

반응표면분석법을 이용한 사출성형품의 휨의 강건설계

박종천* · 김경모** · 안흥일***

(2001년 7월 31일 접수)

Robust Design of Warpage in Injection-Molded Parts Using the Response Surface Methodology

J. C. Park, K. M. Kim and H. I. Ahn

Abstract

An optimal robust design methodology has been developed to minimize warpage in injection-molded parts. The response surface methodology was applied to obtain a functional relationship between design variables and warpage value, and the modified complex method was used as an optimization tool to search for an optimal design solution over prescribed design region. To attain robustness against process variations, Taguchi's SN ratio was introduced as the design metric. The proposed optimal design procedure was applied to an actual part, the Guide-ASF model of a fax machine, and the usefulness of the methodology was shown through the CAE simulation using a commercial injection molding software package.

Key Words : Injection Molding, Warpage, Response Surface Methodology, Central Composite Design, Robust Design, Complex Method

1. 서 론

플라스틱 사출성형 제품에서 성형불량의 발생을 최소화하기 위해서는 수지, 제품, 금형, 그리고 성형조건 등에 속하는 설계변수들에 대한 최적설계가 이루어져야 한다. 그러나 성형불량과 설계변수간에는 복잡한 다차원적이고 비선형적인 관계가 있어서 숙련된 설계자라 하더라도 최적의 설계변수값을 결정하는 것은 매우 어렵다. 근래에는 상용 성형해석 소프트웨어를 이용한 CAE(Computer Aided Engineering) 기술을 적용하여 설계 단계에

서 성형불량의 발생 여부를 어느 정도 예측할 수 있게 되었으나⁽¹⁻⁹⁾, 최적설계에 이르기까지는 여전히 많은 문제점들이 있다. 먼저, 현재까지 개발된 성형해석용 소프트웨어는 최적 설계해를 직접적으로 제시해 주지는 못하고 있다. 이로 인해 아직도 성형해석 소프트웨어를 단순히 시행착오적 방식에 따라서 사용하거나, 보다 발전된 형태로서 일반 탐색알고리즘(search algorithm)과 통합하여 사용하고 있다^(4-6,8-9). 그러나 어느 경우에도 최적 설계해를 얻기 위해서는 많은 횟수의 반복계산이 필요하고 이에 따른 긴 탐색시간으로 인하여 설계의 효율이 크

* 금오공과대학교 기계공학부
** 금오공과대학교 신소재시스템공학부
*** 금오공과대학교 대학원 기계공학과

게 떨어질 수밖에 없다. 따라서 설계의 효율성을 추구하는 측면에서 볼 때 가능한 한 적은 횟수의 탐색실험으로 최적해를 탐색할 수 있는 설계 방안이 요구된다고 하겠다.

또한 사출성형공정은 내재적으로 공정변동(process variation)이 매우 심하고 이를 제거하기가 어려운 점이 있다^(1,8-9). 이것은 설계 단계에서 결정된 최적해가 실제 성형공정에서도 최적해가 된다는 것을 보장할 수 없음을 의미한다. 따라서 설계 최적화를 위해서는 하류에서의 재현성(downstream reproducibility)이 보장되는 강건설계⁽¹⁰⁻¹¹⁾가 필요하다. 일반적으로 강건설계는 공정변수의 변동에 대해서 성능특성의 변동이 적은 해를 의미한다.

본 연구의 목적은 제품, 금형, 성형조건을 설계공간으로 고려하여 최소한의 탐색실험으로 사출 성형품의 휨(warpage)을 최소화하기 위한 최적 강건설계 절차를 개발하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Taguchi의 강건설계 개념과 반응표면분석법(response surface methodology), 그리고 콤플렉스법(complex method)을 상용 사출해석 시뮬레이션 툴(simulation tools)과 통합하였다. 반응표면분석법⁽¹²⁻¹⁴⁾은 계획된 실험에 의거하여 관측된 실험결과로부터 설계변수와 반응간의 근사적 관계를 나타내는 회귀함수(regression function)를 추정하는 통계적 방법이다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 휨과 설계변수간의 2차 반응표면모형을 추정하고, 추정된 반응표면에 대해 콤플렉스법⁽¹⁵⁾을 일부 수정한 수정 콤플렉스법(modified complex method)을 사용하여 최적해를 탐색한다. 또한 최적화 과정에서 설계해의 강건성을 평가하기 위해서 Taguchi의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio; SN ratio)⁽¹⁰⁻¹¹⁾를 사용한다.

