

패널형 소음기의 투과손실 특성 연구

Transmission Loss Characteristics of the Panel Type Silencer

서상현*·김양한**

Sang-Hyun Seo and Yang-Hann Kim

Key Words : Helmholtz Resonator(헬름홀쯔 공명기), Transmission Loss(투과손실), 4-Pole Parameter(4 단자 정수), Two-Microphone Method(두 개의 음향 탐촉자 방법)

ABSTRACT

This paper deals with transmission loss characteristics of the panel type silencer to control low frequency noise. The panel type silencer is composed of many Helmholtz resonators by side branch. Each resonator has high transmission loss on the narrow band of its resonance frequency. Direct arrangement of the resonators increases mainly the magnitude of transmission loss. If we arrange the resonators in a row, the peak and band of transmission loss are increased. This makes the resonator array to have high transmission loss in the broader band. Using this idea, we design a silencer that has broader band characteristics and smaller volume.

1. 서론

소음기(Silencer)는 덕트나 파이프를 통과하는 소음은 줄이되 통과하는 유동은 가급적으로 유지하려는 것을 목적으로 하는 소음제어 장치이다. 이러한 소음기의 종류는 크게 흡음형(Dissipative Type)과 반사형(Reflective Type)으로 나눌 수 있다. 흡음형 소음기는 음파가 전파될 때 흡음재로 인한 고체부분과 유체부분의 연성작용에 의한 에너지 소산을 이용하기 때문에 특히 저주파 영역에서 좋은 흡음 성능을 지닌다. 그러나 저주파 영역에서는 연성작용이 저하하여 흡음성능이 현저히 떨어지고 장기간 사용하게 되면 흡음재의 일부가 부식, 파손될 수 있다는 단점이 있다. 반사형 소음기는 유로면의 급확대나 축소 및 공명기를 부착하여 임피던스 부정합(Impedance Mismatching)에 의한 음파의 반사, 간섭 작용을 이용하여 소음을 줄이는 방식이다.

특히 헬름홀쯔 공명기(Helmholtz Resonator)는 다른 인자들에 비해 상대적으로 큰 부피를 갖는 공동(Cavity)과 좁은 목(Neck)으로 이루어져 있는 음향기구로 공명주파수에 해당하는 영역에서 높은 흡음성능을 가진다. 공명기의 공명주파수는 공동과 목의 크기 비에 따라 결정되기 때문에 원하는 주파수 영역으로의 설계가 용이하다. 따라서 이러한 헬름홀쯔 공명기의 특성을 이용하여 제어하기

힘들고, 여러 분야에서 점점 심각해지고 있는 저주파 영역에서의 소음제어를 목적으로 일반 소음기보다 부피는 줄이고 소음성능은 뛰어난 소음기 설계를 그 목적으로 한다.

본 연구는 다양한 공명기를 여러 방법으로 배열하여 제어하고자 하는 저주파 영역의 소음저감을 위해 기본 이론과 함께 간단한 실험들을 수행하고 그 특성에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 공명기를 이용한 소음기의 투과손실

소음기 내에서의 투과손실 특성은 Fig.1 과 같이 각 요소로 나누어진 입구와 출구에서의 음압(Sound Pressure) P, 체적속도(Volume Velocity) U 의 관계에 의한 4 단자 정수(4-Pole Parameter)로 구성된 식 (1)의 전달행렬(Transfer Matrix) [T]을 이용하여 나타낼 수 있다.

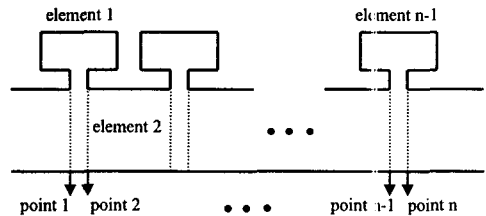


Fig.1 Elements of duct using resonators

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : ssh77@mail.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

투과손실(Transmission Loss : TL)은 식 (2)에서와 같이 소음기 입구와 출구에서의 입사 파워레벨 (L_{wi})과 투과 파워레벨 (L_{wt})의 차로 정의된다.

$$TL = L_{wi} - L_{wt} = 10 \log_{10} \left| \frac{\text{incident power}}{\text{transmitted power}} \right| \quad (2)$$

여기서 전달행렬을 이용하여 전체 요소 사이의 투과손실을 구하면 식 (3)과 같다.

$$TL = 20 \log_{10} \left| \left(\frac{Z_n}{Z_1} \right)^{1/2} \frac{T_{11} + T_{12} / Z_n + Z_1 T_{21} + (Z_1 / Z_n) T_{22}}{2} \right| \quad (3)$$

덕트의 입구와 출구에서 단면적은 동일하므로 $Z_1 = Z_n = Z_D$ 는 덕트 내에서의 음향임피던스를 의미한다. 식 (3)을 이용하여 다양한 공명기들의 투과손실을 이론적으로 예측하는 것이 가능하다.

