

# 충전해석에 의한 Plug Cover Housing 금형의 피드시스템 설계

박종천\*<sup>#</sup>, 유만준\*\*

\*금오공과대학교 기계공학과, \*\*구미에이테크솔루션(주) 기술연구소

## Designing Mold Feed Systems for Plug Cover Housing with Filling Analysis

Jong-Cheon Park\*<sup>#</sup>, Man-Jun Yu\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, KIT, \*\*R&D Department, KAS

(Received 6 August 2018; received in revised form 14 August 2018; accepted 28 August 2018)

### ABSTRACT

In this study, the optimum design of mold feed systems is determined for plug cover housing (PCH), which is a cover-assembly product that protects the wiring of automobile connectors. The design goal is to achieve the filling balance of the resin in the left and right covers while avoiding the occurrence of weld lines in the hinge as much as possible. For the optimization, an orthogonal array experiment and a main effect analysis of the design factors are performed, and the factors that cause the interactions with the two design characteristics are selected as the design variables. We present some design alternatives, i.e., some combinations of the design variables, and analyze the filling-simulation results, expected molding risk, and cost economics to select an optimum design solution among the design alternatives. In the optimal solution, the weld line is generated at a position outside the hinge, and the filling balance is also acceptable, showing that both design goals can be satisfied simultaneously despite conflicting with each other.

**Key Words** : Filling Analysis(충전해석), Feed System(피드시스템), Optimization(최적화), Weld Line(웰드라인), Filling Balance(충전균형)

## 1. 서 론

사출금형의 피드시스템(feed system)은 사출기로부터 용융 수지를 제품 캐비티에 충전시키는 통로의 역할을 하며, 스프루와 러너 및 게이트로 구성된다. 제품 캐비티 내부의 압력 및 온도 분포와 품질에 영향을 미치는 중요한 성형특성들이 주로 충전과정에서 결정되므로, 피드시스템에 대한 최

적설계는 매우 중요하다<sup>[1,2]</sup>. 이에 따라 최근까지 사출성형 해석을 이용한 피드시스템의 설계 최적화에 관한 다양한 연구들이 수행되어져 왔다.

Joe 등<sup>[3]</sup>은 근사모델과 최적화 알고리즘(PIAnO)을 기반으로 하는 설계법을 제시하고, 자동차 도어트림에 대해 최대사출압이 최소화되도록 다수 밸브 게이트의 위치를 최적화하였다. Lee와 Kim<sup>[4]</sup>은 자동차 대시보드를 대상으로 최대사출압과 게이트의 최대압력차를 가중치법을 적용하여 단일 목적함수로 구성하고, 마이크로 유전알고리즘을 사용하여 최소화하였다. Zhai 등<sup>[5]</sup>은 웰드라

# Corresponding Author : cadpark@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7297, Fax: +82-54-478-7319

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인을 지정된 장소에 위치시키기 위한 최적화 절차를 제시하였다. 이 알고리즘에서는 먼저 제품 영역을 가상으로 분리하고, 각 영역에서 게이트 위치를 최적화한 후 러너 크기의 변경을 통해 웰드라인을 지정 위치로 이동시킨다. Alam과 Kamal<sup>[6]</sup>은 러너 밸런스의 강건설계를 위해 다목적 유전 알고리즘을 사용하여 러너의 직경과 길이를 최적화하였다. Park과 Kim<sup>[7]</sup>은 멀티 캐비티 금형의 러너 밸런스를 위해 미충전된 총 체적을 최소화하는 반복 계산을 통해 각 러너의 직경을 결정하는 최적화 알고리즘을 제시하고, 3 캐비티 금형의 러너 설계에 적용하였다.

본 연구에서는 자동차 커넥터의 배선 보호용 커버 부품인 Plug Cover Housing(이하 PCH)을 대상으로 사출성형 시뮬레이션 해석을 이용하여 금형 피드시스템의 최적설계를 수행한다. 이 PCH는 한 쌍의 좌, 우 커버가 길고 가느다란 힌지로 연결되어 있는 구조로서, 설계목표는 힌지에서 웰드라인(weld line)의 발생을 억제하면서, 동시에 좌, 우 커버에서 수지의 충전이 균형을 이루는 것이다.

