

## 研究論文

설계자 선호도를 고려한 다특성 강건설계법<sup>1)</sup>

김 경 모

금오공과대학교 신소재시스템공학부(산업시스템전공)

## Multi-Characteristic Robust Design Methodology Based on Designer's Preference

Kyung Mo Kim

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

## Abstract

The ever increasing demands for enhanced competitiveness of engineered products require a "designing-in-quality" strategy that can effectively and efficiently incorporate multiple design objectives into design. Robust design can be viewed as a multi-characteristic design problem requiring tradeoffs between mean and variance characteristics. Firstly this paper analyzes the intrinsic preference of the traditional SN ratio on mean and variance, and secondly presents a new design metric for a robust design using concepts from utility theory to accurately capture designer's intent and preference on mean and variance. The steps to apply the proposed design metric as the robust design criterion in an orthogonal array based engineering experimentation is presented with the aid of a demonstrative case study. The performance of the proposed design metric is tested, and the results are discussed.

## 1. 서 론

강건 설계(robust design)는 제품과 공정의 개발설계단계에서 품질을 확보한다는 전략 하에서 제품 성능의 획기적 향상을 추구해 왔으며, 제품의 성능변동을 줄이고 제조

단가를 절감하여 성능뿐만 아니라 수익성 향상에도 효율적인 수단임이 세계적 품질선도 기업에서의 적용성과를 통해서 증명되었다 [Taguchi et al., 2000]. 또한, 이것은 개발설계의 초기단계에서 문제를 해결함으로써 개발설계의 생산성을 극대화시킬 수 있으며, 제품의 수명주기가 지속적으로 단축됨과 동시에 고품질을 추구하는 현행의 산업적 요구에 적합한 설계방법이라고 평가된다.

1) 본 연구는 금오공과대학교 중점과제 연구비 지원에 의해 수행되었음

강건 설계는 설계대상 시스템의 내외적인 성능변동원인(잡음) 하에서 성능특성의 안정적 확보를 추구한다. 즉, 성능과 관련된 제어가능인자와 제어불가능인자의 변동에 대해 제품성능이 영향을 적게 받는 설계조건을 찾음으로써 고품질의 제품을 생산할 수 있게 한다. 전통적으로 설계자들은 안정된 제품성능을 얻기 위해서 설계변수의 허용차(tolerances)를 줄이거나 안전계수(safety factors)를 늘이는 방법을 일반적으로 사용해 왔다. 그러나, 이러한 방법은 설계상의 여러 가지 불확실한 요소(uncertainty)들에 의해 목적달성에 한계를 가질 수밖에 없었다. 다시 말해서 불확실한 요소에 대한 보다 근본적인 해결책이 필요하며, 이것이 바로 강건 설계인 것이다.

강건 설계의 목표는 다음의 2가지로 볼 수 있다. 한편으로는 제품의 성능변동(즉, 성능특성의 표준편차)을 최소화하고, 다른 한편으로는 설계목표치(target value)에 최대한 근접한 제품성능(즉, 성능특성 평균의 최적화)을 추구한다. 그러나, 이러한 2가지 설계목표를 동시에 달성하는 설계조건은 일반적으로 존재하지 않는다. 그러므로, 설계과정에서 2가지 설계목표의 달성정도에 대한 평가와 2가지 설계목표의 달성정도에 대한 절충(tradeoff)이 필요하게 된다.

설계목표 달성정도에 대한 평가나 다수의 설계목표에 대한 절충은 모든 공학적 설계에 있어서 매우 중요한 과제이다. 설계과정에서 제품성능(performances), 환경오염문제(environment considerations), 비용(costs) 등과 같은 다수의 목표에 대한 평가와 이들간의 절충은 일종의 의사결정과정(decision making process)으로 볼 수 있으며, 최근의 연구[Thurston et

al., 1991, 1994; Chen et al., 1998]에서 이러한 문제의 해결책으로 효용이론(utility theory)을 제시하고 있다.

본 연구에서는 2가지 설계목표를 갖는 강건 설계에 효용이론을 이용하는 방법을 제시하고자 한다. 우선 강건 설계에 대한 최근의 연구경향을 검토하고, 강건 설계의 기본 개념과 설계특성에 대한 설계자 선호도를 살펴본 후, 설계자 선호도를 반영한 새로운 설계평가척도(design metric)를 개발한다. 마지막으로 이를 간단한 공정설계문제에 적용시켜 봄으로써, 제안된 평가척도의 유용성을 검토한다.

## 2. 관련 연구

다구찌에 의해 80년대 초반 미국에 소개된 강건 설계는 설계목표의 참신성으로 인해 설계이론 연구자들과 현장 설계자들의 주목을 받아 왔으며, 현재 다양한 산업분야의 설계문제에 적용되고 있다. 강건 설계의 선구적 연구자인 다구찌는 SN비를 설계평가에 사용하는 2단계 설계법을 제시하였다[Taguchi, 1987]. 그 후, 많은 연구자들은 기존의 다구찌 방법이 갖는 한계를 극복하고 다양한 응용영역에 적용될 수 있도록 개선된 방법들을 제시하였으며, 주요한 내용은 다음과 같다. Otto 와 Antonsson(1993)은 설계 제약조건(engineering constraints)을 처리할 수 있도록 기존의 방법을 확장하였으며, Chang et al.(1994)은 설계팀내의 여러 구성원들에 의해 내려지는 일관성 없는 의사결정에 기인한 "conceptual noise"에 대응한 설계방법을 제시하였다. Bras 와 Mistree(1994)는 강건설

계 개념과 axiomatic design principles[Suh, 1995]를 통합하여 compromise DSP(Decision Support Problem)라는 최적화 모형을 개발하였다. Chen et al.(1996)은 RSM(response surface methodology)과 compromise DSP를 결합하여 closed-form 해가 존재하지 않는 강건 설계 문제에 적용되는 변형된 다구찌 방법을 제안하였다. Ku et al.(1997)은 제약이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 다구찌 방법이 다수의 설계목표를 갖는 설계문제에 적용될 수 있도록 확장하였으며, Iyer 와 Krishnamurty(1998)는 강건 설계에서 다수의 설계목표를 절충하는 방법에 대하여 기초적인 수준에서 논의하였다. Gadallah 와 Elmaraghy(1993)는 동적 시뮬레이션을 이용하여 3가지 유형의 기하학적 공차가 존재하는 캠-벨브 시스템의 강건 설계를 위한 parametric 설계절차를 제시하였다.

