

# 초기 설계단계에서의 셋 베이스 다목적 설계 최적화(제3보) : 환경문제를 고려한 자동차 사이드 도어 어셈블리에의 적용

남 윤 의

국립 한밭대학교 기계설계공학과

## Set-Based Multi-objective Design Optimization at the Early Phase of Design (The Third Report) : Application to Environment-Conscious Automotive Side-Door Assembly

Yoon-Eui Nahm

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

The design flexibility and robustness have become key factors to handle various sources of uncertainties at the early phase of design. Even though designers are uncertain about which single values to specify, they usually have a preference for certain values over others. In the first and second reports of a four-part paper, a set-based design approach has been proposed for achieving design flexibility and robustness while capturing designer's preference, and its effectiveness has been illustrated with a simple vehicle side-door impact beam design problem. This report presents the applicability of the proposed design approach to the large-scale multi-objective design optimization with a successful implementation of real vehicle side-door structure design.

**Keywords** : Computer-Aided Design, Optimal Design, Preliminary Engineering Design, Structural Analysis, Uncertainty

### 1. 서 론

현재의 동시공학적 제품 개발 환경에서의 설계 방식은 임의의 단일, 즉 포인트의 설계해를 구해 다종다양한 성능 요건을 만족시킬 때 까지 설계해의 수정을 되풀이하는 포인트 베이스 설계(point-based design) 방식이 일반적이고, 이러한 설계 방식에서는 설계해의 변경에 의해 관련되는 타 부문에서 방대한 양의 수정을 발생시킬 가능성이 높기 때문에 개발 전체의 효율 악화의 원인이 되고 있는 것이 현실이다[6]. 따라서, 설계자는 다양한

불확정 요소가 많이 포함되어 있는 초기 설계단계에서부터 다수의 요구 사항을 고려하고 이와 병행하여 작업이 행해지고 있는 타 부문과 정합성을 유지하면서 최적인 설계해를 구해야만 한다.

이를 실현하기 위한 하나의 방법으로서 제1보에서는 새로운 셋 베이스 설계법으로서 PSD(preference set-based design)법을 제안하였다[1]. PSD법에서는 설계자의 경험이나 의도를 반영한 집합으로서의 설계해 및 요구 사항을 규정하고 다양한 성능 요건을 만족시키는 설계해 집합을 구함으로써 개발이 진행됨에 따라 설계 변경이 필

논문접수일 : 2011년 06월 01일      게재확정일 : 2011년 12월 09일

† 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 사이드 도어 어셈블리의 유한요소 해석, 코스트 해석, LCA 해석 등을 포함한 많은 노력과 조언을 아끼지 않은 위원회 멤버들에게 깊은 감사를 드린다.

요한 경우에도 이미 준비되어 있는 설계해 집합을 축소함으로써 설계 변경을 최소화할 수 있다. 또한, 제2보에서는 PSD법의 유효성을 검증하기 위해 간단한 도어 빔 설계 문제를 제시하여 초기 설계단계에서의 다목적 설계 최적화에 대해서 검토하였다[2].

한편, 현재의 자동차 차체 구조 개발에 있어서는 성능이나 시장으로부터의 요구를 비롯하여 코스트, 질량, 생산성 등 다양한 요구 사항을 높게 만족시키면서 환경에 대한 부하 저감에 대해서도 많은 노력을 기울이지 않으면 안 된다. 또한, 고장력 강판의 채용 증가나 멀티머티리얼(multi-material)화에 의해 설계자에게 주어지는 자유도가 비약적으로 증대하고 있기 때문에 설계 문제가 복잡화되고 있다.

일본 자동차 기술회(Society of Automotive Engineers of Japan, JSAE)의 구조형성 기술 부문 위원회에서는 위에서 언급한 바와 같이 복잡화되고 있는 실제의 차체 구조 설계에서의 PSD법의 적용 가능성에 대하여 검토해 왔다. 본 논문에서는 멀티 머티리얼화 되고 있는 차체의 도어 어셈블리 설계 문제를 예로 들어 각종 기술적 성능, 경제적 성능 및 환경적 성능과 같은 다종다양한 성능 요건을 만족시키기 위한 PSD법을 이용한 다목적 설계 최적화에 대해서 소개한다.

## 2. PSD법을 이용한 도어 어셈블리의 다목적 설계 최적화

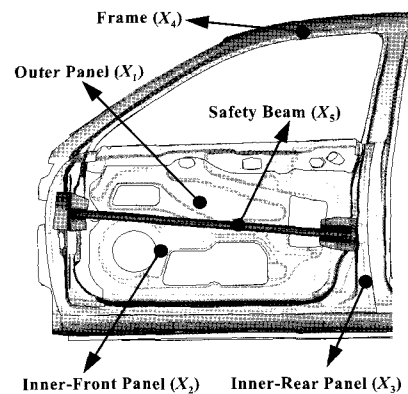
### 2.1 문제 설정 및 근사식의 도출

본 사례에서는 복수의 부품으로 구성되어 있고 요구되는 성능도 복수이며, 또한 컴포넌트로서 그 자체의 평가가 가능하다는 것을 감안하여 도어 어셈블리를 대상으로 검토하였다. 단, 기구 부품을 포함시켰을 경우 검토 항목이 방대해지고, 또한 본 사례가 차체 구조에 주안을 두고 있기 때문에 평가는 BIW상태(도장 미포함)로 한정하였다.