최적화를 위해 기존 시스템을 단순화시킨 새로운 피드시스템 구조를 제시하였다. 피드시스템의 설계인자들에 대한 직교배열(orthogonal array) 실험을 실시하고, 웰드라인과 충전균형에 대한 설계인자의 효과를 분석하여 러너와 스프루 및 게이트에 대한 설계 최적화를 수행하였다. 선택한 최적 설계안에서 웰드라인은 힌지를 벗어난 위치에서 생성되었고, 충전 균형성도 매우 우수하여 상충(conflict)하는 두 설계목표를 동시에 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 기존 설계안과 비교해서는 충전 불균형에 따른 성형 리스크 회피와 수지 절감에 의한 경제적 효과가 기대된다.

## 2. Plug Cover Housing

### 2.1 해석모델

Fig. 1은 PCH의 3차원 형상이다. 이 PCH는 형상과 크기가 서로 다른 좌측 커버와 우측 커버가 긴 힌지로 연결되어 있다. 제품 크기는 인클로징 박스(enclosing box)로 측정해서 길이×폭×높이가

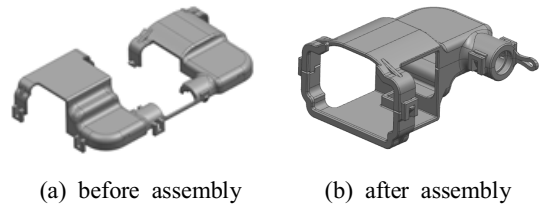


Fig. 1 Geometry of the Plug Cover Housing

95.2×42.98×19.15(mm)이며, 살두께 범위는 0.6~1.22(mm)이다. 힌지의 단면 치수는 1.0×1.0(mm)이고 길이는 16.25mm이다. 제품 취출 후에는 좌, 우측 커버를 서로 마주보게 돌려 세운 다음, 우측 커버의 다섯 개 스냅핏들을 좌측 커버의 측면에 위치한 각 구멍들에 체결시켜 조립한다.

2단 금형을 적용하고, 피드시스템의 요소로 빼기구배가 적용된 스프루, 원형 단면의 러너와 터널게이트를 채택한다. 게이트는 성형성을 고려하여 좌측 커버와 우측 커버의 전면부 분할면 상에 각각 하나씩 두는 멀티게이트 시스템을 사용한다.

유한요소모델은 듀얼 도메인(dual domain) 형식으로 생성한 60,348개의 삼각형 유한요소와 30,166개의 절점으로 구성된다. 유한요소의 매치율은 89%이고 평균 형상비(aspect ratio)는 1.65이다. 충전해석을 위한 상용 해석 프로그램으로 Moldflow<sup>[8]</sup>를 사용하였다. 수지는 PA66-C112 NC013이며, Table 1에 수지의 기본적 물성을 나타내었다.

### 2.2 설계 목표

PCH가 조립된 상태에서 힌지는 큰 굽힘응력을 받게 되는데(Fig. 1(b)), 힌지의 중심에 가까울수록

Table 1 Material properties of PA66-C112 NC013

Property	Unit	Value
Elastic modulus	MPa	2,690
Shear modulus	MPa	962.1
Poisson's ratio	-	0.398
Thermal conductivity	W/m-C	0.1401
Melt density	g/cm <sup>3</sup>	0.96149
Transition temperature	°C	215

굽힘응력은 더 커지게 된다. 만약 웰드라인<sup>[9]</sup>이 힌지 가운데에 존재하면, 굽힘을 받을 때 웰드라인 상의 V자형 노치에서 응력집중이 발생하고 힌지는 굽힘강도를 유지하지 못해 파손될 수 있다. 따라서 웰드라인이 가급적 힌지의 중심부에서 생성되는 것을 피하는 것이 바람직하다. PCH 피드시스템의 설계목표는 힌지에서 웰드라인 발생을 최대한 방지하는 것과 동시에 좌, 우측 커버의 충전 불균형<sup>[10]</sup>을 최소화하는 것이다.

