

## 논문

## 수치해석에 의한 진공다이캐스팅에서의 용탕 유동특성 연구

박진영 · 임관우\* · 이광학\* · 김성빈\*\* · 김억수†\*\*\* · 박익민

부산대학교 금속공학과, \*울산대학교 첨단소재공학부

\*\*(주)에니캐스팅 기술연구소, \*\*\*한국생산기술연구원 부산연구센터

## A study on Characteristics of Molten Metal Flow in Vacuum DieCasting by Numerical Analysis

Jin Young Park, Kwan Woo Lim\*, Kwang Hak Lee\*, Sung Bin Kim\*\*, Eok Soo Kim†\*\*\*, and Ik Min Park

Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*School of Materials Science &amp; Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

\*\*R&amp;D Center, Anycasting Co. LTD, Seoul 157-040, Korea

\*\*\*Pusan R&amp;D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 683-420, Korea

## Abstract

Molten metal flow in vacuum die casting was characterized by a numerical analysis. The VOF method was used to simulate the filling behaviors of molten metal during filling process. The various vacuum degrees of no vacuum(760 mmHg), 650, 500, 250 and 60mmHg were artificially applied in cavity. And the filling behaviors of molten metal with the applied vacuum conditions were simulated and compared with those of experiment. The results showed that molten metal was partially filled into cavity when vacuum was applied and the filling length of molten metal in cavity was increased with increasing applied reduced pressure in cavity. Also, the simulated filling behaviors of molten metal were apparently similar to those of experiment, indicating the numerical analysis developed in this study was highly effective. Through the result of fluid flow simulation, both relation equations of filling length and filling velocity with the variation of pressure conditions in cavity were calculated respectively and the internal gas contents of casting was significantly reduced by the modification of vacuum gate system.

**Key words :** Vacuum die casting, Vacuum degree, Vacuum reduced pressure, Gas contents, Vacuum gate system, Fluid flow simulation, Numerical analysis

(Received June 5, 2007 ; Accepted July 18, 2007)

## 1. 서 론

다이캐스팅 공법은 자동차를 비롯한 각종 수송기기의 경량화 추세에 부합하여 공법이 갖는 높은 생산성과 우수한 치수 정밀도 등의 장점으로 인해 그 적용 예가 갈수록 증가하고 있다. 그러나 다이캐스팅 공법은 사출시 공기의 혼입에 따른 기포발생 및 응고시 극히 제한적인 압탕 효과로 후육부의 수축공 발생 등의 품질 문제를 안고 있어 그 적용이 단순 구조체에 제한되어 왔으나 최근에는 이를 개선하기 위한 다양한 형태의 특수다이캐스팅 공법들이 개발 적용되어 고기능성 부품을 포함하여 그 적용 품목이 갈수록 확대되고 있다[1-3]. 이러한 특수 다이캐스팅 공법 중 사출시 캐비티를 강제 감압시켜 제품내 공기혼입을 원천적으로 줄일 수 있는 진공다이캐스팅 공법은 공기혼입에 따른 기포결함을 최소화 할 수 있는 가장 근원적인 공법으로 평가되고 있다. 그러나, 진공다이캐스팅 공법 역시 다른 주조공정과 마찬가지로, 주조공정에 대한 관찰이 매우 어렵고 또 금형 제작 후 시험 주조된 이후에 주조결합이 발견되

기 때문에 주조품의 진공 적용 주조방안 설계가 대부분 경험과 시행착오에 의해 이루어져 주조품의 품질 조기 확보 및 제품 개발기간 단축에 많은 제약이 있어 왔다. 최근 들어, 컴퓨터 해석을 통한 주조 공정변수를 제어하려는 시도가 활발히 이루어지고 있으며[4,5], 다이캐스팅의 경우에도 용탕 유동, 응고, 열응력 등의 해석지원이 이뤄지고 있으나 캐비티에 진공을 적용하는 진공다이캐스팅 공법의 경우에는 캐비티 진공도에 따른 용탕 충전 거동을 반영하는 연구시례는 극히 드문 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 캐비티 진공적용에 따른 용탕의 유동을 모사할 수 있는 수치해석 방안을 도출한 후, 해석을 수행하여 진공 다이캐스팅의 주조방안 설계시 적용할 수 있는 용탕 유동 특성을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험방법