다수의 공명기를 덕트에 부착하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있는데 기본적으로 덕트의 길이 방향(직렬 배열)과 단면 방향(병렬 배열)으로의 배치를 생각할 수 있다. 이 절에서는 이러한 기본적인 모델에 대한 투과손실 특성에 대해 살펴보고 이것을 토대로 실제 적용 가능한 모델에 대해 알아보려고 한다.

2.1 직렬 배열

다수의 공명기를 사용한 모델에 앞서 우선 하나의 공명기가 부착되어 있는 경우에 대해서 살펴보자. 음파가 진행하는 덕트(이 경우 예는 $50 \times 50 \text{mm}^2$)에 Fig.2 과 같이 하나의 공명기가 부착되어 있는 경우 음압과 체적속도의 연속성을 이용하여 전달행렬을 구하면 잘 알려진 바와 같이 식 (4)와 같다.

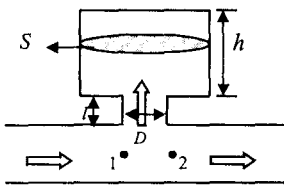


Fig.2 Helmholtz resonator with a duct

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = [T_{\text{resonator}}] \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$Z_h = \frac{\rho c}{S_h} \{0.0072 + jk(l + 0.75D)\} \quad (5)$$

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{2 + Z_D \left(\frac{1}{-jZ \cot kh + Z_h} \right)}{2} \right| \quad (6)$$

여기서 k 는 파수(Wave Number)를 말하고, 식 (5)의 Z_h 는 홀의 공극 임피던스를 말한다. 이 실험식은 J. W. Sullivan⁽¹⁻²⁾이 제안한 실험식에서 실수항을 본 연구에서 수행한 실험결과를 고려하여 변형한 것이다. S_h 은 홀의 단면적이고, l (25mm) 은 목의 길이, D (10mm)는 홀의 직경이다. Z ($= \rho c / S$)는 음향 임피던스이다. 식 (6)은 식 (3)과 식 (4)를 사용한 공명기가 1 개일 때의 투과손실을 나타낸 식이다.

Fig.3 과 같이 공명기들을 음파의 진행방향(직렬)으로 배열하게 되면 소음기 전체의 전달행렬은

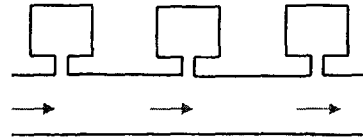


Fig.3 Direct arrangement of the resonators

$$T_{\text{tube}} = \begin{bmatrix} \cos kL & jZ_D \sin kL \\ j \frac{1}{Z_D} \sin kL & \cos kL \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_{\text{total}} = T_{\text{resonator}} \cdot T_{\text{tube}} \cdot T_{\text{resonator}} \cdot T_{\text{tube}} \cdots \quad (8)$$

식 (8)과 같이 공명기요소의 전달행렬과 직관요소의 전달행렬 $[T_{\text{tube}}]$ 의 곱으로 나타나게 된다. L (실제로 고려한 경우는 100mm)은 직관의 길이 즉, 공명기 간의 거리가 된다.

Fig.4 는 단일 공명기를 사용하였을 때와 공명기의 개수를 직렬로 증가시켜 갈 때의 투과손실을 비교하고 있다. 예상한대로 같은 종류의 공명기를 사용하였기 때문에 공명 주파수(340Hz)에 해당하는 좁은 영역에서 높은 투과손실을 가짐을 알 수 있고, 공명기가 증가할수록 투과손실 산의 크기가 거의 선형적으로 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 대역폭은 크게 넓어지지 않는다는 것을 볼 수 있다.

