

TOPSIS와 콤플렉스법에 의한 사출성형품의 다속성 강건설계

박종천*, 김기범**, 김경모***

Robust Design for Multiple Quality Attributes in Injection Molded Parts by the TOPSIS and Complex Method

Jong Cheon Park*, Ki Bum Kim** and Kyung Mo Kim***

ABSTRACT

An automated injection molding design methodology has been developed to optimize multiple quality attributes, which are usually in conflict with each other, in injection molded parts. For the optimization, commercial CAE simulation tools and optimization techniques are integrated into the methodology. To deal with the multiple objective problem, the relative closeness computed in TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) is used as a performance measurement index for optimizing multiple part defects. To attain robustness against process variation, Taguchi's quadratic loss function is introduced in the TOPSIS. Also, the modified complex method is used as an optimization tool to optimize objective function. The verification of the developed design methodology was carried out on simulation software with an actual model. Applied to production, this methodology will be useful to companies in reducing their product development time and enhancing their product quality.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Multi-attribute Design Problem(다속성 설계문제), TOPSIS, Taguchi Methods(다구찌 방법), Complex Method(콤플렉스법), Warp(휨), Weld Line(웰드라인)

1. 서론

사출성형 제품의 품질을 좌우하는 주요 성형결함으로는 휨(warpage), 웰드라인(weld line), 수축(shrinkage), 싱크마크(sink mark), 플로우마크(flow mark), 플래시(flash) 등이 포함된다^[1]. 이러한 성형결함들의 발생은 일반적으로 수지(material), 제품(part), 금형(mold), 그리고 공정조건(process conditions)에 의해 결정된다. 따라서 성형결함이 최

소화되는 고품질의 제품을 얻기 위해서는 수지, 제품, 금형, 공정조건과 관련된 설계변수들에 대한 최적설계가 이루어져야 한다. 그러나 이들 설계변수와 성형결함들간에는 매우 복잡한 비선형적 함수 관계가 있어서 숙련된 설계자라 하더라도 성형결함이 최소화될 수 있는 최적의 설계변수값을 찾기란 매우 어렵다^[2]. 최근 들어 사출성형 해석용 소프트웨어를 이용하여 설계단계에서 성형결함의 발생 여부를 예측할 수 있게 되었으나^[2-12], 최적설계에 이르기에는 여전히 많은 문제점들이 남아있다. 먼저, 현재의 상용

** 2001년 7월 26일 접수

* 금오공과대학교 기계공학부

** 금오공과대학교 대학원 기계공학과

*** 금오공과대학교 신소재시스템공학부(산위시스템전공)

해석 소프트웨어는 제품 품질에 대한 최적 설계해를 직접적으로 제시해 주지는 못하고 있다. 따라서 아직도 대부분의 설계자들은 해석용 소프트웨어를 시행착오적 방식에 따라 사용하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 방식으로는 신속한 설계가 이루어지기가 어렵고 최적해를 보장받을 수도 없다.

한편 사출성형 공정은 내재적으로 공정조건변동(process variation)이 매우 심하고, 이를 완전히 제거하기가 어렵다. 이러한 공정변동으로 인해 결국 최종 제품내의 성형결함의 크기도 변동되므로 최적설계의 어려움은 더욱 커진다. 따라서 사출성형 공정설계에서는 공정변수의 변동에 대해서도 성형결함을 나타내는 설계속성(design attribute) 값의 변동이 작게 되는 설계해를 구하는 설계방법이 요구되는데, 이러한 설계를 강건설계(robust design)^[13-14]라 한다.