실제의 차체 개발에 있어서는 디자인 데이터를 받아 도어 패널(panel)의 설계를 하지만 여기서는 초기 설계 단계를 상정하여 도어 구조의 부품 형상은 고정된 상태로 하고 두께를 설계 변수로 하였다. <그림 1>에 나타낸 바와 같이 구성 부품 중에 특히 도어 구조의 특성에 영향이 크다고 생각되는 5개 부품의 두께를 설계 변수( $X_1 \sim X_5$ )로 하는 치수 최적화 문제에 대해 검토했다. 특히, 설계 변수  $X_5$ 에 있어서는 제 2보에서 예로 든 중공 원형의 단면을 갖는 도어 빔의 두께만을 고려했다. 도어 구조에 요구되는 성능으로서는 아래와 같이 기술적 성능( $Y_1 \sim Y_4$ ), 경제적 성능( $Y_5 \sim Y_6$ ) 및 환경적 성능( $Y_7 \sim Y_8$ )에

관계되는 8개의 성능 변수를 고려하기로 했다.

- 덴트 저항성(dent-resistance)( $Y_1$ ) : 도어 외판(outer panel)의 중앙 부근에서 접촉 곡률 50R,  $\varnothing 30$ 의 압자를 이용하여 수직으로 245N까지 가압하고 해제 후의 잔류 변위량(mm)
- 인장 강성( $Y_2$ ) : 도어 외판의 중앙 부근에서 접촉 곡률 50R,  $\varnothing 30$ 의 압자를 이용하여 수직으로 49N 부하 시의 변위량(mm)
- 비틀림 강성( $Y_3$ ) : 힌지 및 래치 부착부를 고정하고 프레임 상부(B-pillar 부분)를 차량 횡 방향으로 200N 부하 시의 변위량(mm)
- 충돌 시 에너지 흡수량( $Y_4$ ) :  $\varnothing 254$  폴(Euro-NCAP 상당)을 이용해 120mm 변형시켰을 때의 에너지 흡수량(Nm)
- 코스트( $Y_5$ ) : 도어 하나 당 재료, 가공 및 조립 코스트(Yen)
- 질량( $Y_6$ ) : 도어 하나 당 질량(kg)
- 에너지 소비량( $Y_7$ ) : 도어 하나 당 에너지 소비량(MJ)
- CO<sub>2</sub> 배출량( $Y_8$ ) : 도어 하나 당 CO<sub>2</sub> 배출량(kg)



<그림 1> 자동차 사이드 도어 구조의 치수 최적화

또한, 현재의 차체 구조에는 통상의 스틸이 채용되고 있으나 경량화나 환경 문제로의 대응을 목적으로 차체 구조의 멀티 머티리얼화는 향후 가속화되리라 예상된다[10]. 따라서, 본 사례에서는 다음과 같이 도어 패널에 일반적으로 사용되는 SHP(열간 압연 강판) 계열의 스틸재료로 구성된 Case 1을 포함한 총 4가지 케이스로 나누어 다른 재료에 대해서도 검토하기로 했다.

- Case 1 : 일반적인 스틸 도어의 경우
- Case 2 : 알루미늄 재료로 한 경우
- Case 3 : Case 1에 대해서 외판을 수지로 교체한 경우
- Case 4 : 내판을 마그네슘, 외판을 알루미늄 재료로 한 경우

<표 1>은 4가지 케이스에 대한 설계변수의 재질 및 범위를 나타낸다. 설계변수인 각 부품의 두께로 설정되어 있는 범위는 경험적인 설계지식이나 재료의 입수 용이성 등에 의해 결정되었다.

<표 1> 각 케이스에서의 재질과 두께

구분		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
Case 1	재질	스틸 SHP390	스틸 SHP440	스틸 SHP440	스틸 SHP440	스틸 SHP1470
	두께	0.4~1.2	1.6~2.8	0.4~1.2	1.6~3.2	3.0~3.4
Case 2	재질	알루미늄 A6063	알루미늄 A6063	알루미늄 A6063	알루미늄 A6063	스틸 SHP1470
	두께	1.0~1.4	3.0~3.6	1.0~1.4	4.0~5.6	3.0~3.4
Case 3	재질	수지 PA/PPE+ talc20%	스틸 SHP440	스틸 SHP440	스틸 SHP440	스틸 SHP1470
	두께	1.6~2.0	2.0~2.4	0.6~1.0	2.0~2.8	3.0~3.4
Case 4	재질	알루미늄 A6063	마그네슘 AM60B	마그네슘 AM60B	마그네슘 AM60B	스틸 SHP1470
	두께	1.0~1.4	3.0~3.6	1.0~1.4	4.0~5.6	3.0~3.4

이와 같은 4가지 케이스의 도어 구조에서의 성능 평가를 위해서 도어 구조의 해석 모델로서 NHTSA(national highway traffic safety administration)[5]로부터 공개되어 있는 차체 구조의 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 모델로부터 프런트 도어만을 추출하여 이용했다.

