經營科學
第33卷 第2號
2016年 6月, pp.75-87
http://dx.doi.org/10.7737/KMSR.2016.33.2.075

다수의 마켓 세그먼트 하에서 품질기능전개 시(時) 기술특성들의 최적 값을 결정하기 위한 혼합정수계획모형*

양재영 · 유재욱†
동아대학교 경영학과

Mixed Integer Linear Programming Model to Determine the Optimal Levels of Technical Attributes in QFD under Multi-Segment Market

Jae Young Yang · Jaewook Yoo†
College of Business Administration, Dong-A University

■ Abstract ■

Quality function deployment (QFD) is a widely adopted customer-oriented product development methodology by analyzing customer requirements. It is a main activity in QFD planning process to determine the optimal values of the technical attributes (TAs) so as to achieve the customer requirements (CRs) from the House of Quality (HoQ). In most of the previous research, all the TAs in QFD are assumed to have either continuous or discrete values. In the real world applications, the continuous TAs and the discrete TAs are often mixed in QFD. In this paper, a mixed integer linear programming model is formulated to obtain the optimal values for the continuous TAs and the discrete TAs in QFD planning as well as Branch and Bound (B and B) algorithm is proposed as the solution approach. Finally, the proposed model and solution approach are illustrated with an office chair under multi-segment market, and the sensitivity analysis is performed to study how the proposed model and its solutions respond to the variation for the two elements which are budget and CRs' weights.

Keywords : Quality Function Deployment, Mixed Integer Linear Programming, Branch and Bound Algorithm

논문접수일 : 2016년 01월 20일 논문게재확정일 : 2016년 05월 24일
논문수정일 : 1차(2016년 04월 30일), 2차(2016년 05월 24일)
* 이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.
† 교신저자, jyoo@dau.ac.kr

1. 서 론

품질기능전개(Quality Function Deployment 이하 QFD)는 고객의 요구사항(Customer Requirements 이하 CRs)을 분석하여 이들을 제품 사양에 반영하는 체계적인 방법으로 제품개발 및 설계에 널리 사용되고 있다[1]. QFD의 기본적인 개념은 품질의 집(House of Quality 이하 HoQ)이라는 차트(Chart)를 활용해서 CRs를 관련 기술속성(Technical Attributes 이하 TAs)으로 전환하고, 이어서 TAs를 관련 부품(Parts)들로, 부품을 공정설계(Process Design)로 그리고 공정설계를 관련 제조 및 생산계획(Production planning)으로 전환하여 CRs을 제품에 반영하는 것이다[5]. HoQ에는 일반적으로 CRs 과 TAs 간의 관계, 그리고 각 TAs간의 관계에 대한 정보들이 있으며, 이와 같은 정보를 토대로 전체고객만족도(Overall Customer Satisfaction 이하 OCS)를 최대화 하는 TAs의 목표 값을 결정하는 것은 QFD 과정에서 가장 중요한 일 중의 하나이다.

QFD에서 TAs의 최적 값을 결정하기 위하여 다양한 최적화 방법들이 적용되었다. 이들 대부분은 선형계획법(Linear Programming)과 정수계획법(Integer Programming)을 기반으로 하였고, 또한 동적계획법(Dynamic Programming)을 기반으로 한 모형도 연구되었다.

Wasserman[17]을 비롯한 많은 연구자들이 선형계획법(Linear Programming)을 이용하여 예산제약하에 TAs의 우선순위를 도출하고 제한된 예산을 TAs에 배분하는 QFD 연구를 진행하였다[6, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 18]. Lai et al.은 선형계획법을 이용한 TAs의 최적해를 구하는 방법은 좋기는 하나, TAs의 값들이 연속적인 범위내의 한 값을 가지는 것을 전제로 하였고, TAs와 고객만족도와의 관계, TAs와 비용과의 관계를 찾아내는 데에 많은 어려움이 있다는 것을 발견하였다[7]. Park and Kim[15]과 Halog et al.[4]는 각 TAs의 기술중요도를 계산하고 이를 목적식으로 하는 정수계획법을 이용하여 TAs을 선택하였다. 그러나 이들 방법은 기술적으로 중요한 TAs을 선택하여 고객의 요구사항을 만족시키지 못할 수 있다는 단점이 지적되었다[7].

이와 같이 선형계획법과 정수계획법을 기반으로 한 연구에서 발견된 한계를 극복하기 위해 동적계획법(Dynamic Programming)을 통한 QFD 최적화 연구가 진행되었다. 동적계획법을 적용한 연구에서는 TAs가 모두 불연속적인 값을 갖는다고 가정하여 숙련된 엔지니어의 경험을 바탕으로 CRs과 TAs 간의 관계를 정하고 각 TA마다 이를 구현함으로써 얻어지는 고객의 만족도와 비용을 체계적으로 분류하였다[7].

위에서 언급된 대부분의 연구에서는 QFD 수행시 모든 TAs의 값이 연속적이거나 불연속적인 경우 중 하나의 경우만을 가정하였다. 그러나, 실제 제품개발 환경에서는 연속적인 값을 갖는 TAs와 불연속적인 값을 갖는 TAs가 혼합되어 동시에 고려해야 하는 경우가 대부분이다[10]. 예를 들어 컴퓨터 하드웨어 제품개발에서 하나의 TA인 CPU성능은 그 값들이 3.0GHz~4.0GHz사이의 연속적인 범위 내에서 한 값을 갖고, 동시에 다른 TA인 메모리의 크기는 2GB, 4GB, 8GB와 같이 불연속적인 값을 가지는 경우이다.

따라서 본 연구에서는 제품개발에서 보다 실제 상황인 연속적인 값을 갖는 TAs와 불연속적인 값을 갖는 TAs가 혼합되어 동시에 고려하고 TAs간의 관계, 각 CR에 대한 고객만족도와 그 CR을 구현하기 위한 TAs간의 관계, 그리고 한정된 예산 등의 제약하에서 제품의 전체시장에서 고객의 만족도를 최대화하는 TAs의 최적 값을 구하고자 이를 혼합정수계획법(Mixed Integer Linear Programming)으로 모형화하고 그 해법으로 분지한계법(Branch and Bound Algorithm)을 제시한다. 또한 본 연구의 모델을 최근 제품개발 패러다임인 대량맞춤(Mass Customization)에 적용을 가능하게 하기 위하여 제품군 설계(Product Family Design)를 위한 다수의 마켓 세그먼트(Market Segment)로 확장한다[11].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 본 연구에서 다룰 문제를 수리모형화하고 그 해법을 설

명하고 제 3장에서는 사례를 들어 제 2장에서 제안된 모형과 해법을 적용하고, 사례로 제시한 모형에서 개발예산과 CRs 가중치에 대한 민감도 분석을 수행한다. 제 4장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구방향에 대하여 언급한다.

