

# 공명기 배열을 이용한 소음기의 음향학적 특성

## Acoustic Characteristics of a Silencer by Using Array Resonators

서 상 현\* · 김 양 한\*

Sang-Hyun Seo and Yang-Hann Kim

(2004년 5월 31일 접수 : 2004년 9월 3일 심사완료)

**Key Words** : Helmholtz Resonator(헬름홀쯔 공명기), Transmission Loss(투과손실), Equivalent Impedance(등가 임피던스)

### ABSTRACT

Helmholtz resonator is used to reduce noise of the narrow frequency band. It has high transmission loss at its resonance frequency. The silencer that combines many resonators could control broadband noise at low frequency. To convey this rather simple idea, serial and parallel arrangement of resonators have been tested to obtain high transmission loss characteristics in the band of which are selects. Theoretical and experimental results explain these characteristics in the absence of mean flow. The change of acoustic characteristics by the resonance frequencies and resonators' arrangement are explained by using the equivalent impedance analysis that is defined in this paper. It shows that the transmission loss has a maximum value when the separation distance between each resonator is  $\lambda/4$  of its wavelength.

### 1. 서 론

일반적으로 소음기(silencer)는 원동기계류의 흡-배기구나 덕트를 통한 방사소음을 줄이기 위한 목적으로 사용된다. 단면적의 변화나 다공관 또는 공명기 등 다양한 요소를 이용하여 음파의 반사나 흡음을 통해서 소음을 줄이게 된다. 이러한 소음기 요소 중 헬름홀쯔 공명기(Helmholtz resonator)는 단일 주파수 제어를 위한 목적으로 많이 사용되고 있다. 공명기의 공명주파수는 공동과 목의 크기 비에 따라 결정되기 때문에 원하는 주파수 영역으로의 설계가 용이하고, 저주파수에서도 작은 부피를 가질 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 본 연구에서는 하나의 공명기가 아

닌 다수의 공명기 배열(직렬 및 병렬)을 이용하여 보다 넓은 저주파 영역에서 작은 부피를 가지면서도 우수한 소음제어 성능을 가지는 소음기의 음향학적 특성에 대해 살펴보고 이를 응용한 소음기 설계 방향을 제시하고자 한다.

공명기 배열을 이용하여 소음을 제어하려는 노력으로 다수의 공명기 배열을 이용한 패널(panel)로 저주파수의 넓은 영역에서 높은 흡음률을 가지게 하려는 연구<sup>(1)</sup>가 있다. 이 경우 공명기 배열을 통한 임피던스 특성 변화를 현실적으로 잘 이용하고 있다. 결국 공명기 배열에 의하여 만들어지는 임피던스가 공명기 배열, 공명기의 형태, 주파수 등과 어떠한 관계에 있는가를 잘 알아낸다면 이를 이용한 공명기 설계가 가능하다는 추론이 가능하다. 이러한 점에 착안하여 공명기 배열 특성을 대표하는 등가 임피던스(equivalent impedance), 즉 공명기 배열에 의하여 각각의 공명기들이 서로에게 미치는 영향을 고려한 임피던스 개념을 도출하고 그 적용성을 살펴보는 것이 필요하다. 이와 더불어 원하는 투과손실 특성을 얻기 위한 효과

† 책임저자 : 정희원, 한국항공우주연구원 구조그룹  
E-mail : ssh@kari.re.kr

Tel : (042) 860-2541, Fax : (042) 860-2233

\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

적인 공명기 배열 방법이 어떻게 되어야 하는지를 알 수 있다면 실질적 응용 또한 가능할 것이다.

## 2. 공명기 배열을 이용한 소음기의 투과손실 (Transmission Loss) 해석

공명기형 소음기는 덕트벽에 공명기를 부착하여 형성된 임피던스 부정합(impedance mismatch)으로 인한 음파의 반사 및 목에서의 에너지 소산에 의한 흡음을 통하여 소음을 줄이는 원리를 이용한다.

