

주기적 배열을 갖는 원형 봉 집합체의 차음효과해석

⁰김현실*, 김재승*, 강현주*, 김상렬*

A Study of Sound Insulation Effect of Periodically Arranged Circular Rods

Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Joo Kang, and Sang-Ryul Kim

ABSTRACT

Sound insulation effect of periodically arranged circular rods is studied by numerical method (BEM) and model experiment in anechoic room. Five different cylinder groups of diameter from 48 mm to 27 mm are arranged, where each group consists of 5 rows of identical rods and area ratio is kept almost the same as 60%. Comparisons of results by BEM and experiment show the band gap frequency ranges are qualitatively in agreement, while experiments give higher attenuations. Frequency shifted attenuations (BEM results) by first group ($\phi 48$), third group ($\phi 34$) and fifth group ($\phi 27$) show that attenuation curves are in reasonable agreements for both plane wave and point source.

1. 서 론

두 가지 종류의 물질이 2차원 또는 3차원으로 주기적으로 배열된 상태에서 특정 주파수밴드의 음파는 완전히 차단될 수도 있다는 사실이 최근 여러 연구에서 보고되고 있다. 이러한 현상은 고체 물리학 중 광학과 전자기파분야(electromagnetic wave)에서 처음 연구되어 photonic band gap (PBG) 현상[1]으로 알려져 왔으며 최근에는 탄성파에 적용하고자 하는 시도도 이루어지고 있다. PBG 현상과 이에 관련된 물질은 반도체 레이저기구나 기타 양자-전자 기구(quantum electronic devices)에 응용되며 또한 주파수 선택 반사경, 밴

드패스 필터 및 공명기 등에 이용된다.

Montero 등[2]은 5 cm x 4 cm x 1.5 cm(두께) 알루미늄 판에 직경 2 mm의 실린더 모양의 구멍을 2.8 mm의 간격을 갖는 격자형으로 뚫고 수으로 채워서 초음파 탐상실험을 수행하였다. 그들은 1000 kHz에서 1120 kHz 사이에 입사각에 무관하게 초음파의 전파가 불가능한 완전한 밴드 갭이 존재함을 보였다. Ye 등[3]은 강판위에 Lucite 블럭을 주기적으로 배열한 후 force transducer로 가진하고 가속도를 측정하여 bending wave의 전파가 국지적으로 집중됨을 보였다.

Martinez-Sala[4] 등은 스페인 마드리드시에 있는 한 야외 조형물에 대해 음향실험결과를 발표하였다. 이 조형물은 여러 높이를 갖는 지름 2.9 cm의 강철 봉이 10 cm 간격으로 주기적으로 배열된 구조인데 (면적비는 6.6%) 조형물을 통과하는 음파의

* 한국기계연구원 음향연구그룹

감소를 측정하고 결과 특정 주파수대역에서 음파의 차단이 두드러지며 첫번째 차단주파수는 강철 봉의 간격에 기인하는 Bragg 차단 주파수임을 발표하였다. 그러나 이들이 예측한 차단 주파수는 음파 입사 방향에 따라 달라지는데 방향에 무관한 차단 주파수의 존재에는 봉이 차지하는 면적비가 매우 중요한 역할을 함이 추후 다른 연구에서 밝혀졌다.

Sanchez-Perez 등[5]은 Martinez-Sala 등[4]이 예측한 조형물의 모델을 만들어 무향실에서 측정하였는데 실린더 봉의 직경과 간격을 여러 가지로 바꾸어 실험하였으며 이론적인 계산으로 확인하였다. 이론해석결과는 무한개의 실린더를 대상으로 하나 모델실험은 100개에서 500개의 유한한 실린더에 대해 측정하였는데 봉의 간격이 l 이고 입사각 θ 인 경우 $n\lambda = 2l/\sin\theta$ 로 주어지는 Bragg 피크(λ 는 파장, $n=1,2,3,\dots$)의 위치는 봉의 수와 관계없으나 음파의 차단효과는 봉의 수가 많아질 수록 커짐을 보였다.

