

자동차 대시보드의 사출압력 최소화를 위한 게이트 위치와 공정조건의 강건설계

김광호*, 박종천#

(* , # 금오공과대학교 기계공학과)

Robust Design of Gate Locations and Process Parameters for Minimizing Injection Pressure of an Automotive Dashboard

Kwang-Ho Kim*, Jong-Cheon Park#

(Received 23 September 2014; accepted 11 December 2014)

ABSTRACT

In this paper, multiple gate locations and process conditions under concern are automatically optimized by considering robustness to minimize the injection pressure required to mold an automotive dashboard. Computer simulation-based experiments using orthogonal arrays(OA) and a design-range reduction algorithm are consolidated into an iterative search scheme, which is then used as a tool for the optimization process. The robustness of a design is evaluated using an OA-based simulation of process fluctuations due to noise as well as the signal-to-noise ratio. The optimal design solution for the automotive dashboard shows that the robustness of the injection pressure is significantly improved when compared to the initial design. As a result, both the die clamping force and the pressure distribution in the part cavity are also much improved in terms of their robustness.

Key Words : Robust Design(강건설계), Injection Pressure(사출압력), Gate Location(게이트위치), Design-Range Reduction Algorithm(설계영역축소알고리즘), Orthogonal Array(직교배열)

1. 서론

사출성형은 고온, 고압의 고분자 용융수지를 단 령있는 금형의 공동부(cavity)에 고속으로 주입하 여 냉각시킨 후 성형품을 얻는 제작법이다^[1]. 사출 압력(injection pressure)은 보압전환 시점에 사출성 형기의 노즐에 작용하는 압력으로 용융수지가 노즐을 거쳐 금형의 러너시스템과 제품 캐비티를 채우는데 필요한 압력이다^[2]. 사출압력은 성형특성들 에 대한 간접적인 평가 기준이 될 수 있는데, 본 논문에서는 형체결력(die clamping force)과 충전

* Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

Corresponding Author :

Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

E-mail : cadpark@kumoh.ac.kr

후 제품 캐비티의 압력분포에 대한 단일 평가기준으로 고려하고자 한다. 일반적으로 사출압력이 커지면 금형의 평균 내압이 증가되어 성형 중에 금형을 열려는 힘으로 작용하게 된다. 따라서 사출압력이 클수록 형체결력도 커져야 하는데, 요구되는 형체결력이 작을수록 사출기의 선택과 생산성 측면에서 유리하므로 사출압력은 최소화되는 것이 좋다. 또한 사출압력은 금형의 충전과정에서 유동저항을 극복하는데 필요한 구동력이다^[2]. 제품 캐비티에서 수지의 충전이 불균형하게 되면 큰 유동저항이 발생하므로 결국 사출압력은 커지게 된다. 제품 캐비티의 충전 불균형은 수지의 불균일한 압력분포를 초래하여 보압단계 이후에 휨(warpage) 불량이 발생할 수 있으므로 사출압력이 최소화되도록 하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 사출 성형 설계에서 최소의 형체결력과 제품 캐비티의 균일한 압력분포를 동시에 얻기 위해서 사출압력을 단일 평가기준으로 하고 이것을 최소화하는 최적설계를 자동차 대시보드 모델에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 기반으로 수행하고자 한다. 최근까지 사출품의 품질 예측과 향상을 위해 시뮬레이션 해석을 이용한 최적설계에 관한 연구가 폭넓게 수행되어 왔다^[3-8].

사출성형 공정은 공정의 불연속과 사출기 제어의 불완전으로 인해 매 사출마다 성형조건이 명목 수준에서 변동하고 그에 따라 제품의 품질 편차가 발생하는 특성이 있다. 이러한 공정 특성을 고려하여 본 최적설계에서는 설계해의 강건성(robustness)을 목표로 한다. 강건설계해는 공정변동의 원인, 즉 잡음(noise)의 작용에도 불구하고 품질의 변동이 작게 되는 설계해를 의미한다^[9]. 강건성은 Taguchi의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio; SN비)^[9,10]를 사용하여 평가한다.

본 논문에서는 최적의 강건설계해를 얻기 위한 방법으로 Taguchi의 직교배열(orthogonal array)^[9,11]을 이용한 설계영역축소알고리즘을 사용한다. 설계영역축소알고리즘^[12-14]은 직교배열 실험과 그 결과에 따라서 설계영역을 축소시키는 과정을 반복수행함으로써 최적해를 탐색하는 방법이다.