2. 수리모형 및 분지한계법

2.1 수리모형

하나의 제품은 I개의 CRs과 J개의 TAs로 이루어지고, 이 제품의 시장은 K개의 마켓 세그먼트들로 분할된다고 가정하자. K개로 분할된 마켓 세그먼트와 일치하여 K개의 HoQ를 수립해야 한다. 각 마켓 세그먼트의 특성에 맞게 HoQ 내에는 CRs 및 그들의 가중치, 각 TA와 그 밖의 TAs간의 관계, 각 CR과 이를 구현하기 위해 필요한 TAs간의 관계, 경쟁사 제품과 자사 기존제품에 대한 벤치마킹 점수 등의 데이터가 수집되어야 한다.

본 논문에서 사용될 기호를 다음과 같이 정의한다.

CR_i : 고객의 요구사항 i
TA_j : 기술속성 j
j^* : 불연속적인 값을 갖는 TA_{j^*}
MS_k : 마켓 세그먼트 k
y_{ki} : MS_k에서 구현된 CR_i에 대한 고객인식도
w_{ki} : MS_k에서 CR_i의 가중치($0 \le w_{ki} \le 1$, $\sum_{i=1}^{I} w_{ki} = 1$)
ξ_k : MS_k의 가중치($0 \le \xi_k \le 1$, $\sum_{k=1}^{K} \xi_k = 1$)
q_k : MS_k의 고객수의 추정값
x_{kj} : MS_k에서 TA_j의 정규화(normalizing)된 값
l_{kj} : MS_k에서 TA_j의 목표 실제값
$l_{kj}^{\max}$, $l_{kj}^{\min}$: MS_k에서 TA_j의 최대값, 최소값
v_{kj^*l} : MS_k에서 TA_{j^*}의 대안 l의 정규화된 값
L_{j^*} : TA_{j^*}의 대안의 총 개수
z_{kj^*l} : MS_k에서 TA_{j^*}의 값으로 v_{kj^*l}가 선택되면 1이고, 그렇지 않으면 0인 이진정수변수
f_{ki} : MS_k에서 CR_i의 고객 인식도와 이와 연관된 TAs와의 관계를 보여주는 함수
g_{kj} : MS_k에서 TA_j와 그 밖의 TAs간의 관계를 보여주는 함수
c_{kj} : x_{kj}를 실행하는 데 드는 비용
B : 제품개발을 위해 주어진 예산

2.1.1 TAs의 정규화(Normalizing)

TAs는 각기 다른 단위를 가지기 때문에, Chen et al. [2]에 의해 제안된 방법으로 제품의 TAs 값을 식 (1)과 식 (2)와 같이 정규화할 수 있다.

$$x_{kj} = (l_{kj} - l_{kj}^{\min}) / (l_{kj}^{\max} - l_{kj}^{\min}) \quad (1)$$

$$x_{kj} = (l_{kj}^{\max} - l_{kj}) / (l_{kj}^{\max} - l_{kj}^{\min}) \quad (2)$$

설계팀의 목적이 l_{kj}의 값을 증가시키는 것(예를 들면, 컴퓨터의 메모리 크기)이라면 식 (1)이 사용되고, 설계팀의 목적이 l_{kj}의 값을 감소시키는 것(예를 들면, 기계의 소음)이라면 식 (2)가 사용된다.

2.1.2 제품의 전체시장에 대한 OCS의 모델링

MS_k에서 고객의 OCS인 S_k는 MS_k의 각 CR에 대한 고객 만족도와 그 CR의 가중치간의 곱을 모든 CRs에 대한 합으로 식 (3)과 같이 표현될 수 있다[2, 6, 16].

$$S_k = \sum_{i=1}^{I} w_{ki} s_{ki}(y_{ki}) \quad (3)$$

여기서, w_{ki}는 MS_k에 있어서 CR_i의 중요도를 나타내는 가중치이다($0 \le w_{ki} \le 1$, $\sum_{i=1}^{I} w_{ki} = 1$). y_{ki}는 MS_k에 있어서 CR_i에 대한 고객의 인식도를 의미하고 경쟁사 대비 본사 제품의 CR_i의 만족도를 가리키는 수치로 양의 범위 $[a, b]$에서 선택될 수 있다(예를 들면, [1, 5]). $s_{ki}(y_{ki})$는 y_{ki}를 정규화한 값으로 식 (4)와 같이 정의될 수 있다.

$$s_{ki}(y_{ki}) = (y_{ki} - y_{ki}^{\min}) / (y_{ki}^{\max} - y_{ki}^{\min}) \quad (4)$$

여기서, $y_{ki}^{\max}$와 $y_{ki}^{\min}$은 각각 y_{ki}의 최대값과 최소값을 의미하고, $s_i(y_{ki}^{\min})=0$이고 $s_i(y_{ki}^{\max})=1$이다. 그러므로 식 (3)은 식 (5)와 같이 정리될 수 있다.

$$S_k = \sum_{i=1}^{I} w_{ki}(y_{ki} - y_{ki}^{\min})/(y_{ki}^{\max} - y_{ki}^{\min}) \tag{5}$$

전체시장의 OCS인 S는 각 마켓 세그먼트 OCS인 S_k와 그 가중치의 곱을 모든 마켓 세그먼트에 대하여 합한 것이라고 가정하면, 이때 본 연구에서 다루는 최적화 문제의 목적식은 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$S = \sum_{k=1}^{k}\sum_{i=1}^{I} \xi_k w_{ki}(y_{ki} - y_{ki}^{\min})/(y_{ki}^{\max} - y_{ki}^{\min}) \tag{6}$$

여기서, ξ_k는 과거의 판매 자료 또는 판매부서의 경험을 통해 추정진 MS_k의 고객 수를 기반으로 MS_k의 중요도를 나타내는 가중치로 식 (7)과 같이 정의한다.

$$\xi_k = q_k / \sum_{k=1}^{K} q_k \tag{7}$$

여기서, q_k는 MS_k의 고객 수의 추정 값이다.

2.1.3 CR_i와 TAs간 함수관계의 계수 추정

MS_k에서 CR_i에 대한 고객 인식도와 TAs간의 함수관계는 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$y_{ki} = f_{ki}(x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{kJ}) \tag{8}$$

식 (8)을 수식으로 나타내기 위해 널리 이용되는 방법은 회귀분석을 기반으로 한다[13].

