

# 합체박판 기술을 적용한 고강도 경량도어 최적 설계

## Optimal Design of Lightweight High Strength Door with Tailored Blank

송 세 일\*, 박 경 진\*\*  
Se Il Song , G. J. Park

### ABSTRACT

The automotive industry faces many competitive challenges including weight and cost reduction to meet need for higher fuel economy. Tailored blanks offer the opportunity to decrease door weight, reduce manufacturing costs, and improve door stiffness. Optimization technology is applied to the inner panel of a door which is made by tailored blanks. The design of tailored blanks door starts from an existing door. At first, the hinge reinforcement and inner reinforcement are removed to use tailored blanks technology. The number of parts and the welding lines are determined from intuitions and the structural analysis results of the existing door. Size optimization is carried out to find thickness while the stiffness constraints are satisfied. The door hinge system is optimized using design of experiment approach. A commercial optimization software MSC/NASTRAN is utilized for the structural analysis and the optimization processes.

주요기술용어 : Tailored blanks(합체박판), Inner panel(내판), Structural optimization(구조 최적화), Design of experiment(실험 계획법), Orthogonal array(직교 배열표)

### Nomenclature

$\delta$  : displacement, mm  
 $X$  : design variables

### Subscripts

x, y, z : coordinate axis  
j : load case

## 1. 서 론

1997년에 채택된 교토의정서에 의해서 이산화탄소 총량 규제가 의무화됨에 따라 자동차 업

계는 연비향상을 위한 획기적인 차체 경량화 기술개발을 추진하고 있다. 차체 경량화 방법으로는 형상 설계 변경, 개별부품의 두께감소, 부품의 통합화, 구조변경을 수반한 경량소재로의 전환 등이 있다. 차체 경량화를 위해 새롭게 적용되는 제작 기술로는 합체박판 기술(tailored blank), 액압성형 기술(hydroforming) 등이 있다. 기존에는 차체를 구성하는 여러 부품을 각각의 금형을 이용하여 별도로 스탬핑 한 후에 서로 용접으로 조립하여 차체를 생산하였다. 합체박판 기술을 적용하면 각 부위에 적합한 두께와 재질을 갖는 강판들을 레이저 용접하여 한 개의 블랭크를 만든 다음에 스탬핑 공정으로 제품을 생산할 수 있다.

\* 회원, 자동차부품연구원 차체샤시실  
\*\* 회원, 한양대학교 기계공학과

따라서 강도와 강성이 필요한 부위에는 두꺼운 고강도 강판을 사용하고, 강도와 강성이 별로 필요하지 않은 부위에는 얇은 강판을 사용함으로써 보강부품을 줄일 수 있기 때문에 경량화가 가능하다. 합체박판 기술의 장점으로는 차체 강성 향상, 부품 수 감소, 재료 수율 향상, 제작비 절감 등이 있다.<sup>1-3)</sup>

도어 분야에 대해서 지금까지 연구된 내용으로는 Porsche Engineering에서 ULSAC(Ultra Light Steel Auto Closure) 과제를 연구하였고, S. Baskar 등은 횡치형 힌지의 각 부위 치수가 도어 새깅 특성에 영향을 주는 정도를 연구하였다. S. E. Zilincik 등은 도어 개폐시 내구성능 평가 방법을 연구하였고, T. Kashima 등은 고강도 도어 임팩트 빔을 개발하였고, J. Staif는 도어 제작시의 효과적 공차관리 방법을 제안하였고, B. Kinsey 등은 합체박판의 성형성을 예측하는데 유한요소법을 사용하였다. 신정규 등은 도어 내판의 분할선 결정에 위상최적설계를 적용하여 최적설계를 수행하였다.<sup>4-11)</sup>

본 연구에서는 합체박판 기술을 적용하여 구조적으로 안전하고, 제작이 가능하며, 경제적이고, 경량화된 도어를 최적 설계하고자 하였다. 기존 모델의 외형을 변경시키지 않고 도어 내판에 합체박판 기술을 적용함으로써 내판(inner panel)에 부착되는 보강 부품 중에서 제거 가능한 부품을 제거하여 도어 경량화를 실현하였다. 기존 도어에는 힌지 부착 부위를 보강하기 위한 힌지 보강재(hinge reinforcement)와 내판의 윈도우 하단 부위를 보강하기 위한 내부 보강재(inner reinforcement)가 있다. 제거되는 보강부품의 형상, 내판에 작용하는 응력분포, 합체박판 제작성, 경량화 가능성 등을 감안하여 내판에서의 분할선 위치와 형상을 결정하였다.

내판은 경량화 효과와 제작성을 고려하여 두 가지 방법으로 분할하였다. 첫 번째, 내판을 세 부분으로 나누는 방법이다. 경량화 효과와 부품 수 감소를 위해서 기존의 내판에 부착된 부품 중에서 힌지 보강재와 내부 보강재를 제거하는 것

이 타당하다고 판단하여 두 가지 보강재를 제거한 후에 내판을 세 부분으로 분할하였다. 두 번째, 내판을 두 부분으로 나누는 방법이다. 내판을 세 부분으로 하면 용접선이 비선형화 되어 현재 확보한 레이저 용접 장비로는 비선형 용접선을 따라서 용접하는 것이 곤란하고, 또한 소재를 비선형으로 절단하는 데도 어려움이 있기 때문에 힌지보강재만을 제거한 후에 내판을 두 부분으로 분할하였다.

도어에서 요구되는 성능 조건은 다양하지만 구조 설계 시에 일반적으로 사용되는 설계요구 조건은 처짐을 규정하는 세 가지 강성조건으로써 두 군데의 윈도 프레임 굽힘 강성과 도어 새깅(door sagging) 조건이다. 따라서 최적설계에 적용된 구속조건도 세 가지 강성조건에서 기존 도어의 변위 이하이어야 한다는 조건이다.

기존 도어의 구조 성능을 파악하고 이를 바탕으로 최적설계에 적용할 구속조건에 대한 기준을 설정하기 위해서 기존 도어에 대한 구조해석을 수행하였다. 또한 구조해석 결과로 얻어진 내판의 응력 분포를 참고하여 응력이 크게 작용하는 부분을 따로 구별하여 합체박판 기술이 적용될 내판에서의 분할선을 결정하였다. 여러 부분으로 나뉘어진 합체박판의 각 부분에 대한 두께를 구성하는 조합 수는 부분의 개수가 늘어남에 따라 기하급수적으로 늘어난다. 따라서 합체박판이 적용된 두 가지 내판의 각 부위 별 최적두께를 구하기 위해서 치수 최적설계를 적용하였다.