자동차 대시보드 모델에 대해 게이트 위치와 공정조건을 설계변수로 하여 사출압력을 최소화하

는 최적설계를 수행하였다. 그 결과 공정의 변동에도 강건한 최적의 설계해를 얻었으며, 이때 사출압력의 크기와 편차가 최소화됨에 따라 동시에 형체결력과 제품 캐비티의 압력분포도 크기와 편차가 대폭 감소하여 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 최적화 모델 및 문제 정의

본 논문에서는 자동차 대시보드 모델에서 요구되는 사출압력을 최소화하기 위해 다수 개 게이트의 위치와 공정조건을 최적화 문제를 수행하였다. Fig. 1은 최적화 대상으로 선정한 대시보드 모델이다. 이 모델은 대형 사출물로서 제품면의 굴곡 변화가 심하고 기하학적으로도 매우 복잡한 형상을 갖는다. 모델의 치수는 길이가 1,174 mm, 높이가 373 mm, 폭이 273 mm이고 두께는 2.5 mm이다.

일반적으로 사출압력은 제품의 크기와 형상, 게이트 위치를 포함한 금형 형상과 성형조건 등에 의해 결정된다. 따라서 제품 형상이 결정되어 있는 경우에, 사출압력을 최소화하기 위해서는 게이트 위치와 성형조건에 속하는 설계변수와 잡음변수를 동시에 고려해 최적화해야 한다. 사출압력 최소화를 위한 최적설계 문제를 다음 식으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{X}) \\ \min & \sigma(f(\tilde{\mathbf{P}})) \text{ for } -e_i + p_i \leq \tilde{\mathbf{P}} \leq p_i + e_i \quad (1) \\ \text{s.t.} & \mathbf{X} \in \Omega, \tilde{\mathbf{P}} \in \Lambda \end{aligned}$$

여기에서 f 는 목적함수로서 함수값은 사출압력이고 \mathbf{X} 는 설계변수 벡터이다. σ 는 분산, $\tilde{\mathbf{P}}$ 는 잡음변수 벡터, p_i 는 i 번째 잡음변수의 명목값, $2e_i$ 는 i 번째 잡음변수에 대한 변동 범위, Ω 는 설계변수 공간, Λ 는 잡음변수 공간이다.

해석에 사용된 수지는 폴리프로필렌(Samsung general chemical, NB731-3 (18%TF))이다. 시뮬레이션을 위해 CAPA^[15]의 유동해석 모듈을 사용하였고, 유한요소로 총 16,980개의 쉘 요소를 생성하였다.

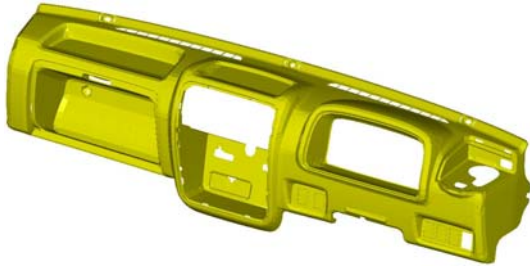


Fig. 1 An automotive dashboard model

3. 강건설계해의 자동 탐색

강건설계해의 자동 탐색을 위해 직교배열 실험과 설계영역축소알고리즘을 통합하여 목적함수의 값만으로 설계해를 탐색하는 직접탐색법을 사용한다. 이 최적화 방법은 직교배열 실험의 결과로 선택된 최선의 설계대안을 중심으로 현재의 설계영역을 축소하고 그 과정을 반복하여 최적해로 수렴시켜 가는 방법이다. 최적해 탐색과정을 설명하면 다음과 같다.

1. 설계변수와 잡음변수를 선정하고 각 변수의 범위와 수준값을 결정한다. 이때 설계변수의 범위는 최적해 탐색을 위한 초기 설계영역이 되며, 수준값은 서로 같은 간격을 갖도록 정한다.
2. 설계변수와 잡음변수 및 그 수준값을 내측 직교배열과 외측 직교배열에 각각 배치하여 전체 실험을 설계한다.
3. 내측 직교배열의 각 설계대안에 대해 외측 직교배열의 잡음변수의 변동조건별로 전산실험을 실시하여 사출압력을 시뮬레이션하고 사출압력 분포로부터 다음 식을 사용하여 SN비^[9,10]를 계산한다.

$$SN = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j^2 \right\} \quad (dB) \quad (2)$$

여기에서 n 은 잡음조건 총 수, y_j 는 j 번째 ($j=1, 2, \dots, n$) 잡음조건 사출압력이다.

