

밴드 갭 현상을 이용한 소음·진동 차단

김현실*, 김재승, 강현주, 김봉기, 김상렬(한국기계연구원)

Noise and Vibration Reduction by using the Band Gap Phenomenon

Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Ju Kang, Bong-Ki Kim, and Sang-Ryul Kim (Acoustics Lab, KIMM)

hskim@kimm.re.kr

ABSTRACT

In periodic structures where two or more materials of different density and sound speeds are arranged, there exist stop bands, in which waves cannot propagate. In this paper noise and vibration reduction by using band gap phenomena is discussed. The general theoretical background is presented and experimental results for acoustic wave attenuation in 2D cylinder arrays are described.

1. 서 론

밴드 갭(Band Gap) 현상이란 주기적으로 배열된 구조에서 특정 주파수 밴드의 전자기파 또는 음향파/탄성파가 전혀 전달되지 않는 현상을 말한다. 밀도와 음속 등 물리적 성질이 다른 두 가지 종류의 물질이 2차원 또는 3차원으로 주기적으로 배열된 상태에서 나타나는데 배치 구조나 밀도, 음속 등 물성치에 따라 특정 전파 각도에서만 전파가 안되거나 또는 전파각도와 무관하게 모든 방향의 wave가 차단되는 밴드가 존재할 수도 있다.

주기적 배열과 차단주파수의 존재는 광학(optics)과 전자기분야에서 활발히 연구되었는데

Yablonovitch[1]는 PBG (Photonic Band Gap) material에 대해 연구하였다. Datta 등[2]은 평면파 전개방법(plane wave expansion method)을 사용하여 dielectric 구(sphere)로 형성된 주기적인 격자 구조에서 스칼라 파의 전파에 관한 밴드 갭 현상을 연구하였다.

Sanchez-Perez 등[3]은 Martinez-Sala 등[4]이 야의 조형물을 대상으로 얻은 음향파의 감쇠 측정결과를 모델을 만들어 무향실에서 측정하였는데 실린더 봉의 직경과 간격을 여러 가지로 바꾸어 실험하였으며 또한 이론적인 계산을 수행하였다. 차단 주파수밴드의 중심주파수는 Bragg 피크로 주어지며 이는 봉의 수와 관계없으나 음파의 차단효과는 봉의 수가 많아질 수록 커짐을 보였다.

Sigalas와 Economou[5]는 탄성파에 대한 밴드 갭의 주파수를 2차원 및 3차원 배열에 대해 계산하였다. Montero 등[6]은 초음파 탐상실험을 수행하였는데 1000 kHz에서 1120 kHz사이에 입사각에 무관하게 초음파의 전파가 불가능한 완전한 밴드 갭이 존재함을 보였다.

Kushwara 등[7]은 shear wave의 차단 밴드폭을 계산하였으며 Kushwara와 Halevi[8]는

square 격자 대신 hexagonal 배치를 고려하였는데 square 격자보다 밴드 폭이 더 넓은 것을 보였다. Kushwaha와 Djafari-Rouhani[9]는 물과 수은의 3차원 주기적배열에서 음향파의 밴드 갭 존재를 계산하였으며 Kushwaha[10]는 Matinez-Sala 등[5]이 수행한 조형물의 음파차단 효과에 대해서 여러가지 원통형 봉의 직경과 간격에 대해 밴드 갭의 주파수를 계산하였다.

2. 지배방정식 (Acoustic Wave)

밴드 갭 현상을 연구하기 위한 가장 단순한 구조로 길이가 무한한 원형 봉이 공기 중에 (또는 수중에) 주기적으로 배열된 2차원 구조의 음향파 전파를 생각할 수 있다. 원형 봉의 단위 cell 배치는 사각형, 삼각형, hexagonal 등 여러가지 형태의 격자 배치가 가능하며 모델의 단순화를 위해 원형 봉은 무한개가 반복된다고 가정한다. 또한 봉의 단면도 반드시 원형일 필요는 없으나 단면의 형상보다는 단위 cell 당 봉이 차지하는 면적비가 가장 중요한 요소이다.

