

## 선택적 요소방법을 이용한 구조 형상최적 설계기법의 개발

심진욱<sup>†</sup> · 박경진<sup>\*</sup>

(2003년 6월 18일 접수, 2003년 10월 13일 심사완료)

### Development of a Structural Shape Optimization Scheme Using Selective Element Method

Jin-Wook Shim and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Structural optimization(구조 최적화), Shape optimization(형상 최적화), Topology Optimization(위상 최적화), Selective Element Method(선택적 요소방법), Shape Model(형상모델), Analysis Model(해석모델)

#### Abstract

Structural shape optimization offers engineers with numerous advantages in designing shapes of structures. However, excessive relocation of nodes often cause distortion of elements and eventually result in degrade of accuracy and even halts of processes. To overcome these problems, an effective method, Selective Element Method(SEM), has been developed. This paper describes the basic concept of SEM and processes to implement into real-world problem. 2-D and 3-D shape optimization problems have been chosen to show the performance of the method. Though some limitations have been found, it was concluded that SEM can be useful in general shape optimization and even in some special cases such as decision of optimal weld line location.

#### 1. 서론

치수최적설계, 형상최적설계, 위상최적설계의 세 가지로 분류되는 구조최적설계 분야 중 형상최적설계는 구조물의 경제적인 형상설계에 직접적인 도움을 줄 수 있는 설계법으로 많은 연구자들의 관심을 받아왔다.<sup>(1-5)</sup> 초기의 연구에서는 유한요소의 절점 좌표를 설계변수로 최적화의 대상인 형상 모델로 사용하여, 민감도 정보에 의한 근사함수의 최적화 기법을 적용하였다. 즉, 유한요소의 절점 좌표를 직접 설계변수로 지정하여 최적화를 시도하였다.<sup>(6)</sup> 하지만 이 방법은 설계변수들이 독립적이어서 평활한 경계를 얻을 수 없는 문제에 직면하게 되었다. 그 후 이러한 문제를 해결하는 동시

에 설계변수의 개수를 줄이기 위해 형상 경계를 몇 개의 조절점으로 구성하는 스플라인으로 표현하고, 조절점의 좌표를 설계변수로 하여 유효한 결론을 도출할 수 있게 되었다.<sup>(7-9)</sup> 그러나, 스플라인으로 구성된 모델은 최적화 과정 중 요소망의 생성을 반복해야 하거나, 요소의 형상비가 나빠지는 등의 단점이 나타난다.<sup>(10)</sup> 또한 모델 내부에 증량 경감이나 기능상의 목적으로 구멍이 있는 경우에는 최적화 자체가 어려워진다.

Bendsoe와 Kikuchi<sup>(11)</sup> 등에 의해 발전된 위상 최적설계는 초기 형상에 구애받지 않고 재료의 배치를 최적화할 수 있으나 형상 최적화가 추가로 필요하게 되는 단점이 있다. Xie와 Steven<sup>(12-14)</sup>에 의해 활발하게 진행되고 있는 연구는 전응력설계를 근간으로 하여 요소의 가감을 통해 효율적인 재료의 사용을 위한 위상 설계안을 찾을 수 있지만, 기존의 우수한 최적화 기법을 사용하지 못하고, 형상 경계의 평활화 작업이 필요하며, 반복 계산량이 아주 많아 비효율적이다. 복셀로 불리는 단위요소로 구성된 모델에 대한 해석법이 개발되어

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계설계공학과  
E-mail : jwshim@tsne.co.kr  
TEL : (031)400-4065 FAX : (031)407-0755

<sup>\*</sup> 회원, 한양대학교 기계공학과

상용화까지 이루어지고, Baron<sup>(15)</sup> 등은 복셀을 이용한 진화 최적화를 시도하였다. 최근의 연구 경향은 CAD 를 사용하여 위상최적화의 결과를 경계의 평활화를 통해 형상최적화까지 자동으로 연결하려는 노력이 활발하다.<sup>(16,17)</sup>

심<sup>(18)</sup> 등이 제안한 선택적 요소방법은 매개변수로 정의된 형상의 최적설계를 위해 미리 분할된 이상적인 형상의 요소를 사용한다. 설계변수의 변화에 따라 미리 분할된 요소 중 강성이 필요한 형상에 해당되는 요소만을 선택적으로 가감하는 방식으로 최적의 형상을 구하게 된다. 아울러 2 차원 문제에 적용하여 그 타당성을 검토한 바 있다.

본 연구에서는 선택적 요소방법의 개념과 적용 절차를 설명하고, 2 차원과 3 차원의 모델의 복잡성에 따라 기존연구<sup>(18)</sup>를 보완한 2 가지의 요소 선택 방법을 제안하여 실제 현장 문제에도 충분히 적용할 수 있는 방안을 제시하였다. 2 차원의 회전판 문제를 통해 변위와 고유진동수를 제한조건으로 하는 중량최적화 문제에 적용하였고, 3 차원의 커넥팅 로드와 합체박판의 도어문제에 적용해 보았다. 이 방법이 몇 가지 단점에도 불구하고, 복잡한 실제 설계문제에도 쉽게 적용할 수 있고, 용접위치 최적화 문제 등 기존의 방법으로는 적용이 어려웠던 분야에도 매우 효과적인 방법임을 보여준다.

