

2차원 음향 은폐를 위한 대칭형 실린더 격자 구조의 설계

Design of axisymmetric cylindrical lattices for two-dimensional acoustic cloak

조충희[‡] · 정지훈[‡] · 오일권[†]

Choonghee Jo, Jihoon Jeong and Il-Kwon Oh

1. 서 론

전자기파를 제어하여 파동의 진행 경로 위에 있는 물체가 탐지되지 않도록 하는 전자기파 은폐의 기술로서 transformation optics 라는 수학적 기법이 사용되어 왔다. 좌표 변환의 불변성을 이용하여 음파와 같은 다른 종류의 파동에도 이와 유사한 방법이 적용될 수 있으며, 많은 연구자들이 음향 은폐에 관심을 가져왔다. 이와 관련하여 다수의 이론적 연구가 보고되었지만, 재료값이나 형상 설계 등이 현실적으로 구현이 어려운 면이 있었다. 알루미늄 실린더를 기반으로 한 2차원 음향 은폐 구조가 보고된 바 있으나⁽¹⁾ 이는 음파의 특정 진행방향과 주파수에 한정된 결과였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 이번 연구에서는 대칭형 실린더 격자구조를 이용한 이차원 음향은폐 구조체의 설계를 수행하였다. 역설계 방법을 통해 원형 실린더의 크기와 배치, 그리고 재료 물성을 결정하고, 이를 통해 음파의 진행방향에 구애받지 않고, 넓은 주파수 대역에서 유효한 음향 은폐를 구현하였다.

2. 2차원 음향은폐를 위한 격자구조의 설계

2.1 설계 모델

원형 물체의 음향 은폐를 구현하기 위해서 Fig. 1 과 같은 다섯 층으로 이루어진 원형 실린더 격자

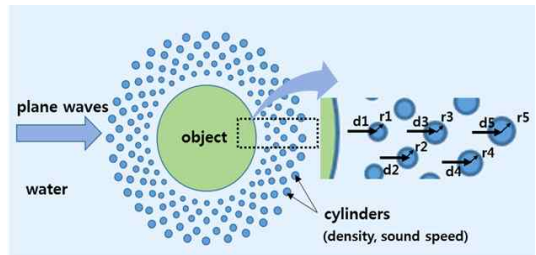


Fig. 1. Structure of cylindrical lattice and design variables of cylindrical lattice.

구조를 고려하였다. 음파의 진행 방향에 의한 변수를 억제하기 위해 각 층을 같은 개수와 같은 물성의 실린더로 구성하였다. 사용될 수 있는 설계변수로는 각 층에서 실린더의 크기, 층간 간격, 원주 방향으로의 실린더 분포 수, 그리고 실린더의 밀도와 실린더 내의 음파 속도 등이 있다. 최적화 모델에서 목적함수는 음파의 진행 경로 위에 물체가 없는 것으로 간주되는 이상적인 음향 은폐에서 나타나는 음압 분포와 현재의 음압 분포 사이의 차이를 최소화 하는 방향으로 표현되며 이때 음압은 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션으로 구하였다. 목적함수의 영역은 음향 은폐 구조물 주변의 임의의 점을 포함하도록 정의될 수 있지만, 계산의 편의를 위해 Fig. 2와 같이 기둥형상을 가진 점들의 집합을 이용하였다.

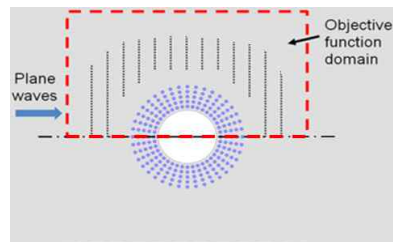


Fig. 2. Column-like domain of objective function.