## 2.1 수치해석모델

캐비티 진공도에 따른 용탕 유동 특성을 수치해석을 이용하

†E-mail : osgim@kitech.re.kr

여 도출하고자 Fig. 1에서와 같은 주조방안 모델링 실시하였다. 수치해석 대상제품은 자동차 자동변속기의 오일펌프의 핵심부품인 리액션 샤프트 서포트(reaction shaft support)로서 높은 내압성을 요하는 기능성 부품으로 제품 본체에 다수의 오일 홀과 중심부에 리액션 샤프트와의 조립을 위한 보스(boss)부를 갖는 것을 특징으로 한다. Fig. 1의 제품 모델링 상부에는 GF(gas free) 진공 시스템 적용을 위한 섷 오프 밸브(shut-off valve)와 진공 게이트 시스템을 나타내었다. 수치해석은 Al-10wt%Si-2.0wt%Cu 합금(JIS ADC12)에 대하여, 2235 g의 용탕이 플런저팁 저속 충전 후 고속 충전 직전의 제품 캐비티(전체 부피 397 cm<sup>3</sup>, 평균 두께 2 cm)에 인위적인 감압이 없는 즉, 무진공 상태와 캐비티의 진공도를 650, 500, 250, 60 mmHg로 적용하였을 때 각 진공도에 따른 용탕의 캐비티내(비스켓부~진공밸브부)에서의 용탕 충전 거동에 대해서 실시하였다. 수치해석은 각각의 진공도에 따른 진공밸브에서의 흡입력과 사출 팁에서의 압력을 경계조건으로 고려하여 진공도에 따른 충전해석을 실시하였으며, 각각의 경계조건을 Table 1에 나타내었다. 해석에 사용된 Table 1의 경계조건 중 진공적용위치(Transition position)는 실험적으로 플런저팁의 사출에 따른 슬리브내 용탕 난류를 줄여 제품 기포량을 최소화할 수 있는 경험적 위치를 적용하였다. 또한, 진공효과 뿐만 아니라 주조공정 해석시 각종 압력 영향을 정밀하게 계산하기 위하여 압력 보정 방정식으로서 압력 P의 프와송 방정식(Poisson equation)을 사용하였다.

$$\nabla^2 P = -R \tag{2.1}$$

여기서 P는 압력, R은 압력의 반복 보정시 수렴하기 이전 속도성분에 의해 나타나는 값(residual)으로 사용되기도 하고,

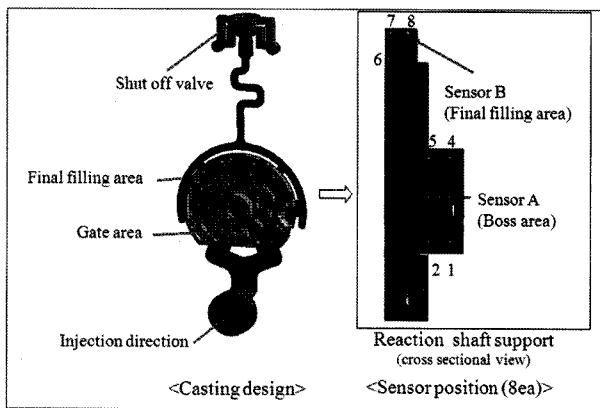


Fig. 1. Casting model of reaction shaft support.

Table 1. Boundary condition for simulation of vacuum diecasting

vacuum valve condition	Vacuum	760, 650, 500, 250, 60 mmHg
	Diameter	Φ 40
Plunger tip condition	Low speed pressure	15.4 kPa
	High speed pressure	2400 kPa
	Transition time	0.22 sec
	Transition position	240 mm

특수 구조의 경우 나타나는 압력 생성향을 입력하여 계산하는데 사용되기도 한다.

