

쌍대비교에 기초한 다속성 효용함수의 결정 및 사출성형설계에 대한 응용

박종천* · 김경모**
(2003년 2월 17일 접수)

Determination of a Multiattribute Utility Function Based on the Pairwise Comparison and the Application to Injection Molding Design

J. C. Park and K. M. Kim

Abstract

Engineering design can be viewed as a decision making process, which involves the nonlinear tradeoffs task among the multiple conflicting attributes and considers the robustness of design. In order to obtain best engineering design, methodology for accurate assessment of his/her preference about the multiple attributes is required. Conventionally, intuitive procedures based on lottery questions are used to elicit the designer's preference structure; however, they can lead to inconsistent and inexact preference results due to the rank reversal problems derived from the designer's big cognitive burden. In this paper, alternatively, a design methodology based on multiattribute utility function through the pairwise comparison among alternatives is presented. The proposed procedure is applied to an actual injection mold design with the aid of the CAE simulation and the result is discussed.

Key Words : Multiattribute Utility(MAU) Function, Pairwise Comparison, Injection Molding, Weldline, Warpage, Complex Method, Robustness

1. 서론

일반적으로 공학적 설계에서기는 기술적 또는 경제적 평가와 관련된 다수의 상충된 설계 속성이 관여된다. 이 경우 설계자는 제약조건을 만족시키기는 설계영역 내에서 다수 설계 속성간의 절충(tradeoffs)을 통하여 최

적 설계해를 구하게 된다. 아울러 최종적으로 제조된 제품의 품질문제를 고려한다면 잡음변수의 영향을 고려하는 강건설계(robust design)가 필요하다.⁽¹⁾ 따라서 일반적인 설계문제는 기존의 최적화 기법의 단순한 적용대상이 아니라, 강건설계개념이 필요한 동시에 다수의 설계 속성이 관련된 의사결정문제(decision making

* 남요공과대학교 기계공학부

** 남요공과대학교 신소재시스템공학부(산업시스템전공)

problem)라고 할 수 있다.

효용이론(utility theory)은 의사결정문제의 해결에 널리 사용되는 방법으로 그 동안 공학적 설계문제에 성공적으로 적용되어 왔다.⁽²⁻³⁾ 이 경우의 주된 문제는 설계 목표에 입각한 적절한 다속성 효용함수를 찾는 것이며, 설계자는 다수의 복권(lottery) 질문에 대한 답을 통하여 자신의 속성치에 대한 선호도(preference)를 나타낸다. 그러나, 복권 질문에 대해 설계자가 정확하고 일관성 있는 답을 하기는 매우 어려워 효용함수를 구하는데 있어 필연적으로 모순이나 비전이성(intransitivity)과 같은 선호도 오류(preference error)를 일으킨다.⁽¹⁾ 이러한 오류의 문제는 설계속성의 수가 증가할수록 발생 가능성이 높아지므로 선호도 오류를 줄일 수 있는 다속성 효용함수의 결정방법이 필요하다.

AHP(Analytic Hierarchy Process)⁽⁴⁾에서는 설계자의 선호정보를 획득하는데 쌍대비교(pairwise comparison) 질문을 사용한다. AHP는 주어진 대안들에서 최선의 대안을 선택하는 방법으로 선택 가능한 대안의 수가 무한대인 설계문제에는 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 효용이론의 관점에서 본다면 복권 질문은 설계대안에 대한 절대적 효용값에 대한 질문이며 쌍대비교 질문은 주어진 설계대안들에 대한 선호순서와 선호강도를 묻는 질문으로서 설계대안에 대한 상대적 효용값에 대한 질문이다. 대안의 선호순서에 대한 답변은 합리적 설계자라면 일관성 있는 답변을 할 수 있을 것이다. 선호강도에 대한 답변은 선호순서에 비해 인식적 부담이 클 수가 있다. 그러나, Satty가 제안한 AHP 절차에서 사용하는 9점 척도⁽⁴⁾를 변형하여 사용하면 복권질문에 비교해서 상대적으로 수월하게 선호강도에 대한 답변할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 쌍대비교 질문은 복권 질문에 비해 설계자의 인식적 부담(cognitive burden)이 적어 설계자가 자신의 정확한 선호도를 반영한 답변을 할 수 있다고 평가된다.