Kushwaha[6]는 음향파의 차단에 대한 연구를 집중적으로 수행하였으며 여러 가지 물질의 조합에 대해 격자간격, 면적비와 밴드갭의 존재 유무, 차단 주파수와의 관계를 밝혔다.

본 논문에서는 강철 봉을 배열한 구조물에서 음파의 차단 현상을 이론 및 실험적으로 살펴보았다. 여러 가지 단면을 갖는 봉을 점진적으로 배열하여 차단 밴드폭을 넓히고자 하였다. 원형 봉의 선택과 배열은 참고문헌 [6]에 근거하였으며 BEM 프로그램을 이용하였으며 수치해석을 하였다.

2. 격자구조와 차단 주파수

Fig. 1과 같이 원형 봉이 주기적으로 배열된 2차원 구조를 생각하면 가장 단순한 경우로 동일한 격자구조가 무한대로 반복하는 경우를 가정할 수 있다. 물론 격자구조는 Fig. 1처럼 반드시 사각형일 필요는 없으며 삼각형, 육각형 등 다양한 배열이 가능하다. 먼저 무한대의 경우에 참고문헌 [6]

의 방법을 소개하면 밀도와 음속이 불균일한 재질의 파동전파로 보아 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

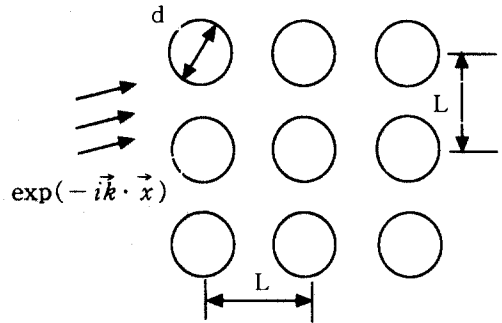


Fig. 1 Periodic cylindrical array

$$-\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla \phi \right) \quad (1)$$

음속과 밀도를 다음과 같이 Fourier series로 표시가 가능하며

$$\frac{1}{\rho c^2} = \sum_G \zeta(G) e^{iGr} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} = \sum_G \sigma(G) e^{iGr} \quad (3)$$

여기서 ζ, σ 는 Fourier series의 계수이고 G 는 격자 벡터의 reciprocal이다. 식 (1)의 해는 Bloch 이론에 따라 다음과 같이 주어진다

$$\phi = e^{i(K \cdot r - \omega t)} \sum_K \phi_K e^{iK \cdot r} \quad (4)$$

여기서 K 는 Block wave 벡터이며 식 (2)-(4)를 식 (1)에 대입한 후 정리하면 무한대 차수를 갖는 고유치 문제(eigenvalue problem)로 된다. K 를 변화시켜 가며 고유치 문제를 풀고 이와 관련된 계산을 수행하면 밴드 갭의 범위를 수치적으로 찾아낼 수 있는데 대단히 많은 계산량을 필요로 한다. 보통 무한대 대신 400x400 정도의 매트릭스를 풀면 고유치가 2%이내의 오차를 갖는 것으로 알려져 있다. 자세한 과정은 참고문헌 [6]과 여기에 인용된 문헌에 나와 있으며 Kushwaha[6]는 여러 가지 격

자 배열과 재질에 대해 밴드갭의 크기를 제시하였다. 일반적으로 평면파의 입사각도에 따라 차단되는 밴드가 달라지는데 여기서 밴드갭이라 정의하는 것은 모든 각도에 대해 공통적으로 존재하는 차단 주파수 대역을 말한다. 밴드갭의 폭을 넓히는 가장 중요한 요소는 면적 비로 Fig. 1의 경우 $\pi(d/2L)^2$ 로 정의된다.

2차원 원형 봉(cylinder)의 경우 최소 30% 이상 되어야 밴드갭이 존재하며 면적비가 커질수록 밴드폭은 증가한다. 같은 면적비라면 간격이 커질수록 반비례하여 주파수대역이 낮아지는 효과를 보인다. 따라서 면적이 점진적으로 변하는 배열을 택하면 차단 밴드폭을 크게 할 수 있는 가능성이 있다.