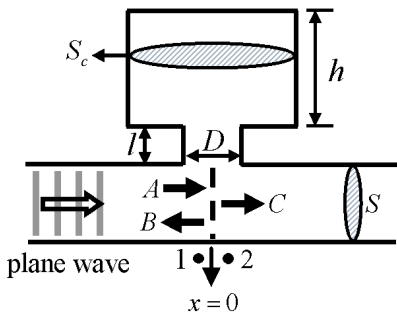
Fig. 1과 같이 하나의 공명기가 부착된 경우 덕트 내에 전파하는 음파의 주파수에 해당하는 파장이 관의 직경에 비하여 비교적 커서 평면파(plane wave)가 주로 전파되고, 반사파의 영향이 무시할 수 있을 정도이며 마하수(mach number)가 매우 작다면, 일반적으로 1과 2지점에서의 음압(pressure :  $P_1, P_2$ )과 체적속도(volume velocity :  $U_1, U_2$ )는

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

과 같은 전달행렬(transfer matrix)로 나타낼 수 있다.(2) 여기서  $Z_r$ 은 공명기의 임피던스이며

$$Z_r = -jZ_c \cot kh + Z_h \quad (2)$$

과 같이 쓸 수 있다.  $Z_c = \rho c / S_c$ 는 공명기 공동의 음향 임피던스,  $Z_h$ 는 공명기 입구의 공극 임피던스



$S_c$ : cross sectional area of cavity     $h$ : height of cavity  
 $l$ : length of neck     $D$ : diameter of neck  
 $S$ : cross sectional area of duct     $A$ : magnitude of incident wave  
 $B$ : magnitude of reflected wave     $C$ : magnitude of transmitted wave

Fig. 1 Helmholtz resonator with a duct

(hole impedance)를 나타내는 항이다. 이들 임피던스에 관련하여 여러 가지 모델들이 있으나 가장 많이 사용되는 것이 Sullivan<sup>(3, 4)</sup>이 제안한 실험식이다. 이 모델의 수정 보완된 형태를 사용할 수 있는 것은 물론이다. 본 연구에서도 보정을 위한 실험을 하고 이 결과를 고려하여

$$Z_h = \frac{\rho c}{S_h} \{0.0072 + jk(l + 0.75D)\} \quad (3)$$

와 같은 모델을 사용하기로 한다. 여기서  $S_h$ 는 홀의 단면적을 나타내고,  $k = 2\pi f/c$ 는 파수(wave number),  $\rho$ 는 공기의 밀도(density),  $c$ 는 음속(sound speed)을 나타낸다. 투과손실(TL)은 정의에 의하여 투과된 음파의 파워( $|C^2|$ )에 대한 입사파의 파워( $|A^2|$ )의 비이므로

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{A}{C} \right| \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

과 같이 쓸 수 있고, 다시 이것을 식 (1)을 이용해

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{T_{11} + T_{12}/Z + T_{21} \cdot Z + T_{22}}{2} \right| \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 식 (1)과 식 (5)를 이용하여 단일 공명기 경우의 투과손실을 구하면

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

으로 표현할 수 있다. 이러한 방법으로 구한 단일 공명기의 투과손실은 잘 알려진 바와 같이 해당 공명주파수(resonance frequency)의 좁은 영역에서 높은 투과손실을 갖는다.

보다 넓은 저주파 영역에서 높은 투과손실을 얻기 위한 방법으로 가능한 것은 선택한 주파수 영역 안에 분포된 공명기를 다양하게 배열하는 것을 생각할 수 있다. 배열 방법은 직렬 혹은 병렬 형의 배열을 생각할 수 있는데, 동일한 공명기를 덕트의 길이 방향인 직렬로 배열하게 되면 공명기의 개수가 증가할수록 공명주파수에서 투과손실은 크게 증가하지만 밴드는 거의 변화하지 않고, 덕트의 둘레 방향인 병렬배열을

하게 되면 공명기의 개수가 증가할수록 투과손실의 크기는 로그함수적으로 증가하면서, 공명주파수를 중심으로 폭이 넓어지는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 따라서 공명기를 이용하여 넓은 주파수 대역의 소음을 효율적으로 제어하기 위해서는 이러한 특성을 조합하는 방법이 합리적일 것이고, 따라서 Fig.2와 같이 조합된 형태가 가능하게 보인다. 동일한 공명기의 배열보다는 관심주파수 영역에 해당되는 서로 다른 공명주파수를 가진 공명기들의 배열이 더욱 합리적임은 물론이다. 이러한 개념이 구체적으로 어떻게 현실적 적용성을 갖는지 알아보기 위해서 한 예로서 Fig.2와 같이 각각 257 Hz, 297 Hz, 361 Hz, 413 Hz의 공명주파수를 갖는 공명기들을 직렬 및 병렬 방향으로 8 개씩 배열한 경우에 대해서 살펴보기로 하자. 여기서 공명기 홀 간의 간격( $L_i$ )은 우선 모두 100 mm로 일정하게 두었다.

