

## 사출 성형품의 두 품질특성 최적화를 위한 실용적 방법의 개발

박종천<sup>\*,#</sup>, 차재호<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>금오공과대학교 기계공학과

## Development of a Practical Method to Optimize Two-Quality Characteristics in Injection Molded Parts

Jong-Cheon Park<sup>\*,#</sup>, Jae-Ho Cha<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, KIT

(Received 13 October 2015; received in revised form 16 November 2015; accepted 19 November 2015)

### ABSTRACT

Optimization of multi-quality characteristics in injection molded parts is very important, but it is sometimes difficult for part/mold designers. The objective of this study is to develop a practical design methodology for optimizing two-quality characteristics of injection molded parts. To attain this end, we developed a new design-range reduction algorithm based on Taguchi's orthogonal arrays for two characteristics. Then, the algorithm was integrated with commercial injection-molding simulation tools. A feature of the proposed methodology is that it allows field-designers unfamiliar with general optimization methods to be able to apply the methodology to their design problems with ease. Finally, we have applied the proposed design methodology to optimization of weldlines and deflections in an actual bezel model. The results show the usefulness of this methodology.

**Key Words** : Injection Molding(사출성형), Optimization(최적화), Two-quality Characteristics(두 품질특성), Design-Range Reduction(설계영역축소)

### 1. 서 론

사출 성형품은 고온, 고압의 고분자 용융수지를 단한 금형의 캐비티 안으로 고속으로 주입하고 냉각시킨 후 취출하여 얻는다. 사출품의 사출결함, 즉 품질특성(quality characteristics)에는 대표적으로 웰드라인(weldline), 휨(warpage), 수축(shrinkage), 변형(deflection), 싱크마크(sink mark) 등이 포함되는데, 이 품질특성들은 수지, 제품, 금형 및 성형

조건에 의해 결정된다<sup>[1]</sup>. 그러나 이 설계인자들은 상호간에 비선형적인 관계가 강해서 단일 품질특성에 대해서도 최적의 설계조건을 찾기가 매우 어렵다. 더구나 다른 형태의 품질특성들이 한 제품에서 발생하는 경우에 이것들을 동시에 최적화하는 것은 더욱 어렵다.

1980년대 이후 최근까지 사출성형의 단일 또는 다수 품질특성에 대한 설계 최적화를 위해 전통적으로 수학적 또는 통계적 이론을 기반으로 하는 최적화 방법들이 사용되어 왔다<sup>[1-16]</sup>. 이 최적화 방법들은 최적해의 정확성과 탐색의 효율성 등의 측면에서 고유한 장점들이 있으나 실제 적용을 위해

# Corresponding Author : cadpark@kumoh.ac.kr  
Tel: +82-54-478-7297, Fax: +82-54-478-7319

서는 최적화 이론과 알고리즘 구현에 대한 지식이 요구된다. 따라서 최적화에 대한 이해와 경험이 부족한 산업 현장의 설계 엔지니어들이 설계시간을 제약받는 상황에서 이러한 엄밀한 최적화 방법들을 실제 설계문제에 적용하기는 현실적으로 어려운 점이 있다. 이런 관점에 따라서 이 연구에서는 두 개의 품질특성을 동시에 최적화할 수 있는 실용적인 최적설계 방법을 제시한다. 이 최적화 방법에서는 직교배열(orthogonal array) 실험계획<sup>[17,18]</sup>과 두 품질특성에 대한 새로운 설계영역축소(design-range reduction) 알고리즘을 개발하여 사출성형 시뮬레이션 모듈과 통합한다. 이 최적화 방법은 직교배열 실험과 그 결과에 따른 설계영역의 축소를 연계하고 실험을 반복하는 과정에서 최적해를 탐색하기 때문에 전통적인 최적화 방법과 비교해서 설계자는 연속되는 직교배열 실험만으로 최적해를 쉽게 찾을 수 있다.