일반적으로 간단히 f_{ki}는 식 (9)와 같이 선형관계로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y_{ki} &= a_{ki0} + \sum_{j=1}^{J} a_{kij} x_{kj} \\ &= a_{ki0} + a_{ki1}x_{k1} + a_{ki2}x_{k2} + \cdots + a_{kiJ}x_{kJ} \end{aligned} \tag{9}$$

만약 MS_k에 있어서 CR_i가 TA_j와 아무 관계가 없다면 TA_j가 어떤 수준의 값을 가져도 CR_i를 실현하는 데 아무런 영향을 미치지 못하는 것을 의미한다. 이때 x_{kj}의 계수는 0의 값을 갖게 된다.

2.1.4 TA_j와 그 밖의 TAs간 상관관계의 모델링

TA_j와 그 밖의 TAs간의 함수관계는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &x_{kj} = g_{kj}(x_{k1}, \cdots, x_{k,j-1}, x_{k,j+1}, \cdots, x_{kJ}) \\ &k = 1, 2, \cdots, K \end{aligned} \tag{10}$$

식 (9)과 유사하게 g_{kj}는 선형이라고 가정하고 최소자승회귀분석방법(least square regression method)으로 이들 계수들을 추정할 수 있다[13].

2.1.5 불연속적인 값을 갖는 TA의 모델링

불연속적인 값을 갖는 TA_{j^*}는 L_{j^*}개 대안들 중에서 하나의 대안을 그 값으로 가질 수 있다고 가정한다. 이를 식 (11)~식 (13)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\sum_{l=1}^{L_{j^*}} z_{kj^*l} = 1 \tag{11}$$

$$x_{kj^*} = \sum_{l=1}^{L_{j^*}} z_{kj^*l} v_{kj^*l} \tag{12}$$

$$z_{kj^*l} = 0 \text{ 또는 } 1 \tag{13}$$

식 (11)은 단지 한 개의 대안만을 TA_{j^*}가 선택할 수 있도록 하고, 식 (12)는 TA_{j^*}가 선택된 대안의 값을 그 값으로 갖도록 한다. 식 (13)은 z_{kj^*l}가 이진정수 변수임을 나타낸다.

2.1.6 예산제약

각 마켓 세그먼트의 고객 요구사항을 만족시키기 위하여 TAs을 구현할 때 드는 모든 비용은 제품의 전체 시장에 할당된 예산을 초과할 수 없으므로 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J} c_{kj} x_{kj} \le B \tag{14}$$

여기서, c_{kj}는 MS_k에서 TA_j를 실현하는 데 드는 비용이고, 이들 비용과 TA간의 관계는 선형관계를 갖는다고 가정한다. B는 신제품 개발에 사용 가능한 예산이다.

2.1.7 최적화 모형

종합적으로 수리모형을 정리해 보면, QFD 수행 시 불연속적인 값을 갖는 TAs와 연속적인 값을 갖는 TAs가 혼합된 개발환경에서 각 CR과 TAs간의 관계, 각 TA와 그 밖의 TAs간의 관계, 주어진 예산 등의 제약이 있고 다수의 마켓 세그먼트로 분할된 전체 시장에 대한 고객 요구사항의 만족도를 최대로 하는 각 마켓 세그먼트의 TAs의 최적 값을 찾는 문제로서 혼합정수계획법(Mixed Integer Linear Programming)으로 문제(P)와 같이 모델링 된다.

문제(P)

$$\max \quad S = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I}\xi_k w_{ki}(y_{ki} - y_{ki}^{\min})/(y_{ki}^{\max} - y_{ki}^{\min})$$

$$\text{s.t.} \quad y_{ki} = f_{ki}(x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{kJ}) \text{ for all } k,\ i$$

$$x_{kj} = g_{kj}(x_{k1}, \cdots, x_{k,j-1}, x_{k,j+1}, \cdots, x_{kJ}) \text{ for all } k, j$$

$$\sum_{l=1}^{L_j^*} z_{kj^*l} = 1 \text{ for all } k, \text{ some } j^*$$

$$x_{kj^*} = \sum_{l=1}^{L_{j^*}} z_{kj^*l} v_{kj^*l} \text{ for all } k, \text{ some } j^*$$

$$z_{kj^*l} = 0 \ \textit{or}\ 1 \text{ for all } k, \text{ some } j^*, \text{ all } l$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J} c_{kj}x_{kj} \le B$$

$$0 \le x_{kj} \le 1 \text{ for all } k, j$$

2.2 분지한계법

제 2장 제 1절에서 제시된 문제(P)의 최적해를 찾기 위해 분지한계법(Branch and Bound)을 적용한다. 최적해의 탐색방법은 깊이우선 탐색(depth-first search)을 사용하며, 다음과 같이 분지한계법을 간략하게 설명한다.

초기화(Initialization)

문제(P)의 최초 하한값(Lower Bound) $S_{LB} = -\infty$로 설정한다. 아래 설명된 단계 2의 한계(Bound)단계부터, 패덤(Fathom)단계, 최적해 점검(Optimality Test)을 실행한다. 패덤되지 않으면 문제(P)를 아래의 단계들을 적용하기 위한 서브문제(Sub-Problem)로 취급하여 단계 1의 분지단계(Branch)부터 첫 번째 반복(Iteration)을 수행한다.

단계 1 : 분지단계(Branch)

분지단계에서는 불연속적인 값을 갖는 TA_{j^*}에 대한 이진정수변수 z_{kj^*l}를 임의로 선택하여 $z_{kj^*l} = 1$과 $z_{kj^*l} = 0$으로 고정하고 두 개의 서브문제로 분지한다.

단계 2 : 한계단계(Bounding)

서브문제에 대하여 선형계획문제로 이완(LP-relaxed Problem)하여 풀고 그 해를 상한값(Upper Bound) S_{UB}로 이용한다. 만약 그 해가 정수조건을 만족하면 S_{LB}로 이용한다. 본 논문에서는 선형계획문제를 Matlab의 Optimization Tool box를 이용하여 해를 구했다.

단계 3 : 패덤단계(Fathom)

현재의 서브문제에 대해서 3가지 항목을 점검하여 이들 중 단지 하나의 항목에만 해당 되도 패덤한다.

점검 1 : $S_{UB} \le S^*$, 여기서 S^*는 현재까지 최고 가능해(incumbent)이다.

점검 2 : 선형계획으로 이완된 문제가 가능해를 갖지 못한다.

점검 3 : 선형계획으로 이완된 문제의 해가 정수 조건을 만족한다. 이 때 $S_{LB} \ge S^*$이면, S^*를 S_{LB}로 업데이트(Update)한다.

