

# 초기 설계단계에서의 셋 베이스 다목적 설계 최적화(제2보) : 자동차 사이드 도어 임팩트 빔에의 적용

남 윤 의

국립 한밭대학교 기계설계공학과

## Set-Based Multi-objective Design Optimization at the Early Phase of Design (The Second Report) : Application to Automotive Side-Door Impact Beams

Yoon-Eui Nahm

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

The computer-based simulation tools are currently used overwhelmingly to simulate the performance of automotive designs. Then, the search for an optimal solution that satisfies a number of performance requirements usually involves numerous iterations among several simulation tools. Therefore, meta-modeling techniques are becoming widely used to build approximations of computationally expensive computer analysis tools. The set-based approach proposed in the first report of a four-part paper has been a test bed for the innovation of vehicle structure design process in the Structural Design and Fabrication Committee of JSAE(Society of Automotive Engineers of Japan). In the second report, the proposed design approach is illustrated with a side-door impact beam design example using meta-modeling techniques.

**Keywords** : Concurrent Engineering, Computer-aided Design, Optimal Design, Preliminary Engineering Design, Uncertainty

### 1. 서 론

현재의 차는 소비자 니즈의 반영, 안전성의 향상(각국의 법규), 환경 문제(경량화, 연비향상)로의 신속한 대응, 개발 기간의 단축, 개발 코스트의 삭감 등이 요구되고 있다[1]. 따라서, 자동차 업계의 설계 부문에서는 동시공학(concurrent engineering, CE)의 개념을 도입하여 차체 구조 계획 단계에서부터 차량에 요구되는 성능 및 레이아웃 요건을 부여된 디자인 안에서 모두

만족시키도록 제품 개발을 추진하고 있다.

그러나, 차체 구조 계획의 초기 단계에서는 주어지는 디자인이나 채용되는 유닛의 요건뿐만 아니라, 사회적인 환경 요건의 변화나 시장 환경의 변화에 의해 차량 기획 그 자체가 유동적이기 때문에, 기획의 변경이나 설계 사양의 변경이 빈번하게 발생하는 경우가 있다. 동시공학적 제품개발이 보급된 현재에서는 기획이나 설계 사양의 변경이 미치는 영향은 변경이 결정된 시점에서 업무에 임하고 있는 일부 부서에 머무르

논문접수일 : 2011년 06월 01일    논문수정일 : 2011년 09월 06일    게재확정일 : 2011년 09월 22일

† 교신저자 nahm@hanbat.ac.kr

※ 본 논문에서 제안된 설계법은 일본 자동차 기술회(JSAE)의 구조형성 기술 부문 위원회에서 제품개발 혁신을 위한 테스트베드로서 검토되어 왔다. 저자는 본 설계법을 적용하는데 있어서 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 유한요소 해석을 포함한 많은 노력과 조언을 아끼지 않은 위원회 멤버들에게 깊은 감사를 드린다.

지 않고 같은 설계 정보를 동시에 사용하고 있는 복수의 부서에 서로 영향을 주어 각각 연쇄적으로 설계 변경이 필요하게 된다.

따라서, 설계자는 다양한 불확실성에 의한 차량기획·설계사양의 변경에 유연하게 대응하면서 다종다양한 설계 요건(디자인, 생산, 기획, 레이아웃, 성능 범위)을 만족시키는 설계해를 도출해야만 한다.

한편, 현재의 설계 부문에서는 강도 특성, 진동 특성, 충돌 특성, 리사이클성, 코스트 등의 설계해의 타당성을 확인하기 위해서 유한요소법(finite element method, FEM)과 같은 구조해석 시스템의 도입이 왕성하게 이루어지고 있다. 이러한 해석 시스템에 의한 시뮬레이션은 설계 단계에서 앞당겨 행할 수 있고 종래의 실험 평가에 비해 저렴한 코스트로 단시간에 평가가 가능하기 때문에 설계 기간의 단축이나 코스트 삭감에 유효한 방법이다. 따라서, 종래의 실험 평가에 기초한 시작품 의존형 설계로부터 시뮬레이션 기술을 베이스로 한 설계 검토형 설계 기법으로의 전환이 이루어지고 있다[2]. 그러나, 시뮬레이션 베이스 설계 작업은 종래의 설계자의 경험이나 감을 바탕으로 시행착오를 거치면서 행해 온 설계 변경의 반복 작업을 컴퓨터로 시뮬레이션 하는 것에 지나지 않고, 또한 시뮬레이션에 필요로 되는 인적·시간적 비용도 적지 않아 모든 관련 성능에 관한 시뮬레이션을 하고 그 결과로부터 다종다양한 성능 요건을 만족하는 최적해를 구하는 것은 실질적으로 곤란하다.