또한 사출성형 공정에서는 제품내에 다른 유형의 성형결함들이 동시에 발생하는 경우가 많다. 특히 이들 성형결함은 그 거동이 서로 충돌(conflict)하는 경우가 자주 나타나는데, 이것들을 동시에 제어하여 최적화하는 일은 매우 어렵다. 이러한 다수 성형결함의 최적화를 위해서는 각 설계속성들을 설계자의 의도대로 절충(tradeoff)하는 방안이 반드시 필요하다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 사출성형 제품 및 공정의 설계과정에서 서로 충돌하는 다수의 성형결함 속성을 동시에 최적화하는 자동 강건설계방법을 개발하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 다속성 설계에 사용되는 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)^[15-17]와 설계자의 애매한 선호도(preference)를 계량화하는 퍼지 다속성 의사결정방법(fuzzy multi-attribute decision making)을 이용하고, 설정된 설계영역 내에서 최적해를 직접적으로 탐색하는 콤플렉스법(complex method)을 상용 사출성형 시뮬레이션 툴(simulation tools)과 통합하여 최적 강건설계해를 탐색하는 새로운 설계절차를 개발하였다. TOPSIS는 설계대안(design alternative)의 이상해에 대한 상대적 근접도를 이용하여 설계대안을 평가하는 방법이다. 퍼지 다속성 의사결정법에서는 언어적 형태로 표현되는 설계속성에 대한 설계자의 불확실한 선호도로부터 각 설계속성의 상대적 중요도를 결정한다. 또한 본 연구에서는 강건한 설계해를 구하기 위해 다양한 잡음조건 하에서 얻어진 설계속성 데이터로부터 평균손실^[13-14]을 계산하고 이들로 TOPSIS 의사결정행렬을 구성한다. 즉 설계속성의

평균손실들로 구성된 의사결정행렬로부터 TOPSIS 값을 구하고, 이것을 강건해를 구하기 위한 목적함수값으로 사용한다. 따라서 최적 강건설계를 얻기 위해 전체 설계공간에서 탐색 알고리즘에 따라 후보 설계해 집합, 즉 설계대안들을 생성하고 이것들에 대한 의사결정행렬을 반복적으로 생성해 가면서 상대적으로 최대 TOPSIS 값을 갖는 설계해를 탐색하게 된다. 탐색 알고리즘은 직접탐색법(direct search method)인 콤플렉스법을 설계문제에 적합하도록 수정하여 사용하였다.

개발된 설계절차를 상용 캔(can) 모델에 적용하여 이 모델의 중요한 성형결함인 휨과 웰드라인에 대한 최적 강건설계해를 결정하였다. 시뮬레이션에 의해 기존 설계와 비교한 결과 상당히 만족스러운 설계해를 얻었으며 본 설계 방법이 실제 문제에 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 다속성 최적설계

2.1 다속성 의사결정

일반적으로 대부분의 공학적 설계문제는 상충하는 다수 설계속성을 동시에 최적화하는 다속성 의사결정문제이다. 사출성형 설계의 경우에서도 휨과 웰드라인 등과 같은 설계속성들을 동시에 최적화하는 설계가 필요하며, 이 과정에서 상충하는 설계속성들을 설계의도(design intent)에 따라 적절히 절충하여야 한다. 다속성 의사결정문제는 설계속성의 절충에 의해 각 설계대안의 다수 속성에 대한 평가치를 하나의 상위평가기준(super criterion)으로 통합함으로써 단일 속성 의사결정문제로 변환된다^[18-19]. 본 연구에서도 다수 속성에 대한 평가치를 상위평가기준인 TOPSIS 값으로 통합하여 단일 속성 설계문제로 변환한 다음 최적해를 구한다.

2.2 퍼지 다속성 의사결정

TOPSIS와 같은 다수 속성에 대한 단일 상위평가치를 얻기 위해서는 설계속성들의 상대적 중요도가 결정되어야 한다. 그러나 설계자의 입장에서 각 속성의 상대적 중요도를 명확한 수치로 부여하기보다는 애매한 언어적 표현형태로 부여하는 것이 더 실제적이다. 따라서 상대적 중요도에 대한 설계자의 불확실한(uncertain) 평가로부터 각 속성의 중요도를 수치적으로 추정할 수 있는 수단이 필요하다.

Chen과 Hwang^[15]은 설계자가 언어적 표현형태

Table 1 Crisp scores of fuzzy numbers

Scale	1	2	3	4	5	6	7	8
No. of terms used	two	three	five	five	six	seven	nine	eleven
1. extremely high								0.954
2. very high			0.909		0.917	0.909	0.917	0.864
3. high-very high							0.875	0.701
4. high	0.750	0.833	0.717	0.885	0.750	0.773	0.750	0.667
5. fairly high				0.700	0.584		0.630	
6. mol high						0.637		0.590
7. medium	0.583	0.500	0.500	0.500		0.500	0.500	0.500
8. mol low						0.363		0.410
9. fair low				0.300	0.416		0.370	
10. low		0.166	0.283	0.115	0.250	0.227	0.250	0.333
11. low-very low							0.125	0.299
12. very low			0.091		0.083	0.091	0.083	0.136
13. none								0.046