다구찌 방법은 최초에는 실험적 설계방법론으로 개발되었지만, 이 후 강건 설계문제를 특정한 형태의 최적화 문제로 모형화하여 기존의 최적화 해법을 적용하는 방법에 대해 폭 넓게 연구되었다. Sandgren et al.(1985)은 제어불가능인자에 대한 설계 민감도를 최소화하는 최적화 모형을 사용하여 강건한 용접 구조물을 얻었다. Parkinson et al.(1993, 1994a, 1994b, 1995)은 설계 변수와 parameters 의 변동에 의해 기인되는 설계 제약함수의 변동을 전파된 변동(transmitted variation)개념을 이용하여 강건 설계에 응용하였다. Sundaresan et al.(1993)은 설계변수와 제약에 대한 변동에 민감한 정도를 나타내는 감도지수(sensitivity index)를 강건성 척도로 사용한 최적화 절차를 개발하였다. Ramakrishnan 과 Rao(1996)는 일반적

손실함수(general loss function)를 설계평가에 이용하는 최적화 기법에 기초한 강건 설계법을 제시하였다.

본 연구에서는 강건 설계에 있어서 2가지 설계목표의 달성정도를 어떻게 평가할 것이며, 또한 이들 설계목표간의 합리적 절충을 어떻게 할 것인가에 대해 연구의 초점을 두고 있다.

### 3. 기본 개념

공학적 설계과정은 제품, 공정, 그리고 제조시스템과 관련된 문제를 구체화시키는 다양한 활동들로 구성된다. 다수의 설계목표간의 절충은 어떠한 설계과정에서도 근본적인 의사결정과제이다. 설계과정은 의사결정과정으로 해석될 수 있으며, 전통적으로 경제나 경영학적 문제에 성공적으로 적용되어온 의사결정이론의 개념들은 공학적 설계에도 적용될 수 있을 것이다. von Neumann and Morgenstern(1947)에 의해 경제적 응용을 위해 개발된 효용이론(utility theory)은 이후 Keeney and Raiffa(1993)에 의해 설계문제에 적용될 수 있는 형태로 발전되었다. 여기에서 효용함수는 설계대안의 질적 수준(goodness)을 평가하는 정규적인 수단으로서 효용함수의 값이 클수록 좋은 설계를 의미하게 된다.

설계대안에 대한 설계자 선호도(designer's preference)는 설계목표에 따라서 결정되며, 설계목표는 설계의도(design intent)를 결정한다. 따라서, 설계목표를 충실히 달성하기 위해서는 설계과정에서 설계대안의 평가는 설계자 선호도에 입각하여 이루

어져야 한다. 한편, 다수의 설계특성이 있는 설계문제에서는 다음 2가지 측면의 설계자 선호도가 고려되어야 한다. 즉, 설계특성에 대한 설계자 선호도는 절대적 선호도와 상대적 선호도가 있다. 즉, 절대적 선호도는 각 설계특성값(설계목표의 달성정도)에 대한 설계자의 선호정도를 의미하며, 상대적 선호도는 각 설계특성의 다른 설계특성에 대한 상대적 중요도를 의미한다. 전통적인 의사결정 분석방법에서는 기본적으로 설계자에게 선호와 관련된 특정한 질문을 하고, 그 질문에 대한 답을 통해서 설계자 선호도를 결정한다. 절대적 선호도는 해당 설계특성에 대해 주어진 값에 대한 선호정도를 나타내는 설계평가함수(단일특성 효용함수, SAU function : single attribute utility function)를 구하여 설계평가에 사용함으로써 반영하고, 상대적 선호도는 설계특성의 SAU 함수를 하나의 함수(다수특성 효용함수, MAU function : multiple attribute utility function)로 통합하는 방식(즉, MAU 함수의 형태)을 통하여 반영된다.

설계특성에 대한 SAU 함수는 각 설계특성의 특정한 수준에 대한 설계자 선호도를 나타내는 함수로서, 가장 바람직한 특성 수준에 대해 1의 값을 갖고 가장 바람직하지 못한 특성 수준에 대해 0의 값을 갖는다. MAU 함수는 종합적인 설계평가기준으로서, MAU 값의 최대화를 통해 가장 바람직한 설계자 선호도를 갖는 설계대안을 구할 수 있게 된다. 만약, 모든 설계특성간에 상호효용독립이 만족되는 경우 MAU 함수는 식(1)과 같이 SAU 함수에 대한 승법적 형태(multiplicative form)가 되므로, 대부분의 의사결정문제에서는 분석과정의 단순화를 위해

설계특성간의 상호효용독립을 기본적으로 가정한다.

$$MAU(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{K} \left[ \prod_{i=1}^n (Kk_i SAU_i(x_i) + 1) - 1 \right] \quad (1)$$

단,

$MAU(x_1, x_2, \dots, x_n)$  : 다수특성 효용함수

$x_i$  : 설계특성  $i$ 의 값 ( $i=1, 2, \dots, n$ )

$SAU_i(x_i)$  : 설계특성  $i$ 의 단일특성 효용함수

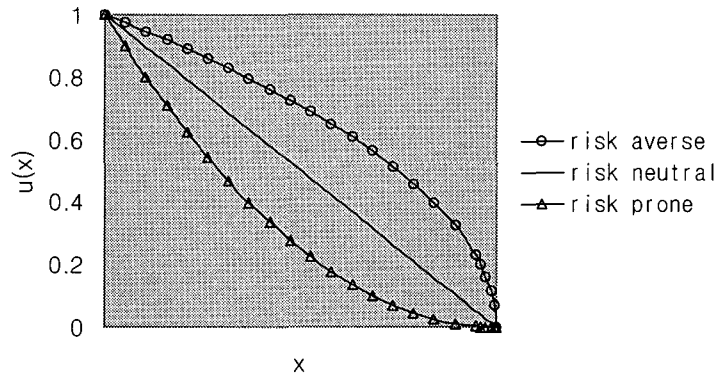
$k_i$  : 설계특성  $i$ 에 대한 scaling 상수

$K$  : 정규화

상수 (단,  $1 + K = \prod_{i=1}^n (1 + Kk_i)$ )