제시한 최적화 방법의 효용성을 보이기 위해 디스플레이 베젤(bezel) 성형품의 웰드라인과 변형을 최소화하는 설계문제에 적용하였다. 최적화를 수행한 결과 두 품질특성이 최소화되는 최적의 설계조건을 안정적으로 찾을 수 있었다. 초기 설계조건과 비교하여 웰드라인은 제품 코너부에 근접해서 매우 짧게 형성되고 변형도 30% 정도 감소되어 두 품질특성이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. 두 품질특성의 실용적 최적화

### 2.1 전통적 사출성형 최적화 방법

최근까지 사출성형 품질특성의 최적화를 위해 주로 사용되고 있는 대표적인 최적화 방법으로는 실험계획법(DOE)<sup>[5]</sup>, 다구치법(Taguchi method)<sup>[6,7]</sup>, 반응표면법(response surface methodology)<sup>[9]</sup>, 회귀분석법(regression analysis method)<sup>[10]</sup>, 유전알고리즘(genetic algorithm)<sup>[11]</sup>, 인공신경망(artificial neural networks)<sup>[12]</sup> 등이 있다. 한편 사출품에 서로 충돌하는 다수의 품질특성들이 존재하는 경우에 이것들을 동시에 최적화하기 위해서는 우선 설계자의 선호도에 의해 품질특성의 목적함수들을 절충

(trade-offs)하여 다특성에 대한 평가치를 하나의 상위평가기준(super criterion)으로 통합하는 과정이 요구된다. 이를 위해 대표적으로 AHP(Analytical Hierarchical Process)<sup>[13]</sup>, TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)<sup>[14]</sup>, 효용함수(utility function)<sup>[15]</sup> 등의 다특성 의사결정 방법 등이 사용된다. 그러나 이러한 단일 또는 다수 특성에 대한 전통적인 최적화 방법들은 설계 현장에서 엔지니어가 실제로 적용하기란 현실적으로 쉽지 않다. 왜냐하면 전통적인 최적화 방법들을 적용하기 위해서는 상당한 수준의 수학적, 통계적 이론에 대한 이해는 물론이고 알고리즘의 구현 또는 최적화 소프트웨어를 운용할 수 있는 능력이 요구되기 때문이다. 더구나 시간제약이 따르는 설계단계에서 긴 최적화 시간이 소요될 수도 있는 최적화 방법들을 사용하기가 어려운 점이 있다. 따라서 이러한 현실적인 제약을 고려할 때 설계 엔지니어가 사용할 수 있는 실용적인 최적화 방법이 필요하다. 이를 위해 이 연구에서는 직교배열과 설계영역축소 알고리즘을 통합한 두 품질특성의 실용적 최적화 방법을 개발하여 다음 절에 제시한다. 이 최적화 방법은 직교배열에 기초하고 있어서 알고리즘의 구현이 쉽고 설계변수가 많은 경우에도 비교적 적은 횟수의 실험으로 최적 설계조건을 빠르게 탐색할 수 있다.

### 2.2 최적화 알고리즘

이 연구에서 제시되는 직교배열 기반 설계영역 축소 알고리즘은 2수준 직교배열 실험의 결과에 따라 각 품질특성에 대해 최악의 실험조건(설계조건, 설계대안)에 해당하는 설계변수들의 수준을 설계영역에서 제거하는 과정을 반복 수행하는 방식을 통해 설계영역을 최적해가 있을 법한 영역으로 점진적으로 축소, 수렴시켜 간다. 이 알고리즘에서 두 품질특성에 대한 최적해를 탐색하는 과정은 다음과 같다.

Step 1. 두 개의 품질특성과 각 품질특성의 목적함수를 선정한다.

Step 2. 설계변수들과 각 설계변수의 범위를 결정

한다. 전체 설계변수들의 범위가 최적해를 탐색하기 위한 초기 설계영역이 된다.

Step 3. 2수준 직교배열을 선정하고 직교배열표에 설계변수들과 그 수준(level)들을 배치한다. 설계변수 범위의 하한(lower limit)을 1수준, 상한(upper limit)을 2수준으로 한다.

Step 4. 직교배열 실험을 실시하고 설계조건별로 각 품질특성의 목적함수값을 얻는다.

Step 5. 각 품질특성에 대해 목적함수값이 최악인 설계조건과 설계변수들의 수준을 얻는다.

