Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol. 34, No. 2, pp.112－120, June 2011.

초기 설계단계에서의 셋 베이스 다목적 설계 최적화(제1보) : 이론 및 설계지원 시스템

남 윤 의†

국립 한밭대학교 기계설계공학과

Set-Based Multi-objective Design Optimization at the Early Phase of Design(The First Report) : Theory and Design Support System

Yoon-Eui Nahm†

Department of Mechanical Design Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea

The early phase of design intrinsically contains multiple sources of uncertainty in describing design, and nevertheless the decision-making process at this phase exerts a critical effect upon drawing a successful design. This paper proposes a set-based design approach for multi-objective design problem under uncertainty. The proposed design approach consists of four design processes including set representation, set propagation, set modification, and set narrowing. This approach enables the flexible and robust design while incorporating designer's preference structure. In contrast to existing optimization techniques, this approach generates a ranged set of design solutions that satisfy changing sets of performance requirements.

Keyword : Concurrent Engineering, Computer-aided Design, Optimal Design, Preliminary Engineering Design, Uncertainty

1. 서 론

현재, 자동차 업계에서는 해마다 엄격해 지는 법규와 환경규제 하에서 수요구조의 변화와 사용자 요구의 다양화에 대응하면서 수익 창출을 해야만 하는 매우 어려운 상황에 처해 있고, 다종다양한 성능요건을 만족시키면서 저비용의 자동차를 단기간에 개발하는 것이 더욱 더 중요해지고 있다. 최근, 이와 같은 요청에 부응하기 위한 하나의 방법으로서 동시공학(concurrent Engineering, CE)의 개념이 제창되어, 제품의 라이프사이클에 속하는 제과정의 작업을 동시 병행적으로 처리할 필요성이 제시되고 있다.

종래의 설계에서는 <그림 1(a)>에 나타낸 바와 같이 동시 병행적(concurrent)이든 수차 처리적(sequential/serial)이든 초기단계에서 임의의 포인트 값으로 규정되는 설계해(point solution)를 구하고, 그 해가 정확한 요구사양 및 제약을 만족시키는지 여부를 평가하여 평가결과가 부적절한 경우에는 그 해가 설계목표에 도달할

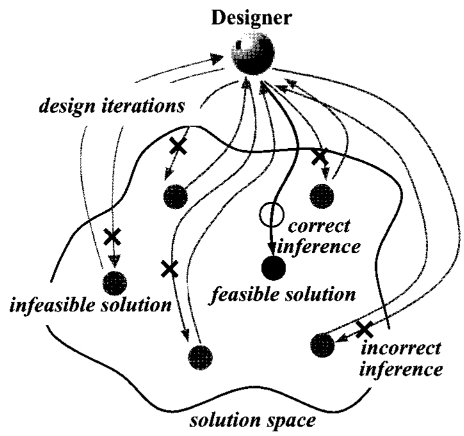
논문접수일 : 2011년 06월 01일　　게재확정일 : 2011년 06월 24일
† 교신저자 nahm@hanbat.ac.kt
※ 본 논문에서 제안된 설계법은 일본 자동차 기술회(JSAE)의 구조형성 기술 부문 위원회에서 제품개발 혁신을 위한 테스트베드로서 검토되어 왔다. 저자는 본 설계법을 적용하는데 있어서 노력과 조언을 아끼지 않은 위원회 멤버들에게 깊은 감사를 드린다.

때까지 수정을 되풀이하는 방법이 이용되어 왔다. 그러나, 이러한 포인트 베이스 설계방식(point-based design approach)에서는 다음과 같은 문제점이 있다.

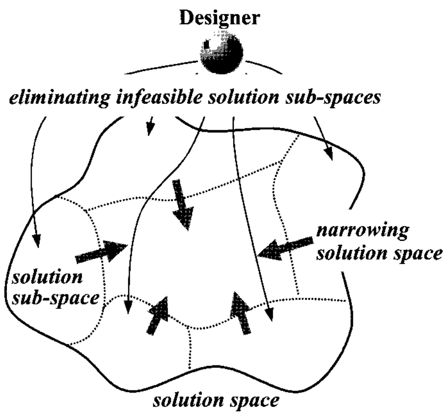
- 자동차의 초기 설계단계에서는 주어지는 디자인·채용되는 유닛(unit)의 조건 뿐만 아니라 시장 환경의 변화에 의해 차량계획 그 자체가 유동적이기 때문에, 정확한 설계 요구사양을 결정하는 것이 곤란하다는 점, 설계자가 유동적인 요구사양으로부터 최적의 단일 설계해를 선정하는 것이 어렵다는 점, 제조 및 조립 치수의 편차, 사용 환경의 변화, 타 부문으로부터의 설계해의 변동 등과 같은 다양한 불확실성이 존재한다. 포인트 베이스 설계방식에서는 이러한 초기 설계단계에서의 다양한 불확실성을 반영할 수 없다.
- 실제의 설계에서는 초기설계로부터 상세설계로 설계가 진행됨에 따라 이미 얻어진 설계해가 부적절하게 되어 설계해의 수정이나 그 수정에 의한 영향에 의해 이미 결정한 내용을 변경할 필요성이 발생하는 경우가 있다. 특히, 동시공학적 제품개발 프로세스에 있어서는 그 일부의 설계 변경이 같은 설계정보를 사용하고 있는 복수의 타 부서에 서로 영향을 미쳐 2차적, 3차적인 연쇄 설계변경을 발생시키며, 수정 정도로 대응할 수 없는 경우에는 각 관련 성능의 설계를 처음부터 다시 할 필요가 있다. 설계의 수정 내용과 규모에 따라서 개발기간 및 비용 등을 증대시킬 리스크가 있는 것이 현실이다.

