

두 특성의 가치함수를 이용한 사출성형의 최적 설계

박종천*, 김경모**,#

*금오공과대학교 기계공학과, **금오공과대학교 산업공학부

Optimization of Injection Molding Design Using Two-Characteristic Value Function Methodology

Jong-Cheon Park* and Kyung-Mo Kim**,#

*Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, **School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received 4 December 2014; received in revised form 20 January 2015; accepted 6 February 2015)

ABSTRACT

Optimizing multiple design characteristics which are usually in conflict with each other in the injection molding process is frequently becoming a critical problem for designers who work in this area. The purpose of this work is to develop an automated design methodology for optimizing two such design characteristics found in injection-molded parts. A value function based on decision-making theory is used as a means of evaluating the performance of a two-characteristic design alternative. Also, a design space reduction algorithm based on Taguchi's orthogonal arrays is utilized to discover an optimal design alternative. Verification of the developed design methodology is carried out for an actual model with two design characteristics, the weld line and the gate location, to be optimized in computer simulation experiments.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Value Function(가치함수), Design Space Reduction Algorithm(설계공간 축소 알고리즘), Orthogonal Array(직교배열)

1. 서 론

사출 성형품의 질은 제품, 수지, 금형 및 성형조건으로 정의되는 다차원적 설계공간에 의해 결정된다. 이 설계공간의 설계변수들은 설계특성들에 대해 비선형성이 강하고 변수 상호간의 관계가 복잡해서 최고의 품질을 얻을 수 있는 설계조건을 예측하기가 매우 힘들다. 특히 사출품 내에 발생 양상이 서로 충돌하는 다수의 설계특성들이 동시에 존재하는 경우에는 최적의 설계조건을 결정하기가 더

욱 어려워진다. 이때 상충하는 설계특성들을 최적화하기 위해서는 설계자의 선호도(preference)에 따라서 설계특성들에 대한 절충(tradeoffs)이 요구된다. 이러한 관점에 따라 최근까지 성형불량을 포함한 다양한 설계특성들을 최적화하기 위한 연구가 진행되어 왔다^[1-10].

이 연구에서는 제품, 금형, 공정조건의 설계공간을 고려하여 사출품 내의 상충하는 두 설계특성을 최적화하기 위한 설계방법을 제시한다. 이를 위해 의사결정(decision-making) 이론과 최적해 탐색법을 통합하고 사출성형의 시뮬레이션 모델과 연계한다. 이 연구에서는 가치함수(value function) 이론^[11,12]을 이용하여 설계자의 선호구조(preference structure)에

Corresponding Author : kmkim@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7653, Fax: +82-54-478-7679

따라서 개별 설계특성에 대한 선호도를 가치(value)로 평가하고 두 설계특성에 대한 가치를 상위 평가 기준으로 통합하여 단일 특성의 설계문제로 변환한다. 최적의 설계대안을 탐색하기 위해서 Taguchi의 직교배열(orthogonal array)^[13,14]을 기반으로 하는 설계공간축소 알고리즘(Design Space Reduction Algorithm)^[15,16]을 개발하여 사용한다.

제시한 설계방법을 커패시터 캔(capacitor can) 모델에 적용하여 웰드라인(weld line)과 게이트(gate) 위치를 최적화하였다. 그 결과 비교적 적은 횟수의 실험으로 두 설계특성을 동시에 최소화하는 최적의 설계대안을 체계적으로 찾을 수 있음을 확인하였다.

2. 두 특성의 가치함수

공학설계는 설계자가 설계변수의 선택에서부터 구체적인 변수값을 결정하는 일종의 의사결정과정이다. 의사결정 이론에서 어떤 설계대안을 선택할 때 그 대안에 대한 평가 결과가 확정적인 경우를 확실성하의 의사결정 문제라고 한다. 한편 확실성하의 의사결정 문제에서는 설계대안에 대한 선호도가 가치함수로 평가된다. 가치함수는 중간가치분할법을 통해 결정할 수 있으며, 그 구체적인 과정은 참고문헌 [Keeney and Raiffa^[11]]에 설명되어 있다.