공명기 각각의 임피던스  $Z_{r(i)}$ 는 식 (2)에서 나타낸 바와 같이

$$Z_{r(i)} = -jZ_{c(i)} \cot kh_{(i)} + Z_{h(i)} \quad (i=1,2,3,4) \quad (7)$$

와 같이 표현된다. 또한 각각의 공명주파수( $f_i$ )를 가지는 공명기를 나타내는 전달행렬을  $T_{f_i, Hz}$ 로 표현하면 각 요소의 전달행렬의 곱으로써 전체 전달행렬을 구할 수 있다. 즉,

$$T_{tot} = T_{257Hz} \cdot T_{tube} \cdot T_{297Hz} \cdot T_{tube} \cdot T_{361Hz} \cdot T_{tube} \cdot T_{413Hz} \quad (8)$$

따라서,

$$T_{tot} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N}{Z_{r1}} & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{tube} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N}{Z_{r2}} & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{tube} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N}{Z_{r3}} & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{tube} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N}{Z_{r4}} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

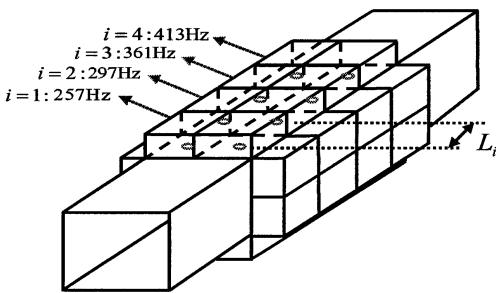


Fig. 2 Panel type silencer using resonator array

와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $T_{tube}$ 는 각각의 공명기 요소 사이에 위치하는 직관 요소의 전달행렬을,  $N$ 은 병렬방향으로 공명기의 개수를 나타낸다. 투과손실 특성은 앞에서 언급한 바와 같이 식 (9)의 전달행렬과 식 (5)의 투과손실 식을 이용하면 Fig.3과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 3을 살펴보면 대체적으로 종류가 다른 각각의

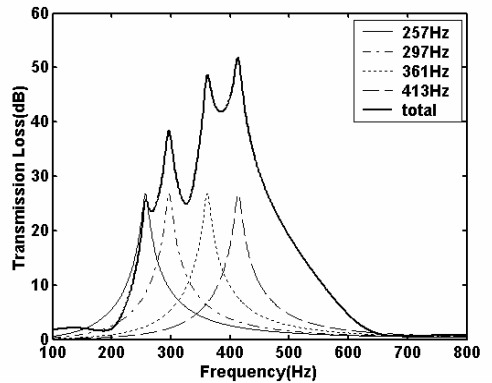


Fig. 3 Transmission loss of panel type silencer ( $N=8$ ,  $S=50*50 \text{ mm}^2$ ,  $N=10 \text{ mm}$ ,  $l=25 \text{ mm}$ ,  $L=100 \text{ mm}$ )

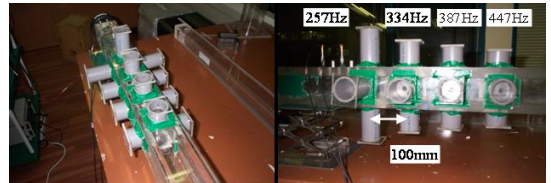


Fig. 4 Experiment setup ( $N=4$ ,  $S=50*50 \text{ mm}^2$ ,  $D=10 \text{ mm}$ ,  $l=25 \text{ mm}$ ,  $L=100 \text{ mm}$ )

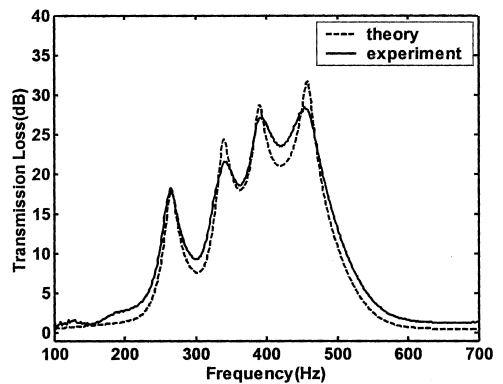


Fig. 5 Comparison between the experimental and theoretical result of Fig. 4

공명기들에 의한 투과손실이 합해져서 전부 조합했을 경우의 투과손실이 됨을 알 수 있다. 그러나 좀더 세밀하게 관찰하여 보면 단순히 각각의 투과손실이 더해진 효과보다 추가적인 효과가 있음을 볼 수 있다.