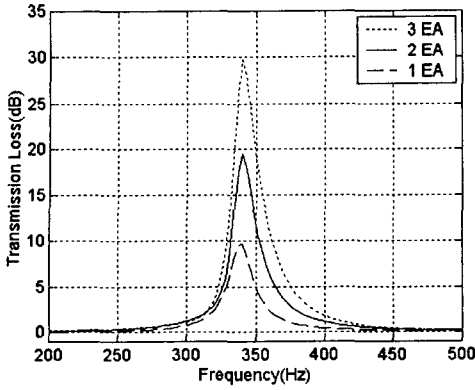


Fig.4 Theoretical result of direct arrangement with increasing number of resonator
 < D=10, l=25, L=100, Duct=50×50 (mm) >

2.2 병렬 배열

공명기의 또 다른 배열 방법으로 Fig.5 와 같이 단면 방향으로 여러 개의 공명기를 부착하는 형태를 생각해 볼 수 있다.

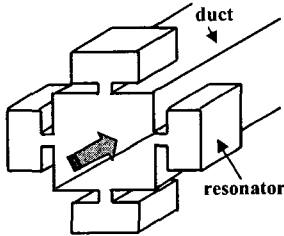


Fig.5 Arrangement of the resonators in a row

같은 종류의 공명기를 병렬로 배열하게 되면 전달 행렬은

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N}{-jZ \cot kh + Z_h} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

과 같이 구할 수 있고, 앞에서의 식 (3)에 대입하면

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{2 + Z_D \left(\frac{N}{-jZ \cot kh + Z_h} \right)}{2} \right| \quad (10)$$

과 같이 투과손실을 구할 수 있다.

여기서 N 은 하나의 열(row)에 위치하는 공명기의 개수가 된다. 이러한 경우의 투과손실 특성은 Fig.6 에서 볼 수 있듯이 공명기의 개수가 증가할수록 공명주파수(340Hz)를 중심으로 투과손실 산의 크기는 로그함수적으로 증가하고 대역폭 또한 넓어지는 것을 알 수 있다.

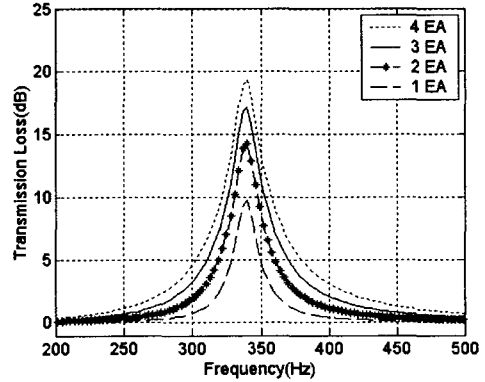


Fig.6 Theoretical result of arrangement in a row with increasing number of resonator
 < D=10, l=25, Duct=50×50 (mm) >

이는 여러 개의 공명기 홀이 가지는 단면적의 총합과 같은 크기의 하나의 홀을 가지고 그의 공명주파수에 맞게 설계한 하나의 공동을 갖는 경우와 동일한 투과손실을 가진다. 이렇게 설계된 하나의 공명기는 부피가 매우 커지기 때문에 병렬 배열이란 그런 큰 공명기를 여러 개로 나누어 소음기 설계에 유연성을 줄 수 있다는데 의미가 있다고 하겠다.

2.3 패널형 소음기

앞에서 공명기를 직렬 및 병렬 배열했을 때의 각각 투과손실이 어떻게 변하는지 살펴보았다. 공명기를 직렬로 배열했을 때는 대역폭은 크게 넓어지지 않으나 개수가 증가함에 따라 공명주파수에서 투과손실이 상당히 커짐을 알 수 있었고, 반면 병렬로 부착했을 때는 투과손실의 대역폭이 커지는 특성을 관찰할 수 있었다.

따라서 공명기를 이용하여 넓은 주파수 대역의 소음을 효율적으로 제어하기 위해서는 이러한 특성을 다 포함할 수 있도록 Fig.7 과 같이 공명기들을 직렬과 병렬 배열의 조합된 형태를 생각할 수 있다. Fig.7 과 같은 패널형 소음기에서 투과손실에 영향을 미치는 대표적인 파라미터

(Parameter)로 각 공명기의 공명주파수와 배열순서를 들 수 있다. 다음 절에서는 우선 실험을 통하여 패널형 소음기의 투과손실 특성에 대해 살펴보고, 공명기들의 공명주파수와 배열순서가 투과손실에 어떤 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

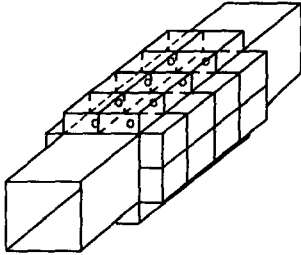


Fig.7 Panel type silencer using resonator array

3. 투과손실 측정

소음기의 투과손실을 측정하기 위한 방법으로 Fig.8 과 같이 두 개의 음향 탐촉자 방법(Two-Microphone Method)⁽³⁾을 사용하였다. 마이크로폰이나 반사면의 간격 등은 ASTM E1050-98⁽⁴⁾에서 제시한 규정에 따라 결정하였다.

