

흡음재가 부착된 직방형 소음기의 전달 손실 예측 Prediction of transmission loss of parallelepiped plenum chambers with liner

김 회 전*, 이 정 권*, 박 철 민**
Hoi-Jeon Kim, Jeong-Guon Ih, Chul-Min Park

Key Words: Dissipative silencer (흡음형 소음기), Transmission loss (전달손실), Plenum chamber (상자형 소음기)

ABSTRACT

This paper deals with transmission loss of 3-dimensional rectangular plenum lined chamber. There are three kinds of rectangular plenum lined chamber: throughflow type, flow-reversal type, and end-in/side-out type. The combination of above three types of rectangular plenum lined chamber is used for the commercial HVAC system and automobile exhaust system. However, the ambiguity and complexity of sound absorbing material property and 3-dimensional property have impeded research. In this paper, the transmission loss of three kinds of rectangular plenum lined chamber is derived and calculated. The effect of increase of sound absorbing material is also considered. Analytical solution is calculated by using the locally-reacting property of sound absorbing material.

1. 서론

최근 강화되는 소음 규제 및 소음의 음질에 관한 관심을 부합하기 위해 관심 주파수 대역에서 효과적인 흡음재의 선택 및 설치가 고려되고 있다. 따라서 소음기의 반사형 음향 특성과 함께 흡음재의 특성 및 흡음재를 통하여 제어할 수 있는 주파수 대역에 대한 연구가 필요하다. 기존에는 주로 2 차원 소음기[1]나 원통형 소음기[2]에 대해서 성능 예측이 이루어져 왔다. 이는 2 차원 소음기나 원통형 소음기의 경우 좌표계의 좌표의 개수가 2 개면 충분하기 때문에 수식의 전개 및 해석이 간단해지는 장점이 있기 때문이다. 그러나, 소음기의 형상이 복잡한 경우에는 주로 수치해석방법을 이용할 수 있다 [3]. 그러나 여러 chamber 가 연결되는 경우 모델링이 복잡하고, 또 관련 변수들을 변화시켜가면서 소음기의 성능을 예측하고자 할 때, 시간과 인력을 많이 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 3 차원 사각 흡음형 소음기의 고차 모드 해석을 수행하고자 한다. 기존에 수행된 3 차원 사각 흡음형 소음기 해석의 경우, 소음기의 입구에 평면파 입사 가정을 사용하여 고차 모드 해석에 오차를 발생시키면, 사단자 정수를 구하지 않고 단순히 전달 손실을 구하였기 때문에 여러 소음기가 연성되어 있는 실제 상용차 소음기의 성능해석에는 부적합하다. 3 차원 사각 흡음형 소음기의 경우, 입구와 출구의 위치에 따라서 세가지

형태의 소음기, 즉, 순방향형(through-flow type), 역방향형(flow-reversal type), 그리고 끝단입구/측면출구형(end-in/side-out type) 가 존재한다. 본 연구에서는 상기 세 가지 소음기의 성능해석을 수행하여 각각의 전달 손실을 예측하였다. 여기서 흡음재의 성질은 Locally-reacting 으로 가정하였고, Delaney 와 Bazley 의 실험식을 사용하였다. 이때 흡음재 모델은 일반적으로 사용되는 폴리우레탄 폼의 흡음재의 유동 저항, 2300 mks rayl/m 과 Delany 와 Bazley 의 실험식을 사용하여 조금이라도 실제 상황에 가까운 전달 손실값을 구하도록 하였다.

2. 3 차원 사각 흡음형 소음기 이론

2.1. 순방향형(Through-flow type)

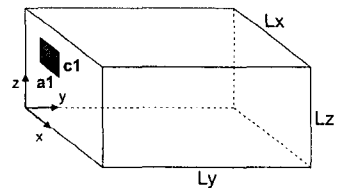


Fig. 1 A rectangular plenum chamber harmonically excited by a rectangular piston 1 uniformly moving back and forth.

