

박판 구조물의 소음 방사 및 산란에 대한 위상 최적 설계

⁰이제원*, 왕세명**

Topology Optimization for Radiation and Scattering of Sound from a Thin-body

Jeawon Lee and Semyung Wang

ABSTRACT

Although the holes on the shell case are very important for the acoustic performance, it is difficult to solve the problem because the case includes thin bodies. Hence, in the past, only the method of trial and error, which depends on the engineer's intuition and experience, was available for the design of holes. Many researchers have tried to solve the thin-body acoustic problems, since the conventional boundary element method (BEM) using the Helmholtz integral equation fails to yield a reliable solution for the numerical modelling of radiation and scattering of sound from thin bodies. In the area of the analysis of thin-body acoustic problem, three approaches are generally used; the multi-domain BEM, the indirect variational BEM, and the normal derivative integral equation. And there has been just a few study reported on the design optimization for the acoustic radiation problems by using only the conventional BEM. For the thin-body acoustics, however, no further study in the optimization fields has been reported. In this research, the normal derivative integral equation is adopted as an analysis formulation in the thin-body acoustics, and then used for the optimization. The analytical approaches for the design of holes are proposed by using a topology optimization technique and a genetic algorithm. The proposed approaches are implemented and validated using numerical examples.

1. 서 론

최근 들어 위상 최적 설계에 관한 연구가 활발해지면서, 그 적용 분야도 구조 설계뿐만 아니라 전자기 등 여러 부분으로 확장되고 있다. Sigmund [1]는 micro-thermal-actuator의 설계에 위상 최적 설계 기법을 적용하였으며, Nishiwaki [2]는 piezo ceramic을 이용한 flexensional actuators를 위상 최적 설계 기법을 활용하여 개발하였다.

Wang [3]은 전자기 시스템의 설계에 위상 최적 설계 기법을 활용함으로써 전자기적 효과를 극대화 하기 위한 설계안을 제안하였다. 그러나 타 분야에 비해 소음 분야에서의 위상 최적 설계의 적용은 매우 미미하다.

특히 위상 최적 설계의 특성상, 구멍 등이 존재하는 박판 형태의 구조물이 대상이 되기 쉬운데, 이런 경우에는 그 해석조차도 일반적인 경계 요소법으로는 불가능하기 때문에 최적 설계 단계에 적용하기에는 아직까지 많은 어려움이 있다. 박판 구조물의 음향 해석에 있어서, 이론적으로 가장 간단한 방법이 바로 다영역 경계 요소법(multi-domain BEM)[4]이다. 그러나 다영역 경계 요소법

* 삼성전자 DA 연구소 요소기술그룹
E-mail : jeawon.lee@samsung.com
Tel : (031) 218-5217, Fax : (031) 218-5195
** 광주과학기술원 기전공학과

은 상대적으로 가상 평면(imaginary surface)이 넓은 경우에는 계산 효율이 매우 떨어지는 단점이 있다. 반면에 범선 도함수 적분식(normal derivative integral equation)[5]은 개념적으로는 다영역 경계 요소법과 마찬가지로 가상 평면을 구축하지만, 압력과 속도의 연속성을 이용하여 적분 과정에서는 이를 고려하지 않게 된다. 간접 변분법(Indirect variational method)[6]도 박판 구조물의 음향 해석에 사용된다. 간접 변분법은 이산화 후에 대칭 행렬을 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 이때 이중 면적분을 수행해야 한다.

박판 구조물의 최적 설계 분야에서는 Lee와 Wang[7]에 의하여 발표된 박판 구조물의 형상 설계 민감도 해석과 최적 설계 기법이 드문 연구 결과이며, 그 외에는 전혀 연구 결과가 발표되지 않고 있다.

본 연구에서는 범선 도함수 적분식을 기본 해석식으로 하여, 박판 구조물의 방사 소음에 대한 위상 최적 설계법을 제안하였다. 이때 최적 설계 알고리즘으로는 유전자 알고리즘(GA; genetic algorithms)을 이용하였다. 박판 구조물의 방사 소음과 산란에 두가지 경우 모두에 대해 위상 최적 설계법을 개발하였으며, 제안된 방법은 간단한 상자 형태의 모델을 이용하여 검증하였다.