본 연구에서는 기존의 복권 질문 대신 쌍대비교 질문을 이용한 효용함수 부과방법을 제시하고자 한다. 또한 제안된 절차를 플라스틱 사출성형 설계문제에 적용해 봄으로써 그 유용성을 평가하고자 한다. 플라스틱 사출성형 제품의 품질은 수지, 제품 및 금형의 형상, 공정조건 등에 속하는 설계변수들에 의해 영향을 받으며, 이들은 다차원적이고 비선형적인 행태를 보이므로 전통적인 최적화 방법으로는 접근하기가 매우 어려운 문제이다.⁽⁵⁻⁷⁾

2. 공학적 설계에 있어서 효용이론

최근에 설계과정을 의사결정과정으로 간주하여 공학적 설계문제에 의사결정분석의 개념을 활용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^(2-3,8) 공학적 설계에 효용이론을 적용하는 절차는 (I) 설계속성의 결정, (II) 개별 설계속성의 선호도를 나타내는 단일속성 효용(SAU, single attribute utility) 함수의 결정, (III) 다수의 설계속성에 대한 종합적 선호도(overall desirability)를 나타내는 다속성 효용(MAU, multiple attribute utility) 함수의 결정, (IV) 설계대안의 평가 및 최적 설계해의 결정으로 이루어진다.⁽⁹⁾

공학적 설계문제는 적절한 변환과정을 거치면 식 (1)과 같은 다속성 최적화 문제(multiattribute optimization problem)로 표현된다.

$$\text{Optimize } \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

$$s.t. \quad Z \in S = \{ Z \mid g_j(Z) \geq 0, j=1, 2, \dots, k, h_j(Z) = 0, j=1, 2, \dots, l \}$$

여기서, $Z = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ 는 설계대안벡터이고, z_1, z_2, \dots, z_m 은 설계변수, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 는 설계속성벡터(n =설계속성의 수), X 는 대안 Z 가 주는 설계속성값, $g_j(Z)$ 와 $h_j(Z)$ 는 선형 또는 비선형적 제약함수이다. 설계대안 Z 의 선호도는 $u(Z) = u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 이며, 최적 설계해는 선호도 $u(Z)$ 를 최대화하는 대안이 된다.

효용이론에서 그 성질이 규명된 다양한 형태의 효용함수가 있지만, 공학적 설계에는 식 (2)와 같은 승법적 효용함수(multiplicative utility function)를 주로 사용한다.^(2,10)

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{K} \left[\prod_{i=1}^n (K k_i u_i(x_i) + 1) \right] - 1 \quad (2)$$

단, $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$: MAU 함수

x_i : 설계속성값 ($i=1, 2, \dots, n$)

$u_i(x_i)$: 설계속성 i 의 SAU 함수

k_i : 설계속성 i 의 scaling 상수

K : 정규화 상수, $1 + K = \prod_{i=1}^n (1 + K k_i)$

전통적 효용이론에서 SAU 함수, 즉 $u_i(x_i)$ 는 Fig. 1과 같은 복권 질문을 통하여 구하며, scaling 상수 k_i 는

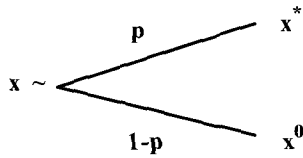


Fig. 1 Lottery question in SAU assessment

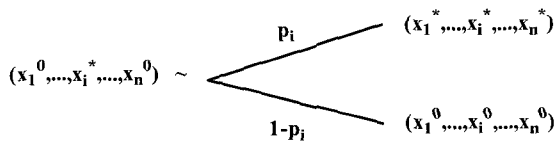


Fig. 2 Scaling constant lottery question for two attributes

Fig. 2 와 같은 복권 질문을 통해 결정한다. 만약, Fig. 2 질문에 대한 설계자의 답변이 p_i 이었다면, 설계속성 i 에 대한 scaling 상수 k_i 는 p_i 와 같게 된다. 그러나, 설계자는 자신의 마음속에 갖고 있는 효용함수의 기울기 방향(gradient direction)에 대한 정확한 인식이 없으며, 또 연역적 추론보다 주관적 직관에 의존한 답변을 하기 때문에 각 복권 질문에 대해 부정확한 답변을 하게 된다. 이러한 설계자의 실제 선호도와 일치하지 않는 부정확한 답변을 선호오류(preference error)라고 한다. 최근의 연구⁽¹¹⁾에 의하면 설계자는 매우 단순한 복권 질문에 대해서도 선호오류를 나타낸다고 평가된다.

