

# 원형 실린더 격자를 이용한 이차원 음향은폐

## Two-dimensional acoustic cloaking by cylindrical lattice

조충희\* · 권병진\* · 박광춘\*,\*\* · 오일권†

Choonghee Jo, Byung-Jin Kwon, Kwang-Chun Park and Il-Kwon Oh

### 1. 서 론

음향 메타물질의 파동 전파 특성을 이용하는 파동 제어 구조체에 대한 관심이 최근까지 지속되어 왔다. 특히 음향은폐(acoustic cloaking)에 관해서는 많은 이론적 연구가 보고되었지만 이를 실제 설계에 구현하는데 있어서는 재료값이나 형상설계 등의 요건을 만족시키기가 어려운 면이 있었다<sup>(1)</sup>. 최근, 원형 알루미늄 실린더로 이루어진 음향 메타물질을 이용해 공기 전파음의 이차원적 음향은폐에 관한 연구가 시도되었다<sup>(2)</sup>. 여기에서 역설계법으로 결정되는 실린더의 분포는 음파의 특정 진행방향과 주파수에 적합한 결과를 보여주고 있어 이러한 방향성 등의 제한을 극복하기 위한 노력이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 원형 실린더 격자구조를 이용한 이차원 음향은폐 구조체의 설계가 수행되었다. 특히, 음파의 진행방향에 제한을 받지 않도록 대칭성을 이용했고, 실린더의 형상을 결정하기 위한 방법으로 최적화(parametric optimization) 기법이 사용되었다.

### 2. 음향은폐를 위한 이차원 격자구조 설계

#### 2.1 설계 모델 (Optimization model)

물속에서 원형 물체의 음향은폐를 위해 그림1과 같이 5개의 층(layer)으로 이루어진 원형실린더 격자 구조가 고려되었다. 전체 은폐 구조체의 크기가 고

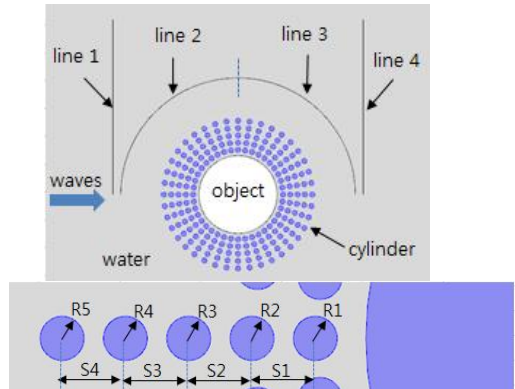


Fig. 1. Two-dimensional acoustic cloaking structure and four line-integration positions.

정되었을 때 사용될 수 있는 설계변수로는 각 layer에서 실린더의 크기, layer 간의 간격, 원주 방향으로의 실린더 분포 수, 실린더의 밀도와 실린더내의 음파속도 등이 있다. 최적화 모델에서 목적함수는 은폐의 정도와 양상 등에 따라 달라질 수 있는데 본 논문에서는 아래와 같이 4개의 line에서 음압(total acoustic pressure field,  $p$ )의 적분값을 물체가 없을 때의 음압( $p_0$ )과 비교하는 식으로 나타냈다. 이 때 압력값은 FEM을 이용한 simulation으로 구한다.

$$F_{obj} = \frac{\left| \int p(r, \theta) - \int p_0(r, \theta) \right|}{\left| \int p_0(r, \theta) \right|}$$

먼저 각 line에서 실린더 크기에 따른 압력적분값의 변화를 살펴보았다. Table 1은 각 line에서의 압력적분값을 물체가 없을 경우의 것과 비교한 percent

Table 1. Percent errors of the line integration.

Radius of cylinder	Line 1	Line 2	Line3	Line4
0.045 m	140	251.63	164.82	18.59
0.055 m	197	230.09	190.02	17.52
0.065 m	254	212.62	211.46	14.88
0.075 m	320	209.63	218.28	10.34
0.085 m	397	226.01	201.12	4.97

† 교신저자; 정희원, 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 해양시스템전공

E-mail : ikoh@kaist.ac.kr

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

\* 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 해양시스템전공

\*\* Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder

error를 보여준다. Line 1과 4에서 상대적으로 낮은 error는 이 음향은폐 구조체가 이 두 line 부근에서 음파의 산란을 작게 해줌을 나타낸다. 또한 line 1과 4에서 실린더 크기변화에 따라 error의 증가/감소 경향이 서로 반대가 되는 현상은 파의 산란방향도 실린더의 크기변화를 통해 조절이 가능함을 보여준다.