2. 음향 위상 최적 설계

2.1 음향 위상 최적 설계의 정의

구조 해석에 있어서의 위상 최적 설계는 일반적으로 구조물의 Young's modulus 나 밀도를 정규화하여 설계 변수로 사용한다. 그러나 음향 문제에서는 이와 같은 구조물의 특성을 설계 변수로 사용할 수 없다. 그 이유는 음향 해석에 사용되는 경계 요소 행렬이 구조물의 특성과는 무관하고,

오직 위치와 형상에만 관계되기 때문이다. 물론 방사 문제의 경우에는 구조물의 물성이 진동 속도를 변화시킴으로써 최종 방사 소음에도 영향을 미치지만, 이를 직접적으로 연관 지어 문제를 풀기는 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 음향 위상 최적 설계를 위해 각 요소의 존재 여부(exist or not)를 직접 설계 변수로 이용함으로써, 전형적인 정수형 문제로 정의하였다. 따라서 일반적으로 위상 최적 설계에 사용되는 민감도 기반 최적 설계 기법 대신 정수형 문제에 장점이 많은 유전자 알고리즘을 최적 설계 알고리즘으로 사용하였다.

2.2 제안된 위상 설계 기법의 특징

유전자 알고리즘의 가장 큰 단점은 각 개체의 해석에 많은 시간이 소요된다는 것이다. 더구나 음향 해석의 경우에는 일반적으로 행렬식을 구축하는 데에 많은 시간이 소요되므로, 개체수가 많아질수록 더욱 오랜 시간이 필요하게 된다. 그러나 만약 초기 설계 영역의 모든 요소에 대한 행렬식을 알고 있다면, 음향 해석에 있어서 각 개체의 행렬식을 구축하는 것은 큰 문제가 되지 않는다. 그 이유는 구조 해석을 위한 행렬식은 구조물의 물성이 바뀔 때 따라 새로 적분을 수행하여야 하지만, 음향 문제의 경우에는 각 요소의 위치와 세부 형상이 변하지 않는다면 각 요소 행렬은 변하지 않기 때문이다. 따라서 위상 최적 설계 과정에서 요소가 제거되더라도, 해당 요소의 요소 행렬만을 제외한 채 나머지 요소 행렬을 단순히 더하기만 함으로써 광역 행렬을 구축할 수 있기 때문이다. 결국 개체의 수가 증가함에 따라 계산 시간이 많이 필요한 것은 사실이지만, 구조 특성을 위한 위상 최적 설계에 유전자 알고리즘을 적용하는 것에 비해 훨씬 적은 계산 시간을 필요로 하게 된다.

3. 수치 예제

3.1 모델 정의

본 연구에서는 얇은 판재로 만들어진 상자형 구조물을 이용하여 제안된 방법을 검증하였다. 초기에 구조물은 모두 밀폐되어 있으며, 위상 최적 설계 과정을 거치면서 상판에 구멍이 만들어지도록 하였다. 따라서 일반적인 경계 요소법으로는 문제를 해결할 수 없으므로 범선 도함수 적분법을 이용하였다.

3.2 소음 산란에 대한 위상 최적 설계

Preliminary studies.

그림 1에 보인 바와 같이 소음 산란의 경우에 대한 위상 최적 설계를 수행하기 위하여 강도 10의 음원을 상자내 모서리에 위치시켰다. 이때 음원의 파동은 구조물을 가진시킬 수 없다고 가정하였다.

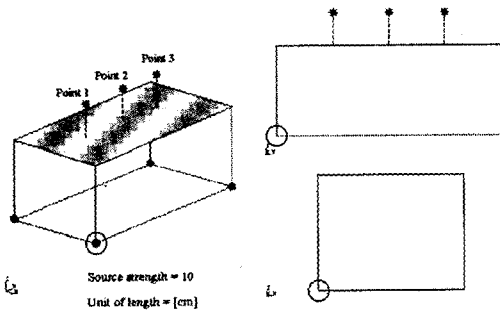
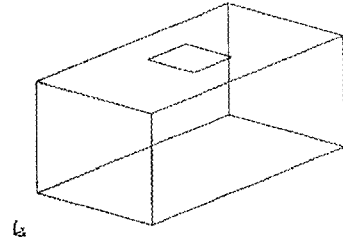