최근, 이를 개선하기 위해서 <그림 1(b)>와 같이 초기단계로부터 포인트 값이 아니라 다양한 불확실성을 고려하면서 폭넓은 집합으로서의 설계해를 구하고 설계가 진행됨에 따라 점차적으로 현실성이 부족한 해를 제외시킴으로써 최초의 설계해 집합을 축소해 가는 셋 베이스 동시공학(set-based concurrent engineering)이 제안되고 있다[1, 2]. 이하, 셋 베이스 설계방식(set-based design approach)이라 부르기로 한다. 포인트 베이스 설계방식에 비해 설계 초기단계에서는 설계해 집합의 계산에 어느 정도의 시간을 필요로 하지만, 설계의 후기단계에서는 보다 단시간에 최종적인 해를 수렴시킬 수 있어 종합적으로는 보다 효율적이라고 말할 수 있다. 셋 베이스 설계방식에서는 설계해와 요구성능을 규정하는 모든 양(quantity)을 각각 집합(범위 또는 구간)으로 부여하기 때문에 다양한 불확실성을 고려하는 것이 가능하다. 또한, 최종적인 설계해도 집합으로서의 해가 구해지기 때문에 후 공정에서의 설계변경에 의해 설계 수정이 필요한 경우에도 이미 얻어진 설계해 집합을 축소(narrowing)시킴으로써 개발을 계속하는 것이 가능하다. 이러한 의미로 요구특성이나 제약이 많고 동시에 복잡한 프로세스를 통해 개발이 진행되는 자동차와 같은 제품 설계에 있어서는 셋 베이스 설계방식의 도입이 효과적이라고 생각된다.

이와 같이 종래의 포인트 베이스 설계방식에 비해 여러 가지 이점이 있지만, 셋 베이스 동시공학의 모든 개념과 원리를 컴퓨터에 의해 실장 가능한 방법은 아직 확립되어 있지 않다. 또한, 퍼지이론을 베이스로 한 방법(fuzzy-based approach)[3, 4, 5], 구간 연산을 베이스로 한 방법(interval-based approach)[6, 7], 확률을 베이스로 한 방법(probability-based approach)[8, 9] 등과 같이 불확실성에 대응한 강건 설계(robust design)가 다수 제안되고 있으나, 설계해 및 요구성능의 집합표현(set representation), 설계해 집합의 전파(set propagation) 및 설계해 집합의 축소(set narrowing)와 같은 셋 베이스 설계방식의 모든 구조를 실현할 수 있는 방법은 아직 존재하지 않고 있다.



(a)



(b)

<그림 1> 포인트 베이스 설계법(a)과 셋 베이스 설계법(b)

본 논문에서는 셋 베이스 설계의 모든 구조의 실현과 그것의 컴퓨터 실장을 목표로 한 새로운 셋 베이스 설계방법으로서 PSD(preference set-based design)법을 제안한다. PSD법은 초기 설계단계에서의 다양한 불확실성에 대응하고, 설계자의 경험, 의사나 기업 방침 등을 반영하면서 다종다양한 성능 요건에 강건하고 최적인 설계해 집합을 효율적으로 도출할 수 있다. 제2장에서는 PSD법에서 제안되는 새로운 개념을 기술하고, 제3장에서는 PSD법에 기초한 셋 베이스 설계지원 시스템에 대해서 소개한다. 마지막으로 제4장에서는 PSD법의 특징을 요약함으로써 그 유효성을 제시한다.

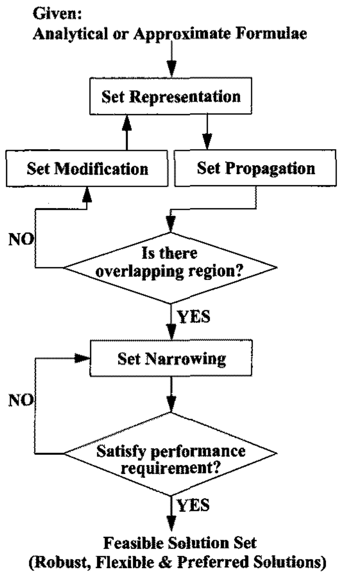
2. 새로운 셋 베이스 설계법(PSD)의 제안

2.1 개요

<그림 2>는 PSD법에 의한 설계 프로세스를 나타낸다. 먼저, 설계자는 입력 설계변수와 출력 성능변수의 관계성을 나타내는 이론식 또는 근사식(analytical or approximate formulae)을 준비한다. 다음으로, 포인트 베이스 설계방식과 같이 설계변수 및 성능변수에 대하여 단일의 설계해와 정확한 요구사양을 규정하는 것이 아니라, 설계내용에 관계하는 모든 양을 임의의 범위로서의 값으로 표현한다(set representation). 이것은 초기 설계단계에 있어서는 목적과 기능이 명확하더라도 그것을 표현하는 기구나 물리현상의 선정에는 대안(alternatives)이 복수 존재한다는 것과 대안이 결정되어 있어도 다루어야 할 요구성능이나 설계변수에 관한 모든 값에는 기본적으로 불확실성이 존재하기 때문이다. 또한, 각각의 범위에 대해 범위 내에서 어느 부분을 보다 중요시할 것인가와 같은 설계자의 의도를 나타내는 함수(이하, 선호도 함수(preference function)라 부르기로 함)를 설정한다. 이는 설계 작업에 있어서 자연스러운 설정이다. 또한, 취급하는 변수에는 설계자에 의해 제어 가능한 변수(controllable variable)와 제어 불가능한 변수(uncontrollable variable)가 존재한다. 예를 들면, 제조에 관한 오차나 다른 담당자에 의해 결정되는 해 등은 설계자에 있어서 제어 불가능한 변수이다. 즉, 불확실한 설계해나 요구성능을 표현하기 위해서 범위, 선호도 함수 및 제어가능성을 이용한다.