단계 4 : 최적해 점검

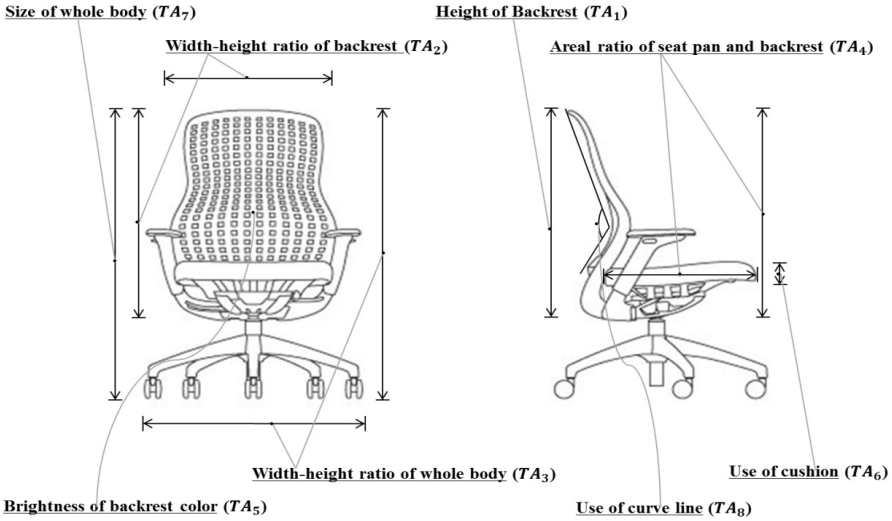
모든 서브 문제가 패덤되었다면 알고리듬을 정지한다. 이 때 S^*가 문제(P)의 최적해이다. 그 밖의 경우에 단계 1~단계 3을 반복하여 수행한다.

3. 사 례

3.1 개요

본 연구에서 제시한 모형과 해법의 타당성을 보이기 위하여 Park and Han[14]의 연구에서 활용한 사무용의자와 관련 데이터를 본 연구에 맞게 수정하여 사용하고자 한다. 시장조사에 의하면 사무용 의자에 대한 고객이 가장 관심 있는 요구사항으로 3가지 CRs를 갖는다. 이들 CRs은 “고급스러움(Luxuriousness CR_1)”, “균형성(balance CR_2)”, “매력도(Attractiveness CR_3)”이고, 이와 관련된 TAs는 “등받이 높이(Height of backrest TA_1)”, “등받이 폭-높이 비율(Width-height ratio of backrest TA_2)”, “전체 폭-높이 비율(Width-height ratio of whole body TA_3)”, “좌판-등받이 면적비율(Areal ratio of seat pan and backrest TA_4)”, “등받이 색 밝기(Brightness of backrest color TA_5)”, “쿠션 두께(Use of cushion TA_6)”, “전체 크기(Size of whole body TA_7)”, “등받이 곡선(Use of curve lines TA_8)”으로 8가지로 구성되어 있다. <그림 1>은 사무용 의자의 TAs를 보여준다. TAs들 중에서 TA_1, TA_2, TA_3, TA_4, TA_6, TA_7, TA_8는 이들의 최대값과 최소값의 연속적인 범위 내 에서 특정 값을 가질 수 있는 반면에, “등받이 색 밝기”(TA_5)의 경우는 실제로 가질 수 있는 값들이 밝기의 강도에 따라 1(매우 밝음), 2(밝음), 3(보통), 4(어두움) 또는 5(매우 어두움)와 같이 불연속적인 값들로 이들 5개의 대안 중 하나가 선택되게 된다. 따라서 TA_5의 경우 이진정수 변수를 이용하여 5개의 대안들을 중에서 하나를 선택하도록 한다. TA_5의 대안을 식 (1)을 이용하여 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1로 정규화 한다.

Park and Han[14]이 수집한 50개 경쟁사의 사무용 의자에 대한 데이터로부터 얻은 벤치마킹정보를 분석하여 본 연구에 적용하고자 2개의 마켓 세그먼트를 선택하였다. 첫 번째 마켓 세그먼트는 회의실 사무용 의자에 대한 시장이고 두 번째 마켓 세그먼트는 PC 작업 사무용 의자에 대한 시장이다. 회의실 사무용 의자에 대한 CRs과 TAs간의 관계, TA_S간의 관계, 그 밖의 측정 데이터 들이 <표 1>과 같이 마켓 세그먼트 1에 대한 HoQ에 정리되어있다. PC 작업 사무용 의자에 대한 HoQ도 <표 1>과 같이 정리될 수 있다. CR-TA간 함수의 계수와 TAs간 상관관계 함수의 계수들은 50개 경쟁사 제품들의 데이터를 활용하여 최소자승회귀분석[14]을 통하여 얻어졌으며 본 연구의 사례에 이용할 2개 마켓 세그먼트의 결과들은 <표 2>에 정리되어 있다.



〈그림 1〉 사무용 의자의 TAs

〈표 1〉 마켓 세그먼트 1의 HoQ

	TA_s	TA_1	TA_2	TA_3	TA_4	TA_5	TA_6	TA_7	TA_8	Correlation			
	TA_1												
	TA_2			●									
	TA_3		●										
	TA_4												
	TA_5												
	TA_6												
	TA_7												
	TA_8										Benchmark information		
CR_s	Weights	Relation								Ours	Co1~Co50	Min	Max
CR_1	w_{ki}	●				●	●	●		*		1	5
CR_2	w_{ki}			●	●							1	5
CR_3	w_{ki}		●			●			●			1	5
	Units	mm	W/H	W/H	S/B	1-5	mm	mm	°	Engi-neering Mea-sures			
	Ours	* 벤치마킹정보는 Park and Han[14]가 수집한 자료를 이용하였음.											
	Co1~Co50												
	Min	430	0.59	0.44	0.58	1	50	797	5				
	Max	715	1.24	0.81	1.67	5	100	1025	40				

TA_2 = W/H, Min = W(min)/H(max) = 420/715, Max = W(max)/H(min) = 533/430.
TA_3 = W/H, Min = W(min)/H(max) = 455/1025, Max = W(max)/H(min) = 644/797.
TA_4 = S/B381095, Max = S(max)/B(min) = 180600/381095.

〈표 2〉 2개 사무용 의자의 CR-TA간 함수계수와 TAs간 상관관계 함수의 계수 값

y_{ki}	Intercept	x_{k1}	x_{k2}	x_{k3}	x_{k4}	x_{k5}	x_{k6}	x_{k7}	x_{k8}
x_{k2}	0.04			1.02					
y_{11}	75.81	0.2984				-3.24	-8.536	8.689	
y_{12}	55.9			17.57	55.13				
y_{13}	52.82		-37.02			3.121			12.17
y_{21}	-14.37	-1.602				15.12	3.862	-9.257	
y_{22}	105.7			-43.28	109.2				
y_{23}	70.6		-4.087			-4.918			-0.1528

본 사례에서는 2개의 마켓 세그먼트에 대하여 각각 가중치를 주기 위하여 마켓 세그먼트 1인 회의실 사무용 의자에 대한 시장에는 고객의 수가 4,500명, 마켓 세그먼트 2인 PC작업 사무용 의자에 대한 시장의 고객의 수는 5,500명으로 각각 값을 주었고 CRs의 가중치는 마켓 세그먼트 1에서 각각 0.4, 0.25, 0.35, 마켓 세그먼트 2에서 각각 0.2, 0.5, 0.3으로 값을 주었다.