참고문헌 [6]의 방법은 동일한 격자구조가 무한대 또는 대단히 많은 숫자로 반복될 때는 유용하나 격자가 점진적으로 변한다든지 유한한 개수의 격자만 존재할 때, 또는 평면파가 아니고 점음원인 경우, 위치에 따른 차단효과 등 실질적인 문제에 대해서는 적용이 불가능한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 참고문헌 [6]의 방법 대신 BEM을 사용하여 해석하였으며 실린더는 강체로 가정하였다. 공기에 비해 실린더의 재질이 나무나 금속등 밀도가 매우 큰 물체이면 강체로 가정하여도 오차는 무시할만한 수준이며 계산량을 크게 줄일 수 있다. 2차원 BEM을 적용하였는데 소음원은 점음원 및 평면파 두 가지 경우를 모두 고려하였다.

3. 모델 실험

무향실 내에 Fig. 1처럼 강철 파이프로 만든 원형 봉(circular rod array)을 격자형으로 배열하였는데 점진적으로 단면이 변하는 효과를 보기 위해 같은 단면을 갖는 봉을 세로로(파의 진행방향) 5개씩 모두 5가지 종류를 배열하였으며 가로로는 단면적이 큰 경우($\phi 48$)는 17개에서 가장 작은 경우

31개($\phi 27$)까지 배열하였다. 면적비는 5 종류의 봉 모두 대략 60% 정도로 같은 비율이 되도록 하여 주파수 이동효과가 발생하도록 하였다.

음원으로는 스피커를 사용하였으며 Fig. 2처럼 스피커와 실린더 집합체 중간에 위치한 고정 마이크로폰에 대해서 실린더 집합체 뒤에 위치한 마이크로폰의 음압과의 상대적인 비를 측정하였다. 표 1에는 모델실험에 사용된 봉의 크기와 면적비, 예상되는 차단주파수를 나타냈는데 차단 주파수는 참고문헌 [6]에 근거한 것으로 가장 낮은 주파수대역의 밴드 갭을 나타낸다.

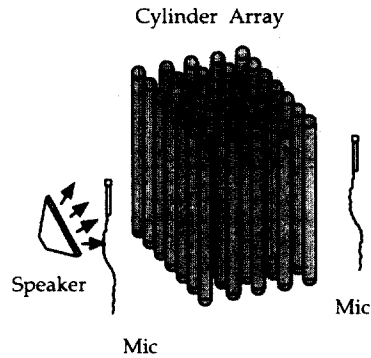


Fig. 1 Cylinder array in an-echoic room

Table 1. Size of band gap model

구분	1	2	3	4	5
직경 (mm)	48	42.5	34	31.8	27.2
격자 간격 (mm)	55	48	39	36	31
단수	5	5	5	5	5
실린더 수	17	21	25	27	31
면적비 (%)	59.8	61.6	59.7	61.2	60.5
차단 주파수 (kHz)	2.9-4.8	3.3-5.4	4.1-6.7	4.4-7.2	5.2-8.4

총 실린더 수는 $5 \times (17 + 21 + 25 + 27 + 31)$
 $=605$ 개이다.

실린더 집합체가 없는 상태에서 스피커로부터 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m 떨어진 거리에서 음압을 측정하여 상대적인 크기를 비교한 결과 주파수 대역별로는 차이가 있지만 대략적으로 점음원에 해당하는 거리 자승에 반비례하여 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 2에는 위에서 본 실험 장치 개요와 스피커 위치, 측정점을 나타냈다.

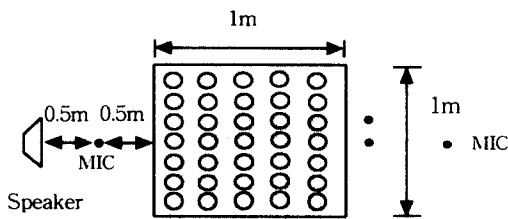


Fig. 2 Source and receiver position

실린더 봉 집합체는 가로 세로 높이가 각각 1m이며 스피커는 전면에서 1m 떨어져 있다. 고정된 마이크는 스피커와 실린더 집합체 사이 중앙에 있으며 다른 마이크는 실린더 집합체 후면으로 20cm 씩 떨어져서 측정하였다. 마이크는 바닥에서 0.5 m 높이에 있다.