끝으로 본 연구에서 개발된 최적 강건설계 절차를 상용 펙시밀리 부품인 Guide-ASF 모델에 적용하여 휨을 최적화하였다. 시뮬레이션을 통해 기존 설계와 비교해 본 결과 적은 탐색실험으로도 만족할 만한 설계해를 얻었으며, 이로부터 제안된 강건설계 방법이 사출성형 공정의 최적화에 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 강건설계

Taguchi⁽¹⁰⁻¹¹⁾는 제품의 품질을 “제품이 출하한 후 사회에 끼친 총 손실”로 정의하였다. 여기서 손실(loss)은 제품의 성능특성이 목표치를 유지하지 못하고 산포함으로써 야기되며 이러한 성능산포의 원인을 총체적으로 잡

음(noise)이라 한다. 강건설계(robust design)는 제품의 성능특성이 잡음에 둔감하도록 설계변수의 최적조건을 결정함으로써 제품 품질을 향상시키는 설계 방법으로, SN비가 최대가 되는 설계변수의 조건을 실험적으로 결정한다. 한편 사출성형품에 나타나는 휨은 양의 값을 갖고 그 값이 작을수록 바람직하므로 전형적인 망소특성이며, 이에 대한 SN비는 다음 식과 같다.

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

여기서 y_i 는 i 번째 잡음조건 ($i = 1, 2, \dots, n$)에서 측정된 휨의 값이다.

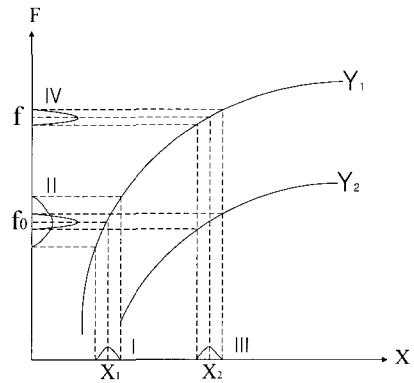


Fig. 1 Robust design

강건설계의 원리는 Fig. 1을 통해서 설명할 수 있다. 성능특성 F는 목표치가 f_0 이고, 설계변수 X, Y에 따라 변화한다고 하자. 만약 설계변수 Y가 Y_1 인 경우 성능특성의 설계 목표치를 달성하기 위해 X는 X_1 이 되어야 한다. 그러나 잡음으로 인해서 X가 X_1 을 정확히 유지하지 못하고 X_1 을 중심으로 I과 같이 변동하게 되면, 이것은 성능특성에 영향을 주어 F는 II와 같이 산포하게 된다. 즉, X_1 부근에서는 X에 대한 F의 변화율이 크므로 F는 X의 작은 변화에도 매우 민감하게 변동한다. 반면 X가 X_2 인 경우에는 X와 F의 관계가 완만한 기울기를 가지므로 I에서와 동일한 정도의 변동에도 F의 산포가 IV와 같이 매우 작다. 결과적으로 X를 X_2 로 설계할 때 설계변수 X가 잡음에 의해 변동하더라도 성능특성의 산포가 작게(즉, 강건하게)됨을 알 수 있다. 이 때 성능특성의 평균치가 f_0 로 목표치 f_0 로부터 벗어나 있는데, 이는 또 다른 설계변수 Y의 값을 Y_2 로 선택함으로써 F의 산포는 그대로 유지하되 성능특성의 평균을 목표치 f_0 로 접근시

킬 수 있다. 그러므로 설계변수의 값을 적절히 선택함에 따라 잡음의 영향력을 감소시킬 수 있으며, 강건설계는 이러한 설계조건을 실험적으로 결정하는 것을 목표로 한다.