한편 이 연구에서와 같이 컴퓨터 시뮬레이션에 기초한 사출성형 설계 문제도 입력한 설계변수들의 값에 따라 설계특성 값들이 정확하게 계산되어 결정되므로 확실성하의 의사결정 문제에 해당된다. 따라서 시뮬레이션 결과를 사용하여 설계 최적해를 탐색하는 과정에서 가치함수를 사용하여 설계대안을 평가하는 것이 타당할 것이다.

아래에서는 사출성형 설계에서 두 설계특성을 통합해서 단일 특성으로 평가하기 위한 두 특성의 가치함수의 결정과정을 설명한다. 주어진 설계대안들에 대해 설계자의 선호순서가 존재한다면 선호도를 평가하는 가치함수가 존재하고, 가치의 크기에 따라 설계대안의 선호순서가 결정된다. 일반적으로 가치함수는 가장 선호되는 결과에 대해서 1의 가치를 갖고, 가장 선호하지 않는 결과에 대해서는 0의

가치를 갖도록 결정한다. 일반적으로 대부분의 공학적 설계특성들은 상호선호독립(mutual preferential independence) 관계를 만족한다. 설계특성 y_1 에 대한 설계대안들의 선호순서가 설계특성 y_2 의 값에 영향을 받지 않을 때, y_1 은 y_2 에 대해서 선호독립이라고 한다. 이때 y_2 도 y_1 에 대해서 선호독립이 되면, y_1 과 y_2 는 상호선호독립이라고 한다. 만약 설계특성 y_1 과 y_2 가 상호선호독립이면, 가치함수는 아래 식 (1)과 같이 주어진다.

$$V(y_1, y_2) = w_1 V_1(y_1) + w_2 V_2(y_2) \quad (1)$$

여기서, $V(y_1, y_2)$: y_1 과 y_2 에 대한 통합 가치함수

$V_1(y_1)$: y_1 에 대한 단일 가치함수

$V_2(y_2)$: y_2 에 대한 단일 가치함수

w_1, w_2 : 척도구성계수

여기에서 상수인 w_1 과 w_2 는 설계특성 y_1 과 y_2 의 상대적 중요도를 나타내는 수치는 아니다. 이에 관해서는 참고문헌 [Keeney and Raiffa^[11]]에 자세히 설명되어 있다.

두 특성에 대한 통합 가치함수를 결정하기 위해서는 우선 단일특성에 대한 가치함수가 정의되어야 한다. 여기에서는 뒤에서 적용할 사출성형 최적화 과정의 두 설계특성들이 망소특성임을 고려하여 편의상 y_1 과 y_2 를 망소특성으로 가정한다. 망소특성의 단일 가치함수 $V_1(y_1)$ 와 $V_2(y_2)$ 는 아래 식 (2)와 식 (3)과 같이 제시될 수 있다.

$$V_1(y_1) = \left(\frac{y_1^0 - y_1}{y_1^0 - y_1^*} \right)^{r_1} \quad (2)$$

$$V_2(y_2) = \left(\frac{y_2^0 - y_2}{y_2^0 - y_2^*} \right)^{r_2} \quad (3)$$

여기에서 y_1^* 은 y_1 의 가장 선호하는 결과이고, y_1^0 은 y_1 의 가장 선호하지 않는 결과이다. 식 (2)에서 r_1 은 의사결정자로서 설계자의 위험(risk) 성향을 나타내는 지표이며, $0 < r_1 < 1$ 이면 위험추구성, $r_1 = 1$ 이면 위험중립성, $r_1 > 1$ 이면 위험회피성을 나타낸다.

식 (3)의 y_2 에 대해서도 y_1 과 동일하게 설명할 수 있다. y_1 에 대한 상수 r_1 은 설계자가 구간 (y_1^*, y_1^0) 에 대해서 답변한 중간가치를 갖는 점을 y_1^{mid} 라고 하면 식 (2)에서 $V_1(y_1^{mid})=0.5$ 의 관계식으로부터 결정된다. 상수 r_2 도 동일한 방법으로 구할 수 있다.

