

설계자 선호도를 고려한 동적 시스템의 강건설계법*

김 경 모

금오공과대학교 신소재시스템공학부(산업시스템전공)

A preference-based design metric in dynamic robust design

Kyung Mo Kim

School of Advanced Materials and Systems Engineering
Kumoh National University of Technology

Key Words : Robust Design, Dynamic System, Design Metric, Value Function

Abstract

Dynamic robust design has been regarded as the most powerful design methodology for improving product quality. Dynamic SN ratio adopted in dynamic robust design combines two major quality attributes, the variability around the linear function and the slope of the linear function, into a single design metric. The principal shortcoming associated with the dynamic SN ratio is that the metric is independent of designer's preferences for the quality attributes due to priori sets of attribute tradeoff values inherent in it. Therefore, a more rigorous preference-based design metric to accurately capture designer's intent and preference is needed. A new design metric that can be used in dynamic robust design is proposed. The effectiveness of the proposed design metric is examined with the aid of a demonstrative case study and the results are discussed.

1. 서론

강건 설계(robust design)는 1980년대 초 다구찌에 의해 미국에 소개된 이래 설계 엔지니어들의 주목을 받아 왔으며, 현재 반도체 및 자동차 등 다양한 첨단산업분야에서 제품품질을 향상시키는 유용한 설계기법으

로 인정받고 있다[Genichi et al., 2000]. 특히, 동적 시스템(dynamic system)에 대한 강건 설계는 기술개발(R&D)이나 제품 및 공정설계의 초기단계에서 채택할 수 있는 설계방법론으로 강건 설계의 효과가 가장 확실하게 기대되는 분야로 평가된다.

강건 설계는 시스템과 관련된 제어할 수 없는 성능변동의 원인(이하, 잡음)하에서 시스템의 이상적 기능(ideal function)에 최대

*본 연구는 2002년도 금오공과대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음

한 근접한 기능을 안정적으로 달성하는 것을 목표로 한다. 시스템 성능특성의 안정성을 얻는 것은 품질향상에 있어 가장 중요한 요소로서 전통적으로 설계자들은 이를 위해 설계변수의 공차(tolerance)를 줄이거나 안전계수(safety factor)를 크게 하는 방법을 사용해 왔다[한국공업표준협회, 1991]. 그러나, 이러한 대책은 품질문제에 대한 근본적인 해결책이 되지 못하며, 추가적인 비용을 발생시켜 제품의 가격 경쟁력 저하라는 새로운 문제를 초래하였다. 따라서, 이러한 품질문제에 대한 보다 근원적인 해결책이 요구되었으며, 강건 설계는 이러한 문제에 대한 효과적인 대응책으로 인정되어 왔다.

다구찌에 의한 강건 설계법이 전통적 실험 계획법과 근본적으로 다른 점은 잡음조건하에서 성능 데이터를 수집하는 것과 설계대안의 평가에 SN비(signal to noise ratio)를 사용하는 것이다[Phadke, 1989]. 한편, 기존의 강건 설계법은 설계변수들 간에 존재하는 설계제약조건(design constraints)을 고려할 수 없었으며 또한 다수의 설계목표를 고려할 수 없다는 현실적 한계를 가지고 있었다. 최근, 기존의 강건 설계법이 갖는 한계를 극복하기 위한 개선된 강건 설계법이 다양하게 제시되었다. Otto 와 Antonsson(1993)은 설계 제약조건을 처리할 수 있도록 개선하였으며, Chang et al.(1994)은 설계팀내의 여러 구성원들에 의해 내려지는 일관성 없는 의사결정에 기인한 "conceptual noise"를 해결하는 방법을 제시하였다. 최근, Gold 와 Krishnamurty(1997)는 제약식을 설계목표에 통합한 다속성 강건 설계절차를 제시하였으며, Iyer 와 Krishnamurty(1998)는 정적 SN비(static SN ratio)에 효용개념을 도입하여

설계자의 설계의도를 설계과정에 반영하는 방법을 개발하였다.