도어를 구성하는 각 부품이 도어 전체강성에 어느 정도 기여하는가를 평가하기 위해서 전체 도어 부품의 두께를 설계 변수로 하는 치수 최적설계를 수행하였다. 도어의 닫힘 소리에 영향을 주는 도어의 고유진동수에 대해서 기존 도어와 최적 설계된 도어를 서로 비교하였다. 도어 새깅 성능에 큰 영향을 미치는 힌지에 대하여 종치형과 횡치형 힌지 두 가지 종류를 비교하였다. 비교한 결과 새깅 특성이 우수한 횡치형 힌지의 주요 치수와 도어 스프레드 비 등이 새깅 특성에 영향을 미치는 정도를 평가하고 이를 바탕으로 최적

설계를 하기 위해서 L<sub>9</sub> 직교배열표를 사용하였다.

본 연구에서는 이미 양산되고있는 기존 도어에 대해서 외형을 변경시키지 않고 합체박판 기술을 적용하여 도어를 경량화시킬 수 있는 방안을 구조최적설계 방법을 통해서 찾고자 하였다. 구조해석과 구조 최적설계에 MSC/NASTRAN을 사용하였다. 기존 도어에 구조최적설계를 적용함으로써 합체박판 기술이 적용된 부품을 기준으로 20.3%의 경량화를 달성하였다. 기존 도어에 합체박판 기술을 적용하여 보강재를 삭제하고 내판의 각 부위의 두께를 결정하는데 구조최적설계를 적용하여 상당한 경량화 효과를 얻을 수 있었다.

## 2. 합체박판 도어의 설계 및 구조해석

### 2.1 기존 도어 구조해석 모델

기존 도어의 구조 해석 결과와 시험 결과를 서로 비교하여 향후 설계 데이터 베이스로 활용하기 위해서 상세한 해석 모델을 작성하였으며, 전체 도어 모델은 Fig. 1에 나타나있다. 상대적으로 얇은 강판을 성형하여 만든 내판, 외판, 보강재, 윈도 프레임 등은 2차원 사각형 셀 요소를 사용하였다. 상대적으로 두껍고 폭이 좁은 힌지는 3차원 육면체 요소를 사용하였다. 힌지 핀은 1차원 빔 요소를 사용하여 모델링하였다. 힌지 핀이

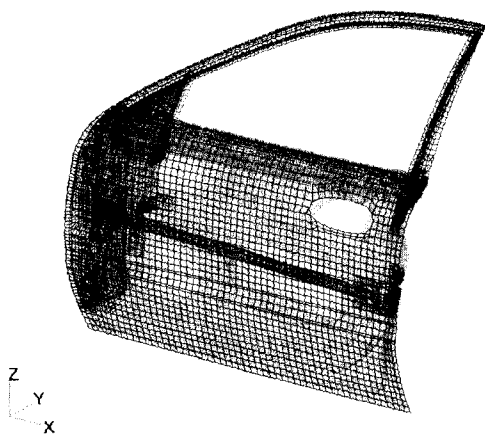


Fig. 1 Base door FEM model

끼워지는 구멍 둘레에 있는 절점은 강체 요소를 이용하여 중심에 있는 절점에 고정되었으며, 가운데 절점과 힌지 핀을 강체 요소로 연결하였다. 구성 부품들을 서로 결합시키는 접 용접 부분은 강체 요소로 모델링하였다. 부분적으로 사용되는 연속용접 부위는 용접선 상에 존재하는 절점을 강체 요소로 연결하였다. 용접 부위의 적절한 모델링이 도어 전체의 변위에 영향을 많이 주기 때문에 힌지를 고정하는 모델링을 세심하게 하였다.

### 2.2 합체박판 도어의 설계

기존 도어의 외형과 조립되는 부위의 치수를 변경하지 않으면서 합체박판 기술을 적용하여 도어를 경량화할 수 있는 방법을 모색하였다. 합체박판 기술을 주요 보강재들이 부착되는 내판에 적용하면 경량화 효과가 클 것으로 판단되었다. 삭제되는 보강재 형상과 기존 도어의 해석 결과를 참고하여 두꺼운 강판이 사용되는 면적을 최소화함으로써 경량화 효과를 극대화하였다. 합체박판 기술을 적용하여 두 부분과 세 부분으로 나누는 두 가지 방법으로 내판을 개념 설계하여 타당성을 검토하였다.

내판을 두 부분으로 분할하면 힌지 보강재를 제거할 수 있고, 세 부분으로 분할하면 힌지 보강재와 내판 보강재를 제거할 수 있다. 합체박판 기술을 적용함으로써 제거되는 힌지 보강재와 내판 보강재는 Fig. 2에 나타나있다. 경량화 효과는 세 부분으로 분할하는 것이 더 유리하지만 제작 회사의 현재 기술 환경 하에서 합체박판의 제작성을 고려하면 분할선이 선형으로 되어야 하므로 두 부분으로 분할된 내판도 아울러 고려하였다. 두 부분 나뉘어진 내판은 Fig. 3에 있고, 세 부분으로 나뉘어진 내판은 Fig. 4에 나타나 있다.