척도구성계수 w_1 과 w_2 는 다음과 같이 결정된다. 두 설계특성(y_1, y_2)이 모두 가장 바람직한 결과(y_1^*, y_2^*)를 갖는 경우에 통합 가치함수의 값이 1이 되므로 식 (1)에서 다음 관계식을 얻는다.

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (4)$$

또한 설계자가 설계대안 (y_1^0, y_2^0) 에서 (y_1^*, y_2^0) 로 변경하는 것을 (y_1^0, y_2^0) 에서 (y_1^0, y_2^*) 로 변경하는 것보다 선호한다면, (y_1^0, y_2^*) 와 (y_1', y_2^0) 에 대한 선호도가 같아지는 y_1' 를 설계자에게 질문하고, 질문의 답변으로부터 다음 식 (5)의 관계를 얻을 수 있다. 설계자의 선호관계 답변이 이와 반대인 경우에도 유사한 방식으로 전개할 수 있다.

$$w_1 V_1(y_1^0) + w_2 V_2(y_2^*) = w_1 V_1(y_1') + w_2 V_2(y_2^0) \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 (5)로부터 w_1 과 w_2 는 다음과 같이 결정된다.

$$w_1 = \frac{1}{1 + V_1(y_1')} \quad (6)$$

$$w_2 = 1 - w_1 \quad (7)$$

3. 최적화 알고리즘

두 설계특성에 대한 통합 가치함수 $V(y_1, y_2)$ 가 결정되면 최적설계 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{maximize } f(\mathbf{X}) = V(y_1, y_2) \quad (8) \\ &\text{subject to } x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

여기서 \mathbf{X} 는 설계변수벡터이고, n 은 설계변수의 수, x_i 는 설계변수, x_i^L 와 x_i^U 는 각각 탐색될 설계공간의 하한(lower limit, LL)과 상한(upper limit, UL)이다.

이 연구에서는 최적의 설계대안을 탐색하기 위해 Taguchi의 직교배열 실험과 승자선택법(pick the winner method)^[17]을 기반으로 하는 설계공간축소 알고리즘을 개발하여 사용한다. 직교배열에 의한 탐색은 구현이 용이하고 요구되는 실험의 횟수가 비교적 적어서 실용적인 장점이 있으나, 기본적으로 실험을 실시한 설계변수의 수준 조건에서만 탐색이 가능하므로 최적해를 탐색하는데 한계가 있다. 그러나 본 알고리즘에서는 직교배열 실험을 반복하면서 최선의 설계대안의 설계변수 수준을 중심으로 설계공간을 축소시켜감으로써 최적해에 근사한 설계대안을 자동으로 탐색할 수 있다. 이 알고리즘의 적용 절차는 다음과 같다.

[단계 1] 직교배열을 선정한다. 직교배열에 배치할 설계변수와 설계변수의 수준들을 결정한다. 설계공간은 설계변수의 하한 수준과 상한 수준에 의해 결정되어진다. 본 연구에서는 설계변수를 3수준으로 하고 수준의 간격을 같게 하였다.

[단계 2] 직교배열에 설계변수와 수준을 배치하고 전체 설계대안들에 대해 실험을 실시한다.

[단계 3] 각 설계대안에 대해 두 설계특성의 값을 얻고 통합 가치함수의 값을 계산한다.

[단계 4] 축소된 새로운 설계공간을 결정한다. 새 설계공간은 실험이 실시된 전체 설계대안들 중에서 통합 가치함수의 값이 가장 큰 설계대안의 설계변수들의 수준을 기준으로 현재 설계공간의 범위를 일정한 비율만큼 축소하여 얻는다. 설계변수들의 수준도 축소된 범위에 맞추어 변경한다. Table 1은 이 연구에서 적용한 축소율 0.5로 가정한 경우의 설계공간축소 알고리즘이다.