## 2. 선택적 요소방법

선택적 요소방법은 기존의 형상 최적화에서 문제가 되었던 부분을 보완하고, 형상 최적화가 어려웠던 특수한 경우에도 적용할 수 있는 형상 최적화 기법이다. 심<sup>(18)</sup> 등은 이전의 연구에서 이 기법의 개념을 설명하고, 구조형상에 속하는 요소에는 실제의 물성치를 적용하고, 그 외의 요소에는 아주 작은 값을 설정하여 요소가 삭제되는 효과를 얻었다. 그 방법은 2 차원의 문제에 적용하여, 기존의 형상최적화 방법과 비교하여 동등한 정도의 최적해를 얻을 수 있었다. 하지만, 요소선택방법의 제약으로 3 차원 문제에 적용하는 것이 어려웠는데, 본 연구에서는 좀 더 발전된 요소의 선택방법으로 복잡한 형상의 문제에도 적용이 가능하게 되었다. 선택적 요소방법의 적용 과정과 방법을 설명하기 위해 Fig.1 의 외팔보 문제를 대상으로 설명한다.

Fig.1 (a)의 직사각형 외팔보가 수직하중에 대해 제한조건을 만족하면서 최소중량을 가지는 후보형상으로 하부 경사량  $dv$  를 설계변수로 설정한다. 기존의 요소 재분할에 의한 최적형상은 Fig.1 (b)와

같이 되는데 자유단으로 갈수록 요소의 형상비가 나빠짐을 알 수 있다.

선택적 요소방법은 먼저, Fig.1 (c)와 같이 설계할 구조물을 충분히 포함할 수 있을 정도의 설계영역을 정하여 균일한 요소망으로 분할을 한다. 그 다음, 이 설계영역 내의 모든 요소의 도심 위치와 설계변수  $dv$  의 위치를 비교하여 외팔보의 형상을 구성하는 요소만을 선택 한다. 그리고, 해석은 검은 색으로 표시된 요소로만 하여, 변위나 응력을 제한조건으로 추출하게 된다. 최적화 과정에서는 기존의 최적화 알고리즘 중 적절한 것을 사용하여 설계변수를 결정하게 된다. (i)번의 최적화로 Fig.1 (c)와 같이 구해진 형상이 (i+1)번째의 최적화에서 설계변수  $dv$  가 커져서 Fig.1 (d)의 형상으로 바뀌었다면, x 로 표시된 요소들이 외팔보의 형상에서 제거되었음을 의미한다. 이와 반대로  $dv$  의 크기가 작아졌다면, 외팔보의 형상에서 추가되는 요소가 생기게 된다. 최적화 과정이 한번 수행될 때마다 수렴여부를 검토하고, 목적함수나 설계변수가 수렴할 때까지 반복계산을 하게 된다.

전체적으로 Fig.2 와 같은 과정이 이루어지며, 해석과정에는 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS v7.0 이 사용되었고,<sup>(19)</sup> 최적화 과정에는 Model Center v4.1.4 의 MFD (Modified Feasible Direction Method) 알고리즘이 사용되었다.<sup>(20)</sup> ANSYS 프로그램은 자체 모델러를 가지고 있고, APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 사용하여 형상과

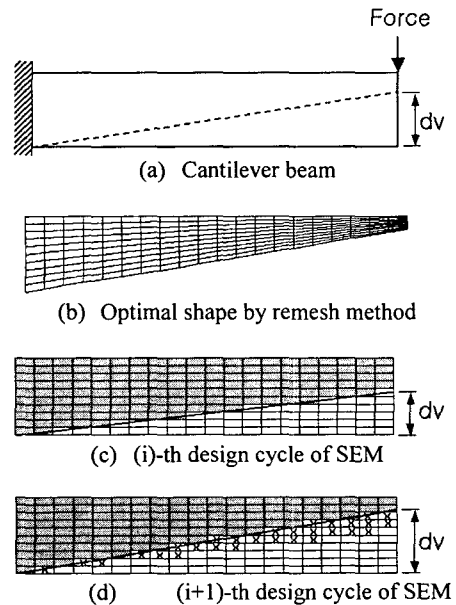


Fig. 1 Shape Optimization by remesh method and SEM

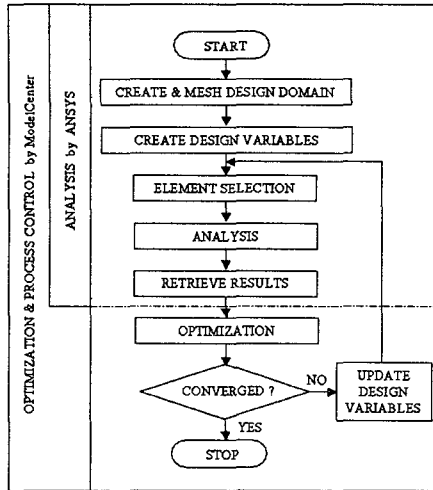


Fig. 2 Flow chart of SEM

치수 등 모든 설계정보를 매개변수로 처리할 수 있으므로 요소선택에 필요한 알고리즘을 다른 프로그램보다 잘 표현할 수 있었고, ModelCenter 를 이용하여 해석과 최적화를 포함하는 전반적인 과정을 조절할 수 있었다.