Fig. 3에는 직경 48 mm의 실린더만 세로로 5개 ($5 \times 17 = 85$ 개) 있는 상태에서 실린더 어레이 표면으로부터 0.2 m 떨어진 수음점에 대해 스피커 앞 0.5 m에 고정된 위치에 대한 상대적인 비를 측정하여 BEM을 사용하여 계산한 차단효과(Attenuation, dB)와 비교하였다. 비교한 양은 $20 \log |P_2/P_1|$ 로 거리감쇠에 의한 양을 보정해준 값이다. BEM 계산에서는 실린더 당 16개의 node를 사용하였다. 측정점은 중앙선을 따라 원통 봉 표면에서 0.2 m 떨어져 있으며 Fig. 4, 5 모두 적용된다.

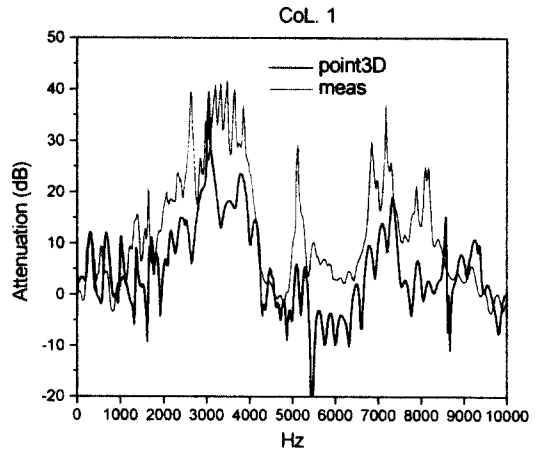


Fig. 3 Attenuation (dB) when only first five columns of cylinder of ϕ 48mm exist.

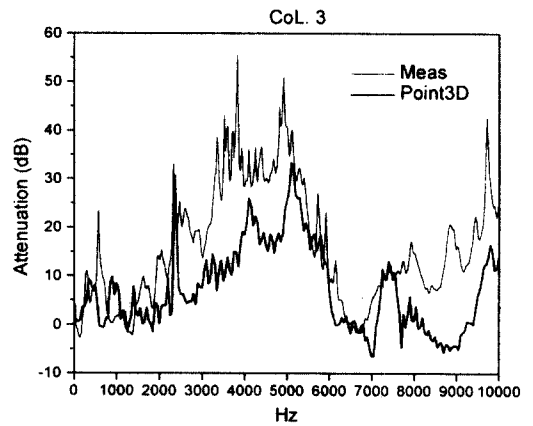


Fig. 4 Attenuation (dB) when five columns of 3rd cylinder of ϕ 34mm exist.

Fig. 4에는 직경 34 mm의 실린더만 세로로 5개 ($5 \times 25 = 125$ 개) 있는 상태를, Fig. 5에는 직경 27 mm의 실린더만 세로로 5개 ($5 \times 31 = 155$ 개) 있는 상태의 차단값(Attenuation, dB)을 BEM 값과 비교하였다. 전반적으로 BEM 계산과 측정치는 주파수 대역별 양상은 비슷하나 차단 값은 측정치가 더 높은 레벨을 보인다. 그러나 주파수 대역 폭은 표 1에 제시된 값과 다소 차이를 보인다.

