

# 다이캐스팅 모바일 기기의 기공결함 감소를 위한 유동구조 설계

장정희\*, 김준형\*\*, 한철호\*,#

\*금오공과대학교 일반대학원 기계시스템공학과, \*\*삼성전자 생산기술연구소

## A Gating System Design to Reduce the Gas Porosity for Die Casting Mobile Device

Jeong Hui Jang\*, Jun Hyung Kim\*\*, Chul Ho Han\*#

\*Graduate School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Inst. of Technology

\*\*Core Technology R&D Team, Samsung Electronics

(Received 30 October 2020; received in revised form 19 November 2020; accepted 24 November 2020)

### ABSTRACT

Usually, the die-cast components used in small mobile devices require finishing processes, such as computer numerically controlled coating. In such cases, porosity is the most important defect. The shape of the molten aluminum that passes through the runner and gate in a mold is the one of the factors that influences gas porosity. To define the spurt index, which numerically indicates the shape of molten aluminum after the gate, Reynolds number and Ohnesorge number are used. Before die fabrication, computer-aided engineering analysis is performed to optimize the filling pattern. Finally, X-ray and surface inspection are performed after casting and machining to evaluate how the spurt index affects porosity and other product parameters. Based on the results obtained herein, a new gating system design process is suggested.

**Key Words :** Die Casting(다이캐스팅), Runner/Gate Design(런너/게이트 설계), Porosity Defect(기공 결함), Ohnesorge's Number(오네조르게 수)

### 1. 서 론

최근에 알루미늄은 많은 산업 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 그중 몇몇 모바일 제품에서 비용 절감을 위하여 외장재에 다이캐스팅을 적용하였다. 다이캐스팅 외장재의 경우 표면에 후가공을 거치게

되는데, 이때 가장 문제가 되는 것이 기공결함이다. 기공결함은 NADCA(North American Die Casting Association)에서 가스 기공(Gas Porosity), 흐름 기공(Flow Porosity), 수축 기공(Shrinkage Porosity)으로 분류하였다.<sup>[1]</sup> 그 중 가스 기공은 다이캐스팅에서 가장 중요한 불량 현상 중 하나이다. 가스 기공의 원인은 급격한 형상의 변경, 부적절한 벤트, 슬리브(Sleeve) 내에 고립된 공기, 냉각수 누출(leak), 이형제 수분 잔류와 같이 다양하다. 그리고 이러한 원인들은 금형 설계 및 생산 단계에서 충

# Corresponding Author : [chhan@kumoh.ac.kr](mailto:chhan@kumoh.ac.kr)

Tel: +82-54-478-7393, Fax: +82-54-478-7319

분히 검토되어야 하며, 진공 다이캐스팅 등이 가스 기공을 줄이기 위해 사용되기도 한다<sup>[2]</sup>.

하지만 가스 기공 해결을 위한 적절한 런너/게이트 설계방식은 연구가 많이 진행되지 않은 상황이다. 다이캐스팅 런너/게이트 설계방식으로 가장 널리 알려진 J. F. Wallace and E. A. Herman 식은<sup>[3]</sup> 분무 형태의 흐름(Atomized Flow)을 얻기 위한 방식으로, 용탕이 게이트를 통과할 때 분무된 용탕 사이에 필연적으로 에어트랩이 발생하고 결과적으로 표면기공 시 기공결함을 유발한다.<sup>[4]</sup> J. F. Wallace와 E. A. Herman에 의해 제안된 런너/게이트 설계방식은 아래와 같다. (1) 용탕온도 및 금형 온도 등 주어진 값을 바탕으로 외장재 또는 내장재에 따라 고상율(S) 값을 결정하게 되면 충전시간( $t$ )이 계산되며, 이를 바탕으로 게이트에서의 속도 및 단면적 등 금형 설계에 필요한 값들을 계산하게 된다. 이때  $K$ 는 열전도도와 관련한 실험상수,  $T_i$ 는 게이트에서의 용탕온도,  $T_f$ 는 액상선( $^{\circ}C$ ),  $Z$ 는 변환 인자( $^{\circ}C$  to %),  $T_d$ 는 금형 온도,  $T_{min}$ 는 제품의 가장 얇은 곳의 두께이다.