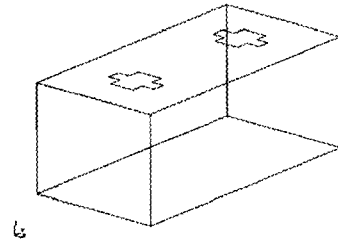
Figure 1. Simple box with an acoustic source

그림 2에 보인 것과 같이, 최적 설계 문제를 정의하기 위하여, 관심 주파수 영역 및 구조물의 기본적인 음향 특성 확인을 위한 4개의 기본 모델을 만들었다. 각 모델은 상판에 가장 일반적인 형태로 구멍이 있는 형상을 가정하였으며, 각 구멍

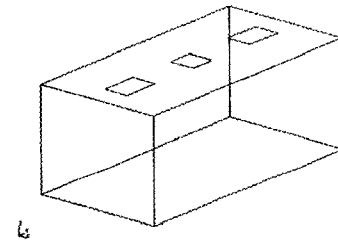
면적의 합은 상판 전체 면적의 8~10%가 되도록 모든 모델에 대해 동일하게 설정하였다.



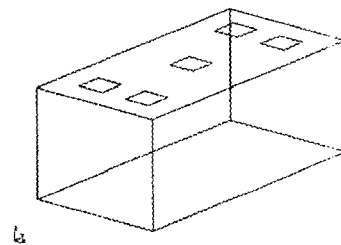
(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

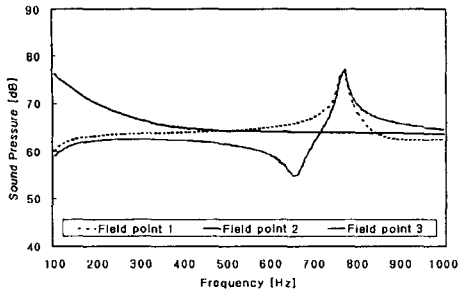


(d) Model 4

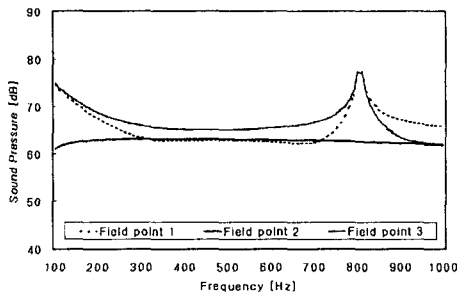
Figure 2. Basic models for the preliminary studies

각 기본 모델에 대하여 음향 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3에 보였다. 모든 모델에 대해 공통적으로 첫번째 극치가 800 Hz 부근에서 발견되었는데, 이는 상자 내 음장의 1차 고유진

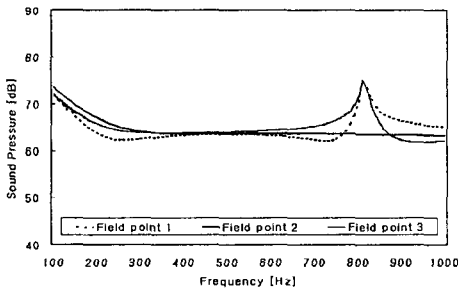
동수 영역의 지배를 받고 있는 것이다.



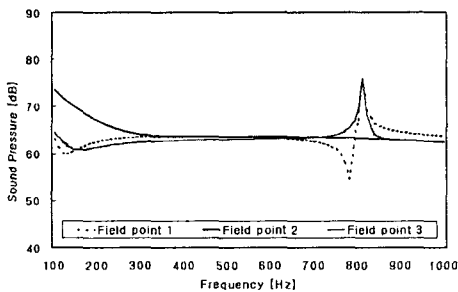
(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3



(d) Model 4

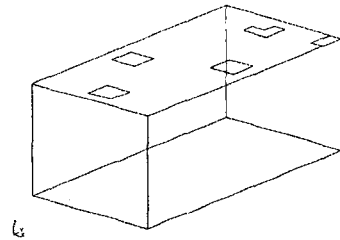
Figure 3. Analysis results of the preliminary studies for the scattering problem

Optimization.