세 부분으로 나뉘어진 내판의 분할선은 기존 도어의 해석 결과로부터 얻어진 내판의 응력 분포(Fig. 13)를 참고하여 응력이 크게 작용하는 부분을 따로 구별하여 큰 두께가 필요한 부분의 크기를 최소화하였다. 제거되는 보강재의 강성을

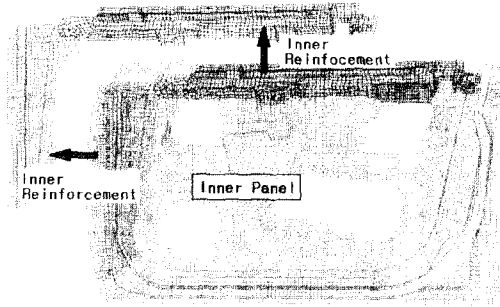


Fig. 2 Removed hinge and inner reinforcement

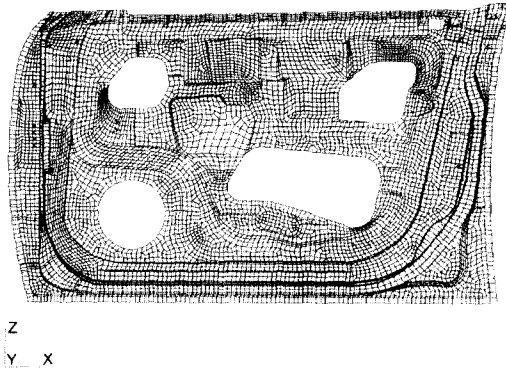


Fig. 3 2 pieces inner panel

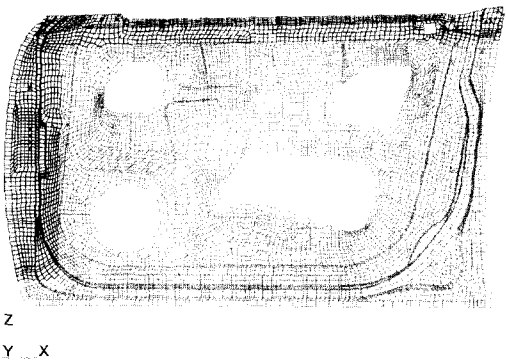


Fig. 4 3 pieces inner panel

감안하여 국부적인 강성을 유지하기 위해서 제거되는 보강재의 부위에 있는 내판 부분의 두께는 기존 치수 보다 증가되어야 한다.

기존 도어는 Fig. 2에 있는 바와 같이 1.5mm 두께의 힌지 보강재와 0.7mm 두께의 내판 보강재를 갖고 있으며, 내판의 두께는 전체적으로 0.7

Table 1 Comparison of thicknesses and weights among three cases(Units: mm, kg)

	Base door	3 pieces inner panel	2 pieces inner panel
Upper inner panel	0.7	1.2	0.65
Hinge side inner panel	0.7	1.3	1.3
Middle inner panel	0.7	0.65	0.65
Front door weight	17.01	15.81	15.97

mm로 균일하다. 기존 도어에서 힌지 보강재, 내판 보강재, 내판의 무게는 각각 1.31kg, 0.469kg, 4.521kg이다. 따라서 합체박판이 적용되는 부품의 전체 무게는 6.3kg이다. 합체박판 기술을 적용하여 내판을 세 부분으로 나눈 모델은 Fig. 4에 있는 바와 같이 힌지 보강재와 내부 보강재를 제거하고 내부 보강재가 있었던 위쪽 부분의 내판 두께를 1.2mm로 하였고, 힌지 보강재가 있었던 앞쪽 부분의 내판 두께를 1.3mm로 하였으며, 나머지 부위에는 0.65mm 강판을 사용하였다. 이러한 두께는 제거되는 보강재의 두께와 경량화를 고려하여 직관적으로 결정되었다. 내판을 두 부분으로 나눈 모델은 Fig. 3에 있는 바와 같이 힌지 보강재를 제거하고 힌지 보강재가 있었던 앞쪽 부분의 내판 두께를 1.3mm로 하였고 나머지 부위는 0.65mm로 하였다. 세 가지 모델에 대한 내판 부위의 두께와 도어 전체 무게를 Table 1에 정리하였다.

### 2.3 도어 설계 조건과 해석 조건

도어의 설계 요구조건은 앞에서 언급된 세 가지 강성, 덴트와 오일 캐닝에 견디는 외판의 국부 강성, 과도한 새김 하중이 작용하고 난 후에 남아 있는 영구 변형량, 거주성, 방음, 방수성, 기밀성, 도어 개폐 시의 음색, 도어 개폐와 탑승의 용이성 등 매우 다양하다. 그러나 일반적으로 설계 단계에서 제작회사가 도어의 구조적인 측면에서 고려하는 설계 조건은 도어의 세 가지 강성 조건이다. 여기서는 도어의 강성적인 측면과 개폐시의 음색을 고려하여 세 가지 강성조건에 대한 선형

해석과 고유진동 해석을 수행하였다.

도어의 세 가지 강성조건은 앞쪽 윈도 프레임 강성, 뒤쪽 윈도 프레임 강성, 도어 새김이다. 윈도 프레임 강성은 차량이 고속주행 중에 공기 흐름에 의해서 도어 바깥쪽에 음압이 발생하기 때문에 윈도 프레임 강성이 충분하지 않으면 도어와 차체사이에서 틈이 벌어져 바람소리가 심하게 나는 것을 방지하기 위한 설계조건이다.

도어 새김은 사람이 도어에 아래로 기대거나 문을 열린 상태에서 도어 아래 면이 보도에 닿은 상태에서 비정상적인 하중이 과대하게 작용하는 경우에 힌지 부위의 강도, 강성과 도어의 전체 비틀림 강성을 충분하게 확보하기 위한 설계조건이다. 중요한 도어 설계 조건인 새김 성능에는 네 개의 주요인자가 영향을 준다. 네 개의 인자는 도어 힌지가 부착되는 내판의 강성, 힌지의 강성, 힌지가 차체에 부착되는 위치인 B-필러 강성, 그리고 도어 전체의 비틀림 강성이다.

기존 도어와 합체박판 기술을 적용한 도어의 구조 강성을 비교하기 위해서 도어의 세 가지 강성을 기준으로 검토하였다. 프레임 강성을 해석하기 위한 모델에 적용한 구속 조건은 힌지에서의 모든 자유도를 구속하였고, 도어 래치 부위에서의 y와 z축 변위와 y와 z축의 회전 변위를 구속하였다. 해석에서 사용한 구속조건은 Fig. 5에 나타나있다. 도어 새김을 해석하기 위한 모델에 적

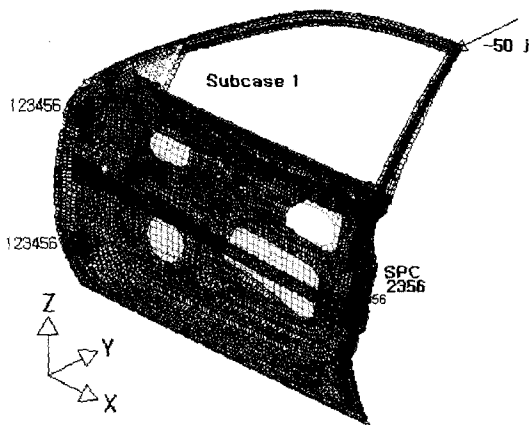


Fig. 5 Load condition and boundary conditions

용한 구속조건은 힌지에서의 모든 자유도를 구속하고, 도어 래치 부위에서 y축 변위를 구속하였다. 프레임 강성 해석을 위해서 앞쪽 프레임과 뒤쪽 프레임에 도어 면에 수직인 하중을 작용시켰고, 도어 새김 경우에는 래치에서 차체의 아래쪽으로 하중을 작용시켰다.