3. 쌍대비교를 통한 다속성 효용함수의 결정

복권 질문이 선호오류를 발생시킬 가능성이 있는 반면, 주어진 대안에 대한 비교질문은 연역적 추론에 기초한 학습효과가 기대된다. 학습효과를 얻기 위한 가장 효과적인 비교질문 형태는 쌍대비교⁽¹²⁾이다. 본 연구에서 언급하는 쌍대비교 질문의 기본 형태는 설계 속성값을 알고 있는 두 대안에 대해 어느 대안을 선호(선호순서)하는지 그리고 한 대안을 다른 대안에 비해 얼마나 더 선호(선호강도)하는지를 묻는 것이다. 따라서, 설계자가 주어진 설계대안의 쌍에 대해 항상 일관성 있는 쌍대비교를 수행할 수 있다는 전제하에 쌍대비교 결과를 이용한 다속성 효용함수 결정방법을 제안한다.

다속성 설계문제에서 설계대안의 종합적 선호도를 나타내는 MAU 함수는 쌍대비교 결과에 반영된 설계자 선

호도로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 2개의 설계속성을 갖는 MAU 함수의 결정과정을 아래에 제시한다. 설계속성이 n 개인 일반적인 경우에도 이와 유사한 절차를 통해서 MAU 함수를 결정할 수 있다. 식 (2)에서 설계속성이 v 와 w 인 경우에 승법적 MAU 함수는 다음 식 (3)과 같게 된다.

$$u(v, w) = k_v u_v(v) + k_w u_w(w) + (1 - k_v - k_w) u_v(v) u_w(w) \quad (3)$$

설명의 편의상 이들 속성은 클수록 좋은(larger-the-better) 속성이라고 가정한다. 속성의 유형이 작을수록 좋은(smaller the better) 경우나 상수의 목표값을 갖는(nominal the best) 경우에도 이와 유사한 방법으로 설명될 수 있다. 여기서, k_v, k_w 는 0과 1사이의 상수이고, $u_v(v)$ 와 $u_w(w)$ 는 SAU 함수로서 v 와 w 가 클수록 좋은 속성이므로 아래 식(4) (5)와 같이 표현될 수 있다.⁽¹³⁾ 다른 형태의 SAU 함수를 갖는 경우에도 이와 동일한 절차가 사용된다.

$$u_v(v) = \left(\frac{v - v^0}{v^* - v^0} \right)^{r_v} \quad (4)$$

$$u_w(w) = \left(\frac{w - w^0}{w^* - w^0} \right)^{r_w} \quad (5)$$

여기서 v^0, v^* : v 에 대한 최악 및 최선의 결과치
 w^0, w^* : w 에 대한 최악 및 최선의 결과치
 r_v, r_w : 선호도에 따른 상수 ($0 < r_v, r_w$).

쌍대비교를 위해 설계자에게 제시된 두 개의 설계대안을 Z_i 와 Z_{i+1} 이라고 하고, 두 설계대안의 속성값을 각각 $X_i = (v_i, w_i)$ 와 $X_{i+1} = (v_{i+1}, w_{i+1})$ 라고 한다. 주어진 대안 쌍에 대해 설계자가 대안 Z_i 를 대안 Z_{i+1} 보다 $a_{i, i+1}$ 배 더 선호한다고 답변했을 때, 쌍대비교 질문에 대한 답변이 설계자의 선호도를 정확하게 반영하고 있다면 다음 식 (6)의 관계가 성립한다.

$$u(Z_i) = a_{i, i+1} u(Z_{i+1}), \text{ or} \\ u(v_i, w_i) = a_{i, i+1} u(v_{i+1}, w_{i+1}) \quad (6)$$

따라서, i 번째 쌍대비교 질문에서 생길 수 있는 선호오류에 의한 MAU 함수값에 대한 평가오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_i = u(v_i, w_i) - a_{i,i+1}u(v_{i+1}, w_{i+1}) \quad (7)$$

MAU 함수의 파라미터(parameter) k_v, k_w, r_v, r_w 는 평가오차를 최소화하는 값으로 결정하는 것이 바람직하므로, 식 (8)과 같은 최적화 문제로부터 결정할 수 있게 된다. 즉, 주어진 q 개의 쌍대비교 질문에 대한 평가 오차의 제곱합이 최소가 되도록 상수를 결정한다.