[단계 5] 탐색종료 조건이 만족될 때까지 단계 2에서 단계 4까지 반복한다. 이 연구에서는 통합 가치함수의 값이 충분히 크거나 전체 설계공간의 추가적인 축소가 무의미하다고 판단될 때 최적화 탐색이 종료된다. 후자인 경우에는 마지막 직교배열 실험에서 통합 가치함수의 값이 가장 큰 설계대안을 최적해로 선택한다.

Table 1 Design Space Reduction Algorithm

<p>If best level is 1; if level 1 is lower limit(LL) $1^{new} = LL$ $3^{new} = 2^{old}$ $2^{new} = (1^{new} + 3^{new}) / 2$ otherwise $1^{new} = 1^{old} - (2^{old} - 1^{old}) / 2$ $2^{new} = 1^{old}$ $3^{new} = 1^{old} + (2^{old} - 1^{old}) / 2$</p> <p>If best level is 2; $1^{new} = 2^{old} - (2^{old} - 1^{old}) / 2$ $2^{new} = 2^{old}$ $3^{new} = 2^{old} + (3^{old} - 2^{old}) / 2$</p> <p>If best level is 3; if level 3 is upper limit(UL) $3^{new} = UL$ $1^{new} = 2^{old}$ $2^{new} = (1^{new} + 3^{new}) / 2$ otherwise $1^{new} = 3^{old} - (3^{old} - 2^{old}) / 2$ $2^{new} = 3^{old}$ $3^{new} = 3^{old} + (3^{old} - 2^{old}) / 2$</p>
--

4. 적용 예 :

웰드라인과 게이트 위치의 최적화

이 연구에서는 Yao^[1]가 사용한 커패시터 캔(Fig. 1) 모델에 대해 두 설계특성의 가치함수를 사용하여 웰드라인과 게이트 위치를 최적화하였다. 이 모델의 벽(wall)은 세 면, 즉 전면, 후면, 옆면으로 구성되어 있다. 모델의 치수는 폭, 길이, 높이가 각각 38mm, 33mm, 11mm이다. 사출성형 해석을 위해 Moldflow^[18]를 사용하였으며, 수지는 PP/HUNTSMAN/ P4-011이다. 원래 이 모델의 게이트 위치(X; 금형의 분할면에서 게이트까지 거리)는 3.5mm였고 게이트 반대편에 웰드라인이 길게 나타났다(L=15.5mm).

Yao는 웰드라인을 단일 설계특성으로 하고 X를 최적화하여 X=11.5mm에서 웰드라인을 제거할 수 있었다(L=0 mm). 그러나 금형설계 측면에서 보면 게이트가 금형 분할면에 놓여 있지 않는 경우(X> 0 인 경우)에는 서브머린(submarine) 게이트로

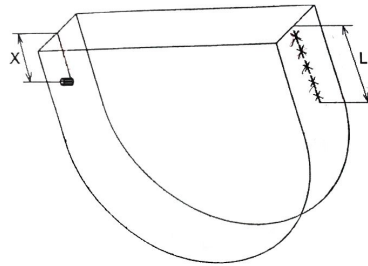


Fig. 1 3-D view of the capacitor can

변경되어야 하며 이때는 별도의 금형 가공이 요구된다. 또한 X가 클수록 분할면에 놓인 러너로부터 제품면까지 서브머린 게이트의 길이가 길어져서 제품 취출 후 폐기로 인한 수지의 손실이 커질 뿐만 아니라, 제품의 중심부위 쪽으로 게이트 자국을 남기게 되는 미관상의 문제가 발생하게 된다. 이러한 관점에 따라서 이 연구에서는 웰드라인과 함께 게이트의 위치를 최적화되어야 할 설계특성으로 고려한다. 게이트 위치를 설계특성으로 선택하는 것은 서브머린 게이트 사용으로 인한 복잡한 특성들을 게이트 위치가 대변한다고 보기 때문이다.