이를 검증하기 위해 Fig. 4와 같은 실험을 통하여 그 이론 예측과 실험 결과를 Fig. 5에 비교하였다. 한 변의 크기가 50 mm인 정사각 덕트의 측면에 공명기를 배열하고, 무반사끝단을 설치하였다. 실험 방법은 두 개의 음향 탐촉자를 이용한 음파 분리 방법을 이용하여, 입사파와 반사파를 분리하여 투과손실을 구하였다.<sup>(6)</sup> 여기에서는 257, 334, 387, 447 Hz의 공명기를 병렬로 4개씩 간격 100 mm를 두고 직렬로 배열하였다.

지금까지의 결과에서 확인할 수 있듯이 다양한 공명기들의 직렬, 병렬배열 조합으로 제어하고자 하는 주파수 영역에서 대역폭이 넓어지면서도 높은 투과손실을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

이제 이러한 소음기 모델을 적용하여 그 배열에 따른 특성을 파악하고 목적에 맞는 적절한 설계를 하는 방법이 필요하다. 이러한 설계를 위한 안내자(guide line)가 필요한데, 다음 절에서는 여러 종류의 공명기의 배열에 의해 형성되는 덕트 내에서의 임피던스를 하나의 임피던스 모델로 보는 즉, 등가임피던스(equivalent impedance)의 개념을 통하여 전체 시스템의 특성을 이해하는 방법을 보기로 하자. 이러한 개념이 어떻게 설계를 위한 안내자가 되는지 또한 살펴보고자 한다.

### 3. 등가 임피던스 해석

Fig. 6과 같은 소음기 모델에서 공명기의 배열 및 간격에 따른 음향학적 특성 변화를 등가 임피던스 모델을 통하여 살펴보기로 한다.

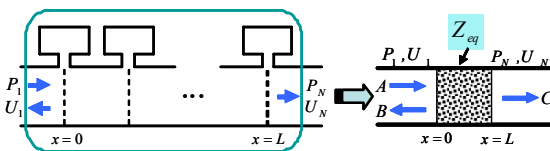


Fig. 6 Equivalent impedance of a silencer using array resonators

### 3.1 병렬 조합

먼저 Fig. 1과 같이 공명기에 의해 형성되는 임피던스 면( $x=0$ )에서의 음의 전파에 따른 음압 반사계수(pressure reflection coefficient)와 투과계수(pressure transmission coefficient)를 구하면 다음과 같다. 경계 지점에서의 입사파와 반사파, 투과파의 크기를  $A, B, C$ 라 했을 때 1과 2 지점에서의 음압과 체적속도를 공간 상에서 표현해보면

$$\begin{aligned} P_1 &= Ae^{-jkx} + Be^{jkx} & P_2 &= Ce^{-jkx} \\ U_1 &= \frac{1}{Z}(Ae^{-jkx} - Be^{jkx}) & U_2 &= \frac{1}{Z}(Ce^{-jkx}) \end{aligned} \quad (10)$$

과 같다. 여기서  $Z = \rho c/S$ 는 덕트의 음향 임피던스이다. 경계  $x=0$ 에서의 음압에 대한 반사계수( $R_{coeff}$ )와 투과계수( $T_{coeff}$ )는

$$R_{coeff} = \frac{B}{A}, \quad T_{coeff} = \frac{C}{A} \quad (11)$$

과 같이 쓸 수 있다.

병렬 방향의 공명기의 개수  $N$ 를 고려하고, 전달렬을 이용하여 1과 2지점 사이의 관계를 표현하면

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} & 0 \\ \frac{1}{Z_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

과 같고, 이는

$$P_1 = P_2 \quad (13)$$

$$U_1 = \frac{N \cdot P_2}{Z_r} + U_2 \quad (14)$$

의 관계가 있음을 알 수 있다. 식 (10)에  $x=0$ 을 대입하고 식 (11), 식 (13), 식 (14)를 이용하면

$$R_{coeff} = \frac{-N \cdot Z}{N \cdot Z + 2 \cdot Z_r} \quad (15)$$

$$T_{coeff} = \frac{2 \cdot Z_r}{N \cdot Z + 2 \cdot Z_r} \quad (16)$$

과 같이 임피던스 면에서의 반사계수( $R_{coeff}$ )와 투과계수( $T_{coeff}$ )를 공명기의 임피던스와 덕트의 음향 임피던스의 관계로 나타낼 수 있다.