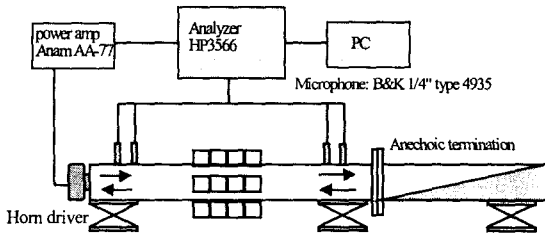


Fig.8 Experimental setup for TL measurement

3.1 패널형 소음기의 투과손실

Fig.4와 Fig.6에서 관찰할 수 있었듯이 패널형 소음기 개념으로 넓은 주파수 대역을 제어하기 위해서는 공명주파수가 다른 공명기들을 부착하는 방법을 생각할 수 있다. 이러한 방법의 효과를 검증하기 위해 단순한 형태의 패널형 소음기로 Fig.9와 같은 모델로 257Hz, 334Hz, 387Hz, 447Hz의 공명기를 각각 병렬방향으로 4개씩, 그림과 같은 배열 순서로 실험을 수행하였다. 결과를 살펴보면 Fig.10에서와 같이 각각의 공명주파수에서 큰 값을 가지면서 다른 종류의 공명기에 의한 다양한 임피던스 부정합면 서로 간의 영향으로 보다

넓은 영역에서 투과손실이 증가하게 되는 현상을 관찰할 수 있다. Fig.7과 같은 형상으로 공명기 서로 간의 공명주파수 차이를 줄이고, 또한 많은 개수의 공명기를 사용한다면 상당히 높은 투과손실을 얻을 수 있게 된다.

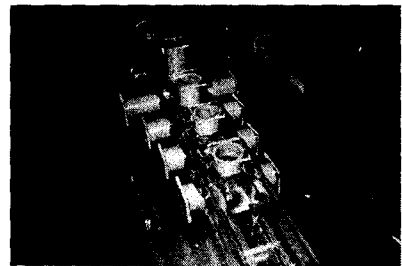
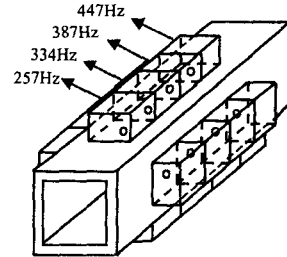


Fig.9 Panel type silencer using each 4 resonators (257Hz, 334Hz, 387Hz, 447 Hz)

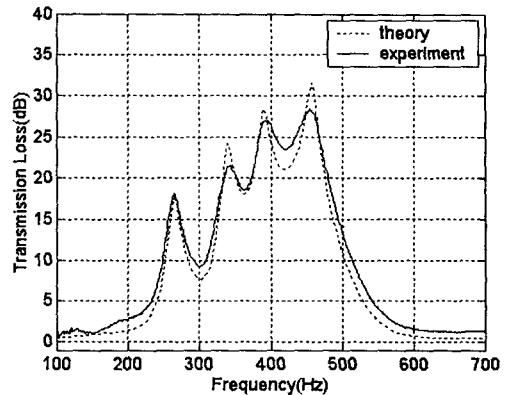


Fig.10 Comparison between the experimental and theoretical result of the panel type using each 4 resonators

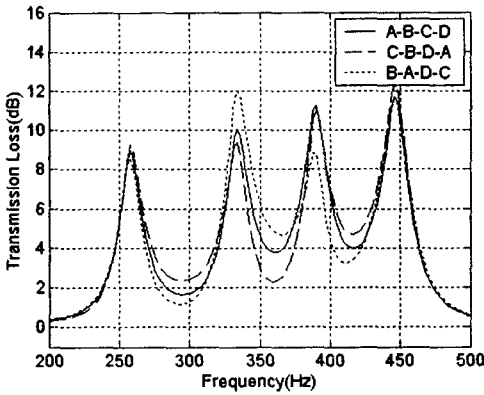
$\langle D=10, l=25, L=100, \text{Duct}=50 \times 50 \text{ (mm)} \rangle$