이 모델의 두 설계특성, 즉 웰드라인 길이(L)와 게이트 위치(X)에 대한 가치함수를 설계자의 답변을 기초로 해서 다음과 같이 결정하였다. L과 X의 단위는 mm이며, 편의상 이하 설명에서 생략한다. L의 범위는 ($L^* = 0, L^0 = 20$)이며 X의 범위는 ($X^* = 0, X^0 = 14$)이다. L은 (0, 20)에서 중간가치점이 $L^{mid} = 7$ 이고, X는 (0, 14)에서 중간가치점이 $X^{mid} = 5$ 이다. 따라서 이로부터 결정된 L과 X에 대한 단일 가치함수는 각각 다음 식과 같다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 L과 X의 가치함수의 그래프이다.

$$V(L) = \left(\frac{20-L}{20-0} \right)^{2.4094} \quad (9)$$

$$V(X) = \left(\frac{14-X}{14-0} \right)^{1.5688} \quad (10)$$

또한 설계자는 가장 선호하지 않는 결과인 (L=20, X=14)에서 X는 그대로 유지하면서 L만 가장 선호하는 결과로 바꾼 (L=0, X=14)로 변경

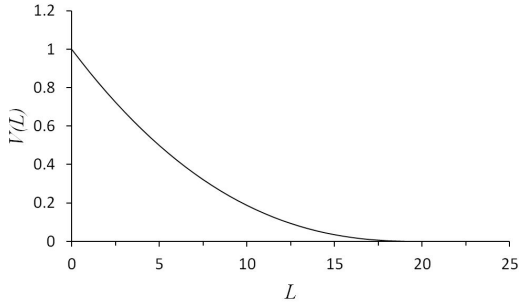


Fig. 2 Graph of $V(L)$

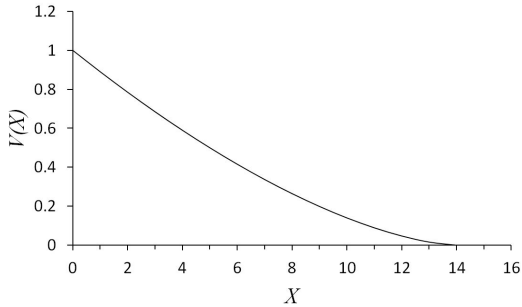


Fig. 3 Graph of $V(X)$

하는 것을 ($L=20, X=14$)에서 L 은 그대로 유지하면서 X 만 가장 선호하는 결과로 바꾼 ($L=20, X=0$)로 변경하는 것 보다 더 선호하고, ($L=20, X=0$)과 ($L=7, X=14$)의 선호도가 같아지는 가치 점이 $L=7$ 이라고 하여, 식 (6)과 식 (7)로부터 척도구성계수 $w_1 = 0.7385$, $w_2 = 0.2615$ 를 얻었다. 따라서 이 모델의 두 설계특성에 대한 통합 가치함수는 식 (11)과 같으며, Fig. 4의 그래프를 갖는다.

$$V(L, X) = 0.7385 \left(\frac{20-L}{20} \right)^{2.4094} + 0.2615 \left(\frac{14-X}{14} \right)^{1.5688} \quad (11)$$

최적해 탐색을 위한 설계공간의 설계변수와 3수준은 Table 2와 같다. 게이트 위치(X)에 따라 웰드라인의 길이가 영향을 받으므로 X 는 설계특성인 동시에 설계변수로 고려된다. $th_{front/back}$ 은 모델의

