

선택적 요소 방법을 이용한 2차원 구조물의 형상 최적설계 기법 개발

Development of 2D Structural Shape Optimization Scheme Using Selective Element Method

심진욱*

Shim, Jin-Wook

신정규**

Shin, Jung-Kyu

박경진†

Park, Gyung-Jin

(논문접수일 : 2002년 2월 15일 ; 심사종료일 : 2002년 11월 18일)

요 지

형상 최적설계 중에 발생하는 절점의 과도한 이동은 요소망을 왜곡하고, 결국 최적해의 저하를 유발한다. 이러한 문제를 개선한 형상 최적설계 기법을 개발하였다. 이 방법은 구조물의 형상이 변해 갈 수 있는 충분한 공간의 설계 영역을 정하여, 균일하고 세밀한 요소망을 미리 생성한다. 각각의 최적화 단계마다 모든 요소들과 구조물의 위치 관계를 검사하여, 내부의 요소에는 실제의 물성치를 부여하고, 외부에 존재하는 요소는 0에 가까운 물성치를 부여한다. 변위와 고유 진동수의 제한조건을 가진 두 개의 예제를 통해 이 방법의 특징을 살펴 보았다.

핵심용어 : 구조 최적설계, 형상 최적설계, 위상 최적설계, 선택적 요소 방법, 설계 영역

Abstract

During the shape optimization, relocations of nodes happen successively. However, excessive movement of nodes often results in the mesh distortion and eventually deteriorates the accuracy of the optimum solution. To overcome this problem, an efficient method for the shape optimization has been developed. The method starts from the design domain which is large enough to hold the possible shape of the structure. The design domain has pre-defined uniform fine meshes. In each cycle, the method allots real properties to the elements inside the structure and nearly zero to ones outside. The performance of the method is evaluated through two examples with displacement and frequency constraints.

Keywords : structural optimization, shape optimization, topology optimization, selective element method, design domain

1. 서 론

구조 최적설계는 치수 최적설계, 형상 최적설계, 위상

최적설계의 세 가지로 구분 할 수 있는데, 그 중에서 형상 최적설계는 구조물의 경계를 이루는 절점의 위치를 변화시키면서 제한조건을 만족하는 최적의 구조 형

† 책임저자, 정회원 · 한양대학교 기계, 경영정보공학부 교수

전화: 031-400-5246; Fax: 031-407-0755

E-mail: gjpark@hanyang.ac.kr

* 정회원 · 한양대학교 기계설계학과 박사과정

** 한양대학교 기계설계학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2003년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2003년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

상을 찾는 방법이다.¹⁾ 형상 최적설계를 이용하여 기존의 설계를 개선하고자 하는 노력은 많은 문헌^{2)~7)}을 통해서 찾아볼 수 있다. 그러나 최적형상을 구현하기 위해 절점이 과도하게 이동하면서 발생하는 요소 형상의 왜곡현상(mesh distortion)은 해석의 정도를 저하시키게 된다.^{8),9)} 따라서, 형상 최적설계를 수행할 때에는 이러한 요소 변형을 어느 정도 고려하여 설계 변수를 선정 해야 한다. 현재 상용화된 최적설계 프로그램에서는 이러한 왜곡현상을 자동으로 완화하기 위한 방안을 개발하여 사용하고 있다. 예를 들어, 요소의 형상 검사 기준을 완화하거나 보간법을 이용한 도메인 방법¹⁰⁾을 사용하고 있고, 요소 재분할법(remesh)을 통해 요소의 찌그러짐을 방지하고 있다.¹¹⁾ 본 연구에서는 최적화 과정 동안에 요소 변형이 전혀 발생하지 않는 선택적 요소 방법>Selective Element Method, SEM)을 이용한 형상 최적설계 기법을 제안한다. 이 방법은 구조물을 충분히 포함하는 설계 영역(design domain)에 구조물의 외곽선을 배치하여, 구조물의 내부에 존재하는 요소에는 구조물의 실제 물성치를 부여하고, 외부에 위치한 요소에는 0에 가까운 물성치를 부여한다. 설계자는 외곽선에 적절한 형상 설계 변수를 설정하여, 종래의 형상 최적설계를 수행하고, 설계변수의 변화에 의해 변경된 외곽선을 기준으로 요소의 내/외부를 다시 검토하여 변화된 새로운 형상을 구성한다. 즉, 기존의 형상 최적설계와 같이 절점을 이동시키지 않고 변화된 구조물의 외곽선을 기준으로 내/외부의 요소를 선택적으로 구분하여 구조물을 구성한다. 선택적 요소 방법은 이러한 일련의 반복 과정을 통해 최적화를 수행한다. 기존의 형상 최적설계는 구조물의 절점 위치를 변화시키면서 최적해를 얻지만, 선택적 요소 방법은 최적화로 얻어진 외곽선을 기준으로 미리 분할된 요소의 물성치를 변화시켜 최적해를 구한다. 따라서, 설계 변수의 큰 변화에도 요소의 찌그러짐은 전혀 발생하지 않고, 최상의 요소 형상을 유지하게 된다. 본 논문에서는 선택적 요소 방법을 이용한 형상 최적설계 기법을 설명하고, 변위 및 진동수 제한조건을 가진 2차원 최적화 문제에 적용해 보았다.