최근, 이에 대한 대책으로서 실험계획법(design of experiment, DOE)을 이용한 최적화 기법이 제안되고 있다[3-7]. 즉, 실험계획법을 이용해서 필요 최소의 설계 변수의 샘플링 포인트를 정하고 그 조합에 대해 여러 가지 성능에 영향을 미치는 시뮬레이션을 하여 그 결과로부터 설계 변수와 성능 변수 간의 관계성을 나타내는 근사적인 계산 모델(이하, 근사식이라 부름)을 도출하는 메타 모델링 기법(meta-modeling technique)이 널리 활용되고 있다. 따라서, 실제의 시뮬레이션 대신에 이 근사식을 이용함으로써 보다 적은 노력과 코스트로 신속하게 복수의 성능을 평가할 수 있다.

이러한 배경으로부터 세계적으로 저명한 미국 Engineous사의 iSIGHT[8]나 VMA Engineering사의 DOT[9] 등과 같은 실험계획법과 최적화 기법을 통합한 시스템이 다수 시판되고 있다. 그러나, 그 대부분은 종래의 최적화 기법을 이용하고 있기 때문에 초기 설계 단계에서의 다양한 불확실성에 대응한 설계 사양(설계해 및 요구 성능)이나 제약조건의 설정이 곤란하다는 것, 최종해로서 통상 단일의 설계해를 구하기 때문에 후 공정에서의 다양한 설계 변경에 유연하게 대응할 수 없다

는 것, 조작이 어렵다는 것, 최적화 프로세스에 설계자의 경험·노하우나 의사를 반영할 수 없다는 것과 같은 여러 가지 문제점이 있어 실제 설계개발 현장에서의 실용 모델로의 활용에는 미치지 못하고 있다.

따라서, 현재와 같이 설계 과제가 다종다양화 되고 있는 상황에서는, 제1보에서 제안된 PSD(preference set-based design)법[10]이 실제의 다목적 설계 현장에서의 여러 가지 문제점을 극복하기 위한 매우 유용한 설계 기법이라고 생각된다. 일본 자동차기술회(society of automotive engineers of Japan, JSAE)의 구조형성 기술 부문 위원회에서는 시뮬레이션 설계 환경에서의 PSD법의 유효성을 검증하기 위해 구체적인 차체 구조의 사례를 선정하여 PSD법의 초기 설계 단계에서의 다목적 최적설계로의 적용을 검토해 왔다. 본 논문에서는 PSD법의 이해를 높이기 위해 저자가 상기 위원회에서 검토한 실제의 차체 모델의 간단한 자동차 사이드 도어 임팩트 빔 설계로의 적용사례에 대해서 기술한다.

## 2. PSD법을 이용한 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 다목적 설계 최적화

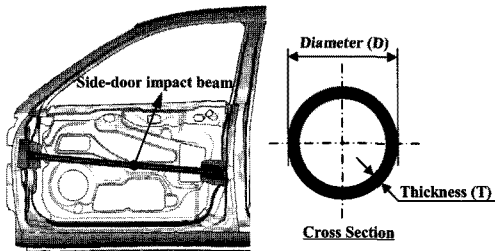
### 2.1 문제 설정 및 근사식의 도출

JSAE의 구조형성 기술 부문 위원회에서는 PSD법을 차체 구조 전체에 적용할 것을 전제로 검토해 왔다. 따라서 우선 필요로 되는 것은 PSD법의 이해를 높이기 위해 차체 구조로의 적용의 유효성을 확인할 필요가 있다. 이 때, 이용되는 설계 사례로는 서로 상반되는 성능을 동시에 만족화 하는 과정이나 복수의 설계자의 설계 방침에 의해 얻어진 각각의 설계 결과의 차이 등이 어느 정도 직관적으로 이해하기 쉬운 대상이 바람직하다고 생각된다.

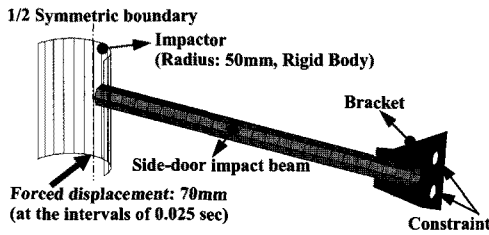
이와 같은 상황을 고려하여 본 논문에서는 <그림 1>에 나타내는 자동차 사이드 도어 임팩트 빔을 대상으로 하는 구조 최적화 문제를 예로 든다. 구조 최적화 문제는 구조물의 위상을 다루는 위상 최적화(topology optimization), 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 단면형상이나 두께와 같이 요소의 치수를 다루는 치수 최적화(size optimization)와 형상에 관한 좌표치를 다루는 형상 최적화(shape optimization)로 분류된다. 본 논문에서는 <그림 1(a)>와 같은 단면형상을 갖고 일반적으로 사용되는 스틸 소재로 설계 문제를 단순화하여 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 직경( $D$ )과 두께( $T$ )를 설계 변수로 하는 치수 최적화에 대해 소개한다.