Step 6. 각 설계변수의 범위를 축소하여 새로운 설계영역을 결정한다. 이 과정은 각 설계변수에 대해 step 5에서 얻은 최악 수준을 기준으로 일정한 비율만큼의 영역을 현재의 설계영역에서 제거하는 방식으로 이루어진다. 설계변수들의 수준도 새로운 설계영역에 맞추어 변경한다. Table 1은 축소율이  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ )일 때 새로운 설계영역을 결정하는 알고리즘이다. 여기에서  $l_i^{old}$  과  $u_i^{old}$  는 각각  $i$ 번째 설계변수의 이전 설계영역의 하한(1수준)과 상한(2수준)이다. 또한  $l_i^{new}$  과  $u_i^{new}$  는 각각  $i$ 번째 설계변수의 축소된 새로운 설계영역의 하한(1수준)과 상한(2수준)이다. 현재 알고리즘에서는 두 품질특성에 대한 가중치가 동일한 경우로

**Table 1 Design-range reduction algorithm for two-quality characteristics**

If the worst levels of the two quality attributes are different;

$$l_i^{new} = l_i^{old} + \frac{\beta}{2} (u_i^{old} - l_i^{old})$$

$$u_i^{new} = u_i^{old} - \frac{\beta}{2} (u_i^{old} - l_i^{old})$$

Otherwise;

If the level 1 is worst level;

$$l_i^{new} = l_i^{old} + \beta (u_i^{old} - l_i^{old})$$

$$u_i^{new} = u_i^{old}$$

otherwise;

$$l_i^{new} = l_i^{old}$$

$$u_i^{new} = u_i^{old} - \beta (u_i^{old} - l_i^{old})$$

가정한다.

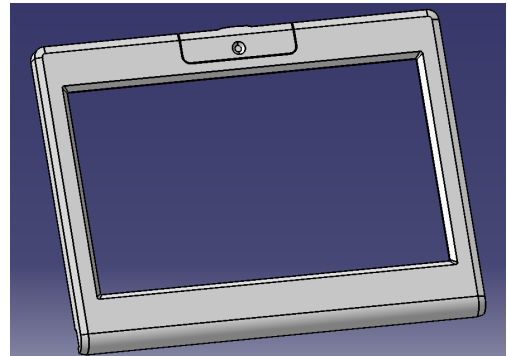
Step 7. 탐색종료 조건이 만족될 때까지 step 4에서 step 6을 반복한다. 설계자에 의해 두 품질특성의 목적함수값이 충분히 우수하거나 설계영역의 추가적인 축소가 무의미하다고 판단될 때 탐색을 종료한다. 후자인 경우 마지막 직교배열 실험에서 설계자가 두 품질특성의 목적함수값이 가장 우수하다고 판단하는 설계조건을 최적해로 선택한다.

### 3. 최적설계 적용: 디스플레이 베젤의 웰드라인과 변형의 최소화

#### 3.1 문제 정의

제시한 최적화 알고리즘을 사용하여 Fig. 1에 보인 디스플레이 시스템의 베젤 모델에 대해 제품 전면의 웰드라인과 제품의 변형을 동시에 최소화 하였다. 이 모델은 가로가 113mm, 세로가 84.7 mm이고 가로와 세로 변의 폭은 최소 7.58mm에서 최대 15.25mm이다. 단면의 두께는 최소 0.7 mm에서 최대 2.0mm이고 평균 두께는 대략 1.8 mm이다. Moldflow<sup>[19]</sup>를 사용하는 시뮬레이션 해석을 위해 Dual Domain 타입의 총 64,722개의 삼각형 유한요소를 생성하였다. 해석에 사용된 수지는 Generic PP이다.

웰드라인<sup>[1,20]</sup>은 두 개 이상의 유동선단들이 서로 마주 보면서 만날 때 형성되는 가늘고 긴 홈을 가진 선으로, 제품면에 나타날 때 특히 외관 품질이



**Fig. 1 3D bezel model**

떨어진다. 일반적으로 제품의 형상이 고정된 경우에는 게이트의 개수와 위치가 웰드라인 발생에 가장 큰 영향을 미친다. 이 모델에서는 성형 가능성을 고려하면서 웰드라인을 최소화하기 위해 게이트의 수를 두 개로 정하였다. 이 모델에 대한 웰드라인의 설계목표는 설계자의 판단에 따라서 웰드라인이 베젤의 코너에 최대한 근접해서 형성되게 하면서 그 길이도 최소화하는 것이다. 시뮬레이션 결과에서 웰드라인은 두 유동선단이 맞닿아 놓이게 되는 유한요소 절점들을 연결하여 표시되므로 실제 길이를 정확히 계산하기가 쉽지 않다. 또한 연결된 선의 형상이 불규칙한 경우가 많아서 웰드라인이 베젤 코너에 근접해 있는 정도를 정량화하기가 어렵다. 이런 이유로 웰드라인에 대해서는 설계자가 정성적으로 평가하도록 하였다. 여기에서는 5-등급, 즉 {A('Good'), B('Fairly good'), C('Fair'), D('Fairly poor'), E ('Poor')}로 평가한다. 평가 등급을 웰드라인의 목적함수로 정의하고 최적화 과정에서 목적함수를 최대화한다.