이 방법은 기존의 형상최적설계와는 달리 절점의 이동이 필요 없으므로 최적화가 종료될 때까지 요소의 품질이 유지되며, 요소의 재생성이 필요 없게 된다. 아울러, 최적화 과정동안 요소의 선택 여부에 따라 형상의 설계가 가능하게 되므로, 구조 내부에 구멍이 있거나, 형상이 복잡한 문제에도 적용이 용이하다. 또한 매개변수를 사용하여 모델링을 하는 최근의 CAD 프로그램과 연동하면 복잡한 실제모델을 단순화시키는 과정이 없이 최적화설계가 가능해진다. 그러나, 이 방법의 단점으로는 매개변수로 표현된 모델은 연속적이지만, 해석이나 최적화에는 모두 지그재그형의 형상 경계를 가지게 되므로 제한조건으로 응력을 사용할 경우 응력집중현상의 영향을 받게 된다는 점과 3 차원 모델에서 요소 선택을 위해 조밀한 요소망을 가진 형상모델이 필요하고, 그에 따른 계산시간의 소모가 큰 점 등을 들 수 있다.

2.1 2 차원 문제에서의 요소의 선택방법

요소의 선택은 설계 영역 내 모든 요소들의 도심위치와 매개변수로 구성된 구조물 형상 경계와의 위치 관계에 의해 결정된다. 예를 들어, Fig.3 과 같은 설계 영역에서  $y=f(x)$  선분의 아래에 위치한 검은색으로 표시된 부분을 구조물 영역으로 선택하려고 한다. 선택의 기준은 Fig.3 과 같이 도심

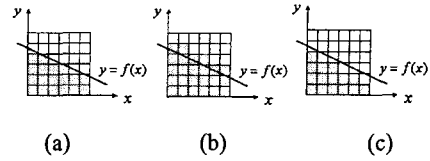


Fig. 3 Selection of elements in 2-D model

이 선분의 아래에 위치하는 요소를 선택하거나 (Fig.3 (a)), 절점이 하나라도 선택된 모든 요소를 선택하거나(Fig.3 (b)), 4 개의 절점이 모두 선택된 요소만 선택하는(Fig.3 (c)) 세 가지 방법이 있다. 이 가운데 가장 실제와 가까운 방법은 (a)이며, 위치와 목적에 따라 (b)또는 (c)를 사용할 수도 있다.

대부분의 2 차원 구조 형상은 직선과 원호가 연속적으로 연결된 형태이므로 형상 변경이 가능한 부위의 연결점 좌표를 설계변수로 지정해 두면, 최적화 과정을 통해 요소의 자동적인 가감으로 형상 최적화가 가능하게 된다. 하지만 직선이나 원호로 표현되지 않는 형상 경계를 가진 경우에는 적용하기 곤란해진다. 이러한 경우에는 2 차원 문제라도 다음에 소개하는 3 차원 문제에 적용하는 방법을 사용하면 된다.

2.2 3 차원 문제에서의 요소의 선택방법

3 차원 문제는 구조 형상이 복잡한 것이 많으므로 2 차원에서 사용하는 방법으로는 현실적으로 어려움이 있고, 다음과 같이 형상모델과 해석모델의 개념을 사용하여 요소의 선택방법을 단순화 하였다. 여기서, 형상모델이란 형상치수와 물성치 정보를 가진 조밀하게 분할된 삼각형(2 차원) 또는 사면체(3 차원) 형상의 요소로 구성된 모델이며, 요소를 용이하게 선택해서 해석모델의 형상을 구성 하기 위한 목적으로만 사용된다. 또한 설계변수가 갱신될 때마다 요소망의 재분할이 필요하다. 해석모델은 설계영역 전체를 사각형(2 차원) 또는 육면체(3 차원)의 이상적인 형상의 요소망으로 분할한 것이며, 해석과 최적화에 실제로 사용되는 모델이다. 요소망의 분할은 처음에 한번만 하게 된다. 그 밖의 특징으로는, i)설계변수가 갱신되면, 형상모델과 해석모델이 순차적으로 변경된다. ii)형상모델은 최적화과정동안 요소의 재분할이 필요하지만, 해석모델은 최초의 요소형태를 유지한 채 설계변수의 변화에 따라 요소의 가감이 발생한다. iii)모델 내부에 구멍이 있거나, 두께의 변경선이 있어도 사용할 수 있다. iv)셀 요소의 두께와 형상 최적화를 동시에 고려할 수 있다.

한 예로써, Fig.4 는 x-y 평면상에 있는 십자형의

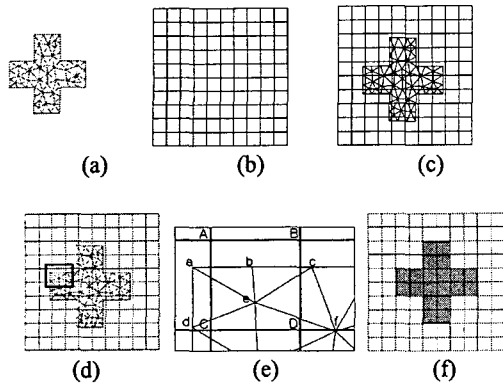


Fig. 4 Selection of elements in 3-D model

2 차원모델을 기준으로 해석모델을 구성하는 방법을 순서대로 표현한 것이다.

(1) 형상모델의 생성(Fig. 4(a)): 매개변수를 사용하여 초기형상을 만들고, 2 차원일 때는 삼각형으로, 3 차원일 때는 사면체로 요소망 분할을 한다. 생성할 요소의 한 변의 길이는 해석모델 요소의 한 변의 길이를 1.5로 나눈 길이로 한다.

(2) 해석모델의 생성(Fig. 4(b)): 형상변경이 가능한 설계영역을 정하여 2 차원일 때는 사각형으로, 3 차원일 때는 육면체로 요소망 분할을 한다. 그러면, (c)처럼 동일한 위치에서 요소가 겹쳐져 생성된다.