그러나 힌지를 중심으로 좌, 우측 커버와 게이트의 대칭적인 배치 구조로 인해 웰드라인과 충전 균형이 상충하는 특징이 있다. 즉 두 게이트로부터 대칭적인 러너시스템에서는 충전 균형성은 좋겠지만, 힌지에서 웰드라인 발생을 피하기는 어렵다. 그러나 웰드라인을 힌지의 외곽으로 이동시키고자 유동을 조절할 경우에는 좌, 우측 커버의 충전 불균형이 심화된다. 충전 불균형이 커지면 먼저 충전된 커버에서 내부압력이 급격히 커지게 되고, 결국 좌, 우측 커버의 수축 편차가 커져 상이한 제품 변형과 플래시 불량을 초래할 수 있다.

### 2.3 기존 설계안

Fig. 2는 PCH 피드시스템의 기존 설계안의 해석모델이다. 힌지에서 웰드라인을 회피하기 위해 우측 커버로 연결되는 러너를 우회시킨 구조이다. Fig. 3은 이 설계안에 대해 웰드라인과 충전 균형을 해석한 결과이다. 해석조건으로 수지온도는 270℃, 금형온도는 55℃, 사출시간은 자동으로 설정하였다. 해석 결과, 충전 시간은 1.36sec였다.

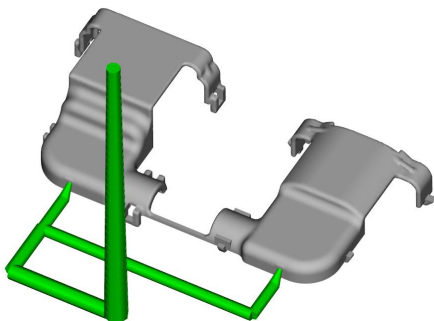


Fig. 2 Analysis model of current feed system

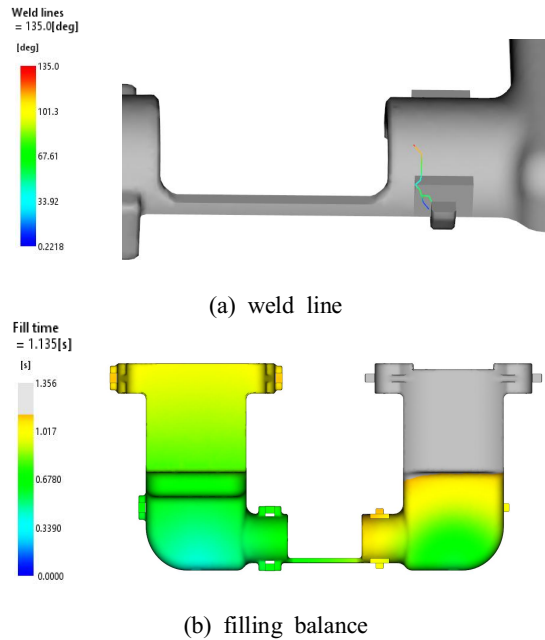


Fig. 3 Simulation results of current feed system ( $\Delta_{fill-time}=0.22sec$ ,  $P_{max}=71.61MPa$ )

웰드라인은 힌지를 벗어나 우측 커버 상에 발생하여 만족한 결과를 보였다. 그러나 충전균형은 크게 부족한 것으로 나타났다. 먼저 충전되는 좌측 커버와 우측 커버의 충전시간차가 0.22sec에 이를 만큼 충전 불균형이 심하게 나타났다. 선 선 충전된 좌측 커버의 내부압력 분포는 39.39MPa ~ 41.82MPa, 최대사출압은 71.61MPa로 예측되었다. 또한 이 설계안은 우측 커버로 우회하는 긴 러너로 인해, 사출압력 손실에 따른 최대사출압의 증가뿐만 아니라 제품 취출 후 스크랩 처리에 따른 수지 낭비가 심한 단점도 가지고 있다. 기존 설계안의 단점을 극복하고 두 설계목표를 충족하기 위해서는 피드시스템의 새로운 구조와 설계 최적화가 필요하다.