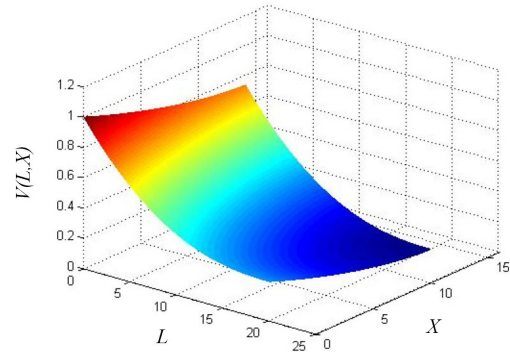


Fig. 4 Graph of $V(L, X)$

Table 2 Design variables and their three levels

Variable	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
X	mm	0	7	14
$th_{front/back}$	mm	1	1.5	2
th_{side}	mm	1	1.5	2
t_{fill}	sec	0.5	1	1.5
T_{melt}	℃	190	210	230
T_{mold}	℃	20	40	60

전면과 후면의 벽두께이고 th_{side} 는 옆면의 벽두께이다. 이 연구에서는 창의적 문제해결 이론인 TRIZ의 문제해결 원리 중에서 문제 대상의 구조를 균일체에서 비균일체로 변경하는 원리(3. Local quality)^[19]를 원용하여 전후면과 옆면에 대해 상이한 두께 분포를 고려하였다. 이것은 허용 가능한 범위 안에서 제품의 두께 변화를 통해 수지의 다양한 유동 경로를 유도하기 위함이다. 또한 t_{fill} 은 충전시간, T_{melt} 와 T_{mold} 는 각각 수지와 금형의 온도이다. 최적해 탐색을 위해 직교배열로 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 을 선택하고 설계변수와 수준을 배치하였다. Table 3은 첫 번째 탐색실험의 결과이다. 13번 설계대안에서 통합 가치함수의 값이 가장 크게 나타났고 ($V=0.826$), 게이트 위치(X)가 7mm이고 웰드라인은 형성되지 않았다. 이후 설계공간축소 알고리즘에 따라 총 4번의 탐색실험을 진행하였다. 전체 탐색실험에 따라 축소되는 설계공간을 Table 4에 보

Table 3 Experimental results for 1st iteration

#	X	th _{fb}	th _s	t _{fill}	T _{melt}	T _{mold}	L	X	V(L, X)		
1	1	1	1	1	1	1	16.68	0.0	0.271		
2	1	1	2	2	2	2	15.40	0.0	0.282		
3	1	1	3	3	3	3	14.47	0.0	0.294		
4	1	2	1	1	2	2	3	4.98	7.0	0.458	
5	1	2	2	2	3	3	1	3.32	7.0	0.565	
6	1	2	3	3	1	1	2	11.69	7.0	0.177	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.0	14.0	0.738
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.0	14.0	0.738
9	1	3	3	1	3	2	1	2	20.0	14.0	0.0
10	2	1	1	3	3	2	2	1	4.58	0.0	0.656
11	2	1	2	1	1	3	3	2	20.0	0.0	0.261
12	2	1	3	2	2	1	1	3	20.0	0.0	0.261
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.0	7.0	0.826
14	2	2	2	3	1	2	1	3	0.66	7.0	0.769
15	2	2	3	1	2	3	2	1	20.0	7.0	0.088
16	2	3	1	3	2	3	1	2	1.61	14.0	0.603
17	2	3	2	1	3	1	2	3	4.98	14.0	0.370
18	2	3	3	2	1	2	3	1	8.61	14.0	0.190

Table 4 Design range at each iteration

Iteration	1 st	2 nd	3 rd	4 th
X	(0, 14)	(3.5, 10.5)	(1.75, 5.25)	(0.87, 2.62)
th _{fb}	(1, 2)	(1, 1.5)	(1, 1.25)	(1, 1.12)
th _{side}	(1, 2)	(1.25, 1.75)	(1.12, 1.37)	(1.31, 1.43)
t _{fill}	(0.5, 1.5)	(1, 1.5)	(0.87, 1.12)	(1.06, 1.18)
T _{melt}	(190, 230)	(190, 210)	(190, 200)	(192, 197)
T _{mold}	(20, 60)	(40, 60)	(35, 45)	(37.5, 42.5)

였다. 4번째 탐색실험의 설계공간을 보면 설계변수들의 범위가 상당히 수렴되어 더 이상의 공간 축소가 기술적으로 의미가 없는 것으로 판단하였다. Table 5는 마지막 탐색실험의 결과이다.