여기서, 각 설계특성에 대한 scaling 상수 ( $k_i$ )는 설계자에게 설계특성간의 상대적 중요도에 대한 질문(lottery question)을 통하여 구해지며, 정규화 상수( $K$ )는 식(1)의 관계식으로부터 구해진다. 한편, 강건 설계의 2가지 설계특성에 대해서는 반드시 상호효용독립을 가정할 수 없으므로, 식(1)의 MAU 함수는 언제나 적용될 수 있는 것은 아니다. 즉, 설계특성간에 상호효용독립이 만족되지 않는 경우에는 설계의도에 합당한 설계자 선호도를 반영할 수 있는 새로운 형태의 MAU 함수의 결정이 반드시 필요하다.

SAU 함수는 그림1에서와 같이 설계자의 위험에 대한 태도(risk attitudes)에 따라 다양한 형태를 가질 수 있다. 설계자의 위험에 대한 태도는 설계최적화 과정에서 다음과 같이 작용한다. 위험회피형(risk averse) 효용함수는 특성의 개선이 대응된 설계대안의 선호도 증대에 큰 영향을 주지 못하므로 해당 특성을 개선하고자 하는 의지가 약함(conservative)을 나타내며 위로 볼록



<그림 1> 위험태도에 따른 효용함수의 형태

(concave)한 함수형태를 갖는다. 위험추구형 (risk prone) 효용함수는 특성에 대한 작은 개선도 대응된 설계대안에 대해 큰 선호도 증대를 주므로 해당 특성을 개선하려는 의지가 강함(aggressive)을 나타내며 아래로 볼록(convex)한 함수형태를 갖는다. 일반적으로 상대적 중요도가 큰 설계특성에는 개선의지가 상대적으로 강한 위험추구형 효용함수가 대응되며, 상대적 중요도가 작은 설계특성에는 개선의지가 상대적으로 약한 위험회피형 효용함수가 대응된다.

강건 설계는 잡음환경 하에서 안정된 성능의 제품을 얻기 위한 실험적 설계 최적화 방법으로서, 기존의 다구찌 방법에서는 여러 가지 논란에도 불구하고 설계평가척도 (design metric)로 SN비(signal-to-noise ratio)를 사용한다. 강건 설계에 있어서 대표적 정특성인 망소특성(smaller-the-better)과 망목특성(nominal-the -best)의 SN비는 식 (2), (3)과 같다.

한편, 망대특성(larger-the-better)의 역수는 망소특성이므로, 앞으로의 논의에서 망대

특성은 망소특성과 동일하다고 간주한다.

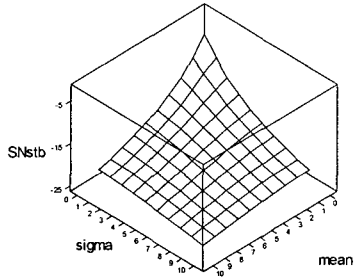
$$SN_{stb} = -10 \log[\sigma^2 + \mu^2] \quad (2)$$

$$SN_{ntb} = 10 \log[(\frac{\mu}{\sigma})^2] \quad (3)$$

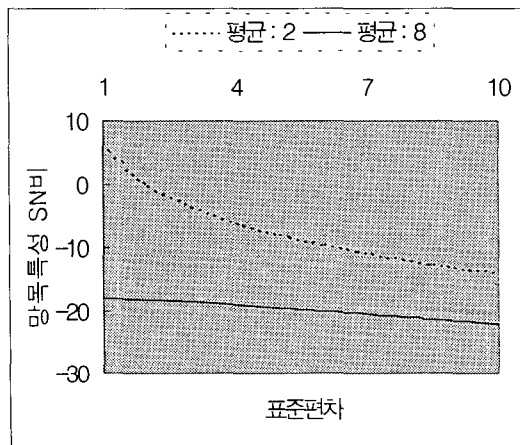
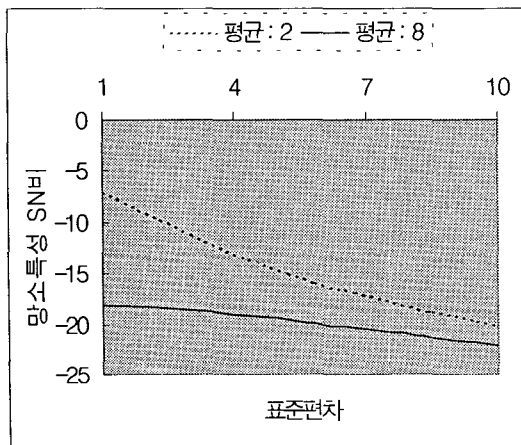
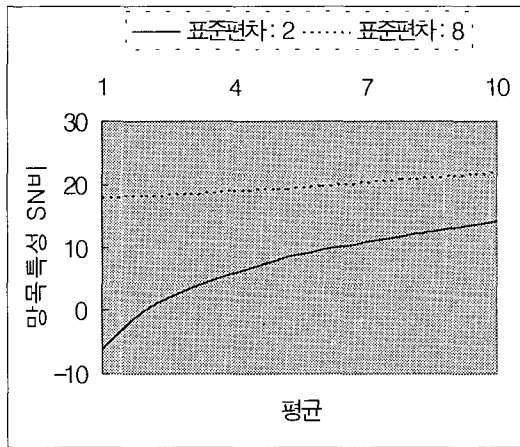
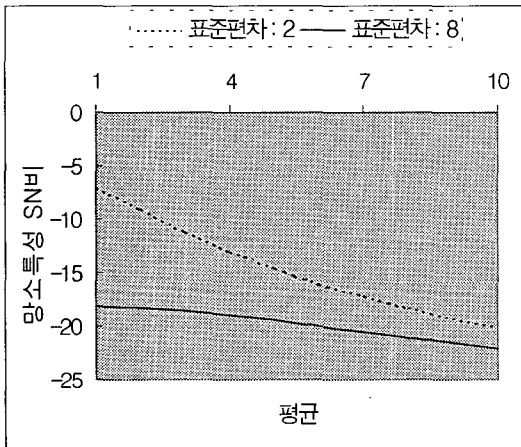
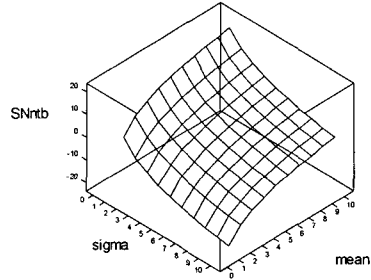
여기서,  $\sigma$  은 성능특성의 표준편차,  $\mu$  는 성능특성의 평균을 나타낸다. 식(2), (3)에서 보는 바와 같이 SN비는 평균과 표준편차라는 2가지 특성에 의해 결정되므로 SN비는 설계특성에 대한 고유한 선호도를 식 내부에 포함하고 있다. 즉, 기존의 SN비를 이용한 최적화에서는 SN비에 내재한 선호도를 이용하여 대안평가가 이루어지므로, 특정한 설계 의도를 반영한 설계자 선호도를 고려하는 것은 불가능하다. SN비에 내재한 설계자 선호 구조를 규명하기 위해, 식(2), (3)에 주어진 SN비를 평균과 표준편차에 대해 그래프를 그려보면 그림2와 같다.