2. 기존의 형상 최적설계의 문제점

형상 최적설계 문제의 일반적인 해결과정은 다음과 같다.^{12)~14)} (1) 구조물의 경계를 몇 개의 패치로 구분

하고, 각각의 패치를 스플라인으로 표시한다. 형상최적화가 필요한 패치는 형상을 정의하는 조절점의 좌표를 설계 변수로 잡는다. (2) 스플라인으로 표시된 구조물의 경계정보를 이용해 자동 요소분할을 하고 해석을 한다. (3) 설계 변수인 조절점의 좌표에 대한 민감도해석을 한다. (4) 계산된 민감도로 최적화문제를 풀고 조절점의 새로운 위치를 구하여 형상을 갱신한다. (1)-(4)의 과정을 최적해가 구해질 때까지 반복한다. 이러한 기존의 형상 최적설계에서는 최적화 과정에서 구조물의 절점 위치가 변함에 따라 요소가 찌그러지게 되고, 상태 변수값이 부정확해지는 원인이 된다. 경우에 따라서는 최적화가 수렴되지 못하고, 종료되기도 한다. 기존의 형상 최적설계는 경계를 구성하는 절점들의 이동으로 인해 요소의 변형이 발생하므로 주의를 요하고 있다.

형상 최적설계에서 나타나는 요소 변형의 일례를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에서 최적화된 결과의 요소 형상은 형상비가 커지면서, 왜곡이 많아지는 경향을 알 수 있고, Fig. 1(b)에서는 절점 위치의 전도가 발생하여 해석을 계속할 수 없게 되어 최적화 수행이 중단된다. 이러한 바람직하지 못한 요소들의 변형은 절점들이 형상 최적설계 과정을 거치면서 과도하게 이동했기 때문이다. 과도한 설계 변수의 변화에 의한

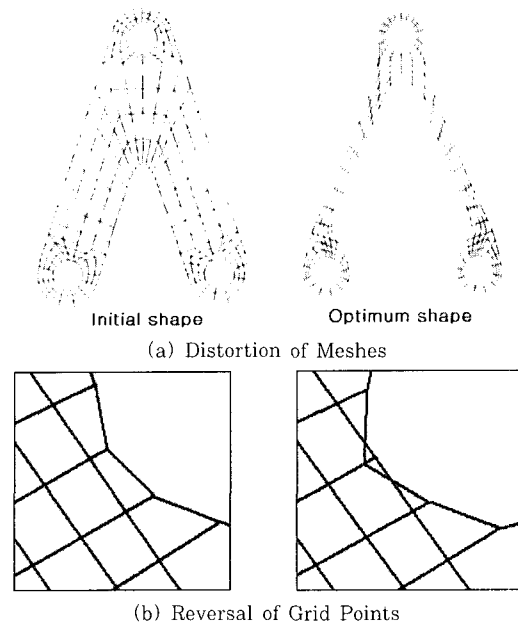


Fig. 1 Undesirable Results of a Current Shape Optimization

요소의 변형을 해결하기 위한 요소의 자동 분할 기능이 최적화 과정에 포함되어야 하는데, 2차원 요소와 쉘 요소는 비교적 완전한 자동분할 프로그램이 있지만, 3차원 구조물에 대해서는 아직 완전하지 않다.¹⁵⁾

3. 위상 최적설계

1988년 Bensoe와 Kikuchi의 논문은 균질화법(homogenization method)을 구조 최적설계에 연결하여 위상 최적설계 발전의 계기를 마련하였다.¹⁶⁾ 미리 설정된 설계 영역에 경계조건과 하중조건을 지정하고, 제한된 재료를 이용하여 주어진 하중조건에 대한 변형에너지를 최소화하는 최적의 위상을 제시하므로, 개념 설계 단계에서 매우 효과적이다.^{7),17)} 위상 최적설계의 특징은 초기에 미리 설계 영역을 설정하여 요소를 나누는 점과 각 요소의 물성치 변화를 허용한다는 점이다. 선택적 요소 방법은 이 두 가지 특징을 기존의 형상 최적설계에 접목한 방법이다.

4. 선택적 요소 방법을 이용한 형상 최적설계 기법

기존의 형상 최적설계의 문제점인 요소 변형을 해결하기 위한 선택적 요소 방법의 개념을 설명하기 위해, Fig. 2의 외팔보 문제를 제시한다.