이와 같이 설계변수와 성능변수에 대하여 설계해 집합이나 요구성능 집합이 정의되면, 다음은 준비된 이론식이나 근사식을 이용하여 초기 설계해 집합에 의해 달성될 수 있는 성능치를 구한다(set propagation). 이 때, 설계해 집합이 선호도와 같이 분포로서 규정되기 때문에 그것에 의한 성능치도 분포로서 얻어진다(이하, 가능성 분포(possibilistic distribution)라 부르기로 함). 모든 성능변수에 있어서의 가능성 분포와 요구성능 집합 사이에 공통집합이 존재하면(Is there overlapping region?) 초기 설계해 집합 안에 유효해(feasible solutions)가 있다고 판단할 수 있다. 그러나, 하나의 성능변수에서라도 공통집합이 존재하지 않는 경우에는 최초에 설계자에 의해 규정된 설계해 집합을 수정할 필요가 있다(set modification).

모든 성능변수에 있어서 공통집합이 존재하는 경우에도 모든 가능성 분포가 요구성능 집합의 부분집합이 아닐 경우(가능성 분포 전체가 요구성능 집합 안에 들어가 있지 않은 경우), 즉 가능성 분포의 어느 부분이 요구성능 집합으로부터 벗어나 있을 경우에는 초기 설계해 집합 안에 유효하지 않은 해(infeasible solutions)가 존재한다고 판단할 수 있다. 따라서, 초기 설계해 집합으로부터 점차적으로 유효하지 않은 해의 집합을 제거함으로써 설계해 집합을 축소해 간다(set narrowing). 그 설계해 집합의 축소 프로세스에서는 초기 설계해 집합의 부분집합의 조합을 작성하고, 각각의 조합에 의한 성능의 가능성 분포의 요구성능 집합에 대한 만족도나 강건성(robustness)을 평가함으로써(Satisfy performance requirement?) 최종적인 설계해 집합(feasible solution set)을 선정한다. 이와 같은 최종 설계해는 다양한 불확실성에 대해 강건한 집합으로서의 해가 얻어지기 때문에 후 공정에서 발생할 수 있는 설계변경에 유연하게 대응할 수 있고, 또한 설계자의 선호도를 가장 높게 만족시키고 있는 설계해라고 할 수 있다(robust, flexible and preferred solutions).



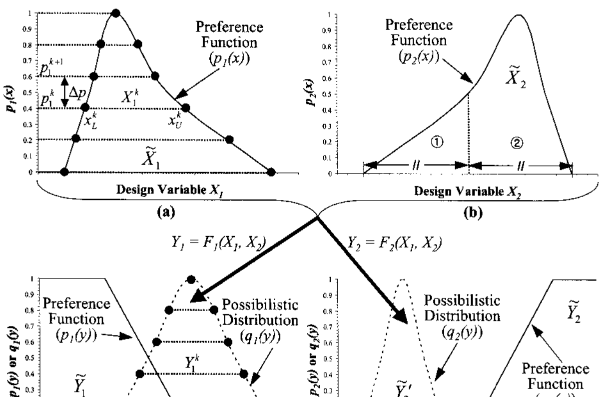
〈그림 2〉 PSD법에 의한 설계 프로세스

2.2 설계해 집합 및 요구성능 집합의 표현

설계변수로서 취해야 할 값의 집합을 고려할 경우, 일반적으로 두 종류의 집합을 생각할 수 있다. 연속량과 이산량이다. PSD법에서는 그래프 이론을 이용해 이산량 집합에 대한 설계자의 선호도를 표현하기 위한 정량적이고 직관적인 표현방법도 제안하고 있으나, 본 논문에서는 연속량 집합에 대한 셋 베이스 설계에 한정하여 설명하기로 한다. 연속량에 대한 설계자의 선호도를 정의하기 위해서 구간 집합(interval set)과 선호도 함수를 이용한다. 이것을 선호도수(preference number, PN)라 부르기로 한다. 구간의 설계해 집합을 갖는 설계변수 $X_i(i=1,2,\cdots,m)$와 그 요소를 x라고 하면 선호도수($\overline{X_i}$)는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{X_i}=\{(x,\ p_i(x))\,|\,x\in X_i,\ p_i(x):x\rightarrow[0,1]\} \tag{1}$$

여기서, $p_i(x)$는 선호도수의 선호도 함수이다. <그림 3(a)>와 <그림 3(b)>는 설계변수 X_1과 X_2에 대해서 각각 선호도 함수 $p_1(x)$와 $p_2(x)$를 정의한 예를 나타낸다.