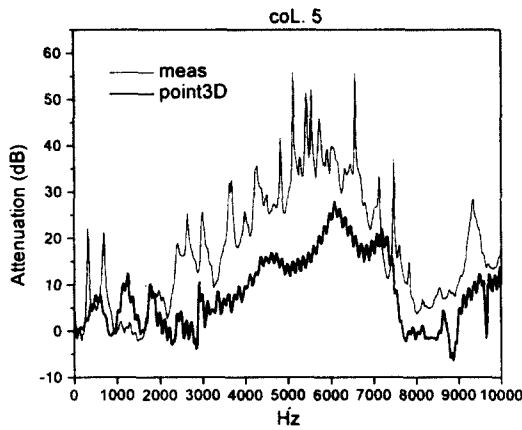


Fig. 5 Attenuation (dB) when last five columns of cylinder of ϕ 27mm exist

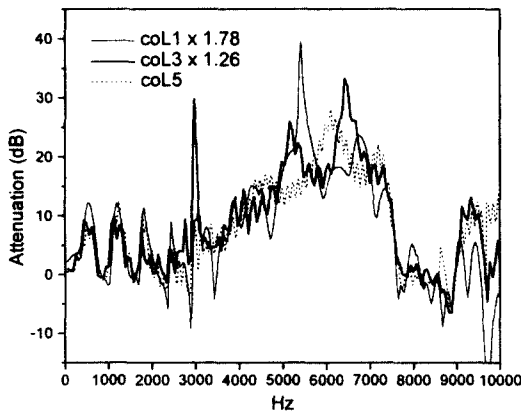


Fig. 6 Comparisons of attenuation of 1st, 3rd and 5th cylinder columns for point source (BEM)

Fig. 6에는 1단(ϕ 48), 3단(ϕ 34) 및 5단(ϕ 27)의 실린더가 세로로 각각 5개씩 존재하는 경우 BEM에 의한 차음값을 비교한 것으로 실린더의 직경과 간격은 같은 비율을 유지하기 때문에 주파수에 대해 이동한 상태로 가정할 수 있다. 따라서 5단의 실린더(직경 27 mm)는 그대로 두고 1단(직경 48 mm)은 $48/27=1.78$ 배, 3단(직경 34 mm)은 $34/27=1.27$ 배를 주파수에 곱해 이동시킨 뒤 비교한 것으로 전반적인 모양은 비교적 일치함을 알

수 있다. Fig. 7은 Fig. 6과 같은 내용이나 BEM 계산시 소음원을 점음원(point source) 대신 평면파(plane wave)를 가정한 것으로 역시 처음 밴드폭의 형상은 대체로 일치함을 알 수 있다.

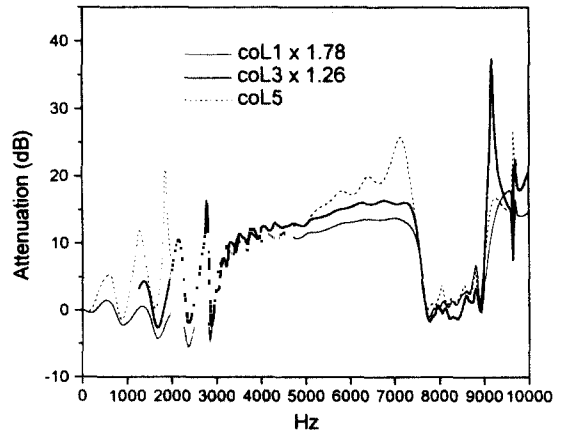


Fig. 7 Comparisons of attenuation of 1st, 3rd and 5th cylinder columns for plane wave source (BEM)

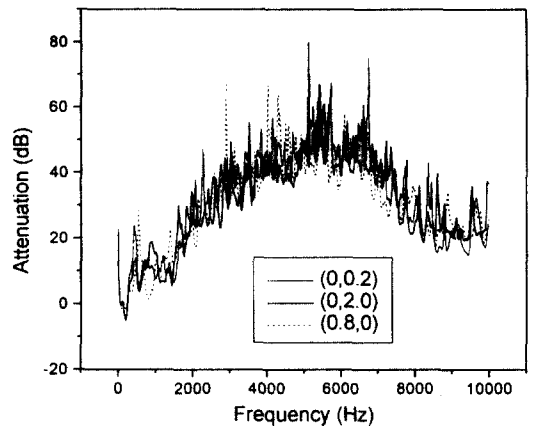


Fig. 8 Attenuation when 1st, 3rd and 5th cylinders exist.