기존의 강건 설계법에서는 설계대안의 평가에 다구찌가 제안한 SN비를 사용하며, 또한 SN비는 출력반응의 유형에 따라서 다양한 형태를 가진다[Phadke, 1989]. 동적 시스템은 입력신호에 의해 출력반응(즉, 성능특성)의 목표값이 결정되는 시스템으로서, 강건 설계는 시스템의 이상적 기능을 잡음하에서 안정적으로 달성하는 것을 목표로 한다. 그러나, 동적 시스템에서 사용되는 동적 SN비는 설계속성에 대한 내재한 절충전략(intrinsic tradeoff strategy)이라는 자체 한계에 의해 설계대안의 평가를 왜곡시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 동적 SN비의 이러한 한계점을 극복할 수 있는 새로운 설계평가척도(design metric)를 제시하고자 한다.

2. 기본 개념

공학적 설계(engineering design)는 선택 가능한 설계대안들로부터 최선의 대안을 선택하는 의사결정과정으로 볼 수 있다. 최근, 경제 및 경영학적 문제에 적용되던 효용이론(utility theory)이 공학적 설계과정으로 그 응용영역을 확대하고 있다[10, 11].

확실성하에서의 의사결정에 사용되는 가치함수(value function)는 의사결정자(즉, 설계자)의 선호도(preference)를 수치로 표현하는 정규적인 수단으로서, 서로 상충하는 다수의 설계목표의 절충(tradeoff)에 효과적으로 사용된다. 설계자의 가치함수를 결정하는 절차는 Keeney 와 Raiffa(1993)에 상세히 설명되어 있다. 단일속성에 대한 의사

결정에 사용되는 단일속성 가치함수(single attribute value function)는 클수록 좋은 속성인 경우 <그림 1>과 같이 3가지 형태로 대별된다. 이러한 가치함수의 형태는 속성에 대한 설계자의 선호구조(preference structure)를 반영하고 있다.

일반적으로 고려되는 동적 시스템의 이상적 기능은 $y = \beta M$ (단, M : 신호인자, y : 성능특성, β : 성능특성에 대한 신호의 감도) 으로 표현되며, 설계대안의 평가에 식(1)의 동적 SN비를 사용한다.

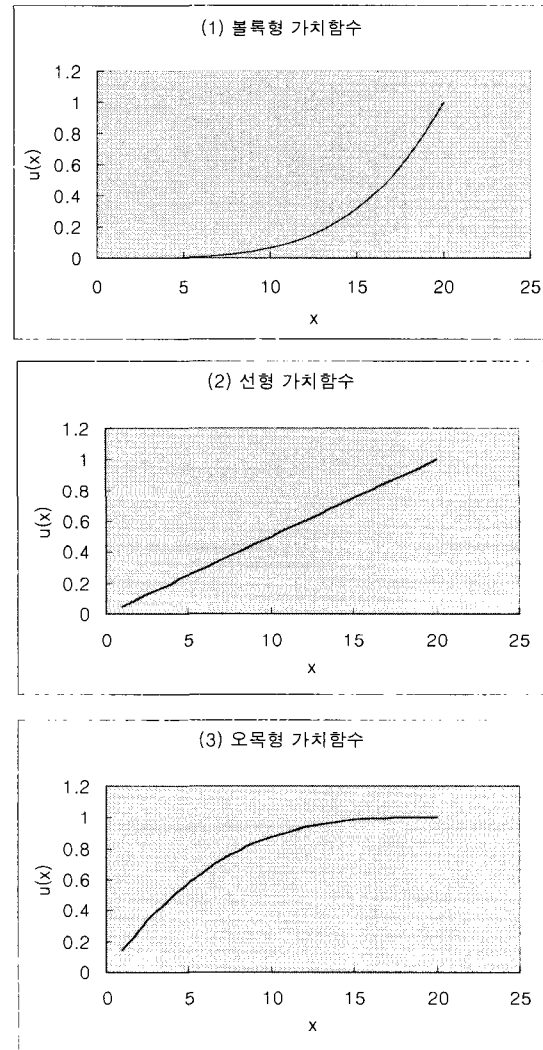
$$SN = 10 \log \left[\frac{\beta^2}{s^2} \right] \quad (dB) \quad (1)$$

여기서, s^2 은 성능특성의 이상적 기능으로부터의 분산, $E[(y - \beta M)^2]$, 이다.