변형에 대해서는 제품에 발생하는 처짐(deflection)의 크기를 최소화하는 것을 설계목표로 한다. 이를 위해 시뮬레이션 결과 모델의 유한요소 절점들에서 측정된 처짐량 분포에서 그 최대값을 변형에 대한 목적함수로 정의하고 최적화 과정에서 목적함수를 최소화한다. 따라서 이 베젤 모델에서 웰드라인과 변형을 동시에 최적화하는 설계문제를 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Maximize } F_1 = \text{Grade on simulated weldline}$$

$$\text{Minimize } F_2 = \text{Maximum deflection} \quad (1)$$

$$\text{with } \mathbf{X} \in \Omega$$

여기에서  $F_1$ 과  $F_2$ 는 각각 웰드라인과 변형에 대한 목적함수이고,  $\mathbf{X}$ 는 설계변수벡터,  $\Omega$ 는 설계변수영역이다.

### 3.2 실험계획 및 최적화 수행

직교배열 실험을 위해서는 우선 설계변수, 변수 수준과 직교배열을 선정해야 한다. 설계변수로 두 게이트의 위치와 성형조건을 선택하고 설계변수의

수준은 2수준으로 하였다. Fig. 2는 최적의 게이트 위치를 탐색하기 위해 설계자가 지정한 두 게이트의 위치 설계변수와 설계영역이다. 여기에서 설계변수  $X_i (i=1,2)$ 와  $Y_i (i=1,2)$ 는 각각  $i$ 번째 게이트 위치의  $X$  좌표와  $Y$  좌표이다. 각 게이트의 설계영역은 사각형 영역의 꼭지점에 해당하는 유한요소 절점( $N^i$ )들을 지정함으로써 정의된다. Table 2는 각 게이트 설계영역의 절점 좌표와 절점들의 설계변수 수준조합이다. 절점의 설계변수 조합에서 위 첨자 1은 해당 설계변수의 1수준값을, 2는 2수준값을 표시한다. 또한 성형조건 중에

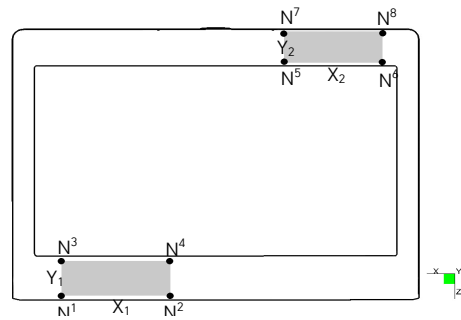


Fig. 2 Specification of two gate-design ranges

Table 2 Nodes of two gate-design ranges

Gate #	Node	Coordinate (x, y, z)	level combination
1	N <sup>1</sup>	(39.48, 26.01, 134.70)	(X <sub>1</sub> ) <sup>1</sup> (Y <sub>1</sub> ) <sup>1</sup>
	N <sup>2</sup>	(12.89, 26.01, 134.70)	(X <sub>1</sub> ) <sup>2</sup> (Y <sub>1</sub> ) <sup>1</sup>
	N <sup>3</sup>	(39.39, 28.22, 126.45)	(X <sub>1</sub> ) <sup>1</sup> (Y <sub>1</sub> ) <sup>2</sup>
	N <sup>4</sup>	(12.76, 28.22, 126.45)	(X <sub>1</sub> ) <sup>2</sup> (Y <sub>1</sub> ) <sup>2</sup>
2	N <sup>5</sup>	(-18.09, 43.99, 67.61)	(X <sub>2</sub> ) <sup>1</sup> (Y <sub>2</sub> ) <sup>1</sup>
	N <sup>6</sup>	(-34.06, 43.99, 67.61)	(X <sub>2</sub> ) <sup>2</sup> (Y <sub>2</sub> ) <sup>1</sup>
	N <sup>7</sup>	(-18.10, 46.18, 59.43)	(X <sub>2</sub> ) <sup>1</sup> (Y <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>
	N <sup>8</sup>	(-34.21, 46.18, 59.43)	(X <sub>2</sub> ) <sup>2</sup> (Y <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>