4. 내측 직교배열 실험에서 가장 큰 SN비를 갖는 설계대안의 설계인자들의 수준값을 중심으로 현재의 설계영역을 지정된 비율 α ($0 < \alpha < 1$)로

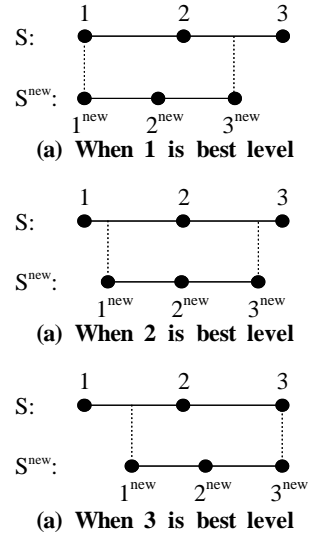


Fig. 2 A design-range reduction algorithm

축소하여 새로운 설계영역을 정의하고, 축소된 설계영역에 맞추어 수준값도 새로 조정한다. Fig. 2는 설계영역축소알고리즘을 도식화한 것이다.

5. 조정된 설계변수들의 수준값으로 새로운 직교배열 실험을 설계하고 단계 3으로 간다.
6. 만족할 정도의 큰 SN비를 갖는 강건설계해를 찾았거나 설계영역을 더 이상 축소할 필요가 없다고 판단될 때까지 단계 3에서 단계 5의 과정을 반복해서 수행한다. 종료조건이 후자인 경우에는 마지막 직교배열 실험에서 가장 큰 SN비를 갖는 설계대안을 최적의 강건설계해로 선택한다.

4. 직교배열 실험의 설계

대시보드 모델의 사출압력을 최소화하기 위해 게이트 위치와 공정변수를 설계변수로 고려하였다. 먼저 최적화 과정에서 게이트의 위치를 지정하기 위해 게이트 설계영역으로 선정된 모서리곡선 위에 일정한 간격($\Delta = 5$ mm)을 갖는 점의 집합을 생성하고 점군의 위치 좌표계를 정의하였다. 좌표계상의 한 점이 게이트 위치로 결정되면 그 점이 새로운 유한요소의 절점이 되도록 인접한 유한요소들을 분할한다. Fig. 3은 설계자가 선정하

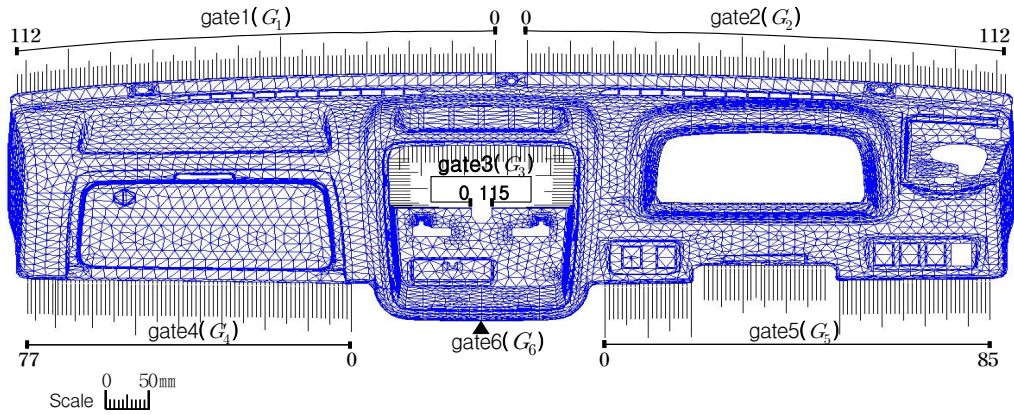


Fig. 3 Definition of gate locations

각 게이트의 설계영역과 정의된 위치 좌표계이다. 여섯번째 게이트(G_6)는 중앙 하단부 모서리의 가운데 위치에 고정시키고, 나머지 5개 게이트($G_1 \sim G_5$)만을 게이트 설계변수로 선택하였다. 또한 사출압력에 영향을 미치는 공정변수 중에서 수지온도와 금형온도는 온도가 높을수록 수지의 유동성이 좋아져 사출압력이 낮아지는 효과가 있으므로 여기에서는 다른 성형특성들을 고려하여 설계자가 지정하는 설계값으로 고정하고 사출시간(t_{fill})만을 설계변수로 선택하였다. 수지온도(T_{melt})와 금형온도(T_{mold})는 각각 210°C 와 40°C 이다.