전통적 강건 설계에서는 단계1에서 SN비를 최대화하고 단계2에서 감도를 원하는 수준으로 조정하는 2단계 설계법을 사용하여 최적 설계해를 결정한다. 이러한 2단계 설계절차가 정당화될 수 있는 전제 조건은 SN비에는 영향을 주지 않고 감도를 변경시킬 수 있는 조정변수가 설계변수들 내에 존재하는 것이다. 그러나, 모든 설계상황에서 조정변수를 실험을 하기 전에 알아낸다는 것을 보장할 수 없기 때문에, 단계2의 조정과정에서 단계1에서 최대화된 SN비가 감소하는 바람직하지 않는 현상이 발생하게 되어 최적 설계해의 수준(quality)을 떨어뜨리게 된다.

동적 시스템에 대한 2단계 설계법의 또 다른 문제점은 SN비 자체의 한계성에 기인한다. 동적 SN비는 식(1)에서 보는 바와 같이 β 과 s^2 의 2가지 속성을 통합한 설계

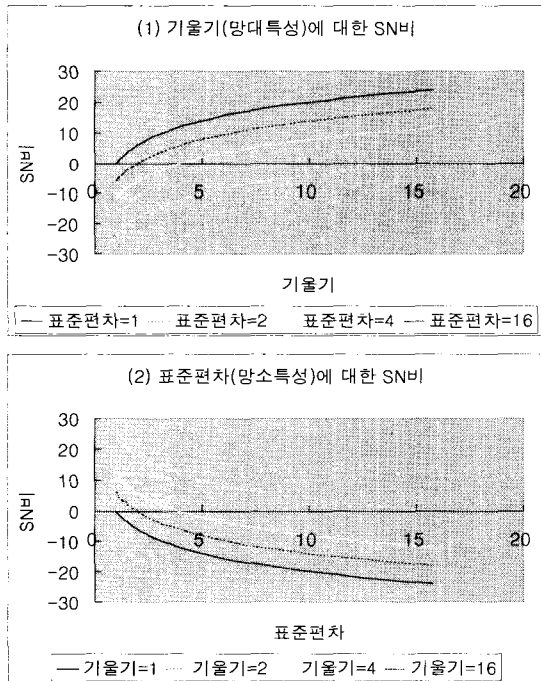
평가척도이며, 여기에는 <그림 2>에서 볼 수 있듯이 감도(기울기)와 산포(표준편차)에 대해 고유한 절충전략이 내재되어 있다.



<그림 1> 망대형 속성의 가치함수 형태

즉, 동적 SN비는 표준편차가 일정한 경우에 기울기는 <그림 2> (1)에서 보는 것과 같이 위로 오목(concave)한 형태를 가지므

로 체감한계가치(decreasing marginal value), 그리고 기울기가 일정한 경우에 표준편차는 <그림 2> (2)에서 보는 것과 같이 아래로 볼록(convex)한 형태를 가지므로 체증한계가치(increasing marginal value)를 갖는다. 따라서, 기울기는 클수록 기울기 증가에 따른 선호도 증가분은 작아지며, 표준편차는 작을수록 표준편차 감소에 따른 선호도 증가분이 커진다. 그러므로, 동적 SN비라는 평가척도는 표준편차의 추가적 감소를 위해 기울기를 희생시키는 성향이 강하며, 기울기의 추가적 증가를 위해 표준편차를 희생시키고자 하는 성향이 약하다고 할 수 있다.