여기서 구한 반사계수( $R_{coeff}$ )를 이용하여 덕트의 측면에 부착된 공명기 요소에 의해 덕트에 형성된 임피던스  $Z_{eq}$ 를 구하면

$$Z_{eq} = \frac{P_1}{U_1} = \frac{Z(A+B)}{A-B} = \frac{Z(1+R_{coeff})}{1-R_{coeff}} = \frac{Z \cdot Z_r}{N \cdot Z + Z_r} \quad (17)$$

과 같다.

Fig. 7에서는 공명기 개수의 증가에 따른 덕트의 음향 임피던스에 정규화(normalization)한 등가 임피던스( $Z_{eq}/Z$ )의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 7를 살펴보면 공명기의 개수가 증가할수록 등가 임피던스의 실수항(Re)을 나타내는 레지스턴스(resistance)는 폭이 넓어진다는 것을 알 수 있고, 허수항(Im)인 리액턴스(reactance)는 공명주파수(200 Hz)에서 0을 지난다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 직렬 조합

다음으로 Fig. 6과 같이 직렬로 배열된 경우 전체 소음기 요소들의 전달행렬은

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdots \begin{pmatrix} P_N \\ U_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_N \\ U_N \end{pmatrix} \quad (18)$$

과 같이 나타낼 수 있고, 식 (18)으로부터 다음과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1 &= T_{11} \cdot P_N + T_{12} \cdot U_N \\ U_1 &= T_{21} \cdot P_N + T_{22} \cdot U_N \end{aligned} \quad (19)$$

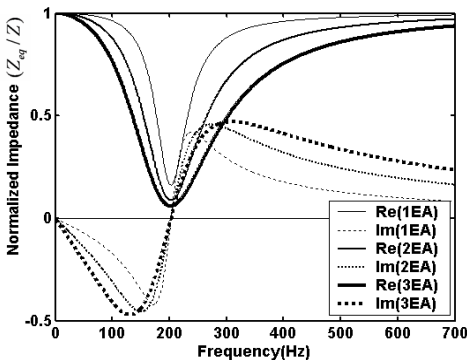


Fig. 7 Impedance change of parallel arrangement varying the number of resonator (Re: resistance, Im: reactance)

식 (11)과 식 (19)를 이용하여 앞과 유사한 방법으로 구하게 되면

$$\begin{aligned} T_{coeff} &= \frac{2}{T_{11} + T_{12}/Z + T_{21} \cdot Z + T_{22}} \\ R_{coeff} &= \frac{T_{11} + T_{12}/Z - T_{21} \cdot Z - T_{22}}{T_{11} + T_{12}/Z + T_{21} \cdot Z + T_{22}} \end{aligned} \quad (20)$$

과 같이 전체 전달행렬을 이용하여  $x=0 \sim L$  지점을 포함하는 전체 시스템에 대한 음압의 반사계수( $R_{coeff}$ )와 투과계수( $T_{coeff}$ )를 구할 수 있다.

Fig. 8의 경우는 직렬배열의 가장 간단한 경우인 두 개의 공명기가 배열되었을 경우인데, 전기적 모델로의 상사(electrical analogy)<sup>(7)</sup>를 통해서 등가 임피던스를 계산할 수 있다. 먼저 2번 공명기 요소와 공명기 사이 직관요소의 경우를 먼저 고려해보면 2번 공명기에 의해 덕트의 끝단에 형성된 임피던스를  $Z_L$ 이라고 볼 수 있다.

끝 단의 임피던스가  $Z_L$ 이고, 길이  $L$ 인 덕트의 입구에서의 임피던스  $Z_0$ 를 구해보면 다음과 같다. 우선 앞의 식 (17)를 통해서  $Z_L$ 은

$$Z_L = \frac{Z \cdot Z_2}{Z + Z_2} \quad (21)$$

와 같다.