$$t = \left( K \frac{T_i - T_f + SZ}{T_f - T_d} \right) * T_{min} \quad (1)$$

B. Vijaya Ramnath<sup>[5]</sup> 등과 Nair Akhil K. Raveendran<sup>[6]</sup> 등은 J. F. Wallace와 E. A. Herman의 식에 기초하여 금형의 유동구조 설계에 관하여 연구하였다. 여기서 용탕의 온도 및 충전속도와 밀도의 관계를 통하여 기공에 대한 영향을 평가하였으나 금형 설계에 필요한 구체적인 설계방식은 제시하지 못하였다. 반면 S. Schneiderbauer<sup>[7]</sup> 등은 레이놀즈 수(Re)와 오네조르계 수(Oh)의 관계를 통하여 게이트에서 분사되는 용탕의 형태를 설명하였다. S. Schneiderbauer 등에 따르면 용탕이 파이프 노즐을 통과할 때, 가해지는 압력에 따라 물의 흐름이 Fig. 1의 (a), (b)에서 처럼 연속-끊어짐(Wavy Disintegration) 또는 분무(Atomization) 형태로 나눌 수 있다. 흔히 분무기 노즐 크기를 조절하였을 때, 물의 분사형태가 바뀌는 현상과 같으며, (b)는 분무기 노즐을 조였을 때 퍼져서 나가는 형태와 같다.

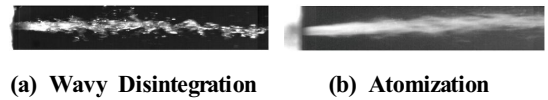


Fig. 1 Free jet of water according to pressure<sup>[7]</sup>

본 연구에서는 S. Schneiderbauer의 연구에 기초하여, 새로운 다이캐스팅 런너/게이트 설계 기준을 제안하고자 한다. 이를 위해 모바일 제품을 모델링 하였으며, 런너/게이트 및 오버플로를 설계하였다. 캐비티 내에서 급격한 형상변화로 인한 에어트랩을 개선하기 위하여 성형해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 충전말단부에 오버플로를 설치하였다. 또한 새로 제안된 런너/게이트로 제작된 금형의 주조 시 게이트 분사형태 이외의 영향을 최소화하기 위하여 강호정 등의 연구<sup>[8]</sup>를 참조하여 슬리브 절환위치를 결정하였으며, 주조 1시간 전 탈가스 처리를 실시하였다. 이렇게 제작된 금형 및 주조조건에서 플런저(Plunger) 속도를 변화하여 샘플을 제작하였으며, 조건 별 샘플은 표면기공 및 X-ray (X-eye 5000B, SEC Co. Ltd) 촬영을 통하여 기공에 대한 영향을 평가하였다.

## 2. 유동구조 설계 및 해석

### 2.1 제품 및 유동구조 설계

제품 형상으로 153 \* 78 \* 1.6 mm 가운데가 빈 사각형 박스형상을 모델링 하였다. (하늘색) 중앙 살채움 형상은 순차적인 용탕의 흐름을 유도하기 위하여 추가된 형상이며(노란색), 성형 후 트리밍을 통하여 제거된다.

유동구조(Biscuit/Sprue/Runner/Gate)는 Toyo 125 Ton, 플런저 Ø50 1 캐비티 콜드 챔버(Cold Chamber)를 기준으로 설계하였다. 런너의 단면적은 일반적인 설계방식에 따라 게이트 단면적의 1.2배로 하였다. 게이트 반대쪽은 초탕 및 산화물, 에어트랩을 배출하기 위해 오버플로 형상을 추가하였다. 오버플로 끝에는 진공밸브에 연결하기 위해 폰다렉스(Fondarex) 타입의 진공블럭을 설치하였으며, 금형 내부는 약 100mbar의 진공도를 유지하였다. 주조에 사용된 형상은 Fig. 2와 같다.