자동차 사이드 도어 임팩트 빔에 요구되는 주요 성

능으로서는 충돌 시의 충돌 특성, 도어 개폐 시의 강도 특성, 도어 공진 방지를 위한 공진 특성이 고려된다. 구체적인 성능 특성으로서 충돌 특성에 대해서는 강체계 동으로 간주하여 임팩터(impactor)로 압력을 가했을 때의 시간에 따른 반력( $Y_1$ ), 강도 특성으로서는 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 도어 부착 부분에서의 응력의 최대값( $Y_2$ ), 진동 특성에 대해서는 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 고유진동수( $Y_3$ )를 평가하는 것으로 하였다. <그림 1(b)>는 충돌 해석에 의한 반력을 구하기 위한 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 모델의 예를 나타낸다. 이와 같은 기술적 성능과 함께, 코스트( $Y_4$ ), 질량( $Y_5$ )과 같은 경제적 성능도 고려하는 것으로 하였다.



(a) 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 설계 문제



(b) 충격 해석을 위한 FEA 모델

<그림 1> 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 치수 최적화

위의 설계 변수와 성능 변수 간의 근사식을 얻기 위해서 본 연구에서는 비교적 적은 계산으로 다항식으로 근사식을 도출할 수 있는 응답 곡면법(response surface method, RSM)을 이용하였다[5, 6]. 여기서는 컴퓨터 시뮬레이션에 가장 적합한 충전 실험계획법(space filling DOE)[4]에 의해 설계 변수의 샘플링 포인트를 얻고 그 조합에 대해 FEA 해석을 행하여 성능 변수에 대한 해석치를 최소 제곱법(least square method)으로 2차식으로 근사함으로써 <표 1>과 같은 근사식을 구했다. 요구 성능  $Y_1$ 을 예로 들면, 두 개의 설계 변수  $D$ 와  $T$ 에 관한 <그림 2>에 나타내는 선호도를 갖는 초기 설계해 집합(설계 선호도수)에 대해서 충전 실험계획법에서 가장 널리 사용되는 라틴방격법(latin hypercube)을 이용하여  $D$ 와  $T$ 의 조합을 구하고 <그림 1(b)>에 나

타내는 충돌 해석을 수행하여 그 때의 반력  $Y_1$ 을 구한다. 이를  $D$ 와  $T$  조합의 실험계획 수만큼 해석을 수행한 결과에 의해  $Y_1$ 의 응답곡면의 근사식이 다음의 식 (1)과 같이 얻어진다. 이러한 실험계획 및 응답곡면 작성은 동경공업대학(Tokyo Institute of Technology)의 A. Todoroki 교수에 의해 개발된 소프트웨어인 RSMaker for Excel [11]을 이용하였다.

$$Y_1 = 17.0892 - 1.2811 \times D + 2.6171 \times T + 0.0275 \times D^2 - 0.0016 \times D \times T - 0.1292 \times T^2 \quad (1)$$

근사식과 실제 해석에 의한 값을 비교해 보면 해석치와 근사식에 의한 값의 오차는 10% 이내로 초기 설계 단계에서 충분한 정확도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 이 근사식을 이용해서 PSD법에 의한 최적화 계산을 할 수 있다. 다음의 제2.2절부터 제2.4절에서는 초기 설계단계에 있어서 설계자의 설계 사상을 반영하면서 불확실한 성능 요건에 대응 가능하고, 또한 다중다양한 성능 요건을 동시에 만족하는 설계해 집합을 얻을 수 있는 PSD법을 적용한 새로운 다목적 설계 최적화 프로세스에 대해서 설명한다.

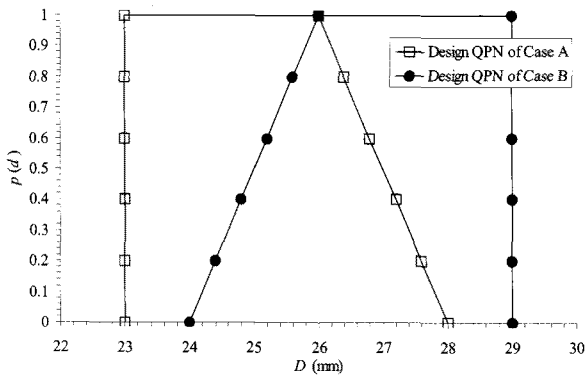
<표 1> 자동차 사이드 도어 임팩트 빔 설계를 위한 근사모델

변수	$Y_j = a_0 + a_1 \times D + a_2 \times T + a_3 \times D^2 + a_4 \times D \times T + a_5 \times T^2$				
	$Y_1 (kN)$	$Y_2 (N/mm^2)$	$Y_3 (Hz)$	$Y_4 (\text{원})$	$Y_5 (kg)$
$a_0$	17.0892	1191.496	-19.6578	1426.88	2.0469
$a_1$	-1.2811	-96.6738	1.9606	-141.651	-0.1765
$a_2$	2.6171	11.8221	0.0596	709.159	0.5910
$a_3$	0.0275	2.0747	-0.0429	3.423	0.0038
$a_4$	-0.0016	-0.0023	-0.0001	25.631	-6.0821
$a_5$	-0.1292	-0.0051	-0.0001	-9.116	-0.0076