음향파의 전파를 구하는 일반적인 방법은 주어진 경계조건을 만족하도록 wave equation을 푸는 것이나 무한대의 격자구조라면 이론적인 접근이 가능한데 단위 cell에 대해 반복되므로 변수를 Fourier series로 전개하는 것이 기본 아이디어이다[5-10]. 밀도와 음속이 불균일한 재질의 파동전파에 관한 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

음속과 밀도를 다음과 같이 단위 cell에 대한 Fourier series로 표시한다.

$$\frac{1}{\rho c^2} = \sum_{\mathbf{G}} \zeta(\mathbf{G}) e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{\mathbf{G}} \alpha(\mathbf{G}) e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}} \quad (3)$$

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

$$\phi = e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \sum_{\mathbf{G}} \phi_{\mathbf{K}}(\mathbf{G}) e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{K} 는 Bloch wave 벡터이다. σ 는 다음과 같이 주어지며 V_c 는 단위 cell의 체적(또는 면적)이다.

$$\sigma = \frac{1}{V_c} \int_{V_c} \frac{d\mathbf{r}}{\rho} e^{-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}}$$

식 (2)-(4)를 식 (1)에 대입한 후 정리하면 무한대 차수를 갖는 고유치 문제(eigenvalue problem)로 된다. 탄성파의 경우도 같은 방법으로 변수와 지배방정식의 해를 Fourier 전개하여 구한다.

\mathbf{K} 를 변화시켜 가며 고유치 문제를 풀고 이와 관련된 계산을 수행하면 밴드 갭의 범위를 수치적으로 찾아낼 수 있다. 보통 무한대 대신 400x400 정도의 매트릭스를 풀면 고유치가 2% 이내의 오차를 갖는 것으로 알려져 있다. 여기서 밴드 갭이라 정의함은 모든 각도에 대해 공통적으로 존재하는 차단 주파수 대역을 말한다.

2차원 원형 봉(cylinder)의 경우 최소 30% 이상 되어야 음향파의 밴드 갭[10]이 존재하며 이보다 작은 경우 입사파의 각도에 따라 좁은 밴드의 차단이 가능하다. 면적비가 커질수록 밴드 폭은 증가한다. 같은 면적비라면 간격이 커질수록 반비례하여 주파수대역이 낮아지는 효과를 보인다.

3. 모델 실험

무향실 내에 Fig. 1처럼 강철 파이프로 만든 원형 봉(circular rod)을 격자형으로 배열하였는

데 점진적으로 단면이 변하는 효과를 보기 위해 같은 단면을 갖는 봉을 세로로(파의 진행방향에 대해) 5개씩 모두 5가지 종류($\phi 48$, $\phi 42.5$, $\phi 34$, $\phi 31.8$, $\phi 27$)를 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. 본 연구에서는 2D BEM을 사용하여 해석하였으며 실린더는 강체로 가정하였다. 실린더 봉 집합체는 가로 세로 높이가 각각 1m이며 스피커는 전면에서 1m 떨어져 있다.

음원으로는 스피커를 사용하였으며 스피커와 실린더 집합체 중간에 위치한 고정 마이크로폰(P_2)에 대해서 실린더 집합체 뒤에 위치한 마이크로폰(P_1)의 음압과의 상대적인 비를 측정하여 다음과 같이 차단효과(attenuation)를 구하였다.

$$Att = 20 \log |P_2/P_1|$$

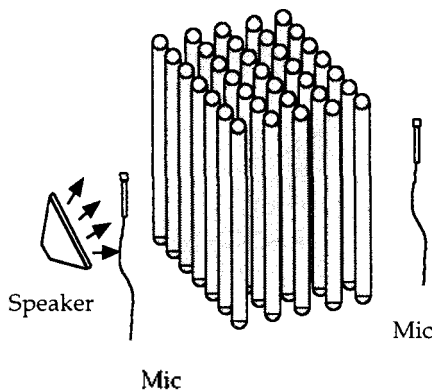


Fig. 1 Cylinder array in an-echoic room

Fig. 2에는 직경 48 mm의 실린더만 세로로 5개($5 \times 17 = 85$ 개) 있는 상태에서 실린더 아래 표면으로부터 0.2 m 떨어진 수음점에 대해 차단효과를 BEM 계산결과와 비교하였다. 전반적으로 BEM 계산과 측정치는 주파수 대역별 양상

은 비슷하나 차단 값은 측정치가 더 높은 레벨을 보인다.

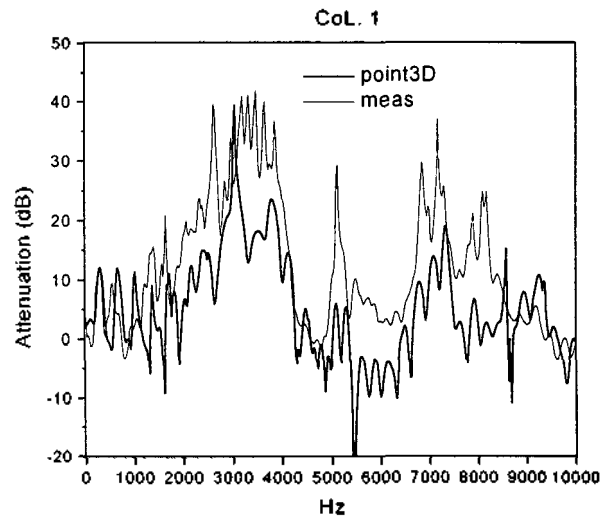


Fig. 2 Attenuation (dB) when only first five columns of cylinder of $\phi 48$ mm exist.