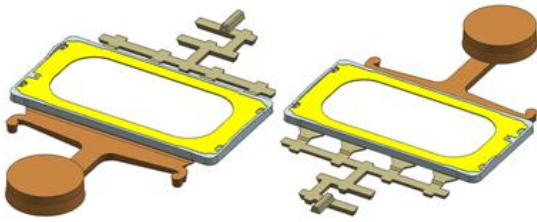


Fig. 2 Shape of gating system, cavity, O/F

## 2.2 실험조건

S. Schneiderbauer 등에 따르면, 게이트에서 용탕이 분사되는 패턴은 I: 흠뿌림(Splattering), II: 연속-끊어짐(Wavy Disintegration), III: 분무(Atomization)로 분류된다. 패턴 I에서는 유체의 흐름이 불연속적으로 발생하고, 패턴 II에서는 연속적인 흐름을 보인 후 흠어지게 된다. 패턴 III에서는 유체가 분무되는 형태로 퍼져 나가게 된다. 일반적인 다이캐스팅 유동구조 설계는 패턴 III의 형태로 설계하며, 이때 용탕은 가스를 포함하게 되어 필연적으로 기공 결함을 유발하게 된다. 각 패턴은 Fig. 3와 같이 실험적으로  $125 \leq Oh * Re^{1.25} \leq 1000$ 에서 용탕은 연속-끊어짐 형태를, 1000 이상에서는 분무되는 형태를 보인다.<sup>[9]</sup> 여기서  $Oh * Re^{1.25}$  값을 분사지수(Spurt Index, S/I)로 정의한다.

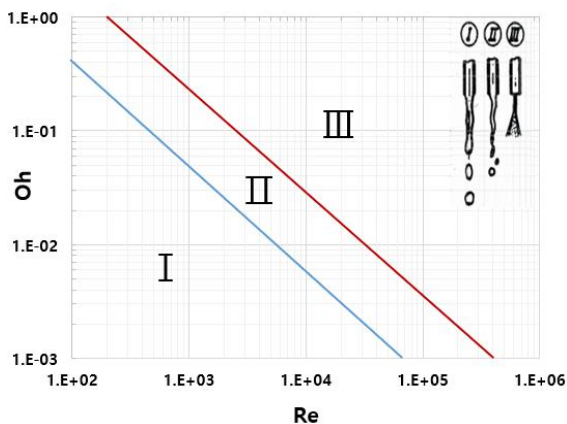


Fig. 3 Graph of drop decay processes according to Relation between Re and Oh (I: splattering, II: wavy disintegration, III: atomization) with schematic representation<sup>[11]</sup>

Re와 Oh 수는 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho_l v d}{\mu_l} \quad \text{and} \quad Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma d}}$$

여기서  $\rho_l$ 는 용탕밀도,  $v$ 는 게이트에서의 속도,  $d$ 는 게이트의 두께,  $\mu_l$ 은 점성계수,  $\sigma_l$ 는 표면장력이다. 위 식을 바탕으로 플런저 크기, 게이트 단면적, 용탕온도, 표면장력, 동점성계수, 용탕밀도는 상수로 하여, 고속속도를 1.5, 2.0 2.5, 3.0 m/s 네 경우에 대한 분사지수 등을 Table 1에 나타내었다. 고속속도의 증가 시 플런저 충격력(Impulse Force,  $F_p = m \cdot v \cdot t$ )의 증가로 인해 금형의 파팅라인에서 플래시(Flash)가 발생하게 되므로, 주조압력(Pc)과 더불어 고속속도도 함께 고려하여 식 (2)와 같이 형체력을 계산하였다. 이때  $A_p$ 는 제품/스프루/런너/오버플로의 투영면적이다.

$$0.9 * A_p * P_c + F_p = \text{형체력(ton)} \quad (2)$$

Table 1 Boundary conditions for clamping force and spurt index

Section	Velocity (m/s)	Spurt Index
Case 1	1.5 (Case 1)	628.9
Case 2	2.0 (Case 2)	901.1
Case 3	2.5 (Case 3)	1191.0
Case 4	3.0 (Case 4)	1495.9
Gate Cross Section (mm <sup>2</sup> )		126 * 1.0
Runner Cross Section (mm <sup>2</sup> )		126 * 1.0
Project Area (mm <sup>2</sup> )		13129
Intensifier Pressure (MPa.)		11
Acc. Cylinder Diameter (Ø)		125
Plunger Diameter (Ø)		50
Plunger Weight (kg)		15.2
Impulse time by Plunger (sec)		0.01
Temp. of Molten Al (°C)		670
Surface Tension (N/m)		0.685
Kinematic Viscosity (kg/ms)		0.001305
Density of Molten Al (kg/m <sup>3</sup> )		2396.6