텐트 저항성(Y<sub>1</sub>), 인장 강성(Y<sub>2</sub>), 비틀림 강성(Y<sub>3</sub>)의 평가에는 ABAQUS/Standard[3]를 이용하고, 충돌 시 에너지 흡수량(Y<sub>4</sub>)의 평가에는 ABAQUS/Explicit[3]을 이용하였다. 텐트 저항성(Y<sub>1</sub>)과 인장 강성(Y<sub>2</sub>)의 평가에 있어서는 요소 분할을 압착에 맞춰 도어 중앙 부분을 세밀하게 하였고 비틀림 강성(Y<sub>3</sub>)과 충돌 시 에너지 흡수량(Y<sub>4</sub>)에 대해서는 세분할하지 않고 평가했다. 실제로 작성된 FEA 모델의 요소수는 10369, 절점수는 10471, 절점 공유 요소수(spot welding과 hemming을 포함)는 178이다. 경계 조건으로서 도어의 힌지부 및 래치부 절점의 전 방향(진행방향 및 회전방향)을 구속해서 해석하였다.

또한, 코스트(Y<sub>5</sub>) 산정에 있어서는 설계자가 제조 코스트나 설비 투자액을 간략하게 견적할 수 있는 DFMA(design for manufacture and assembly) 소프트웨어[4]를 이용했다. DFMA는 계산하는 코스트의 종류에 따라 몇 가지 소프트웨어가 제공되고 있으나 본 연구에서는 부품 가공 코스트를 계산하기 위해 DFMCc(design for manufacture : concurrent costing)를 이용했다. 부품 코스트의 견적에는 재료비, 작업자 임금, 형 가공비 등에 대한 데이터가 필요로 되지만, 본 연구에서는 소프트웨어에 준비되어 있는 표준치를 사용했다. 또한, 각 케이스에 있어서 일반적이라고 생각되는 제조방법을 근거로 코스

트를 계산했다.

마지막으로, LCA(life-cycle assessment) 평가를 위해 일본 자동차 공업회의 위탁을 받아 일본 자동차 연구소(Japan Automobile Research Institute)에 의해 개발된 LCA96[7]을 이용했다. LCA96은 자동차로의 적용을 상정하고 있고 차량 질량이나 재료 구성 비율, 제조 공정, 연비 등의 각종 파라미터의 변경이 가능하여 자동차 고유의 파라메트릭 연구에 적합한 시스템이다. 본 연구에서는 이 시스템을 이용하여 도어 어셈블리의 질량, 재료 구성 비율 등 특정 파라미터를 변경해 그 영향으로서의 라이프사이클 에너지 소비량(Y<sub>7</sub>)과 CO<sub>2</sub> 배출량(Y<sub>8</sub>)의 비교 검토를 실시했다. LCA를 위해서는 소재 제조나 차량 제원, 생산 공정이나 주행 조건, 유지 관리, 폐기에 이르는 라이프 스테이지의 에너지 소비량과 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하기 위한 데이터베이스의 정비가 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 도어 구성 비율 차이의 영향을 상대적으로 비교하는 것이기 때문에 그 영향 평가에 직접 관여하는 파라미터를 제외하고는 일본 자동차 공업회가 일본의 평균적인 승용차의 에너지 소비량과 CO<sub>2</sub> 배출량을 평가할 목적으로 조사하여 LCA96에 표준 사례로서 등록한 것을 사용했다. 한편, 소재 제조에 관해서는 일본 산업기술총합연구소 LCA센터의 데이터를 사용하였고 생애 주행 거리와 사용 연수는 일본 국내의 평균적인 값으로서 각각 94,100(km), 9.29(년)를 사용했다[8]. 더욱이, 재료 리사이클 비율에 관해서는 모든 재료에서 95%가 본래의 품질로 리사이클 된다고 가정했다.

위와 같은 FEA, DFMA 및 LCA 해석 툴을 이용해서 제2보의 도어 빔 설계 사례와 같이 Space Filling법[9]에 의해 작성된 설계 변수의 샘플링 포인트의 조합에 대한 성능치의 계산을 행하고 그 결과로부터 응답 곡면법에 의해 설계 변수와 성능 변수 간의 근사식을 얻었다. <표 2>는 Case 1의 각 성능변수에 대한 근사식의 예를 나타낸다. 해석치와 근사식에 의한 값의 오차는 최대 10% 이하로 충분한 정확도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