그림2에서 보는 바와 같이, 망소특성의 SN비는 평균(또는, 표준편차)이 작으면 표준편차(또는, 평균)에 대해 위험추구형 함수형태(아래로 볼록)를 갖고, 평균(또는, 표준편차)이 크면 표준편차(또는, 평균)에 대해 위

(a) 망소특성에 대한 SN비



(b) 망목특성에 대한 SN비



<그림 2> 정특성에 대한 SN비 그래프

위험회피형 함수형태(위로 볼록)를 갖는다. 그리고, 망목특성의 SN비는 대체적으로 평균에 대해서는 위험회피형 함수형태를 갖고, 표준편차에 대해서는 위험추구형 함수형태를 갖는다.

갖는다. SN비의 함수형태는 해당 특성에 대한 설계자 선호도를 대변하며, 이것이 곧 SN비에 내재하는 선호도이다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 기존의 SN비에 의한 설계평가는 평균과 표준편차라는 2가지 설계특성에 대한 내재적 선호도를 묵시적으로 가정하고 있다. 그러나, SN비에 내재하는 선호도는 실제적 설계요구로부터 결정되는 설계자 선호도를 언제나 잘 반영한다고 할 수 없다. 즉, 성능특성의 평균을 설계목표치에 우선적으로 근접시키기를 원하거나 또는 설계자가 성능특성의 표준편차를 우선적으로 줄이기를 원할 때, SN비는 이러한 설계자의 요구를 설계평가에 반영할 수 없게 된다. 그러므로, 평균과 표준편차라는 2가지 설계특성값에 대한 설계자 선호도를 정확히 반영할 수 있는 설계평가척도의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 설계의도를 정확히 반영할 수 있는 새로운 설계평가척도를 개발하고자 한다.

#### 4. 설계자 선호도에 기초한 설계평가척도

실험적 최적화에 있어서 설계 시스템의 중요한 설계변수를 알아내는 능력은 설계평가척도가 갖추어야 할 중요한 요소이다. 이상적 평가척도는 설계목표 달성에 중요한 설계변수와 중요하지 않은 설계변수를 정확히 판별하게 하여, 설계목표를 달성하는데 있어서 자원의 효율적 배분을 성취할 수 있어야 한다. 강건 설계에서의 설계목표는 표준편차 최소화와 평균 최적화이다. 앞에서 살펴본 바와 같이 SN비는 2가지 설계특성에 대해

내재한 설계자 선호도를 반영하고 있으므로, 각 설계특성에 대한 설계의도에 의해 결정되는 설계자 선호도에 기반을 둔 설계평가척도의 개발이 필요하다.

한편, 일반적 설계상황에서 설계특성간에 상호효용독립은 언제나 성립한다고 볼 수 없다. 즉, 설계특성 Y가 설계특성 Z에 대해 효용독립이라는 것은 Y에 대한 설계자 선호도가 Z 값에 의해 영향을 받지 않음을 의미한다. 강건 설계에 있어서 설계특성은 평균(Y)과 표준편차(Z)이다. 성능변동을 우선적으로 줄이고자 하는 강건 설계의 목표에 비추어 볼 때, 표준편차의 개선은 평균의 크기에 관계없이 중요하다고 할 수 있으나 평균의 개선은 표준편차가 어느 정도 작을 때에는 의미가 있으나 표준편차가 클 때에는 그다지 중요하다고 볼 수 없다. 즉, 강건 설계에서는 평균에 대한 선호도는 표준편차의 크기에 종속적이며, 표준편차에 대한 선호도는 평균의 크기에 독립적이다. 그러므로, 평균은 표준편차에 효용종속이고 표준편차는 평균에 효용독립이라고 할 수 있다. 이와 같이 한 개의 설계특성만이 다른 설계특성에 대해 효용독립인 경우에는 식(1)을 이용하여 MAU를 구할 수 없으며, 식(4)를 이용하여 MAU 함수를 구해야 한다.

[정리] 만약 Z가 Y에 대해 효용독립이면, 다수속성 효용함수  $u(y, z)$ 는 식(4)와 같다.

$$u(y, z) = u(y, z_0) + \frac{u(y, z_*) - u(y, z_0)}{u(y_0, z_*)} u(y_0, z) \quad (4)$$

단,  $y_0$ 는 Y의 가장 바람직하지 못한 값이고  $y_*$ 는 Y의 가장 바람직한 값이며,  $z_0$ 는 Z의 가장 바람직하지 못한 값이고  $z_*$ 는

Z의 가장 바람직한 값이다.