순방향형 사각 흡음형 소음기의 성능을 예측하기 위해 먼저 상기와 같은 임피던스 경계조건을 가지는 사각상자의 한면에 강제 피스톤 경계조건이 주어진 경우를 생각한다. 강제 피스톤은 관심 주파수로 앞, 뒤 방향으로 가진 되고 있다. 이 경우 사각 상자 안은 아래와 같은 파동방정식이 성립한

* 한국과학기술원 기계공학과 Novic 센터 음향연구실 E-mail: kscagull@kaist.ac.kr; Tel: (042) 869-3075, Fax : (042) 869-8220

** 삼성전자㈜

다[6].

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \right] p = 0. \quad (1)$$

여기서 c 는 음파속도, p 는 음압을 나타낸다. 파동방정식 식(1)의 일반적 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi(x, y, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \left(e^{-jk_{xm}x} + B_{mn} e^{jk_{xm}x} \right) \left(e^{-jk_{zn}z} + C_n e^{jk_{zn}z} \right) \left(e^{-jk_{ym}y} + D_{mn} e^{jk_{ym}y} \right). \quad (2)$$

흡음형 소음기의 성능해석을 위해서는 상자 내부의 전파상수를 구하는 것이 중요하다. x, y, z 방향의 전파상수 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$k^2 = k_{xm}^2 + k_{ymn}^2 + k_{zn}^2. \quad (3)$$

이 때 x 와 z 방향으로의 전파상수를 구하기 위해서는 y - z 평면 및 x - y 평면에서의 임피던스 경계조건을 사용해야 한다. 예를 들어 y - z 평면의 임피던스식은 아래와 같이 주어진다:

$$\frac{\rho_0 c u_x(0, y, z)}{p(0, y, z)} = \frac{-\rho_0 c (\partial \Phi(0, y, z) / \partial x)}{j \omega \rho_0 \Phi(0, y, z)} = -\frac{\rho_0 c}{Z_x}, \quad (4)$$

$$\frac{\rho_0 c u_x(L_x, y, z)}{p(L_x, y, z)} = \frac{-\rho_0 c (\partial \Phi(L_x, y, z) / \partial x)}{j \omega \rho_0 \Phi(L_x, y, z)} = \frac{\rho_0 c}{Z_x}. \quad (5)$$

식(4-5) 및 x - y 평면에서의 임피던스 경계조건식을 풀면 아래와 같은 비선형 방정식을 얻게 된다:

$$\frac{k_x Z_x}{k_0 \rho_0 c} = \frac{-\cos(k_x L_x) \pm 1}{j \sin(k_x L_x)} = \begin{cases} -j \tan(k_x L_x / 2) \\ j \cot(k_x L_x / 2) \end{cases}, \quad (6)$$

$$\frac{k_z Z_z}{k_0 \rho_0 c} = \frac{-\cos(k_z L_z) \pm 1}{j \sin(k_z L_z)} = \begin{cases} -j \tan(k_z L_z / 2) \\ j \cot(k_z L_z / 2) \end{cases}. \quad (7)$$

식(6-7)에 수치적 기법[1]을 사용하면 x 와 z 방향으로의 전파상수를 구할 수 있다. 구해진 전파상수를 식(1)에 대입하고 상자 내부의 고유함수의 직교성을 사용하면, 강체 피스톤 1에 의하여 발생하는 사각 흡음형 소음기 내부의 속도 포텐셜을 구할 수 있다.

사각 흡음형 소음기 내부의 음압과 속도는 위에서 구해진 내부의 속도 포텐셜, $\Phi(x, y, z)$ 을 통하여 얻을 수 있다.

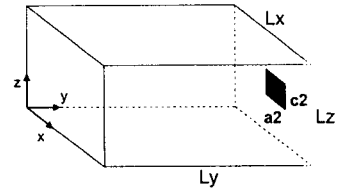


Fig. 2 A rectangular plenum chamber harmonically excited by a rectangular piston 2 uniformly moving back and forth.