Table 1은 설계변수와 그 수준값이다. 각 변수의 1, 3수준값은 설계영역의 하한과 상한에 각각 해당하며, 2수준값은 명목 설계값이다. 또한 강건 설계를 위한 잡음변수로 사출시간, 수지온도와 금형온도를 선택하였다. 이것은 내재적 요인으로 인해 이 변수들이 명목값으로부터 불가피하게 변동될 수 있기 때문이다^[16]. Table 2는 잡음변수와 그

Table 1 Design variables and their three levels

Design factor	t_{fill} (sec)	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
Level 1	5	30	30	42	15	21
Level 2	7	60	60	54	35	35
Level 3	9	90	90	66	55	49

Table 2 Noise variables and their two levels

Noise factor	Level 1	Level 2
t_{fill} (sec)	-0.2	+0.2
T_{melt} ($^{\circ}\text{C}$)	-8	+8
T_{mold} ($^{\circ}\text{C}$)	-5	+5

Table 3 Levels of compounded noise variable

N1		N2	
-0.2	t_{fill} (sec)	+0.2	
+8	T_{melt} ($^{\circ}\text{C}$)	-8	
+5	T_{mold} ($^{\circ}\text{C}$)	-5	

수준값이다. 여기서 수준값은 명목값으로부터 변동되는 크기이다. 한편 본 논문에서는 실험의 횟수를 대폭 줄이기 위해 1개의 2수준 복합잡음변수^[17]를 정의하여 사용한다. 한 잡음변수의 1, 2수준에 대해 각각 나머지 잡음변수들을 명목값에 고정시키고 실험을 실시하는 절차를 모든 잡음변수에 대해 동일하게 시행하여 사출압력이 작게 되는 수준조합을 복합잡음변수의 1수준으로 하고 사출압력이 크게 되는 수준조합을 2수준으로 한다(Table 3).

선정한 설계변수와 잡음변수 및 그 수준값을 교차 직교배열에 배치하여 전체 실험을 설계한다.

Table 4 Experimental results for 1st iteration

EXP #	Control factor array									Noise factor array		SN ratio
	t_{fill}	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	N1	N2				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	107.5	124.9	-42.33
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	86.9	95.4	-39.20
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	67.7	75.0	-37.08
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	92.2	101.8 ^s	(-∞)
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1	98.2	108.8	-40.31
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2	75.3 ^s	87.2 ^s	(-∞)
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3	86.0 ^s	101.4 ^s	(-∞)
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1	87.6	100.7 ^s	(-∞)
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2	104.5 ^s	121.7 ^s	(-∞)
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	92.9	101.3	-39.75
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	93.3	102.5	-39.83
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3	97.6	109.7	-40.33
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2	95.3	109.1	-40.21
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3	82.0	106.3 ^s	(-∞)
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1	98.9	109.2 ^s	(-∞)
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2	84.4	98.7 ^s	(-∞)
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3	107.2 ^s	121.2 ^s	(-∞)
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1	82.5 ^s	85.5 ^s	(-∞)

(* : Short shot)

여기에서는 설계변수의 내측배열로 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 을 사용하고, 잡음변수의 외측배열로 복합잡음변수의 1, 2수준을 사용한다(Table 4).

5. 최적해 탐색 및 결정

첫 번째 탐색실험(iteration)을 실시하여 내측배열의 각 설계대안 별로 복합잡음변수의 1, 2수준 값에서 각각 사출압력을 시뮬레이션하고 두 처리조합의 사출압력 분포로부터 SN비를 계산하였다. Table 4는 사출압력 분포와 SN비 계산결과이다. 전체 36개의 처리조합 중에서 미충전이 발생한 15개 처리조합의 경우에는 추정된 사출압력이 실험 데이터로서 의미가 없으므로 SN비를 음의 무한대(-∞)로 표기하였다. 18개 설계대안 중에서 3번째 설계대안(3번 실험)이 SN비가 가장 큰 (-37.08 dB) 강건설계해로 나타났으며 사출압력의 분포는 67.7 MPa과 75 MPa이었다. 이 설계대안의 설계변수의 수준(수준값)은 $t_{fill}=1(5\text{sec})$, $G_1=3(90)$, $G_2=3(90)$, $G_3=3(66)$, $G_4=3(55)$, $G_5=3(49)$ 이었다. 3번째 설계대안의 수준조합을 중심으로 설계영역 축소알고리즘을 적용하여 설계변수들의 탐색범위와 수준을 축소, 조정한 후 두 번째 탐색실험을 실시하였다(Table 5). 설계영역 축소율(α)을 0.5로 하였