## 2.4 종지형과 횡지형 힌지 비교

일반적으로 도어 힌지에는 종지형과 횡지형 두 가지가 사용되며, 그 모양은 Fig. 6과 7에 나타나있다. 두 가지 힌지 중에서 도어 새김 특성과 무게 측면에서 더 우수한 형태를 찾기 위해서 구조해석을 하여 결과를 비교하였다. 해석결과 중

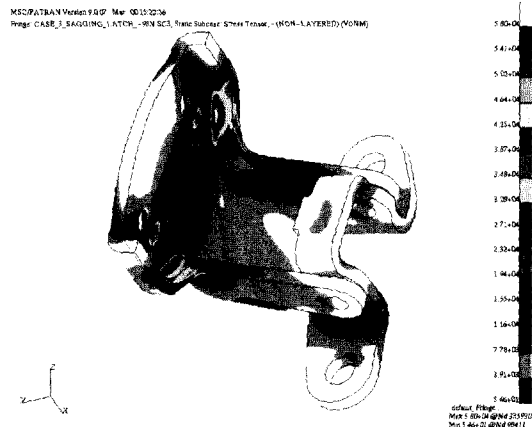


Fig. 6 Stress contour in vertical type hinge

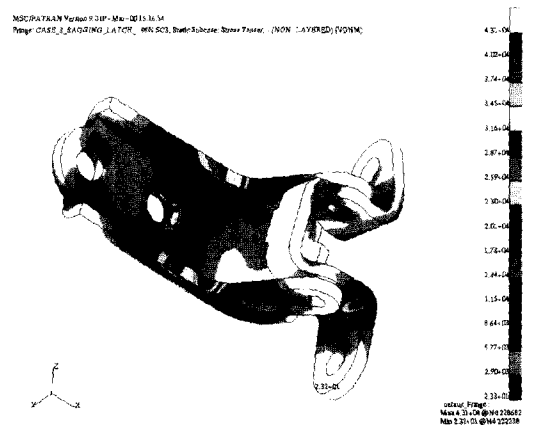


Fig. 7 Stress contour in horizontal type hinge

치형 힌지보다 횡치형 힌지에 작용하는 응력이 더 작다는 것을 알 수 있다.

### 2.5 고유 진동 해석

세 가지 모델에 대한 고유진동모드 해석을 수행하여 고유진동수와 진동 모드를 비교하였다. 고유 진동모드 해석에 적용된 구속조건은 프레임 강성 해석의 경우와 같다. 일차 진동모드는 Fig. 8에 나타난바와 같이 윈도 프레임의 굽힘 모드이고, 일차 고유 진동수는 25.4Hz이다. 이차 진동모드는 Fig. 9에 나타난바와 같이 내판의 굽힘 모드이며, 이차 고유 진동수는 30.83Hz이다.

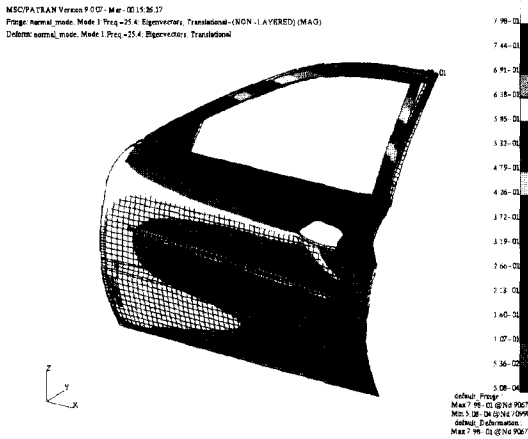


Fig. 8 1st vibration mode of base door

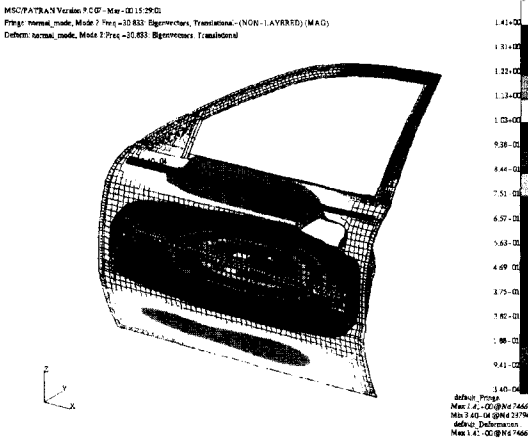


Fig. 9 2nd vibration mode of base door

### 2.6 해석 결과 검토

기존 도어와 합체박판 기술을 적용한 도어의 구조 성능을 비교하기 위해서 도어의 세 가지 강성 조건에 대한 정적 구조해석과 고유 진동 해석 하였다. Table 2에서 결과를 서로 비교하였다.

앞쪽 윈도 프레임 강성 조건에서의 변위 분포는 Fig. 10에 나타나있으며, 변위가 최대인 곳은 하중작용점이다. 기존 도어에서의 변위가 1.27 mm인데 반해서 내판을 세 부분으로 분할된 경우는 1.16mm, 두 부분으로 분할된 경우는 1.19 mm이므로 합체박판 도어가 기존 도어보다 앞쪽 프레임 강성이 우수하다. 뒤쪽 윈도 프레임 강성 조건에서의 변위 분포는 Fig. 11에 나타나있으며, 변위가 최대인 곳은 하중 작용점이다. 기존 도어에서의 변위가 1.68mm인데 반해서 내판을 세 부분으로 분할된 경우는 1.67mm, 두 부분으로 분할된 경우는 1.73mm이므로 기존 도어보다 뒤쪽 윈도 프레임 강성이 약간 떨어진다.

