

복합재료판 구조물의 고유진동수 위상최적화에 관한 연구

Study on Topology Optimization for Eigenfrequency of Plates with Composite Materials

김 화 일*·윤 혁 기*·한 경 민*

Hwa-Il Kim, Hyug-Gee Yun and Kyong-Min Han

(2009년 10월 22일 접수 ; 2009년 12월 7일 심사완료)

Key Words : Topology Optimization(위상최적화), Homogenization Method(균질화법), Moment Formulation(모멘트 정식화), CATO Algorithm(CATO 알고리즘)

ABSTRACT

The aim of this research is to construct eigenfrequency optimization codes for plates with Arbitrary Rank Microstructures. From among noise factors, resonance sound is main reason for floor's solid noise. But, Resonance-elusion design codes are not fixed so far. Besides, The prediction of composite material's capability and an resonance elusion by controlling natural frequency of plate depend on designer's experiences. In this paper, First, using computer program with arbitrary rank microstructure, variation on composite material properties is studied, and then natural frequency control is performed by plate topology optimization method. The results of this study are as followed. 1) Programs that calculate material properties along it's microstructure composition and control natural frequency on composite material plate are coded by Homogenization and Topology Optimization method. and it is examined by example problem. 2) Equivalent material properties, calculated by program, are examined for natural frequency. In this paper, Suggested programs are coded using MatlabTM, Feapmax and Feap Library with Homogenization and Topology Optimization method. and Adequacy of them is reviewed by performing the maximization or minimization of natural frequency for plates with isotropic or anisotropic materials. Since the programs has been designed for widely use. If the mechanism between composite material and other structural member is identified, extension application may be possible in field of structure maintenance, reinforcement etc. through application of composite material.

1. 서 론

공동주택 바닥판의 층간소음 저감대책의 경우 완충재와 상부 질량구조물간의 공진에 의해 중량충격음의 증폭과 같은 문제점을 가진다. 공진은 두 구조

물간, 또는 작용하는 하중과 구조물의 진동수가 일치함으로써 발생하는 물리현상으로 이를 피하기 위해서는 설계초기단계에서부터 완충재가 적용된 슬래브의 고유진동수를 조절할 수 있는 설계기법이 필요하다. 위상최적화(topology optimization) 기법은 구조물의 위상을 변화시킴으로서 다양한 제약조건하에서의 구조물의 최적위상을 결정하는 기법으로서 연속체의 경우 미시구조(micro-structure)를 도입하여 최적구조설계문제를 최적재료분포문제로 변

† 교신저자; 정회원, 부산가톨릭대학교 산업보건학과
E-mail : hikim@cup.ac.kr

Tel : (051)510-0632, Fax : (051)517-9317

* 부산대학교 건축공학과

환하여 해결하는 설계기법으로 정의할 수 있다. 즉, 주어진 위상을 적절한 수학적 접근을 사용하여 수식화 하고, 일반적인 최적화 알고리즘을 사용하여 수행된다. 이러한 위상최적화 기법은 최적화 조건과 사용재료에 따라 크게 균질화 기법과 진화론적 기법으로 분류할 수 있다⁽¹⁾. 균질화 기법을 이용하는 방법들은 (a) 사각형 미시구조를 포함하는 전형적인 균질화 기법을 이용하는 종류, (b) 인공재료 혹은 SIMP(solid isotropic microstructure with penalization)기법 (c) rank-1 또는 rank-2 기법으로 분류되며 구조물 전체에 대한 재료의 분포는 최적화 조건(optimality criteria)을 사용하며, 목적함수는 부피 비율에 대한 전역적인 등가구속을 가진다. 진화론적 기법은 크게 Hard-Kill과 Soft-Kill기법으로 나누어진다. 이들 기법은 설계영역내부에서 구조적으로 비효율적인 재료를 제거해나감으로서 최적화를 이루어 간다. 이 “제거과정”은 탄성계수를 응력의 함수로 변화시키거나, 설계영역 내부에서 낮은 응력을 받는 부분을 제거해 나감으로서 이루어질 수 있다. 이 연구에서 사용하는 기법은 E.Hinton 등이 제안한 CATO 알고리즘⁽¹⁾을 일부 개선한 알고리즘으로 균질화 기법과 진화론적 기법의 중간적인 기법으로 재료모델은 균질화 기법에서 차용하나, 최적화는 각 요소의 응력이나 에너지 밀도에 기반을 두고 질량 구속조건에 따라 순차적으로 제거해 나감으로서 최적화를 수행한다. 따라서 민감도 함수를 작성하기 어려운 경우에도 최적화의 수행이 가능하며, 진화론적 방법과는 달리 수렴속도의 개선 및 광범위한 사용이 가능하다. 따라서 이 연구에서는 수치해석을 통한 복합재료 판의 고유진동수 최적 설계를 위해 위상최적화를 통한 고유진동수 최적화 프로그램의 개발에 목적을 두고 연구를 수행한다. 이를 위해 판 구조물의 고유진동수 위상최적화 알고리즘을 제시하고, 제시된 알고리즘을 통해 복합재료의 위상최적화 프로그램을 Matlab™, Feapmax 및 Feap 라이브러리를 사용하여 작성한다. 작성된 프로그램은 범용성을 확보하기 위해 해석 부분을 Feap와 Matlab™ 및 Feapmax를 이용하여 메모리상에서 동적연계(dynamic linkage)되도록 한다. 최종적으로 작성된 프로그램을 통해 제시된 모델에 대한 고유진동수 최대, 최소 위상최적화를 수행함으로써 복합재료 판의 고유진동수 조절방안을 제시한다.