<그림 3> PSD법에서의 집합 표현, 집합 전파, 집합 수정 및 집합 축소

더욱이 정량화관계(quantified relations)[6, 7]의 개념을 도입하여 정량기호(전칭기호(∀), 존재기호(∃))를 이용함으로써 선호도수를 정량화한다. 그 정량화 선호도수(quantified preference number, QPN)는 다음과 같이 표현된다.

$$\widetilde{X_i}=Q\overline{X_i},\ Q\in\{\forall,\exists\} \tag{2}$$

식 (2)와 같이 선호도수(PN) 대신에 정량화 선호도수(QPN)를 이용함으로써 개개의 설계변수에 대한 제어 가능성을 명확하게 표현하는 것이 가능하게 된다. 예를 들면, 제조에 관한 오차나 다른 담당자에 의해 결정되는 설계해 등, 설계변수에 따라서는 설계자가 제어 불가능한 변수가 존재하는 경우가 있고, 이와 같은 설계변수에 관해서는 주어진 집합의 모두를 만족시키는 설계해를 구해야만 한다. 이 경우 선호도수는 전칭기호를 이용하여 정의한다. 또한, 설계자에 의해 제어 가능한 설계변수에 대해서는 존재기호를 이용하여 정의하고, 가장 좋은 성능을 달성하도록 설계치를 그 설계해 집합으로부터 선택할 수 있도록 한다. 또한, 설계변수의 설계해 집합뿐만 아니라 성능변수에 대한 요구성능의 규정에 있어서도 정량화 선호도수를 이용함으로써 불확실한 요구사양을 표현할 수 있다. 따라서, 구간의 요구성능 집합을 갖는 성능변수 $Y_j(j=1,2,\cdots,n)$와 그 요소를 y라고 하면 요구성능의 정량화 선호도수는 다음과 같이 정의된다.

$$\widetilde{Y_j}=Q\overline{Y_j} \tag{3}$$

$$\overline{Y_j}=\{(y,\ p_j(y))\,|\,y\in Y_j,\ p_j(y):y\rightarrow[0,1]\} \tag{4}$$

<그림 3(c)>와 <그림 3(d)>는 성능변수 Y_1과 Y_2에 대해서 각각 선호도 함수 $p_1(y)$와 $p_2(y)$를 정의한 예를 나타낸다. 이하, 설계해 집합 및 요구성능 집합의 정의에 사용되는 정량화 선호도수를 각각 설계 선호도수(design QPN), 요구 선호도수(performance QPN)라 부르기로 한다. 이와 같이 PSD법에서는 설계해 및 요구사양을 선호도가 부여된 범위로서 표현함과 동시에 각 변수의 제어가능성을 명확하게 정의함으로써 설계자의 의도나 제약을 반영하는 것이 가능하다.

2.3 설계해 집합의 전파

설계변수(X_i) 및 성능변수(Y_j)에 대한 설계 선호도수와 요구 선호도수가 정의되면, 설계 선호도수에 의해 달성될 수 있는 성능치를 계산할 필요가 있다. 그 때, 입력치인 설계 선호도수가 임의의 분포(선호도 함수)로서 주어지기 때문에, 출력치도 임의의 분포(가능성 분포)로서 구해진다. <그림 3(c)>와 <그림 3(d)>에는 규정되는 설계 선호도수에 의한 성능의 가능성 분포($q_1(y)$와 $q_2(y)$)의 예를 나타낸다. 설계 선호도수를 주어진 관계식(<그림 3>의 F_1과 F_2)을 통해 전파시켜 출력성능의 가능성 분포를 계산하는 방법으로서 PSD법에서는 퍼지 연산의 $\alpha-cut$ 개념을 도입한다. 모든 설

계 선호도수를 $\alpha-cut$에 의해 종축을 균등하게 분할하면(Δp), 다음과 같이 임의의 선호도 레벨 $k(p_i^k)$에서의 레벨 셋(level set)이 구해진다.

$$X_i^k = [x_L^k, x_U^k] \tag{5}$$

다음으로 각각의 레벨 셋에 대하여 구간 연산(interval arithmetic)을 행하고 그 결과의 구간을 조합함으로써 성능의 가능성 분포를 구할 수 있다. 그러나, 통상의 구간 연산은 실제의 해보다 폭넓은 해를 계산한다는 것이 보고되고 있다[6, 7]. 즉, 해를 과대평가(overestimation)하는 문제점이 있다. 따라서, PSD법에서는 통상의 구간 연산을 각 레벨 셋에 적용하는 대신에 변수 간의 인과관계(전칭기호, 존재기호로 표현되는 제어가능성)를 다룰 수 있는 interval propagation theorem(IPT)[6~7]을 도입한다. IPT를 이용함으로써 해집합의 과대평가를 피할 수 있다. 또한, 통상의 구간 연산에서는 2^m의 조합에 대해 계산을 해야 하지만, IPT는 2회의 계산만으로 가능하여 계산량도 줄어든다. IPT를 이용한 성능의 가능성 분포의 계산 프로세스는 다음과 같다.

Step 1 : 설계변수와 성능변수 간의 관계식 $Y_j = F_j(X_1, \cdots, X_m)$을 $Y_j - F_j(X_1, \cdots, X_m) = 0$와 같이 변환한다. 각 변수를 변환된 식에 있어서의 단조성에 의해 단조증가 변수군(I)과 단조감소 변수군(D)으로 분류한다. 예를 들면, 임의의 관계식 $Y_1 = X_1 - X_2 - X_3 + X_4$는 $Y_1 - X_1 + X_2 + X_3 - X_4 = 0$으로 변환할 수 있고 그 변환식에 대해서 성능변수 Y_1 및 설계변수 X_2와 X_3는 단조증가 변수이고 X_1과 X_4는 단조감소 변수이다. 즉, 변수는 $I = \{Y_1, X_2, X_3\}$과 $D = \{X_1, X_4\}$와 같이 분류할 수 있다.