Fig. 5에 각 탐색실험에서 얻은 최적의 설계대안(가치함수 값이 가장 큰 설계대안)의 변화를 그래프로 표시하였다. 여기에서 탐색실험의 진행에 따라 최적 설계대안의 가치함수 값이 개선되면서 수렴해가는 것을 알 수 있다. 마지막 탐색실험(Table 4)에서 얻은 최적 설계대안(10번 설계대안)은 가치함수의 값이 0.974이며, 게이트가 분할면에서 0.87mm 만큼 떨어진 위치일 때 웰드라인이 제거되는 결과를 보였다. Table 6은 초기 설계대안과 최적 설계대안의 설계변수값이다. 여기서 초기 설계대안은 Table 2에 보인 설계자가 지정한 설계변수들의 명목 설계값, 즉 2수준값으로 조합한 설계조건이다.

Table 5 Experimental results for 4th iteration

#	X	th _{fb}	th _s	t _{fill}	T _{melt}	T _{mold}	L	X	V(L, X)		
1	1	1	1	1	1	1	1	0.66	0.87	0.917	
2	1	1	2	2	2	2	2	0.66	0.87	0.917	
3	1	1	3	3	3	3	3	0.66	0.87	0.917	
4	1	2	1	1	2	2	3	0.66	1.75	0.893	
5	1	2	2	2	3	3	1	0.66	1.75	0.893	
6	1	2	3	3	1	1	2	0.66	1.75	0.893	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.0	2.62	0.927
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.0	2.62	0.927
9	1	3	3	1	3	2	1	2	4.98	2.62	0.559
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.0	0.87	0.974
11	2	1	2	1	1	3	3	2	4.98	0.87	0.606
12	2	1	3	2	2	1	1	3	4.98	0.87	0.606
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.0	1.75	0.950
14	2	2	2	3	1	2	1	3	0.0	1.75	0.950
15	2	2	3	1	2	3	2	1	8.54	1.75	0.405
16	2	3	1	3	2	3	1	2	0.0	2.62	0.927
17	2	3	2	1	3	1	2	3	0.66	2.62	0.869
18	2	3	3	2	1	2	3	1	15.40	2.62	0.210

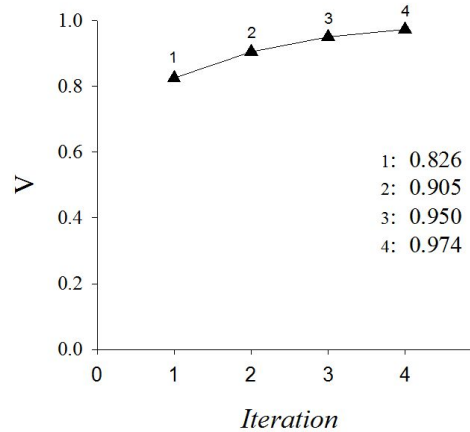


Fig. 5 Value of the optimal design alternative versus experiment runs

Table 7은 두 설계대안에서 두 설계특성과 가치함수의 값을 수치적으로 비교한 것이다. 초기 설계대안에 비해 최적 설계대안에서는 두 설계특성이 크게 개선되었다. 초기 설계의 경우에는 게이트 위치가 7mm이고 게이트의 반대쪽 옆면에 8.57mm의 비교적 긴 웰드라인이 형성되었으나, 최적 설계조건에서는 게이트 위치는 분할면에 거의 근접하도록 결정되었으며 웰드라인은 완전히 제거될 수 있었다. 이 설계대안은 두 설계특성의 값이 충분히 최소화되어 설계목표에 부합하는 것으로 판단된다.