### 2.3 성형해석

제품 성형해석은 AnyCasting을 사용하였다. 금형내에서 에어트랩에 의한 가스기공이 발생하지 않도록 내측에 더미형상을 추가하였으며, 성형 후 제거하였다. Fig. 4은 Case 1의 충전흐름 결과로 (Filling Sequence) 캐비티 내에서 용탕의 흐름이 순차적인 것을 확인할 수 있다. Case 2 ~ Case 4의 충전흐름 결과도 Case 1와 동일한 용탕의 흐름을 보여 해석결과는 생략하였다. 성형해석 경계조건은 Table 2 와 같이 설정하였다.

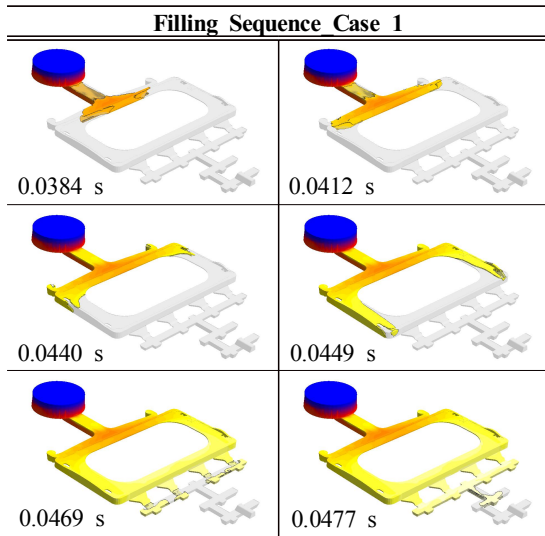


Fig. 4 Filling sequence of case1

Table 2 Boundary conditions for CAE

Boundary Condition	
Total Mesh	4,898,428
Sleeve Length (mm)	155
Amount of Melt (kg)	0.33
Biscuit Thickness (mm)	18
Sleeve Length (mm)	155
Low Speed (m/s)	0.5
Low Speed Length (mm)	97
High Speed (m/s)	1.5 ~ 3.0 m/s
High Speed Length (mm)	40
Filling Percent of Sleeve (%)	40.2

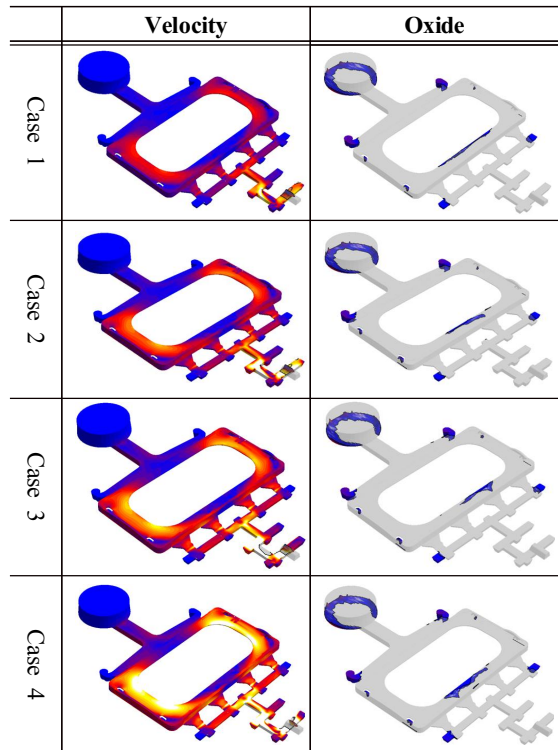


Fig. 5 Velocity and oxide results of each case at 99% filling

Fig. 5에서는 각 조건의 99% 충전 시 속도와 산화물결과를 나타낸다. 해석결과에서 플런저 속도가 1.5 m/s에서 3.0 m/s로 증가함에 따라 금형내에서 용탕의 속도는 100 m/s에서 200 m/s로 증가하나, 산화물 결과는 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이는 플런저 속도가 증가하더라도 용탕의 흐름은 동일하며 결과적으로 용탕이 금형내 공기와 접촉하는 면적도 동일하다는 것을 나타낸다.