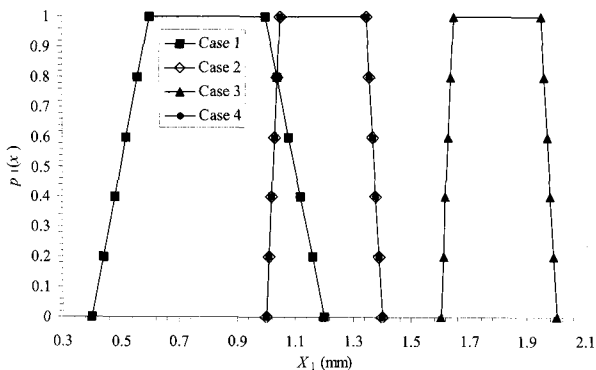
<표 2> Case 1의 응답곡면 모델에 의해 추정된 근사식

구분	Y <sub>j</sub> = a <sub>0</sub> + a <sub>1</sub> *X <sub>1</sub> + a <sub>2</sub> *X <sub>2</sub> + a <sub>3</sub> *X <sub>3</sub> + a <sub>4</sub> *X <sub>4</sub> + a <sub>5</sub> *X <sub>5</sub>						
	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	
Case 1	Y <sub>1</sub>	0.556	-0.396	-0.004	-0.009	-0.003	-0.018
	Y <sub>2</sub>	8.133	-6.052	-0.065	-0.063	-0.044	-0.083
	Y <sub>3</sub>	49.598	-1.889	-2.752	-15.991	-2.683	-1.975
	Y <sub>4</sub>	-105.149	436.636	101.124	589.444	-21.543	281.867
	Y <sub>5</sub>	2706.300	771.600	248.200	799.800	364.400	172.500
	Y <sub>6</sub>	2.044	6.081	1.908	5.531	1.606	0.463
	Y <sub>7</sub>	438.417	1309.375	410.833	1191.250	345.625	100.000
	Y <sub>8</sub>	28.875	89.063	28.125	80.938	23.594	6.875

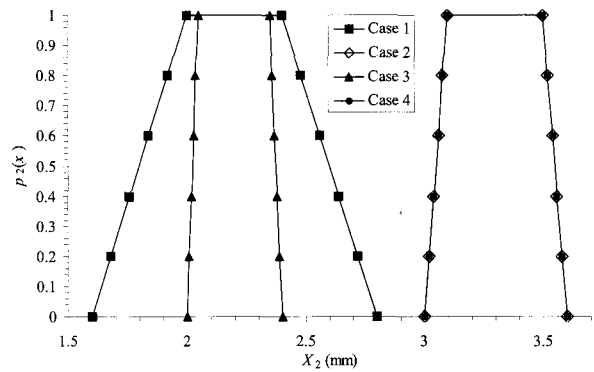
2.2 설계해 집합 및 요구성능 집합의 표현

먼저, PSD법에서는 설계 선호도수(design QPN)와 요구 선호도수(performance QPN)를 이용해서 설계자의 의도나 설계 방침 등을 고려한 설계해 집합 및 요구성능 집합을 정의한다. <그림 2(a)> ~ <그림 2(e)>는 4가지 케이스의 설계 변수에 대해 정의한 설계 선호도수의 예를 나타낸다. 여기서, 일반적으로 채용되고 있는 두께에 비해 꽤 넓은 범위를 설정하고 있는 것에 주목하기 바란다. 예를 들면, Case 1의 스틸 소재의 도어 외판( $X_1$ )의 두께로서는 0.8(mm) 전후가 일반적이지만 부여된 범위는 0.4(mm)로부터 1.2(mm)가 되고 있다. 이것은 모든 가능성 중에서 최적인 설계해 집합을 구하는데 있어 굳이 표준적인 범위에서 벗어난 두께도 검토 대상으로 하기 위해서이다. 단, 설계자는 선호도의 설정에 있어서 표준적인 두께에 대해서는 높은 만족도를 그 이외의 두께에 대해서는 낮은 만족도를 부여함으로써 설계자로서의 의사를 반영하는 것이 가능하게 된다. 또한, 재질에 따라 설계 변수의 범위도 다르기 때문에 4가지 케이스 각각에 다른 설계 선호도수가 설정되었다.

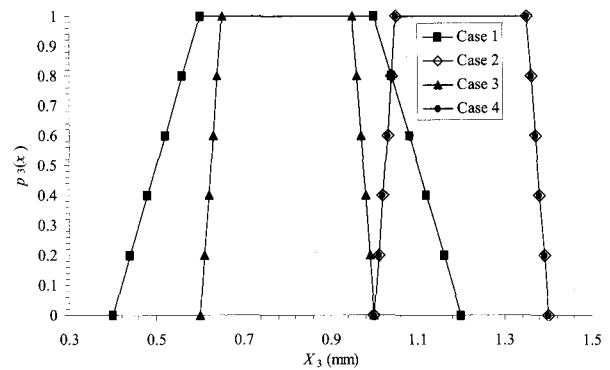
성능 변수에 대한 요구 선호도수의 설정에 있어서는 목표로 하는 도어 구조의 성능에 대해서 20% 개선되는 경우를 1, 50% 악화된 값을 0으로 하여 그것들을 직선으로 연결한 선호도수를 설정했다(<그림 3> 참조). 4가지 케이스에 대해서 기본적으로 같은 요구 선호도수가 정의되었지만 <그림 3(a)>에 나타내듯이 인장 강성( $Y_2$ )에 있어서는 Case 3만 다른 요구 선호도수가 설정되었다. 이것은 수지 소재 판의 탄성계수(Young's modulus)가 금속에 비해 매우 낮기 때문에 같은 성능을 확보하려고 하면 비상식적인 판 두께가 되어버려 현실성이 없기 때문이다. 또한, 실제로 수지 판을 채용한 경우 사용자는 그것을 의식해 수지 판에 대해서 금속 소재의 외판과 동등한 성능은 요구하지 않을 것이라고 가정할 수 있기 때문이다.