(3) 해석모델의 구성(Fig. 4 (d), (e)): (d)에 표시된 사각형 내부를 확대한 (e)로 설명하자면, 형상모델의 절점을 기준으로 가장 가까운 거리에 있는 해석 모델의 절점을 탐색하여 선택해 둔다. 그 다음, 선택된 해석모델의 절점만으로 구성될 수 있는 요소들을 다시 선택한다. 즉, (e)에서 형상모델의 절점 a,b 에 의해 해석모델의 절점 A 가 최근접 절점으로 선택되고, c 는 B 를, d,e 는 C 를, f 는 D 를 선택하게 되어, 결국 해석모델의 절점 A,B,C,D 로 이루어지는 요소 하나가 선택된다.

(4) 앞 단계 (3)의 과정을 모든 형상모델의 절점에 대해 수행하여 (f)와 같이 해석모델을 최종적으로 완성한다.

이 과정에서 해석모델이 전체적으로 약간 위치이동을 하게 된다. 해석과 최적화에서 (f)의 검은색 요소만 사용되며, 최적화의 반복과정에서 (1), (3), (4)의 과정이 연속적으로 반복해서 일어난다. 단, (2)의 과정은 최초의 1 회만 실행된다. 그리고, 3 차원인 경우는 동일한 방법으로 z 축 방향으로 확장하여 적용한다.

### 2.3 타 기법과의 차이점 및 개선 방향

선택적 요소방법은 물성치를 가공하지 않고 이상적인 형상의 요소만을 적절히 선택하여 최적형상을 구성하므로, 위상최적화에서 나타날 수 있는 체커보드 현상(checker board pattern)이 나타나지 않는다. 또, 위상최적화나 진화최적화에서는 최적해로부터 설계에 필요한 형상을 추출하는 과정이 수작업을 필요로 하는 번거로운 작업인데 반해, 선택적 요소방법에서는 최적해인 설계변수값이 직접 형상 설계의 치수로 사용될 수 있는 것이 장점이다. 균일한 크기의 요소로부터 원하는 형상의 구조를 구성한다는 점에서 복셀기법의 해석과 유사하지만, 요소의 선택적 가감이 특징인 본 기법과의 차이가 있다.<sup>(13,14)</sup> 선택적 요소방법은 매개변수를 기반으로 하는 요즘의 고성능 CAD 시스템과 연동시킬 경우 더욱 효율적인 자동최적화가 가능하다.

## 3. 예제의 적용

선택적 요소방법의 성능과 타당성을 검토하기 위하여 세 가지의 예제에 적용해 보았다. 첫 번째 예제는 2 차원의 회전판 문제이고, 두 번째 예제는 3 차원의 커넥팅 로드와 부피 최소화 문제이며, 세 번째 문제는 합체박판기술을 적용한 자동차 도어의 설계에서 중량을 최소화하는 용접선의 위치를 결정하는 문제이다.<sup>(21)</sup> 이상적인 형상의 요소망을 생성하는 것으로 시작하는 앞의 두 예제와는 달리 세 번째의 예제와 같이 검증된 유한요소를 이미 가지고 있는 경우에는 별도의 요소분할과정이 필요없이 바로 해석모델로 사용할 수 있어 용접선의 최적위치나 형상을 설계하거나, 중량 경감구멍을 설계하는데 용이하게 적용할 수 있었다.

### 3.1 회전판

Fig. 5 의 y 축을 회전축으로 12Hz 의 속도로 회전하는 원판이 변위와 고유진동수의 제한조건을 가질 때, 중량이 최소가 되는 형상 설계변수  $y_1, y_2, y_3$  를 구하는 2 차원 축대칭 형상최적설계 문제이다. 내부 재질은 강이며, 상부와 하부 표면을 덮고 있는 알루미늄의 두께는 2mm 를 유지하도록 한다. 강의 영률은 210GPa, 밀도는 7850Kg/m<sup>3</sup>, 포아송비는 0.3 이고, 알루미늄의 영률과 밀도, 포아송비는 각각 73GPa, 2800Kg/m<sup>3</sup>, 0.35 이다. 해석에는 ANSYS 의 2 차원 4 절점 축대칭 요소를 사용하였다. 회전축이 되는  $x=0$  위치의 모든 절점에서 x 와 y 방향의 변위를 구속하고, 회전으로 인한 원심

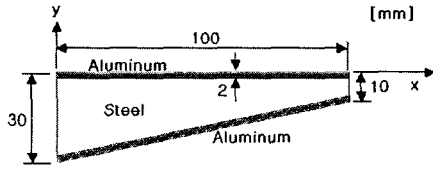


Fig. 5 Disk model

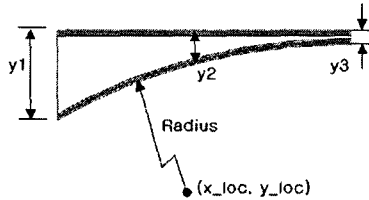


Fig. 6 Definition of design variables

력만 하중으로 고려한다. Fig. 6의 설계변수  $y_1, y_2, y_3$ 의 세 값이 주어지고, 회전판의 하부형상을 하나의 원호로 정의할 경우,  $y_1, y_2, y_3$ 의 세 점을 지나는 원호는 유일하다. 그 원호 중심점의  $x, y$  좌표인  $x_{loc}, y_{loc}$ 와 원호의 반경  $Radius$ 는  $y_1, y_2, y_3$ 를 이용한 기하관계식으로 정할 수 있다. 동일한 형상의 문제라 하더라도 요소망의 밀도가 다른 고유치와 변위가 달라지므로 초기 설계 응답치에 대한 비율을 제한조건으로 하여 초기 설계값의 모델에서 발생한 최대변위( $U_{ini}$ )의 120% 이하, 초기 설계 고유 진동수( $Freq_{ini}$ )의 90% 이상이 되도록 하면 다음 식 (1)과 같이 정식화를 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } y_1, y_2, y_3 \\
 & \text{to minimize Total Weight} \quad (1) \\
 & \text{subject to } \frac{U}{U_{ini}} \leq 1.2 \\
 & \quad \quad \quad \frac{Freq.}{Freq_{ini}} \geq 0.9
 \end{aligned}$$