3. 반응표면분석법에 기초한 설계 최적화

3.1 반응표면분석법

반응표면분석법(response surface methodology)은 다수의 설계변수 X_1, X_2, \dots, X_k 가 복합적인 작용을 하여 특정한 반응 y 에 영향을 줄 때, 설계변수와 반응(response)간의 근사적 함수 관계를 규명하고, 동시에 반응을 최적화하는 설계변수 조건을 구하는 것과 관련된 통계적 분석방법이다⁽¹²⁻¹⁴⁾. 여기서 설계변수는 독립변수이고 반응은 종속변수이다. 실험점 i 의 독립변수값 $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$ 와 종속변수값 y_i 와의 관계는 식(2)와 같이 표시된다.

$$y_i = f(X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}) + \varepsilon_i \quad (2)$$

여기서 ε_i 는 실험점 i 에서 관측된 오차이다. 본 연구에서는 제품, 금형, 공정조건에 속하는 설계변수들이 독립변수이고 종속변수는 휨의 크기이다. 이와 같은 반응표면함수로 많이 사용되는 모형은 k 개의 독립변수에 대한 다항 회귀모형(polynomial regression model)으로서 독립변수의 관심 영역에서 독립변수들과 종속변수간의 관계를 근사화한다.

반응표면분석법에서는 독립변수 X_1, X_2, \dots, X_k 를 다음 식(3)과 같이 선형 변환하여 분석한다.

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{c_i} \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

식(3)에서 X_{0i} 는 보통 X_i 의 평균치로 취하고 c_i 는 x_i 를 (-1, +1) 범위의 값으로 변환하기 위한 상수이다. 그러면 변환된 변수(coded variable) x_i 에 대한 회귀함수를 관측치로부터 추정할 수 있다. 회귀모형으로는 1차 또는 2차 모형이 주로 사용된다. 1차 모형은 종속변수가 독립변수들의 선형함수로 표현되는 경우이다. 그러나 대부분의 공학적 문제에서는 2차 모형이 주로 사용되고 있으며, 3차 이상의 고차 모형은 그 복잡성으로 인해 잘 사용되지 않는다. 사출성형 공정의 경우에는 설계변수와

성능특성간에 비선형적 함수관계가 예상되므로 본 연구에서는 2차 모형을 사용하였다. 2차 모형은 종속변수 y 와 독립변수 x 간의 함수관계가 곡면으로 표현될 것이라고 예상될 때 사용되며 아래 식과 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

여기서 β 는 회귀계수(regression coefficients)로서 각 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력을 나타내며, ε 은 오차를 나타낸다. 2차 모형의 회귀계수를 추정하기 위한 실험계획으로는 중심합성계획(central composite design; CCD)⁽¹²⁻¹⁴⁾이 주로 사용된다. 중심합성계획은 2^k 요인실험이나 2^{k-1} 일부실험법의 실험점에 중심점(center points)과 축점(axial points)을 추가시킨 형태의 실험계획이다. 관측된 실험 데이터로부터 2차 반응표면함수가 결정되면 이 함수를 이용하여 최적 강건설계해를 구한다.

3.2 문제의 정의

서론에서도 설명하였듯이 사출 공정은 내재적으로 높은 공정 변동성을 가지고 있다. 따라서 사출성형품의 휨에 대한 최적설계는 가능한 한 작은 휨 값을 가지면서 동시에 그 값에서 공정변동, 즉 잡음으로 인한 휨 값의 편차가 작게 되는 설계가 바람직하다. 이는 곧 휨에 대한 강건설계가 요구됨을 의미한다. 휨에 대한 강건설계 문제는 수학적으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \mu^2(\mathbf{X}) + \sigma^2(\mathbf{X}; \mathbf{N}) \\ & \text{s.t. } \mathbf{X} \in \Omega, \mathbf{N} \in \Lambda \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, μ 는 휨의 평균값, σ 는 0을 기준으로 계산된 휨의 분산, \mathbf{X} 는 설계변수벡터, \mathbf{N} 는 잡음변수벡터, Ω 는 설계변수공간, 그리고 Λ 는 잡음변수공간이다.