진공밸브 또는 칠 벤트 진공 등과 같은 진공방식에 관계없이 금형에 설치된 진공벤트에는 사용하는 진공압력을 시간 또는 작업조건의 변수로 입력하면 된다. 그러나 플런저에서 가해지는 압력을 용탕의 주입 경계조건에 입력할 경우에는 다이캐스팅 장비의 속도 조건과 증압 조건을 함께 계산하여 다음의 방정식으로 계산하여 입력한다.

$$-\nabla P = \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} - \nabla \mu \cdot (\nabla \vec{u}) - \rho \vec{f} \tag{2.2}$$

여기서  $\vec{u}$ 는 속도,  $\vec{f}$ 는 몸체력(body force)를 나타내며, 용탕입력 경계에서의 압력조건은 상기와 계산된 압력량에 초기 플런저 압력을 더하여 계산되지만, 증압이 시작되면 증압력을 더하여 계산한다.

### 2.2 진공도에 따른 용탕 충전 실험

수치해석 결과에 대한 검증용 위해 해석조건과 동일한 조건으로 실제 주조실험을 실시하였다. 사용된 주조기는 TOSHIBA 800톤이며 적용된 섷 오프 밸브 형태의 진공시스템을 포함한 실험 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었으며 상세한 실험 조건은 Table 2와 같다. 먼저, 캐비티의 진공도에 따른 용탕의 충전 거동을 관찰하기 위하여 Table 2의 실험조건(b)에서와 같이 용탕을 주탕하고 플런저 팁이 전진하여 저속사출 및 진공 적용이 완료된 후 고속사출이 시작되기 직전에 플런저 팁을

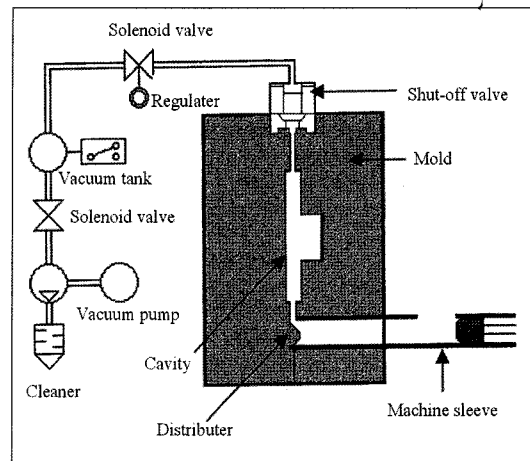


Fig. 2. Schematic drawing of experimental equipment with shut-off valve system.

Table 2. Experimental Condition.

Classification	Condition
Material	JIS ADC12
Mold	JIS SKD61
Pouring temperature	670°C
Mold temperature	180°C
Casting pressure	100 MPa
Tip diameter (Ds)	Φ 80
Low velocity (VL)	0.2 m/s
High velocity (VH)	2.5 m/s
Length of shot sleeve (LS)	670 mm
Length of vacuum adoption (LV-ON)	90 mm
Length of high velocity (LH)	120 mm
Thickness of biscuit (LB)	30 mm

를 관찰하였다. 또한, Table 2의 실험조건(c)에서와 같이 각 캐비티 진공도 조건하에서 고속 충전까지 진행시켜 사출을 완료한 후 완성된 주조품에 대해서 게이트부와 최종 충전부에서의 가스량을 정량적으로 측정하여 주조품의 내부품질에 미치는 진공도의 영향을 조사하였다. 본 실험의 제품 가스량 측정은 일본, Diavac社의 가스측정기(일회 측정량: 1~100 cc/100 g, 진공도 도달압력: 10<sup>-3</sup>Pa)를 이용하여 진공상태에서 제품을 용융시키면서 내부의 가스량을 검출하는 진공 용융 추출법을 이용하였다.

또한, 실험 시작 전 10회의 예비사출을 통해 금형의 온도를 180°C로 안정화한 후 실험을 실시하여 금형온도에 따른 용탕 유동 영향을 배제하였다.

