

고차모드를 고려한 덕트 내 음파 분리 방법 연구

Study of Sound Wave Separation considering Higher-order Mode in a Duct

전수홍* · 정의봉†

Soohong Jeon and Weuibong Jeong

1. 서 론

공조 시스템을 구축하기 위하여 덕트를 많이 사용하고 있다. 엔진이나 발전 시스템 등에서 발생한 소음은 덕트를 통하여 외부로 전달되며, 이를 해결하기 위하여 다양한 소음기를 사용하고 있다. 이러한 소음기의 성능을 평가하기 위해서는 투파손실 및 삽입손실이 주로 사용되고 있다. 투파손실 및 삽입손실을 사용하기 위하여 일반적으로 덕트를 통과하는 음파는 평면파로 가정하게 되는데, 산업용 덕트는 단면적이 매우 넓기 때문에 단순히 평면파로만 가정할 수는 없다. 따라서 평면파에만 주로 사용되는 음파분리 방법을 확장하여 진행파와 반사파를 고차모드 영역에서도 분리할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 평면파 이후의 고차 모드를 가지는 경우에도 소음기의 성능을 더욱 정확하게 예측하기 위한 음파분리 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 음파 분리 이론

사각 단면을 가지는 덕트는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 사각 단면의 길이는 각각 L_x 와 L_y 이다. 옆면은 강체 벽이며, $z = 0$ 인 지점에서 평면파 형태의 음원이 발생하여 정상파의 형태를 가지면서 z 축 방향으로 진행한다고 가정한다.

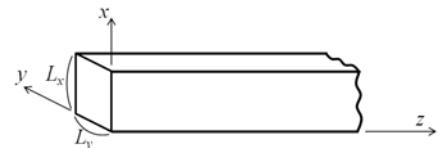


Fig. 1 Rectangular cross-section duct

이 때, 덕트 내부의 진행파와 반사파를 고려한 음압은 식 (1)과 같다.

$$p(x, y, z) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \left(P_{lm} e^{-jk_{lm}z} + Q_{lm} e^{jk_{lm}z} \right)$$

$$k_{lm} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{l\pi}{L_x}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{L_y}\right)^2}$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, L$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

여기서 L 은 x 방향의 모드차수이며, M 은 y 방향의 모드차수이다. 그리고 c 는 음속이며, P_{lm} 과 Q_{lm} 은 각각 진행파와 반사파의 크기이다.

덕트 내부의 진행파를 평면파라고 가정하면 $L = 0$, $M = 0$ 이며 2지점의 측정값으로부터 진행파와 반사파를 분리해낼 수 있다. 두 지점의 위치를 각각 $z = z_1$, $z = z_2$ 로 설정하고, 측정 위치별 음압을 행렬식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} e^{-jk_{00}z_1} & e^{jk_{00}z_1} \\ e^{-jk_{00}z_2} & e^{jk_{00}z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{00} \\ Q_{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 p_1 , p_2 는 각 위치에서 측정된 음압이다.

이를 확장하여 높은 모드차수를 가지는 음파를 분리하기 위한 행렬식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

† 교신저자; 정희원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr

Tel : 051-510-3088, Fax : 051-517-3805

* 부산대학교 대학원 기계공학부

$$\begin{bmatrix} e^{-jk_{00}z_1} e^{jk_{00}z_1} & \dots & e^{-jk_{LM}z_1} e^{jk_{LM}z_1} \\ e^{-jk_{00}z_2} e^{jk_{00}z_2} & \ddots & e^{-jk_{LM}z_2} e^{jk_{LM}z_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jk_{00}z_{N-1}} e^{jk_{00}z_{N-1}} & \dots & e^{-jk_{00}z_{N-1}} e^{jk_{00}z_{N-1}} \\ e^{-jk_{00}z_N} e^{jk_{00}z_N} & \dots & e^{-jk_{00}z_N} e^{jk_{00}z_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{00} \\ Q_{00} \\ \vdots \\ P_{LM} \\ Q_{LM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_N \end{bmatrix}$$

$N = 2(L+1)(M+1)$ (3)

여기서 N 은 측정점의 개수이다.