여기서,  $y_1, y_2, y_3$ 는  $x$ 좌표가 각각 0, 50, 100인 위치에서의 회전판의 두께이며,  $U$ 와  $Freq.$ 는 해석모델에서 발생한 최대변위와 1차 고유진동수를 말한다.  $U_{ini}, Freq_{ini}$ 는 각각 초기설계에서 구한 최대변위와 고유진동수의 값이다.

Fig. 7은 선택적 요소방법(SEM)과 요소 재분할법(REM)의 두 가지 방법으로 요소망의 크기를 달리 하였을 때의 목적함수의 값을 비교한 것이다. 요소망의 밀도에 따른 최적해의 경향을 관찰하기 위해 전체영역을 가로 100개, 세로 50개의 요소로 분할한 경우(요소망의 크기는 0.001)와 가로 200개, 세로 100개의 요소로 분할한 경우(요소망의 크기

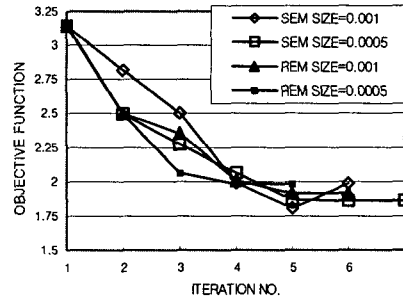


Fig. 7 History of objective function

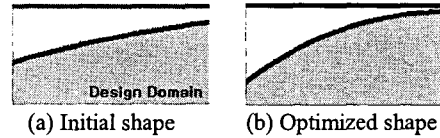


Fig. 8 Initial and optimized shape by SEM (mesh size=0.0005)

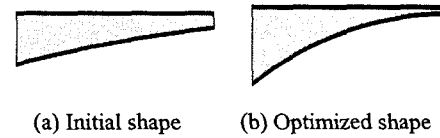


Fig. 9 Initial and optimized shape by remesh (mesh size=0.0005)

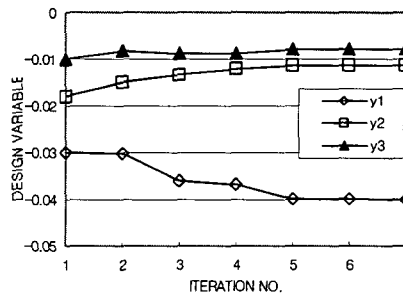


Fig. 10 History of design variables

는 0.0005)의 두 경우에 대한 최적해를 구하였다. 선택적 요소방법은 요소망의 크기가 작을 때 더 좋은 목적함수값을 보였으며, 요소 재분할법과의 비교에서도 더 우수한 결과를 나타냈다. 선택적 요소방법에 의한 형상의 변화는 Fig. 8(a)의 초기 형상이 Fig. 8(b)와 같이 변화하였다. 요소 재분할법에 의한 결과인 Fig. 9의 (a), (b)와 비교해보면, 거의 동일한 형상을 갖게 됨을 알 수 있다. Fig.10은 요소망의 크기가 0.0005이고 선택적 요소방법으로 최적화를 했을 때의 설계변수값의 추이를 나타낸 것이다. 설계변수  $y_1$ 은 다섯번째부터 설계변수의 상한치에 도달하였고,  $y_2$ 와  $y_3$ 는 점진적으로

수렴값에 접근하고 있다. 선택적 요소 방법은 최적화 반복 회수는 1~2 회 더 많았지만, 목적함수 값에서 보면 40.7%의 중량감소로 요소 재분할법의 37%보다 우수한 결과를 나타내었다.

3.2 커넥팅 로드

Fig. 11 의 커넥팅 로드문제는 소단부의 중앙을 고정하고, 대단부의 중심에 40,000[N]의 하중이 가해진 조건에서 초기 설계에서 발생한 최대변위의 120%까지를 제한조건으로 허용하는 부피 최소화 문제이다. 대칭조건을 사용하여 1/4 모델로 문제의 크기를 줄였으며, 영률 210GPa, 포아송비 0.3 의 재질로 가정하였다. 해석에는 ANSYS 의 3 차원 8 절점 솔리드 구조 요소를 사용하였다. 설계변수로는 대단부의 반경 CR, 소단부의 반경 WR, 대단부에서의 연결부 의 두께 CT, 소단부에서의 연결부 의 두께 WT 의 4 개의 치수를 선정하였다. 이 문제의 정식화는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

Find CR,WR,CT,WT  
to minimize Total Volume (2)

subject to  $\frac{U}{U_m} \leq 1.2$

여기서, CR, WR, CT, WT 는 Fig.11 에 나타낸 설계변수이고, U 는 현재 모델 내에서의 최대변위, U<sub>m</sub> 는 초기설계에서 구한 모델내의 최대변위값이다.