Table 5 Experimental results for 2nd iteration

EXP #	Control factor array									Noise factor array		SN ratio
	t_{fill}	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	N1	N2				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	85.5	94.0	-39.07
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	103.4	116.7	-40.85
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	67.7	75.0	-37.08
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	84.3	89.2	-38.77
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1	94.1	108.4	-40.13
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2	101.6	113.4 ^s	(-∞)
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3	105.0 ^s	118.8 ^s	(-∞)
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1	82.0	93.5	-38.88
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2	95.2	107.9	-40.15
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	85.4	117.8 ^s	(-∞)
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	82.2	93.7	-38.90
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3	93.2	107.4	-40.05
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2	86.1	93.2	-39.06
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3	78.5	93.6	-38.73
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1	107.2	120.8	-41.16
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2	78.8	92.3 ^s	(-∞)
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3	110.8 ^s	122.7 ^s	(-∞)
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1	70.2 ^s	81.2 ^s	(-∞)

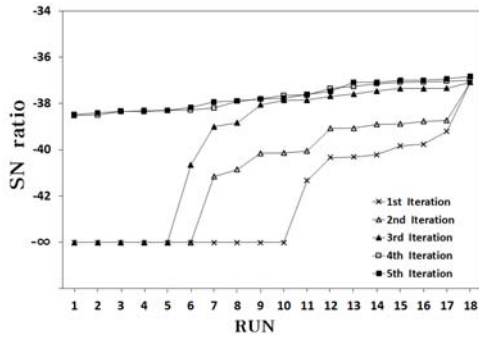
(* : Short shot)

Table 6 Experimental results for 5th iteration

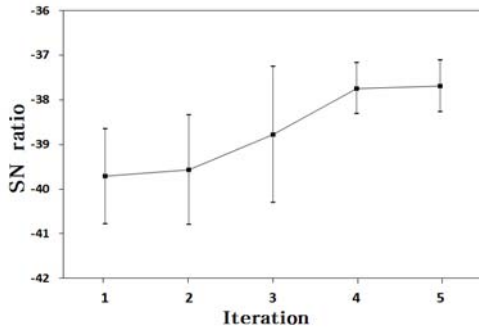
EXP #	Control factor array									Noise factor array		SN ratio
	t_{fill}	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	N1	N2				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	75.4	89.3	-38.34
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	67.8	83.2	-37.60
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	66.7	75.9	-37.08
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	66.5	82.3	-37.48
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1	65.6	75.6	-37.00
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2	77.0	87.7	-38.33
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3	77.0	89.0	-38.40
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1	70.3	85.5	-37.88
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2	65.5	74.6	-36.93
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	63.8	74.4	-36.82
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	77.4	89.9	-38.47
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3	70.3	83.8	-37.77
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2	67.1	74.2	-37.00
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3	76.6	87.3	-38.29
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1	69.1	85.4	-37.80
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2	71.1	85.9	-37.93
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3	76.3	66.2	-37.08
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1	76.0	85.8	-38.17

(* : Short shot)

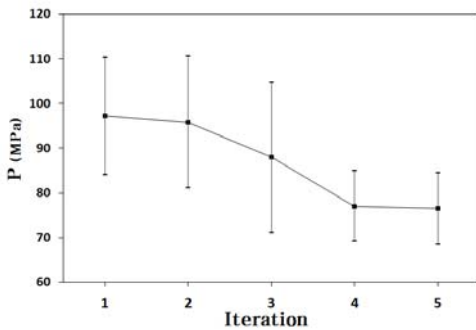
다. 두 번째 탐색실험에서도 3번째 설계대안이 SN비가 가장 큰 강건설계해로 나타났다. 대시보드모델에 대해 이와 같은 최적화 탐색실험을 총 5번 실시하였다. 5번의 연속 탐색실험에 의해 설계영역이 충분히 수렴되었다고 판단하여 탐색을 종료하였다. Table 6은 마지막 탐색실험의 계산결과이다. 여기에서 10번째 설계대안이 강건설계해로서 SN비가 -36.82 dB이고, 사출압력의 평균은 69.12 MPa, 표준편차는 7.47 MPa이었다. 이 설계



(a) SN ratios vs. experiments



(b) Average SN ratios and variations vs. iterations



(c) Average injection pressure and variations vs. iterations

Fig. 4 Optimization of the injection pressure

해의 설계변수 수준(수준값)은 $t_{fill}=1(5.12\text{sec})$, $G_1=1(84)$, $G_2=3(88)$, $G_3=3(66)$, $G_4=2(53)$, $G_5=2(46)$ 이었다.