행렬식을 풀이하면 각 모드차수에 대한 진행파와 반사파를 계산할 수 있다.

2.2 해석 모델

진행파와 반사파로 분리하기 위한 음압을 측정하기 위하여 LMS.SYSNOISE를 이용하여 음향 FEM 해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 2와 같이 사각 단면의 단순확장형 소음기가 장착되어 있는 덕트로 설정하였다. 덕트의 입구에 평면파 가진을 하였으며, 해석주파수는 10Hz 간격으로 2000Hz 까지 설정하여 해석을 수행하였다.

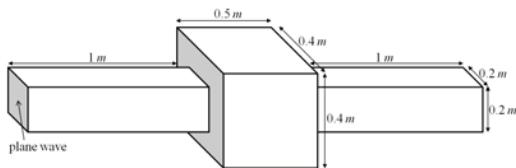


Fig. 2 Duct model for acoustic analysis

해당모델의 덕트 단면에 대한 평면파 이상 차단 주파수는 850Hz이며, 2000Hz 까지 고차모드를 분리하기 위해서는 2차 모드까지 고려하여야 하므로 18개의 위치에서 측정하였다. 측정지점은 입구 단으로부터 0.5m 떨어진 거리에서부터 0.005m 사이의 간격으로 배치하였다.

2.3 해석 결과

해석결과로부터 계산된 음압 데이터에서 각 모드 차수별 음압레벨을 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 각 모드 차수에 해당하는 차단 주파수를 지남에 따라서 해당 고차모드에 해당하는 음압레벨 그래프가 추가되는 것을 확인할 수 있다. 각 모드에 대한 음압레벨을 모두 합하여 단순히 평면파만 고려한 경우와

비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 첫 번째 차단 주파수인 850Hz 이후에 두 개의 그래프가 서로 다른 크기를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 평면파에서는 고려되지 않았던 고차모드의 성분이 더해져서 더욱 높은 레벨의 음압을 보여주고 있다.

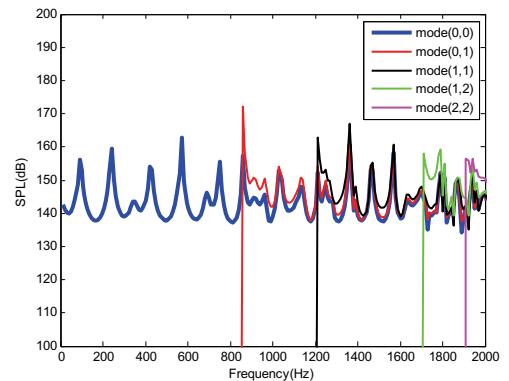


Fig. 3 Sound pressure level of each mode

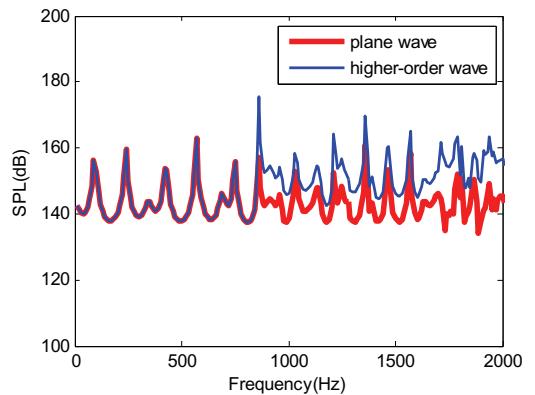


Fig. 4 Comparison of sound pressure levels

3. 결 론

지금까지 덕트를 통과하는 음파의 고차모드가 고려된 진행파와 반사파를 분리하기 위하여 행렬식을 구성하고, 해석을 통하여 평면파만 고려된 경우와 고차모드가 합해진 경우의 음압레벨을 비교해보았다. 고차모드를 고려하면 단순히 평면파만 고려된 경우의 음압레벨과는 많은 차이점이 있음을 알 수 있었다. 이러한 특성을 이용하여 덕트 내부를 지나는 음파를 더욱 정확하게 계산할 수 있으며, 덕트 및 다양한 소음저감 장치의 평가에도 활용하여 효과적인 공조 시스템의 설계에 반영할 수 있을 것이다.