로 부여한 각 설계속성의 상대적 중요도를 Table 1을 이용하여 수치적으로 나타내는 방법을 제시하였다. 본 연구에서도 설계속성들의 중요도를 결정하는 과정에 이를 사용한다. Table 1의 유도 과정과 적용 절차에 대해서는 참고문헌 [15]를 참조하길 바란다. Chen과 Hwang의 상대적 중요도 결정 절차는 다음과 같다. 첫째, 설계속성들의 상대적 중요도를 언어적 형태로 표현한다. 둘째, 설계자가 선택한 언어적 표현에 부합하는 변환 척도(scale), 즉 퍼지 숫자(fuzzy numbers)를 찾는다. 이때 하나 이상의 척도가 존재하면, 그 중 가장 작은 숫자의 척도를 선택한다. 셋째, 선택된 변환 척도에 보통점수(crisp scores)를 부여한다. 마지막으로 보통점수를 정규화하여 각 속성의 상대적 중요도를 얻는다. 예를 들어 설계자에 의해 세 가지 속성의 중요도가 “매우 높음(very high)”, “중간(medium)”, “낮음(low)”으로 표현되었다고 하면, Table 1에서 척도 3, 6, 7, 8이 세 가지 중요도를 모두 포함하고 있으므로 이들 중 가장 작은 숫자인 3이 변환 척도가 된다. 이때 세 가지 속성에 대응하는 보통점수는 0.909(very high), 0.500(medium), 0.283(low)이며, 정규화된 상대적 중요도는 최종적으로 0.537, 0.296, 0.167이 된다.

2.3 TOPSIS

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)는 Hwang과 Yoon^[16]에 의해 제안된 다속성 평가척도로서, 최적해는 이상해(ideal solution)로부터는 가장 가깝고 반이상해(negative-ideal solution)로부터는 가장 멀어야 한다는 논리로부터 정의된 것이다. 각 속성별로 이상해

와 반이상해는 선택 가능한 설계대안들 중에서 가장 좋은 평가치(performance)를 갖는 설계대안과 가장 나쁜 평가치를 갖는 설계대안으로 각각 정의한다. 기하학적으로 볼 때 한 속성에 대한 이상해와 가장 가까운 설계대안이라도 다른 속성의 반이상해에 가까울 수가 있다. 따라서 TOPSIS는 이상해와 반이상해를 동시에 고려하여 상대적 근접도(relative closeness)를 산출한다.

예를 들어 다음과 같은 의사결정행렬을 가정하자.

$$D = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

여기서 A_i ($i=1,2,\dots,m$)는 선택 가능한 설계대안, X_j ($j=1,2,\dots,n$)는 설계속성, x_{ij} 는 A_i 의 X_j 에 대한 평가치이다. 위의 의사결정행렬에 대해 각 설계대안의 TOPSIS 값은 다음과 같이 계산된다.

[단계1] 정규화된 의사결정행렬, $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, 을 계산한다.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

[단계2] 속성의 상대적 중요도를 고려한 정규화된 의사결정행렬, $V = [v_{ij}]_{m \times n}$, 을 계산한다.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}, \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

여기서 w_j 는 j 번째 속성의 상대적 중요도이며 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 이다. 본 연구에서는 Chen과 Hwang에 의해 제시된 절차를 사용하여 w_j 를 결정한다.

[단계3] 이상해와 반이상해를 결정한다. 본 연구에서 고려되는 설계속성, 즉 성형결합은 작을수록 좋으므로 이상해와 반이상해는 다음과 같이 구한다.

(a) 이상해

$$A^+ = \{ \min v_{ij} \mid i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \} = \{ V_1^+, V_2^+, \dots, V_j^+, \dots, V_n^+ \} \quad (4)$$

(b) 반이상해

$$A^- = \{ \max v_{ij} \mid i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \} = \{ V_1^-, V_2^-, \dots, V_j^-, \dots, V_n^- \} \quad (5)$$

[단계4] 거리척도를 계산한다. i 번째 설계대안의 이상해로부터의 거리 S_i^+ 와 반이상해로부터의 거리 S_i^- 은 다음과 같다.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - V_j^+)^2}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - V_j^-)^2}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (7)$$