증명) Z가 Y에 대해서 효용독립이므로 정의에 따라,  $u(y, z) = d_1(y) + d_2(y)u(y_0, z)$ 이며,  $u(y, z_0) = d_1(y) + d_2(y)u(y_0, z_0)$ ,  $u(y, z_*) = d_1(y) + d_2(y)u(y_0, z_*)$  이 된다.

한편,  $u(y_0, z_0) = 0$  이므로, 정리하면  $d_1(y) = u(y, z_0)$ ,

$$d_2(y) = \frac{u(y, z_*) - u(y, z_0)}{u(y_0, z_*)} \text{ 이 된다.}$$

그러므로,  $u(y, z) =$

$$u(y, z_0) + \frac{u(y, z_*) - u(y, z_0)}{u(y_0, z_*)} u(y_0, z)$$

이 성립한다.

따라서, 강건 설계의 2가지 설계목표에 대한 다수특성 효용(MAU)함수는 3가지 조건부 단일속성 효용함수(SAU)로부터 구할 수 있다. 설계과정에서 설계의도를 정확히 고려하기 위해서는, 설계평가기준(design metric)에 평균과 표준편차라는 설계특성에 대한 설계자의 절대적 선호도와 이들에 대한 상대적 선호도(즉, 절충전략)이 반영되어 있어야 한다. 본 연구에서 제안한 식(4)의 MAU 함수는 성능 산포를 우선적으로 줄인다는 강건 설계의 설계철학을 반영한 설계평가기준이라고 할 수 있다.

## 5. 사례연구

본 연구에서 제안된 설계평가척도를 커넥터 튜브 조립공정[다구찌, 1991]에 적용해 봄으로써 설계과정에 설계자 선호도(설계의도)를 반영하는 절차를 보이고, 설계의도가 최종 설계안에 미치는 영향을 분석하고자 한

다. 사례문제의 설계목표는 커넥터 튜브를 삽입하는데 필요한 힘(삽입력)이 잡음환경 하에서도 일관성 있게 작도록 하기 위한 조립공정조건을 결정하는 것이다. 설계에서 고려하는 성능특성은 삽입력으로 망소특성이다. 삽입력과 관련된 공정조건은 물림량(A), 커넥터 두께(B), 삽입 치수(C), 접착제의 량(D)이며, 중요한 잡음인자는 컨디셔닝 시간(E), 컨디셔닝 온도(F), 컨디셔닝 습도(G)이다.

실험점에 대응되는 각 설계대안에 대해 제안된 설계평가척도를 계산하기 위해서는 3개의 조건부 SAU 함수를 구하여야 한다. SAU 함수의 결정은 기본적으로 의사결정분석(decision analysis)에서의 표준적 절차를 따르는데, 사례의 SAU 결정과정을 간략히 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 설계특성인 삽입력의 평균(Y)과 표준편차(Z)에 대한 설계자의 관심범위를 결정하여야 한다. 즉, 설계자가 삽입력의 평균에 대해서 5 이하이면 매우 만족스럽게 생각하고 15 이상이면 매우 불만족스럽게 생각한다면,  $y_* = 5$  이고  $y_0 = 15$  이 된다. 또한, 삽입력의 표준편차가 0 일 때 가장 만족스럽게 생각하고 1.5 이상이면 매우 불만족스럽게 생각한다면,  $z_* = 0$  이고  $z_0 = 1.5$  이 된다. 둘째, MAU 함수의 결정에 필요한 조건부 SAU 함수를 결정한다. 조건부 SAU 함수는 다양한 함수 형태를 가질 수 있으며 효용함수는 가정한 함수형태와 무관하게 동일한 절차를 통해 구할 수 있으므로, 본 연구에서는 편의상 함수의 형태를 식(5)-(7)과 같이 가정한다. 이러한 지수함수는 설계특성(Y, Z)의 범위를 설계자 관심범위에 맞추어 쉽게 제한할 수 있



으며, 함수 parameter  $r_i$  의 크기에 따라 위험회피형(risk averse), 위험중립형(risk neutral), 위험추구형(risk prone) 효용함수를 나타낼 수 있다. 즉,  $r_i < 1$  이면 위험회피형,  $r_i = 1$  이면 위험중립형,  $r_i > 1$  이면 위험추구형 효용함수를 대표하게 된다.

$$u_1(y, z_0) = a_1 \left( \frac{y_0 - y}{y_0 - y_*} \right)^{r_1} + b_1 \quad (5)$$

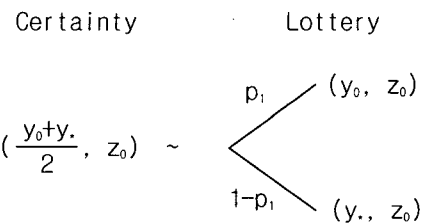
$$u_2(y, z_*) = a_2 \left( \frac{y_0 - y}{y_0 - y_*} \right)^{r_2} + b_2 \quad (6)$$

$$u_3(y_0, z) = a_3 \left( \frac{z_0 - z}{z_0 - z_*} \right)^{r_3} + b_3 \quad (7)$$

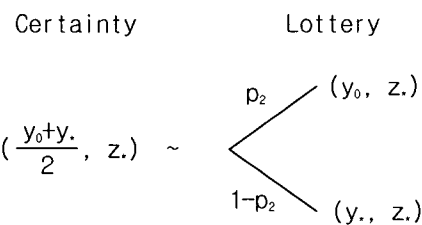
조건부 SAU 함수의 parameters 인  $a_i, r_i, b_i$  를 결정하기 위한 절차는 다음과 같다. 우선 얻어진 MAU 함수가 0 과 1 사이의 값을 갖도록 정규화하기 위하여, 결과  $(y_*, z_0)$  와 결과  $(y_0, z_*)$  에 대하여 가능한 최선의 결과인  $(y_*, z_*)$  와 비교해 볼 때 어느 정도의 효용(utility)을 갖는지를 설계자에게 0 과 1 사이의 수치로 평가하게 한다. 만약  $(y_*, z_0)$  가  $(y_*, z_*)$  의  $100c_1(\%)$  그리고  $(y_0, z_*)$  가  $(y_*, z_*)$  의  $100c_2(\%)$  의 효용을 갖는다면,  $u_1(y_*, z_0) = c_1$  그리고