2. 위상최적화 이론의 개요

2.1 요소별 고유진동수 에너지 밀도

위상최적화 알고리즘에서는 각각의 반복에서 최적의 재료 위치를 찾기 위해 구조물내의 각 요소에 대한 인자가 계산된다. 이 민감도 인자는 재료가 구조물의 고유진동수에 의해 받는 영향을 표시하는 것으로서 구조물의 동적 거동을 정의하는 고유진동수 문제는 아래와 같이 기술된다.

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M})\mathbf{u}_n = 0 \quad (1)$$

여기서, \mathbf{K} 와 \mathbf{M} 은 구조물의 전역 강성행렬과 질량행렬, ω_n 은 n 번째 고유진동수, \mathbf{u}_n 은 대응하는 고유벡터를 나타낸다. 고유진동수 ω_n 과 고유벡터 \mathbf{u}_n 은 Rayleigh quotient에 의해 서로 연결되어 있다⁽²⁾.

$$\omega_n^2 = \frac{k_n}{m_n} \quad (2)$$

여기서 모달강성 k_n (model stiffness)와 모달질량 m_n (model mass)은 아래와 같이 정의된다.

$$k_n = \mathbf{u}_n^T \mathbf{K} \mathbf{u}_n, \quad m_n = \mathbf{u}_n^T \mathbf{M} \mathbf{u}_n \quad (3)$$

구조물내의 재료의 재분배에 의한 주파수의 변화는 다음과 같은 진동수의 민감도의 계산에 의해 얻어진다.

$$\Delta(\omega_n^2) = \frac{1}{m_n} (\Delta k_n - \omega_n^2 \Delta m_n) \quad (4)$$

만일, 요소내부에 Void를 생성하는 재료 재분배 과정 도중, 요소 e 안의 재료가 구조물 내에서 갱신되면 주파수 민감도는 고유벡터 \mathbf{u}_n 이 이번 단계의 요소 e 의 재료내의 갱신(update)에서 영향을 받지 않았다고 가정하므로 식(5)와 같이 근사적으로 구할 수 있다⁽³⁾.

$$\Delta k_n = \mathbf{u}_n^{(e)T} \Delta \mathbf{K} \mathbf{u}_n^{(e)} = -\mathbf{u}_n^{(e)T} \mathbf{K}^{(e)} \mathbf{u}_n^{(e)} \quad (5a)$$

$$\Delta m_n = \mathbf{u}_n^{(e)T} \Delta \mathbf{M} \mathbf{u}_n^{(e)} = -\mathbf{u}_n^{(e)T} \mathbf{M}^{(e)} \mathbf{u}_n^{(e)} \quad (5b)$$

여기서 $\mathbf{K}^{(e)}$ 와 $\mathbf{M}^{(e)}$ 는 요소 e 의 강성행렬과 질량행

렬을 나타내며, $\mathbf{u}_n^{(e)}$ 는 요소 e 의 고유벡터이다. 요소 e 의 재료분포 갱신에 의한 주파수의 민감도는 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 다음과 같이 구한다⁽²⁻⁴⁾.

$$\Delta(\omega_n^2) = f^e = \frac{1}{m_n} \mathbf{u}_n^{(e)\top} (\omega_n^2 \mathbf{M}^{(e)} - \mathbf{K}^{(e)}) \mathbf{u}_n^{(e)} \quad (6)$$