다음은 강체 피스톤 2의 위치를 그림 2와 같이 강체 피스톤의 반대쪽에 위치시키고 상기에서 설명한 방법을 그대로 적용하면 강체 피스톤 2로 인한 흡음형 소음기 내부의 속도 포텐셜, 즉 음압과 속도를 구할 수 있다.

그림 1과 2의 피스톤을 합치면 순방향형의 흡음형 소음기가 구성된다.

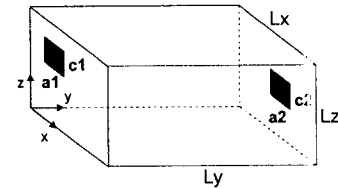


Fig. 3 Rectangular lined plenum chambers with rectangular inlet and outlet: a throughflow type

x - z 면에 존재하는 면적 S_i 를 가지는 i 번째 면적이 거리 y 만큼 떨어진 강체 피스톤 i 에 의해서 받는 음압을 아래와 나타낸다.

$$\bar{p}_{i'} = \frac{1}{S_i} \iint_{S_i} p_i dx dz. \quad (8)$$

위의 정의를 사용하면, 각각의 강체 피스톤에 작용하는 음압은 다음과 같다.

$$\bar{P}_1 = \bar{p}_{11} + \bar{p}_{12}, \quad \bar{P}_2 = \bar{p}_{21} + \bar{p}_{22}. \quad (9, 10)$$

위의 값을 통하여 아래와 같은 사단자 정수를 구할 수 있다[6].

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P}_2 \\ U_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

일단 사단자 정수가 구해지면 아래식을 이용하면 소음기의 성능을 나타내는 전달손실을 구할 수 있다.

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \left| T_{11} + \frac{S_2}{\rho_0 c} T_{12} + \frac{\rho_0 c}{S_1} T_{21} + \frac{S_2}{S_1} T_{22} \right| \right). \quad (12)$$

2.2. 역방향형(flow-reversal type)과 끝단입구/측면출구형(end-in/side-out type)

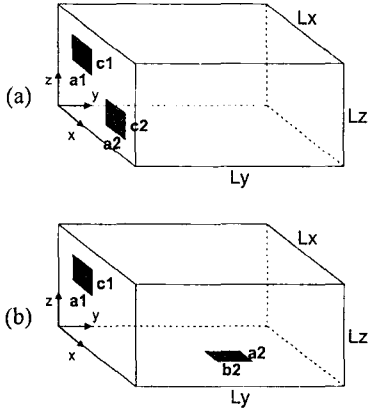


Fig. 4 rectangular lined plenum chambers with rectangular inlet and outlet: (a) a flow-reversal type; (b) an end-in/side-out type.

역방향형과 끝단입구/측면출구형의 소음기 해석은 순방향형과 거의 유사하며, 다만 2 번째 강제 피스톤 위치만 이동시켜서 내부 속도 포텐셜을 해석하면 된다.

3. 이론해 결과

그림 3 과 같은 순방향 사각 흡음형 소음기의 내부 치수를 각각 (0.15 m × 0.225 m × 0.15 m)로 하고 입구와 출구의 강제 피스톤의 치수는 (0.05 m × 0.05 m)로 정하였다. 소음기 내부의 고차 모드는 7 개까지 고려하였다.

아래 그림은 순방향 사각 흡음형 소음기의 전달손실을 흡음재의 두께를 변화시켜가면서 계산한 값이다. 흡음재의 두께를 0.1 mm로 얇게 했을 때의 전달손실값과, 강제 벽면 조건일 때의 전달손실값의 유사성을 통하여 코드의 검증을 수행하였다.

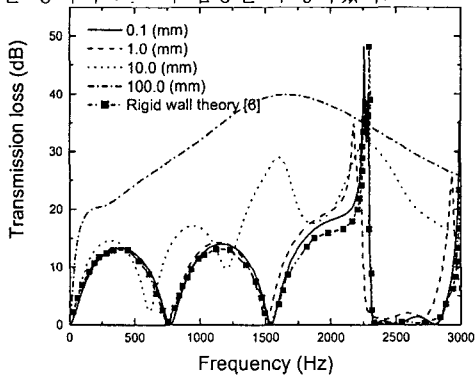


Fig. 5 Transmission loss of rectangular lined plenum chambers: through-flow type.