Fig. 8의 덕트 내에서 각각 크기  $A, B$ 를 가지고 진행하는 음파를 고려하면

$$P(x) = Ae^{-jk(x-L)} + Be^{jk(x-L)} \quad (22)$$

와 같이 표현할 수 있고

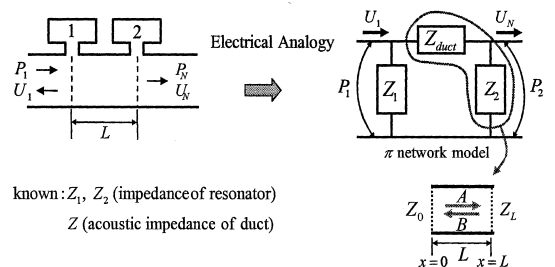


Fig. 8 Electrical analogy of simple model using two resonators ( $P$ : sound pressure,  $U$ : volume velocity)

$$Z_L = \frac{P(L)}{U(L)} = Z \cdot \frac{A+B}{A-B} \quad (23)$$

$$Z_0 = \frac{P(0)}{U(0)} = Z \cdot \frac{Ae^{jkl} + Be^{-jkl}}{Ae^{jkl} - Be^{-jkl}} \quad (24)$$

과 같이  $x=0, x=L$ 에서의 임피던스를 구할 수 있다. 식 (23), 식 (24)에서  $A$ 와  $B$ 를 소거하면

$$Z_0 = Z \cdot \frac{(Z_L/Z) + j \tan(kL)}{1 + j(Z_L/Z) \tan(kL)} \quad (25)$$

과 같이 덕트 입구에서의 임피던스  $Z_0$ 를 구할 수 있다. 마지막으로 1번 공명기를 고려해 주면

$$Z_{eq} = \left\{ \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_0} \right\}^{-1} \quad (26)$$

과 같이 전체 등가 임피던스를 구할 수가 있다.

이 경우는 두 개의 공명기를 사용하였을 때이지만 더 많은 공명기가 직렬 및 병렬로 배열되더라도 앞에서 언급한 방법으로 등가 임피던스를 구할 수 있다. 이러한 등가 임피던스 해석을 통해서 공명기 배열에 따른 특성 변화를 예측할 수 있다. 따라서 원하는 투과손실 특성을 얻기 위한 가장 효과적인 배열 방법을 결정할 수 있게 된다.

### 3.3 공명기 간격에 따른 특성 변화

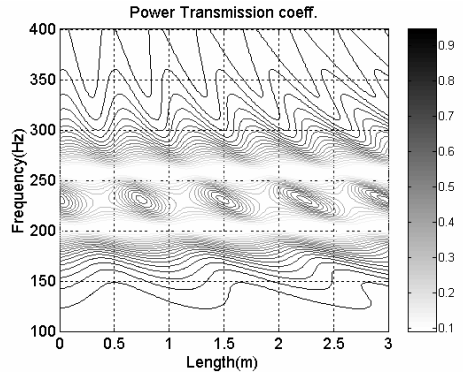
여기서 공명기 배열에 따른 전체 소음기의 음향학적 특성 변화를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 간단한 경우로 두 개의 공명기(202 Hz, 258 Hz)를 사용하여 홀 간의 간격의 변화에 따른 특성을 예측해보면 다음과 같다.

Fig. 9는 202 Hz(앞) → 258 Hz(뒤)의 순서로 배열했을 경우의 공명기 홀 간의 간격에 따른 파워투과계수(power transmission coefficient:  $T_{\Pi} = |T_{coeff}|^2$ ), 파워 반사계수(power reflection coefficient:  $R_{\Pi} = |R_{coeff}|^2$ ), 흡음률(absorption coefficient:  $D_{\Pi} = 1 - R_{\Pi} - T_{\Pi}$ )에 대한 특성변화를 나타내고 있다.

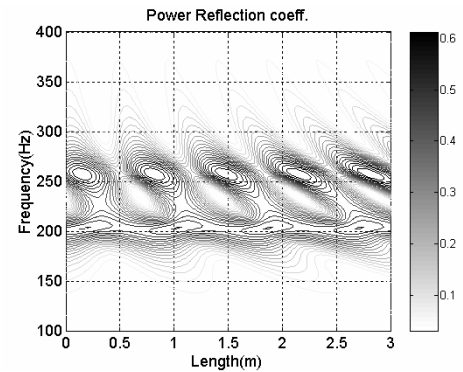
공명기 간의 간격의 변화에 따라 전체적으로 그 해당 주파수의  $\lambda/2$ 를 기준으로 주기적인 특성을 나타낼 수 있다. 그리고, 두 공명 주파수 사이에 존

재하는 골에서는  $\lambda/4$ 에 해당하는 간격에서 최대 투과손실을 가짐을 알 수 있다.