윈도 프레임 강성을 향상시키기 위하여 프레임 자체 강성도 중요하지만 프레임과 내판, 외판이 접합되는 부위의 접합 강성을 크게 해야 한다. 이를 위해서 프레임과 패널의 접합부위를 잘 용접하고, 프레임과 패널을 연결하는 부착 프레임을 적절히 설계하여 하중을 분산시켜야 한다.

도어 새김 조건에 대한 구조해석 통해서 얻어진 변위의 분포는 Fig. 12에 나타나있으며, 변위가 최대로 되는 위치는 힌지 중심에서 가장 멀리

Table 2 Comparison of deformations and natural frequencies among three cases(Units : mm, Hz)

	Base door	3 pieces door	2 pieces door
Front frame stiffness	1.27	1.16	1.19
Rear frame stiffness	1.68	1.67	1.73
Door sag	0.770	0.744	0.750
Natural frequencies	1st	25.40	24.36
	2nd	30.83	31.20
	3rd	33.65	31.52

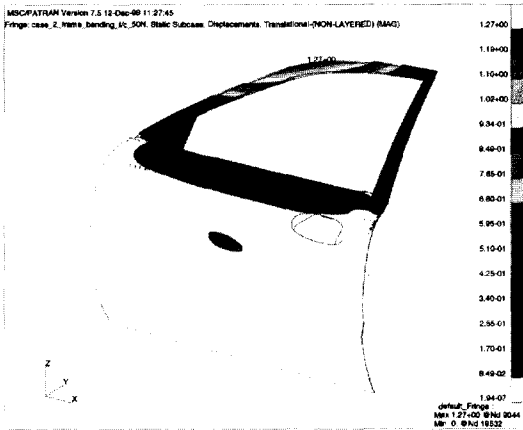


Fig. 10 Displacement in front frame stiffness case

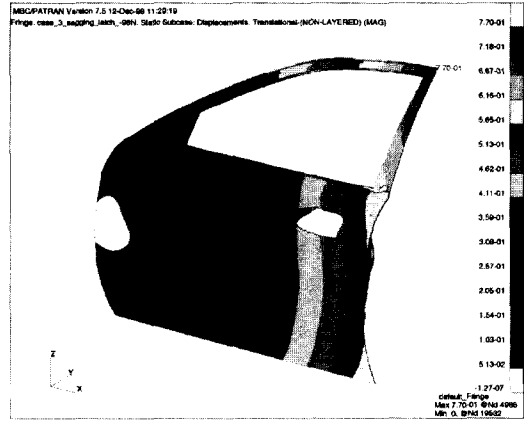


Fig. 12 Displacement in door sag case

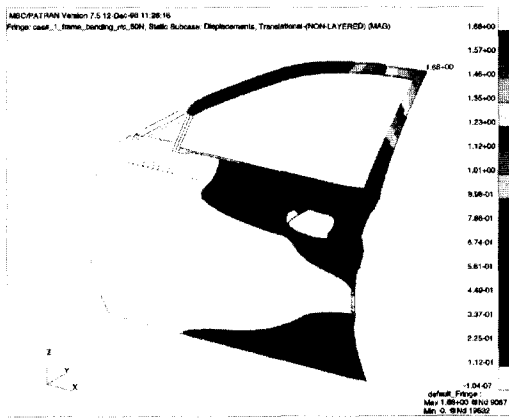


Fig. 11 Displacement in rear frame stiffness case

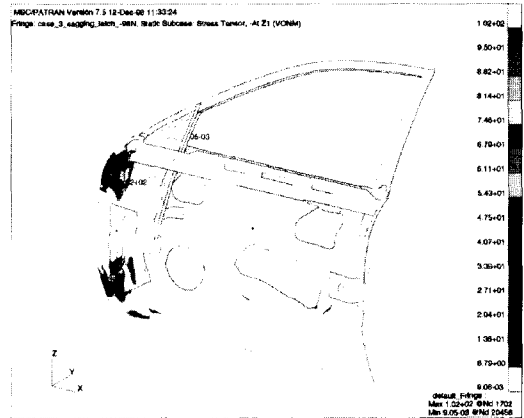


Fig. 13 Stress contour in door sag case

있는 뒤쪽 윈도 프레임이다. 변위 분포가 동심원 형상을 나타내므로 힌지 부위의 변형에 의한 도어의 강체 회전은 새깅 처짐의 주요 원인이 될 수 없다. 따라서 힌지와 힌지 부착 부위의 강성을 강화하면 새깅 특성을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 힌지 부위 강성을 크게 하기 위해서 적절한 크기와 두께의 힌지 어태치먼트를 내판에 부착하는 것이 효과적이라고 판단된다. 응력은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 힌지 부착 부위에 집중되어 작용한다.

기존 도어에서의 새깅 변위가 0.77mm인데 반해서 내판을 세 부분으로 분할된 경우는 0.744mm, 두 부분으로 분할된 경우는 0.750mm이므로

기존 도어보다 새깅 강성이 우수하다.

승용차에 사용되는 도어 힌지의 형태는 일반적으로 종치형과 횡치형이 있는데 두 종류에 대한 도어 새깅 성능을 해석결과를 토대로 서로 비교하였다. 종치형 힌지의 변위가 1.39mm인데 반해 횡치형 힌지는 1.10mm이므로 횡치형 힌지가 종치형 힌지보다 도어 새깅 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다. 여기서도 힌지 전체를 모델링하였기 때문에 도어 쪽에 있는 힌지만을 모델링하여 얻어진 변형보다 크다는 것을 알 수 있다.

힌지의 무게는 Table 3에 있는 바와 같이 횡치형 힌지가 0.08kg 더 가볍다. 그러나 Fig. 6과 7에 나타난 바와 같이 차체의 B-필러에 부착되는 부

Table 3 Comparison of deformations and weights between horizontal and vertical type hinge

	Vertical type hinge	Longtudinal type hinge
Door sag deflection	1.39mm	1.10mm
Hinge weight (2 pieces)	0.90kg	0.82kg

위의 볼트 구멍이 옆으로 벌어져 있는 횡치형 힌지가 종치형에 비해서 B-필러의 폭이 더 커져야 할 필요성이 있을 수 있다. 따라서 B-필러의 폭에 영향을 미치는 횡치형 힌지의 두 가지 주요 치수가 새깅 처짐에 미치는 영향을 평가하기 위해서 비교배열표를 이용하여 최적 조합과 민감도를 3.5절에서 구하였다.