## 3. 피드시스템의 최적 설계

### 3.1 피드시스템의 구조와 설계인자

Fig. 4는 본 연구에서 채택한 피드시스템 구조의 해석모델이다. 이 설계안은 기존 설계안이 가

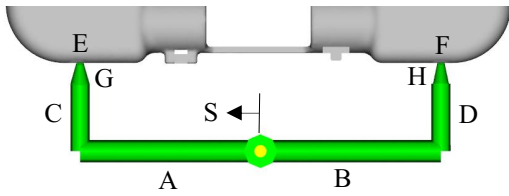


Fig. 4 Analysis model of new feed system and design factors

진 긴 콜드러너의 단점을 개선하기 위해 러너 구조를 단순화시킨 것이다. 피드시스템의 주요 설계 인자는 주러너 및 2차 러너의 직경, 터널게이트의 직경과 위치, 그리고 스프루의 상하단 직경과 스프루 위치의 오프셋이다. 스프루 오프셋은 스프루를 주러너의 중심에서 좌측으로 이동시킨 거리로 정의한다. 경험적 판단에 따라, 설계인자들 중에서 좌측 주러너의 직경(A)을 3.5mm로 제한하였다. 또한 스프루의 상, 하단의 직경을 각각 3.5mm, 5.25mm로, 높이는 87mm로 정하였다. Table 2는 최적화를 위해 선정한 설계인자와 2수준값이다.

### 3.2 설계인자의 효과 분석

Table 2의 설계인자들이 수준값이 변함에 따라 웰드라인과 충전균형에 미치는 효과를 추정하기 위해  $L_{12}(2^{11})$  직교배열 실험<sup>[11]</sup>을 실시하고 해석 결과를 평가하였다. Table 3은  $L_{12}(2^{11})$  직교배열 표에 따른 12개의 실험조건과 각 실험조건에서 해

Table 2 Design factors and their two levels

Factor	Description	Unit	Level 1	Level 2
B	Right main-runner diameter	mm	2.5	3.5
C	Left 2nd-runner diameter	mm	2.5	3.5
D	Right 2nd-runner diameter	mm	2.5	3.5
E	Left-gate location	mm	(28.5, 29.7, 3.1)	(28.5, 19.1, 3.1)
F	Right-gate location	mm	(28.5, -20.5, 3.1)	(28.5, -31.0, 3.1)
G	Left-gate diameter	mm	1.0	1.5
H	Right-gate diameter	mm	1.0	1.5
S	Sprue offset	mm	0	10
T	Filling time	sec	0.9	1.3

Table 3  $L_{12}$  experiments and results of desirability evaluation for weld line and filling balance

#	B	C	D	E	F	G	H	S	T	Desirability	
										Weld line	Filling balance
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	4
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	4	9
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	10	4
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	10	4
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	3	9
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	3	6
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	4	6
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	8	9
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	3	10
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	3	8
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	3	10

석한 웰드라인과 충전균형성에 대해 만족도를 평가한 결과이다. 각 실험조건에서 숫자 1과 2는 해당 설계인자의 1수준값과 2수준값을 각각 의미한다. 해석 조건으로 수지온도는 270℃, 금형온도는 55℃로 설정하였다. 각 설계특성에 대한 만족도는 최하 1점(매우 불만족)에서 최고 10점(매우 만족)까지 10점 척도로 평가하였다.

Fig. 5는 만족도 점수를 토대로 설계인자의 수준별 평균분석을 통해 주효과(main effect)를 추정한 것이다. 분석 결과, 설계인자 C와 E는 2수준값에서, 그리고 H는 1수준값에서 웰드라인과 충전균형에 대한 만족도가 모두 높은 것으로 나타났다. 따라서 Table 2로부터 C의 최적 조건을 3.5mm, E의 최적조건을 (28.5, 19.1, 3.1)(mm), H의 최적 조건을 1.0mm로 정하였다.