<그림 2> 기울기와 표준편차에 따른 SN비

즉, 동적 SN비는 기울기와 표준편차라는 2가지 설계속성에 대해 내재하는 절충전략

을 가지며, 이러한 절충전략은 모든 설계상황에서의 설계요구와 일치할 수는 없다. 같은 수준의 SN비를 갖는 설계 대안에 대해서도 어떤 설계상황에서는 산포(표준편차)가 작은 것 또 다른 설계상황에는 감도(기울기)가 큰 것이 더 선호될 수 있으며, 그 선호되는 강도 역시 설계상황에 따라 각각 달라질 수밖에 없다. 즉, 설계자가 성능특성의 산포를 어느 수준까지 줄인 후에는 추가적 산포의 감소보다 성능특성에 대한 감도의 증대를 원할 때, 동적 SN비로는 이러한 설계요구를 반영할 수 없게 된다.

위에서 살펴 본 바와 같이 전통적 동적 SN비는 이러한 한계점을 갖고 있으므로, 산포와 감도라는 2가지 설계속성에 대한 설계자 선호구조를 정확하게 반영할 수 있는 새로운 설계평가척도가 요구된다.

3. 설계자 선호도를 반영한 설계평가척도

동적 시스템의 설계목표는 시스템의 이상적 기능에 근접한 기능을 달성하기 위하여 출력특성의 편차를 줄이고 감도를 이상적 수준에 근접시키는 것이며, 설계속성은 표준편차(산포)와 기울기(감도)이다. 따라서, 표준편차와 기울기에 대한 2속성 가치함수는 설계자의 설계의도를 설계과정에서 정확히 반영할 수 있게 해 준다. 한편, 강건 설계에서 표준편차는 기울기의 수준과 관계없이 작을수록 선호되고 기울기는 표준편차의 수준과 관계없이 이상적 기울기에 가까울수록 선호되므로 표준편차와 기울기는 상호선택독립(mutual preferential independence)이라고 할 수 있다. 따라서, 기울기(X)와 표

준편차(Z)에 대한 2속성 가치함수는 식(2)와 같은 가법적 형태를 갖는다[강맹규, 1990].

$$v(x, z) = w_x v_x(x) + w_z v_z(z) \quad (2)$$

단, $v(x^w, z^w) = 0, v(x^b, z^b) = 1$

$$v_x(x^w) = 0, v_x(x^b) = 1$$

$$v_z(z^w) = 0, v_z(z^b) = 1$$

여기서, x^w, z^w 는 가장 선호되지 않는 속성의 값, x^b, z^b 가장 선호되는 속성의 값을 나타낸다. v_x, v_z 는 단일속성 X, Z 에 대한 가치함수, w_x, w_z 는 가치함수의 척도구성계수(scaling constant)이다.

단일속성 가치함수는 중간가치 분할법(mid-value splitting technique)을 사용하여 구하거나, 설계자의 선호경향을 사전에 파악하여 가치함수의 형태를 결정한 후 선호 무차별 대안에 대한 질문으로부터 결정되는 관계식을 이용하여 구한다. 즉 $v(x^b, z^b) = 1$ 이라는 기본적 조건과 $(x^w, z^b) \sim (x', z^w)$ 또는 $(x^b, z^w) \sim (x^w, z')$ 와 같은 무차별 선호관계를 만족시키는 x' 또는 z' 를 설계자에게 질문하여 척도구성계수를 결정할 수 있다[강맹규, 1990]. 2속성 가치함수의 결정에 대한 구체적 절차는 아래의 사례연구에서 추가적으로 설명한다.

4. 사례연구

본 사례에서는 동적 시스템의 설계평가척도로 제안된 표준편차와 기울기에 대한 2속

성 가치함수를 Taguchi et al.(2000)의 자동차 와이퍼의 소음저감설계에 적용함으로써, 새로운 설계평가척도가 더 나은 설계자 선호도를 갖는 최적 설계해를 제공해 줌을 보이고, 최적 강건 설계해가 설계자의 선호구조에 큰 영향을 받는다는 것을 규명하고자 한다.