대단부의 중심에 하중을 가하기 위해 강체요소를 사용하여 대단부 내측의 절점과 중심점을 연결하였다. 대단부의 내경은 설계변수의 영향을 받지 않으므로 강체요소의 변경은 발생하지 않는다. 경계조건이 가해진 소단부의 내경부도 동일한 방법으로 강체요소를 만들어 경계조건을 주었다. 요소의 선택을 위해 필요한 형상모델은 요소가 약 25 만개 정도였고, 실제 해석과 최적화에 사용된 해석 모델은 6400 개정도의 요소가 사용되었다. Fig.12 는 초기형상과 최적형상을 비교한 것이다.

최적화과정을 통해 설계변수는 Fig.13 과 같이 초기설계에 비해 CR 이 2%, CT 가 0.5%, WR 이

9% , WT 가 20% 작아진 값으로 결정되었다. 대단부의 반경 CR 이 목적함수에 가장 큰 영향을 주는 인자이지만, 변화량이 크지 않았던 이유는 링형상의 대단부가 연결부에 비해 상대적으로 변형에 취약하기 때문이다. 반대로 소단부에 연결되는 두께인 WT 의 값이 향상될 여지가 많았다. 결국 목적함수는 초기값에 비해 10.2% 감소한 값이 나왔다.(Fig. 14)

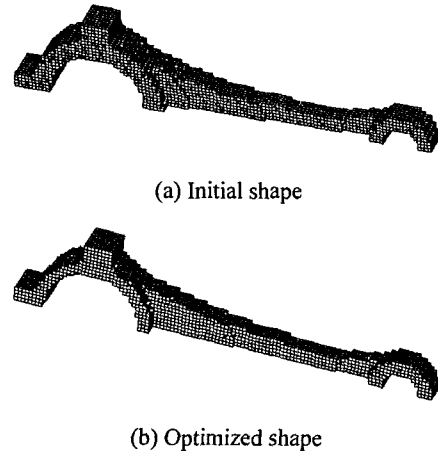


Fig. 12 Initial and optimized shape

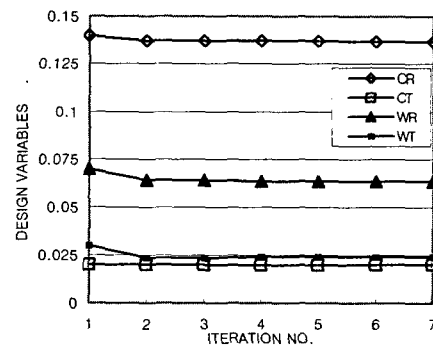


Fig. 13 History of design variables

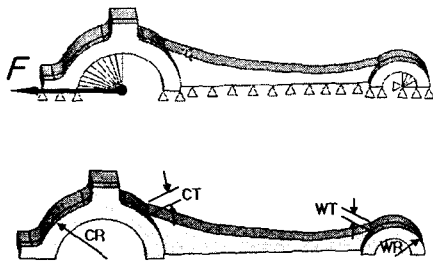


Fig. 11 Boundary condition & design variables

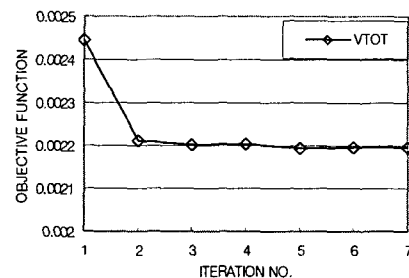


Fig. 14 History of objective function

3.3 합체박판 도어

초경량차체 개념의 자동차 설계 기술의 하나인 합체박판(tailor welded blank) 기술을 적용한 도어의 설계에서 용접선의 최적위치를 결정하는 문제이다.<sup>(21)</sup> 합체박판 기술이란, 판재에 보강재를 용접하는 대신 부위에 따라 두께가 다른 판재를 미리 용접한 후 한번의 스탬핑 공정으로 원하는 부품을 만드는 기술이다. 용접선의 위치는 판재의 두께값이 변화한다는 점에서 치수 최적설계로 볼 수 있으나, 두께의 경계선을 조절할 수 있다는 점에서는 형상 최적설계로도 볼 수 있다. 도어 구조는 세 군데의 다른 위치에서 다른 크기의 하중을 받고 있고, 도어의 내측판(Fig. 15(b))의 두께를 초기의 0.7mm 균일한 두께에서 0.7mm 와 0.5mm 의 두장의 강판을 용접해서 경량화를 이루고자 할 때, 최적이 되는 용접선의 위치(DIST)를 설계변수로 설정하였다.(Fig. 16) 제한조건은 초기의 설계에서 발생한 변위값의 115%범위 내로 한정하였으며, Fig. 17 과 같은 세 가지의 하중조건이 모두 만족하

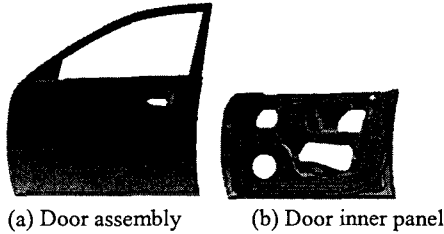


Fig. 15 Shape of door

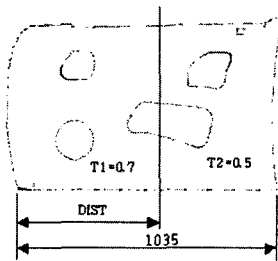


Fig. 16 Thickness distribution & design variable

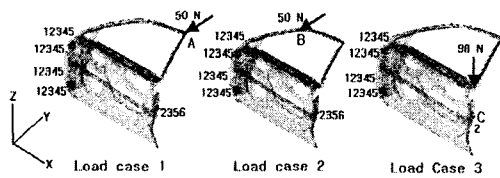


Fig. 17 Boundary conditions

도록 하였다. 이 문제를 풀기 위한 최적화문제의 정식화는 식 (3)과 같다. (단, 길이는 mm 단위)