### 3. 최적설계

#### 3.1 구조 최적설계 개요

설계 요구조건이 명확히 규정되어 있고, 이것을 수학적으로 정의할 수 있으면 구조 최적화를 통해서 관심 부위의 최적 치수를 구하는 것이 효과적인 설계 방법이다. 유한요소법에 최적화 알고리즘이 접목되어 구조 최적설계에 사용되어 지는 상용 소프트웨어로는 MSC/NASTRAN, GENESIS 등이 있다. 이러한 소프트웨어를 이용하면 대형 구조물을 효과적으로 최적설계할 수 있다.

합체박판 도어를 구조 최적설계 문제로 적절히 정의할 수 있다면 합체박판의 최적 치수를 효과적으로 구할 수 있다. 구조해석 시에 입력되는 변수(치수, 형상 등)와 결과(응력, 처짐, 진동수 등) 등을 이용하여 목적함수, 구속조건, 설계변수들을 규정함으로써 구조 최적설계의 정식화를 할 수 있다. 유한요소 모델은 설계 변수와 구속조건 등이 많아서 해를 구하는데 시간이 많이 걸리기 때문에 효과적으로 해를 구하는 기법이 적용되어야 한다.

합체 박판 기술이 적용된 도어 내판의 각 부위에 대한 최적 두께를 결정할 수 있으면 도어 무게를 효과적으로 줄일 수 있다. 합체박판 도어의 경

우 구속조건으로 설계 요구조건을 사용하고 목적함수를 무게로 하면 구조 최적설계 문제로 정식화 할 수 있다.

#### 3.2 내판의 최적설계

내판에 합체 박판기술을 적용하면 두께가 균일한 소재를 이용하는 기존 내판에 비해서 부위별로 두께나 인장강도가 다른 강판을 적절히 조합하여 사용할 수 있다. 따라서 다른 강판들이 서로 접합되는 용접선의 형상이나 합체박판 두께를 결정하는데 최적화 방법이 적용되어야 하는 필요성이 더욱 커진다. 합체박판 기술을 사용하여 내판을 설계할 때 각 부위의 최적 두께를 구하기 위해서 치수 최적화(size optimization)를 수행하였다.

기존 도어 모델을 구조 해석하여 얻어진 응력 분포, 제거되는 보강재 형상, 그리고 내판 형상을 고려하여 내판을 세 부분으로 나누었다. 제거되는 부품은 힌지 보강재와 내판 보강재이며 제거되는 부품의 강성을 보완하면서 무게를 최소화할 수 있도록 내판의 분할선을 결정하였다. 세 가지 강성 요구조건인 앞쪽 윈도 프레임 강성, 뒤쪽 윈도 프레임 강성, 도어 새깅 강성을 구속조건으로 설정하고, 도어 무게를 목적 함수로 하며, 이를 최소화하는 치수 최적화 문제로 만들었다. 내판의 세 부분의 두께를 설계변수로 하여 이것의 최소 두께를 구하였다.

세 가지 강성조건에 대해서 합체박판 도어가 기존 도어의 변위 보다 크지 않아야 한다. 따라서 기존 도어의 전체 중에서 가장 변위가 큰 절점에서의 변위 크기 보다 합체박판 도어에 있는 같은 위치에 있는 절점의 변위 크기가 크지 않아야 한다. 한 절점에서의 변위 크기는 x, y, z 변위의 성분의 벡터 합과 같다. 이를 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$|\delta| = (\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2)^{1/2} \quad (1)$$

목적 함수인 도어 무게를 최소화하고, 세 가지 강성조건에서 합체박판 도어의 변위 크기를 기



존 도어의 변위 크기 이하로 제한하는 것을 구속 조건으로 함으로써 합체박판 도어 최적화 문제를 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } X = \{X_1, X_2, X_3\} \\
 & \text{Minimize Weight} \\
 & \text{Subject to } |\delta_j^{TB}| - |\delta_j^{BASE}| \leq 0 \quad (2) \\
 & \quad j = \text{하중조건 } 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

여기서

X : 두께 설계변수(내판의 각 부위 두께)

$|\delta_j^{BASE}|$  : 하중조건(j)에서의 기존 도어의 최대 변위의 크기

$|\delta_j^{TB}|$  : 하중조건(j)에서의 합체박판 도어의 최대 변위의 크기

### 3.3 내판의 최적설계 결과

2.2절에서 초기 설계된 합체박판 도어를 구성하는 세 부분으로 나뉜 내판의 두께를 최적화하기 위해서 힌지 부분, 위 부분, 가운데 부분 등의 세 부분의 내판 두께를 설계 변수로 하였다. 세 부분의 초기 두께는 0.7mm이며, 최적화가 진행되는 동안에 두께가 변화하여 최적 두께에 수렴하는 정도는 Fig. 14에 나타내었으며, 네 번의 반복으로 최적값에 수렴하였다.

치수 최적화를 수행한 결과 얻어진 도어 내판의 최적두께는 힌지 부위가 1.2565mm, 위쪽 부위가 1.0549mm, 중간 부위에서 0.65991mm이다. 이러한 결과로부터 힌지 부위의 내판에서 강성이 가장 크게 필요하고, 그 다음으로 위쪽 부위의 내판에서 강성이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 1에 있는 바와 같이 기존 도어의 무게는 17.01kg, 초기 설계된 합체박판 도어는 15.81kg인데 비해서 최적 설계된 합체 박판도어는 15.733kg이다. 따라서 최적설계를 수행하여 0.077kg의 무게를 감소시켰다. 초기설계가 해석 결과와 직관에 의해서 잘 이루어졌기 때문에 무게 감소 효과가 줄었지만 그렇지 않은 경우에는 최적설계가 매우 유용한 결과를 가져다 줄 것이다.