2.3 진공유동해석을 통한 주조방안 설계

진공 유동해석을 통한 진공적용 주조방안 설계에서 가장 유의해야 할 사항은 진공 적용에 따른 전체적인 용탕 유동 관찰을 통한 충전 게이트 시스템 및 진공 게이트 시스템의 적절성 여부를 판단하는 것이다. 본 연구에서는 캐비티 진공도에 따른 용탕유동해석 결과를 통해 주조방안의 핵심인 게이트 시스템의 적절성 여부를 판단하였으며 이를 위해 진공도에 따른 유동해

석시 주조품의 주요부(보스부 및 최종 충전부)에 총 8개의 센서를 설치(Fig. 1 참조)하여 진공도에 따른 충전 속도를 평가하였다. 이와 같은 진공적용 유동해석 결과에 따라 추가적으로 개선된 진공주조방안을 제시하여 실주조함으로써 기존 주조품과의 제품내 가스량을 비교 평가하여 주조방안에 대한 검증을 시도하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진공도에 따른 용탕 충전 거동

Table 2의 실험조건(b)의 캐비티내의 진공도에 따른 용탕유동의 해석결과와 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 진공이 적용되지 않은 경우 해석과 실험 결과 모두에서 저속시출(실험조건 (b))에 의해 용탕은 런너를 통과한 후 캐비티 하부의 일부만을 충전시키고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 캐비티내의 진공도가 증가할수록 진공 흡입력에 의해 캐비티의 용탕 충전량은 증가하며, 60 mmHg의 진공도를 적용할 경우 캐비티의 90% 이상을 충전하는 것으로 나타났다. 한편, Fig. 3(a)의 500, 250 mmHg의 경우 해석결과보다 Fig. 3(b)의 실제 주조결과에서 충전길이(filling length)가 다소 긴 것으로 나타났으나, 이는

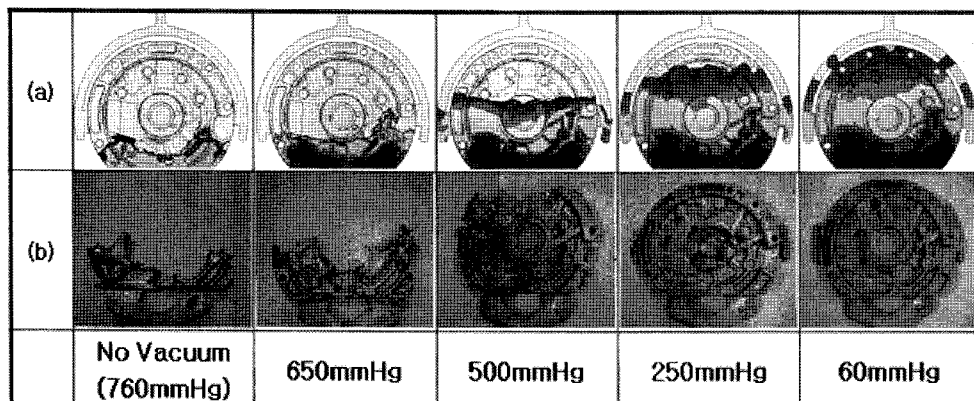


Fig. 3. (a) Calculated and (b) experimental molten metal behaviors with the variation of vacuum degree in cavity (before high velocity filling).

진공 적용 후 고속 사출 직전에서 플런저 팁을 강제 정지시킴에 따른 용탕의 유동 관성에 의해 실주조에서는 다소 더 충전됨을 감안할 때, 전체적으로 캐비티 진공도에 따른 용탕 충전 거동은 실험 및 해석 결과에서 전체적으로 매우 유사한 거동을 보이는 것으로 판단되었다.

Fig. 4에서는 Fig. 3에서 얻어진 실제 적용된 감압도(대기압과 캐비티 진공도의 차이)에 따른 용탕의 충전길이를 상호 비교하였다. 용탕의 충전길이는 제품 하단부에서 용탕의 선단부위까지의 거리를 측정된 결과이다. 캐비티내의 감압도가 증가할수록 충전길이는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 감압도에 따른 용탕 충전 길이는 앞에서 언급한 바와 같이 상호 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 감압도에 따른 캐비티 내의 충전 길이를 직선회귀(linear regression)한 다음 정량적으로 표현하면 Table 3과 같다. Table 3에서 보듯이 감압도가 100 mmHg 증가함에 따라 충전길이는 15 mm씩 증가함을 알 수 있다. 특히, 실험과 해석간의 충전길이를 비교하면 무진공과 감압도 700 mmHg(캐비티 진공도: 60 mmHg)의 경우는 실험치와 해석치가 매우 유사함을 보인다. 따라서, 진공다이캐스팅 적용에서 캐비티 진공