아래 그림들은 각각 역방향 사각 흡음형 소음기(출구위치(0.025 m, 0.0 m, 0.125 m)) 및 끝단입구/측면출구(출구위치는 중앙) 사각 흡음형 소음기의 전달손실을 흡음재의 두께를 변화시켜가면서 계산한 값이다.

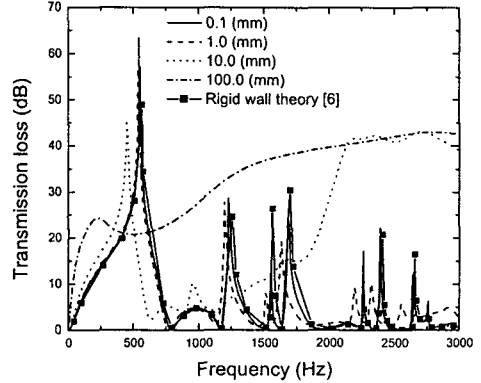


Fig. 6 Transmission loss of rectangular lined plenum chambers: flow-reversal type.

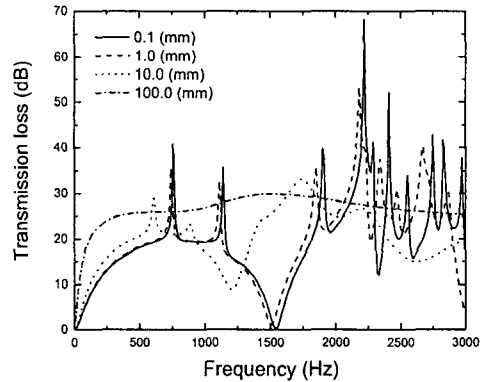


Fig. 7 Transmission loss of rectangular lined plenum chambers: end-in/side-out type.

흡음재를 얇게 한 경우, 기존의 강제벽면 조건일 때의 결과[6]와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

흡음재 두께를 점점 증가시킬 경우, 날카로운 피크 값들이 사라지고, 전반적으로 전달손실 값이 평탄해지고 있다. 또한 흡음재의 두께가 증가되면 소음기의 부피가 커지는 효과를 발생시켜, 첫번째 골의 주파수 값이 감소하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

Locally-reacting 성질을 가진 흡음재가 장착된 3차원 사각 흡음형 소음기의 이론해를 유도하고, 흡음층의 두께가 얇을 때, 강제형 소음기의 이론해와 거의 같게 됨을 확인하였다. 또, 흡음재 두께 변화에 의한 전달손실의 변화를 분석하였으며, 이 방법론은 추후 실험 및 수치해석 등의 방법과 비교하여 그 당위성을 입증할 계획이다..

후 기

본 연구는 BK 21 과 NRL (National Research Laboratory) 에서 일부 보조를 받았습니다.

참고문헌

- (1) A. Cummings, "High frequency ray acoustics models for duct silencers," J. Sound Vib. 221, 681~708 (1999).
- (2) A. Cummings and I.-J. Chang, "Sound attenuation of a finite length dissipative flow duct silencer with internal flow in the absorbent", J. Sound Vib. 127, 1~17 (1988).
- (3) 정지훈, 이정권, 1999, "경계요소법을 이용한 소음기의 전달 손실 예측시의 실제 문제점 및 해결방안," 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1001 ~ 1004.
- (4) A. Cummings, "The attenuation of lined plenum chamber in ducts: 1. Theoretical models", J. Sound Vib. 61, 347~373 (1978).
- (5) A. Cummings, "Sound attenuation of a finite length dissipative flow duct silencer with internal mean flow in the absorbent," J. Sound Vib. 127, 1~17 (1988).
- (6) J.-G. Ih, "The reactive attenuation of rectangular plenum chambers," J. Sound Vib. 157, 93- 112 (1992).