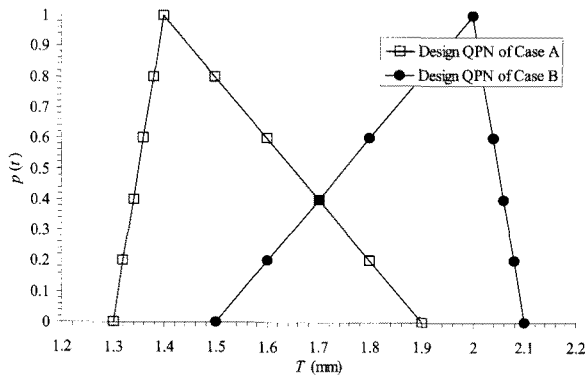
## 2.2 설계해 집합 및 요구성능 집합의 표현

통상, 설계자에게는 과거 경험으로부터 자동차 사이드 도어 임팩트 빔으로서의 직경이나 두께 등의 설계 변수에 대해서 생각하고 있는 설계 사상(예를 들면, 각종 성능을 고려하면 두께는 이 정도의 값으로 하고 싶다는 등)이 있다.

PSD법에서는 종래의 설계 방식에서와 같이 포인트 값으로 설계해를 규정하는 것이 아니라 폭넓은 범위로서의 설계해를 정의함과 동시에 그 설계해 집합에 있어서의 설계자의 선호도를 정량적으로 표현하기 위해 설계 선호도수(design QPN)를 이용한다.



(a) 직경(D)의 설계 선호도수



(b) 두께(T)의 설계 선호도수

<그림 2> 다른 선호도 함수를 갖는 설계해 집합의 표현

본 사례에서는 서로 다른 선호도 함수를 갖는 설계 선호도수에 의한 설계 결과를 비교·검토하기 위해서 <그림 2>에 나타난 바와 같이 2명의 설계자에 의한 설계 선호도수를 고려하기로 하였다. 또한, 일반적으로 제작, 시판되고 있는 자동차 사이드 도어 임팩트 빔을 포함하여 보다 폭넓은 범위의 설계해를 탐색하는 것으로 하였다.

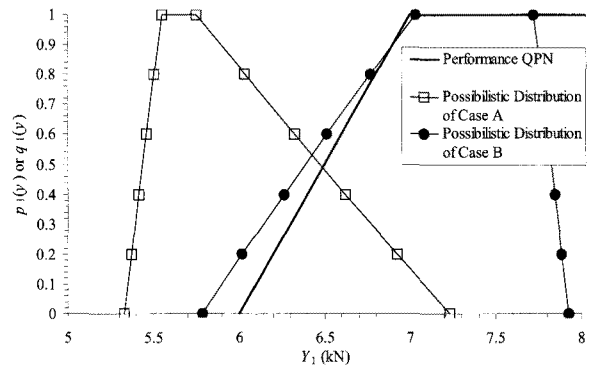
예를 들면, <그림 2(a)>에서는 설계자 A는 직경이 23(mm)로부터 26(mm)의 값에서 가장 바람직하다고 생각하고(선호도 1), 23(mm) 미만이거나 28(mm) 보다 큰 경우에는 바람직하지 않게 생각하고(선호도 0) 있는 것이 된다. 그 외의 선호도가 0으로부터 1에 대응하는 직경에 대해서는 설계자의 선호도가 그 선호도의 수준으로 표현되게 된다. 이와 달리 설계자 B는 26(1mm)로부터 29(mm)를 바람직하다고 생각하고 있다. 이와 같이 두 사람의 설계 사상의 차이가 설계해 집합에 대한 선호도의 차이로부터 알 수 있다.

이와 동일하게 두께에 대해서도 <그림 2(b)>에 나타

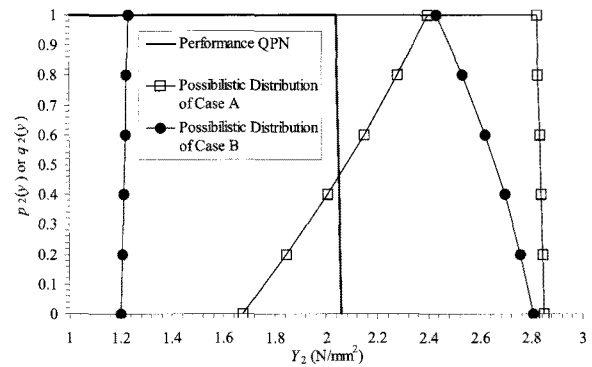
낸 바와 같이 설계 사상의 차이를 다른 선호도 함수를 이용해서 표현할 수 있다.

또한, PSD법에서는 요구 사양의 규정에 있어서도 설계 선호도수와 같이 요구 성능 집합과 선호도 함수를 이용함으로써 다양한 불확실성 하에서의 요구 성능의 애매함을 포함하는 형태로 정량적으로 표현할 수 있다. <그림 3(a)>~<그림 3(e)>는 성능 변수에 대한 요구 선호도수(performance QPN)를 나타낸다.