끝단에 하중을 받는 외팔보의 아랫단이 기존의 형상 최적설계 결과 Fig. 2(a)와 같이 점선으로 변하였다고 가정하자. 요소 재분할에 의한 최적형상은 Fig. 2(b)와 같이 구해지는데 설계변수(dv)의 변화로 요소의 형상이 변형되었음을 알 수 있다. 선택적 요소 방법은 Fig. 2(c)와 같이 설계할 구조물을 포함할 수 있는 설계 영역(검은색과 흰색 부분 전체)에서 형상 최적설계를 수행한다. 설계변수에 의해 결정된 경사진 외곽선으로 구조물 내부와 외부의 요소가 구분이 되며, 내부 요소들(검은색 부분)은 실제 구조물의 물성치를 가지며, 구조물 외부의 요소들(흰색 부분)은 아주 작은 승수(multiplier)를 곱하여 거의 0에 가까운 물성치를 가지게 한다. 내/외부의 판단은 요소의 도심이 구조물의 경계선 내부에 존재하는지의 여부에 따라가 된다. 최적화 과정을 통하여 설계 변수의 값이 결정되면, 구조물의 경계선이 설계 변수 만큼 이동하고, 다시 요소의 도심위치를 기준으로 구조물의 내/외부 판단을 하게 된다.

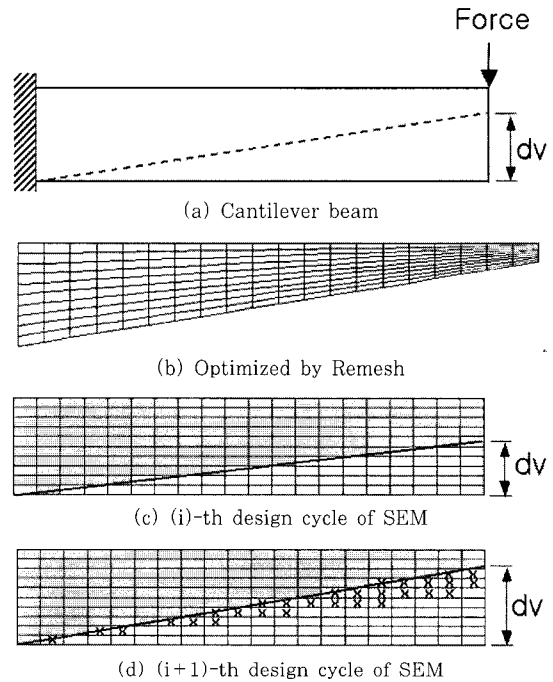


Fig. 2 Shape Optimization by Remesh and SEM

즉, (i)번째 최적화 과정의 결과로 구해진 Fig. 2(c)의 검은색으로 표시된 형상에서 (i+1)번째 계산으로 Fig. 2(d)의 형상으로 바뀌었다면, X로 표시한 요소들은 (i)번째 최적화 결과에서는 내부요소로 판단되어 구조물의 물성치를 가졌었지만, (i+1)번째 계산 결과 외부요소로 판단되어 0에 가까운 물성치로 바뀌게 된다. 이와 반대로 외팔보의 아랫단이 아래로 움직일 경우에, 추가된 요소는 기존의 0에 가까운 물성치 대신 구조물의 실제 물성치를 가지게 된다. 하나의 최적화 과정에서의 결과를 바탕으로 다음 최적화 과정으로 이동하기 위해 수렴여부를 조사하게 되고, 수렴하지 않았다면 개선된 구조물의 모델을 이용하여 다시 해석과 최적화를 수행하는 반복과정을 목적함수가 수렴될 때까지 계속한다.

이와 같이 제안한 방법은 Fig. 3과 같은 순서로 구현할 수 있으며, ANSYS Version 5.7과 Model Center Version 3.01을 사용하였다. ANSYS는 자체 모델러를 가지고 있고, 치수나 형상에 관련된 어떠한 설계 변수도 매개변수로 처리가 가능하며, 내장된 조건문 및 반복문을 활용하면, 최적화 과정에서의 요소의 적절한 선택을 위한 내/외부 판단을 용이하게 처리할 수 있기

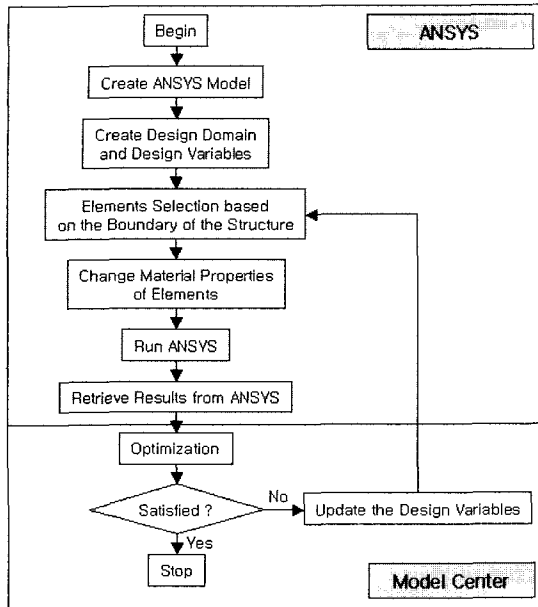


Fig. 3 Flow Chart of Shape Optimization by SEM

때문이다.¹¹⁾ 최적화 문제는 Phoenix Integration사의 Model Center에 포함된 MFD(Modified Feasible Method) 알고리즘을 사용하여 풀었다.¹⁸⁾