자동차의 와이퍼시스템은 와이퍼 팔과 와이퍼 날로 구성되어 있는데, 날이 매끄럽게 작동하지 못하면 소음이 발생하고 날의 마모가 촉진되기 때문에 제품의 품질수준이 떨어진다. 와이퍼는 운전자가 설정한 다양한 회전속도 모드에서 작동되므로, 전형적인 동적 시스템으로 볼 수 있다. 와이퍼 시스템의 이상적 기능은 정해진 위치까지 와이퍼가 도달하는데 걸리는 시간이 이론적으로 계산된 시간과 일치하면 달성된다. 실제 사용환경에서는 다양한 잡음조건에 의해 날이 매끄럽게 작동하지 못하므로 실제시간과 이론시간 사이에 차이가 나게 되고, 이 차이가 커질수록 와이퍼 시스템은 이상적 기능에서 멀어지게 된다.

본 사례에서 설계자가 선택한 제어인자는 8개이며, 신호인자는 사용자가 설정한 와이퍼의 회전속도가 되며, 잡음인자는 2가지만을 고려하였다. 설계대안의 평가를 위한 2속성 가치함수의 결정과정을 간략히 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 설계속성인 기울기(X)와 표준편차(Z)에 대한 설계자의 고려범위를 결정한다. 와이퍼 시스템의 이상적 기능은 $y=M$ 으로 표현되며 M 은 설정한 와이퍼 회전속도에서의 와이퍼 날의 이론적 도달시간 그리고 y 는 와이퍼 날의 실제 도달시간을 나타낸다. 만약, 설계자가 와이퍼 날의 실제 도달시간이 이론시간에 일치하는 경우 가장 만족스럽게 생각하고 이론

시간의 15% 이상의 편차가 발생하면 매우 불만족스럽게 생각한다며, $x^b=1$, $x^w=1.15$ 라고 할 수 있다. 그리고, 도달 시간의 표준편차는 작을수록 만족스럽게 생각하고 200 msec. 이상이면 매우 불만족스럽게 생각한다며, $z^b=0$, $z^w=200$ 라고 할 수 있다. 둘째, 기울기와 표준편차에 대한 단일속성 가치함수를 결정한다. 설계자에 대한 질문을 통해 기울기는 감소한계값이 그리고 표준편차는 체증한계값의 선호 구조를 가진다면, v_x 는 위로 오목하므로 식(3)과 같이 가정할 수 있고 v_z 는 아래로 볼록하므로 식(4)와 같이 가정할 수 있다.

$$v_x(x) = \left(\frac{x^w - x}{x^w - x^b}\right)^{r_x}, \quad r_x > 1 \quad (3)$$

$$v_z(z) = \left(\frac{z^w - z}{z^w - z^b}\right)^{r_z}, \quad 0 < r_z < 1 \quad (4)$$

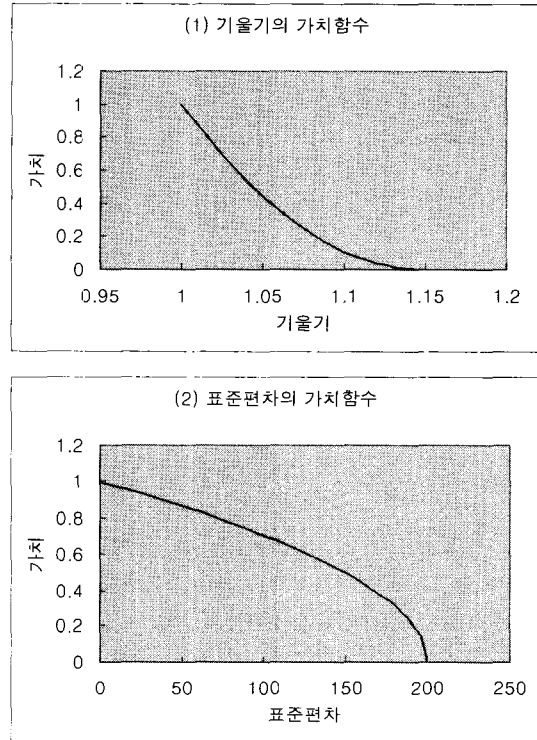
설계자에 대한 질문을 통해 속성 X 의 구간 $[1, 1.15]$ 에서의 중간가치점이 $x_{0.5}=1.044$ 이고, 속성 Z 의 구간 $[0, 200]$ 에서의 중간가치점이 $z_{0.5}=150$ 임을 알았다. 따라서, $v_x(1.044)=0.5$, $v_z(150)=0.5$ 가 성립하므로, 단일속성 가치함수의 미지계수는 $r_x=2$, $r_z=0.5$ 가 되어 가치함수는 식(5), (6)과 같으며 그래프는 <그림 3>과 같다.