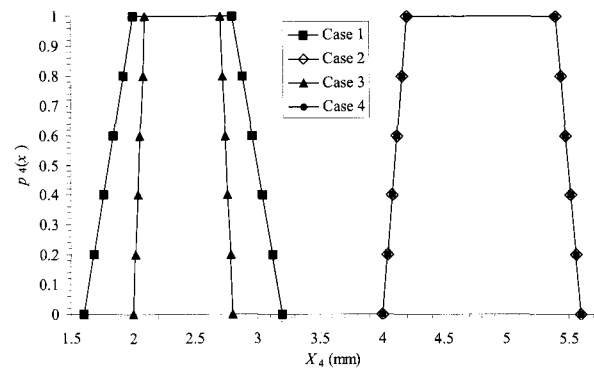
(a) Outer Panel( $X_1$ )에 대한 설계 선호도수



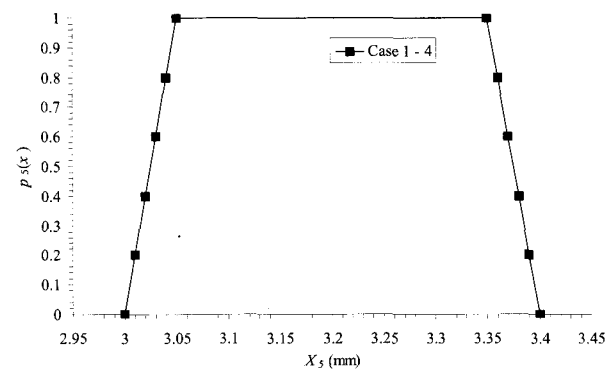
(b) Inner-Front Panel( $X_2$ )에 대한 설계 선호도수



(c) Inner-Rear Panel( $X_3$ )에 대한 설계 선호도수



(d) Frame( $X_4$ )에 대한 설계 선호도수



(e) Safety Beam( $X_5$ )에 대한 설계 선호도수

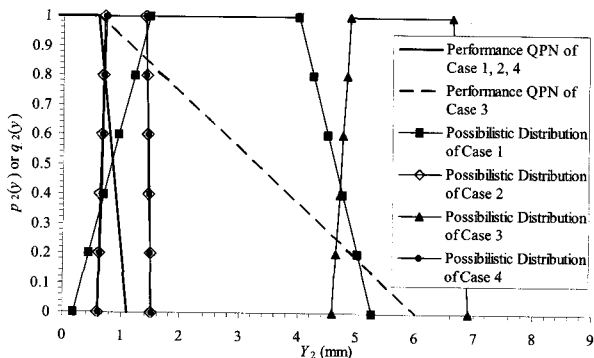
<그림 2> 설계해 집합의 표현

### 2.3 설계해 집합의 전파

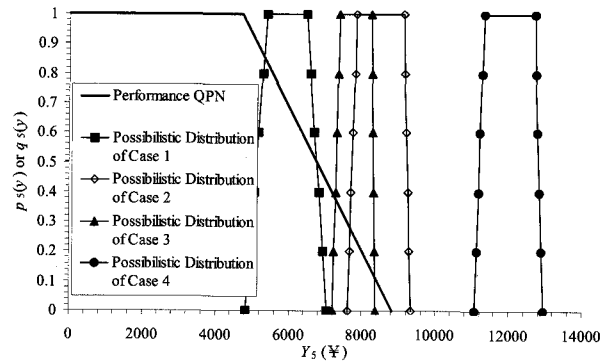
위와 같이 설계 변수 및 성능 변수에 대해서 설계 선호도수와 요구 선호도수가 정의되면 PSD법에서는 그 설계 선호도수에 의해 달성될 수 있는 각 성능 변수의 가능성 분포를 구할 필요가 있다. 이를 위해서는 축적된 기술 지식에 관한 데이터베이스를 구축하거나 시스템 안에 해석 소프트웨어를 구성함으로써 직접 계산 결과를 얻는 방법을 생각할 수 있지만 본 연구에서는 제 2.1절에서 얻어진 근사식을 이용하여 PSD법의 집합 전파법에 의해 각 성능 변수에 대한 가능성 분포를 구했다.

<그림 3>은 설계 선호도수를 전파시켜 계산된 가능성 분포와 요구 선호도수의 예를 나타낸다. Case 1로부터 Case 3에서는 모든 성능에 있어서 요구 선호도수와 가능성 분포 사이에 공통 영역이 존재하기 때문에 설계 선호도수 안에 유효해가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, <그림 3(b)>에 나타난 바와 같이 Case 4의 코스트( $Y_5$ )에 있어서는 가능성 분포의 모든 영역이 요구 선호도수로부터 벗어나 있는 것으로부터 최초 정의된 설계 선호도수 안의 어떠한 두께를 이용해도 코스트의 요구를 만족시킬 수 없다. 즉, Case 4에 대해서는 모든 성능을 만족시키는 설계해가 없다는 것을 알 수 있다.