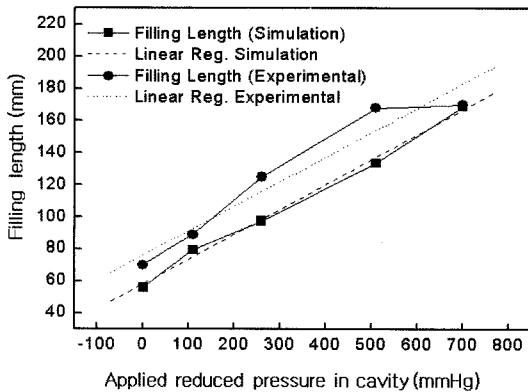


Fig. 4. Filling length versus applied reduced pressure in cavity.

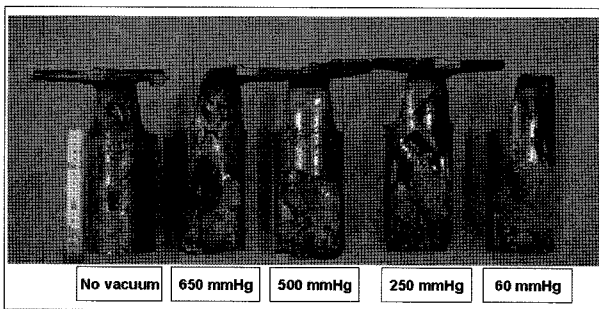


Fig. 5. Behaviors of molten metal in shot sleeve with the variation of vacuum degree in cavity.

도에 따른 진공 유동해석은 현장의 진공 적용에 따른 용탕 유동 특성을 파악하기에 유용한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5에서는 진공을 적용하고 고속사출 직전에서 사출이 멈춘 상태에서 사출슬리브 내에 잔존하고 있는 용탕 양상을 나타내었다. 캐비티 무진공시에는 저속 사출 후 플런저 팁이 멈추어 150 mm의 거대 비스킷이 형성되었고 비스킷내에는 거시 수축공 형성 외에는 캐비티내로의 추가적인 용탕 토출은 없었다. 그러나 캐비티내에 진공이 적용됨에 따라 플런저 팁과 접촉되는 슬리브 부분에서 용탕이 캐비티 내의 진공 흡입력에 의해 캐비티 내로 토출되어 슬리브내의 용탕량이 저감되었고 그 저감량은 진공도에 비례하여 증가하였다. 이러한 저감량이 캐비티내에 진공이 적용됨에 따라 캐비티내로 유입되어 캐비티 충전 길이를 증가시키게 된다.

### 3.2 진공 유동 해석에 의한 유동 특성 및 주요방안 설계

진공적용 유동해석에 의해 캐비티 진공도에 따른 주조품의 보스부와 최종 충전부에서의 충전속도를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 6의 보스부 부위에서의 용탕 충전시간과 충전속도는 진공을 적용하지 않은 경우에서는 0.24 sec후에 용탕이 유입되기 시작하는 반면, 캐비티의 진공도가 높아짐에 따라 충전 시간이 빨라지기 시작하여 진공도 60 mmHg의 경우에는 0.225 sec에 용탕이 유입되고 동시에 최고속도에 도달한 후 충전 시간에 지남에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 진공도가 높아질수록 급격한 충전 속도가 얻어지는 것으로 나타났고, 진공도 60 mmHg에서의 최고속도는 420 cm/s로 나타났다. Fig. 7에서는 제품의 최종 충전부에서의 용탕 충전 시간과 따른 충전 속도 변화를 나타내었다. 보스부에서와 마찬가지로 진공도가 증가할수록 충전 시간은 짧아져 무진공일 경우 약 0.247 sec에 충전이 시작되는 반면, 60 mmHg의 경우에는 약 0.239 sec에 충전이 시작되었고, 충전이 시작되자마자