제품개발을 위한 총 예산은 $40,000이고 각 TAs에 대한 단위비용은 마켓 세그먼트 1에서 $5,000, $7,000, $6,000, $8,000, $3,000, $9,000, $4,000, $5,000이고 마켓 세그먼트 2에서는 $4,000, $8,000, $5,000, $9,000, $4,000, $7,000, $3,000, $4,000으로 값을 주고, TAs의 값에 비례하여 비용이 발생한다고 가정하였다.

3.2 수리모형 및 분지한계법

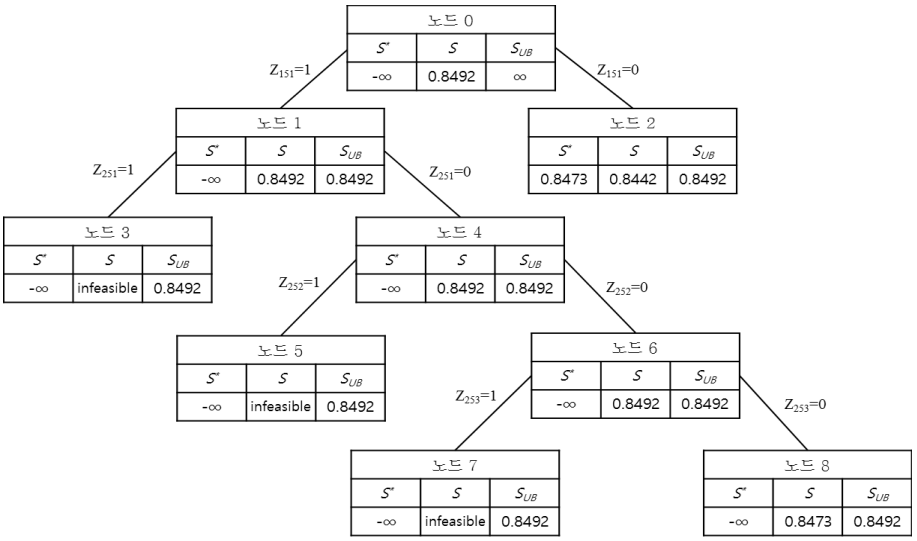
본 연구의 사례인 2개의 마켓 세그먼트를 고려한 사무용 의자의 TAs 최적 해를 구하는 문제를 혼합정수계획법의 모형으로 나타내면 문제(Q)와 같다.

문제(Q)

$$
\begin{aligned}
\max\quad & 0.45(0.0192y_{11}+0.0034y_{12}+0.0066y_{13})+ \\
& 0.55(0.0067y_{21}+0.0032y_{22}+0.00327y_{23})-1.8157 \\
\text{s.t.}\quad & y_{11} = 0.2984x_{11}-3.24x_{15}-8.536x_{16}+8.689x_{17}+75.81 \\
& y_{12} = 17.57x_{13}+55.13x_{14}+55.9 \\
& y_{13} = -37.02x_{12}+3.121x_{15}+12.17x_{18}+52.82 \\
& x_{12} = 0.12x_{13}+0.04 \\
& x_{15} = 0z_{151}+0.25z_{152}+0.5z_{153}+0.75z_{154}+1z_{155} \\
& z_{151}+z_{152}+z_{153}+z_{154}+z_{155}=1 \\
& y_{21} = -1.602x_{21}+15.12x_{25}+3.862x_{26}-9.257x_{27}-14.37 \\
& y_{22} = -43.28x_{23}+109.2x_{24}+105.7 \\
& y_{23} = -4.087x_{22}-4.918x_{25}-0.1528x_{28}+70.6 \\
& x_{22} = 1.02x_{23}+0.04 \\
& x_{25} = 0z_{251}+0.25z_{252}+0.5z_{253}+0.75z_{254}+1z_{255} \\
& z_{251}+z_{252}+z_{253}+z_{254}+z_{255}=1 \\
& 5{,}000x_{11}+7{,}000x_{12}+6{,}000x_{13}+8{,}000x_{14}+3{,}000x_{15} \\
& +9{,}000x_{16}+4{,}000x_{17}+5{,}000x_{18}+4{,}000x_{21}+8{,}000x_{22} \\
& +5{,}000x_{23}+9{,}000x_{24}+4{,}000x_{25}+7{,}000x_{26}+3{,}000x_{27} \\
& +4{,}000x_{28} \le 40{,}000 \\
& z_{k,jl} \in \{0,1\} \quad \forall k,\ j=5,\ \forall l \\
& 0 \le x_{kj} \le 1 \quad \forall k,\ \forall j
\end{aligned}
$$

분지한계법

<그림 2>는 문제(Q)를 풀기 위한 분지한계법의 적용과정을 모두 보여준다. 문제(Q)의 최초 하한값(Lower Bound) $S_{LB}=-\infty$로 설정한다. 문제(Q)를 선형계획으로 이완시켜 풀면 그 해가 정수 조건을 만족하지 못하므로 그 값을 상한가 $S_{UB}=0.8492$로 이용한다(노드 0). 불연속적인 값을 갖는 TA_5 "등받이 밝기"에 대한 대안인 이진정수 변수 중 임의로 z_{151}을 선택하여 $z_{151}=1$인 서브문제(노드 1)와 $z_{151}=0$인 서브문제(노드 2)로 분지한다. 깊이우선탐색에 따라 노드 1의 서브문제를 선형계획문제로 이완하여 풀면 정수 조건을 만족하지 못하므로 그 해는 $S_{UB}=0.8492$이다. 패덤되지 않고 임의로 z_{251}을 선택하여 $z_{251}=1$인 서브문제(노드 3)와 $z_{251}=0$인 서브문제(노드 4)로 분지한다. 노드 3의 서브문제를 선형계획문제로 이완하여 풀면 실행 불가능해이므로 노드 3의 서브문제는 패덤된다.