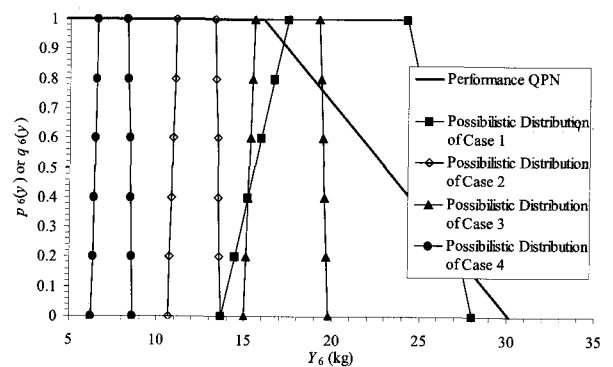
그러나, 질량( $Y_6$ )과 CO<sub>2</sub> 배출량( $Y_8$ )의 성능에 있어서는 다른 케이스에 비해 매우 높은 레벨로 선호도 1을 만족시키고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 코스트는 높지만 질량( $Y_6$ ), 에너지 소비량( $Y_7$ ), CO<sub>2</sub> 배출량( $Y_8$ )은 상정하고 있는 요구 성능을 크게 달성하고 있다. 만일 코스트( $Y_5$ )에 대한 요구 선호도수를 변경할 수만 있다면 Case 4에 대해서도 만족하는 해 집합을 얻는 것은 가능하지만, 본 사례에서는 스틸 소재의 일반적인 도어를 바탕으로 설계 선호도수와 요구 선호도수의 설정을 행하고 있기 때문에 이와 같은 결과가 되고 있어 이후의 검토 내용으로부터 제외시키는 것으로 했다.



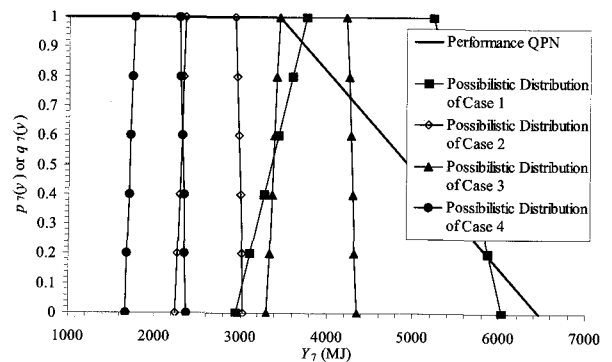
(a) 인장 강성( $Y_2$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



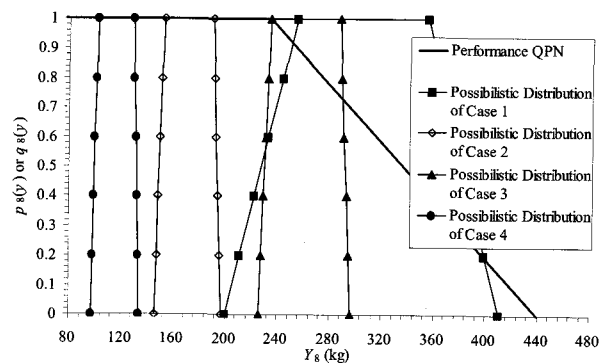
(b) 코스트( $Y_5$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



(c) 질량( $Y_6$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



(d) 에너지 소비량( $Y_7$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포



(e) CO<sub>2</sub> 배출량( $Y_8$ )의 요구 선호도수와 가능성 분포

<그림 3> 초기 설계 선호도수에 의한 집합 전파 결과

### 2.4 설계해 집합의 축소

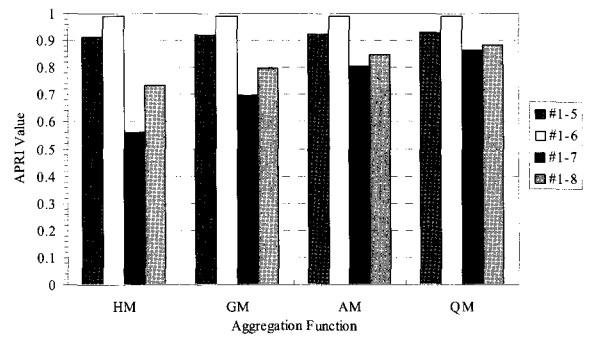
Case 1로부터 Case 3은 모든 성능 변수에 있어서 가능성 분포와 요구 선호도수가 겹치고 있으나, 가능성 분포의 일부가 요구 선호도수로부터 벗어나 있기 때문에 최초의 설계 선호도수 안에는 요구 성능을 만족시킬 수 없는 성능치를 생성하는 유효하지 않은 설계해가 존재한다. 예를 들면, Case 1의 인장 강성( $Y_2$ )에서는 요구 성능이 약 1.1(mm) 이하인 것에 대해 가능성 분포의 영역이 약 0.2(mm)로부터 5.2(mm)가 되고 있다. 이와 같은 경우에는 초기 설계 선호도수의 축소를 행함으로써 가능성 분포가 반드시 요구 선호도수의 영역 안으로 들어가도록 할 필요가 있다.