여기서 $f^{(e)}$ 는 요소 e 내의 재료량의 변화로 인한 고유진동수의 변화를 나타내는 민감도 인자이다. 이 인자는 CATO 내부에서 갱신 알고리즘의 기준으로 사용된다. 식 (6)에서 m_n 은 모든 요소에 대해 같은 값을 가지므로 생략 가능하다. 또한 식 (5)의 합은 전체 요소에 대해 0이 되므로 이를 통해 작성된 알고리즘의 유효성을 평가하는 것이 가능하다. 그러나 이 경우 하나의 고유진동수가 증가(또는 감소)함으로써 타 고유진동수와 교차하는 문제들에 대해서는 고려하지 않고 있다.

예를 들어 1차 고유진동수가 증가하고 2차 고유진동수가 감소할 때, 두 개의 고유진동수가 만나는 일이 발생할 수 있다. 이와 같은 교차 현상을 피하기 위해 최대(또는 최소화) 고유진동수와 이와 가장 가까운 고유진동수간의 차이를 상수로 고정하는 기법을 사용할 수 있다⁽¹⁾. 이 연구에서 작성된 프로그램은 매 단계에서 주변의 고유진동수를 구하여 이를 최적화 하는 방법으로 이를 해결하였다.

2.2 위상최적화 알고리즘

정적인 조건하에 있는 구조물에 대해 요소변형률 에너지 밀도 값 f_e 는 각각의 반복단계에서 정적해석을 통해 얻어진다. 이러한 값들은 오름차순으로 배열된다. 자유진동 문제에서는, 각각의 요소에서의 민감도 인자 f_e 는 주어진 고유진동수에 대해 각각의 반복단계에서 자유진동 해석으로부터 얻어진다. 이 알고리즘에서는 이들 값을 주파수 최적화 문제의 종류에 따라 오름차순 또는 내림차순으로 정리한다⁽¹⁾.

- 주파수극소화: f_e 를 오름차순으로 정리
- 주파수극대화: $-f_e$ 를 오름차순으로 정리

이는 동일한 알고리즘이 고유진동수의 극대화와 극소화 문제에 동시에 사용될 수 있도록 한다. 위상 최적화 알고리즘을 아래에 요약하였다.

(1) 최적화 문제의 종류를 정의한다(정적 또는 동적). 설계영역 데이터를 설정하고 최적화 데이터와 매쉬정보, 재료속성, 경계조건, 하중조건을 포함하는 유한요소 모델 데이터를 작성한다. 반복카운터 $i = 1$ 로 설정한다.

(2) 필요한 질량비 \mathbf{M}_{fac} 에 대해 재료 밀도 변수 a_i^e 를 각각의 요소에 대해 다음과 같이 초기화 한다.

$$a_i^e = \begin{cases} 0 & \text{비설계영역} \\ \sqrt{1 - \mathbf{M}_{fac}} & \text{설계영역} \\ a_{pr} & \text{밀도지정} \end{cases} \quad (7)$$

전체 계의 필요한 질량 \mathbf{M}_{des} 를 아래와 같이 구한다.

$$\mathbf{M}_{des} = \mathbf{M}_{fac} * \sum_{e=1}^n \rho^e v^e \quad (8)$$

여기서 n 은 설계영역의 요소 수, ρ^e 와 v^e 는 각각 요소 e 의 밀도와 부피를 나타낸다.

(3) 현재의 a_i^e 값에 대해 인공재료모델(artificial material model)을 사용하여 적절한 재료 구성에 대한 속성을 계산한다.

(4) 최적화 문제에 따라 정적해석이나 자유진동 해석을 수행한다.

(5) 요소들을 요소들의 f_e 값들에 나열한다.

(6) 지정된 질량을 보존 관계 $\Delta a_i^e(f^e)$ 로부터 재료 밀도 변수의 변화량 Δa_i^e 를 각각의 요소에 대해 구하고 $a_{i+1}^e = a_i^e + \Delta a_i^e$ 와 같이 재료 밀도 변수를 갱신한다.

(7) 주어진 새로운 재료 밀도 변수 a_{i+1}^e 에 대해 전체 구조물의 질량 \mathbf{M}_{sys} 를 계산한다.