$$\min_{k_v, k_w, r_v, r_w} \sum_{i=1}^q \varepsilon_i^2 \quad (8)$$

단, $\varepsilon_i = u(v_i, w_i) - a_{i,i+1}u(v_{i+1}, w_{i+1})$

4. 수정된 콤플렉스법에 의한 MAU 함수 파라미터의 결정

MAU 함수의 파라미터를 결정하기 위해 콤플렉스법(complex method)을 일부 수정하여 식 (8)의 해를 구한다. 식 (8)의 해법과정에는 콤플렉스법 외에 다양한 탐색적 절차가 사용될 수 있을 것이나, 본 연구에서는 해법과정이 계산상의 효율을 크게 요구하지 않는 관계로 이해의 용이성을 고려하여 콤플렉스법을 사용한다. 콤플렉스법⁽¹⁴⁾은 결정변수가 n 개일 때 임의로 생성된 $2n$ 개의 후보해 집합을 꼭지점으로 하는 다각형을 생성하고, 이 중 목적함수의 값이 가장 나쁜 점을 후보해 집합에서 탈락시키고 탈락된 후보해로부터 나머지 후보해들의 무게중심 방향으로 일정한 거리에 있는 점을 새로운 후보해로 교체하는 과정을 반복하는 방법으로 최적해를 결정한다. 본 연구에서 수정 콤플렉스법을 사용하여 MAU 함수의 파라미터를 결정하는 과정은 다음과 같다.

(1) 쌍대비교를 위한 가상의 설계대안들을 생성한다. 각 설계대안에서 속성(v, w)의 값들은 발생 가능한 최소-최대값 범위 내에서 임의로 선정한다. 이때 설계대안의 개수는 설계변수의 개수보다 크게 한다.

(2) 쌍대비교를 통해 설계대안들을 선호 순서대로 나열하고, 인접한 설계대안간의 선호강도비를 부여한다.

(3) 설계대안들간의 선호강도비에 따른 답변오차의 제곱합(식 (8))을 구하여 목적함수를 구성한다.

(4) 탐색범위($r_v, r_w > 0, 0 < k_v, k_w < 1$)안에서 $2n$ 개, 즉 8개의 초기 후보해 $P_i = (r_v, r_w, k_v, k_w)_i \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$ 를 임의로 생성하고, 각각의 후보해에서 목적함수의 값 $f_i = \sum_{i=1}^q \varepsilon_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$ 을 구한다.

(5) 8개의 후보해 중 가장 큰 목적함수값 f_v 를 갖는 후보해 P_v 를 나머지 후보해들의 무게중심 P_c 방향으로 투사하여 새로운 후보해 P_w 를 다음 식 (9)를 써서 생성하고 이 점에서의 목적함수값 f_w 를 구한다.

$$P_w = P_c + \alpha(P_c - P_v) \quad (9)$$

여기에서 α 는 Box⁽¹⁴⁾가 추천한 1.3을 사용한다.

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

(b) P_w 이 탐색공간 내에 속하고 $f_w < f_v$ 이면 $P_w = P_v$ ($f_w = f_v$)로 한다.

(c) P_w 가 탐색공간에 속하고 $f_w > f_v$ 이면 P_w 를 P_c 방향으로 $\overline{P_c P_w}$ 의 1/2 만큼 후퇴시키고 그 점에서 새로운 목적함수값을 계산한다. 이 과정을 $f_w < f_v$ 이 될 때까지 최대 4회까지만 반복한다. 이 후에도 $f_w > f_v$ 이면 $P_c = P_v$ ($f_c = f_v$)로 한다.

(6) 탐색 종료조건을 검사한다. 만약 종료조건이 만족되지 않으면 단계 5로 가서 탐색을 계속한다. 여기에서는 탐색회수의 상한치를 탐색의 종료조건으로 설정하였다.

5. 사출성형에 대한 적용

본 연구에서 제안된 최적 설계과정의 유용성을 보이기 위해 Fig. 3의 capacitor can 사출성형 설계에 적용해 보았다. 이 모델에서는 사출성형의 중요한 품질 및 설계속성이 되는 웰드라인(weldline)의 길이와 휨(warpage)의 크기가 모두 고려된다. 이 모델은 얇은 벽두께(1.52mm)를 가지며 한 쪽 방향이 열려 있는 뚜껑 형태로서 세 면, 즉 그림에서 위 평면(H F J M H면), 아래 평면(G E I N-G면), 그리고 옆면(G H M J I N-G면)으로 구성되어 있다. 모델의 폭(\overline{HJ})은 38mm, 높이(\overline{GH}) 11mm, 옆면 직선부 길이(\overline{AO}) 14mm, 게이트(gate)가 위치한 옆면 중심선의 길이(\overline{AOB})는 44mm 이다. 최초의 설계⁽¹⁵⁾에서 이 모델은 게이트 위치 $X=3.5$ mm에서 옆면에 에어트랩이 동반된 $L=15.5$ mm의 긴 웰드라인과 0.52mm 크기의 휨이 발생하였다. 웰드라인을 제거하기 위해서 Yao⁽¹⁵⁾는 게이트의 위치(X)를 단일 설계변수로 하여 최적화하였으며, 그 결과 $X=11.5$ mm에서 웰드라인과 에어트랩은 제거되었으나 휨