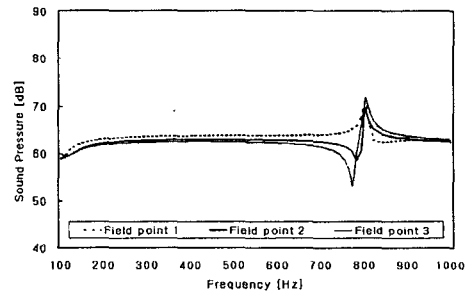
각 모델마다 1 차 극치의 주파수가 약간씩 다르게 나타나는데, 이는 구멍의 형상과 위치의 영향 때문이다. 최적 설계를 위해 1 차 극치를 충분히 포함할 수 있도록 750 Hz 부터 850 Hz 까지를 관심 주파수로 설정하였으며, 세 개의 수음점에서의 음압의 최고치를 최소화 하는 것으로 목적 함수를 결정하였다. 또한 전체 구멍 면적의 합이 상판 면적의 8~10% 가 되도록 구속 조건을 설정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \max |P(\hat{x}_i, f)| \\ & \text{Subject to } 0.08A_{ds} \leq A_{hole} \leq 0.10A_{ds} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 \hat{x}_i 는 i^{th} 번째 수음점을 의미하며, f 는 관심 범위 내의 각 주파수, 그리고 A_{ds} 는 상판의 면적, A_{hole} 구멍 면적의 합을 의미한다.



(a) Optimum design



(b) Analysis results of optimum design.

Figure 4. Optimum design for the scattering problem and its analysis results

그림 4 는 제안된 위상 최적 설계 기법을 이용하여 얻은 최적 해이다. 최적 해의 음향 해석 결과

를 통해, 동일한 면적의 구멍을 재배열 함으로써 관심 주파수 영역내의 음압의 극치가 작아졌음을 알수 있다. 전체적인 기본 모델과 최적 해의 해석 결과를 표 1 에 정리하였다.

Table 1. The biggest peak values and the frequencies for the scattering problem

Model	Peak Value [dB]	Frequency [Hz]
Model 1	77.1	770
Model 2	77.3	800
Model 3	74.9	810
Model 4	75.7	810
Optimum Design	71.6	800

3.2 소음 방사에 대한 위상 최적 설계

Preliminary studies.

동일한 모델의 방사 소음 해석을 위해 전체 계를 반 연성 시스템으로 가정하였다. 따라서 구조물의 진동은 소음 방사를 야기 하지만 반대로 음압의 변동은 구조물의 진동을 야기할 수 없다. 모델의 경계 조건은 그림 5 와 같다.

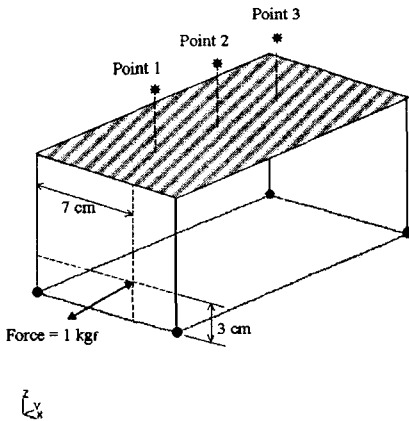
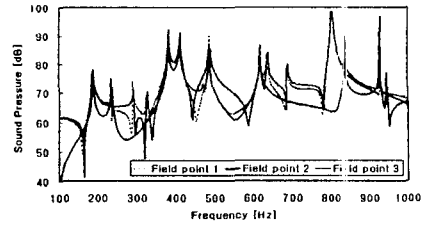


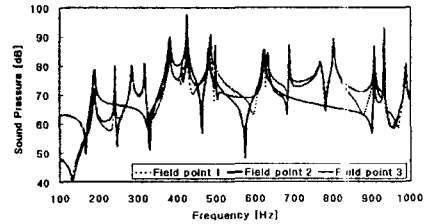
Figure 5. Simple box with an exciting force applied on the front surface

소음 산란의 경우와 마찬가지로, 동일한 기본 모델에 대해 음향 해석을 수행하였으며, 그 결과를

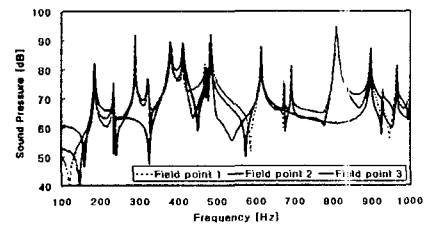
그림 6 에 보였다.