(8) 요구조건 $\mathbf{M}_{sys}/\mathbf{M}_{des} < \mathbf{M}_{tol}$ 을 검사한다. 만일 이 조건이 만족되지 않으면 $\mathbf{M}_{sys} = \mathbf{M}_{des}$ 가 되도록 a_{i+1}^e 을 비례 조절하여 구하고 7단계로 되돌아간다.

(9) 만일 수렴조건중 하나라도 만족되면 10단계로 가고, 그렇지 않으면 $i = i + 1$ 로 설정하고 3단계로 간다.

(10) 시각화를 위해 후처리 과정을 거치고 종료한다.

2.3 재료 갱신 원리

이 연구에서 사용된 위상최적화 알고리즘은 요소 내의 재료 밀도 변수 a^e 를 최적화 종류와 연관되는 요소 인자값 f^e 에 따라 조절하기 위해 $\Delta a_i^e(f^e)$ 의 증분 관계를 사용한다⁽¹⁾.

이들 관계식의 특징은 최적화 반복과정중 구조물의 전체질량을 보존하도록 선택되어진다는 점이다. Fig. 1에 최적화 과정 중 서로 다른 두 단계에서의 이 관계를 나타내었다. 이 함수는 $y = n^{p_{cur}}$ (n 과 p_{cur} 는 뒤에서 설명)과 같은 곡선 형태로 구성되어 있다. 이 곡선을 정의하기 위해서는 몇 개의 매개변수가 필요하다. 만일 $l = [l^1, l^2, \dots, l^m]^T$ 이 최적화 종류에 따라 정렬된 요소 n 개의 번호배열이라면 다음과 같이 3개의 매개변수가 정의된다.

$$f_{\min} = f^{(l^1)} \quad (9a)$$

$$f_{\max} = f^{(l^m)} \quad (9b)$$

$$f_{\text{cut}} = f^{(l^k)} \quad (9c)$$

여기서 k 는 다음과 같은 방정식을 만족하는 값이다.

$$\sum_{i=k}^n \rho^i v^i = M_{\text{des}} \quad (10)$$

또한 ρ^i, v^i 는 각각 요소 i 의 밀도와 부피를 나타낸다. 반복단계 i 에서 요소 e 에 대한 재료 밀도 변수의 변화량 Δa_i^e 은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta a_i^e = \alpha n^{p_{cur}} \quad (11)$$

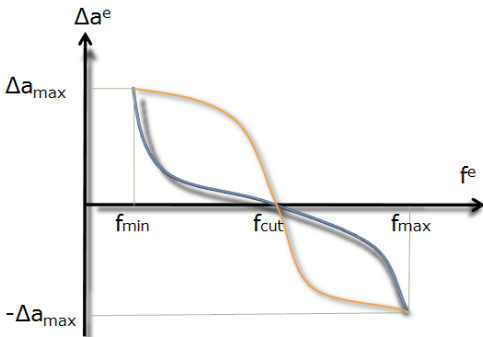


Fig. 1 Relationship of $\Delta a^e(f^e)$ between initial and each iteration

여기서,

$$\alpha = -\frac{f^e - f_{\text{cur}}}{|f^e - f_{\text{cur}}|} \quad (12a)$$

$$n = -\frac{f^e - f_{\text{cur}}}{r} \quad (12b)$$

$$p_{\text{cur}} = p_{\text{init}} - (i - 1.0) \times \text{iter} \quad (12c)$$

또한 r 은 다음과 같이 정의된다.

$$r = \begin{cases} f_{\max} - f_{\text{cut}} & \text{if } f^e > f_{\text{cut}} \\ f_{\min} - f_{\text{cut}} & \text{if } f^e \leq f_{\text{cut}} \end{cases} \quad (13)$$

이제 (a) 어떠한 반복 사이클에서 Δa^e 의 최대 허용 가능한 변위를 정의하는 재료 밀도 변수의 변화량 증분의 최대치 Δa_{\max} , (b) 곡선의 초기 형상을 결정하는 초기 곡선 지수 매개변수 p_{init} , (c) 곡선이 반복 계획을 통해 적응해 나가는 과정을 조절하는 반복 가속화 매개변수 iter 를 정의한다. 설계영역 내의 모든 요소에 대한 재료 밀도 변수 a^e 가 새로운 계의 밀도로 한번 갱신되면 질량비율 구속조건이 아래의 표현식을 어기는지 검사하여야 한다⁽⁶⁾.

$$M_{\text{sys}}/M_{\text{des}} < M_{\text{tol}} \quad (14)$$

여기서 M_{sys} 는 계의 현 단계의 구조 질량, M_{des} 는 요구되는 질량, M_{tol} 은 질량구속의 허용오차를 나타낸다. 식 (14)가 만족된다면, 알고리즘은 다음 단계로 넘어갈 수 있다.