〈그림 2〉 분지한계법 적용 결과

이와 같이, 분지와 한계를 반복하면 $S_{LB} = 0.8473$로 현재까지 최고 가능해 $S^* = 0.8473$로 업데이트하고 노드 8의 서브문제는 패덤된다. 깊이우선 탐색에 따라 노드 2의 서브문제를 선형계획문제로 이완하여 풀면 정수조건을 만족하지 못하고 그 해는 $S = 0.8442$이고 현재까지 최고 가능해 $S^* = 0.8473$보다 낮은 값이므로 노드 2의 서브문제는 패덤된다. 이때 노드 8의 서브문제의 최고 가능해가 최적해 $S^* = 0.8473$임을 알 수 있고, 의사결정변수의 최적 값은 $x_{11} = 0.68$, $x_{12} = 0.04$, $x_{13} = 0$, $x_{14} = 1$, $x_{15} = 0$, $x_{16} = 0$, $x_{17} = 1$, $x_{18} = 0$, $x_{21} = 0$, $x_{22} = 0.04$, $x_{23} = 0$, $x_{24} = 1$, $x_{25} = 0.75$, $x_{26} = 1$, $x_{27} = 0$, $x_{28} = 0$이다.

이는 마켓 세그먼트 1에서 "등받이 높이(TA_1)"는 623.8mm, "등받이 폭-높이 비율(TA_2)"는 0.61, "전체 폭-높이 비율(TA_3)"은 0.44, "좌판-등받이 면적 비율(TA_4)"은 1.67, "등받이 색 밝기(TA_5)"는 매우 밝음, "쿠션(TA_6)"은 50mm, "전체 크기(TA_7)"는 1,025mm, "등받이 곡선(TA_8)"는 40°이며, 마켓 세그먼트 2에서 "등받이 높이(TA_1)"는 430mm, "등받이 폭-높이 비율(TA_2)"는 0.61, "전체 폭-높이 비율(TA_3)"은 0.44, "좌판-등받이 면적비율(TA_4)"은 1.67, "등받이 색 밝기(TA_5)"는 어두움, "쿠션(TA_6)"은 100 mm, "전체 크기(TA_7)"는 792mm, "등받이 곡선(TA_8)"는 5°인 사무용 의자를 개발할 때 마켓 세그먼트 1과 2로 이루어진 제품전체시장의 OCS를 0.8473으로 최대화 할 수 있다. <표 3>은 TAs의 최적값을 정리해 놓은 것이다.

3.3 민감도 분석

본 연구에서 제시한 사무용 의자 사례에 대하여 개발예산의 값과 CRs의 가중치 값의 변동에 따라 TAs의 값들이 어떻게 변하는지를 파악하기 위하여 이들 2개의 항목에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

3.3.1 예산 B에 대한 민감도 분석

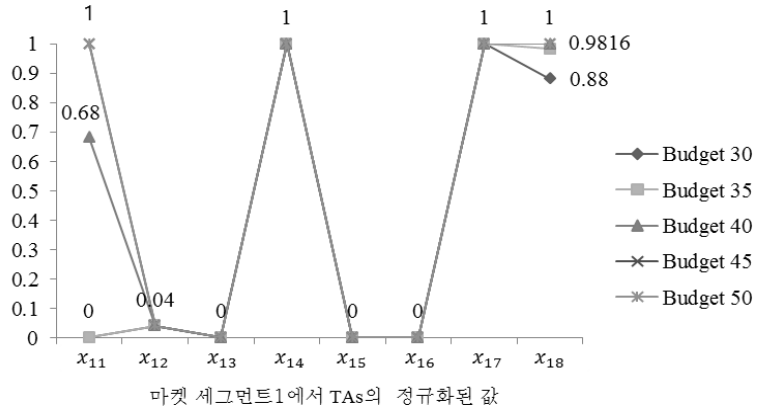
본 사례에서 제시한 사무용 의자의 개발예산이 $30,000, $35,000, $40,000, $45,000, $50,000으로 변함에 따라 문제($Q$)의 TAs의 값들의 변화를 분석하였다.

<그림 3>은 개발예산 값의 변동에 따른 마켓 세그먼트 1인 회의실 사무용 의자에 대한 TAs의 정규화된 값의 변화를 보여준다. 개발예산 값이 증가함에 따라 "등받이 높이(TA_1)"의 정규화된 값(x_{11})이 최저 값인 0 (TA_1의 실제 값=430mm)에서 최고 값인 1(TA_1의 실제 값 = 715mm)로 증가하고, "등받이 곡선(TA_8)"의 정규화된 값(x_{18})은 0.88(TA_8의 실제값 = 35.8°)에서 1(TA_8의 실제값 = 40°)로 소폭 증가하였다. 그 밖의 TAs의 정규화된 값들은 변동이 없음을 볼 수 있다. 이는 3개의 CRs 중 고급스러움(CR_1)과 매력도(CR_3)가 강조된-마켓 세그먼트 1의 CRs의 가중치는 각각 0.4, 0.25, 0.35임-마켓 세그먼트 1의 회의실 사무용 의자는 개발예산이 허락된다면 "등받이 높이(TA_1)"가 높고 "등받이 곡선(TA_8)"의 각도가 클수록 마켓 세그먼트 1의 고객의 요구사항을 잘 반영한 의자의 설계라고 볼 수 있다.

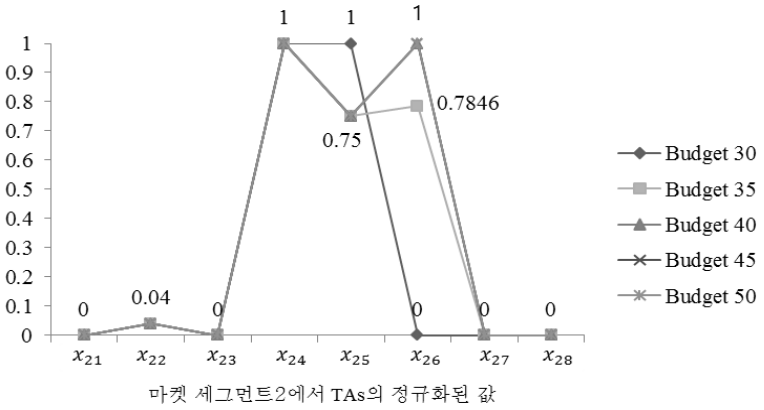
<그림 4>는 마켓 세그먼트 2의 PC작업 사무용 의자에 대한 개발예산 값의 변동에 따른 TAs의 정규화된 값의 변화를 보여준다. 개발예산이 증가함에 따라 "등받이 색 밝기(TA_5)"의 정규화된 값(x_{25})은 0.75(TA_5의 실제 값 = 어두운 색)에서 1(TA_5의 실제 값 = 매우 어두운 색)로 소폭 증가하고 "쿠션두께(TA_6)"의 정규화된 값(x_{26})은 0(TA_6의 실제값 = 50mm)에서 1(TA_6의 실제값 = 100mm)로 큰 폭으로