강건한 설계조건을 구하기 위해서는 공정변수의 변동이라는 잡음이 휨의 변동에 얼마나 큰 영향을 주는지를 평가해야 한다. 본 연구에서는 직교배열(orthogonal arrays)⁽¹⁰⁻¹¹⁾을 이용하여 잡음(즉, 공정변동)을 모형화한다. 콤플렉스법을 이용한 최적해 탐색과정에서 각 후보해의 강건성은 잡음 하에서 얻어진 휨 데이터로부터 계산된 SN비로 평가한다. 사출성형품에서 휨은 전형적인 망소특성(smaller-the-better characteristic)이며, SN비가 클수록 성능특성의 평균치는 작아지고 이상값에 대한 성능특

성의 편차는 작아진다^(10, 11). 따라서 힘에 대한 강건설계는 SN비를 목적함수로 하고 그 함수값을 최대화하는 최적설계가 된다.

3.3 콤플렉스법

힘에 관한 반응표면함수가 결정되면, 각 설계변수의 설계범위 내에서 탐색 알고리즘을 사용하여 최적 강건설계해를 탐색한다. 본 연구에서는 최적해의 탐색을 위해 콤플렉스법을 문제에 적합하도록 수정하여 사용하였다.

콤플렉스법⁽¹⁵⁾은 설계변수가 k개일 때 임의로 생성된 2k개의 후보해 집합을 꼭지점으로 하는 다각형(simplex)을 생성하고, 이 중 목적함수의 값이 가장 나쁜 점을 탈락시키는 대신 이 점을 나머지 후보해들의 무게중심(centroid) 방향으로 일정한 거리에 있는 점으로 교체하여 새로운 다각형을 생성하는 과정을 반복해 가면서 최적해를 결정한다. 콤플렉스법을 적용하기 위해서는 먼저 설계변수와 설계범위, 잡음변수와 수준을 결정한다. 이때 설계해 탐색공간은 설계변수의 설계범위로부터 설정된다. 계획된 실험을 통해 힘에 대한 반응표면함수가 추정되고 최적해 탐색공간이 결정되면 설계해의 탐색은 다음의 수정된 콤플렉스법(modified complex method)에 의해 수행된다.

[단계1] 탐색공간 안에서 2k개(k : 설계변수의 수)의 초기 후보해 P_i ($i=1, 2, \dots, 2k$)를 임의로 생성한다.

[단계2] 각 초기 후보해에 대해 잡음조건에 따른 힘의 값을 반응표면함수식을 사용하여 구하고, 이로부터 각 후보해에 대한 SN비를 구한다. 이 SN비가 각 후보해의 목적함수값 f_i ($i=1, 2, \dots, 2k$)가 된다.

[단계3] 2k개의 후보해 중 가장 작은 목적함수값 f_m 을 갖는 후보해 P_m 을 나머지 후보해들의 무게중심 P_c 방향으로 투사하여 새로운 후보해 P_n 을 생성하고 이 점에서의 목적함수값 f_n 을 구한다.

$$P_n = P_c + \alpha(P_c - P_m) \quad (6)$$

여기에서 α 는 투사율(reflection factor)로서 Box⁽¹⁵⁾가 추천한 $\alpha=1.3$ 을 사용한다.

(a) 만약 P_n 이 탐색공간에 속하고 $f_n < f_m$ 이면 P_n 을 무게중심 P_c 쪽으로 $\overline{P_c P_n}$ 의 1/2만큼 후퇴시키고 그 점에서 새로운 목적함수값을 계산한다. 이 과정을 $f_n > f_m$ 이 될 때까지 반복한다. 본 연구에서는 후퇴과정을 최대 4점까지만 허용하고 그때까지도 $f_n < f_m$ 이면 $P_c = P_m$

($f_c = f_m$)으로 한다.