$$v_x(x) = \left(\frac{1.15 - x}{0.15}\right)^2, \quad 1 \leq x \leq 1.15 \quad (5)$$

$$v_x(x) = 0, \quad x > 1.15$$

$$v_z(z) = \left(\frac{200 - z}{200}\right)^{0.5}, \quad 0 \leq z \leq 200 \quad (6)$$

$$v_z(z) = 0, \quad z > 200$$



<그림 3> 단일속성 가치함수의 그래프

따라서, 설계자의 선호구조는 기울기에 대해서 체증한계값이 그리고 표준편차에 대해서 체감한계값임을 알 수 있으며, 이는 기울기에 대해 체감한계값이 그리고 표준편차에 대해 체증한계값을 갖는 동적 SN비와는 상이한 선호구조임을 알 수 있다. 그러므로, 전통적 동적 SN비를 이용하여 구한 최적해는 설계자의 선호와 일치하지 않을 가능성이 있음을 알 수 있다. 셋째, 척도 구성계수를 결정한다. 기울기와 표준편차가 모두 최선의 상태인 경우에는 설계자가 1의

가치값을 가지므로 식(7)이 만족되며, “기울기를 최선의 상태에서 최악의 상태로 희생할 때 신호 무차별이 되기 위해서 표준편차는 최악의 상태에서 얼마나 감소되어야 하는가?” 하는 질문에 대해 설계자가 $x' = 1.0518$ 라고 답했다면 이는 $(x = 1.15, z = 0) \sim (x', z = 200)$ 가 되므로 식(8)이 성립한다(실제로는 이렇게 정밀하게 답변할 수 없으나, 간단한 결과를 얻기 위해 필자가 역산한 수치임).

$$v(1, 0) = 1 \tag{7}$$

$$v(1.15, 0) = v(1.0518, 200) \tag{8}$$

그러므로, 식(7),(8)을 동시에 만족시키는 척도구성계수는 $w_x = 0.7, w_z = 0.3$ 이 되며 최종적으로 2속성 가치함수는 식(9)과 같이 얻어진다.

$$v(x, z) = 0.7 \left(\frac{1.15 - x}{0.15} \right)^2 + 0.3 \left(\frac{200 - z}{200} \right)^{0.5} \tag{9}$$

와이퍼 시스템의 2수준 제어인자 D는 1열, 3수준 제어인자 A-H(D제외)는 2열-8열에 순서대로 배치한 L_{18} 직교표를 이용하여 도달시간에 대한 데이터를 얻었다[Taguchi et al., 2000]. 도달시간 데이터로부터 SN비, 기울기, 표준편차, 그리고 식(9)을 이용하여 계산한 $v(x, z)$ 는 <표 1>과 같다.

전통적 2단계 설계절차에 의해 구한 최적 설계해는 $A_2B_1C_2D_2E_3F_2G_2H_2$ 로서 이 조건에서 SN비의 추정치는 -28.1(dB), 기울기와 표준편차의 추정치는 각각 1.057 과 14.67이다. 그리고, 2속성 가치함수값을 최대화시키

는 최적 설계해는 $A_3B_1C_1D_2E_3F_2G_1H_1$ 로서 이러한 조건에서 SN비의 추정치는 -29.2(dB), 기울기와 표준편차의 추정치는 각각 1.050와 34.84이다. 즉, 제안된 설계평가척도를 이용한 최적해는 전통적 방법에 의한 최적해와 비교했을 때, 기울기 속성은 1.057에서 1.050으로 개선되었으며 표준편차 속성은 14.67에서 34.84로 악화되었다. 한편, 최적해에 대한 추정 가치값은 $v(1.057, 14.67) = 0.558$ 이고 2속성 가치함수로 구한 최적해에 대한 추정 가치값은 $v(1.050, 34.84) = 0.584$ 로써, 본 연구에서 제안된 2속성 가치함수로 구한 설계해가 전통적 2단계 설계법에 의한 최적해보다 더 나은 설계자 선호도를 가짐을 알 수 있다.