〈표 3〉 사무용 의자의 마켓 세그먼트 별 TAs의 최적값

	TA_1	TA_2	TA_3	TA_4	TA_5	TA_6	TA_7	TA_8
Seg1	623.8mm	0.61	0.44	1.67	매우밝음	50mm	1025mm	40°
Seg2	430mm	0.61	0.44	1.67	어두움	100mm	792mm	5°



〈그림 3〉 마켓 세그먼트 1에서 개발예산(Budget) 변화에 따른 TAs 민감도



〈그림 4〉 마켓 세그먼트 2에서 개발예산(Budget) 변화에 따른 TAs 민감도

증가하였다. 그 밖의 TAs의 값들은 변동이 없음을 볼 수 있다. 이는 균형성(CR_2)이 강조된-마켓 세그먼트 2의 CRs의 가중치는 각각 0.2, 0.5, 0.3임-마켓 세그먼트 2의 PC작업 사무용 의자는 개발예산이 허락된다면 "등받이 색 밝기(TA_5)"는 어두운 색과 "쿠션의 두께(TA_6)"는 두꺼울수록 마켓 세그먼트 2의 고객의 요구사항을 잘 반영한 의자의 설계라고 볼 수 있다.

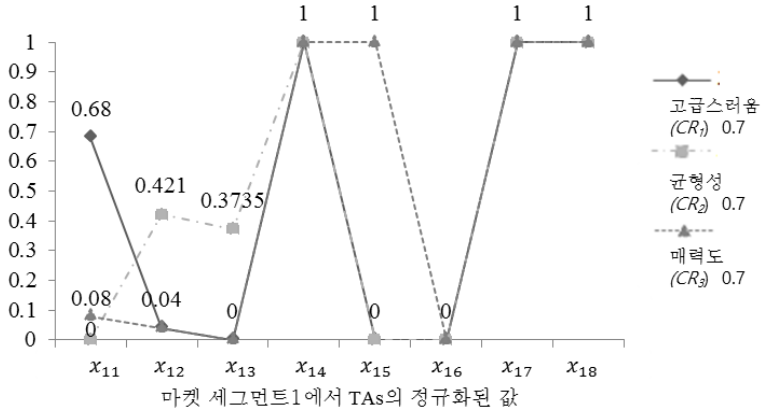
한편, "등받이 폭-높이 비율(TA_2)", "전체 폭-높이 비율(TA_3)", "좌판-등받이 면적비율(TA_4)"은 비율에 관한 TAs로써 본 사례의 시나리오에서는 예산의 변동에 2개의 마켓 세그먼트에서 변화가 없었다.

3.3.2 마켓 세그먼트 k의 CR_l의 가중치 w_{ki}에 대한 민감도 분석

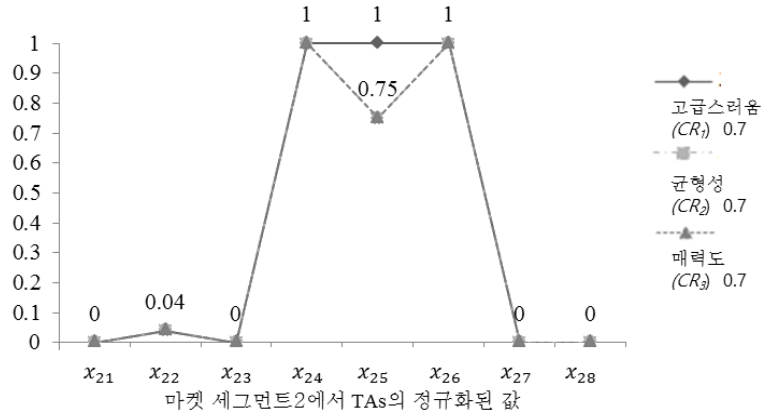
마켓 세그먼트 k의 CR_l의 가중치 w_{ki} 변동에 따라서 사무용 의자 TAs의 값에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위하여 한 마켓 세그먼트의 3개 CRs 중에서 하나의 CR 가중치의 값을 0.7로 주고, 나머지 2개 CR의 가중치 값을 각각 0.15로 주었다. 이때, 다른 마켓 세그먼트의 CRs의 가중치는 앞 절의 사례 개요에서 준 값으로 두었다. 즉, CRs의 가중치는 마켓 세그먼트 1에서 각각 0.4, 0.25, 0.35, 마켓 세그먼트 2에서 각각 0.2, 0.5, 0.3으로 값을 주었다. 총 6번의 런(run)이 실행되었고 그 결과가 <표 4>에 정리되어있다.

〈표 4〉 마켓 세그먼트 k의 CR_i의 가중치 w_{ki} 변동에 따른 런(run) 결과

런 (run)	마켓 세그먼트 k의 CR_i 가중치 w_{ki}						마켓 세그먼트 k의 TA_j의 정규화된 값 x_{kj}															
	w_{11}	w_{12}	w_{13}	w_{21}	w_{22}	w_{23}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}
1	0.7	0.15	0.15	0.2	0.5	0.3	0.68	0.04	0	1	0	0	1	1	0	0.04	0	1	0.75	1	0	0
2	0.15	0.7	0.15	0.2	0.5	0.3	0	0.42	0.37	1	0	0	1	1	0	0.04	0	1	0.75	0.78	0	0
3	0.15	0.15	0.7	0.2	0.5	0.3	0.08	0.04	0	1	1	0	1	1	0	0.04	0	1	0.75	1	0	0
4	0.4	0.25	0.35	0.7	0.15	0.15	0.48	0.04	0	1	0	0	1	1	0	0.04	0	1	1	1	0	0
5	0.4	0.25	0.35	0.15	0.7	0.15	0.68	0.04	0	1	0	0	1	1	0	0.04	0	1	0.75	1	0	0
6	0.4	0.25	0.35	0.15	0.15	0.7	0.68	0.04	0	1	0	0	1	1	0	0.04	0	1	0.75	1	0	0



〈그림 5〉 마켓 세그먼트 1에서 CRs의 가중치(w_{1i}) 변화에 따른 TAs 민감도



〈그림 6〉 마켓 세그먼트 2에서 CRs의 가중치(w_{2i}) 변화에 따른 TAs 민감도

<표 4>의 결과의 분석을 돕기 위하여 마켓 세그먼트 1과 2에서 CR_S의 가중치의 변동에 따른 TAs의 정규화 값의 변동을 <그림 5>와 <그림 6>에서 각각 볼 수 있다. <그림 5>에서 마켓 세그먼트 1의 "고급스러움(CR_1)"의 가중치 w_{11}이 클 때는 "등받이 높이(TA_1)"의 정규화된 값 x_{11}이 큰 폭으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 "고급스러움(CR_1)"의 요구사항이 강조될 때 마켓 세그먼트 1의 회의실 사무용 의자의 등받이가 높게 설계되는 것이 바람직하다는 것을 의미한다. 또한 "균형성(CR_2)"의 가중치 w_{12}가 클 때는 "등받이 폭-높이 비율(TA_2)"과 "전체 폭-높이 비율(TA_3)"의 정규화된 값 x_{12}과 x_{13}이 상승하여 이들 비율의 차이가 적을수록 균형성이 강조된 의자임을 알 수 있고, "매력도(CR_3)"의 가중치 w_{13}이 클 때는 "등받이 색 밝기(TA_5)"의 정규화된 값이 크므로 의자의 등받이 색이 어두울수록 매력도가 있음을 보여준다. 한편, <그림 5>에는 나타내지 않았으나 <표 4>를 보면 마켓 세그먼트 2의 PC작업 사무용의자의 TAs의 정규화된 값들이 두 번째 런의 "쿠션의 두께(TA_6)"을 제외하고는 변동이 없음을 알 수 있다.