3. 위상최적화 프로그램의 작성

복합재료관의 위상최적화 프로그램을 MatlabTM 및 Feapmax, Feap 라이브러리를 사용하여 제작하였다. 위상최적화 프로그램의 제작 시 추후 이 프로그램의 활용성 및 확장성을 고려하여 유한요소 해석 부분을 Feap(finite element analysis program)^(2,7)를 MatlabTM과 Feapmax를 이용하여 실행단계에서 유기적으로 컴퓨터의 memory상에서 동적연계(dynamic linkage)되도록 작성하였다. Fig. 2에 최적화 초기 단계에서 MatlabTM에서 모델을 초기화 한 후 Feap로 보내어 재료 밀도를 구하는 루틴을 작성하

였다.

Fig. 2와 같이 이 프로그램에서는 최적화를 위해 우선 최적화 도중 사용할 재료들의 개수 및 속성을 Matlab을 이용하여 설정한 후 이를 Feap에 보내는 방식을 택하였다. 따라서 각각의 해석 재료는 일반적인 위상최적화 알고리즘에서 사용되는 연속밀도 함수와 달리 미리 해석 프로그램 내부에 지정된 개수의 재료들 중 가장 일치하는 재료를 선택한 후

```
p = xlsread('mesh.xls','node','A1:C121');
t = xlsread('mesh.xls','elem','A1:D100');
BC = xlsread('mesh.xls','BC','A1:G40');

Feap parameter setting
param.np = size(p,1);
param.ne = size(t,1);
param.thk = 0.43;
param.numma = 100;
feapstart('SHELL', param, p, t);

feapcmd('mesh');
for i= 2: param.numma
    feapcmd(sprintf('mate,%d',i));
    feapcmd('SHELL');
    feapcmd('elastic isotropic 69.0d9 0.3');
    feapcmd('density mass 2500');
    feapcmd(sprintf('thickness
shell %f',param.thk*i/param.numma));
    feapcmd('');
end
feapcmd('!',end');

feap
for i= 2: param.numma
    feapcmd(sprintf('mate,%d',i));
    feapcmd('SHELL');
    feapcmd('elastic isotropic 69.0d9 0.3');
    feapcmd('density mass 2500');
    feapcmd(sprintf('thickness
shell %f',param.thk*i/param.numma));
    feapcmd('');
end

matrho = Matuensity(t, p);
```

Fig. 2 Modeling and Feap input step

```
Dmode = 2; Drho = 0.6; MminNo = 10
Pinit = 1; iter = 0.01; DAmx = 0.04;
maxiter = 100; Mtol = 0.001; CLimit = 0.001;

Mdes = Mfull*Drho;
Dmass = EMfull(1)*Drho; Did = Matno(Dmass, matrho,param.numma);
ix=feapgetm('ix'); ix(9:9*size(t,1))=Did; feapsetm('ix',ix);

while changeFreq > CLimit

1. Calculating Sensitivity and then to go "Feap" for gaining
eigenvalues and eigenvector
2. Take design variable 'a' again from element density given
by "Feap"
3. Obtain element 'fmax', 'fmin', 'fcut'
4. Obtain element design variable 'a' at current step
5. Obtain element density by 'a'
6. Material renumbering in "Feap" model by 'a'

end;
feapcmd('quit', 'h');
```

Fig. 3 Optimization step

이를 다음번 최적화 반복에 사용함으로써 연속밀도 함수에 비해 빠른 수렴이 가능하다. 일단 Feap에 재료모델들이 넘어가면 그 다음 단계는 MatlabTM과 Feap의 연동을 통해 Fig. 3과 같이 최적화를 수행한다.

4. 판 구조물에 대한 고유진동수 최적화

4.1 등방성 판 구조물 예제

이 연구에서 작성된 프로그램을 바탕으로 우선 등방성 판 구조물에 대한 고유진동수 위상최적화를 수행하였다. 해석모델은 각각의 변의 길이가 5 m로 가정하였고, mesh는 [10×10]으로 모델을 작성하였다. 최적화 모델 및 재료의 속성은 Fig. 4와 같다.