Fig. 8은 1단, 3단 및 5단의 실린더가 동시에 존재할 때 세 위치(표면에서 0.2 m, 0.8 m)에서 계측된 차음손실 값을 비교하였는데 거의 전 주파수대

역에 걸쳐 밴드 갭이 존재하며 위치에 관계없이 같은 양상을 보인다. Fig. 9은 5단의 모든 실린더가 있을 때의 차음손실 값으로 Fig. 8과 비슷한 양상을 보인다.

본 연구에서 사용한 실린더는 각 그룹별로 세로로 5개 뿐으로 무한대로 가정된 기존 연구와는 큰 차이가 있으며 실린더의 길이도 무한대가 아니므로 실제로는 바닥에서의 반사도 영향을 미친다. 또한 소음원도 이상적인 점음원과는 국부적으로 큰 차이를 보이므로 이론 계산과 모델 실험과의 결과가 다른 원인으로 작용한다.

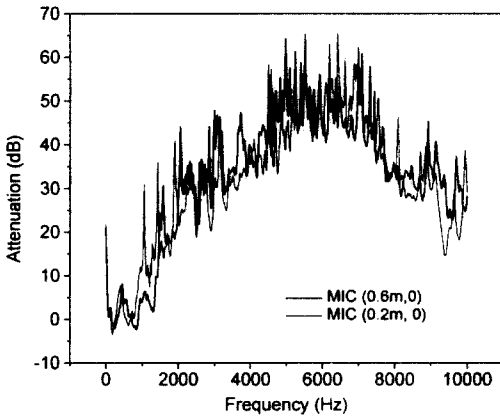


Fig. 9 Attenuation when all cylinders exist.

4. 결론

재질이 다른 두 가지 이상의 물질을 주기적으로 배열한 상태에서 발생하는 밴드 갭 현상은 특정 주파수대역의 음파만 차단할 수 있다는 점에서 앞으로 매우 응용 가능성이 높다. 특히 흡음재를 사용하지 않으며 구조의 형상으로만 흡음효과를 얻는다는 점에서 새로운 형태의 소음기 (silencer)로 활용될 수도 있다. 밴드갭 현상은 음파 뿐만이 아니고 진동의 차단에도 응용될 수 있다.

그러나 밴드갭 현상을 이용한 구체적인 설계에 이르기까지에는 아직 밝혀지지 않은 점이 많으며

지금까지 주로 계산에 이용된 모델은 지나치게 단순화되었다는 점에서 많은 문제점이 있다. 다양한 모델에 대한 계산수단의 개발과 모형실험을 통해 구체적인 데이터의 확보가 중요하며 이를 근거로 실용적인 소음제어 수단으로서의 밴드갭 현상의 연구가 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- [1] Yablonovitch, E., 1987, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Physical Review Letters*, Vol. 58, pp. 2059-2061.
- [2] Montero, F. R., Jimenez, E., and Torres, M., 1998, "Ultrasonic band gap in a periodic two-dimensional composites", *Physical Review Letters*, Vol. 80, pp. 1208-1211.
- [3] Ye, L., Cody, G., Zhou, M., and Sheng, P., 1992, "Observation of bending wave localization and quasi mobility edge in two dimensions", *Physical Review Letters*, Vol. 69, pp. 3080-3083.
- [4] Martinez-Sala, R., Sancho, J., Sanchez, J. V., Gomez, V. and Llinares, J., 1995, "Sound attenuation by sculptures", *Nature*, Vol. 378, pp. 241.
- [5] Sanchez-Perez, J. V., Caballero, D., Martinez-Sala, R., Rubio, C., Sanchez-Dehesa, J., Meseguer, F., Llinares, J., and Galvez, F., 1998, "Sound attenuation by two-dimensional array of rigid cylinders", *Physical Review Letters*, vol. 80, pp. 5325-5328.
- [6] Kushwaha, M. S., 1997, "Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp. 3218-3220.