한편 F는 웰드라인에 대한 주효과가 충전균형에 비해 압도적이어서, 웰드라인의 평균 만족도가 큰 2수준값, 즉 (28.5, -31.0, 3.1)(mm)을 최적 조건으로 정하였다. 반대로 T는 웰드라인의 주효과에 비해 충전균형의 주효과가 매우 커서, 최적 조건을 충전균형의 평균 만족도가 큰 2수준값, 즉 1.3sec로 정하였다. 또한 웰드라인과 충전균형 모두에서 주효과가 매우 작은 설계인자 D에 대해서는 1수준과 2수준의 중간값인 3.0mm로 정하였다.

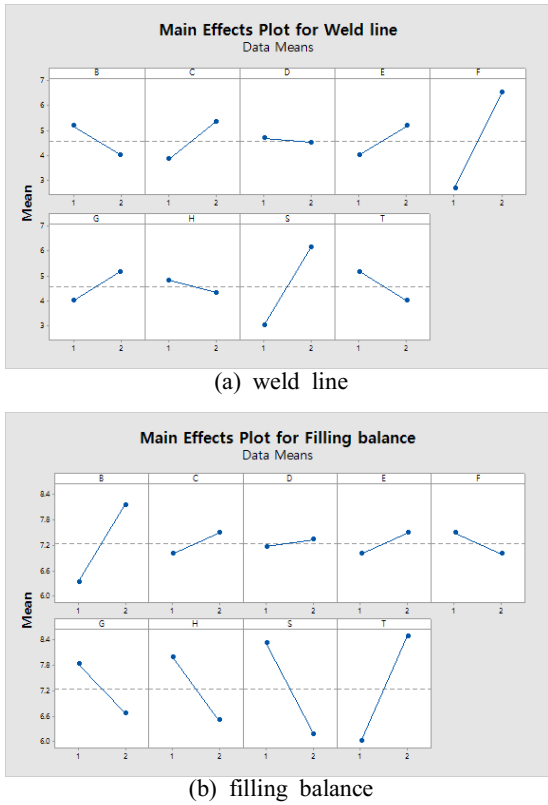


Fig. 5 Main effects plot

이 연구에서는 웰드라인과 충전균형에 대한 최적 수준이 완전히 상충하는 것으로 분석된 설계인자 B(우측 주러너 직경), G(좌측 게이트 직경)과 S(스프루 오프셋)을 피드시스템의 설계변수로 선정하고, 최적화를 시도하였다.

### 3.3 최적 설계대안의 선택

설계변수 B, G와 S에 대한 최적의 설계조합을 결정하기 위해, 경험에 기초하여 네 가지 경우의

Table 4 Design alternatives

Case	B(mm)	G(mm)	S(mm)
1	3.5	1.2	5
2	3.5	1.3	10
3	3	1.1	0
4	3	1.2	5

설계대안들을 설정하고 충전해석을 수행하였다. Table 4는 최적화를 위해 고려한 설계대안들이다. Figs. 6 ~ 9는 각 설계대안에 대해 웰드라인 위치, 좌우 커버에서 충전패턴 및 충전시간차와 최대사출압에 대해 해석한 결과이다. 먼저 웰드라인은 네 경우의 설계대안들 모두에서 힌지의 우측 외곽, 즉 힌지와 우측 커버가 연결되는 필렛 부위에서 발생하는 것으로 나타났다. 웰드라인의 위치와 크기에서 유의미한 차이는 없었으며, 설계대안 모두가 웰드라인에 대한 설계목표를 상당히 만족시키는 것으로 분석되었다. 그러나 충전균형에 대해서는 만족도에 차이가 있었다.