선택적 요소 방법을 이용한 형상 최적설계는 기존의 형상 최적설계 방법을 기본으로 다음의 3가지 과정이 추가된다.

- (1) 설계 영역의 생성(Create Design Domain and Design Variables) : 최적화 과정 동안 구조물의 형상이 변해 갈 수 있는 공간을 충분히 포함하는 설계 영역을 설정하고, 정방향의 유한 요소망을 생성하여 모두 0에 가까운 물성치를 가지도록 한다.
- (2) 요소 선택(Elements Selection based on the Boundary of the Structure) : 설계 영역내부에 구조물의 형상을 적절히 배치하고, 내부에 존재하는 요소에는 구조물의 실제 물성치를 부여한다.
- (3) 물성치 변화(Change Material Properties of Elements) : 최적화 과정 중 얻은 결과를 바탕으로, 구조물의 외곽선을 기준으로 요소의 도심을 이용한 위치검사를 실시한다. 이때, 구조물의 내부로 판단된 요소에는 실제 물성치를 부여하며, 외부로 판단되는 요소는 구조물의 물성치에 아주 작은 승수를 곱하여 0에 가까운 물성치를 가지도록 한다.

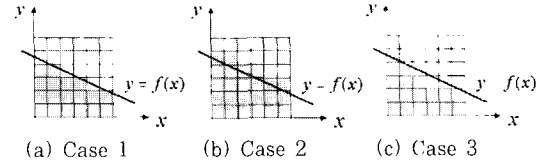


Fig. 4 Selection of Elements

한편, 구조물의 내/외부를 판단하는 방법은 CAD에서 사용하는 교차검사를 이용할 수도 있다.¹⁹⁾ 이런 교차 검사는 2차원에 대해서는 비교적 쉽게 구현할 수 있지만, 3차원의 경우는 구현이 쉽지 않으므로, 본 논문에서는 선택적 요소 방법을 2차원 평면 구조물의 최적화에 적용하여 보았다.

요소의 선택법은 설계 영역 내의 모든 요소들의 도심과 구조물의 외곽선의 위치 관계를 살펴서, 그 결과에 따라 요소들의 물성치를 변화시킨다. 예를 들어, Fig. 4와 같은 설계 영역(검은색과 흰색부분)에서 $y=f(x)$ 선분의 아래에 위치한 검은색으로 표시된 부분이 구조물 내부라고 가정한다. 초기에 모든 요소는 0에 가까운 물성치(흰색)를 가진다. 구조물의 내부에 존재하는 모든 요소에 대해 아래와 같은 방법으로 선택한 후에 실제 구조물의 물성치(검은색)를 부여한다.

```

DO i = 1 to N
  IF  $f(x_i) \geq C_{yi}$  THEN
    Change Material Properties of
    i element to almost zero
  ELSE
    Change Material Properties of
    i element to real values
  ENDF
ENDDO
    
```

여기서, N은 설계 영역을 구성하는 요소의 개수, C_{yi} 는 i 번째 요소의 도심의 y좌표를 나타낸다. 앞으로 다룰 5.1절의 회전판 예제에 대하여 구조물의 내부 요소를 판단할 때에, 요소의 도심을 기준으로 한 경우(Fig. 4(a)), 절점이 하나라도 구조물의 내부인 경우에 해당 요소를 내부로 판단하는 경우(Fig. 4(b)) 그리고, 절점이 모두 내부로 판단된 요소만 내부로 인정하는 경우(Fig. 4(c))에 대해서 요소망의 밀도를 높이면서 해석한 결과, Fig. 5를 얻을 수 있었다. 요소망의 밀도가 현저히 작

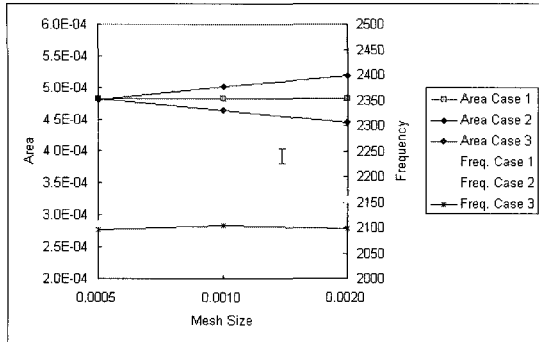


Fig. 5 Comparison of Selection Criteria

아질 경우에는 3가지 경우 모두 동일한 결과를 얻을 수 있으나, 본 연구에서는 도심을 이용하여 내/외부를 판단하였다.