각각의 해석은 판의 두께를 최적화 목적변수로 하고, 각각의 질량제한조건에 따른 고유진동수 극대화를 목적함수로 하여 위상최적화를 수행하였다. 이때 재료의 비율제한은 각각 0.4, 0.5, 0.6으로 설정하고, 재료모델은 탄성계수 $E=69.0e^9$, 푸아송 비는 0.3, 밀도는 2500, 두께는 0.0043~0.43 m까지 100개의 모델을 설정하였다⁽⁵⁾. Figs. 5~7에 질량비 제한에 따른 1차 고유진동수 최적화 결과를 나타내었다.

Table 1에 각각의 질량 제한비에 따른 최적화 결과를 정리하였다. 해석 시 고유진동수는 각각의 판의 형상에 따라 변화하는 저차 고유진동수 3개를 추적대상으로 하였다. 각각의 경우 1차 고유진동수는 최적화가 진행됨에 따라 증가하고 있으며 이는 질량비가 큰 경우 더욱 큰 값으로 증가가 이루어지고 있다.

또한 질량비 0.6의 경우 42단계의 1차 고유진동수는 25단계에 비해 -4.34정도 줄어들고 있다. 이는 사용된 재료의 위상이 수렴해 감에 따라 1, 2차 고유진동수가 근접하여 일어나는 현상으로 파악된다.

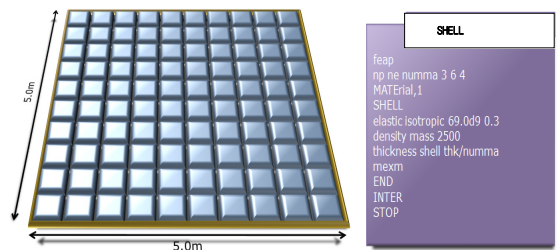
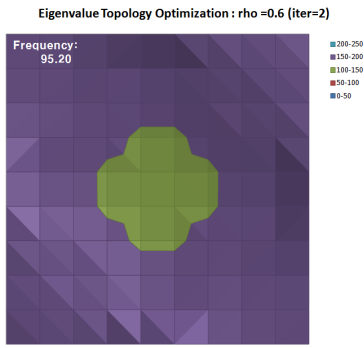
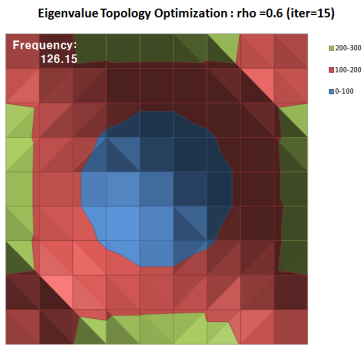