충전균형은 Case 1, Case 3, Case 2, Case 4의 순서로 우수하였다. Figs. 6 ~ 9의 충전패턴은 충전시간차를 보이기 위해 좌측 커버가 충전 완료되는 시점에서 우측 커버 끝단의 미충전된 부위(파선 원의 내부)를 가시화한 것이다. 우측 커버의 미충전 영역이 클수록(충전 불균형이 클수록) 충전시간차는 크게 나타난다. Case 1은 좌우 커버의 충전시간차가 0.01sec, 최대사출압은 54.34MPa로

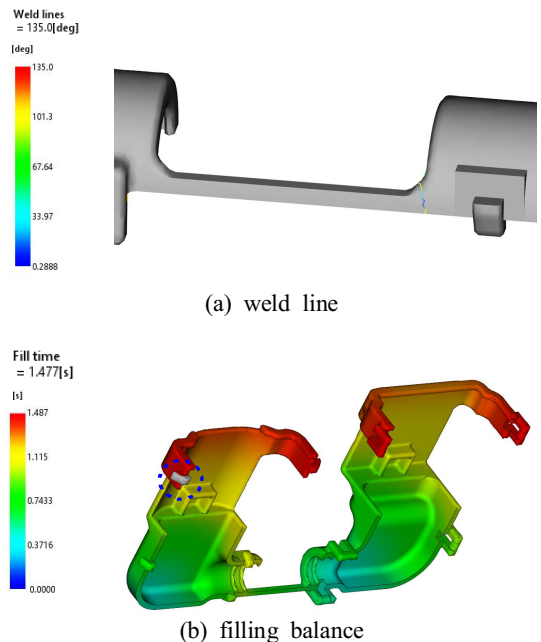


Fig. 6 Simulation results for Case 1 ( $\Delta_{fill-time} = 0.01sec$ ,  $P_{max} = 54.34MPa$ )

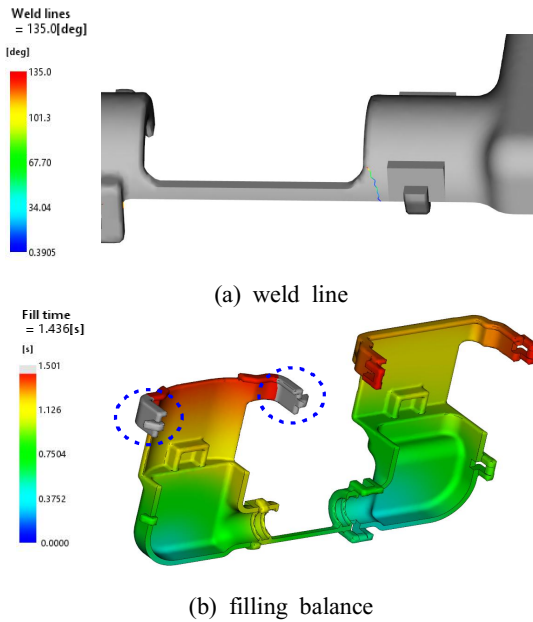


Fig. 7 Simulation results for Case 2 ( $\Delta_{fill-time} = 0.065\text{sec}$ ,  $P_{max} = 62.51\text{MPa}$ )

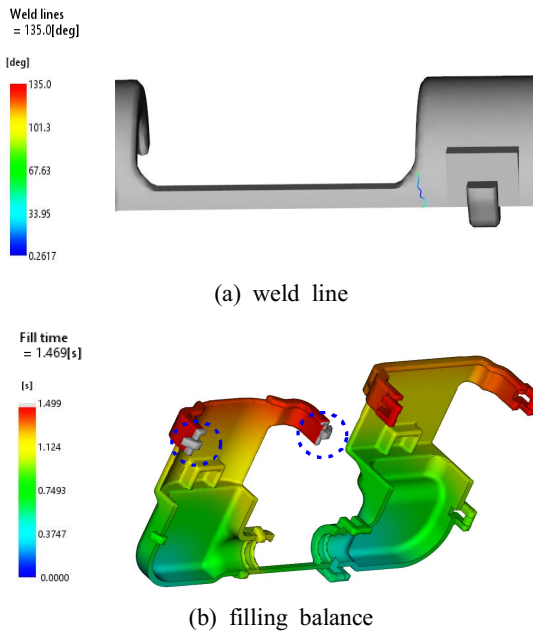


Fig. 8 Simulation results for Case 3 ( $\Delta_{fill-time} = 0.03\text{sec}$ ,  $P_{max} = 55.59\text{MPa}$ )