Table 3 Process design variables and their two levels

Process variable	Unit	Level 1	Level 2
t <sub>fill</sub>	sec	0.5	3
T <sub>mold</sub>	°C	20	60
T <sub>melt</sub>	°C	220	260
t <sub>cool</sub>	sec	5	20
P <sub>pack</sub>	%	50	90
t <sub>pack</sub>	sec	3	10
P <sub>v/p</sub>	%	95	99

서는 설계변수로 사출시간( $t_{fill}$ ), 수지온도( $T_{melt}$ ), 금형온도( $T_{mold}$ ), 보압전환시점( $P_{v/p}$ ), 보압( $P_{pack}$ ), 보압시간( $t_{pack}$ )과 냉각시간( $t_{cool}$ )을 선택하였다. 냉각은 제품 전체에서 균일하게 이루어진다고 가정하고 냉각해석은 별도로 실시하지 않았다. Table 3은 성형조건 설계변수와 그 수준값을 나타낸다. Table 2와 Table 3에 보인 설계변수들의 1수준값과 2수준값은 설계자가 해당 설계변수에 대해 지정한 설계영역의 하한과 상한이며, 이 설계영역들이 최적해의 초기 탐색범위가 된다. 이 연구에서는 최적해 탐색을 위해  $L_{12}(2^{11})$  직교배열을 선택

**Table 4 Experiment results of the 1st iteration**

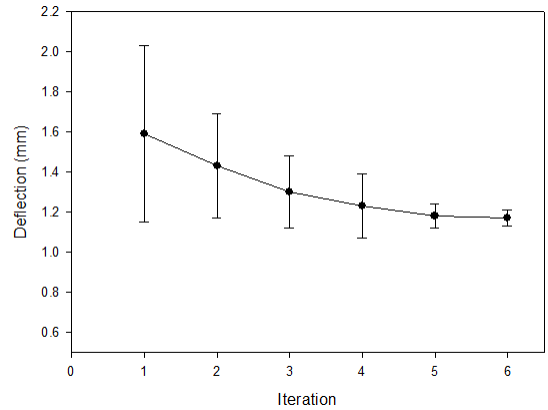
#	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	t <sub>fill</sub>	T <sub>mold</sub>	T <sub>melt</sub>	t <sub>cool</sub>	P <sub>pack</sub>	t <sub>pack</sub>	P <sub>v/p</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	C	2.09
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	C	0.91
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	C	1.23
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	D	2.06
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	D	1.33
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	D	1.57
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	D	1.65
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	D	1.92
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	E	1.81
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	D	2.26
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	E	1.08
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	E	1.19

A = Good, B = Fairly good, C = Fair, D = Fairly poor, E = Poor

**Table 5 Experiment results of the 6th iteration**

#	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	t <sub>fill</sub>	T <sub>mold</sub>	T <sub>melt</sub>	t <sub>cool</sub>	P <sub>pack</sub>	t <sub>pack</sub>	P <sub>v/p</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	B	1.22
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	B	1.13
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	B	1.11
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	A	1.21
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	B	1.13
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	B	1.13
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	B	1.22
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	A	1.20
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	B	1.19
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	A	1.18
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	B	1.16
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	A	1.16