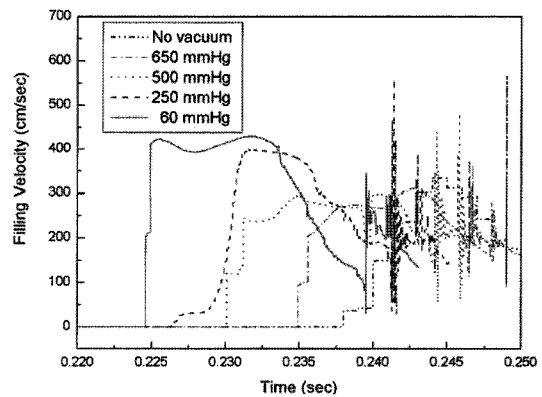


Fig. 6. Variation of filling velocity with vacuum degree in cavity (Boss area : sensor A(Fig1)).

Table 3. Dependence of filling length of the molten metal on the applied reduced pressure in cavity.

	Curve fitting	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
a) Filling length (simulation)	Linear regression	58.07 ± 2.630	0.15 ± 0.006
b) Filling length (experimental)	(Y = A <sub>1</sub> + B <sub>1</sub> *X)	76.20 ± 9.169	0.15 ± 0.023

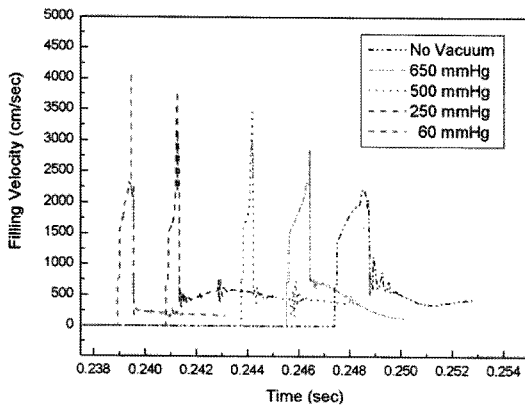


Fig. 7. Variation of filling velocity with vacuum degree in cavity (Final filling area: sensor B (Fig.1)).

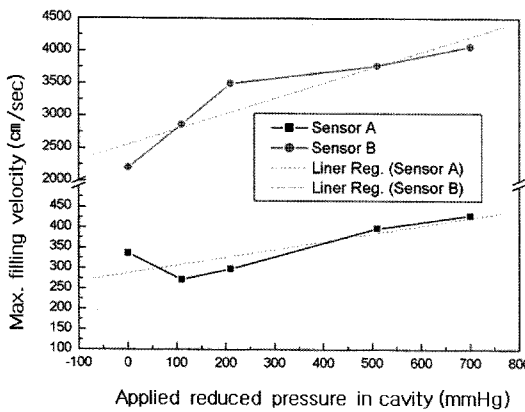


Fig. 8. Variation of max. filling velocity with applied reduced pressure (Sensor A, Sensor B).

며 최고속도는 진공도가 증가할 수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고속사출효과 이외에 진공 적용에 따른 캐비티내의 역압(back pressure)제거로 인한 에어쿠션(air cushion)효과가 줄어들었기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 보스부와 최종 충전부에서 캐비티 진공도에 따른 최고속도를 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 보스부의 최고속도는 무진공 상태에서 감압도를 700 mmHg까지 증가시킴에 따라 275 cm/sec에서 450 cm/sec까지 증가하며, 최종 충전부의 속도는 2500 cm/sec에서 4200 cm/sec까지 증가하여 최종 충전부에서의 최고속도는 boss부위 약 9배 가량 높은 것으로 나타났다. Table 4에서는 이를 직선회귀한 다음 정량적으로 나타내었다. Table 4에서 나타나듯이 보스부 속도는 감압도가 100 mmHg 증가할 때 마다 19.5 cm/sec 증가하며, 최종 충전부에서는 237 cm/sec씩 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 9는 캐비티 진공도가 60 mmHg인 경우에서의 용탕의 충전 거동에 대한 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에 유입된 용탕은 런