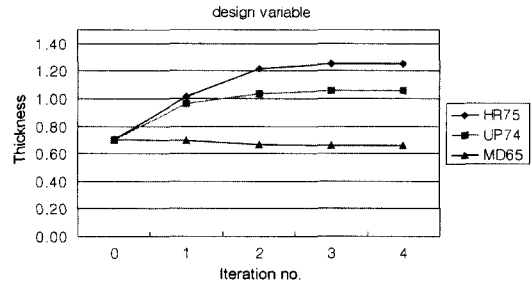


Fig. 14 History of design variables

### 3.4 전체 도어의 최적설계

세 가지 강성 조건에 대한 도어의 각 부품이 기여하는 정도를 파악하기 위하여 전체 부품에 대한 치수 최적 설계를 수행하였다. 여기서의 구속 조건과 목적 함수는 내판 최적설계에서 사용된 것과 같으며 설계변수는 도어 모든 부품의 두께가 된다. 각 부품 두께는 하한값으로 0.3mm, 상한값으로 4.0mm로 정하였다. 최적설계 결과 얻어진 각 부품의 두께는 Fig. 15에 나타나 있다. 원도 프레임을 구성하는 두 개 부품의 두께는 4.0mm로 되었다. 또한 힌지 어태치먼트가 3.68mm로 강성에 비중이 큰 부품이다. 힌지 보강재와 내부 보강재는 0.3mm인데 반해서 힌지쪽 내판 부

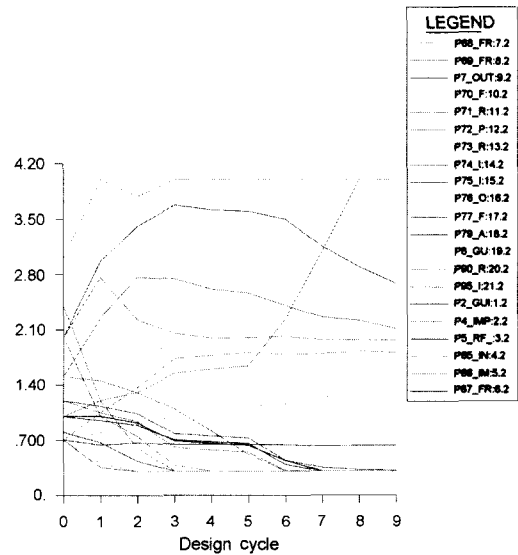


Fig. 15 History of design variables

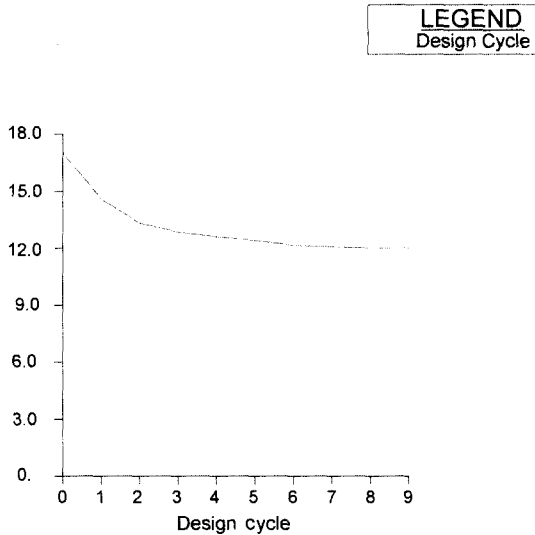


Fig. 16 History of door weight

위는 1.2mm이고, 위쪽 내판 부위는 1.81mm이므로 두 보강재를 삭제하고 해당 부위의 내판을 보강하는 것이 효율적임을 알 수 있다. 외판과 도어 임팩트 빔 관련 부품의 두께가 작게 나온 것은 이 부품들이 세 가지 강성 조건보다 충돌이나 외판 국부 강성을 유지하는 다른 기능을 수행하는 부품이기 때문이다. 최적설계 과정에서 도어 무게의 변화는 Fig. 16에 나타나 있으며, 도어 무게가 12kg 정도까지 감소되었다. 윈도 프레임을 형성하는 부품의 두께가 크게 나온 부품은 그러나 최소 두께와 다른 설계요구조건을 고려하면 12kg보다 커지겠지만 도어를 설계할 때 부품의 두께와 크기를 결정하는데 이러한 결과를 참고할 수 있을 것이다.

### 3.5 힌지 최적 설계

도어에 부착되는 두 힌지 사이의 간격과 힌지의 볼트 구멍 위치가 새깅 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하는 것이 필요하다. 힌지의 볼트 구멍 위치는 Fig. 17에 나타난 바와 같이 힌지가 부착되는 차체의 B-필러 쪽에 의해서 제한을 받는다. 따라서 볼트 구멍의 위치가 도어 새깅에 미치는 영향을 파악하는 것이 필요하다.

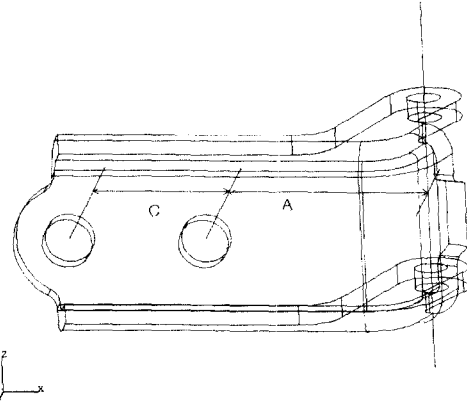


Fig. 17 Control factors

그러나, 도어에 부착되는 힌지 사이의 간격이나 볼트 구멍 위치가 새깅 특성에 미치는 영향을 파악하는데 치수 또는 형상 최적설계를 적용하기가 곤란하다. 따라서, 볼트 구멍 위치가 새깅 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해서 실험계 획법을 적용하였다.

선택된 관심인자는 세 가지로서 힌지축과 차체 쪽 뒷 볼트구멍의 거리(A), 차체 쪽 볼트 사이 거리(C), 힌지 스프레드 비(B)이며, Fig. 17에 나타나 있다. 힌지 스프레드 비(hinge spread ratio)는 도어 길이를 위쪽 힌지와 아래쪽 힌지 사이의 거리로 나눈 비이다. 관심있는 인자수가 세 개이고 각 인자별로 수준수가 3개이므로  $L_9$  직교배열표를 사용하였다. 세 인자의 수준과 치수는 Table 4에 나타나 있으며, 색깔 있는 칸의 숫자가 기존 모델의 치수이다. 내판이 두 부분으로 나뉘어진 합체박판 도어를 이용하여 9가지 경우에 대해서 새깅을 해석하였다.