[단계5] 이상해에 대한 상대적 근접도(TOPSIS 값)를 구한다. A^* 에 대한 A_i 의 상대적 근접도는 다음과 같다.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (8)$$

3. 강건설계

강건한 설계해는 제어할 수 없는 변동원인(즉, 잡음)에 대해 성능변동이 작음을 의미한다. 내재적으로 사출성형 공정은 심한 공정 변동성을 갖는다. 이것은 설정된 성형조건들이 공정이 진행되는 동안 높은 공차 범위 내에서 유지되기 어렵기 때문이며 이로 인해 목표치로부터 심각한 성능변동이 유발되어 사출성형품의 품질이 저하될 수 있다. 따라서 사출성형 공정에서는 강건성을 갖는 설계해를 찾는 것이 품질향상을 위해 매우 중요하다.

사출품의 성형결함은 작을수록 좋은 망소특성으로서 평균손실은 다음 식 (9)와 같으며, 평균손실이 작을수록 강건한 설계해가 된다.

$$x_{ij} \propto \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_{ijl}^2 \quad (9)$$

여기서 x_{ij} 는 i 번째 설계대안의 j 번째 속성에 대한 평균손실, L 은 잡음조건 수, y_{ijl} 는 설계대안 i 와 잡음조건 l 에서 속성 j 의 관측치이다. 본 연구에서 공정변동은 잡음인자를 직교배열표(orthogonal arrays)^[13-14]에 배치하여 모형에 고려되며, 의사결정행렬은 잡음에 의한 설계속성의 변화에 따라 결정되는 평균손실로 구성하였다.

4. 최적해 탐색

본 연구에서는 최적 강건해를 직접탐색법의 하나인 콤플렉스법(complex method)^[20]을 일부 수정하

여 탐색한다. 콤플렉스법은 설계변수가 k 개일 때 임의로 생성된 $2k$ 개의 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 반복하면서 최적해를 결정한다. 콤플렉스법을 적용하기 위해서는 먼저 설계변수와 설계범위, 잡음변수와 수준을 결정한다. 이때 최적해 탐색공간은 각 설계변수의 설계범위로부터 설정된다. 일단 탐색공간이 정해지면 최적해의 탐색은 다음 단계에 의해 수행된다.

[단계1] 탐색공간 안에서 $2k$ 개(k : 설계변수의 총수)의 초기 후보해 P_i ($i=1,2,\dots,2k$)를 임의로 생성한다. 여기서 각 후보해는 의사결정행렬의 선택 가능한 설계대안에 해당된다.

[단계2] 초기 후보해들에 대해 각 잡음조건에 따른 설계속성 값을 시뮬레이션으로 구하고, 이로부터 각 속성에 대한 평균손실을 계산하여 의사결정행렬을 구한다.

[단계3] 각 속성의 상대적 중요도가 부여된 정규화된 의사결정행렬을 구한다. 이때 각 속성의 중요도는 퍼지 다특성 의사결정 과정에 의해 결정된다.

[단계4] 각 후보해에 대해 TOPSIS 값을 구한다. 이 TOPSIS 값이 각 후보해의 목적함수값 f_i ($i=1,2,\dots,2k$)가 된다.

[단계5] $2k$ 개의 후보해 중 가장 작은 목적함수값 f_v 를 갖는 후보해 P_v 를 나머지 후보해들의 무게중심 P_c 방향으로 투사한 새로운 후보해 P_w 를 식 (10)을 사용하여 생성한다.

$$P_w = P_c + \alpha(P_c - P_v) \quad (10)$$

여기에서 α 는 투사율(reflection factor)로서 Box^[20]가 추천한 $\alpha=1.3$ 을 사용한다.

[단계6] P_w 에서 평균손실을 계산하고 P_v 를 P_w 로 바꾼 새로운 다각형, 즉 새로운 의사결정행렬을 구성한 후 각 후보해의 TOPSIS값을 다시 계산한다.

(a) 만약 P_w 가 탐색공간에 속하지 않으면 속할 때까지 α 값을 5%씩 감소시켜 가면서 P_w 를 P_c 방향으로 반복적으로 후퇴시켜 나간다.