<그림 6>은 PC작업 사무용의자에 대한 마켓 세그먼트 2에서는 CRs의 가중치의 변동에 TAs의 정규화된 값들이 "고급스러움(CR_1)"의 가중치 w_{21}이 클 때 "등받이 색 밝기(TA_5)"의 정규화된 값이 소폭 상승한 것을 제외하고는 변화가 없음을 볼 수 있다. 이것은 PC작업 사무용의자의 마켓 세그먼트 2의 고객들이 3개의 CRs에 대하여 크게 민감하지 않다고 추측할 수 있다.

4. 결론 및 미래연구

본 연구에서는 하나의 제품시장이 다수의 마켓 세그먼트로 분할된 시장환경 하에서 고객의 요구사항을 반영하기 위하여 QFD 진행 시 고객의 만족도를 최대화하는 TAs의 최적값을 결정하는 문제를 수리모델링하고 그 해법을 제시하였다. 실제 제품개발 환경과 같이 TAs의 값의 형태가 연속적인 것과 불연속적인 것이 혼합되어 있는 환경을 고려하여 이를 혼합정수계획법으로 수리모델링하고 그 해법으로 분지한계법을 제시하였다.

본 연구에서 제안된 모델과 해법의 타당성을 보여주기 위하여 사무용 의자를 사례로 들어 두 개의 마켓 세그먼트 하에서 각각 세 개의 CRs와 이를 구현하기 위해 필요한 여덟 개의 TAs의 최적 값을 구하였다. 일곱 개의 TAs는 연속적인 값을 갖고 나머지 하나는 불연속적인 값을 갖는 경우를 고려하여 사례의 문제를 혼합정수계획법으로 모델링하고 분지한계법을 적용하였다. 총 9개 노드의 서브문제들을 탐색하여 TAs의 최적 값을 찾았다. 또한 개발예산과 CRs의 가중치 변화에 따라 제품의 TAs 값의 민감도를 분석하였다.

실제 제품 개발환경에서는 하나의 제품에 대한 CRs의 수와 TAs의 수가 각각 수십 개 또는 수백 개인 경우가 빈번할 것이고 더군다나 마켓 세그먼트의 수도 다수일 것이다. 그러므로, 실제 개발환경에서 고려할 문제의 크기는 상당히 클 것이다. 이와 같은 사례를 찾아 본 연구에서 제시한 모델과 해법의 적용 가능한 한계를 확인해보고, 또한 그 한계를 초과한 문제에 대하여 해법을 찾는 것은 본 논문의 미래 연구주제로 매우 흥미로워 보인다.

참 고 문 헌

[1] Akao, Y., *Quality function deployment : integrating customer requirements into product design*, Cambridge, MA, Productivity Press, 1990.

[2] Chen, Y., R.Y.K. Fung, and J. Tang, "Fuzzy expected value modelling approach for determining target value of engineering characteristics in QFD," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.43, No.17(2005), pp.3583-3604.

[3] Fung, R.Y.K., J. Tang, Y. Tu, and D. Wang, "Product design resources optimization using a non-linear fuzzy quality function deploy-

ment model," *Int. J. of Production Research*, Vol.40, No.3(2002), pp.585-599.

[4] Halog, A., F. Schultmann, and O. Rentz, "Using quality function deployment for technique selection for optimum environmental performance improvement," *Journal of Cleaner Production*, Vol.9, No.5(2001), pp.387-394.

[5] Hauser, J.R. and D. Clausing, "The house of quality," *Harvard Business Review*, Vol.66, No.3(1988) pp.63-73.

[6] Kim, K.J., H. Moskowitz, A. Dhingra, and G. Evans, "Fuzzy multicriteria models for quality function deployment," *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 121, No.3(2000), pp.504-518.

[7] Lai, X., M. Mix, and K.C. Tan, "Dynamic programming for QFD optimization," *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.21, No.8(2005), pp.769-780.

[8] Lai, X., M. Xie, and K.C. Tan, "Optimizing product design using the Kano Model and QFD," *International Engineering Management Conference*(2004), pp.1085-1089.

[9] Lai, X., X. Min, and K.C. Tan, "QFD optimization using linear physical programming," *Engineering Optimization*, Vol.38, No.5(2006), pp.593-607.

[10] Luo, X., C.K. Kwong, and F.Q. Sun, "QFD-based product planning with consumer choice analysis," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems*, Vol.45, No.3 (2015), pp.454-461.

[11] Luo, X., C.K. Kwong, and J.F. Tang, "Determining optimal levels of engineering characteristics in quality function deployment under multi-segment market," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.59, No.1(2010), pp.126-135.

[12] Luo, X., J. Tang, and C.K. Kwong, "A QFD-based optimization method for a scalable product platform," *Engineering Optimization*, Vol.42, No.2(2010), pp.141-156.

[13] Moskowitz, H. and K.J. Kim, "QFD optimizer : A novice friendly quality function deployment decision support system for optimizing product designs," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.32, No.3(1997), pp.641-655.

[14] Park, J.C. and S.H. Han, "A fuzzy rule-based approach to modeling affective user satisfaction towards office chair design," *International Journal of industrial Ergonomics*, Vol.34, No.1 (2004), pp.31-47.

[15] Park, T.H. and K.J. Kim, "Determination of an optimal set of design requirements using house of quality," *Journal of Operations Management*, Vol.16, No.5(1998), pp.569-581.

[16] Tang, J., Y.K. Richard, X. Baodong, and D. Wang, "A new approach to quality function deployment planning with financial consideration," *Computers and Operations Research*, Vol.29, No.11(2002), pp.1447-1463.

[17] Wassermam, G.S., "On how to prioritize design requirements during the QFD planning process," *IIE Transactions*, Vol.25, No.3(1993), pp.59-65.

[18] Zhou, M., "Fuzzy logic and optimization models for implementing QFD," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.35, No.1-2(1998), pp.237-240.