Table 4 Control factors and levels

	Control factor	Level 1	Level 2	Level 3
A	Body strap rear bolt offset from hinge axis	20	34	48
B	Hinge spread ratio	2.397	2.653	2.970
C	Body strap radial spread	21	33	45

Table 5 Design of experiment layout(L<sub>9</sub>) and results

Trial No.	Column No.(factors)				Results (sag deflection)
	1(A)	2(B)	3(-)	4(C)	
1	1	1	1	1	0.548
2	1	2	2	2	0.725
3	1	3	3	3	0.918
4	2	1	2	3	0.581
5	2	2	3	1	0.827
6	2	3	1	2	1.03
7	3	1	3	2	0.668
8	3	2	1	3	0.903
9	3	3	2	1	1.04

각 인자의 조합조건과 각 조건에서의 새깅 변형량을 나타내는 직교배열표는 Table 5에 나타나 있다. 9가지 경우에서 가장 처짐이 적은 경우는 실험 번호 1에 있는 인자의 조합이며, 변형량은 0.548mm이다. 각 인자 사이의 교호작용이 없다는 가정 하에서 각 인자의 민감도를 평가하고 이에 대한 최적 수준을 구하기 위해서 각 인자에 대한 영향을 나타내는 일원표를 Table 6, 7, 8에 정리하였고, 각 인자의 비교는 Fig. 18에 나타내었다.

최소 처짐을 갖는 인자들의 최적 조건은 Table 6, 7, 8에 나타나 있는 바와 같이 A1B1C3이며, 이때의 점 추정 값은 0.5211mm이다. 이러한 최적 조건에 대해서 구조해석을 수행하여 얻어진 변형량은 0.515mm이다. 이 해석 결과와 점 추정 값 사이의 오차가 1.2%이므로 교호작용이 거의 없는 인자들이 선택되었음을 알 수 있다.

세 인자 중에서 힌지 스프레드 비(B)가 가장 영향이 크고, 힌지축과 차체 쪽 뒷 볼트 구멍의 거리(A)가 그 다음으로 영향이 크며, 인자 C의 영향은 아주 작음을 알 수 있다. 따라서 새깅 측면에서는 B-필러의 폭이 제한된 경우에 A의 길이를 증가시키는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Table 6 One way table of control factor A

A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
T <sub>1..</sub> = 2.191	T <sub>2..</sub> = 2.438	T <sub>3..</sub> = 2.611

Table 7 One way table of control factor B

B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
T <sub>.1.</sub> = 1.797	T <sub>.2.</sub> = 2.455	T <sub>.3.</sub> = 2.988

Table 8 One way table of control factor C

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
T <sub>..1</sub> = 2.415	T <sub>..2</sub> = 2.423	T <sub>..3</sub> = 2.402

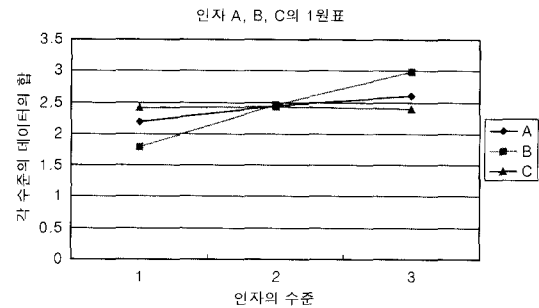


Fig. 18 Response graph

#### 4. 결론

합체박판 기술을 적용하여 기존 도어에서 힌지 보강재와 내판 보강재를 제거하면서 도어 내판을 분할하였다. 치수 최적설계를 적용하여 분할된 내판의 각 부분의 최적 두께를 구하였다. 치수 최적설계 결과 기존 도어에 비하여 무게가 1.277 kg 감소하였으며, 합체박판이 적용된 부품 대비 20.3%에 달하는 경량화 효과를 얻었다.

도어에 부착되는 힌지의 간격과 볼트 구멍 위치가 새깅 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하기 위해서 직교 배열표를 사용하여 주요 치수의 영향을 비교하여 규명하였다.

합체박판 기술과 구조 최적화 방법을 사용하여 고강도 경량도어를 효과적으로 설계할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 미래형 자동차 기획보고서, 자동차부품연구원, 2000.
- 2) UltraLight Steel Auto Body Final Report, Porsche engineering Services, 1998.
- 3) 백승준, 구본영, 금영탁, "합체 박판 (Tailored Blank) 성형기술의 개발 현황과 전망," 자동차공학회지, 제19권 제1호, pp.3-10, 1997.
- 4) U. Weissert, E. Opbroek, "UltraLight Steel Auto Closures Project," SAE 982308, 1998.
- 5) S. Baskar, A. Kamat, R. Lange, "Analytical Robust Door Hinge System Design Taguchi Approach," SAE 982306, 1998.
- 6) S. E. Zilincik, W. J. DeFrank, S. G. Miller "Slam Life Assessment Method for Closures Durability," SAE 982307, 1998.
- 7) T. Kashima, Y. Tanaka, S. Sawaki, "Development of Door Beam ERW Tubing Made of 1470 N/mm<sup>2</sup> Cold Rolled High Strength Steel Sheet," SAE 920785, 1992.
- 8) J. Staif, "Dimensional Management Process Applied to Automotive Door Systems," SAE 982305, 1998.
- 9) B. Kinsey, Z. Liu, J. Cao, "New Apparatus and Method for forming Tailor Welded Blanks," SAE 1999-01-0681, 1999.
- 10) S. I. Song, J. K. Shin, K. H. Lee, G. J. Park, "Automotive Door Design with the Ultra Light Steel Auto Body Concept using Structural Optimization," ICTAM 2000 Abstract Book, p.51, 2000.
- 11) 신정규, 최적설계 기법을 이용한 ULSAB 개념의 자동차 도어 설계, 한양대학교, 1999.
- 12) G. J. Moore, MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization User's Guide, MSC, 1995.
- 13) 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 1995.
- 14) J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, 1989.
- 15) 이권희, 박경진, 설계변수의 공차를 고려한 구조물의 강건 최적설계, 대한기계학회논문집(A), 제21권 제1호, pp.112-123, 1997.
- 16) R. T. Haftka, Z. Gurdal, Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Publishers, 1992.