### 3. 주조 및 검사

해석결과를 바탕으로 1 캐비티 금형을 제작하였으며, 캐스팅은 Toyo 125 ton 콜드 챔버 주조기를 사용하였다. 수소가스에 의한 기공발생을 막기 위해, 주조 1 시간 전 탈가스 처리 및 용탕의 안정화 시간을 거친 후 진행하였다. 시험조건은 플

런저의 속도를 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m/s 4가지 조건으로 진행하였으며 나머지 조건은 모두 동일하게 하였다. 샘플은 각 조건에 대하여 시작 후 20개는 폐기하고 60개 씩 수집하였다. 수집된 시료에 대하여 Fig. 7과 같이 각 1개씩 X-Ray를 통하여 내부기공을 샘플링 검사하였다.

검사결과 Case 4(S/I: 1495.5)에서 기공의 총 체적과 기공의 비율이 가장 낮은 값을 보였으며, Case 2(S/I: 901.1), Case 1(S/I: 628.9), Case 4(S/I: 1191.0) 순으로 내부 기공이 증가하였다. Table 3

반면 Case 4에서는 주조 후 표면에 Fig. 6과 같이 싱크 마크(Sink Mark)가 7개 발생하였다. 표면 싱크 마크는 가공 깊이에 따라 표면가공 후에도 남아 있을 수 있어 불량으로 집계하였다.

외관 형상가공을 위하여 표면에서 0.3 mm CNC 가공 및 크로메이트(Chromate) 처리 후 디노 라이트(Dino-Lite)를 사용하여 표면을 검사하였다. 기공의 크기가 0.1 mm 이상인 경우 불량으로 판정하여 집계하였다. Fig. 8는 Case 3, 2.5 m/s에서 CNC 가공 및 크로메이트 후 표면에 나타난 기공으로 광학현미경(x100)을 통하여 촬영하였다. 0.2 mm ~ 0.3 mm 크기의 둥근 모양의 전형적인 가스기공의 형태를 보인다.

Table 3 X-Ray porosity measurement results of each case

	Total volume of pore (mm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
Case1	7.40	0.1124
Case2	6.06	0.0959
Case3	7.63	0.1207
Case4	3.78	0.0572