Table 7 Optimization results vs. iterations

Iteration	SN ratio		P (MPa)	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
1	-39.71	1.066	97.22	13.14
2	-39.57	1.226	95.85	14.81
3	-38.78	1.521	87.96	16.81
4	-37.74	0.565	77.03	7.88
5	-37.68	0.583	76.53	8.02

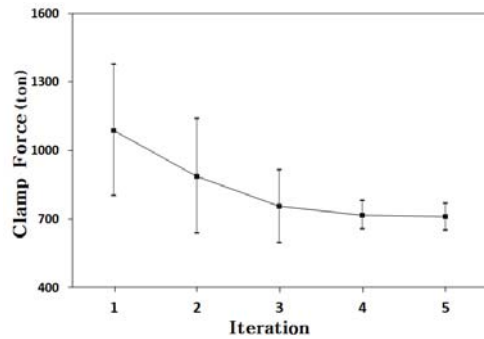


Fig. 5 Average die clamping force and variations vs. iterations

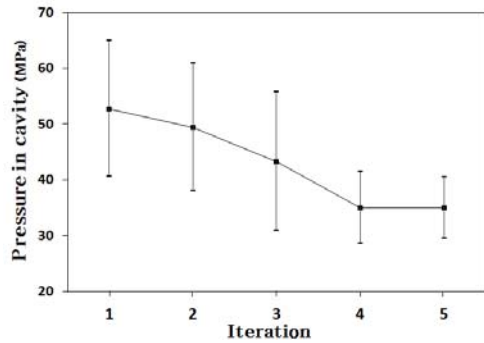


Fig. 6 Average pressure in part cavity and variations vs. iterations

Fig. 4에 전체 탐색실험에서 최적화 특성값이 변화하는 양상을 보였다. Fig. 4(a)는 탐색실험 별로 18개의 설계대안에서 측정된 사출압력의 SN비 분포를 오름차순으로 도시한 것이다. Fig. 4(b)는 SN비의 평균과 평균에서부터 SN비의 변동폭($=2 \times$ 표준편차)을 보인 것으로, 탐색실험이 진행되면서

사출압력의 SN비가 커지는 방향으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 사출압력의 SN비가 커진다는 것은 사출압력의 평균과 표준편차가 감소하는 방향으로 개선된다는 것을 의미한다. 이것을 Fig. 4(c)에 보인 사출압력의 평균과 변동폭(=2×표준편차)이 변화하는 결과로부터 확인할 수 있다. Table 7은 탐색실험 별로 계산된 사출압력과 SN비의 평균과 표준편차이다.

한편 탐색실험에 의해 사출압력의 평균과 표준편차가 감소하여 개선되어 감에 따라서 형체결력과 제품 캐비티의 압력분포도 동시에 개선되어 가는 것을 알 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6에 형체결력과 제품 캐비티 압력분포의 평균과 변동폭(=2×표준편차)의 변화를 각각 보였다. 형체결력과 제품 캐비티 압력분포의 평균과 표준편차가 대체적으로 감소되면서 개선되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 탐색실험 별로 강건설계해(SN비가 가장 큰 설계해)의 SN비를 보인 것으로 전체적으로 탐색실험에 의해 설계해의 강건성이 개선되는 것

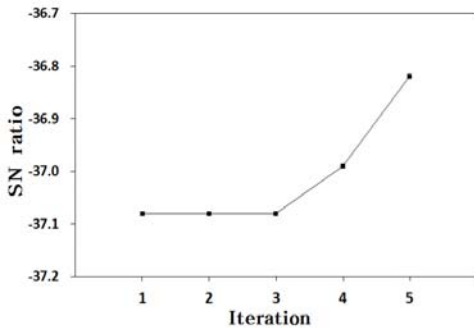


Fig. 7 SN ratios of the robust design solutions

Table 8 Robust design solutions vs. iterations

Iteration	SN ratio	P (MPa)	
		Avg.	S.D.
1	-37.08	71.34	5.17
2	-37.08	71.34	5.17
3	-37.08	71.34	5.17
4	-37.00	70.58	7.03
5	-36.82	69.12	7.47

을 알 수 있다. Table 8은 탐색실험 별로 얻은 강건설계해의 SN비와 사출압력의 평균과 표준편차를 보인 것이다. 마지막 탐색실험의 강건설계해의 SN비가 최대(-36.82 dB)이므로 최적화 알고리즘에 의해 이 설계대안을 최적의 강건설계해로 선택하였다.