A = Good, B = Fairly good, C = Fair, D = Fairly poor, E = Poor



**Fig. 3 Average deflections and variations versus iterations**

하고, 직교배열의 각 열에 설계변수와 그 수준값을 배치하였다. 첫 번째 탐색실험을 위해 직교배열의 각 설계대안(설계조건)에 대해 시뮬레이션 실험을 실시하고 웰드라인과 변형에 대한 목적함수값을 측정하였다. Table 4는 첫 번째 탐색실험의 결과이다. 웰드라인에 대해서는 ‘Poor’로 평가된 세 가지 설계대안들(9번, 11번, 12번) 중에서도 9번 설계대안이 가장 낮게 평가되었다. 변형의 경우에는 10번 설계대안에서 목적함수값(최대 처짐량)이 2.26mm로 가장 크게 나타났다. 두 번째 탐색실험은 두 설계대안(9번과 10번)의 설계변수 수준에 대해 설계영역축소 알고리즘(Table 1)을 적용하여 설계변수들의 설계영역과 수준을 조정하고 새로운 직교배열 실험을 수행하였다. 이후 최적화 알고리즘에 따라 총 6번의 탐색실험을 진행하였다. Table 5는 마지막 탐색실험의 결과이다. Fig. 3은 탐색실험 진행에 따른 변형의 평균과 변동폭( $2 \times$ 표준편차)을 보인 것이다. 탐색실험이 진행되면서 변형의 평균이 감소하면서 점차 개선되는 것을 알 수 있다. 또한 변형의 평균과 함께 변동폭도 지속적으로 감소하여 탐색된 설계해들의 강건성(robustness)이 커지는 것을 알 수 있다. 한편 탐색실험에 따라 웰드라인이 개선되는 것을 정량적으로 보이기 위해 계수치 데이터에 대한 신호대잡음비(signal-to-noise ratio; SN ratio)<sup>[21]</sup>를 사용하였다. 5개 등급(A, B, C, D, E)으로 평가된 계수치 데이

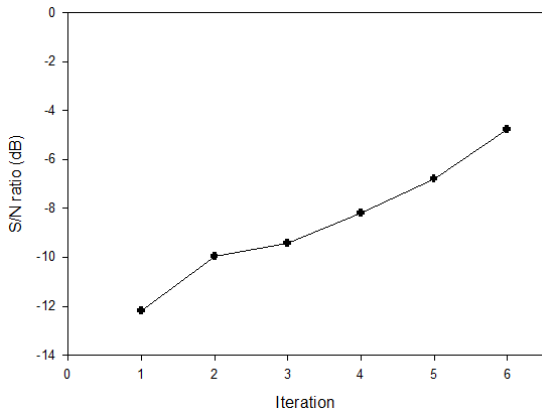


Fig. 4 S/N ratio of weldlines versus iterations

터에 대해, 각 등급에 속하는 데이터의 개수를  $n_i$  ( $i=1,2,\dots,5$ ) (단,  $\sum n_i = n$ ), 각 등급의 선호점수를  $\omega_i$ 라고 하면 SN비는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$SN = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i^2 n_i}{n} \right] \quad (2)$$

여기에서 SN비의 정의에 부합하기 위해 우수한 등급일수록 선호점수에 작은 값을 부여한다. SN비는 클수록 해당 직교배열의 설계대안들의 웰드라인이 평균적으로 더 우수하고 등급의 편차는 작아진다는 것을 의미한다. 평가 등급 A, B, C, D, E의 선호점수로 1, 2, 3, 4, 5를 각각 부여하고 탐색실험별로 웰드라인에 대해 계산한 SN비를 Fig. 4에 보였다. 탐색실험이 진행됨에 따라서 SN비가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이로부터 탐색실험에 따라 웰드라인의 평균 등급은 점차 우수해지고 등급 편차는 작아진다는 것을 알 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4에서 볼 때 전체적으로 탐색실험의 진행에 따라서 웰드라인과 변형이 동시에 개선되어 가는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 초기 설계영역이 제시한 설계영역축소 알고리즘에 의해 강건 설계해들이 존재하는 설계영역으로 점차적으로 수렴해 간다는 것을 알 수 있다. 마지막 탐색실험에서 웰드라인과 변형이 가장 우수한 것으로 판단한 12번 설계대안을 최적 설계해로 결정하였다. Table 6은

최적 설계해와 초기 설계해의 설계변수값이다. 최적 설계해에서 웰드라인은 제품의 두 코너부의 대각선 방향에 거의 근접하면서 길이도 매우 짧게 형성되는 것을 알 수 있었다(Fig. 5). 변형은 제품의 왼쪽 하단의 코너에서 1.06mm의 처짐이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 초기 설계해와 비교

Table 6 Variable values of the two design solutions

Design variable		Unit	Optimal design	Initial Design
Gate position	#1	mm	(35.5, 27.2, 130.3)	(16.9, 27.1, 130.7)
	#2	mm	(-24.4, 44.9, 64.2)	(-32.1, 45.2, 63.2)
Process conditions	$t_{fill}$	sec	1.97	1.5
	$T_{mold}$	°C	38.44	40
	$T_{melt}$	°C	246.68	230
	$t_{cool}$	sec	8.96	10
	$P_{pack}$	%	71.12	60
	$t_{pack}$	sec	6.85	4
	$P_{v/p}$	%	97.12	95