(b) 만약 P_n 이 탐색공간에 속하고 $f_n > f_m$ 이면 $P_n = P_m$ ($f_n = f_m$)으로 한다.

(c) 만약 P_n 이 탐색공간에 속하지 않으면 속할 때까지 α 값을 5%씩 감소시켜 가면서 P_n 을 P_c 방향으로 반복해서 후퇴시켜 나간다.

[단계4] 탐색 종료조건을 조사한다. 만약 종료조건이 만족되면 탐색과정을 중지하고, 그렇지 않다면 [단계3]으로 가서 탐색을 반복한다. 본 연구에서는 과도한 탐색을 방지하기 위해 탐색회수에 상한을 설정하고 이에 도달한 경우 탐색을 종료한다.

4. 설계적용

4.1 설계모델

본 연구에서 제안된 최적 강건설계 방법의 유용성을 보이기 위해 Fig. 2의 팩시밀리 부품인 Guide-ASF 모델에

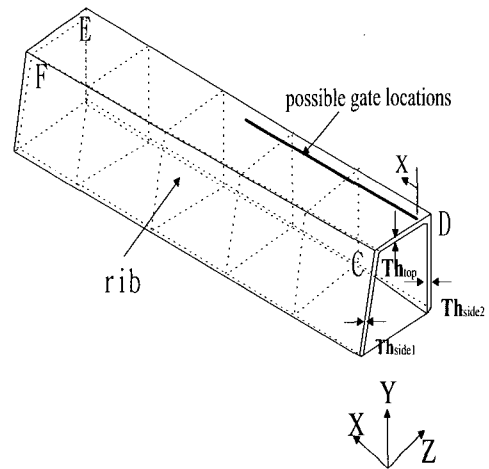


Fig. 2 Guide-ASF part of a fax machine

Table 1 Original design for the Guide-ASF part (unit:mm)

Design factors	Results
Gate location(X)	80.0
Side thickness(Th _{side1})	1.6
Side thickness(Th _{side2})	2.0
Top thickness(Th _{top})	1.8
Rib thickness	1.0
Warpage	0.2

대해 설계 최적화를 수행하였다. 사출 성형해석 소프트웨어로 Moldflow⁽¹⁶⁾를 사용하였으며, 제품에 사용된 수지는 GEUSA/GE1913 폴리카보네이트이다. Guide-ASF는 팩 시밀리에서 종이가 인쇄되어 나올 때 종이를 받쳐 주면서 원활한 이송을 돕는 부품으로, 종이걸림을 피하고 원활한 이송을 위해서는 종이와 직접 접촉하는 부분인 윗면(CDEF면)의 휨이 최소화되어야 한다. 기존 설계에서 윗면 휨의 크기를 변형 후 윗면의 수직방향(Y방향)에 대한 편평도(flatness), 즉 윗면 유한요소 절점(node)들의 수직 변위로부터 계산되는 상대적 최대 수직변위량으로 나타내었다. Table 1은 총 6개의 리브(rib)를 제품 내에 등간격으로 배치한 Fig. 2의 형상에 대한 기존 설계의 결과이다.