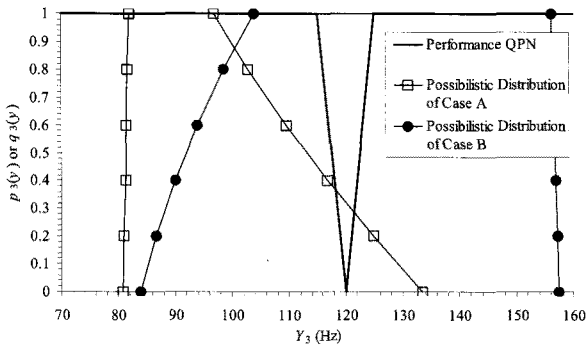
예를 들면, 자동차 사이드 도어 임팩트 빔에 요구되는 반력( $Y_1$ )으로서는 임의의 설계해가 6(kN) 보다 작은 것은 성능 상 문제가 있어 6(kN) 보다 커야 한다는 것을 나타내고 있다. 응력( $Y_2$ )에 대해서는 2.05(N/mm<sup>2</sup>) 보다 작으면 성능 상 만족하고 있음을 나타내고 있고, 또한 고유진동수( $Y_3$ )에 대해서는 70(Hz)에서 115(Hz) 사이와 125(Hz)에서 160(Hz) 사이에 고유 진동수가 있는 경우에는 성능을 만족시키지만 115(Hz)로부터 120(Hz)에 근접할수록 성능 상 만족도가 떨어지고 120(Hz)에서는 성능 상 문제가 있고 120(Hz)로부터 125(Hz)로 근접할수록 만족도가 올라가는 것을 나타내고 있다.



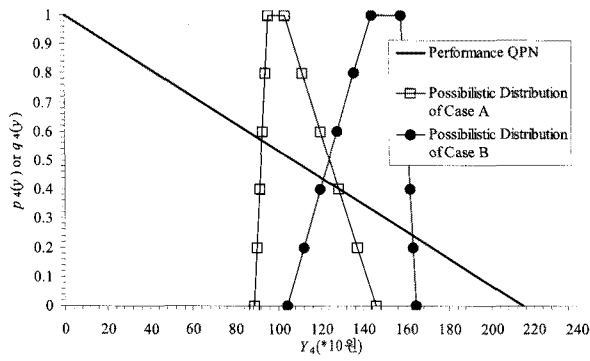
(a) 반력( $Y_1$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



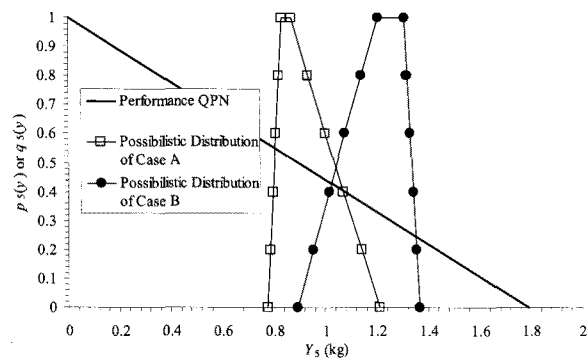
(b) 최대 응력( $Y_2$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



(c) 고유진동수( $Y_3$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



(d) 코스트( $Y_4$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



(e) 질량( $Y_5$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포

<그림 3> 다른 선호도 함수를 갖는 설계해 집합의 표현

### 2.3 설계해 집합의 전파

앞에서 기술한 바와 같이 설계해 및 요구 사양에 대해서 설계 선호도수와 요구 선호도수가 정의되면 <그림 3(a)>~<그림 3(e)>에 나타난 바와 같이 PSD법의 집합 전파법을 이용해서 설계 선호도수에 의해 달

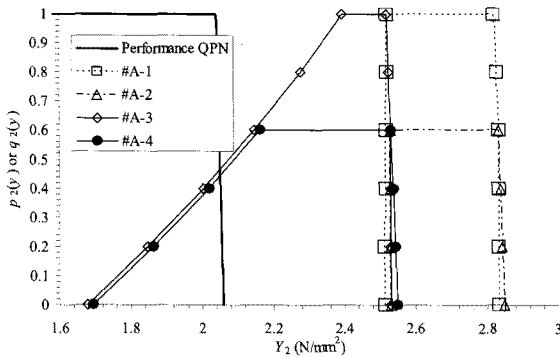
성될 수 있는 성능의 가능성 분포를 구한다. 이 결과로부터 Case A와 Case B 모두 모든 성능 변수에 있어서 가능성 분포와 요구 선호도수 사이에 겹치는 공통 영역이 있기 때문에 설계자의 설계 검토 범위 안에 설계자가 요구하는 성능을 만족하는 설계해가 존재한다는 것을 알 수 있다.

그러나, 반력과 응력에 있어서는 두 케이스 모두 요구 선호도수로부터 벗어난 가능성 분포의 영역이 존재하기 때문에 최초로 설계자에 의해 정의된 설계 선호도수 안에 유효하지 않은 해가 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 설계자의 설계 검토 범위의 일부가 요구 성능을 만족시킬 수 없는 성능치를 생성하고 있다. 따라서, 초기 설계해 집합으로부터 유효하지 않은 해의 부분집합을 제거함으로써 최초 설계해 집합을 축소할 필요가 있다.