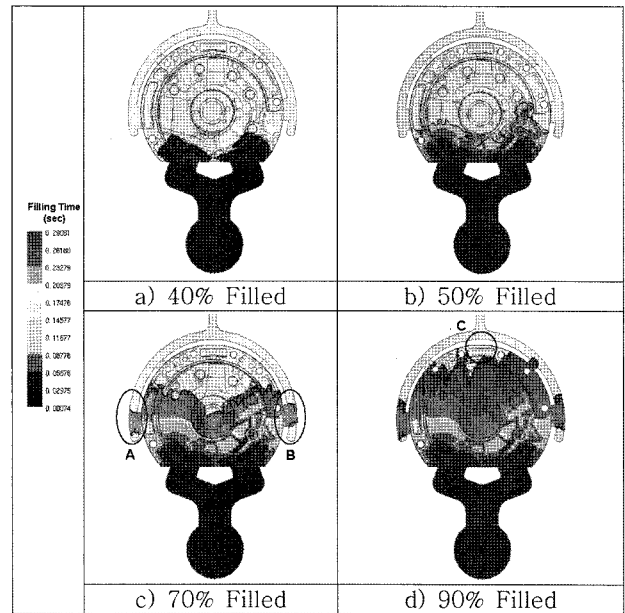


Fig. 9. Filling behaviors of molten metal under the vacuum degree of 60 mmHg in cavity.

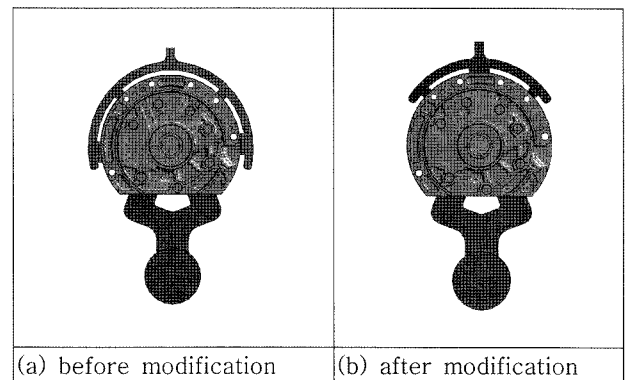


Fig. 10. Modification of vacuum gate system under the vacuum degree of 60 mmHg in cavity.

너를 따라 비교적 균일하게 주입되지만, 70%이상 충전되면서 용탕이 진공 게이트 시스템의 입구를 막는 것을 알 수 있는데 (A, B 부위), 이와 같은 경우 게이트를 통한 가스의 배출효과는 현저하게 떨어지므로 에어벤트 설계변경이 필요하다. 또, 90% 충전시에 최종 충전부는 제품 상부에 형성되는데(C 부위), 이 부위에 게이트가 설치되어 있지 않아 잔류기포 및 개재물 혼입에 의한 불량 유발 위험이 매우 높다. 따라서 진공 적용 효과를 극대화하여 기포가 없는 제품을 생산하기 위해서는 진공 게이트 시스템의 설계 수정이 필요할 것으로 판단되었다. 이에 Fig. 10과 같이 진공 게이트 시스템에서 용탕 충전 시

Table 4. Dependence of velocity variation of the boss area and final filling area on the applied reduced pressure in cavity

	Curve fitting	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
a) Velocity (boss area)	linear regression	287.18 ± 27.63	0.195 ± 0.069
b) Velocity (final filling area)	(Y = A <sub>1</sub> + B <sub>1</sub> *X)	2553.64 ± 234.75	2.371 ± 0.585

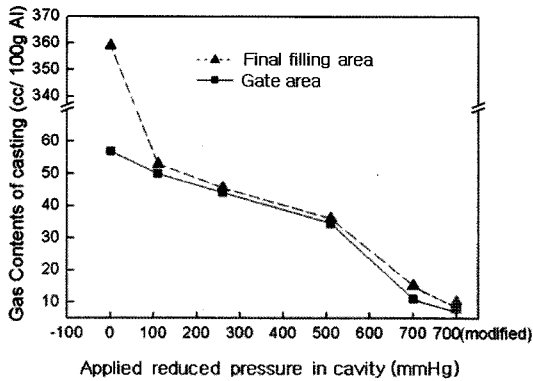


Fig. 11. Applied reduced pressure in cavity versus gas contents of castings.

