPAN DIE CASTING CONGRESS Transactions, (1996) 173-178.
- [3] C.P.Hong, "State of the Art of Computer Simulation Based Casting Technology", Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol.15, No.1, 5-13.
- [4] "98 MAGMASOFT User Seminar", (1998).