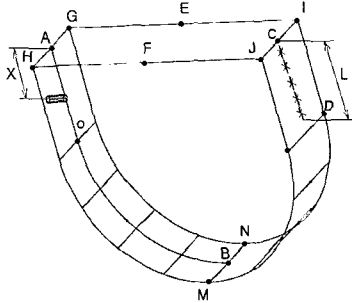


Fig. 3 3-D view of the capacitor can. Variable X is the gate location, which can be located on the line AOB. L is the weld line length

은 0.70mm로 오히려 더 커졌다. 즉, 이 모델의 경우 웰드라인과 휨의 두 설계속성이 서로 상충하고 있음을 알 수 있다. 여기서 휨의 크기는 can의 열린 단면(G E I J F H G)의 변형 후 양쪽 모서리 절점에서의 수직 변위에 대한 가운데 절점에서의 상대적 수직 변위, 즉 $(\overline{GH} + \overline{IJ})/2 - \overline{EF}$ 로 나타내고, 웰드라인은 모델 옆면에서 유동 선단들이 만나는 유한요소 절점들 간의 길이의 합으로 계산한다. 사용한 수지는 PP/HUNTSMAN CHEM/P4 011이고, 시뮬레이터는 Moldflow⁽¹⁶⁾이다.

본 모델에 대해 두 설계속성에 대한 MAU 함수를 다음과 같은 절차를 통해 결정하였다. MAU 함수식은 웰드

라인(v)과 휨(w)의 SAU 함수와 scaling 상수들에 의해 결정된다. 이 모델에 대한 예비 실험과 경험적 판단을 통해 웰드라인과 휨의 최선의 결과치는 모두 0.0mm, 최악의 결과치는 각각 35.0mm, 1.2mm로 설정하였다. 먼저 쌍대비교를 위해 가상의 초기 설계대안들을 선정한다. 설계대안은 (웰드라인의 길이(mm), 휨의 크기(mm))의 순서쌍으로 주어지며 각 속성값들은 웰드라인과 휨의 최선-최악 결과치 범위 안에서 임의로 정하여 구성한다. 이 모델에 대해 선정된 5개의 설계대안은 (2.5, 0.8), (5.0, 0.4), (7.0, 0.2), (14.0, 0.18), (27.0, 0.09)이다. Table 1은 설계자가 이 설계대안들에 대해 쌍대비교를 수행하여 결정한 선호순위와 선호강도비를 나타낸 것이다. Table 2는 수정된 콤플렉스법에 의해 최적화된 MAU 함수의 파라미터 값이며, 따라서 본 모델의 설계평가에 사용할 MAU 함수식은 다음 식과 같다.

$$u(v, w) = 0.3003u_v(v) + 0.0473u_w(w) + 0.6524u_v(v)u_w(w) \quad (10)$$

여기서,

$$u_v(v) = \left(1 - \frac{v}{35.0}\right)^{0.8498},$$

$$u_w(w) = \left(1 - \frac{w}{1.2}\right)^{1.2713}$$

Table 1 Ranking result and preference ratios

Ranking $A_{(rank)} = (\text{weldline}, \text{warpage})$	Comparative alternatives	Preference ratios
$A_{(1)} = (7.0, 0.20)$	A_2	1.1
$A_{(2)} = (5.0, 0.40)$	A_3	1.1
$A_{(3)} = (14.0, 0.18)$	A_4	1.3
$A_{(4)} = (2.5, 0.80)$	A_5	1.5
$A_{(5)} = (27.0, 0.09)$.	.

Table 2 Optimized parameters of MAU function

MAU function parameters		Estimated results
SAU _{weld line}	r_v	0.8498
	k_v	0.3003
SAU _{warpage}	r_w	1.2713
	k_w	0.0473

제어인자는 제품형상, 금형형상, 공정조건과 관련된 9개의 후보 인자들(게이트 위치, 제품의 옆면 벽두께, 상하면 벽두께, 충전시간, 보압시간, 후충전시간, 수지온도, 냉각온도, 보압 프로파일 비율)을 대상으로 L_{12} 직교표에 의한 예비실험을 수행하여 결정하였다. 실험 수준은 관심영역의 하한과 상한을 2수준값으로 두었다. 실험 결과, 충전시간, 후충전시간, 냉각온도는 휨과 웰드라인 모두에 유의하지 않으므로 본 실험에서는 제어인자에서 제외하였다. 본실험에서 제어인자는 L_{18} 직교표의 2열 7열에 배치하고, 잡음인자는 L_8 직교표의 1열-6열에 각각 배치하였다. 잡음조건 사용은 사출성형의 고유특성인 공정 변동성을 설계에 고려하기 위함이다.⁽¹⁷⁾ Table 3은 본실험의 제어인자와 실험수준, Table 4는 잡음인자와 실험수준을 나타낸다. 제외된 3개 인자는 예비실험에서 사용한 수준값의 평균으로 고정하여 실험하였다. 위의 내측배열(L_{18})과 외측배열(L_8)로 구성된 직적실험(cross product experiment)을 Moldflow로 시뮬레이션을 실시한 결과 휨과 웰드라인은 각각 Table 5, 6과 같았다.