이와 같이 설계해 집합을 좁히기 위해 PSD법에서는 설계 선호도수의 선호도 레벨 0의 구간을 기준으로 균등하게 분할된 설계 선호도수의 조합을 작성하고 APRI (aggregated preference and robustness index)를 이용해서 그 조합에 의한 성능의 가능성 분포를 평가함으로써 최적의 조합을 선정한다.

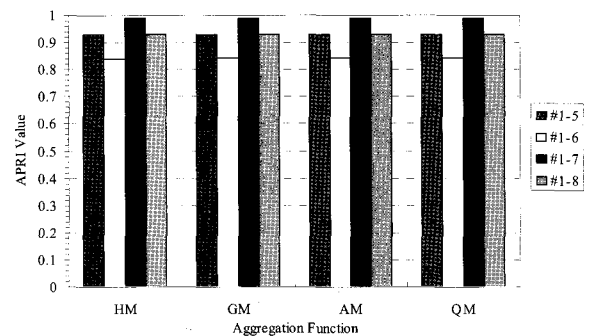
본 사례에서는 실험계획법의 하나인 직교표(orthogonal array)를 도입하여 모든 설계 선호도수를 2수준으로 분할한 L8 직교표를 이용해 설계 선호도수의 조합을 작성했다. 또한, 그 조합에 의한 가능성 분포에 대해서 APRI를 산출할 때 제2보의 도어 빔 설계 예와 같이 모든 성능에 대해서 동일한 가중치를 부여하는 것이 아니라  $Y_1$ 으로부터  $Y_4$ 의 기술적 성능을 중시한 경우와  $Y_5$ 로부터  $Y_8$ 의 경제성과 환경성을 중시한 경우의 두 종류에 대해서 검토하기로 했다.

예를 들면, Case 1의 첫 번째 축소 프로세스에 있어서는 8가지 조합 중에 4가지 조합(#1~#4)에 대해서는 모든 요구 선호도수와 겹치는 가능성 분포가 얻어지지 않았기 때문에 설계안으로부터 제외시키고 나머지 조합(#1-5~#1-8)에 의한 가능성 분포의 APRI를 구했다. <그림 4(a)>는 기술적 성능을 중시한 결과로 모든 평균 연산자(harmonic mean(HM), geometric mean(GM), arithmetic mean(AM), quadratic mean(QM))에 대해서 #1-6의 조합이 가장 높은 APRI를 나타내고 있다. 또한, <그림 4(b)>는 경제성과 환경성을 중시한 결과로 이 경우에는 #1-7의 조합이 가장 높은 APRI를 나타내고 있다. 따라서, 각각 #1-6과 #1-7의 조합에 대해서 두 번째 축소 프로세스를 실행했다.

Case 1에 대해서는 첫 번째 축소 프로세스에서는 모든 요구 선호도수에 포함되는 가능성 분포를 얻을 수 없었기 때문에 세 번에 걸친 축소 프로세스를 실행했다. 두 번째 및 세 번째 축소 프로세스에 있어서도 첫 번째와 같이 각각의 설계 선호도수에 대해서 2수준의



(a) 기술적 성능을 중시한 경우



(b) 경제적·환경적 성능을 중시한 경우

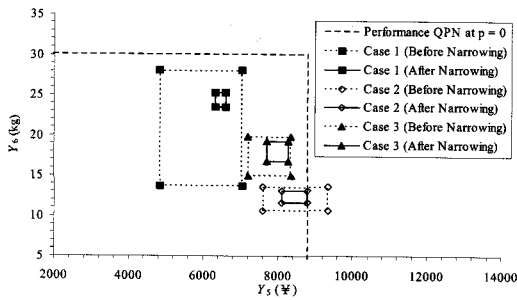
<그림 4> Case 1의 첫 번째 축소 프로세스에서의 APRI 비교

L8을 이용했다. Case 2 및 Case 3에 대해서는 각각 첫 번째 축소 프로세스에서 각 성능을 만족시키는 설계 선호도수를 구하는 것이 가능했다. <표 3>은 기술적 성능을 중시한 경우와 경제성·환경성을 중시한 경우에 대해 축소 프로세스를 통해 얻어진 설계 선호도수의 선호도 레벨 0에서의 설계해 집합을 나타낸다.