용탕에 의해 충전되는 게이트를 삭제하고 최종 충전부에 게이트를 추가 설치하는 내용으로 주조방안을 수정하여 시험 주조하였다. 아울러 각 캐비티 진공도에 따른 제품내의 가스량을 게이트부 및 최종 충전부로 구분하여 측정하였으며, 또 60 mmHg의 진공주조방안 개선 전,후의 제품에 대한 가스량을 정량적으로 측정하여 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서와 같이 셋 오프 밸브 형태의 진공다이캐스팅에서 진공을 적용하지 않았을 경우 제품의 가스량은 게이트부에서 57 cc/100 g, 최종 충전부에서는 약 359 cc/100 g로 최종 충전부가 약 6배정도 높은 가스량을 보였다. 이는 셋 오프 밸브 형태에서 밸브가 열리지 않은 무진공 상태에서는 오히려 캐비티내의 가스가 배출을 방해하여 기포결함을 촉진하는 것으로 나타났다. 캐비티의 감압도가 증가함에 따라 최종 제품의 가스량도 감소하였으며 감압도 700 mmHg에서는 최종충전부에서 15 cc/100 g, 게이트부에서 11 cc/100 g로 현격히 감소하였다. 또한, 캐비티 진공도가 증가함에 따라 최종충전부에서의 가스량이 상대적으로 게이트부보다 높았으나 무진공의 경우에 비해서는 양부위에서의 가스량 차이가 현격히 줄어든 것으로 나타났다. 또한, 캐비티 감압도 700 mmHg의 경우의 용탕유동해석에 의하여 진공주조방안을 개선한 경우의 제품 가스량 검사 결과에서 최종충전부에서 10 cc/100 g, 게이트부에서 8 cc/100 g로 기존 방안대비 약 30%정도의 가스량 저감효과를 보여 개발된 진공다이캐스팅 유동해석 기법을 활용하여 진공주조방안을 최적화할 수 있음을 보였다.

### 4. 결 론

전체 부피 397 cm<sup>2</sup>, 평균 두께 2 cm 캐비티내의 진공 적용에 따른 용탕 유동 수치해석 모델을 설정하고, 이를 적용한 진공유동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 캐비티의 진공도 변화에 따른 용탕 충전 거동 해석 결과와 시험 주조 결과를 비교 검토한 결과, 진공도에 따른 캐비티 용탕 유동 특성이 서로 잘 일치하여 캐비티 진공 유동해석을 위해 설정된 수치해석 모델이 타당하고 또, 해석 모델을 적용하여 개발된 진공 유동해석이 높은 유효성을 갖는 것으로 나타났다.

2) 캐비티내의 감압도가 증가함에 따라, 고속 사출 직전의 감압 적용 단계에서 용탕의 충전 길이는 0.15의 비율로 증가하였고, 최종 충전부의 충전 속도는 적용된 감압의 2.317의 배율로 증가하는 반면, 보스부에서의 충전 속도는 0.1953의 낮은 배율로 증가하였다.

3) 캐비티내의 감압도가 증가함에 따라 주조품 가스량은 최종 충전부 및 게이트부에서 지속적으로 감소하였으며, 특히, 700 mmHg 경우, 최종 충전부는 15 cc/100 g, 게이트부는 11 cc/100 g로 현격히 감소하였다.

4) 설정한 수치해석식을 적용한 해석결과를 이용하여, 60 mmHg 진공도에서의 진공 주조방안을 개선한 결과, 기존 방안 대비 약 30%의 현저한 가스량 저감 효과를 보여 본 연구에서 개발된 진공 유동 해석을 통해 진공 주조 방안의 최적화가 가능함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. J. Vinarcik: John willy & Sons, Inc. USA, "High Integrity Die Casting Processes", (2003) 12-18
- [2] K. Y. Kim and M. S. Yi: J. of Korea Foundrymen's Society, Vol.15,(1995)339
- [3] E. S. Kim: J. of Korea Foundrymen's Society, Vol.17,(1997) 527
- [4] Anzai : J. Japan Foundrymen's Society, Vol. 64, (1992) 410
- [5] H. Nomura and K. Terashima: J. Japan Foundrymen's Society, Vol.63,(1991) 434