Sink Mark at 3.0 m/s

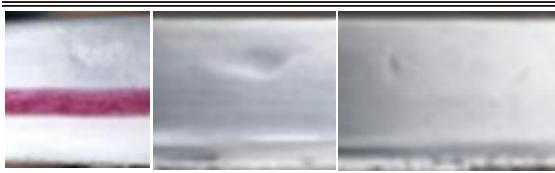


Fig. 6 Sink mark images after casting at 3.0 m/s

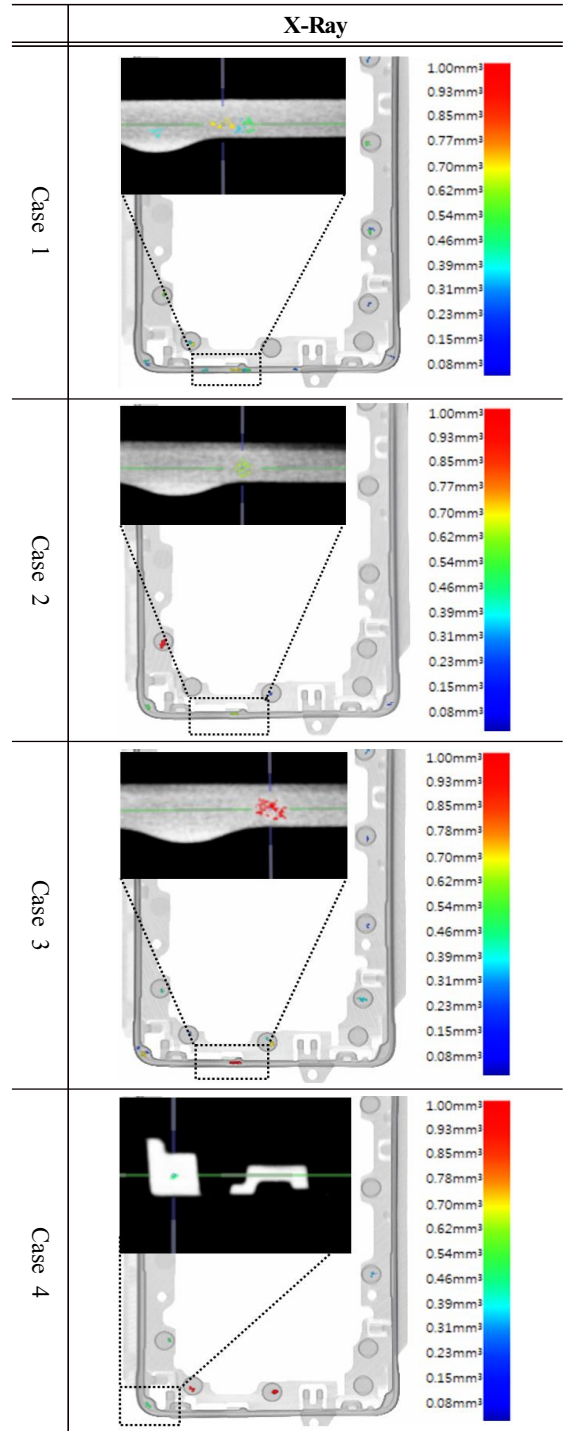


Fig. 7 X-Ray images of each case for porosity

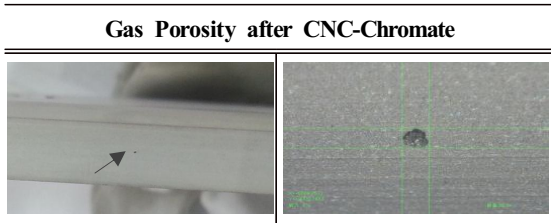


Fig. 8 Gas porosity of case 3 after CNC-Chromate

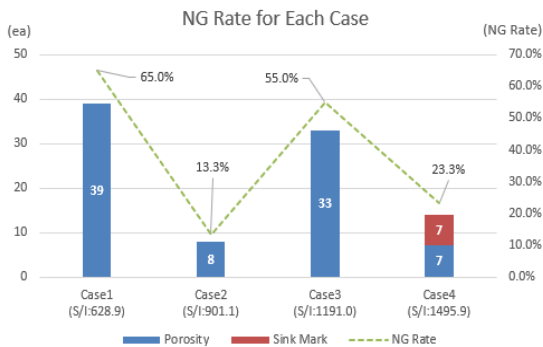


Fig. 9 NG rate of each case for sink mark after Casting and porosity after CNC

위 검사결과를 바탕으로 Fig. 9와 같이 조건 별 60개에 대한 불량률을 정리하였다. Case 2: 13.3%로 불량률이 가장 낮았으며, Case 4: 23.3%, Case 3: 55.0%, Case 1: 65.0% 순으로 X-Ray 측정값과 유사한 결과를 보였다. 가공 후 기공불량에 한하여 Case 4가 7개의 기공불량으로 X-Ray 측정값과 일치하는 가장 양호한 결과를 보였으나 주조 후 싱크마크로 인해 전체 불량률은 증가하였다. 이는 일반적으로 내부기공은 가스기공과 수축기공의 복합적인 결과로 나타나게 되는데, Case 4에서는 표면에 싱크 마크가 발생하는 만큼 수축에 의한 내부기공이 감소한 것으로 판단된다. Case 3에서는 게이트에서 분사되는 형태가 연속-끊어짐에서 분무 형태로 바뀌며 기공이 증가하였으며, 반면 Case 1에서는 용탕속도의 하락으로 인한 성형성 저하로 흐름 기공이 증가한 것으로 판단된다. 하지만 Case 2에서는 용탕이 게이트를 통과할 때 분무 바로 아래의 조건에서 연속적인 용탕의 흐름으로 가스기공은 감소하였으며, 충전 시 적절한 용

탕의 속도로 흐름기공도 감소하였다. 더불어 외관 수축도 발생하지 않아 가장 낮은 불량률을 보였다. 약 10%의 기공결함 불량률은 양산 시 관리가 가능한 수준으로 퍼티도장-폴리싱 추가 공정을 통해 개선하게 된다.