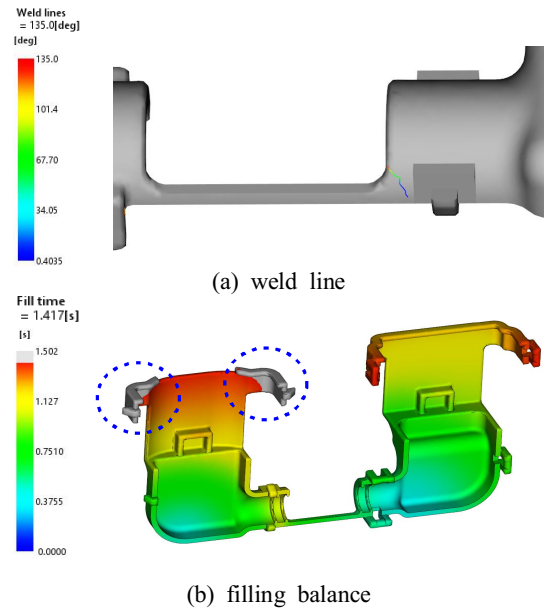


Fig. 9 Simulation results for Case 4 ( $\Delta_{fill-time} = 0.085\text{sec}$ ,  $P_{max} = 66.30\text{MPa}$ )

가장 작게 나타났다. 그러나 Case 2와 Case 4는 Case 1과 Case 3에 비해 충전 불균형이 커서 충전 시간차가 크게 나타났다. 그 결과 충전이 먼저 완료된 좌측 커버에서 내부압력이 크게 증가하였다. 한편 좌측 커버의 측면에는 스냅핏 체결을 위한 구멍들이 존재하고 있기 때문에 금형이 측면으로 형합이 되어야 한다. 이 경우에 좌측 커버에 큰 내부압력이 형성되면 측면 구멍에서 플래시 불량이 생길 수 있다. 따라서 성형 리스크를 고려하여 Case 2와 Case 4를 최적 설계대안의 후보에서 제외하였다.

이 연구에서는 Case 1과 Case 3에 대한 해석 결과를 비교, 분석한 결과, Case 3을 최적의 피드시스템 설계안으로 선택하였다. 이 설계안의 경우, 충전시간차는 0.03sec, 선 충전된 좌측 커버의 내부압력 분포는 29.38MPa ~ 35.05MPa, 최대사출압은 55.59MPa로 나타났다. Case 3이 Case 1에 비해 충전균형성은 약간 떨어진다고 볼 수 있으나, 그에 비해 수지 비용과 금형수정의 용이성 측면에서는 훨씬 유리한 것으로 분석되었다.

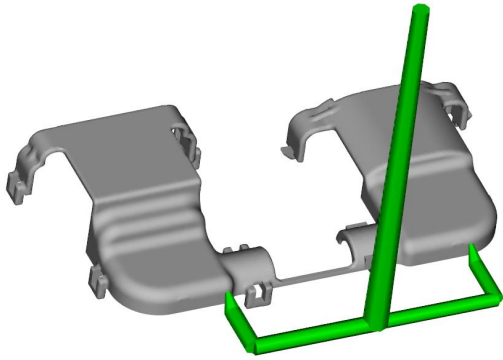


Fig. 10 Optimum design of mold feed system

Case 1과 비교해서, Case 3은 우측 주러너(B)의 더 작은 직경(3mm)으로 인해 러너 스크랩을 줄일 수 있다. 또한 좌측 게이트의 직경(G)을 더 작은 직경(1.1mm)으로 설계함에 따라서 시험 사출 후에 필요한 경우 게이트 직경을 확대 수정할 수 있는 여지가 있게 된다. Fig. 10은 피드시스템의 최적 설계안(Case 3)이다. 이 최적 설계안에 대한 설계변수값은 A=3.5mm, B=3mm, C=3.5mm, D=3mm, E=(28.5, 19.1, 3.1)(mm), F=(28.5, -31.0, 3.1)(mm), G=1.1mm, H=1mm, S=0mm이다.