Table 6 Design variable values at the two designs

Variable	Unit	Initial Design	Optimal Design
X	mm	7	0.87
$th_{front/back}$	mm	1.5	1
th_{side}	mm	1.5	1.43
t_{fill}	sec	1	1.18
T_{melt}	°C	210	195
T_{mold}	°C	40	40

Table 7 The gate location and weld line length and their value function values

Design	Initial	Optimum
L	8.57	0
X	7	0.87
$V(L, X)$	0.279	0.974

5. 결론

사출성형 제품의 두 가지 설계특성을 최소화하기 위해 두 특성의 가치함수를 이용한 최적설계 방법을 제시하였다. 설계대안의 탐색법으로는 직교배열 실험과 승자선택법에 기초한 설계공간축소 알고리즘을 개발하여 사용하였다. 제안한 최적화 방법을 적용하여 커패시터 캔 모델에 대해 웰드라인과 게이트 위치를 최적화하였다. 그 결과 설계자의 선호 구조 하에서 두 설계특성이 충분히 최소화되는 설계조건을 비교적 적은 횟수의 실험 수행으로 안정적으로 찾을 수 있었으며, 초기 명목 설계조건에 비해 설계특성의 값이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

1. Yao, D., "Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage And Weldlines in Injection Molded Parts", Master's Thesis, U. of Massachusetts, MA, pp. 1-135, 1998.
2. Liao, S. J., Chang, D. Y., Chen, H. J., Tsou, L. S., Ho, J. R., Yau, H. T. and Hsieh, W. H., "Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts," Polymer Engineering and Science, Vol. 44, No. 5, pp. 917-928, 2004.
3. Zhai, M. et al., "Automated Selection of Gate Location for Plastic Injection Molding Processing," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 44, pp. 229-242, 2005.
4. Erzurumlu, T. and Ozelik, 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.
5. Zhou, J. and Turng, L.S., "Adaptive Multiobjective Optimization of Process Conditions for Injection Molding Using a Gaussian Process Approach," Advances in Polymer Technology, Vol. 26, No. 2, pp. 71-85, 2007.
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. Chen, W.C., Fu, G.L., Tai, P.H. and Deng, W.J., "Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing," Expert Systems With Applications, Vol. 36, pp. 1114-1122, 2009.
8. Zhai, M. and Xie, Y., "A Study of Gate Location Optimization of Plastic Injection Molding Using Sequential Linear Programming," Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 49, No. 1, pp. 97-103, 2010.
9. Mehat, N.M. and Kamaruddin, S., "Multi-Response Optimization of Injection Moulding Processing Parameters Using the Taguchi

- Method," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 50, pp. 21519-1526, 2011.
10. Cho, S.B. et al., "Determination of Valve Gate Open Timing for Minimizing Injection Pressure of an Automotive Instrument Panel," Transactions of KSAE, Vol. 20, No. 4, pp. 46-51, 2012.
 11. Keeney, R. L. and Raiffa, H., Decisions with Multiple Objectives : Preferences and Value Tradeoffs, John Wiley & Sons Inc., NY, pp. 282-343, 1993.
 12. Kim, K.M., Yin, J.J. and Park, J.C., "Optimization of Sheet Metal Forming Process Based on Two-Attribute Robust Design Methodology," J. of KSMPE, Vol. 13, No. 2, pp. 55-63, 2014.
 13. Phadke, M.S., Quality Engineering using Robust Design, AT&T Bell Laboratories, pp. 285-319, 1992.
 14. Fowlkes, W.Y. and Creveling, C.M., Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 371-388, 1995.
 15. 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.
 16. Park, J.C., Kim, K.H., Kim, K., and Koo, B.H., "Minimization of Warpage in Injection-molded Parts By Optimal Design of U-type Ribs," J. of KSMPE, Vol. 7, No. 1, pp. 53-61, 2008.
 17. Schmidt, S.R. and Launsby, R.G., Understanding Industrial Designed Experiments, Air Academy Press, pp. 5-2-5-3, 1997.
 18. ED&C, Autodesk Moldflow Insight: The 4th edition of AMI Korean Manual, 2009.
 19. Bukhman, I., TRIZ Technology for Innovation, Cubic Creativity, pp. 85-105, 2012.