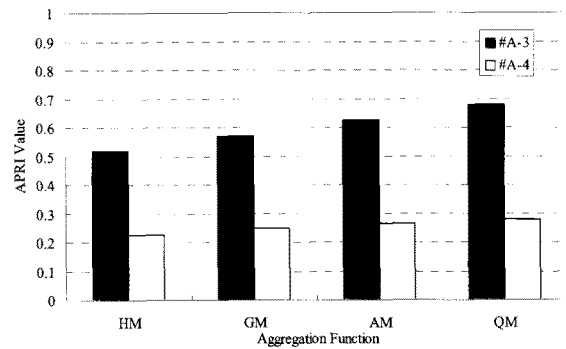
### 2.4 설계해 집합의 축소

PSD법에서는 초기 설계 선호도수로부터 요구 선호도수를 만족시키지 못하는 부분 영역을 점차로 제거하면서 다양한 변동에 강건하고 설계자의 요구 성능에 대해 만족도가 높은 설계해의 부분집합을 효율 좋게 결정하기 위한 집합 축소법이 준비되어 있다. 먼저, 설계 선호도수를 선호도 레벨 0에서의 구간을 기준으로 하여 균등하게 분할하고 full factorial design, central composite design, box-behnken design, plackett-burmann design, orthogonal array 등의 실험계획법[4]을 이용하여 분할된 설계 선호도수의 조합을 작성한다. <표 2>는 직경( $D$ )과 두께( $T$ )에 있어서의 Case A의 설계 선호도수를 각각 2분할하고 full factorial design에 의해 작성한 설계 선호도수의 조합(#A-1~#A-4)의 예를 나타낸다.

다음으로 제 2.3절에서 기술한 PSD법의 집합 전파법을 이용하여 모든 조합에 대한 성능의 가능성 분포를 구한다. <그림 4>는 응력에 대해서 얻어진 가능성 분포의 예를 나타낸다. 그 결과에 기초하여 요구 성능의 선호도를 보다 높게 만족시키면서 강건한 설계 선호도수의 조합을 도출하기 위해서 PSD법에서는 각 성능에 대한 설계자의 선호도와 강건성을 동시에 평가할 수 있는 척도인 PRI(preference and robustness index)를 이용해서 설계안의 평가를 행한다. Case A의 모든 조합에 대한 PRI를 <표 3>에 나타낸다. <그림 4>와 <표 3>으로부터 알 수 있듯이 응력에 있어서는 #A-1과 #A-2의 가능성 분포는 요구 선호도수와 공통 영역이 없기 때문에 그들의 PRI는 0이 되어 설계안으로부터 제외시킬 수 있다.



<그림 4> Case A에서의 조합에 의한 응력( $Y_2$ )의 가능성 분포



<그림 5> APRI를 이용한 Case A에서의 조합의 평가

<표 2> Case A에서의 설계 선호도수의 부분 집합의 조합

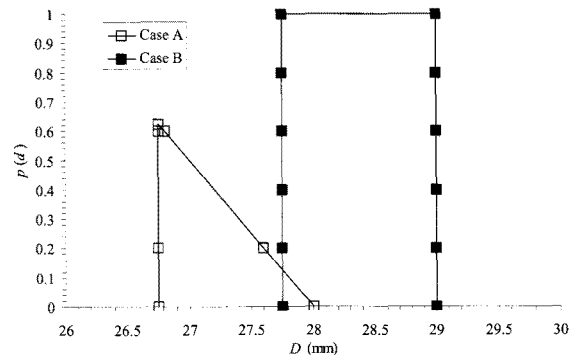
조합	직경( $D$ )	두께( $T$ )
#A-1		
#A-2		
#A-3		
#A-4		

<표 3> Case A에서의 조합의 PRI 값

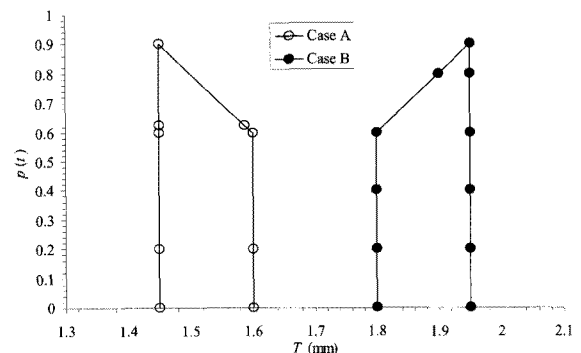
성능 변수	PRI(Preference and Robustness Index) 값			
	#A-1	#A-2	#A-3	#A-4
$Y_1$	0.024806	0.250021	0.304298	0.357615
$Y_2$	0.000000	0.000000	0.510667	0.241261
$Y_3$	0.581630	0.189338	0.450432	0.118043
$Y_4$	0.949336	0.343594	1.000000	0.327250
$Y_5$	0.885048	0.307823	0.861084	0.280004

한편, 나머지 설계안(#A-3과 #A-4)으로부터 반력, 응력, 고유진동수 등의 모든 성능을 동시에 만족시키면서 요구 선호도를 높게 만족시키고 강건한 조합을 선정하기 위해서 각 성능에서의 PRI를 통합한 APRI(aggregated PRI)를 이용한다.