또한, 구조물의 외부에 존재하는 요소들은 실제로 필요 없는 요소들이므로 0의 물성치를 가져야 하지만, 이렇게 하면 강성 행렬이 성립되지 못한다. 따라서, 구조물의 물성치에 비해서 0에 가까운 물성치를 가지도록 조치가 필요하며, 적절한 승수(Multiplier)를 곱하여 강성과 질량을 갖지 못하도록 하였다. 그러나, 승수가 너무 작으면 수치오류가 발생할 우려가 있고, 너무 크면 구조 요소로 작용하게 되어 최적화 결과에 영향을 주게 된다. 적절한 승수를 정하기 위해, 5.1절의 회전판 예제에서 외부에 존재하는 요소에 일정한 승수를 곱하여 고유진동수와 최대변위를 비교한 결과, 승수의 값이 10^{-6} 이하일 때 안정된 해를 보여주고 있음을 Fig. 6으로부터 판단할 수 있다.

새롭게 제안하는 선택적 요소 방법의 가장 큰 특징은 구조물의 경계선 이동으로 절점 위치가 변하지 않으므로 기존의 최적화 과정에서 발생했던 절점의 과도한

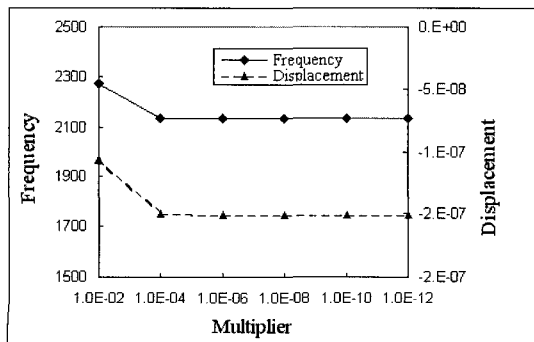


Fig. 6 Effect of Multiplier

이동으로 인한 요소의 찌그러짐이 전혀 발생하지 않는다는 점이다. 또한, 매 최적화 단계 중에 설계 영역 내의 요소를 적절히 선택하는 과정을 거쳐 형상 최적설계를 달성하게 되므로, 구조물 영역내의 요소 경계를 그대로 사용하게 되어 구조물의 외곽선이 계단형이 된다. 그 밖의 특징은 다음과 같다.

- (1) 기존의 형상 최적설계는 구조물 내부의 요소 개수가 정해져 있으나, 선택적 요소 방법에서는 구조물을 이루는 요소가 추가되거나 삭제되므로 요소 개수가 변한다.
- (2) 절점이 움직이는 것이 아니라 요소가 가감되므로 기존의 최적화 결과와 유사한 결과를 얻기 위해서는 가능한 작은 크기로 많은 요소를 만들어 설계 영역을 구성해야 한다.
- (3) 구조물이 변할 수 있는 영역은 미리 정해져 있는 설계 영역 안에서만 이루어지므로, 이를 고려하여 설계 영역을 선정하여야 한다.
- (4) 설계 영역내의 요소는 모두 동일한 형상과 균일한 크기를 가진다.
- (5) 가능한 많은 요소로 나누어야 하므로 해석시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

요소의 선택으로 구조물의 외곽은 Fig. 4와 같이 계단 형태가 되어, 요소망의 형태로 인한 국부적인 응력 집중이 발생하게 된다. 따라서, 응력에 대해서는 향후 과제로 남기며, 여기서는 2차원 강성 문제에 대해서 고찰해 보았다.

5. 적용 예제

회전판과 포탈 프레임의 간단한 두 가지 예제에 대해서, 선택적 요소 방법(SEM)을 이용한 최적화 결과를 얻어보고, 이를 기존의 요소 재분할법(remesh)에 의한 최적화 결과와 비교하여 보았다.

5.1 회전판

Fig. 7은 12Hz의 속도로 회전하는 원판이 변위와 고유진동수의 제한조건을 가질 때, 최소의 무게를 가지는 y_1, y_2, y_3 를 구하는 2차원 축대칭 형상 최적설계 문제이다. 회전판의 내부 재질은 강이며, 상부와 하부