$u_3(y_0, z_*) = c_2$  를 의미하게 된다. 효용함수의 parameters 를 그림3의 lottery questions 에 대해 설계자가 대답한 확률 등가 ( $p_i$ )를 이용하여 구하여 대입하면, 조건부 SAU 함수는 식(8)-(10)과 같이 구해진다. 확률등가(probability equivalence)를 이용하여 parameters를 구하는 절차는 Keeney and Raiffa(1993)에 자세히 설명되어 있다. 셋째, MAU 함수,  $u(y, z)$ , 는 조건부 SAU 함수와

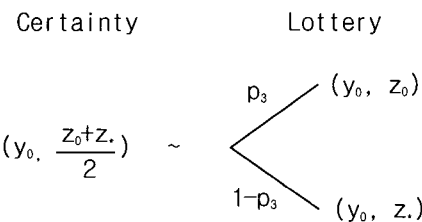
(a) 조건부 효용함수 :  $u_1(y, z_0)$



(b) 조건부 효용함수 :  $u_2(y, z_*)$



(c) 조건부 효용함수 :  $u_3(y_0, z)$



<그림 3> 효용함수 parameters 결정을 위한 lottery questions

[정리]를 이용하여 구하면 식(11)과 같이 된다.

$$u_1(y, z_0) = c_1 \left( \frac{y_0 - y}{y_0 - y_*} \right)^{\log_2 [c_1/p_1]} \quad (8)$$

$$u_2(y, z_*) = (1 - c_2) \left( \frac{y_0 - y}{y_0 - y_*} \right)^{\log_2 [(1 - c_2)/(p_2 - c_2)]} + c_2 \quad (9)$$

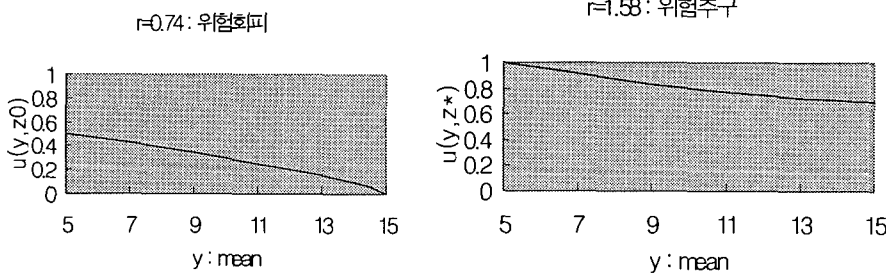
$$u_3(y_0, z) =$$

$$c_2 \left( \frac{z_0 - z}{z_0 - z_*} \right)^{\log_2 [c_2/p_3]} \quad (10)$$

$$u(y, z) =$$

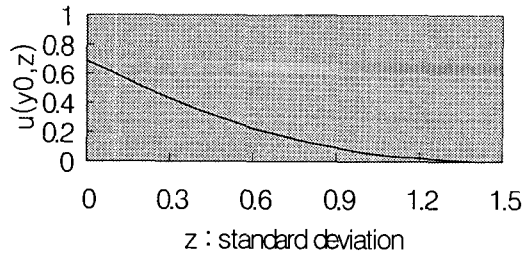
계특성에 대한 절대적 선호도와 절충태도를 반영한 값이다. 여기서,  $c_1$  보다  $c_2$  가 크다는 것은, 삼입력의 평균이 표준편차보다 상대적으로 중요한 설계특성임을 의미한다. 또

(a) 조건부 SAU 함수 :  $u_1(y, z_0)$       (b) 조건부 효용함수 :  $u_2(y, z_*)$



(c) 조건부 효용함수 :  $u_3(y_0, z)$       (d) MAU 함수 :  $u(y, z)$

r=2.22: 위험추구



<그림 4> 효용함수 Graph

$$u_1(y, z_0) + \frac{u_2(y, z_*) - u_1(y, z_0)}{u_3(y_0, z_*)} u_3(y_0, z) \quad (11)$$

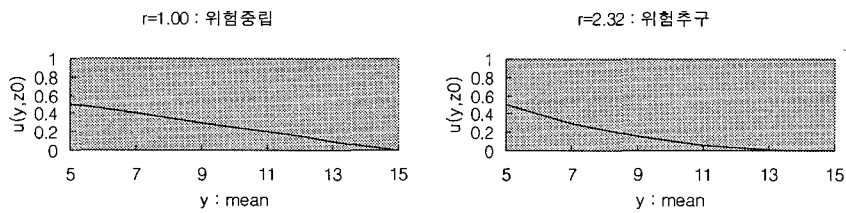
본 사례에 대한 설계자의 평가가  $c_1=0.5$ ,  $c_2=0.7$ ,  $p_1=0.3$ ,  $p_2=0.8$ ,  $p_3=0.15$  이었다면, 조건부 SAU 함수 및 MAU 함수의 그래프는 그림4와 같다. 설계자에 대한 질문을 통해 얻은  $c_1=0.5$ ,  $c_2=0.7$ ,  $p_1=0.3$ ,  $p_2=0.8$ ,  $p_3=0.15$  는 설계의도에서 비롯된 설

한,  $p_1=0.3$  이므로  $r_1=0.74$  가 되어  $u_1(y, z_0)$  는 위험회피형 효용함수가 되며,  $p_2=0.8$ ,  $p_3=0.15$  이므로  $r_2=1.58$ ,  $r_3=2.22$  가 되어  $u_2(y, z_*)$  와  $u_3(y_0, z)$  는 위험추구형 효용함수가 된다. 설계특성에 대한 설계자의 조건부 위험태도는 그림4의 (a)-(c) 에 잘 나타나 있다. 즉, 설계자는 Z 의 크기가 작을 때에는 Y 의 개선에 대해 aggressive 한 태도를 가지며, Z 가 클 때에