Step 2 : 더욱이 각 설계변수에 규정되는 설계 선호도수의 정량기호($\forall$, $\exists$)에 따라 $I_\forall$, $I_\exists$, $D_\forall$, $D_\exists$의 네 종류의 변수군으로 분류한다. 여기서, $I_\forall$와 $I_\exists$는 단조증가 변수군(I) 중에서 각각 전칭기호($\forall$)와 존재기호($\exists$)로 정량화된 변수군을 의미하고, $D_\forall$와 $D_\exists$는 단조감소 변수군(D) 중에서 각각 전칭기호와 존재기호로 정량화된 변수군을 의미한다. 예를 들면, X_1과 X_2는 전칭기호($\forall$)로 Y_1, X_3, X_4는 존재기호($\exists$)로 정의된다고 하면, 변수는 $I_\forall = \{X_2\}$, $I_\exists = \{Y_1, X_3\}$, $D_\forall = \{X_1\}$, $D_\exists = \{X_4\}$와 같이 분류할 수 있다.

Step 3 : 다음으로 성능변수(Y_j)의 선호도 레벨 k에서의 레벨 셋은 요구 선호도수의 정량기호에 따라 다음 식을 이용하여 구한다.

$$Y_j^k = \left[F_j(\underline{I_\forall^k}, \overline{D_\forall^k}, \overline{I_\exists^k}, \underline{D_\exists^k}), F_j(\overline{I_\forall^k}, \underline{D_\forall^k}, \underline{I_\exists^k}, \overline{D_\exists^k})\right], \quad \text{if } \widetilde{Y}_j = \forall\, \overline{Y_j} \tag{6}$$

$$Y_j^k = \left[F_j(\overline{I_\forall^k}, \underline{D_\forall^k}, \underline{I_\exists^k}, \overline{D_\exists^k}), F_j(\underline{I_\forall^k}, \overline{D_\forall^k}, \overline{I_\exists^k}, \underline{D_\exists^k})\right], \quad \text{if } \widetilde{Y}_j = \exists\, \overline{Y_j} \tag{7}$$

여기서, under bar와 upper bar는 연산을 행할 때, 각각 설계변수(X_i)의 레벨 셋의 하한치과 상한치를 적용한다는 것을 의미한다. 위의 예에서는 성능변수(Y_j)의 요구 선호도수가 존재기호로 정의되고 있기 때문에 식 (7)을 이용함으로써 다음과 같은 성능의 레벨 셋을 구할 수 있다.

$$Y_1^k = \left[(\underline{X_1^k} - \overline{X_2^k} - \underline{X_3^k} + \overline{X_4^k}), (\overline{X_1^k} - \underline{X_2^k} - \overline{X_3^k} + \underline{X_4^k})\right] \tag{8}$$

Step 4 : 다른 레벨 셋에 대해서도 Step 3의 연산을 행하고 다음과 같이 연산의 결과 구해지는 각 선호도 레벨에서의 구간을 조합함으로써 근사적으로 최종적인 성능의 가능성 분포를 산출할 수 있다.

$$\widetilde{Y}_j = \bigcup_{k \in [0,1]} Y_j^k \tag{9}$$

2.4 설계해 집합의 수정

위와 같은 설계해 집합의 전파 방법을 이용함으로써 모든 성능변수에서의 가능성 분포를 구할 수 있다. 그 때, 모든 성능변수에 있어서 가능성 분포와 요구 선호도수 사이에 중첩되는 영역이 존재할 경우에는 최초의 설계 선호도수 안에 유효해가 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러나, <그림 3(d)>와 같이 하나의 성능변수에서라도 공통영역이 존재하지 않는 경우에는 모든 성능요건을 만족시키도록 최초에 설계자에 의해 규정된 설계 선호도수를 수정할 필요가 있다. PSD법에서는 다음과 같이 두 가지의 수정방법을 제안한다.

하나는 모든 요구 선호도수와 공통영역이 존재할 때까지 설계 선호도수를 넓히는 것이다. 다른 하나는 성능변수에 대한 설계변수의 감도해석(sensitivity analysis)을 행하고 각 설계변수의 성능변수에 대한 영향도(감도)를 평가함으로써 수정해야 하는 설계변수를 제

시하는 방법이다. 그러나, 통상의 방법으로는 설계 선호도수와 같이 불확실성을 갖는 분포로서 주어지는 설계변수에 대해 감도해석을 행할 수 없다. 이와 같은 임의의 분포로서의 입력(선호도 함수)과 출력(가능성 분포) 사이의 감도해석을 행하기 위해서 PSD법에서는 새로운 불확실성의 척도로서 preference and stability measure(PSM)를 제안한다. 현재, Shannon's entropy measure[10], $\gamma-level$ measure[3] 등과 같은 불확실성 척도가 제안되고 있으나, 이것들은 분포의 높이나 형상에 따라 부정확한 평가를 하는 경우가 있다[11]. PSM은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$PSM(\widetilde{X_i}) = C\sum_{x}^{|X_i^0|} PS(p_i(x)) \tag{10}$$

$$C = \frac{length(X_i^0)}{area(\widetilde{X_i})} \tag{11}$$

$$PS(p_i(x)) = \begin{cases} p_i(x)\ln(p_i(x)) + (1-p_i(x))\ln(1-p_i(x)) - \\ \ln(0.5), \text{ if } 0 < p_i(x) < 0.5 \text{ or } 0.5 < p_i(x) < 1 \\ -\ln(0.5), \text{ if } p_i(x) = 0 \text{ or } p_i(x) = 1 \\ 0, \text{ if } p_i(x) = 0.5 \end{cases} \tag{12}$$