본 사례에서는 <그림 5>에 나타난 바와 같이 APRI로서 일반적인 가중치 평균 연산자인 HM(harmonic mean), GM(geometric mean), AM(arithmetic mean)과 QM(quadratic mean)을 이용하여 각 성능에 대해서 가중치를 부여하는 것으로 하였다. 이 결과로부터 모든 APRI의 평균 연산자에 있어서 설계안 #A-3의 조합이 #A-4보다 높은 APRI 값을 보이고 있기 때문에 #A-3을 최적 설계안으로서 선정할 수 있다.



(a) 직경( $D$ )의 축소된 설계 선호도수



(b) 두께( $T$ )의 축소된 설계 선호도수

<그림 6> Case A와 Case B의 집합 축소 결과

더욱이 #A-3의 설계안에 대해서 축소를 행해 모든 요구 선호도수 안에 성능의 가능성 분포가 들어갈 때까지 설계해 집합의 축소 프로세스를 반복했다. Case B에 대해서도 Case A와 같은 축소 프로세스를 행한 결과, 최종적으로 <그림 6>과 같은 설계 선호도수가 얻어졌다. 또한, <표 4>는 Case A와 Case B에서 선호도 레벨이 0일 때의 설계해의 범위를 나타낸다. 이 결과로부터 다른 선호도 함수를 갖는 설계안이 다른 설계해를 생성하고 있는 것을 알 수 있다.

따라서, Case A와 Case B의 두 케이스에 있어서 어느 쪽의 설계해가 우수한지를 검토했다. 각각의 케이스에서의 설계해를 비교하기 위해 <그림 6>의 각각의 설계 선호도수를 선호도 레벨이 1이 되도록 정규화하고 그 정규화된 설계 선호도수에 의한 성능의 가능성 분포를 산출하여 그 가능성 분포에 대한 PRI를 구했다. 그 결과를 <표 5>에 나타낸다.

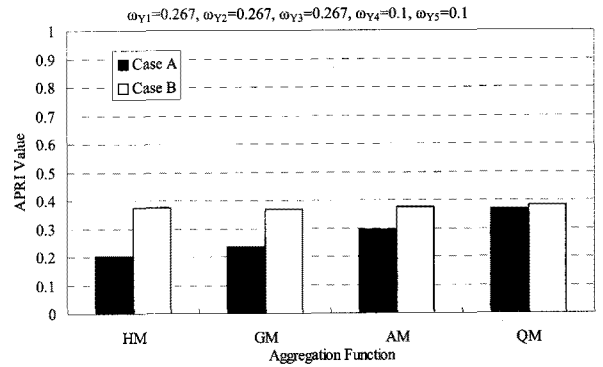
<표 4> 선호도 레벨 0에서의 Case A와 Case B의 최종 설계해 집합

구분	직경(D)	두께(T)
Case A	[26.75, 28.00]	[1.45, 1.60]
Case B	[27.75, 29.00]	[1.80, 1.95]

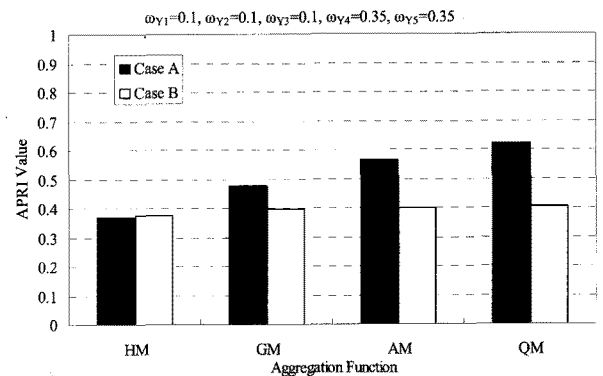
<표 5> Case A와 Case B의 최종 설계해 집합의 PRI 값

성능 변수	PRI 값	
	Case A	Case B
$Y_1$	0.160834	0.476965
$Y_2$	0.134692	0.307759
$Y_3$	0.258010	0.313834
$Y_4$	0.726618	0.412566
$Y_5$	0.732971	0.413377

다음으로, APRI의 계산에 있어서 각 성능에 있어서 다른 가중치에 의한 영향을 검토하기 위해서 본 사례에서는 반력, 응력, 고유 진동수, 코스트, 질량에 대한 가중치를  $(\omega_{Y_1}, \omega_{Y_2}, \omega_{Y_3}, \omega_{Y_4}, \omega_{Y_5}) = (0.267, 0.267, 0.267, 0.1, 0.1)$ 로 하여 반력, 응력 및 고유 진동수의 가중치를 코스트나 질량에 비해 높게 함으로써 기술적인 성능을 중시한 경우와,  $(\omega_{Y_1}, \omega_{Y_2}, \omega_{Y_3}, \omega_{Y_4}, \omega_{Y_5}) = (0.1, 0.1, 0.1, 0.35, 0.35)$ 로 하여 경제적인 성능을 중시한 경우의 두 가지 조합을 비교하였다.