선택된 최적 강건설계해를 초기설계해와 비교하였다(Table 9). 여기에서 초기설계해는 Table 1에 보인 설계자가 지정한 설계 명목값(2수준값)으로 조합되는 설계대안이다. Table 9(a)는 설계변수값을 비교한 것이다. Fig. 8은 게이트 위치에 따른 두 설계해의 러너지시스템이다. Table 9(b)는 SN비와 사출압력 분포를 비교한 것이다. 강건성 비교의 신뢰도를 높이기 위해 2수준 3개 잡음변수의 완전 요인(full factorial)에 의한 총 8가지의 잡음조건에

Table 9 Comparison of the initial design and the optimal robust design

Design	t_{fill} (sec)	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
Initial	7	60	60	54	35	35
Optimal robust	5.12	84	88	66	53	46

(a) Design variables

Design	SN ratio	P (MPa)	
		Avg.	S.D.
Initial	-37.33	104.3	8.81
Optimal robust	-33.23	64.9	2.87

(b) SN ratio and injection pressure

Design	F_{clamp} (ton)		P_{cavity} (MPa)	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Initial	1,939	257.6	55.1	19.47
Optimal robust	1,106	58.0	27.8	11.16

(c) Die clamping force and pressure distribution in part cavity

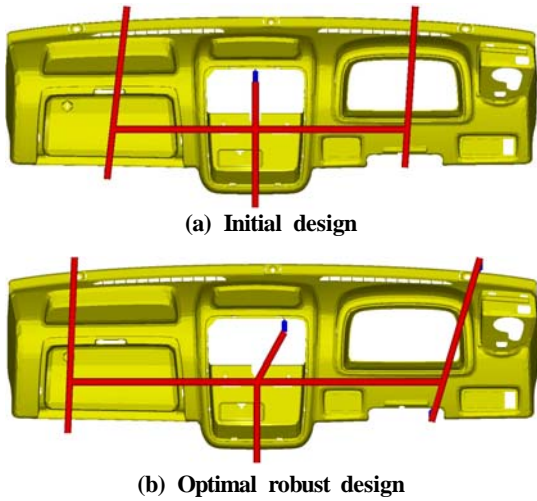


Fig. 8 Comparison of runner systems

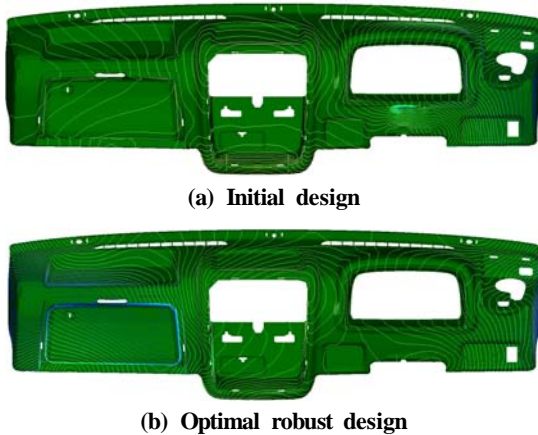


Fig. 9 Comparison of pressure distributions

서 실험을 실시하여 강건성을 측정하였다. 최적 강건설계해는 초기설계해에 비해 SN비가 4.1 (=37.33-(-33.23)) dB 만큼 증가되어 강건성이 크게 개선된 것을 알 수 있었다. 사출압력의 크기는 평균이 39.4 (=104.3-64.9) MPa 만큼 감소하여 약 38%의 높은 개선율을 보였고, 동시에 표준편차도 5.94 (=8.81-2.87) MPa 만큼의 큰 개선폭을 보였다. Table 9(c)에서 보듯이 사출압력의 개선에 따라 형체결력과 제품 캐비티의 압력분포도 개선되었다. 형체결력의 경우에 최적 강건설계해는 평균이