4.2 설계변수와 잠음변수

설계변수를 선정하기 위해 제품, 금형, 공정조건에 속하는 후보 변수들에 대해 L_{12} 직교배열표에 의한 예비(scree-ning) 실험을 수행하였다. 실험 데이터를 분산분석(analysis of variance)한 결과로부터 본 실험의 적정 횟수를 고려하여 총 변동에 대한 기여 정도가 큰 5개의 변수를 설계변수로 선정하였다. 선정된 설계변수는 게이트 위치(X), 옆면 벽두께1(Th_{side1}), 윗면 벽두께(Th_{top}), 충전시간(t_{fill}), 보압시간(t_{pack})이다. 그 외에 옆면 벽두께2(Th_{side2}), 냉각시간(t_{cool}), 수지온도(T_{melt}), 금형온도(T_{mold}), 보압(P_{pack}) 등은 설계변수에서 제외하되, 반응표면추정을 위한 시뮬레이션 수행 시에는 예비실험에서 사용한 수준의 평균값을 해당 변수들의 공칭값으로 사용하였다. 또한 잠음 변수로는 설계변수 중 변동을 제어하기가 힘든 충전시간과 보압시간을 선정하였다.

4.3 반응표면함수의 추정

중심합성계획법에 따라 전산실험을 실시하고, 관측된 휨 값으로부터 휨과 설계변수들 간의 2차 반응표면함수를 추정하였다. 설계변수는 5개이므로 $k=5$ 이고, 각 설계변수의 실험수준은 Table 2와 같이 설정하였다. 2차 반응표면 모형을 추정하기 위해 Table 2의 설계변수들을 식 (3)에

Table 2 Design variables and their levels

Variables	Level 1	Level 2	Level 3
X (mm)	0.0	50.0	100.0
Th_{side1} (mm)	1.2	1.4	1.6
Th_{top} (mm)	1.2	1.5	1.8
t_{fill} (sec)	0.5	1.0	1.5
t_{pack} (sec)	2.0	4.0	6.0

Table 3 Results of the CCD experiment

(-1: Level 1, 0: Level 2, 1: Level 3)

Run	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	-1	-1	-1	-1	+1	0.661
2	+1	-1	-1	-1	-1	1.304
3	-1	+1	-1	-1	-1	0.07
4	+1	+1	-1	-1	+1	0.417
5	-1	-1	+1	-1	-1	0.662
6	+1	-1	+1	-1	+1	1.174
7	-1	+1	+1	-1	+1	0.370
8	+1	+1	+1	-1	-1	0.418
9	-1	-1	-1	+1	-1	0.437
10	+1	-1	-1	+1	+1	1.026
11	-1	+1	-1	+1	+1	0.286
12	+1	+1	-1	+1	-1	0.183
13	-1	-1	+1	+1	+1	0.576
14	+1	-1	+1	+1	-1	0.702
15	-1	+1	+1	+1	-1	0.471
16	+1	+1	+1	+1	+1	0.709
17	0	0	0	0	0	0.555
18	-1	0	0	0	0	0.221
19	+1	0	0	0	0	0.706
20	0	-1	0	0	0	0.983
21	0	+1	0	0	0	0.158
22	0	0	-1	0	0	0.476
23	0	0	+1	0	0	0.621
24	0	0	0	-1	0	0.680
25	0	0	0	+1	0	0.570
26	0	0	0	0	-1	0.590
27	0	0	0	0	+1	0.526

따라 선형 변환하여 새로운 독립변수 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 로 각각 치환하였다. 중심합성계획법에 의한 실험 조건과 그에 따라 Moldflow를 수행하여 얻은 휨 값은 Table 3과 같다. 여기에서 -1, 0, +1은 각각 설계변수의 1, 2, 3 수준값을 나타내고, 총 실험회수는 27회이다. Table 3의 실험 결과로부터 2차 모형의 회귀계수 β 에 대한 최소제곱추정치는 Minitab⁽¹⁷⁾을 이용하여 계산하였다. 추정된 회귀계수들을 식 (4)에 대입하면 변환 설계변수와 휨과의 근사적 반응표면함수식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 y = & 0.5409 + 0.1604x_1 - 0.2467x_2 + 0.0469x_3 - 0.0442x_4 \\
 & + 0.0504x_5 - 0.7930x_1x_1 + 0.0274x_2x_2 + 0.0054x_3x_3 \\
 & + 0.0823x_4x_4 + 0.0151x_5x_5 - 0.0838x_1x_2 - 0.0344x_1x_3 \\
 & - 0.0437x_1x_4 + 0.0291x_1x_5 + 0.0827x_2x_3 + 0.0896x_2x_4 \\
 & + 0.0192x_2x_5 + 0.0220x_3x_4 + 0.0112x_3x_5 + 0.0397x_4x_5
 \end{aligned} \tag{7}$$