기존 설계안과 비교해서, 최적 피드시스템 설계안은 웰드라인과 충전균형의 두 가지 설계목표를 모두 만족시킬 수 있었다. 그 결과, 최대사출압은 기존 설계안에 비해 16.02(=71.61-55.59)MPa이 감소되었고(감소율: 22.4%), 선 충전되는 좌측 커버의 내부압력도 약 6MPa ~ 10MPa 정도가 감소하여 플래시 발생의 리스크를 줄일 수 있게 되었다. 특히 러너의 구조를 짧고 단순한 구조로 개선하고 러너 직경을 최적화함에 따라서 러너 체적이 1,803(=4177-2374)mm<sup>3</sup>만큼 감소되었고(감소율 43.2%), 따라서 러너의 스크랩을 크게 줄일 수 있게 되었다.

#### 4. 결 론

연구에서 수행한 내용과 결론은 다음과 같다.

1. Plug Cover Housing 제품에 대해 상충하는 웰드

라인과 충전균형을 동시에 충족시키기 위해 새로운 피드시스템을 제시하고, 러너와 스프루 및 게이트 설계인자에 대한 최적화를 수행하였다.

2. 최적화를 위해 직교배열 실험과 설계인자의 주효과 분석을 실시하였으며, 두 설계특성에 대해 교호작용을 일으키는 인자인 우측 주러너의 직경(B), 좌측 게이트의 직경(G)과 스프루 오프셋(S)을 최적화를 위한 설계변수로 선정하였다.

3. 선정된 네 가지 설계대안들에 대해, 충전해석결과와 성형 리스크 및 수지 경제성 등을 분석하여 최적의 설계대안을 선택하였다. 최적 설계안에서 웰드라인은 힌지를 벗어난 우측 필렛 부근에서 생성되었으며, 좌우 커버의 충전시간차도 0.03sec로 매우 작아 우수한 충전 균형성을 갖는 것을 확인하였다.

4. 최적 설계안은 기존 설계안에 비해, 최대사출압은 22.4%, 좌측 커버의 내부압력은 대략 6MPa ~ 10MPa 정도를 감소시켜 플래시 발생의 위험을 줄일 수 있게 되었다. 또한 러너 스크랩을 43.2%만큼 크게 줄일 수 있게 되어 수지 절감 효과를 기대할 수 있게 되었다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다(과제번호: 2016-104-042).

#### REFERENCES

1. Park, J. C. and Seong, Y. K., "A Study on Determining Optimal Gate Positions for Cavity Fill-Uniformity in Injection Molding Design," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 6, pp. 21-28, 2010.
2. Steinbichler, G., "Trends in Process Optimization," Kunststoffe German Plastics, Vol. 82, No. 10, pp. 13-17, 1992.
3. Joe, Y. S. et al., "Optimization of Valve Gates Locations Using Automated Runner System



- Modeling and Metamodels,” Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 2, pp. 115-122, 2014.
4. Lee, J. and Kim, J., “Micro Genetic Algorithm Based Optimal Gate Positioning in Injection Molding Design,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, pp. 789-98, 2007.
  5. Zhai, M. et al., “Runner Sizing and Weld Line Positioning for Plastic Injection Moulding with Multiple Gates,” Engineering with Computers, Vol. 21, pp. 218-224, 2006.
  6. Alam, K. and Kamal, M. R., “A Robust Optimization of Injection Molding Runner Balancing,” Computers & Chemical Engineering, Vol. 29, pp. 1934-1944, 2005.
  7. Park, G. M. and Kim, C. K., “A Study on The Optimum Design of Multi-Cavity Molding Parts Using The Runner Balance Algorithm,” Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 11, pp. 41-46, 2003
  8. ED&C, Autodesk Simulation Moldflow Insight: The 6th edition of ASMI Korean Manual, ED&C Inc., 2012.
  9. Malloy, R. A., Plastic Part Design for Injection Molding, Hanser, pp. 47-63, 1994.
  10. Shoemaker, J., Moldflow Design Guide, Hanser, pp. 51-52, 2006.
  11. Roy, R. K., Design of Experiments Using the Taguchi Approach, John Wiley & Sons, pp. 336-363, 2001.