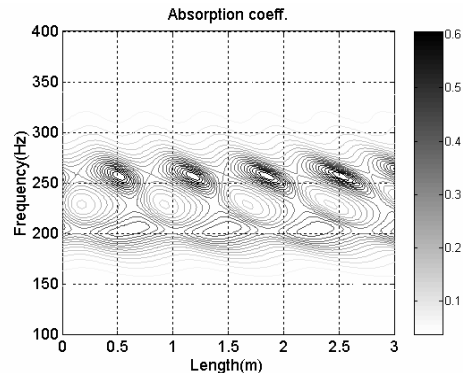
앞쪽에 위치한 공명기에 의한 임피던스 부정합면에서 고른 반사가 일어나고, 뒤쪽에 위치한 공명기에서는 공명기의 간격에 따른 영향이 크게 나타난다.



(a) Power transmission coefficient



(b) Power reflection coefficient



(c) Absorption coefficient

Fig. 9 Acoustic characteristics varying the distance between resonators(202 Hz (front) → 258 Hz(rear))

그리고 흡음은 뒤쪽의 공명기에서 두드러진다. 258 Hz(앞) → 202 Hz(뒤)로 배열 순서를 바꾸었을 경우에는 파워투과계수( $T_{11}$ )의 역수에 로그를 취한 값에 해당하는 투과손실( $TL$ )은 순서의 변화에도 동일한 값을 가지고, 반사계수와 흡음률은 202 Hz(앞) → 258 Hz(뒤)의 경우와 대칭적인 특성을 나타낸다.

등가 임피던스 해석을 통해서도 같은 현상을 관찰할 수 있는데, 공명기 배열 간격에 따른 등가 임피던스 변화를 Fig. 10에서 볼 수 있다.

임피던스의 레지스턴스 항은 에너지 소산과 관계하고, 리액턴스 항은 에너지 반사와 관계하는데, Fig. 9와 Fig. 10의 결과와 비교하면 레지스턴스가 큰 지점에서 흡음이 크게 일어나고, 리액턴스가 0을 지나는 지점에서 반사가 크게 일어난다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 임피던스 해석을 통해 소음기 내에서의 음향학적인 특성을 확인할 수 있고, 이를 이

용하여 공명기 배열 방법을 결정할 수 있다. 즉, 앞의 결과를 통해 순차적으로 공명기를 배열했을 때 인접한 두 공명주파수 사이의 골에 해당하는 주파수 파장의 1/4 간격으로 위치시켰을 경우 가장 우수한 투과손실 특성을 지님을 알 수 있으므로, 공명기 배열을 이용한 소음기의 설계 시 적용할 수 있다.

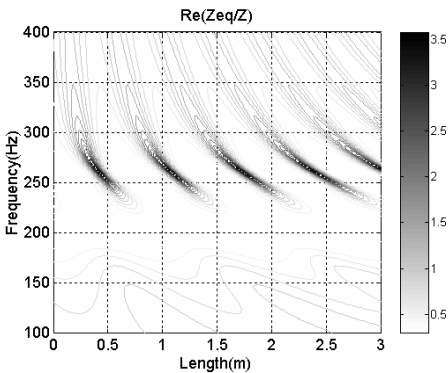
#### 4. 공명기 배열을 이용한 소음기의 설계

앞에서 Fig. 3의 경우는 단순히 공명기 홀 간의 간격(100 mm)을 통일하여 배열하였으나, 등가 임피던스 해석을 통한 공명기 홀 간의 간격에 대한 특성을 바탕으로

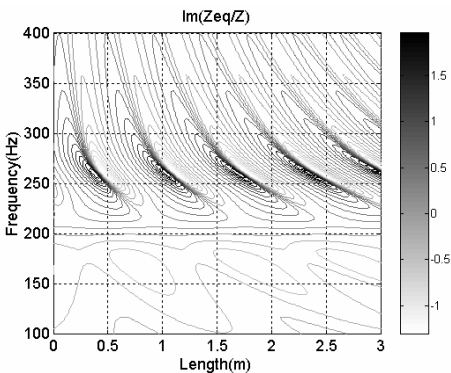
$$L_i = \frac{\frac{\lambda_i}{4} + \frac{\lambda_{i+1}}{4}}{2} = \frac{c(\frac{1}{f_i} + \frac{1}{f_{i+1}})}{8} \quad (27)$$

과 같이 각각의 공명주파수( $f_i$ )를 고려하여 인접한 두 공명주파수 사이 골에서의 주파수에 해당하는  $\rho/4$ 의 거리를 가지도록 공명기 홀 간의 간격을 결정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 간격을 결정했을 때 Fig. 2와 같은 모델( $f_i = 257$  Hz, 297 Hz, 361 Hz, 413 Hz)의 투과손실을 비교해 보면 Fig. 11와 같다.