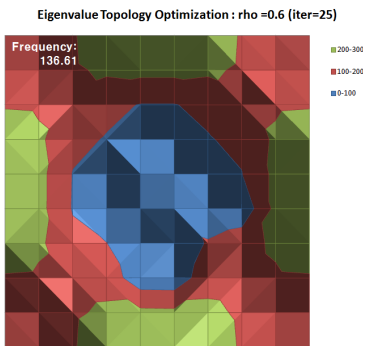
Fig. 4 Analysis model



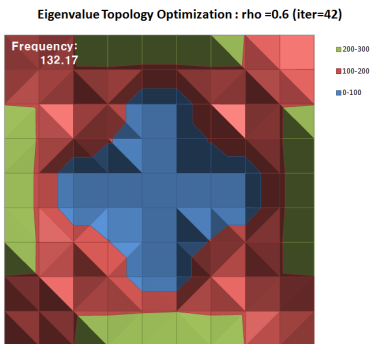
(a) iter = 2



(b) iter = 15

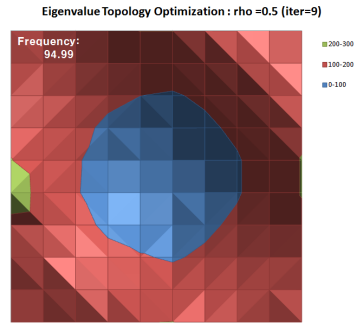


(c) iter = 25

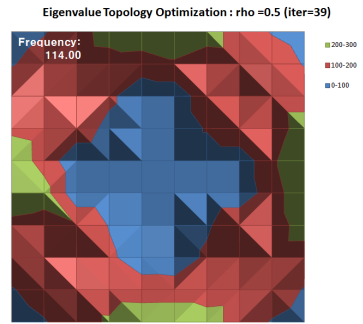


(d) iter = 42

Fig. 5 Optimization result : $\rho = 0.6$

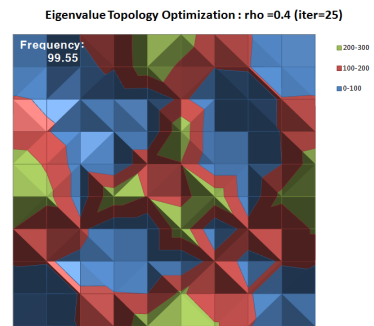


(a) iter = 9

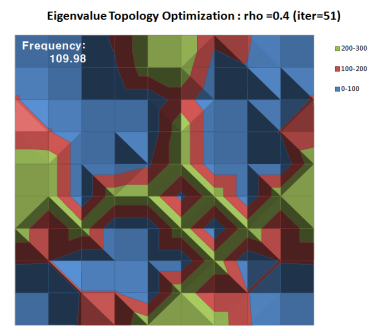


(b) iter = 39

Fig. 6 Optimization result : $\rho = 0.5$



(a) iter = 25



(b) iter = 51

Fig. 7 Optimization result : $\rho = 0.4$

Table 1 Optimization result on eigenfrequency of first order

Material restriction ratio	Iteration step (iter)	Frequency of first order (Hz)	Percentage (%)
0.6	2	95.2	-
	15	126.15	30.95
	25	136.61	10.46
	42	132.27	-4.34
0.5	9	94.99	-
	39	114.00	19.01
0.4	79	124.95	10.95
	25	99.55	-
	51	109.98	10.43

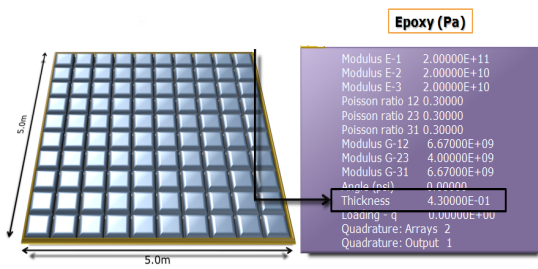


Fig. 8 Example model

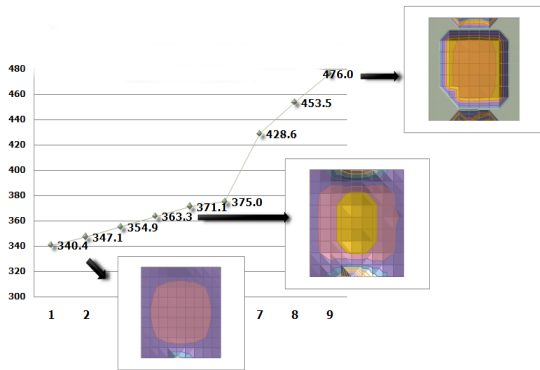


Fig. 9 Optimization result on maximum eigenfrequency of first order

4.2 이방성재료 판 예제

이 연구에서는 균질화법에 의한 등가물성치를 가지는 복합재료 판의 고유진동수 최적화에 대한 예제로서 균질화법에 의해 Fig. 8과 같이 직교 이방성 재료상수를 가지는 판구조물의 고유진동수 최적화를 수행하였다.