4.4 최적 설계해의 탐색

추정된 식 (7)의 반응표면함수를 목적함수로하여 Table 2로 주어진 설계공간에 대해 최적 강건해를 탐색하였다. 탐색과정에서 잡음조건은 L_4 직교배열을 사용하여 모델링하였는데, Table 4는 잡음변수의 실험 수준값을 나타낸다. 난수발생기(random number generator)로 10개의 초기 후보해를 생성한 후 수정된 콤플렉스법을 사용하여 최적해를 탐색한 결과를 Fig. 3 과 Fig. 4에 보였다. Fig. 3은 단위 탐색회수(run number)에 따른 탐색해의 SN비 거동이고, Fig. 4는 다각형 탐색회수(iteration number)에 따른 다각형을 구성하는 후보해들의 평균 SN비 거동을 나

Table 4 Noise factors and their levels

Factors	Level 1	Level 2
t_{fill} (sec)	-0.1	+0.1
t_{pack} (sec)	-0.5	+0.5

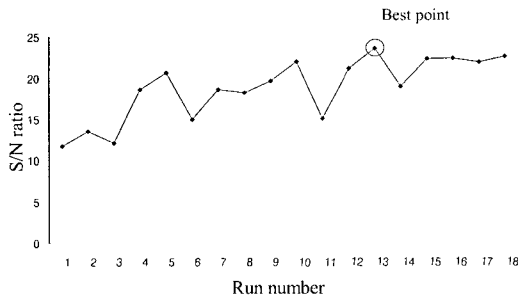


Fig. 3 S/N ratio versus run number for the Guide-ASF part

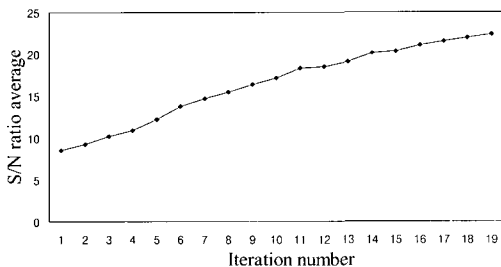


Fig. 4 S/N ratio average versus iteration number for the Guide-ASF part

Table 5 Optimization results

Design	Response surface method	CAE simulation
X (mm)	-0.897	10.0
Th_{side1} (mm)	0.994	1.590
Th_{top} (mm)	-0.852	1.244
t_{fill} (sec)	-0.091	0.950
t_{pack} (sec)	0.263	4.526
Warpage (mm)	average	0.066
	std. dev.	0.018
SN ratio	23.44	21.90

타낸 것이다. 탐색된 후보해 중 최대 SN비를 갖는 13번째 후보해를 최적해로 선택하였다. Table 5에 보인 것처럼 최적 강건해의 SN비는 23.44(dB), 휨의 평균은 0.066mm, 휨의 표준편차는 0.018mm 로 예측되었다. 한편 결정된 최적해에 대해 Moldflow를 수행한 결과 휨의 평균이 0.079mm, 휨의 표준편차가 0.017mm로 나타났으며, 이로부터 반응표면함수가 Moldflow 시뮬레이션 결과를 비교 적 잘 근사하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 절차로부터 구한 최적 강건설계해의 결과를 Table 1의 기존 설계 결과와 비교해 볼 때, 제안된 설계 절차를 적용한 경우 적은 횟수의 실험을 통해 제품의 벽 두께를 줄이면서도 윗면 휨의 평균과 표준편차를 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 설계공간으로 제품, 금형, 성형조건을 고려하여 사출성형 제품의 휨을 최소화하기 위한 최적 강건설계 방법을 개발하였다. 이를 위해 Taguchi에 의해 제안된 강건설계 개념과 전통적 최적해 탐색 절차를 상용 사출해석 시뮬레이션 툴과 통합하였다. 설계실험의 효율을 높이기 위해 예비실험을 통해 설계변수를 선정하고 선정된 설계변수에 대한 실험으로부터 반응표면모형을 구하였다.