<표 1> L_{18} 에 의한 실험결과

실험번호	SN비	기울기	표준편차	$v(x, z)$
1	-34.27	1.078	55.73	0.42
2	-34.41	1.089	57.22	0.37
3	-39.55	1.133	107.58	0.21
4	-37.27	1.096	80.04	0.32
5	-30.81	1.073	37.25	0.46
6	-32.80	1.093	47.71	0.36
7	-34.65	1.076	58.12	0.42
8	-38.89	1.094	96.28	0.31
9	-33.39	1.065	49.76	0.48
10	-30.46	1.063	35.44	0.51
11	-35.24	1.079	62.38	0.41
12	-39.21	1.096	100.07	0.30
13	-30.54	1.075	36.17	0.45
14	-32.52	1.068	45.14	0.47
15	-32.70	1.065	45.96	0.49
16	-31.00	1.065	37.79	0.49
17	-33.67	1.075	51.87	0.43
18	-34.18	1.079	55.21	0.41

5. 결론

본 연구에서는 다속성 효용이론을 이용하여 동적 시스템의 강건 설계에 적용할 수

있는 새로운 설계평가척도를 개발하였다. 전통적 동적 SN비가 내재된 절충전략을 갖는 반면에 제안된 설계평가척도는 설계목표에 부합된 절충전략을 고려함으로써 설계의도를 평가척도에 정확히 반영할 수 있게 해준다.

제품설계에 대한 사례적용을 통해 제안된 설계평가척도가 동적 SN비에 비해 더 나은 설계자 선호도를 갖는 최적해를 구해 줌을 확인할 수 있었으며, 설계속성에 대한 설계자 선호도는 최적해에 큰 영향을 줌을 확인할 수 있었다. 따라서, 설계목표에 부합한 설계자 선호도의 결정은 더 나은 최적해를 찾는 데 있어 필요 불가결한 사항임을 알 수 있다. 아울러 본 연구에서 제안된 설계평가척도의 결정과정은 강건 설계 이외의 일반적인 다속성 설계문제에도 유사한 절차로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 강맹규(1990), 「불확실성하의 의사결정론」, 1판, 회중당.
- [2] 한국공업표준협회(1991), 「개발설계단계의 품질공학」, 품질공학강좌 1권, 한국공업표준협회.
- [3] Chang, T. S., Ward, A. C. and Lee, J.(1994), "Conceptual Robustness in Simultaneous Engineering: An Extension of Taguchi's Parameter Design", Research in Engineering Design, Vol. 6, pp. 211-222.
- [4] Genichi T., Subir, C. and Shin, T.(2000), Robust Engineering, McGraw -Hill, New York.
- [5] Gold, S. and Krishnamurty, S.(1997), "Trade-offs in Robust Engineering Design", ASME Design Engineering Technical Conference, Paper No. DAC-3757.
- [6] Iyer, H. V. and Krishnamurty, S.(1998), "A Preference-Based Robust Design Metric", Proc. of ASME Design Engineering Technical Conferences, Paper No. DAC-5625.
- [7] Keeney, R. L. and Raiffa, H.(1993), Decisions with Multiple Objectives : Preferences and Value Tradeoffs, Wiley & Sons, New York.
- [8] Otto, K .N. and Antonsson, E. K.(1993), "Extensions to the Taguchi Method of Product Design," ASME J. Mechanical Design, Vol. 115, pp. 5-13.
- [9] Phadke, M. S.(1989), "Quality Engineering using Robust Design", Prentice-Hall, New Jersey.
- [10] Thurston, D. L.(1991), "A Formal Method for Subjective Design Evaluation with Multiple Attributes", Research in Engineering Design, Vol. 3, pp. 105-122.
- [11] Thurston, D. L., Carnahan, J. V., and Liu, T.(1994), "Optimization of Design Utility", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp.801-808.