Table 3 Control factors and their levels

Control factor	level 1	level 2	level 3
gate location (mm)	0.0	16.5	33.0
side thickness (mm)	1.0	1.5	2.0
top/bottom thickness (mm)	1.0	1.5	2.0
hold time (sec)	1.25	2.0	2.75
melt temperature (° K)	505.0	525.0	545.0
pack profile percent (%)	30.0	60.0	90.0

Table 4 Noise factors and their levels

Noise factor	level 1	level 2
fill time variation (sec)	-0.1	+0.1
hold time variation (sec)	-0.25	+0.25
postfill-time variation (sec)	1.0	+1.0
melt temperature variation (° K)	-5.0	+5.0
coolant temperature variation (° K)	5.0	+5.0
pack profile percent variation (%)	10.0	+10.0

Table 5 Experiment results for the weldline

	1	2	3	4	5	6	7	8	A _{CT}
1	21.68	21.68	21.68	21.68	22.53	22.53	22.53	21.68	22.00
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
4	28.83	28.83	29.64	28.83	29.64	29.64	29.64	29.64	29.34
5	6.488	2.596	5.191	2.596	2.596	2.596	2.596	2.596	3.41
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
9	6.488	6.488	6.488	6.488	6.488	6.488	6.488	6.488	6.49
10	19.28	18.05	19.28	18.05	18.05	18.05	18.05	16.80	18.20
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
13	25.05	25.05	25.05	25.05	25.05	25.05	25.05	25.05	25.05
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
15	2.596	2.596	1.347	2.596	1.347	2.596	1.347	2.596	2.13
16	0.000	0.000	7.786	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
17	28.83	28.83	28.83	28.83	28.83	28.83	28.83	28.83	28.83
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00

Table 6 Experiment results for the warpage

	1	2	3	4	5	6	7	8	AVG
1	0.777	0.906	0.723	0.480	0.616	0.746	0.674	0.837	0.72
2	0.645	0.686	0.549	0.603	0.544	0.537	0.591	0.529	0.59
3	0.429	0.477	0.476	0.449	0.372	0.413	0.379	0.465	0.43
4	0.393	0.559	0.437	0.275	0.315	0.362	0.450	0.390	0.40
5	0.327	0.350	0.301	0.306	0.288	0.337	0.368	0.340	0.33
6	0.603	0.748	0.621	0.587	0.594	0.477	0.540	0.473	0.58
7	0.763	0.951	0.594	0.667	0.750	0.726	0.700	0.850	0.75
8	0.567	0.589	0.548	0.473	0.466	0.524	0.552	0.607	0.54
9	0.063	0.097	0.064	0.077	0.069	0.080	0.097	0.109	0.08
10	0.432	0.436	0.376	0.414	0.383	0.389	0.410	0.394	0.40
11	0.816	0.884	0.604	0.547	0.615	0.691	0.776	0.724	0.71
12	0.517	0.610	0.336	0.555	0.522	0.496	0.581	0.619	0.53
13	0.379	0.358	0.380	0.334	0.337	0.350	0.368	0.344	0.36
14	0.712	0.720	0.474	0.567	0.680	0.544	0.556	0.595	0.61
15	0.314	0.313	0.307	0.233	0.261	0.440	0.445	0.326	0.33
16	0.505	0.623	0.566	0.526	0.546	0.558	0.552	0.551	0.55
17	0.073	0.089	0.154	0.048	0.108	0.089	0.136	0.145	0.11
18	0.599	0.851	0.489	0.643	0.441	0.526	0.657	0.608	0.60