(b) 만약 P_w 가 탐색공간에 속하고 P_w 에서의

TOPSIS 값(f_w)이 새로운 의사결정행렬 내의 최소 TOPSIS 값(f_{min})에 해당되면 P_w 를 무게중심 P_c 방향으로 $\overline{P_c P_w}$ 의 1/2 만큼 후퇴시켜 새로운 P_w 를 얻고 단계6을 되풀이한다. 이 과정을 $f_w > f_{min}$ 이 만족될 때까지 반복한다. 본 연구에서는 콤플렉스법을 수정하여 후퇴과정에서 최대 4점까지만 목적함수값을 계산하는데 그 때까지도 $f_w = f_{min}$ 이면 P_w 을 P_c 로 교체하여 단계6을 수행한다.

(c) 만약 P_w 가 탐색공간에 속하고 $f_w > f_{min}$ 이면 단계5 이하를 다시 수행한다.

[단계7] 탐색 종료조건을 조사한다. 만약 종료조건이 만족되면 탐색을 중지하고, 그렇지 않다면 단계5로 가서 탐색을 계속한다. 여기에서는 과도한 탐색을 방지하기 위해 탐색회수의 상한치를 설정하고 이에 도달하면 탐색을 종료하거나 또는 설계자의 판단에 따라 일정 횟수 이상의 새로운 다각형 생성에도 불구하고 동일 후보해가 계속해서 최적해로 선정될 때에도 탐색을 종료하도록 하였다.

5. 설계 적용

Fig. 1에 보인 capacitor can 모델^[2]에 대해 본 연구에서 제안한 최적설계 절차를 적용하였다. 사용수지는 PP/HUNTSMAN CHEM/P4-011이고 해석 소프트웨어로 Moldflow^[21]를 사용하였다. 이 모델은 얇은 두께(1.52mm)의 세 벽면, 즉 그림에서 윗면(H-F-J-M-H면), 아랫면(G-E-I-N-G면), 그리고 옆면(G-H-M-J-I-N-G면)으로 구성된 두경 형상의 제품이다. 모델의 폭 길이(\overline{HI})는 38mm, 높이(\overline{GH}) 11mm, 옆면 직선부 길이(\overline{AO}) 14mm, 게이트(gate)가 위치할 옆면 중심선의 길이(\overline{AOB})는 44mm이다. 원래 설계에서 이 모델은 Table 2와 같이 게이트 위치 $X=3.5\text{mm}$ 에서 옆면에 에어트랩(air trap)이 동반된 15.5mm의 긴 웰드라인(weld line)과 0.52mm 크기의 휨(warpage)이 발생하였으나 웰드라인을 우선적으로 제거할 필요가 있었다. Fig. 2(a)^[2]는 충전과정 중 모델의 옆면에서 유동선단(melt front)이 진행하는 과정을 도시한 것으로 결과적으로 긴 웰드라인이 발생하고 있다. 웰드라인을 제거하기 위해 Yao^[2]는 게이트의 위치(X)만을 설계변수로 하여 최적화하였으며, 그 결과 Table 3에서와 같이 $X=11.5\text{mm}$ 에서

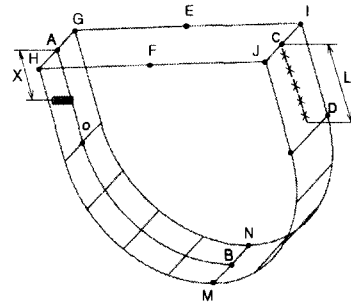


Fig. 1 3-D view of the capacitor can. Variable X is the gate location, which can be located on the line AOB. L is the weld line length

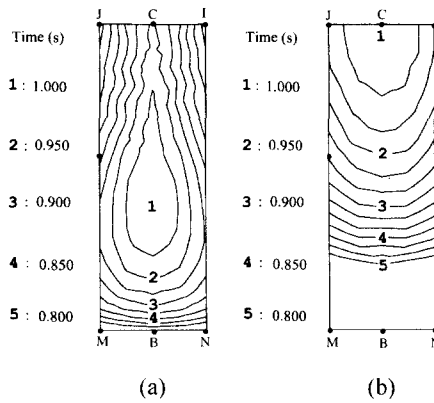


Fig. 2 Melt front movement for the original design (a) and Yao's optimized design (b) of the can

웰드라인과 에어트랩은 제거되었으나 휨은 오히려 더 커졌다. Fig. 2(b)^[2]는 최적설계의 결과로 얻은 유동선단의 진행과정으로 웰드라인이 제거되고 있음을 보이고 있다. Yao는 이 모델에서 휨의 크기를 can의 열린 단면의 변형 후 양쪽 모서리 절점에서의 수직 변위에 대한 가운데 절점에서의 상대적 수직 변위, 즉 $(\overline{GH} + \overline{IJ})/2 - \overline{EF}$ 로 나타내고, 웰드라인의 크기는 모델 옆면에서 유동 선단들이 만나는 유한요소 절점들 간의 길이의 합으로 계산하였다.