[†] 교신저자; 정희원, 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 해양시스템공학전공

E-mail : ikoh@kaist.ac.kr

Tel : (042)350-1520, Fax : (042)350-1510

[‡] 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 해양시스템공학전공

$$f_{obj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(p_{i,j} - \frac{1}{n} \sum_j p_{0,j} \right)^2}$$

m = 목적함수 영역 내부의 기둥 형상 개수
n = 각 기둥 내부의 점의 개수
p = 현재 음압
p₀ = 이상적인 음향 은폐에서의 음압

2.2 음향 은폐성과 유효 주파수 대역

목적함수를 최소화하는 실린더의 크기와 물성을 COMSOL Multiphysics를 사용하여 구하였다. Fig. 3과 같이, 음파 진행 경로 위에 있는 원형 물체를 둘러싼 원형 실린더 격자 구조는 음파가 이를 통과할 때 격자 내부에서 산란, 반사, 간섭 등의 복잡한 현상을 일으켜, 결과적으로 격자 외부로 진행하는 음파에 대한 간섭을 줄이게 된다. 이 결과에서 원형 기둥의 밀도는 물의 약 2.7배, 음파 속도는 물의 약 3.4배에 불과하여 현실적으로 구현 가능성이 높다. 한편, 이 형상의 음향 은폐 성능을 확인하기 위해서, 평균 가시도(averaged visibility)를 도입하여 이를 정량적으로 표현할 수 있다⁽²⁾.

$$Averaged\ visibility = \frac{1}{n} \sum_j \frac{|M_j| - |N_j|}{|M_j| + |N_j|}$$

여기서 M_j와 N_j는 각각 j파면에서의 음압의 최대값과 최소값을 나타내고, 평균 가시도가 낮을수록 음파 진행 경로 위에 음파를 왜곡시키는 요소가 적게 존재한다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 음파의 주파수를 1500Hz로 하여 설계모델을 최적화한 결과로서, 최대 4400Hz 까지도 평균 가시도가 비교모델 대비 절반 이하의 값을 갖는다는 것을 보여준다. 이는 비록 특정 주파수에 대해서 최적화를 진행하더라도 넓은 주파수 대역에 대하여 음향 은폐가 구현 가능하다는 것을 나타낸다.

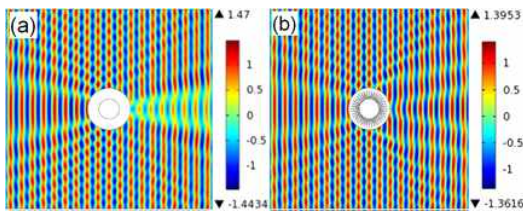


Fig. 3. (a) object only without cloak, (b) cloak model.

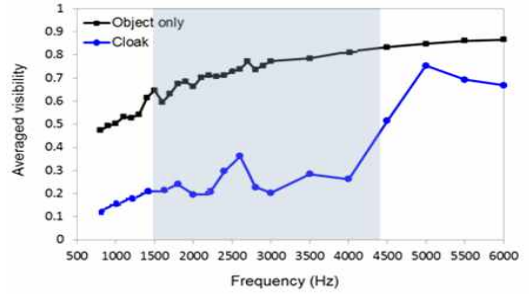


Fig. 4. Averaged visibility as a function of frequency

3. 결론

대칭형 실린더 격자 구조를 통하여 이차원 음향 은폐가 가능하도록 원형 실린더의 형상과 재료값에 관한 최적화 설계를 수행하였다. 이 방법을 통한 설계는 기존의 방법에 비하여 형상이 간단하고, 음향 은폐 수준을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 또한 현실적으로 존재 가능한 물성을 이용하고, 음파의 진행 방향에 구애받지 않으며, 넓은 주파수 영역에서 음향 은폐를 구현할 수 있다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD110096DD)의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.

참 고 문 헌

- (1) V.M. Garcia-Chocano, L. Sanchis, A. Diaz-Rubio, J. Martinez-Pastor, F. Cervera, R. Llopis-Pontiveros, J. Sanchez-Dehesa, Acoustic cloak for airborne sound by inverse design. *Appl. Phys. Lett.* 99 (2011) 074102.
- (2) S. Zhang, C. Xia, and N. Fang, Broadband acoustic cloak for ultrasound waves, *Phys. Rev. Lett.* 106(2) (2011) 024301.
- (3) C. Jo, B.J. Kwon, K.C. Park, I.K. Oh, Two-dimensional acoustic cloaking by cylindrical lattice. *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference* (2012) 645-646.