$$\begin{aligned} & \text{Find } DIST \\ & \text{to minimize Weight} \\ & \text{subject to} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\frac{\delta_j^{WELD}}{\delta_j^{ORG}} - 1.15 \leq 0 \quad j = \text{load case } 1,2,3$$

$$0 \leq DIST \leq 1035$$

여기서, DIST 는 원점으로부터 용접선까지의 거리, Weight 는 내측판의 중량,  $\delta_j^{ORG}$  는 j 번째 하중이 가해진 위치에서 용접선을 가지지 않은 기존 도어 모델의 변위,  $\delta_j^{WELD}$  는  $\delta_j^{ORG}$  와 같은 위치에서 용접선을 가진 도어 모델의 변위를 말한다.

해석에는 ANSYS 의 3 차원 4 절점 쉘요소와 8 절점 솔리드 구조요소, 3 차원 2 절점 보요소를 사용하였다. Fig.18 은 용접선의 위치를 300, 500, 700, 1035 로 변경했을 때, 하중조건별로 지정한 위치에서의 변위값의 추이를 그려본 것이다. 도어의 구조는 도어 왼쪽의 차체와의 힌지 연결부를 고정단으로 하는 외팔보의 구조이다. Fig.16 과 같이 설계변수 DIST 가 커질수록 두꺼운 판재의 비율이 증가하므로 도어의 강성은 증가하고 변위는 감소하게 된다. 해석영역에 포함된 구멍으로 인한 강성의 손실로 국부적인 변위의 증가가 예상되나 전반적으로는 거의 선형으로 변화하는 모습이였다.

이 문제는 사전에 검증된 요소망이 존재하는 경우이므로 앞의 두 예제와는 달리 요소망을 생성하는 과정은 필요하지않다. Fig.16 의 도어왼쪽으로부터 용접선까지의 거리 DIST 에 걸친 영역에 속한 요소들을 선택하여 0.7mm 두께로 정의하고 나머지는 0.5mm 로 하여 해석과 최적화 과정을 수행하였다. Fig.19 는 설계변수 DIST 의 초기값을 1035 로 하여 최적화에서 나온 최적값 696.8 의 위치에 용접선(두께 변경선)을 넣은 모습이다. 즉, 이 위치를 기준으로 왼쪽은 두께가 0.7mm, 오른쪽은 두께가 0.5mm 인 두 종류의 강판을 용접한 합체박판을 사용할 때 주어진 제한조건에서 중량이 최소가 된다. Fig.20 은 일곱차체의 반복계산으로 중량이 9.7%감소되는 추세선이다. Fig.21 은 설계변수의 변동 그래프이다.

이 예제와 같이 중량 경감이나 기능상의 목적으로 구멍이 있는 구조에서 용접선의 위치를 최적화할 때는 신 등의 연구에 따르면,<sup>(21)</sup> 구멍 근처에서는 요소의 변형으로 인해 한번에 요소 크기의 절반이상으로 용접선을 이동하지 못하여 연속적인

최적화가 어려웠다. 하지만 선택적 요소방법으로는 구멍이나, 두께의 분포에 관계없이 용이하게 최적화를 달성할 수 있었다. 다양한 종류의 요소와 다양한 두께의 판 요소가 사용된 복잡한 3 차원 문제이지만 기존의 요소망과 모델형상을 그대로

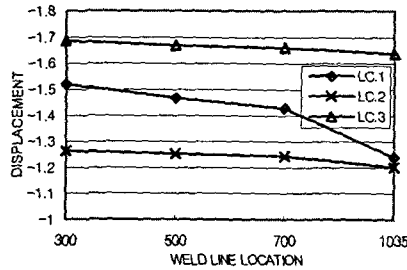


Fig. 18 Weld line location - Displacement relationship

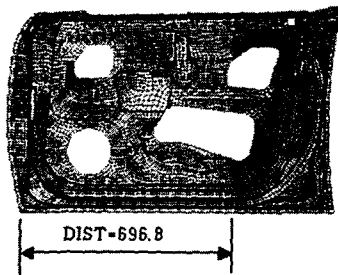


Fig. 19 Optimal weld line location

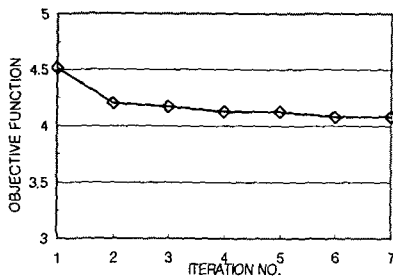


Fig. 20 History of objective function

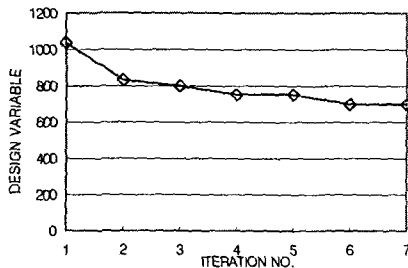


Fig. 21 History of design variable

사용하므로, 형상 모델을 만들 필요가 없이 요소의 선택방법만을 응용하여 최적화 설계에 적용할 수 있었다. 또한, 이미 검증된 요소를 사용할 수 있고, 보 요소나, 질량요소도 포함시킬 수 있다는 점 등을 고려하면, 적용가능한 영역은 매우 넓다. 하지만, 기존의 요소망을 사용하는 경우에는 이 예제와 같이 요소의 두께를 변경하거나, 삭제할 수는 있지만, 요소를 추가할 수는 없다는 단점이 있다.