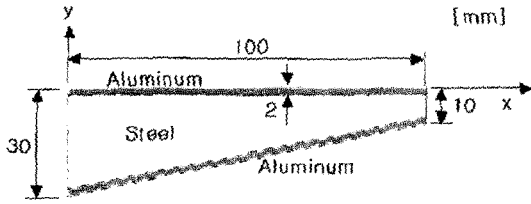


Fig. 7 Original Disk Shape and Model Definition

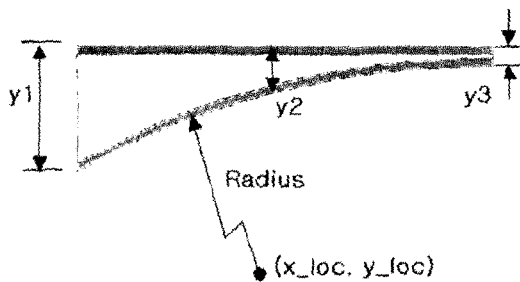


Fig. 8 Position of Design Variables

표면을 덮고 있는 알루미늄의 두께는 2mm를 유지하도록 한다. 강 의 물성치는 탄성계수가 210GPa, 밀도는 7850Kg/m³, 포아송비는 0.3이고, 알루미늄은 각각 73GPa, 2800Kg/m³, 0.35이다. 회전축이 되는 x=0 위치의 모든 절점에서 x와 y방향의 변위를 구속하고, 하중은 회전으로 인한 원심력만 가한다.

Fig. 8의 설계변수 y₁, y₂, y₃의 세 값에 의해 x_{loc}, y_{loc}, Radius가 결정되어 회전판의 형상이 만들어진다. 동일한 형상의 문제라 하더라도 요소망의 밀도가 다르면 고유치와 변위가 달라진다. 따라서, 밀도가 다른 요소망에서 동일한 최적화를 수행하도록 제한조건을 초기설계값에서 나온 응답치를 기준으로 일정 비율로 정하였다. 이 문제에서는 초기 구조물의 변형량(U_{ini})과 고유 진동수(Freq_{ini})를 각각 120%, 90%가 되도록 하였으며, 정식화는 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

회전판에 대해 최적화를 수행한 결과 Fig. 9(a)의

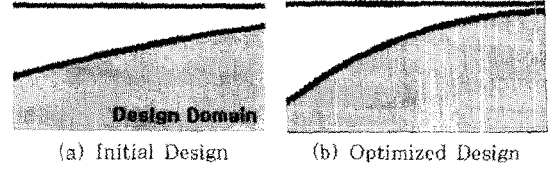


Fig. 9 Initial and Optimized Shape by SEM(Mesh Size=0.0005)

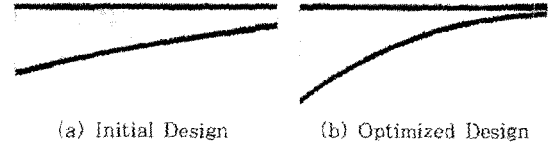


Fig. 10 Initial and Optimized Shape by Remesh (Mesh Size=0.0005)

초기 형상이 Fig. 9(b)와 같이 변화하였다. 요소 재분할법에 의한 결과인 Fig. 10의 (a), (b)와 비교해보면, 거의 동일한 형상을 갖게 됨을 알 수 있다. 요소망의 밀도에 따른 최적화의 변화 경향을 살펴보았으며, Fig. 11에서 요소망의 크기가 0.001일 때, 선택적 요소 방법은 요소 재분할에 비해 약 21%정도 더 큰 최적해를 찾았지만, 요소망의 크기를 0.0005로 하였을 때 두 값은 0.5%이내로 거의 일치하고 있다. 즉, 요소망의 밀도가 충분하면, 선택적 요소 방법은 요소 재분할을 대체할 수 있을 만큼 정확한 결과를 보여준다.

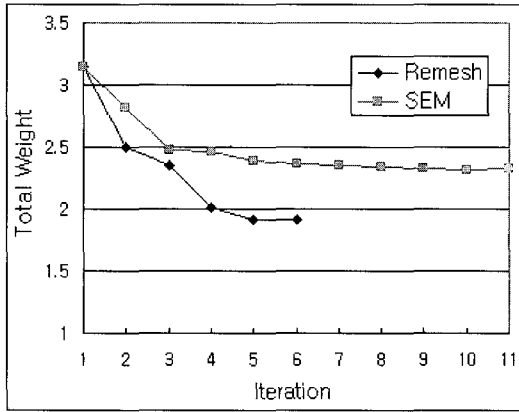
5.2 포털 프레임(Portal Frame)

Fig. 12와 같은 분포하중과 수평하중을 받고 있는 2층 구조의 포털 프레임에서 변위와 고유진동수를 제한조건으로 하고, 최소 부피를 목적함수로 하는 최적화 문제를 풀어 보았다. 재료의 물성치는 탄성계수가 25GPa, 밀도는 2400Kg/m³, 포아송비는 0.2이다. 설계변수는 Fig. 12의 기본 뼈대 구조에 보강을 하기 위한 세 군데의 수평방향의 치수 x₁, x₂, x₃을 Fig. 13과 같이 선정하여 세 점을 직선으로 잇는 외곽선을 구조물의 경계로 하였다.