본 설계예에서는 위의 모델에 대해 다속성 최적설계 방법을 적용하여 서로 충돌하는 휨과 웰드라인을 동시에 최적화하였다. 먼저 제품, 금형, 공정 조건과 관련된 설계변수들에 대해 L_{12} 직교배열을 이용한 예비실험을 수행하여 설계속성에 영향력이 큰 설계변수들을 결정하였다. Table 4는 선정된 설

Table 2 Results of the original design for the can (unit:mm)

Design	Gate location X	Experimentation	
		Weld line	Warpage
Original	3.5	15.5	0.52

Table 3 Results of the optimized design by Yao for the can (unit: mm)

Design	Gate location X	Simulation		Experimentation	
		Weld line	Warpage	Weld line	Warpage
Optimized	11.5	0.0	0.664	0.0	0.70

Table 4 Design factors and their levels

Design factor	Lower limit	Upper limit
Gate location(mm)	0.0	40.2
Fill time(sec)	0.5	1.5
Side thickness(mm)	1.0	2.0
Top-bottom thickness(mm)	1.0	2.0
Pack time(sec)	2	8
Melt temperature(°C)	190	230
Mold temperature(°C)	20	60
Pack pressure(MPa)	10	40

Table 5 Noise factors and their levels

Noise factor	Level 1	Level 2
Fill time(sec)	-0.1	+0.1
Cooling time(sec)	-1	+1
Pack time(sec)	-1	+1
Melt temperature(°C)	-5.0	+5.0
Mold temperature(°C)	-5.0	+5.0
Pack pressure(%)	-10	+10

계변수와 실험범위를 나타내고, Table 5는 잡음변수와 그 수준을 나타낸다. F 검증 결과, 냉각 시간(cooling time)은 유의하지 않은 것으로 판단하여 설계변수에서는 제외하되, 본 실험에서는 예비실험에서 사용한 1, 2 수준의 평균값(7sec.)을 공칭값으로 사용하였다. 결정된 설계변수와 잡음변수를 이용하여 설계변수의 실험범위로 정의된 탐색공간 내에서

컴플렉스법을 사용하여 최적 강건해를 탐색한다. 여기에서는 설계변수가 총 8개이므로 16개의 초기 후보해를 난수발생기를 사용하여 생성하였다. 각 후보해에 대해 잡음인자를 L_8 직교배열에 배치하여 잡음조건을 설정한 후 시뮬레이션을 수행하여 휨과 웰드라인 값을 얻고 이로부터 휨과 웰드라인에 대한 평균손실을 계산하였다. 두 속성의 평균손실로 구성된 의사결정행렬을 정규화하고 속성의 상대적 중요도를 부여한다. 설계자의 공학적 판단에 따라 웰드라인의 중요도는 높음(high), 휨은 보통(medium)의 중요도를 갖는다고 가정하였다. Chen과 Hwang의 절차에 따라 이 모델의 웰드라인과 휨의 상대적 중요도는 각각 0.563과 0.437로 결정되었다. 의사결정행렬로부터 각 후보해의 TOPSIS 값을 계산하고, 이것들을 꼭지점으로 하는 첫 번째 다각형(1st iteration)을 생성한다. 첫 번째 다각형에 대해 콤플렉스법을 적용하여 새로운 의사결정행렬, 즉 새로운 다각형을 계속해서(2nd iteration, 3rd iteration, ...) 탐색해 나간다.