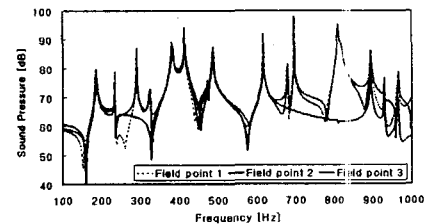
(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3



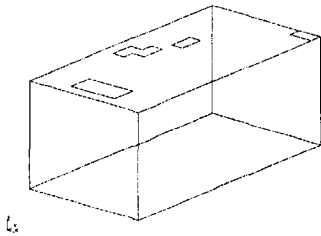
(d) Model 4

Figure 6. Analysis results of the preliminary study for the radiation problem

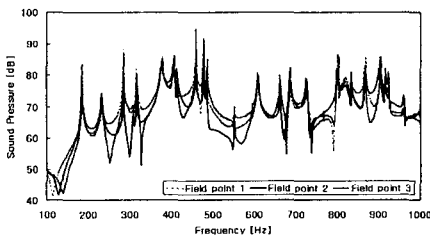
Optimization.

최적 설계를 위해서 모델 전면 판의 굽힘 모드가 존재하는 400 Hz 부근의 음압(from 350 Hz to 450 Hz)을 목적함수로 하였으며, 그 외에는 산란의 경

우와 동일한 구속 조건을 설정하였다. 그 결과 그림 7 과 같이 최적 해를 얻을 수 있었으며, 기본 모델과 최적 해의 극치를 표 2 에 정리하였다.



(a) Optimum design



(b) Analysis results of optimum design.

Figure 7. Optimum design for the radiation problem and its analysis results

Table 2. The biggest peak values and the frequencies for the radiation problem

Model	Peak Value [dB]	Frequency [Hz]
Model 1	92.0	380
Model 2	97.6	424
Model 3	89.5	378
Model 4	94.3	412
Optimum Design	86.1	406

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 범선 도함수 적분법과 유전자 알고리즘을 이용하여 음향 위상 최적 설계 기법을 개발하였으며, 음향 산란과 방사 각 경우에 대해 단순한 상자형 모델을 이용하여 검증하였다.

그러나 제안된 방법을 실제 설계문제에 적용하기 위해서는 몇 가지 주의하여야 할 문제가 있다. 우

선은 수음점이 방사체로부터 멀리 떨어져 있는 경우에는 효과가 매우 작다는 것이다. 실제로 구멍의 위치나 형상을 단순 재배치 하는 경우에 원거리 음향 특성에는 큰 영향이 없다. 그러나 근접장의 소음 특성을 향상시키는 경우에는 큰 효과를 볼 수 있을 것이다. 또 다른 문제는 주파수 영역의 선정에 관한 것으로서, 계산 시간과의 상호관계를 고려하여 적절한 영역을 선정하여야 한다.

REFERENCES

1. O. Sigmund, "Topology optimization in multiphysics problem", *7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, 1492-1500 (1998)
2. S. Nishiwaki, E.C.N. Silva, Y. Li, N. Kikuchi, "Topology optimization for flextensional actuators", *7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, 1883-1888 (1998)
3. S. Wang, J. Kang, "Topology optimization of nonlinear magnetostatics", *IEEE Transaction on Magnetics*, **38**, 1029-1032 (2002)
4. A.F. Seybert, C.Y.R. Cheng, T.W. Wu, "A multidomain boundary element solution for silencer and muffler performance prediction", *Journal of Sound and Vibration*, **151**, 119-129 (1991)
5. T.W. Wu, G.C. Wan, "Numerical modeling of acoustic radiation and scattering from thin bodies using a Cauchy principal integral equation", *Journal of Acoustical Society of America*, **92**, 2900-2906 (1992)
6. X.F. Wu, A.D. Pierce, J.H. Ginsberg, "Variational method for computing surface acoustic pressure on vibrating bodies, applied to transversely oscillating disks", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **OE-12**, 412-418 (1987)
7. J. Lee, S. Wang, "Shape design sensitivity analysis for the radiated noise from the thin-body", *Journal of Sound and Vibration*, **261**, 895-910 (2003)