Fig. 3과 비교했을 때 공명주파수를 중심으로 하는 관심주파수 영역에서 더욱 높은 투과손실을 가진다. 하지만 저주파수의 경우 파장이 길기 때문에 공명기 간격도 길어지게 되므로 소음기 전체의 길이가 길어져야 한다는 단점도 있다.



(a) resistance



(b) reactance

Fig. 10 Equivalent impedance varying the distance between resonators (202 Hz (front) → 258 Hz (rear))

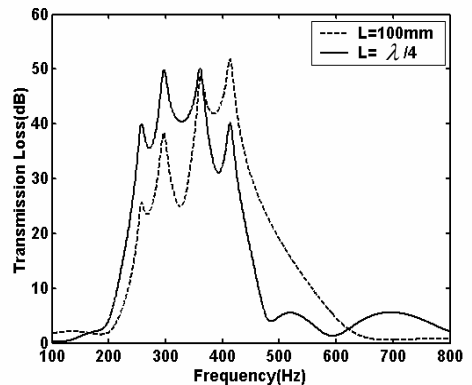


Fig. 11 Transmission loss of panel type silencer ( $N=8$ ,  $S=50*50$  mm<sup>2</sup>,  $N=10$  mm,  $l=25$  mm)

## 4. 결 론

## 참 고 문 헌

지금까지 공명기 배열을 이용한 소음기의 투과손실 특성에서부터 등가 임피던스의 해석에 대해 살펴보았다. 특정 저주파 영역에서 다양한 공명기의 조합을 통해 넓으면서도 높은 투과손실을 가지도록 소음기를 설계할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 등가 임피던스의 해석을 통해 공명기 배열 순서의 변화보다는 공명기 간격에 따른 변화가 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고 공명기 배열을 이용한 소음기 모델에서 중요한 것은 각각의 공명주파수 사이에 나타나는 골에서의 투과손실인데, 해당 주파수 파장의 1/4의 간격으로 공명기 간격을 배치했을 때 가장 높은 투과손실을 가진다. 따라서 소음기의 설계에 있어서 이를 고려하면 골이 깊지 않는 전체적으로 주파수 영역이 넓은 투과손실을 얻을 수 있다. 실제로 응용하는 경우에는 많은 경우 유동의 흐름이 존재하게 되는데 평균 유동의 속도가 마하수(mach number)에 비하여 10% 이내로 작은 경우에는 투과손실의 크기나 공명주파수의 변화가 크지 않으므로, 본 연구에서 제안하고 있는 등가 임피던스의 개념이 유효하다.<sup>(8)</sup>

## 후 기

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

(1) Kim, S.-R., Kim, M.-S., Kim, Y.-H. and Y.-W. Kim, 2003, "Absorptive Characteristics of Resonator Panel for Low Frequency Noise Control, and Its Applications," Inter-Noise 2003, Seogwipo, Korea, N932.

(2) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Duct and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc, pp. 55~85.

(3) Sullivan, J. W. and Crocker, M. J., 1978, "Analysis of Concentric-tube Resonators Having Unpartitioned Cavities", J. Acoust. Soc. Am., 64, pp. 207~215.

(4) Sullivan, J. W., 1979, "A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components", J. Acoust. Soc. Am., 66, pp. 772~788.

(5) 서상현, 2004, "공명기 배열을 이용한 저주파 소음저감용 소음기의 설계," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문.

(6) 강성우, 김양한, 1992, "두 개의 음향탐촉자를 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차해석," 한국소음진동공학회논문집, 제 2 권, 제 3 호, pp. 181~192.

(7) Firestone, F. A., 1932, "A New Analogy Between Mechanical and Electrical Systems," J. Acoust. Soc. Am., 4, pp. 249~267.

(8) Anderson, J. S., 1977, "The Effect of an Air Flow on a Single Side Branch Helmholtz Resonator in a Circular Duct", J. Sound. Vib. 52, pp. 423~431.