본 연구에서는 위의 과정에 따라 총 42번의 다각형 탐색을 실시하였다. 탐색이 진행될수록 다각형을 구성하는 각 후보해들의 평균손실이 감소하여 해의 질이 개선됨을 알 수 있었다. 탐색 결과, 35번째 이후의 다각형 탐색 과정에서 최적해를 선정할 수 있었다. Table 6과 Table 7은 각각 35번째와 마지막 42번째 의사결정행렬에 대한 TOPSIS 값이다. Table 6과 7에서 왼쪽 열의 번호는 다각형을 구성하는 후보해의 일련 번호이고 괄호 안의 번호는 전체 탐색과정에서 후보해가 생성된 순서이다. 여기에서 35번째 얻은 의사결정행렬에서 14번 후보해가 TOPSIS 값이 1로서 최대값을 가졌고 이 후보해가 그 후의 42번째 의사결정행렬까지도 계속해서 최대 TOPSIS 값을 유지하는 것으로 나타나 본 설계예에서는 이것을 최적 강건해로 선정하였다. Table 8은 선정된 최적해에 대한 휨과 웰드라인의 평균과 표준편차이고, Table 9는 최적 설계변수값이다. 결정된 최적 강건해를 Table 2의 기존 설계해와 비교해 볼 때 웰드라인은 완전히 제거되었으며, 웰드라인만을 최적화한 Yao의 설계해와 비교해서는 휨이 다소 개선되었다. 이는 본 설계 예에서 웰드라인과 휨에 대한 상대적 중요도를 각각 높음(high)과 보통(medium)으로 설정한 것에 기인한 것이며, 이 점을 고려하면 기존의 두 설계해와 비교

하여 두 속성이 적당히 절충된 것으로 볼 수 있다.

Table 6 Results of 35th iteration

Point	Si*	Si-	Ci*
1(42)	0.0222	0.0180	0.4475
2(43)	0.0271	0.0131	0.3252
3(44)	0.0147	0.0254	0.6330
4(41)	0.0254	0.0148	0.3684
5(37)	0.0402	0.0000	0.0000
6(34)	0.0135	0.0267	0.6639
7(35)	0.0072	0.0329	0.8196
8(46)	0.0211	0.0190	0.4736
9(39)	0.0189	0.0213	0.5298
10(36)	0.0294	0.0108	0.2677
11(48)	0.0202	0.0200	0.4980
12(49)	0.0283	0.0119	0.2961
13(45)	0.0285	0.0117	0.2901
14(51)	0.0000	0.0402	1.0000
15(22)	0.0335	0.0066	0.1649
16(47)	0.0236	0.0165	0.4117

Table 7 Results of 42nd iteration

Point	Si*	Si-	Ci*
1(42)	0.0235	0.0052	0.1813
2(43)	0.0287	0.0000	0.0000
3(44)	0.0156	0.0131	0.4562
4(41)	0.0269	0.0018	0.0640
5(52)	0.0125	0.0162	0.5659
6(34)	0.0143	0.0144	0.5020
7(35)	0.0077	0.0210	0.7327
8(46)	0.0224	0.0063	0.2199
9(39)	0.0200	0.0087	0.3033
10(56)	0.0142	0.0145	0.5058
11(48)	0.0214	0.0073	0.2561
12(58)	0.0098	0.0189	0.6596
13(57)	0.0171	0.0116	0.4046
14(51)	0.0000	0.0287	1.0000
15(53)	0.0160	0.0127	0.4442
16(47)	0.0250	0.0037	0.1282

Table 8 Results of the weld line and warpage optimization for the can

Design	Warpage(mm)		Weldline
	Mean	Standard deviation	Mean
TOPSIS	0.552291	0.054337	0

Table 9 Process conditions for the best optimal robust design solution for the can

Design factor	values
Gate location(mm)	27.23
Fill time(sec)	1.42
Side thickness(mm)	1.24
Top-bottom thickness(mm)	1.95
Pack time(sec)	7.11
Melt temperature(°C)	211.89
Mold temperature(°C)	57.12
Pack pressure(MPa)	35.55

6. 결론

본 연구에서는 플라스틱 사출성형품의 다수 성형결함을 동시에 최적화할 수 있는 다속성 최적 강건설계법을 개발하였다. 상충하는 개별 설계속성들의 평가치를 단일한 평가척도로 변환하기 위해 퍼지 다속성 의사결정법과 TOPSIS를 이용하였다. 또한 강변동에 강건한 설계해를 구하기 위해서 잡음인자를 고려하였으며 잡음으로 인한 설계속성의 평균손실로 TOPSIS 의사결정행렬을 구성하였다. 최적해를 자동으로 탐색하기 위해 직접탐색법의 일종인 콤플렉스법을 일부 수정하여 사용하였다.