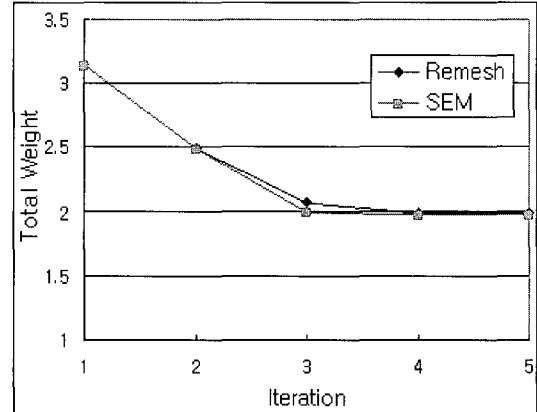
제한조건으로는 150N의 힘이 가해지는 위치에서 초기 변위량(U_{ini})의 네 배를 초과하지 않게 하고, 1차 고유진동수는 초기 설계값에서 나온 1차 고유 진동수(Freq_{ini})의 75% 이상이 되게 하였다. 이 최적화 문제의 정식화는 다음과 같이 표시할 수 있다.

Find x_1, x_2, x_3
 Minimize Total Volume
 Subject to $\frac{U}{U_{mi}} \leq 4.0$ (2)

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 선택적 요소 방법과 요소 재분할 법에 의한 초기 형상 및 최적형상이다. 두 방법의 결과로 도출된 형상이 거의 유사하게 나왔으며,



(a) Mesh Size=0.001



(b) Mesh Size=0.0005

Fig. 11 Iteration History of Total Weight

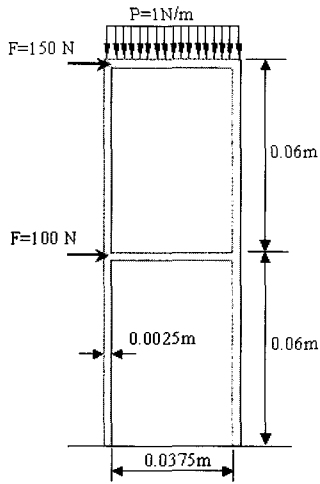


Fig. 12 Dimensions and Loadings

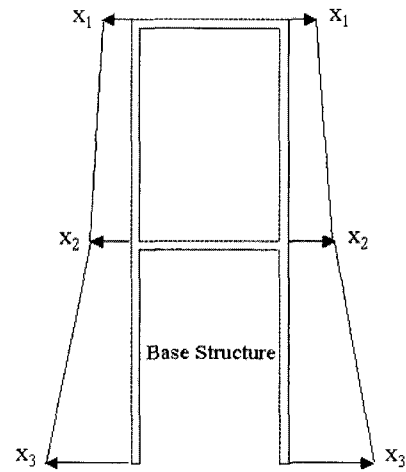
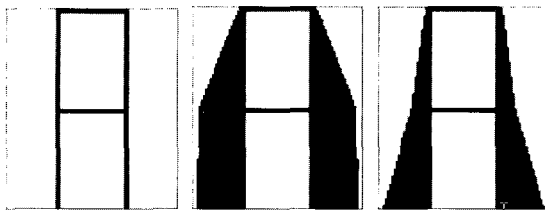


Fig. 13 Design Variables



(a) Base Structure (b) Initial Shape (c) Optimized Shape

Fig. 14 Shape Optimization by SEM



(a) Base Structure (b) Initial Shape (c) Optimized Shape

Fig. 15 Shape Optimization by Remesh

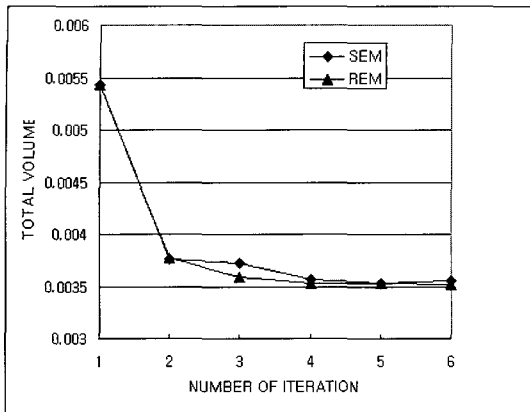


Fig. 16 Results of Portal Frame Optimization(Mesh size=0.00125)

반복수에 따른 목적함수의 추이는 Fig. 16에 나타난 바와 같이 수렴속도는 거의 비슷하였고, 단지 목적함수의 값에서 선택적 요소 방법이 요소 재분할에 비해 약 0.2%정도 크게 나왔을 뿐이다.