여기서, C는 서로 다른 높이를 갖는 분포를 위한 수정계수[11]이고, $length$와 $area$는 각각 선호도 레벨 0에서의 레벨 셋의 길이와 분포의 면적을 가리킨다. 즉, PSM은 Shannon's entropy measure를 수정하고 수정계수를 반영한 척도이다. 다른 불확실성 척도와 달리 PSM은 임의의 분포가 얼마나 선호도 레벨 0과 1에 크게 분포하고 있는지를 나타내는 척도이기 때문에 0과 1 근처에 폭넓게 분포되어 있으면 PSM의 평가치는 커진다. 따라서, PSM의 값이 작으면 작을수록 불확실성이 작다고 할 수 있다. PSM에 기초한 설계 선호도수의 수정방법은 다음과 같다.

Step 1 : 임의의 설계변수의 성능에 대한 감도를 평가하기 위해서 그 변수에 대해서는 최초 규정된 설계 선호도수를 사용하고 다른 설계변수에 대해서는 선호도가 가장 높은 곳에서의 포인트 값($X_i^{1.0}$의 하한치 또는 상한치)을 관계식에 적용함으로써 새로운 가능성 분포를 구한다.

Step 2 : 다음으로 모든 설계변수에 대해서 설계 선호도수를 적용한 경우의 가능성 분포의 PSM에 대해서 Step 1에서 구해진 가능성 분포의 PSM을 정규화(normalizing)한다. 그 결과는 성능의 가능성 분포에 대한 각 설계 선호도수의 상대적 감도를 나타내고 값이 크면 클수록 설계 선호도수에 불확실성이 많이 존재하기 때문에 그 설계해 집합부터 수정을 할 필요가 있다.

Step 3 : Step 2에서의 수정의 우선순위와 함께 요구성능을 만족시키기 위해 필요한 수정량을 제시하기 위해서 설계변수 X와 성능변수 Y 사이의 비례관계($Y \propto X^n$)을 가정하는 quantitative dependency[12]를 도입한다. 즉, 변수 간의 정량적 의존성은 다음과 같이 X의 값을 $r\%$ 변동시켰을 때의 Y의 값의 변동을 조사함으로써 구할 수 있다.

$$\Psi_{X,Y} = n,\ n = \left(\frac{Y' - Y_0}{Y_0}\right)\left(\frac{1}{r\%}\right) \tag{13}$$

여기서, Y_0는 변수 Y의 현재 값이고 Y'는 변수 X의 값을 $r\%$ 변동시켜서 얻어지는 새로운 값이다.

Step 4 : 그러나, 정량적 의존성은 식 (13)과 같이 선형 근사를 가정하기 때문에 비선형의 관계식이 주어진 경우에는 요구성능을 만족시키기 위한 정확한 설계해의 수정량을 구하는 것이 곤란하다. 따라서, PSD법에서는 2단계 수정법을 이용한다. 즉, 위의 정량적 의존성을 이용해 대략적인 수정량을 구한 후, 이분법(bisection method)을 이용해 보다 정확한 수정량을 설계자에게 제시한다.

2.5 설계해 집합의 축소

모든 성능변수에 대해서 요구 선호도수와 가능성 분포가 서로 중첩되는 영역이 존재하는 경우에는 초기 설계 선호도수 안에 유효해가 존재한다고 판단할 수 있다. 그러나, <그림 3(c)>와 같이 성능의 가능성 분포의 일부가 요구 선호도수로부터 벗어나 있는 영역이 존재하는 경우가 있다. 이것은 최초에 규정된 설계 선호도 수안에 유효하지 않은 해가 포함되어 있다는 것을 의미하고 이와 같은 초기 설계해 집합 안에 유효하지 않은 해의 부분집합을 제거하기 위해 설계해 집합의 축소를 행한다. PSD법에서는 실험계획법을 이용함으로써 <그림 3(b)> (①과 ②)와 같이 분할된 설계 선호도수의 부분집합의 조합을 각 설계변수 별로 작성하고 그 조합에 의한 성능의 가능성 분포를 구한다. 다음으로, 그 결과로부터 가장 좋은 조합을 선정할 필요가 있다. 임의의 조합에 의한 성능의 가능성 분포의

요구 선호도수에 대한 만족도를 평가하기 위해 PSD법에서는 다음과 같은 DPI(design preference index)[8]를 이용한다.

$$DPI(\widetilde{Y_j}) = \int_{y_L^0}^{y_U^0} p_j(y) q_j(y) dy \tag{14}$$

여기서, y_L^0와 y_U^0는 공통영역의 하한치와 상한치를 나타낸다. 즉, DPI는 공통영역의 면적을 구하는 지표이다.