제안된 설계 방법의 효용성을 보이기 위해 팩스머신의 주요 부품인 Guide-ASF 모델에 대하여 휨의 최적 강건설계를 수행하였다. 중심합성계획법에 따라 휨과 설계변수간의 2차 반응표면함수를 추정하고 최적화한 결과, 기존 설계해에 비해 제품의 벽 두께를 줄이면서도 휨이 크게 줄어든 강건한 설계해를 빠른 시간 내에 얻을 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 최적 강건설계 방법을 사출금형 설계에 적용할 경우 설계의 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 설계방법은 성형불량들을 적절히 정량화할 수만 있다면 휨 이외의 다른 성형불량에 대해서도 그대로 적용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1999년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

- (1) D. Yao, 1998, Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage and Weldlines in Injection Molded Parts, Masters Thesis, University of Massachusetts, MA., pp.40~43, pp.80~88.
- (2) M.S. Jacques, 1982, "An Analysis of Thermal Warpage in Injection Molded Flat parts Due to Unbalanced Cooling", Polymer Engineering and Science, Vol.22, No.4, pp.241~247.
- (3) I. Pandelidis and Q. Zou, 1990, "Optimization of Injection Molding Design, PartII: Molding Condition Optimization", Polymer Engineering and Science, Vol. 30, No. 15, pp.883~892.
- (4) 김석주, 1995, "유전알고리즘을 이용한 사출 성형 조건의 최적화", 석사학위논문, 서울대학교, pp.1~59.
- (5) 김영일, 1995, "유전알고리즘을 이용한 사출 성형 설계의 자동화", 박사학위논문, 서울대학교, pp.1~135.
- (6) K.D. Choi, N.C. Lee and S.K. Kim, 1994, "Optimization of Process Parameters of Injection Molding with Neural Network, Application in a Process Simulation Environment", CIRP Annals, Vol. 43, pp.449~452.
- (7) S.H. Dillman, D. Howe and H. Robar, 1996, "Optimization of the Injection Molding Process", SPE ANTEC Tech. Papers, Vol. 1, pp.754~757.
- (8) J.C. Park and B.H. Kim, 2000, "Automated Molding Design Methodology to Optimize Multiple Defects in Injection Molded Parts", International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.1, No.1, pp.133~145.
- (9) 박중천, B.H. Kim, 2000, "사출성형품의 휨과 웰드라인을 최적화하기 위한 자동 금형설계 방법", 한국소성가공학회지, 제9권, 제5호, pp.512~525.
- (10) W.Y. Fowlkes and C.M. Creveling, 1995, Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp.53~62, pp.312~325.
- (11) S.R. Schmidt and R.G. Launsby, 1997, Understanding Industrial Designed Experiments, Air Academy Press&Associates, Colorado, pp.4-1~4-20, pp.5-18~5-21, pp.5-65~5-71.
- (12) 박성현, 1995, 현대실험계획법, 민영사, pp.521~565.
- (13) 한형석, 박태원, 1996, "반응표면분석법을 이용한 기구의 강건설계", 한국정밀공학학회지, 제13권, 제10호, pp.56~61.
- (14) 한형석, 안형진, 박태원, 1996, "반응표면분석법을 이용한 VTR Deck 캠의 최적형상설계", 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제3호, pp.788~795.
- (15) G.V. Reklatis, A. Ravindran, and K.M. Ragsdell, 1983, Engineering Optimization Methods and Applications, John Wiley&Sons Inc., New York, pp.268~277.
- (16) Moldflow Pty. Ltd., 1996, Moldflow user's manual.
- (17) 이레테크, 2000, MINITAB 실무 완성.