### 2.2 최적 설계변수 (Optimal design variables) 및 음향은폐 양상

실린더 layer간의 간격을 동일하게 놓고, 목적함수를 최소화 하는 최적화된 실린더의 크기를 COMSOL optimization을 사용해 구했다. line 4에서의 압력적분값이 목적함수에 사용된 경우 압력 분포가 그림 2에 나타나 있다. Line 4에서의 적분값이 사용되었기 때문에 파의 진행방향으로 파형이 비교적 균일하게 나타난다. 그림 3은 line 1에서 4까지의 압력적분값 모두가 목적함수에 포함되었을 경우 인데 그림 2b와 다른점은 R2와 R3의 크기가 작아진 것과 물체의 중앙을 지나는 파형에 변화가 생긴 점 등이다. 이처럼 목적함수의 형태에 따라 음향은폐를 위한 최적설계변수의 값이 달라짐을 알 수 있다. 그림 2와 3은 실린더가 알루미늄일 때의 결과이고 다른 재료를 적용하게 되면 재료의 밀도와 음속도가 달라져 음파의 전달양상에 영향을 주게 된다.

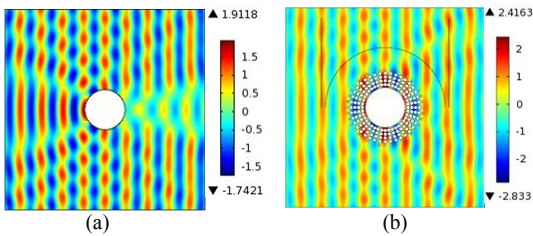


Fig. 2. Acoustic pressure field without cloak (a) and with cloak using optimal R ( $F_{obj}$  at line4) (b).

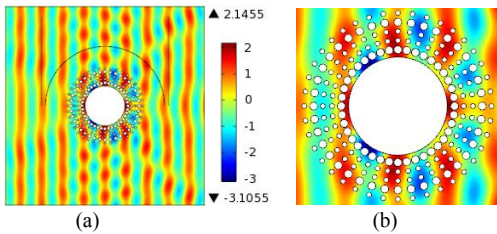


Fig. 3. Acoustic cloaking using all 4 lines in  $F_{obj}$  (a) and the corresponding optimal R (b).

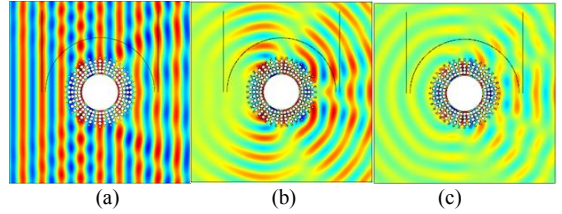


Fig. 4. Acoustic pressure fields with density =  $1200\text{kg/m}^3$  and sound speed =  $3500\text{m/s}$  (a) and the corresponding scattered pressure fields (b), and scattered pressure field of Fig. 2b (c).

다. 입사방향으로 반사되는 음파를 최소화하기 위한 재료값이 적용된 경우 그림 4a와 같은 압력분포를 보인다. 이 때는 입사방향으로의 산란이나 반사가 크게 줄어 line 1에서의 percent error도 0.02에 지나지 않는다. 이 경우의 산란된 압력분포(Fig. 4b)가 그림 2b의 산란된 압력분포(Fig. 4c)와 비교되고 있는데 그림 4b는 반사파의 영향이 최소화되는 음향은폐 양상을 보여주고 있다.

### 3. 결론

원형 실린더 격자를 사용하여 이차원 음향은폐가 가능하도록 실린더의 형상과 재료값에 관한 최적화 설계가 수행되었다. 은폐하고자 하는 방향에 따라 목적함수의 형태가 달라지게 되고, 이에 따라 최적 설계변수의 값도 영향을 받게 됨을 알 수 있었다. 또한 실린더의 재료값도 음파의 진행에 중요한 변수로 작용함을 알 수 있었다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- (1) Chen H.C. and et al., Acoustic cloaking and transformation acoustics, Journal of physics D: Applied physics 43, 113001(14pp) (2010).
- (2) Garcia-Chocano, V.M. and et al. Acoustic cloak for airborne sound by inverse design, Applied Physics Letters 99, 074102 (2011).