그러나, DPI는 성능특성이 가능성 분포로서 표현되는 설계해를 평가하기 위해서는 적절한 평가지표라고 할 수 있지만, 가능성 분포의 불확실성에 대한 측정을 할 수 없기 때문에 올바르지 않은 평가를 할 수가 있다. 즉, 분포가 서로 다른 산포를 갖고 있어도 공통영역의 면적이 동일하면 동일한 평가를 하는 문제점이 있다. 강건 설계(robust design)의 관점으로부터 생각하면 변동의 영향을 최소화하는 설계해를 구하는 것이 바람직하다.

PSD법에서는 DPI와 PSM을 통합함으로써 요구 선호도수에 대한 만족도와 강건성(robustness)을 동시에 평가하는 척도로서 preference and robustness index(PRI)를 제안한다. 이 때 보다 작은 PSM은 보다 좋은 강건성을 나타내기 때문에 PSM은 보다 작은 값이 PRI에 보다 크게 기여하도록 정규화해야 한다. 또한, 복수의 설계해 집합의 조합 사이의 상대평가를 하기 위해서 DPI와 PSM은 각각 DPI의 최대치와 PSM의 최소치로 정규화한다. 즉, PRI는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$PRI(\widetilde{Y_j}) = \underbrace{\left(DPI(\widetilde{Y_j}) / Max_{j=1,\cdots,n}(DPI(\widetilde{Y_j}))\right)}_{NDPI} \times \underbrace{\left(Min_{j=1,\cdots,n}(PSM(\widetilde{Y_j})) / PSM(\widetilde{Y_j})\right)}_{NPSM} \tag{15}$$

여기서, NDPI(normalized DPI)와 NPSM(normalized PSM)은 각각 정규화된 DPI와 PSM을 나타낸다.

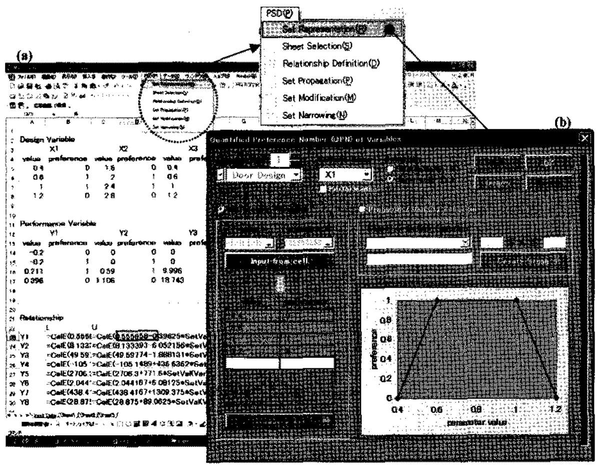
또한, 일반적으로 다목적 설계 문제에서는 복수의 성능이 검토되기 때문에 각각의 성능에 대한 PRI를 통합하여 모든 성능에 대한 평가를 할 필요가 있다. PSD법에서는 다음과 같은 식을 이용한다[5].

$$APRI_S((PRI_1, \omega_1), \cdots, (PRI_n, \omega_n)) = \left(\frac{\omega_1 (PRI_1)^S + \cdots + \omega_n (PRI_n)^S}{\omega_1 + \cdots + \omega_n} \right)^{1/S} \tag{16}$$

식 (16)의 파라메타 S를 변화시킴으로써 min, harmonic mean, geometric mean, arithmetic mean, quadratic mean과 같은 일반적인 평균 연산자를 구할 수 있고, 이와 같이 각 성능에 대해 가중치를 부여하고 APRI(aggregated PRI)를 계산함으로써 설계안의 종합평가를 행한다.

3. PSD 지원 시스템의 개발

현재, Excel과 같은 표계산 소프트웨어는 계산에 사용되는 입력치의 변경에 따라 출력의 계산결과가 자동적으로 갱신된다는 점이나 사용 편의성 등의 이점으로부터 설계자 사이에서 폭넓게 사용되고 있고, 설계 작업에 있어서 유용한 도구가 되고 있다. 특히, Excel은 Microsoft사의 Office 제품에 패키지화되어 있기도 하고 일반적으로 PC 사용자라면 사용해본 가능성이 높다. 그러나, Excel을 포함한 대표적인 표계산 소프트웨어는 입력치로서 포인트 값밖에 취급할 수 없고 본 논문에서 제안하는 PSD법에서의 설계 선호도수나 요구 선호도수의 정의나 그것을 이용한 연산에는 그대로 적용할 수 없다.



<그림 4> Excel을 기초로 한 설계지원 시스템의 구축

이와 같은 관점으로부터 본 연구에서는 <그림 4>와 같이 Excel의 매크로 언어인 Visual Basic과 C#을 이용하여 PSD법에서의 집합 표현방법, 집합 전파방법, 집합 수정방법 및 집합 축소방법에 대응한 PSD 지원 시스템을 개발하였다. PSD 지원 시스템은 주로 Visual Basic에 의해 실장되어 있으나 Visual Basic은 처리속도가 늦기 때문에 IPT 등의 반복 계산에는 적절하지 않다. 따라서, 입·출력 인터페이스에 관계되는 부분은 Visual Basic으로 실장하고 IPT 구간 연산 등의 계산을 행하는 부분은 C# 언어에 의해 실장하였다. Excel은 설계자를 포함한 많은 엔지니어 사이에서 널리 사용

되고 있기 때문에 인터페이스로서 Excel을 이용함으로써 소프트웨어에 관한 특별한 전문지식을 갖고 있지 않더라도 직감적으로 본 시스템을 간단하게 사용할 수 있다.