833 (=1,939-1,106) ton 만큼 크게 감소하였고 표준 편차 또한 199.6 (=257.6-58.0) ton 만큼 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 동시에 제품 캐비티의 압력분포도 평균이 27.3 (=55.1-27.8) MPa 만큼 감소하였다. 특히 표준편차가 8.31 (=19.47-11.16) MPa 만큼 큰 폭으로 감소하여 약 43%의 개선율을 보임으로써 충전 후 제품 캐비티의 압력분포가 크게 균일해짐을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 압력분포의 균일성을 등고선 표시를 통해 비교한 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 H형 러너시스템을 갖는 자동차 대시보드 모델에 대해 다수 개 게이트의 위치와 사출시간을 최적화하여 설계목표인 사출압력을 최소화하였다. 사출성형 공정의 변동 특성을 고려하여 강건설계를 구현하였으며 이를 위해 잡음변수에 의한 공정의 변동을 모사하여 적용하였으며 강건성 평가 도구로 신호 대 잡음비(SN 비)를 사용하였다. 최적화 방법으로 직교배열과 강건 설계대안을 중심으로 설계영역을 축소해 가는 설계영역 축소알고리즘을 통합 사용하여 최적해를 자동 탐색할 수 있었다. 최적해는 초기설계해와 비교해서 사출압력의 평균치와 편차가 모두 크게 감소하여 강건성이 크게 개선되는 것을 알 수 있었다. 또한 사출압력의 강건성이 개선됨에 따라 형체결력과 제품 캐비티 내의 압력분포의 강건성도 크게 개선됨을 확인하였다. 특히 제품 캐비티 내의 압력분포가 크게 균일해지는 설계효과에 의해 이후 제품의 휨 발생 가능성을 그 만큼 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Beaumont, J.P. et al., Successful Injection Molding, Hanser, pp.56-72, 2002.
2. Shoemaker, J., Moldflow Design Guide, Hanser, pp.17-31, 2006.
3. Ni, S., "Reducing shrinkage and warpage for printer parts by injection molding simulation

- analysis," Journal of Injection Molding Technology, Vol.6, No.3, pp.177-186, 2002.
4. Shen, C.Y., Yu, X.R., Li, Q., and Li, H.M., "Gate Location Optimization in Injection Molding By Using Modified Hill-Climbing Algorithm," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol.43, No.3, pp.649-659, 2004.
 5. Erzurumlu, T. and Ozcelik, B., "Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method," Materials and Design, Vol.27, pp.853-861, 2006.
 6. Deng, Y. M. et al., "Injection Molding Optimization for Minimizing the Defects of Weld Lines," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol.47, pp.943-952, 2008.
 7. Altan, M., "Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods," Materials and Design, Vol.31, pp.599-604, 2010.
 8. Akbarzadeh, A. and Sadeghi, M., "Optimization of shrinkage in plastic injection molding process using statistical methods and SA algorithm," Applied Mechanics and Materials, Vols. 110-116, pp.4227-4233, 2012.
 9. Phadke, M.S., Quality Engineering using Robust Design, AT&T Bell Laboratories, pp.1-182, 1992.
 10. Schmidt, S.R. and Launsby, R.G., Understanding Industrial Designed Experiments, Air Academy Press, pp.6-1-6-28, 1997.
 11. Roy, R.K., Design of Experiments Using the Taguchi Approach, John Wiley&Sons Inc., New York, pp.336-363, 2001.
 12. Kota, S. and Chiou, S.J., "Use of orthogonal arrays in mechanical synthesis," Mechanism and Machine Theory, Vol.28, No.6, pp.777-794, 1993.
 13. Gold, S. and Krishnamurty, S., "Trade-offs in Robust Engineering Design," Proceedings of ASME-DETC'97, Sacramento, CA, pp.1-8, 1997.
 14. Park, J.C. et al., "Minimization of Warpage in Injection-molded parts By Optimal Design of U-type Ribs," Journal of the KSMPE, Vol.7, No.1, pp.53-61, 2008.
 15. VM-Tech, Computer Aided Plastics Application-CAPA Tutorial, 2008.
 16. Lee, B.H. and Kim, B.H., "Optimization of part wall thickness to reduce warpage of injection-molded parts based on the modified complex method," Polym.-Plast. Technol. Eng., Vol.34, No.5, pp.793-811, 1995.
 17. Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley, pp.230-231, 1995.