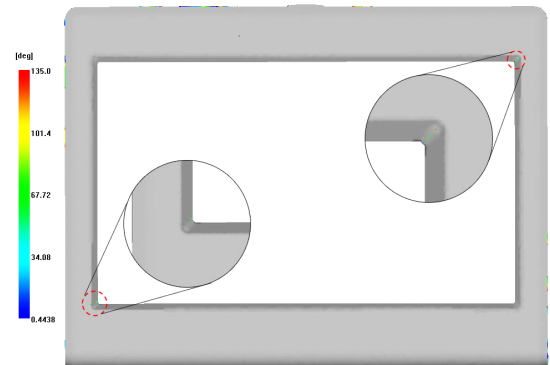


Fig. 5 Weldlines at the optimal design

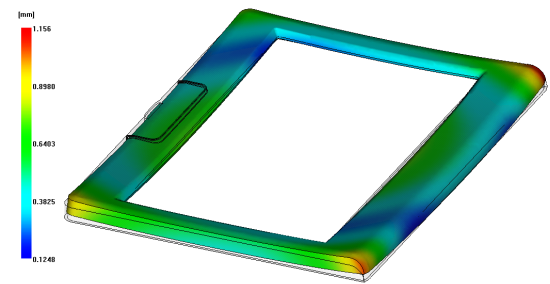


Fig. 6 Deflections at the optimal design(scale factor=2)

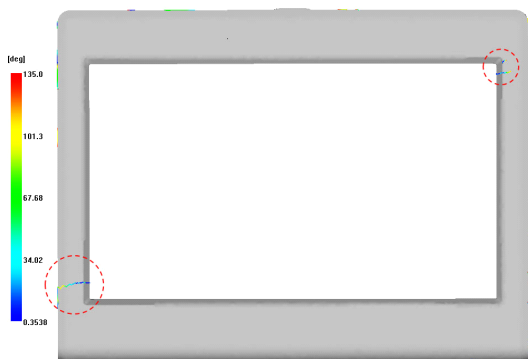


Fig. 7 Weldlines at the initial design

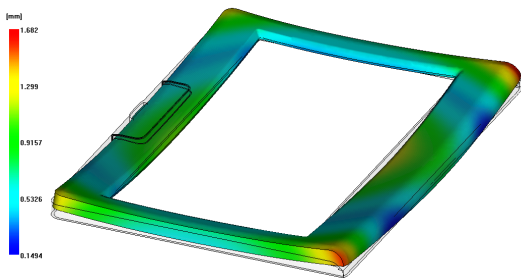


Fig. 8 Deflections at the initial design(scale factor=2)

해 보기 위해 초기 설계해에서 웰드라인과 변형을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 보았다. 초기 설계해는 웰드라인이 베젤 코너에서 벗어난 지역에서 상당히 길게 형성되고, 변형도 1.57 mm의 처짐이 제품 하단 코너에서 발생하고 있다. 초기 설계해와 비교해서 최적 설계해는 웰드라인이 생성 위치와 생성 길이 측면 모두에서 크게 개선되고 제품의 변형도 0.51mm만큼 감소(개선율 32.5%)되는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 두 개의 사출성형 품질특성들을 동시에 최적화하기 위한 직교배열 기반의 새로운 실용적 설계방법을 제시하였다. 이를 위해 직교배열 실험을 반복 수행하면서 각 품질특성에 대해 최악의 설계변수 수준을 설계영역에서 제거해 가

는 새로운 설계영역축소 알고리즘을 개발하였다. 제안한 최적화 방법을 디스플레이 베젤 제품의 웰드라인과 변형을 동시에 최소화하는 설계문제에 적용하였다. 그 결과 웰드라인과 변형이 동시에 충분히 최소화되는 설계조건을 안정적으로 찾을 수 있었다. 초기 설계조건에 비해 웰드라인은 제품 코너부에 근접해 매우 짧게 생성되었고 변형도 32.5%가 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

이 연구에서 제시한 최적화 방법은 알고리즘의 구조가 단순하여 구현이 쉽고 빠른 최적해 탐색이 가능하며 두 품질특성에 대한 평가 방법이 정량적이든 정성적이든 상관없이 적용할 수 있기 때문에 설계현장의 엔지니어가 실용적으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 현재 알고리즘을 기반으로 세개 이상의 품질특성이 존재하는 경우와 품질특성들의 중요도가 다른 경우에 대해 적용할 수 있는 최적화 알고리즘을 개발할 예정이다.