#### 4. 결론

기존의 런너/게이트 설계방식은 게이트를 통한 용탕이 분무되도록 하여 성형성을 향상시키는데 목적이 있다. 용탕의 속도가 과도하게 느리면 성형성이 저하하게 되며, 과도하게 빠른 경우 용탕은 분무되어, 가스 기공 및 파팅 플래시가 발생할 수 있다. 이에 대하여 플런저 속도를 기준으로, 분사지수(S/I)를 사용하여 게이트에서 분사되는 용탕의 형태를 수치적으로 나타내어 형체력 및 게이트 단면적 등 주조조건을 결정할 수 있도록 하였다. 플런저 속도를 증가시켜가며 분사형태가 기공 불량에 미치는 영향을 평가하였고 시험결과 분사지수가 900 ~ 1000에서 가장 양호한 품질을 보였다.

위 시험 결과를 바탕으로 아래와 같이 런너/게이트 설계 프로세스를 제안하고자 한다.

- 1) 제품의 최소 두께( $T_{min}$ )를 확인하고, 성형해석을 통해 해당부위의 성형에 필요한 최소속도를 확인한다.
- 2)  $T_{min}$ 에서 적정 성형속도를 얻기 위한, 플런저 크기 및 속도를 결정한다. 이때 형체력이 주조기의 최대 형체력을 넘지 않도록 한다. 만약  $T_{min}$ 의 성형을 위해 고속속도가 과도하게 높다면, 플런저 크기 증가가 필요하다.
- 3) 플런저 크기와 속도가 결정되면, 분사지수가 900 ~ 1000 사이가 되도록 게이트 단면적을 결정한다. 이때 게이트 위치는 성형해석결과를 참고하여 결정한다.

더불어 분사지수를 활용한 런너/게이트 설계는 전통적인 다이캐스팅 설계뿐만 아니라, 세미 솔리드 다이캐스팅(Semi Solid Die Casting) 금형설계시에도 용탕의 흐름을 정량적인 값으로 나타낼 수 있어 유용하리라 생각된다.

## REFERENCES

1. William, G. W., Die Casting defects – Trouble shootings Guide, NADCA Kindle Edition, pp. 11-19, 2013.
2. Hwang, I. H., Lee, W. S., Cho, J. H., Park, I. S., Heo, M. W., Jung, H. Y., Lee, J. C., “A Study on the Development of Die-Casting Technology for Minimum Gas Hole Defect of Aluminum Automobile Parts”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 135, 2018.
3. Herman, E. A., Gating Die Casting Die, NADCA, pp. 21, 1996.
4. William, G. W., Die Casting Defects - Causes and Solutions, NADCA Kindle Edition, pp. 35-45, 2007.
5. Ramnath, B. V., Elanchezian, C., Chandrasekhar, V., Kumar, A. A., Asif, S. M., Mohamed, G. R., Raj, D. V., Kumar, C. S., “Analysis and Optimization of Gating System for Commutator End Bracket”, Procedia Materials Science 6, pp. 1312-1328, 2014.
6. Raveendran, N. A. K., Patil A. N., “Optimization of Runner Design in Pressure Die Casting”, International Journal of Engineering Research & Technology Vol. 6, pp. 394-396, 2017.
7. Chimani, C. M., Kretz, R., Schneiderbauer, S., Putteringer, S., Pirker, S., “Studies on Flow Characteristics at High-Pressure Die-Casting”, Materials Science and Engineering 27, 2011.
8. Kang, H. J., Park, J. H., Kim, E. S., Yun, P. H., Park, I. M., “Effect of the Plunger Velocity and the Fast Shot Set Point on the Gas Porosity during ADC12 Plate Die Casting”, Korean journal of metals and materials, Vol. 54, No. 2, pp. 145-153, 2016.
9. McKinley, G. H., Renardy, M., “Wolfgang von Ohnesorge”, Physics OF Fluids, 23, pp. 2-5, 2011.