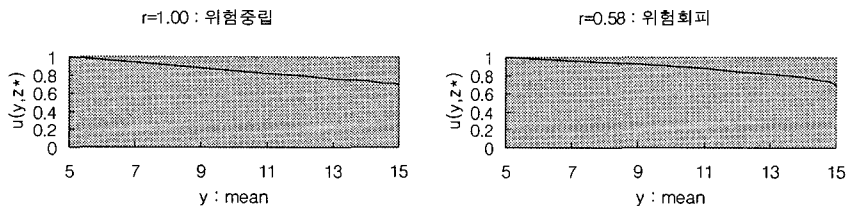
는 conservative 한 태도를 가진다. 또한, 설계자는 Z 에 대해서는 Y 의 크기에 관계없이 aggressive 한 태도를 갖는다. 그리고, 그림4 (d)의 MAU 함수 그래프에서 볼 때, 설계자는 Z 에 대해서는 Y 의 값에 관계없이

위험추구형 태도를 보이며, Y 에 대해서는 Z 가 작으면 위험추구형 태도를 보이다가 Z 가 커짐에 따라 위험회피형 태도로 바뀐다. 그림4 d) 그래프로 볼 때, MAU 함수는 Z 에 대해서는 Y 의 값에 관계없이 위험추구

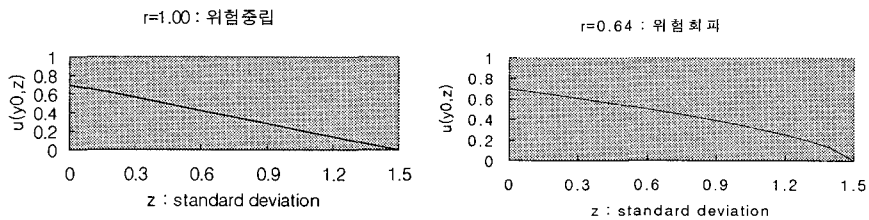
조건부 SAU 함수 :  $u_1(y, z_0)$



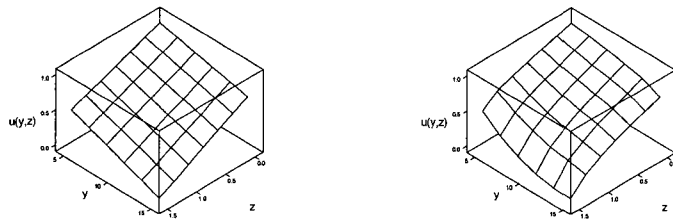
조건부 효용함수 :  $u_2(y, z_*)$



조건부 효용함수 :  $u_3(y_0, z)$



MAU 함수 :  $u(v, z)$



(a)  $p_1=0.25, p_2=0.85, p_3=0.35$  (b)  $p_1=0.17, p_2=0.47, p_3=0.36$

<그림 5> 확률등가와 효용함수의 관계 ( $c_1=0.5, c_2=0.7$ )

형, Y 에 대해서는  $z = z_0 = 1.5$  인 경우에는 위험회피형 그리고  $z = z_* = 0$  인 경우에는 위험추구형임을 알 수 있다. 즉, Z 는 Y 에 대해 효용독립이고, Y 는 Z 에 대해 효용종속이다. 비교를 위해서, 2가지 다른 설계자 선호구조에 대한 효용함수를 구해보면 그림5의 (a), (b) 와 같다. 즉, 설계자 선호도에 따라 MAU 함수의 형태가 확연히 달라짐을 볼 수 있다. 이러한 결과는 최적 설계조건에 큰 영향을 줄 것이다.

본 사례에서 사용한 설계변수의 실험수준은 표1과 같으며, 여기서 각 설계변수의 2수준은 현행의 공정조건이다. 실제 설계에서는 더 많은 설계변수를  $L_{18}$  에 할당하는 것이 바람직하겠지만, 본 사례는 문제해결 절차를 보이기 위한 것이므로 편의상 주어진 설계변수를 배치할 수 있는 가장 작은 직교 배열표인  $L_9$  를 내측 배열에 사용하였다. 외측 배열은 각 실험조건별로 설계특성인 평균과 표준편차를 가능한 정확하게 계산하기 위해 잡음수준을

크기가 비교적 큰  $L_8$  을 사용하여 잡음영향을 평가하였다. 잡음수준은 편의상 명시하지 않았다. 각 실험조건과 이들에게서 얻어진 삼입력 data(단, 단위 생략), 삼입력의 평균(Y) 및 표준편차(Z), 그림4의 MAU 함수값, 망소특성 SN비는 그림6과 같다.

<표1> 설계변수별 실험수준

설계변수	A	B	C	D
1수준	50	500	1	100
2수준	150	1500	50.5	300
3수준	250	3000	100	500

그림4의 MAU 함수값을 이용하여 구한 최적 공정조건은  $A_3, B_3, C_1, D_2$ 로서 전통적 SN비에 의한 최적 조건,  $A_1, B_1, C_1, D_1$ , 과는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 최적 공정조건에서의 MAU 함수값의 기대치는 0.79로서,  $A_1, B_1, C_1, D_1$  의 MAU 함수값 0.67 (그림6의 1행 참고) 보다 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 즉, 설계자 선호도를 고려하