휨과 웰드라인에 대한 실험결과를 식 (10)을 사용하여 계산한 MAU 값과, MAU 값에 대한 SN비는 Table 7과 같았다. 18번의 실험 데이터로부터 SN비가 최대로 나타난 9 번째 실험 (SN=37.49)에 해당하는 설계해를 살펴보면 웰드라인의 평균 길이가 6.49mm, 휨의 평균 크기가 0.08mm임을 알 수 있다. 이것으로부터 최초의 설계(웰드라인: 15.5mm, 휨: 0.52mm)와 Yao의 설계(웰드라인: 0.0mm, 휨: 0.70mm)의 두 설계해와 비교해서 휨의 크기가 대폭 줄어들면서 웰드라인과 휨이 설계자 선호도를 반영하여 적절히 절충되었음을 알 수 있다. 이것은 다속성 설계 최적화로부터 기대했던 바와 일치한다고 할 수 있다. Table 8은 Table 7의 SN비에 대한 제어인자의 주효과를 Minitab⁽¹⁸⁾으로 분석한 결과이며 이로부터 최적 조건을 결정할 수 있다. 결정된 최적 설계조건은 게이트 위치=33.0mm, 옆면 벽두께=2.0mm, 상, 하면 벽두께=1.0mm, 보압시간=2.75sec, 수지온도=505. K, 보압 프로파일 비율=90.0%, 충전시간=1.0sec, 후충진시간=10.0sec, 냉각온도=303.0. K 이다. 본 설계 적용예에서는; 최적공정조건을 탐색하기 위해 직교표(L₁₈)를 사용하였다. 직교표에 의한 탐색보다 더 정밀한 탐색방법이 있겠지만, 실제적인 응용에 있어서 사출 시뮬레이터실험에 많은 시

Table 7 Evaluated MAUs and SN ratios

	1	2	3	4	5	6	7	8	SN
1	0.220	0.188	0.235	0.306	0.252	0.217	0.236	0.205	16.26
2	0.562	0.538	0.621	0.588	0.625	0.629	0.595	0.634	24.67
3	0.699	0.667	0.668	0.685	0.736	0.709	0.732	0.675	28.10
4	0.187	0.157	0.162	0.209	0.183	0.174	0.159	0.170	20.02
5	0.649	0.705	0.689	0.734	0.745	0.714	0.694	0.712	27.58
6	0.588	0.502	0.577	0.598	0.593	0.667	0.627	0.670	20.96
7	0.494	0.395	0.593	0.549	0.501	0.515	0.530	0.446	18.32
8	0.610	0.596	0.622	0.670	0.674	0.637	0.620	0.585	25.79
9	0.808	0.787	0.807	0.799	0.804	0.797	0.787	0.779	37.49
10	0.366	0.387	0.386	0.395	0.407	0.404	0.396	0.426	27.04
11	0.464	0.428	0.587	0.623	0.581	0.535	0.486	0.516	17.93
12	0.642	0.584	0.761	0.618	0.638	0.655	0.601	0.578	20.77
13	0.270	0.276	0.270	0.282	0.281	0.278	0.273	0.279	35.37
14	0.523	0.518	0.669	0.610	0.542	0.625	0.617	0.593	20.70
15	0.728	0.729	0.756	0.781	0.787	0.649	0.666	0.721	23.33
16	0.649	0.576	0.497	0.636	0.623	0.616	0.620	0.620	21.96
17	0.250	0.246	0.233	0.255	0.242	0.246	0.237	0.235	30.01
18	0.590	0.445	0.660	0.564	0.691	0.636	0.555	0.585	17.84

Table 8 Response Table for SN Ratio

Level	A	B	C	D	E	F
1	22.463	23.162	24.174	18.669	24.861	24.127
2	24.659	24.448	24.091	22.756	24.628	24.055
3	25.236	24.747	24.093	30.933	22.868	24.175
Delta	2.772	1.585	0.083	12.263	1.993	0.119
Rank	2	4	6	1	3	5

간이 걸리므로 강건 설계에서 사용을 권장하는 L_{18} 직교표를 사용하였다. 또한 직교표 실험결과로부터 최적조건을 결정하는 과정은 평균분석법을 사용하였으며 구체적인 절차는 Phadke⁽¹⁹⁾에 자세히 설명되어 있다.

6. 결론

다수의 속성이 관련된 공학적 설계문제에서 다속성 효용함수는 상충하는 설계속성을 절충해 주는 매우 유용한 도구이다. 또한, 내재된 공정변동과 같이 설계속성에 영향을 미치는 것은 있으나 기술적이나 경제적인 이유로 제

어할 수 없는 변수가 있는 설계상황에 강건설계는 매우 유용한 설계방법이다.

개념적으로 강건설계는 설계대상 시스템의 기본기능을 이상적 기능에 근접하도록 설계함으로써 시스템과 관련된 다수의 속성을 동시에 최적화시키는 설계방법이므로 다속성 설계법과는 문제해결 방식이 다르다고 할 수 있다. 그러나 시스템의 기본기능을 정의하는 것과 기능을 측정하는 것이 언제나 쉬운 것이 아니기 때문에, 이 경우 저성능에 기인한 문제증상을 설계속성으로 삼아 다속성 설계문제로 해결하는 대안을 선택할 수밖에 없다.