이방성 재료의 두께는 0.43 m로 가정하였고, 재료의 비율제한은 총 재료의 50%로 하여 고유진동

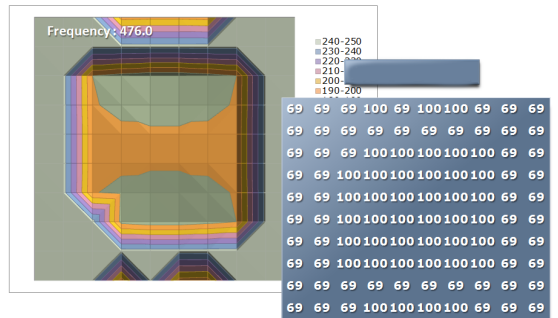


Fig. 10 Material number at maximum eigenfrequency of first order

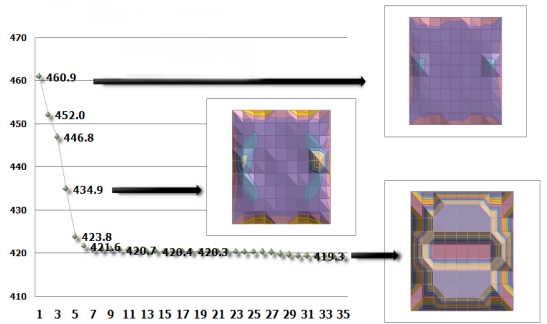


Fig. 11 Optimization result on minimum eigenfrequency of second order

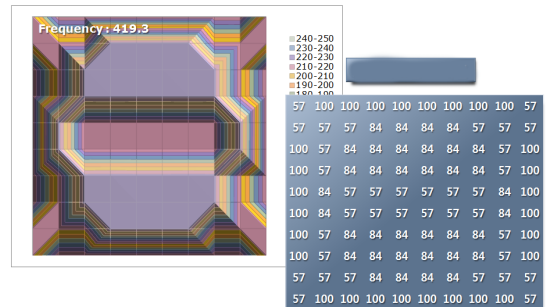


Fig. 12 Material number at minimum eigenfrequency of second order

수 극대화와 극소화에 대해 수행하였고, 결과를 Figs. 9~12에 나타내었다.

최적화 결과 고유진동수 극대하시 등방성 재료에 비해 최소 20%정도 효율이 더 좋은 것으로 나타났다. 따라서 등방성 재료에 비해 이방성 등가물성치를 가지는 복합재료의 경우 위상최적화에 의한 고유진동수의 조절이 더욱 용이할 것으로 판단된다^{(7,8)}}.

5. 결 론

이 연구는 수치해석을 통한 복합재료 판의 고유진동수 최적 설계를 위해 균질화법을 통한 등가물성치 계산 프로그램의 활용 및 위상최적화를 통한 고유진동수 최적화 프로그램의 개발에 목적을 두고 연구가 수행되었다. 이 프로그램은 개발초기단계에서부터 해석의 정확성 및 추후 확장 가능성을 위해 최적화 부분을 제외한 유한요소해석루틴은 O.C. Zienkiewicz에 의해 개발되어 현재 상용화된 Feap⁽²⁾ 라이브러리를 도입하여 해석의 정밀도를 검증하였다. 프로그램 내의 위상최적화 부분 및 Feap와의 연동부는 MatlabTM, Feapmax를 사용하여 작성하고, 복합재료판의 위상최적화를 통한 고유진동수 조절 가능 여부를 검토하였다. 이 연구를 포함한 일련의 연구를 통해 개발된 복합재료의 등가물성치 계산 프로그램 및 고유진동수 위상최적화 프로그램은 추후 공동주택 등에 적용될 복합재료 판의 개발에 있어서 설계 보조 도구로 활용 가능할 것으로 기대된다. 또한, 이 연구에서 작성된 고유진동수 위상최적화 프로그램은 범용성을 가지도록 제작되었으므로, 복합재료와 기타 구조부재간의 역학적인 기구만 파악된다면 복합재료의 적용을 통한 보수, 보강 등과 같은 타 구조분야에도 확장 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

(1) Bulman, S., Sienz, J. and Hinton, E., 2001, "Comparisons between Algorithms for Structural Topology Optimization Using a Series of Benchmark Studies," *Computers and Structures*, Vol. 79, pp. 1203~1218.

(2) Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., 2005, "The Finite Element Method," 6th edition, Elsevier, Oxford.

(3) Afonso, S. M. B., Sienz, J. and Belblidia, F., 2005, "Structural Optimization Strategies for Simple and Integrally Stiffenedplates and Shells," *International Journal for Computer-aided Engineering and Software*, Vol. 22, No. 4, pp. 429~452.

(4) Rozvany, G. I. N., 1997, "Topology Optimization in Structural Mechanics," Springer Wien NewYork, pp. 237~322.

(5) Diaz, A. R., Lipton, R. and Soto, C.A., 1995, "A New Formulation of the Problem of Optimum Reinforcement of Reissner-Mindlin Plates," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 121~139.

(6) Krog, L. A. and Olhoff, N., 1999, "Optimum Topology and Reinforcement Design of Disk and Plate Structures with Multiple Stiffness and Eigenfrequency Objectives," *Computers and Structures*, Vol. 72, pp. 535~563.

(7) Han, K. M. and Park, S. S., 2006, "Study on Structural-acoustic Characteristic Analysis of Composite Plate with Homogenization Method," *Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 8, No. 4, pp. 89~96.

(8) Lee, J. W. and Kim, Y. Y., 2008, "Topology Optimization Based Partition Design for Maximizing or Minimizing the Eigenfrequency of a Double Cavity," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 1118~1127.