					1	2	3	4	5	6	7	8					
					1	1	1	1	2	2	2	2	E				
					1	1	2	2	1	1	2	2	F				
No.	A	B	C	D	1	1	2	2	2	2	1	1	G	Y	Z	MAU	SN
1	1	1	1	1	7.5	7.2	7.6	7.4	7.2	7.3	6.5	7.7		7.30	0.37	0.67	-17.28
2	1	2	2	2	8.0	8.1	8.4	7.6	7.8	8.7	8.2	8.2		8.13	0.35	0.65	-18.20
3	1	3	3	3	8.5	9.0	8.9	8.8	8.9	8.6	8.7	8.7		8.76	0.17	0.73	-18.85
4	2	1	2	3	8.1	8.1	8.2	8.6	7.5	8.5	8.5	8.3		8.23	0.35	0.64	-18.31
5	2	2	3	1	8.7	9.7	8.9	9.0	9.2	8.8	9.1	9.4		9.10	0.33	0.62	-19.19
6	2	3	1	2	7.9	7.5	7.8	7.6	7.6	7.6	8.0	7.6		7.70	0.17	0.77	-17.73
7	3	1	3	2	9.3	9.3	9.5	9.3	9.6	9.6	9.6	9.5		9.46	0.14	0.72	-19.52
8	3	2	1	3	7.5	8.4	7.9	7.9	8.3	8.2	8.1	8.2		8.06	0.28	0.69	-18.13
9	3	3	2	1	8.5	8.4	8.2	8.6	8.5	9.0	8.7	8.3		8.53	0.24	0.69	-18.62

<그림 6> 커넥터 튜브 조립공정의 실험계획 및 실험 data

지 않고 SN비를 이용하여 설계평가를 하는 경우 결과적으로 설계자가 평가하는 효용이 0.67 인 설계대안을 얻게 되며, 이는 설계자 선호도를 고려한 경우의 0.79 에 비해 상당히 불만스러운 결과이다. 따라서, 전통적 SN 비는 설계의도와는 무관한 선호도로 설계 대안을 평가함을 알 수 있다.

결론적으로 설계자 선호도에 관한 정보는 공학적 설계에서 매우 중요한 역할을 하며, 최적 설계의 결정에 큰 영향을 준다. 본 연구에서 제안한 설계자 선호도에 기초한 설계 평가척도는 강건 설계과정에서 설계자의 설계특성값에 대한 선호도와 다수의 설계특성간의 질충태도를 정확히 반영하여 설계의도에 부합된 최적 설계를 결정할 수 있게 해준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 효용이론을 이용하여 강건 설계의 2가지 설계목표에 부합된 설계조건을 구할 수 있는 새로운 설계평가척도의 개발하였다. 제안된 설계평가척도는 강건 설계과정에 설계자의 설계의도를 정확히 반영할 수 있게 해 준다. 간단한 사례적용을 통해 기존의 SN비가 갖는 한계점을 살펴보고, 제안된 설계평가척도가 이러한 문제의 해결에 어떤 기여를 할 수 있는지에 대해 검토해 보았다.

## 참고문헌

- [1] Taguchi G., Chowdhury, S. and Taguchi, S.(2000), Robust Engineering, McGraw-Hill, New York, NY.
- [2] Thurston, L.D., Carnahan, V.J. and Liu, T.(1991), "Optimization of Design Utility," Design Theory and Methodology, DE-Vol.31, pp. 173-180, ASME.
- [3] Thurston, D. L., Carnahan, J.V., and Liu, T. (1994), "Optimization of Design Utility," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp.801-808.
- [4] Chen, W., Wiecek, M.M. and Zhang, J.(1998), "Quality Utility - A Compromise Programming Approach to Robust Design," 1998 ASME Design Engineering Technical Conference, Paper No. DAC-560.
- [5] Taguchi, G.(1987), System of Experimental Design, UNIPUB/Kraus International Publications, New York.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Bras, B. and Mistree, F(1994)., "Concurrent Axiomatic and Robust Design Using Compromise Decision Support Problems," Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol.8, pp. 17-31.
- [9] Suh, N.P.(1990), The Principles of Design, Oxford, U.K., Oxford University Press.
- [10] Chen, W., Allen, J.K., Tsui, K.L., and Mistree, F.(1996), "A Procedure for

- Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors," ASME J. of Mechanical Design, Vol. 118, pp. 478-485.
- [11] Ku, K., Rao, S.S. and Chen, L.(1998), "Taguchi-Aided Search Method for Design Optimization of Engineering Designs," Engineering Optimization, Vol.30, pp. 1-23.
- [12] Iyer, H. V. and Krishnamurty, S. (1998), "A Preference-Based Robust Design Metric," Proc. of 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC98/DAC-5625.
- [13] Gadallah, M.H. and Elmaraghy, H.A.(1993), "A Concurrent Engineering Approach to Robust Product Design," Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol.1, pp. 237-251.
- [14] Sandgren, E., Gim, G. and Ragsdell, K.M.(1985), "Optimal Design of a Class of Welded Structures Based on Design for Latitude," ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.107, pp. 482-487.
- [15] Parkinson, A., Sorensen, C. and Pourhassan, N.(1993), "A General Approach for Robust Optimal Design," ASME J. Mechanical Design, Vol.115, pp. 74-80.
- [16] Emch, G. and Parkinson, A.(1994a), "Robust Optimal Design for Worst-Case Tolerances," ASME J. Mechanical Design, Vol.116, pp. 1019-1025.
- [17] Lewis, L. and Parkinson, A.(1994b), "Robust Optimal Design Using a Second-Order Tolerance Model," Research in Engineering Design, Vol.6, pp. 25-37.
- [18] Parkinson, A.(1995), "Robust Mechanical Design Using Engineering Models," ASME J. Mechanical Design, Vol.117, pp.48-54.
- [19] Sundaresan, S., Ishii, K. and Houser, D.R.(1993), "A Robust Optimization Procedure with Variations on Design Variables and Constraints," DE-Vol. 65-1, Advances in Design Automation-Vol.1, ASME, pp. 3779-3786.
- [20] Ramakrishnan, B. and Rao, S.S.(1996), "A General Loss Function Based Optimization Procedure for Robust Design," Engineering Optimization, Vol.25, pp. 225-276.
- [21] von Neumann, J. and Morgenstern, O.(1947), The Theory of Games and Economic Behavior, 3<sup>rd</sup> ed., Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [22] Keeney, R.L. and Raiffa, H. (1993), Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, Wiley and Sons, New York.
- [23] Baylock Manufacturing Corp.(1991), "수지 커넥터 튜브 조립품의 설계 파라미터 최적화 실험," 품질공학 사례집(미국, 유럽편), pp. 149-160, 한국공업표준협회.