제안된 설계 방법의 유용성을 확인하기 위해 상용 캔(can) 모델에 대해 최적 강건설계 방법을 적용해 보았다. 그 결과 기존의 설계해들에 비해 개선된 최적 설계해를 찾을 수 있었으며, 특히 두 설계속성인 웰드라인과 휨이 설정된 상대적 중요도에 의해 적절히 절충될 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 개발된 설계방법을 실제 사출금형 설계에 적용할 경우, 강건한 설계해를 빠른 시간 내에 찾을 수 있어서 설계의 효율과 제품의 품질을 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

1. E.C. Bernhardt, CAE-Computer Aided Engineering for Injection Molding, Hanser

- Publishers, New York, pp. 275~324, pp. 343~344, 1983.
2. D. Yao, Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage and Weldlines in Injection Molded Parts, Masters Thesis, University of Massachusetts, MA., pp. 40~43, pp. 60~61, pp. 80~88, 1998.
 3. M.S. Jacques, "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, 1982.
 4. M. Rezart and R.O. Stafford, "A Thermoviscoelastic Model for Residual Stress in Injection Molded Plastics," Polymer Engineering and Science, Vol. 31, No. 6, pp. 393~398, 1991.
 5. I. Pandelidis and Q. Zou, "Optimization of Injection Molding Design, PartII: Molding Condition Optimization," Polymer Engineering and Science, Vol. 30, No. 15, pp. 883~892, 1990.
 6. 김석주, 유전 알고리즘을 이용한 사출 성형 조건의 최적화, 석사학위논문, 서울대학교, pp. 1~59, 1995.
 7. 김영일, 유전 알고리즘을 이용한 사출 성형 설계의 자동화, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 1~135, 1995.
 8. G.H. Choi, K.D. Lee, N. Chan and S.K Kim, "Optimization of Process Parameters of Injection Molding with Neural Network, Application in a Process Simulation Environment," CIRP Annals, Vol. 43, pp. 449~452, 1994.
 9. S.H. Dillman, D. Howe and H. Robar, "Optimization of the Injection Molding Process," SPE ANTEC Tech. Papers, Vol. 1, pp. 754~757, 1996.
 10. B.H. Lee and B.H. Kim, "Variation of Part Wall Thicknesses to Reduce Warpage of Injection Molded Part-Robust Design Against Process Variability," Polym.-Plast. Tech. Eng., Vol. 36, No. 5, pp. 791~807, 1997.
 11. Jong Cheon Park and Byung H. Kim, "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, 2000.
 12. 박종천, Byung H. Kim, "사출성형품의 휨과 웰드라인을 최적화하기 위한 자동 금형설계 방법," 한국소성가공학회지, 제9권, 제5호, pp. 512-525, 2000.
 13. W.Y. Fowlkes and C.M. Creveling, Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 53~62, pp. 312~325, 1995.
 14. S.R. Schmidt and R.G. Launsby, Understanding Industrial Designed Experiments, Air Academy Press& Associates, Colorado, pp.4-1~4-20, pp. 5-18~5-21, pp. 5-65~5-71, 1997.
 15. S. J. Chen and C. L. Hwang, Fuzzy Multiple Attribute Decision Making-Methods and Application, Springer-Verlag, New York, 1992.
 16. C.L. Hwang and K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications, A State-of-the Art Survey, Springer-Verlag, New York, 1981.
 17. L.I. Tong and C.-T. Su, "Optimizing Multi-Response Problems in the Taguchi Method by Fuzzy Multiple Attribute Decision Making," Quality and Reliability Engineering International, Vol. 13, pp. 25-34, 1997.
 18. S. Gold and S. Krishnamurty, "Trade-offs in Robust Engineering Design," Proceedings of ASME-DETC'97, Sacramento, CA, pp. 1~8, 1997.
 19. A. Kunjur and S. Krishnamurty, "A Robust Multi-Criteria Optimization Approach," Mech. Mach. Theory, Vol. 32, No. 7, pp. 797~810, 1997.
 20. G.V. Reklatis, A. Ravindran, and K.M. Ragsdell, Engineering Optimization Methods and Applications, John Wiley&Sons Inc., New York, pp. 268~277, 1983.
 21. Moldflow, User's manual, Moldflow Pty. Ltd., 1996.