먼저, 설계자는 <그림 4(a)>와 같은 통상의 Excel 시트(Sheet)나 <그림 4(b)>와 같은 인터페이스(GUI)를 이용하여 설계 선호도수, 요구 선호도수, 관계식 등을 정의한다. 다음으로, 메뉴로부터 『Set Propagation』을 클릭함으로써 초기 설계 선호도수에 의한 성능의 가능성 분포가 구해지고 모든 성능변수에 대한 요구 선호도수와 가능성 분포가 새로운 시트에 표시된다. 그 결과로부터 모든 성능변수에 있어서 공통영역이 존재하는 경우에는 『Set Narrowing』을 위한 인터페이스를 이용하여 설계 선호도수의 축소에 사용되는 실험계획법이나 APRI의 산출방법 등을 입력함으로써 모든 요구성능을 만족시키고 설계자의 선호도에 대한 만족도와 설계안의 강건성의 관점으로부터 최적인 설계해 집합이 산출된다. 이와 같이 설계자는 시스템의 구조를 새롭게 이해할 필요가 없이 통상 Excel을 사용하는 경우와 같이 시스템을 이용할 수 있도록 되어 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 초기 설계단계에서의 다양한 불확실성에 대응하면서 강건하고 유연한 설계를 행하기 위한 새로운 셋 베이스 설계방법으로서 PSD법을 제안하였다. PSD법은 설계해 집합 및 요구성능 집합을 정의하기 위한 집합 표현방법, 설계해 집합에 의해 달성될 수 있는 성능의 가능성 분포를 구하기 위한 집합 전파방법, 불확실성에 대응한 집합 수정방법과 초기 설계해 집합으로부터 부적절한 부분집합을 점차적으로 제거하기 위한 집합 축소방법으로 구성된다. 현재의 강건 설계 기법이나 다목적 최적설계 기법과 비교해 PSD법은 다음과 같은 특징이 있다.

- 설계해 및 요구성능의 설정을 설계자 자신이 임의의 범위(집합)로 지정할 수 있다.
- 선호도 함수를 설정함으로써 규정한 설계해와 요구성능에 설계자의 의도를 반영할 수 있다.
- 설계해는 주어진 요구성능을 만족하는 범위와 그 달성도의 형태로 얻어진다.
- 주어진 설계해의 범위 안에서 요구성능을 만족하는 해가 얻어지지 않을 경우 수정해야만 하는 설계해와 수정량이 효율적으로 제시된다.
- 설계 초보자가 설계해도 숙련 설계자와 같은 해를 얻을 수 있음과 동시에 설계자의 의도를 정량적으로 반영하는 것이 가능하기 때문에 설계자의 개성도 발휘할 수 있다.
- 최종적인 설계해가 임의의 범위로서 얻어지기 때문에 다양한 변경에 의한 수정에 보다 유연하게 대응할 수 있다.

참고문헌

[1] Antonsson, E. K. and Otto, K. N.; "Imprecision in Engnieering Design," *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, 117(B) : 25-32, 1995.

[2] Chen, W. and Yuan, C.; "A Probabilistic-Based Design Model for Achieving Flexibility in Design," *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, 121(1) : 77-83, 1999.

[3] Finch, W. W. and Ward, A. C.; "A Set-Based System for Eliminating Infeasible Design in Engineering Problems Dominated by Uncertainty," *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conference (DETC'97), DETC97/DTM-3886, Sacramento*, CA, 1997.

[4] Finch, W. W. and Ward, A. C.; "Quantified Relations : A Class of Predicate Logic Design Constraints among Sets of Manufacturing, Operating and Other Variables," Proceedings of 1996 ASME Design Engineering Technical Conference(DETC'96), DETC'96/DTM-1278, Irvine, CA, 1996.

[5] Scott, M. J. and Antonsson, E. K.; "Aggregation Functions for Engineering Tradeoffs," *Fuzzy Sets and Systems*, 99(3) : 253-264, 1998.

[6] Sobek II, D. K., Ward, A. C., and Liker, J. K.; "Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering," *Sloan Management Review*, 40(2) : 67-83, 1999.

[7] Zimmermann, H. J.; "Fuzzy Set Theory and Its Applications," *Kluwer Academic Publishers*, 2001.

[8] Ward, A., Liker, J. K., Cristiano, J. J., and Sobek II, D. K.; "The Second Toyota Paradox : How Delaying Decisions Can Make Better Cars Faster," *Sloan Management Review*, 36(3) : 43-61, 1995.

[9] Kusiak, A. and Wang, J.; "Dependency Analysis in Constraint Negotiation," *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 25(9) : 1301-1313, 1995.

[10] Luoh, L. and Wang, W. J.; "A Modified Entropy Measure for General Fuzzy Sets," *International Journal of Fuzzy Systems*, 2(4) : 300-304, 2000.

[11] Wallace, D. R., Jakiela, M. J., and Flower, W. C.; "Design Search under Probabilistic Specifications using Genetic

Algorithms," *Computer-Aided Design*, 28(5) : 405-421, 1996.

[12] Wood, K. L. and Antonsson, E. K.; "Computations with Imprecise Parameters in Engineering Design" : Background and Theory, ASME *Journal of Mechatronics, Transmissions, and Automation in Design*, 111(4) : 616-625, 1989.