선택적 요소 방법은 요소망의 절대적인 크기가 최적해에 영향을 준다. 만일, 포털 프레임의 경우에 실제 치수가 Fig. 12보다 더 커진다면, 요소망의 밀도를 매우 크게 해야 한다. 또한, 요소 재분할을 이용한 형상 최적설계 결과와 선택적 요소 방법을 이용한 최적해의 차이를 근소하게 하고자 할 경우에도 요소망의 밀도를 높여야 한다. 그 이유는 절점의 섭동(perturbation)으로 민감도를 구하는 기존의 형상 최적설계와 달리, 선택적 요소 방법은 요소의 선택을 통해서 민감도를 구하기 때문이다.

6. 결 론

기존의 형상 최적설계의 단점인 요소 변형을 방지하기 위하여 선택적 요소 방법을 이용한 형상 최적설계 기법을 제안하였다. 이 방법의 특징은 구조물을 포함하는 큰 설계 영역을 설정하여 미리 요소를 분할 해 두었다는 점, 그리고 최적화 과정의 결과로부터 근사적으로 구조물의 경계를 재생성 하였다라는 점이다. 이때, 구조물의 경계를 결정하기 위해 요소의 도심을 기준으로 내/외부 요소를 판단하고, 결과에 따라 해당 요소의 물성치가 변하도록 하였다. 요소망의 밀도가 높아질수록 기존의 요소 재분할 방법과 유사해지는 경향이 있으나,

최적화가 수행되는 동안 요소의 변형은 일어나지 않았다.

이 방법의 타당성과 성능을 검토하기 위하여 변위와 고유진동수의 제한조건을 가진 회전판과 포털 프레임의 최적화 문제를 풀어 보았다. 예제 문제에 대한 정해는 구하기 어려우므로 요소 재분할에 의한 결과와의 비교를 통하여 선택적 요소 방법의 적용 가능성을 확인하였다.

제안된 기법을 향후 좀 더 일반적인 기법으로 정착시키기 위해서는 다양한 실제 문제에 적용을 하고, 설계 변수의 설정을 자동화하는 방안도 개발해야 할 것이다. 또한, 요소망의 밀도가 높아질수록 계산 시간이 급격히 증가하는 점을 보완해야 하며, 구조물의 경계가 계단형태로 되어 발생하게 되는 응력 집중에 대해서도 연구를 하여 응력에 대한 최적화 문제를 풀 수 있도록 해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 최적설계기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Haftka, R. T. and Gurdal, Z., *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992
- 박철민, 박경진, 이완익, "가변 샌드위치 구조물의 형상최적설계", 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, 1993, pp.2162~2171
- 고병갑, 서용진, 박경진, "U형 벨로우즈의 유한요소해석과 특정 강성을 위한 형상최적설계", 한국자동차공학회논문집, 제3권, 제6호, 1995, pp.96~111
- 최우석, 강신천, 신민재, 박경진, "자주포 로드암동하중의 상당정하중으로의 변환 및 형상최적설계", 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제12호, 1996, pp.3767~3781
- 이정화, 양원호, 성기득, 조명래, "철도차량용 차륜의 최적형상설계에 관한 연구", 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제12호, 1999, pp.2260~2266
- 이상범, "단순유한요소모델을 이용한 차체 필라 형상 최적설계", 한국공학기학회지, 제9권, 제6호, 2000, pp.133~138

7. 신정규, 송세일, 이권희, 박경진, "구조 최적설계 기법을 이용한 초경량차체 개념의 경량 자동차 설계", 한국전산구조공학회논문집, 제14권, 제3호, 2001, pp.277~286
8. Hsu, Y. L., "A Review of Structural Shape Optimization," *Computers in Industry*, 26, 1994, pp.3~13
9. Haftka, R. T. and Grandhi, R. V., "Structural Shape Optimization-A Survey," *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*, 57, 1986, pp.91~106
10. *GENESIS User's Manual : version 6.0*, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO, 1998
11. Kohnke, P., *ANSYS Theory Reference Ver. 5.6*, ANSYS Inc., 1999
12. 송영준, 민승재, N. Kikuchi, 유한요소법과 최적 구조설계 CAE, 성안당, 1999
13. 박수한, 광명만, "경계형상표현기법에 따른 구조물의 형상최적설계 비교연구," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(A), 1998, pp.708~712
14. Candan, S., Garcelon, J., Balabanov, V. and Venter, G., "Shape Optimization using ABAQUS and VisualDOC", 2000, AIAA-2000-4769
15. Adams, V. and Askenazi, A., *Building better Products with Finite Element Analysis*, Onward Press, 1999
16. Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., "General Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, 1988, pp.197~224
17. 왕세명, 문희곤, 기성현, "보강재 설계를 위한 최적설계 기법의 응용," 한국자동차공학회 1999년 춘계학술대회논문집 제2권, 1999, pp.405~410
18. *Model Center User's Guide: version 3.1*, Phoenix Integration, Inc., 2001
19. 이재규, C로 배우는 알고리즘, 도서출판 세화, 2000

13. 박수한, 광명만, "경계형상표현기법에 따른 구조