3.2 배열 순서에 따른 특성

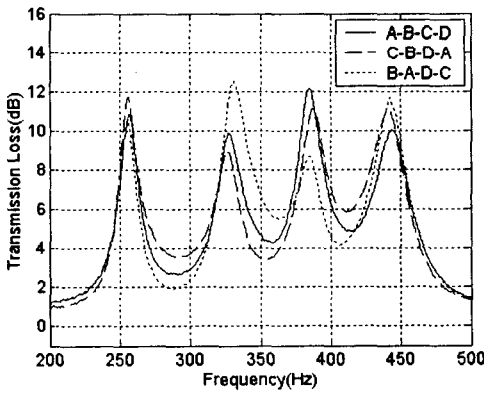
이 절에서는 패널형 소음기에서 공명주파수가

다른 공명기의 배열 순서를 달리했을 경우 투과손실에 미치는 영향에 대해 살펴보기로 한다.

Fig.11 은 공명주파수가 각각 257Hz-(A), 334Hz-(B), 387Hz-(C), 447Hz-(D) 인 공명기를 1 개씩 사용하여 직렬방향으로 배열하되 순서를 다르게 하였을 때의 예측결과와 실험결과이다. 결과에서 보듯이 배열 순서에 따라 산과 골의 크기가 조금씩 변화한다는 것을 알 수 있다. 이것은 다양한 임피던스 부정합의 배열 순서가 달라지면서 주파수에 대한 투과손실이 변화하기 때문이다.



(a) Theory



(b) Experiment

Fig.11 Different arrangement of the resonators (A-257Hz, B-334Hz, C-387Hz, D-447Hz each 1 EA) <math>D=10, l=25, L=100, \text{Duct}=50 \times 50 \text{ (mm)}>

실험상으로는 공명기를 각각 1 개씩 사용한 경우이기 때문에 큰 차이를 나타내지는 않지만 병렬 방향으로 배열하는 공명기의 개수가 증가하면 배열순서에 따른 변화도 커지게 된다. 따라서 원하는 조건에 맞게 배열순서를 정할 수 있다. 하지만 어떤 특정 주파수에서 투과손실이 높기를 원한다

면 간단한 방법으로 그 주파수에 해당하는 공명기의 개수를 증가시키면 된다. 그러므로 이처럼 배열 순서를 달리하며 투과손실 변화를 관찰하는 이유는 일반적으로 관심주파수 영역에서 고른 투과손실을 얻기 위해서 특정 배열에 있어서 골이 깊게 나타나는 현상을 피하기 위해서이다.

결과에서 보면 순차적으로 배열했을 경우 골 부분(Minimum Point)에서 평균적인 크기를 가지므로 일반적으로 선택할 수 있는 모델이라 할 수 있겠다. 그리고 순차적인 모델로는 A-B-C-D 와 D-C-B-A 두 가지 종류가 있을 수 있는데 완전한 역순으로 배열했을 때는 수식상으로는 실험상으로 일치하는 투과손실을 가짐을 확인할 수 있었다.

4. 최소부피를 갖는 패널형 소음기의 제안

다른 소음기 모델과 비교해서 패널형 소음기의 장점은 넓은 덕트 내에 격벽 없이 임피던스 부정합에 의한 음파의 반사에 기인하여 소음을 줄이기 때문에 유동저항이 적고, 작은 부피로도 저주파 영역에서의 효과적인 소음제어를 위한 설계가 가능하다는 점이다. 따라서 공명기 형상과 배치 방법이 중요하다는 것을 알 수 있다.

그러한 점에 착안하여 Fig.12 와 같은 모델을 설계할 수 있다. 공명주파수에 따른 공명기 공동의 체적 차이가 발생시키는 부분을 최대한 활용하여 전체적인 크기를 줄일 수 있다.