#### 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," A Thesis for a Master, U. of Massachusetts, MA., pp. 1-135, 1998.
2. Liao, S. J., Chang, D. Y., Chen, H. J. and Tsou, L. S., "Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts," Polym. Eng. Sci., Vol. 44, No. 5, pp. 917-928, 2004.
3. Zhou, J. and Turng, L. S., "Adaptive Multiobjective Optimization of Process Conditions for Injection Molding Using a Gaussian Process Approach," Adv. Polym. Technol., Vol. 26, No. 2, pp. 71-85, 2007.
4. 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 Syst. Appl.*, Vol. 36, pp. 1114-1122, 2009.
5. Park, K. and Ahn, J. H., “Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 146, No. 2, pp. 221-227, 2004.
  6. Liu, S. J., Wu, J. Y., Chang, J. H. and Hung, S. W., “An Experimental Matrix Design to Optimize the Weldline Strength in Injection Molded Parts,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 40, pp. 1256-1262, 2000.
  7. Li, H., Guo, Z. and Li, D., “Reducing the Effects of Weldlines on Appearance of Plastic Products By Taguchi Experimental Method,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 32, No. 9-10, pp. 927-931, 2007.
  8. Mehat, N. M. and Kamaruddin, S., “Multi-Response Optimization of Injection Moulding Processing Parameters Using the Taguchi Method,” *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, Vol. 50, No. 15, pp. 1519-1526, 2011.
  9. Park, C. H., Pyo, B. G., Choi, D. H. and Koo, M. S., “Design Optimization of an Automotive Injection Molded Part for Minimizing Injection Pressure and Preventing Weldlines,” *Trans. Korean Automot. Eng.*, Vol. 19, No. 1, pp. 66-72, 2011.
  10. Chen, C. S., Chen, T. J., Chien, R. D. and Che, S. C., “Investigation on the Weldline Strength of Thin-wall Injection Molded ABS Parts,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 34, No. 4, pp. 448-455, 2007.
  11. Lee, J. and Kim, J., “Micro Genetic Algorithm Based Optimal Gate Positioning in Injection Molding Design,” *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 5, pp. 789-798, 2007.
  12. Zhou, H. and Li, D., “Computer Evaluation of Weld Lines in Injection-molded Parts,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, Vol. 24, No. 3, pp. 315-322, 2005.
  13. AlKaabneh, F. A., Barghash, M. and Mishael, I., “A Combined Analytical Hierarchical Process (AHP) and Taguchi Experimental Design(TED) for Plastic Injection Molding Process Settings,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 66, No. 5-8, pp. 679-694, 2013.
  14. Su, T. L., Chen, H. W. and Lu, C. F., “Systematic Optimization for the Evaluation of the Microinjection Molding Parameters of Light Guide Plate with TOPSIS-Based Taguchi Method,” *Adv. Polym. Technol.*, Vol. 29, No. 1, pp. 54-63, 2010.
  15. Park, J. C. and Kim, B. H., “Automated Mold Design to Optimize Multi-Quality Characteristics in Injection Molded Parts Based on the Utility Theory and Modified Complex Method,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 17, No. 9, pp. 210-221, 2000.
  16. Kim, K. H. and Park, J. C., “Robust Design of Gate Locations and Process Parameters for Minimizing Injection Pressure of an Automotive Dashboard,” *J. Korean Soc. Manuf. Eng.* Vol. 13, No. 6, pp. 73-81, 2014.
  17. Phadke, M. S., *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice Hall, pp. 285-319, 1995.
  18. Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., *Engineering Methods for Robust Product Design*, Addison-Wesley, pp. 371-388, 1995.
  19. Autodesk, *Moldflow ASMI Training Manual*, 2012.
  20. Malloy, R. A., *Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction*, Hanser Publishers, pp. 75-84, 1994.
  21. Park, S., *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman & Hall, pp. 150-171, 1996.