다속성 설계문제를 다루기 위한 MAU 함수의 결정에는 설계자가 복권 질문이라는 특별한 형태의 질문에 답변하여야 한다. 그러나 복권 질문은 일반 설계자가 답변하기에 어려운 측면이 있다는 것이 알려져 있다. 따라서, 복권 질문보다 답하기 쉬운 방법으로 설계자의 선호도를 평가하는 방법이 필요하며, 본 연구에서는 쌍대비교에 기반을 둔 질문방법을 제시하였다. 쌍대질문은 합리적 설계자라면 근원적으로 답변에 큰 어려움이 없을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 쌍대질문을 통해 MAU 함수를 결정한 후 잡음 크기가 변하는 상황에서도 일관되게 큰 MAU 값을 주는 설계해를 찾음으로써, 다속성이 관련됨으로써 발생하는 문제와 잡음에 따른 품질문제를 모두 고려한 최적 설계해를 결정할 수 있는 절차를 제시하였다. 제안된 절차를 플라스틱 사출성형에 적용한 결과 이러한 최적 설계해를 효율적으로 결정할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 최적설계방법을 사출성형설계 문제뿐만 아니라 다른 공학설계 문제에도 유사한 방법으로 적용하여 해결할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2000년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

- (1) J. Wan and S. Krishnamurty, 1998, "Toward a Consistent Preference Representation in Engineering Design", Proceedings of ASME-DETC'98, Atlanta, GA, pp. 1~10.
- (2) D. L. Thurston, 1991, "A Formal Method for Subjective Design Evaluation with Multiple Attributes", Research in Engineering Design, Vol.

- 3, pp. 105~122.
- (3) D. L. Thurston, J. V. Carnahan and T. Liu, 1994, "Optimization of Design Utility", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp. 801~808.
- (4) 김성희 외 2인, 1999, "의사결정분석 및 응용", 영지문화사, pp. 379~390.
- (5) 박종천, Byung H. Kim, 2000, "사출성형품의 휨과 웰드라인을 최적화하기 위한 자동 급형설계 방법", 한국소성가공학회지, 제9권, 제5호, pp. 512~525.
- (6) S. H. Dillman, D. Howe and H. Robar, 1996, "Optimization of the Injection Molding Process", SPE ANTEC Tech. Papers, Vol.1, pp. 754~757.
- (7) B. H. Lee and B. H. Kim, 1997, "Variation of Part Wall Thickness to Reduce Warpage of Injection Molded Part Robust Design Against Process Variability", Polym.-Plast. Tech. Eng., Vol.36, No.5, pp. 791~807.
- (8) L. I. Tong and K. L. Hsieh, 2000, "A Novel Means of Applying Neural Networks to Optimize the Multiresponse Problem", Quality Engineering, Vol.13, No.1, pp. 11~18.
- (9) S. Gold and S. Krishnamurty, 1997, "Trade-offs in Robust Engineering Design", Proceedings of ASME-DETC'97, Sacramento, CA, pp. 1~8.
- (10) R. L. Keeney and H. Raiffa, 1993, "Decisions with Multiple Objectives : Preferences and Value Trade-offs", John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 282~343.
- (11) D. L. Olson and H. M. Moshkovich, etc., 1995, "Consistency and Accuracy in Decision Aids : Experiments with Four Multiattribute Systems", Decision Sciences, Vol.26, No.6, pp. 723~748.
- (12) E. A. Sykes and C. C. III. White, 1991, "Multiattribute intelligent computer aided design", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.21, No.6, pp. 1498~1511.
- (13) F. S. Fogliatto and S. L. Albin, 2000, "Variance of Predicted Response as an Optimization Criterion in Multiresponse Experiments", Quality Engineering, Vol.12, No.4, pp. 523~533.
- (14) G. V. Reklatis, A. Ravindran, and K. M. Ragsdell, 1983, "Engineering Optimization Methods and Applications", John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 268~277.
- (15) D. Yao, 1998, "Direct Search Based Automatic Minimization of Warpage and Weldlines in Injection Molded Parts", Masters Thesis, U. of Massachusetts, MA, pp. 40~43, pp. 80~88.
- (16) Moldflow Pty. Ltd., 1996, Moldflow manual.
- (17) R. K. Roy, 2001, "Design of Experiments Using the Taguchi Approach", John Wiley&Sons Inc., New York, pp. 336~363.
- (18) 이레테크, 2000, MINITAB 실무 완성.
- (19) M. S. Phadke, 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, NJ, pp. 44~47.