(a) 기술적 성능을 중시한 경우



(b) 경제적 성능을 중시한 경우

<그림 7> Case A와 Case B의 최종 설계해 집합의 비교

이 가중치의 조합을 이용하여 Case A와 Case B의 설계해를 비교한 결과를 <그림 7>에 나타낸다. 이 결과로부터 기술적 성능을 중시한 경우는 Case B가 경제적 성능을 중시한 경우는 Case A가 좋은 설계해라고 말할 수 있다. 이것은 <그림 3(a)>~<그림 3(e)>에 제시된 바와 같이 규정된 요구 선호도수에 대해서 Case A에서는 Case B에 비해 기술적 성능보다도 경제적 성능을 높게 만족시키고 있는 결과(반력, 응력, 고유 진동수에 있어서는 낮은 만족도의 영역에 위치하고 있는 반면 코스트와 질량에 있어서는 높은 만족도의 영역에 위치하고 있음)를 나타내고 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 초기설계 단계에 있어서 자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 다목적 설계 최적화에 PSD법을 적용함으로써 그 유효성을 제시하였다.

종래의 시뮬레이션 기술을 기초로 한 설계 방식에서는 설계안 하나에 대한 확인 작업에 그치고 있고 다수

의 설계안 중에서 최적인 설계변수의 조합을 결정하는 최적설계는 계산 회수가 대폭 증대하기 때문에 실용화에 어려움이 있었다. 그러나, 메타 모델링 기법과 PSD 법을 이용함으로써 다양한 불확실성에 대응하면서 안전성(자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 반력), NV(자동차 사이드 도어 임팩트 빔의 공진주파수), 강도(자동차 사이드 도어 임팩트 빔 부착 부의 응력)와 같은 기술적 측면이나, 코스트, 질량과 같은 경제적 측면 등의 다종다양한 성능을 양립시키는 설계해 집합을 효율 좋게 얻을 수 있었다.

또한, 설계자의 설계 사상을 반영한 설계를 구하는 것이 가능하고, 개발이 진행됨에 따라 보다 정확한 요구 성능을 결정할 수 있을 때나 요구 성능이 변경되었을 때에도 목표 성능 별 달성도를 고려하여 얻어진 설계해 집합으로부터 특정의 설계해를 선정할 수 있고 설계해 집합을 더욱 축소함으로써 설계해를 좁힐 수 있기 때문에 다양한 변경에 유연하게 대응할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Hage, H., Ishikawa, H., Ishibai, N., Daikyu, H., Nahm, Y. E., Nishigaki, H., Miyachi, T., Yoshida, Y., and Watanabe, K.; "Current Situation and Problems in Automotive Design," *Proceedings of the Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE) Symposium*, 12(04) : 15-18, 2004(in Japanese).
- [2] Sakai, H., Shimizu, K., and Yamaoka, N.; "Computer-Aided Optimization System (CAOS) for Optimal Design of Electronic Equipment," *FUJITSU*, 51(5) : 275-279, 2000(in Japanese).
- [3] Chen, W., Allen, J. K., and Mistree, F.; "A Robust Concept Exploration Method for Enhancing Productivity in Concurrent System Design" *Concurrent Engineering : Research and Applications*, 5(3) : 203-217, 1997.
- [4] Simpson, T. W., Peplinski, J., Koch, P. N., and Allen, J. K.; "Metamodels for Computer-Based Engineering Design : Survey and Recommendations," *Engineering with Computers*, 17(2) : 129-150, 2001.
- [5] Kashiwamura, T., Shiratori, M., Yu, Q., and Kohda, I.; "Structural Optimization Using the Design of Experiments and Mathematical Programming," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) A*, 62(601) : 2180-2185, 1996(in Japanese).
- [6] Kashiwamura, T.; *Jikkennkeikakuhou ni yoru hisenkeimonndai no saitekika*, Asakura Shouten, 1998(in Japanese).
- [7] 유우식, 김권흡, 정영배; "다구찌 기법을 이용한 유리 소재의 블라스팅 가공공정의 최적화에 관한 연구", *한국산업경영시스템학회지*, 30(2) : 8-14, 2007.
- [8] Engineous Software, Inc., <http://www.engineous.com>
- [9] Vanderplaats, Miura and Associates, Inc., <http://www.vma.com>
- [10] 남윤의; "초기 설계단계에서의 셋 베이스 다목적 설계 최적화(제1보) : 이론 및 설계지원 시스템", *한국산업경영시스템학회지*, 34(2) : 112-120, 2011.
- [11] Todoroki, A., <http://todoroki.arrow.jp/ssoft/soft.html>.