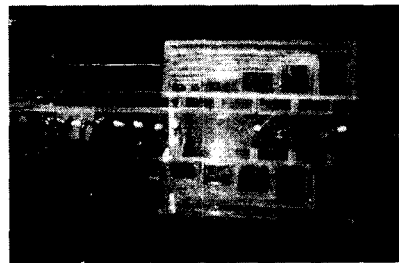
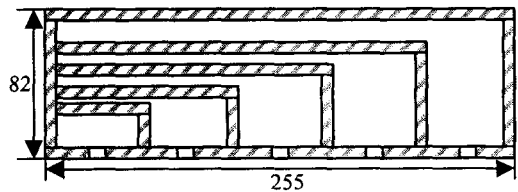


Fig.12 Shape of the model for smaller volume

다섯 종류의 공명기가 배열된 형태로 각각의 공명주파수는 196Hz, 269Hz, 335Hz, 413Hz, 500Hz를 갖고 홀의 크기와 간격, 공명기의 단면적은 같다. 총 길이가 225mm, 폭이 40mm, 높이가 82mm인데, 하나의 경우 만약 같은 단면적을 가지면서 가장 저주파수인 196Hz의 공명주파수를 가지려면 높이가 148mm가 되어야 하는데 이를 봄으로써도 공간 활용을 최대화한 형태라 할 수 있다. 물론 공명기의 단면적을 크게 한다면 높이 또한 더욱 줄일 수 있을 것이다. 그리고 이러한 모델 뿐만 아니라 다양한 응용 모델이 가능할 것이다.

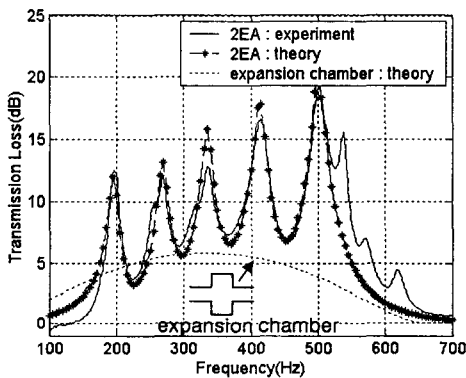


Fig.13 Theoretical and experimental result
< $D=10$, $l=20$, $L=50$, Duct= 50×50 (mm) >

Fig.13을 살펴보면 Fig.12의 모델을 2개 사용한 예측결과와 실험결과를 보여주고 있다. 이론치와 실험치가 유사하지만 실험치의 경우 540Hz, 580Hz, 620Hz 근처에서 피크가 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 공명기의 형상에서 길이가 긴 부분이 생김으로써 발생하는 길이 방향의 고차 모드 영향이라 생각된다.

패널형 소음기가 확장관형 소음기와 비교하여 어떠한 장점이 있는가를 알아보기 위하여, 패널형 소음기가 추가로 가지는 공명기들의 총 부피와 단순확장관(Expansion Chamber)의 덕트 부분을 제외한 부분의 부피를 동일하게 했을 경우에 투과손실을 비교하였다. 물론 같은 길이와 단면적을 가지는 덕트를 사용하였을 경우이다.

결과에서 확장관의 경우 원만한 산과 골이 고주파 영역에서도 반복되겠지만 관심주파수 영역을 기준으로 보면, 제어하고자 하는 저주파 영역에 대해 디자인된 패널형 소음기의 투과손실이 더욱 높다는 것을 알 수 있다. 결과는 2개를 사용하였

을 경우를 비교한 것이지만 그 수를 증가시킬수록 패널형의 확장관에 대한 부피비의 감소율은 더욱 커지게 될 것이다.

5. 결론

공명주파수에 해당되는 좁은 영역에서 높은 투과손실을 가지는 특성을 가지는 헬름홀츠 공명기의 배열 방법에 따른 투과손실 특성에 대해 알아보았다. 그리고 이러한 공명기를 패널형으로 설계하여 공간을 최소화하는 형태인 패널형 소음기의 투과손실 특성 또한 살펴보고 그 응용 가능성에 대해 확인하였다. 확장관이나 다공관의 경우와 비교해서 유동의 흐름이 있는 덕트 단면적에 대해 소음기가 가지는 체적비와 투과손실 특성에 대해 우수하다고 할 수 있다. 그리고 복잡한 형상을 지닌 장치에 있어서 소음기를 부착할 경우 유로를 따라 다양한 형상으로 공명기를 디자인할 수 있어 설계상 많은 이점을 가진다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의해 지원 받았으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. W. Sullivan, "A method for modeling perforated tube muffler components," J. Acoust. Soc. Am., Vol.66, pp.772-788, 1979.
- (2) J.W. Sullivan and M. J. Crocker, "Analysis of concentric-tube resonators having unpartitioned cavities," J. Acoust. Soc. Am., Vol.64, pp.207-215, 1978.
- (3) A. F. Seybert & D. F. Ross, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique," JASA, Vol.61, No.5, pp.1362-1370, 1977.
- (4) ASTM E1050-98, 1998, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System".