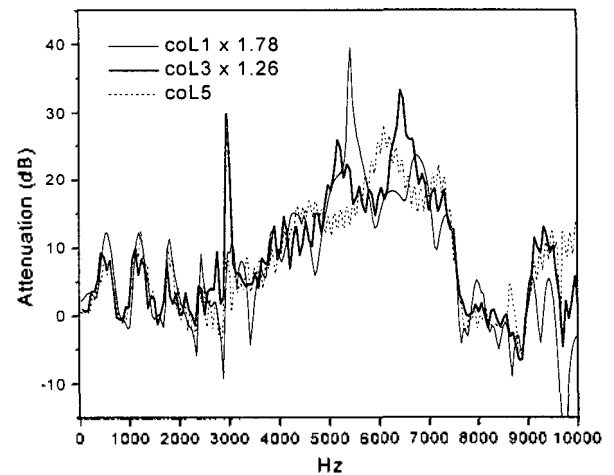


Fig. 3 Comparisons of attenuation of 1st, 3rd and 5th cylinder columns for point source (BEM)

Fig. 3에는 1단($\phi 48$), 3단($\phi 34$) 및 5단($\phi 27$)의 실린더가 세로로 각각 5개씩 존재하는 경우 BEM에 의한 차음값을 비교한 것으로 실린더의 직경과 간격은 같은 비율을 유지하기 때문에 주파수에 대해 이동시킨 값이다. 전반적인 모양은 비교적 일치함을 알 수 있다.

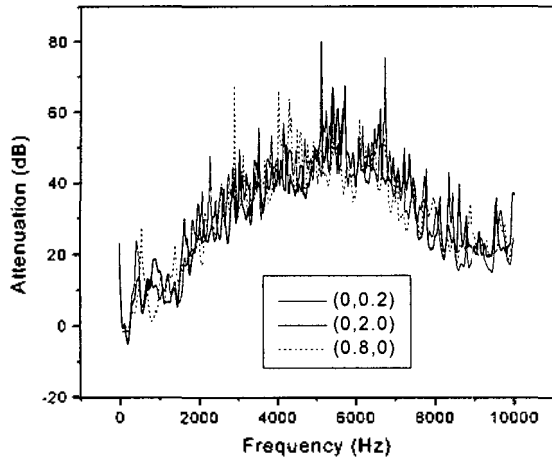


Fig. 4 Attenuation when 1st, 3rd and 5th cylinders exist.

Fig. 4는 1단, 3단 및 5단의 실린더가 동시에 존재할 때 세 위치(표면에서 0.2 m, 0.8 m)에서 측정된 차음손실 값을 비교하였는데 거의 전 주파수대역에 걸쳐 밴드 갭이 존재하며 위치에 관계없이 같은 양상을 보인다.

4. 결론

밴드 갭 현상은 특정 주파수 밴드의 소음 또는 진동을 차단할 수 있도록 구조물을 설계할 수 있기 때문에 소음/진동제어의 새로운 수단으로 활용할 수 있으며 이를 위해서는 다양한 모델에 대한 계산수단의 개발과 모델실험을 통해 구체적인 데이터의 확보가 중요하다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소 기술개발)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. Datta, S., Chan, C. T., Ho, K. M., and Soukoulis, C. M., "Photonic band gaps in periodic dielectric structures: The scalar-wave approximation", *Physical Review B*, Vol. 46, pp. 10650-10656.

3. 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.

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. Sigalas, M. M., and Economou, E. N., 1972, "Elastic and acoustic wave band structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 158, pp. 377-382.

6. 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.

7. Kushwara, M. S., Halevi, P., Dobrzynski, L., and Djafari-Rouhani, B., 1993, "Acoustic band structure of periodic elastic composites", *Physical review Letters*, Vol. 71, pp. 2022-2025.

8. Kushwara, M. S. and Halevi, P., 1994, "Band-gap engineering in periodic elastic composites", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1085-1087.

9. Kushwara, M. S. and Djafari-Rouhani, B., 1996, "Complete acoustic stop bands for cubic arrays of spherical liquid balloons", *J. Appl. Phys.* Vol. 80, pp. 3191-3195.

10. Kushwara, M. S., 1997, "Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp. 3218-3220.