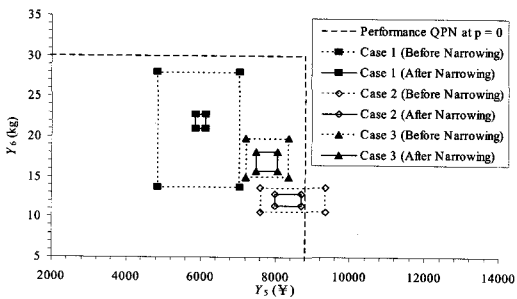
<표 3> 선호도 레벨 0에서의 최종 설계해 집합

구분		기술적 성능 중시	경제적·환경적 성능 중시
Case 1	$X_1$	[1.10, 1.20]	[1.10, 1.20]
	$X_2$	[1.75, 1.90]	[2.35, 2.50]
	$X_3$	[1.00, 1.10]	[0.60, 0.70]
	$X_4$	[2.80, 3.00]	[1.80, 2.00]
	$X_5$	[3.05, 3.10]	[3.30, 3.35]
Case 2	$X_1$	[1.20, 1.40]	[1.20, 1.40]
	$X_2$	[3.00, 3.30]	[3.30, 3.60]
	$X_3$	[1.20, 1.40]	[1.00, 1.20]
	$X_4$	[4.00, 4.80]	[4.00, 4.80]
	$X_5$	[3.20, 3.40]	[3.20, 3.40]
Case 3	$X_1$	[1.80, 2.00]	[1.80, 2.00]
	$X_2$	[2.00, 2.20]	[2.20, 2.40]
	$X_3$	[0.80, 1.00]	[0.60, 0.80]
	$X_4$	[2.40, 2.80]	[2.00, 2.40]
	$X_5$	[3.00, 3.20]	[3.20, 3.40]

이와 같이, Case 1로부터 Case 3에 대해서 모든 요구 선호도수에 들어가는 가능성 분포를 생성하는 설계 선호도수를 구할 수 있었다. 각각의 케이스에 있어서 요구 성능은 모두 만족하고 있기 때문에 실제로 어느 재질의 조합을 선택하는가에 대해서는 설계자의 판단에 맡겨진다. 여기서는 일반적으로 트레이드오프 관계에 있는 코스트( $Y_5$ )와 질량( $Y_6$ )에 착목하여 각 케이스를 비교했다. 축소 프로세스에 의해 얻어지는 가능성 분포와 요구 선호도수의 관계를 <그림 5>에 나타낸다.



(a) 기술적 성능 증시



(b) 경제적·환경적 성능 증시

<그림 5> 코스트( $Y_5$ )와 질량( $Y_6$ )에 대한 집합축소 결과 비교

이 그림으로부터 알 수 있듯이 축소 전에는 선호도 0 이상의 영역에 들어가지 않았던 Case 2의 성능치가 축소 후에는 모두 선호도 0 이상의 영역에 포함되어 있다. 또한, 축소 전의 기술적 성능을 중시한 경우와 경제성·환경성을 중시한 경우에는 축소되는 영역이 다르다는 것에 주목하기 바란다. 이와 같이 어느 성능을 중요시하는가에 따라 다른 결과가 얻어진다. 어느 성능 특성을 중시하는가는 설계자의 판단에 맡겨지기 때문에 PSD법을 이용한 경우에도 해는 일의적으로 결정되는 것이 아니라는 것이 제시되었다.

### 3. 결론

본 논문에서는 제2보에서 예로 든 도어빔 설계 사례에

비해 실제의 설계에 가까운 검토를 하기 위해 도어 어셈블리를 대상으로 PSD법의 적용을 시도했다. 이 결과로부터 많은 부품으로 구성되는 차체 구조 설계에 있어서도 PSD법에 의해 해가 얻어진다는 것이 제시되었다. 요구 선호도수에 대해서는 하나의 셋만을 다루었지만 어느 성능 특성을 중시하는가에 따라 다른 해가 얻어진다는 것도 확인할 수 있었다.

또한, 실제의 설계 현장에서는 다수의 부서로부터 다양한 요구 사항이 제시되지만 그러한 요구 사항을 총합적으로 판단하고, 또한 개발하는 차량의 특성으로서 무엇을 중시하는가를 고려한 다음 최적의 설계해 집합을 구하는 다목적 최적화 방법으로서 PSD법이 유효하다는 것을 제시하였다.

### 참고문헌

- [1] 남윤의; “초기 설계단계에서의 셋 베이스 다목적 설계 최적화(제1보) : 이론 및 설계지원 시스템”, 한국 산업경영시스템학회지, 34(2) : 112-120, 2011.
- [2] 남윤의; “초기 설계단계에서의 셋 베이스 다목적 설계 최적화(제2보) : 자동차 사이드 도어 임팩트 빔에의 적용”, 한국산업경영시스템학회지, 34(3) : 135-142, 2011.
- [3] ABAQUS, Inc., <http://www.hks.com>.
- [4] Boothroyd Dewhurst, Inc., <http://www.dfma.com>.
- [5] FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>.
- [6] 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(4) : 15-18, 2004(in Japanese).
- [7] Japan Automobile Research Institute, <http://jari.or.jp>.
- [8] Kobayashi, O.; “Car Life Cycle Inventory Assessment,” *SAE Technical Papers*, No. 971199, 1997.
- [9] 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.
- [10] Taksue, T., Ishikawa, H., Nakanishi, E., Goto, J., Minami, H., Tanaka, K., Nahm, Y. E., Mori, T., Fujimoto, M., Katagiri, T., Fukui, K., Furusako, S., Shoji, R., and Namba, K.; “Multi-Material Automotive Body Structure Considering Global Environment Issue,” *Proceedings of the Society of Automotive Engineers of Japan(JSAE) Symposium*, 12(4) : 6-14, 2004(in Japanese).