#### 4. 결론

기존의 형상 최적화의 단점인 요소망의 찌그러짐을 피할 수 있는 새로운 형상 최적화 기법을 제안하였다. 이 방법은 충분히 큰 설계영역을 이상적인 요소망으로 채운 다음, 구조물의 형상에 해당되는 요소를 선택하여 그 요소로만 해석과 최적화를 수행한다. 요소의 선택방법은 모델의 복잡성에 따라 2 차원과 3 차원에서 별도의 방법을 제시하였다.

제안한 방법을 2 차원 회전판 문제와 3 차원 커넥팅 로드 문제에 적용하여 의미있는 최적화 결과를 도출하였고, 합체박판기술을 적용한 도어 문제에 적용하여, 최소중량을 가지기 위한 용접선 위치를 결정하는 특수한 경우에도 적용이 가능함을 보였다. 본 연구에서는 변위와 고유진동수 제한조건에 관한 형상최적화를 적용했으며, 응력제한조건에 대해서는 계단형의 형상 경계에서 유발되는 응력 특이성의 문제 때문에 안정적인 최적해를 구하기 어려운데 추후 연구가 필요하다. 또한, 요소의 선택에 필요한 별도의 형상모델을 생성하는데 소요되는 추가적인 비용은 이 방법의 단점으로 보인다.

CAD 와 CAE 프로그램의 통합이 확산되어 가고 있으므로 모델링과 해석단계에서 매개변수를 공유할 수 있게 되면, 이 방법의 적용은 더 쉬워지고, 효율성은 더욱 커질 것으로 생각된다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단지정 최적설계신기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

(1) Haftka, R.T. and Grandhi, R.V., 1986, "Structural Shape Optimization-A Survey," *Computer Methods In*



- Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 57, pp. 91~106.
- (2) Haftka, R.T. and Gurdal, Z., 1993, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- (3) Park, C.H., Kim, M.S. and Lee, K.Y., 1993, "Shape Optimization of an Engine Connecting Rod Using the Two-Level Optimization Method," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 17, No. 4, pp. 776~785.
- (4) Hsu, Y.L., 1994, "A Review of Structural Shape Optimization," *Computers in Industry*, Vol. 26, pp. 3~13.
- (5) Kang, B.S., Choi, W.S. and Park, G.J., 2001, "Structural Optimization under Equivalent Static Loads transformed from Dynamic Loads based on Displacement," *Computers and Structures*, Vol. 20, No. 12, pp. 3767~3781.
- (6) Lee, T.H., Koo, J.K., Han, S.Y. and Lim, J.K., 2000, "Optimization of the Path of Inner Reinforcement for an Automobile Hood Using Design Sensitivity Analysis," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 24, No. 1, pp. 62~68.
- (7) *GENESIS User's Manual*: version 6.0, 1998, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO
- (8) Holzleitner, L. and Mahmoud, K.G., 1999, "Structural Shape Optimization Using MSC/NASTRAN and Sequential Quadratic Programming," *Computers and Structures*, Vol. 70, pp. 487~514.
- (9) Candan, S., Garcelon, J., Balabanov, V. and Venter, G., 2000, "Shape Optimization Using ABAQUS and VisualDOC," *8<sup>th</sup> AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Long Beach, CA.
- (10) Zhang, S. and Belegundu, A.D., 1993, "Mesh Distortion Control in Shape Optimization," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 7, pp.1360~1362.
- (11) Bendsoe, M.P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (12) Xie, Y.M. and Steven, G.P., 1993, "A simple evolutionary procedure for structural optimisation," *Computers and Structures*, Vol. 49, pp. 885~896.
- (13) Yang, X.Y. and Xie, Y.M., 1999, "Bidirectional Evolutionary Method for Stiffness Optimization," *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 11, pp. 1483~1488.
- (14) Querin, O.M., Young, V., Steven, G.P. and Xie, Y.M., 2000, "Computational efficiency and validation of bidirectional evolutionary structural optimisation," *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, Vol. 189, pp. 559~573.
- (15) Baron, P., Fisher, R., Tuson, A., Mill F. and Sherlock, A., 1999, "A voxel-based representation for evolutionary shape optimization," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 13, pp. 145~156.
- (16) Hardee, E., Chang, K.H., Tu, J., Choi, K.K. and Grindeanu, I., 1999, "A CAD-based Design Parameterization for Shape Optimization of Elastic Solids," *Advances in Engineering Software*, Vol. 30, pp.185~199.
- (17) Tang, P.S. and Chang, K.H., 2001, "Integration of Topology and Shape Optimization for Design of Structural Components," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 22, pp.65~82.
- (18) Shim, J.W., Shin, J.K. and Park, G.J., 2002, "Development of 2D Structural Shape Optimization Scheme Using Selective Element Method," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 15, No. 4, pp. 599~607.
- (19) *ANSYS User's Guide*: version 7.0, 2002, ANSYS Inc., Southpointe 275, Technology Drive, Canonsburg, PA.
- (20) *ModelCenter User's Guide*: version 3.1, 2001, Phoenix Integration, Inc., 1750 Kraft Drive, Suite 2200, Blacksburg, VA.
- (21) Shin, J.K., Lee, K.H., Song, S.I. and Park, G.J., 2002, "Automotive Door Design with the ULSAB Concept using Structural Optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 23, No. 4, pp. 320~327.