

# 흡음형 소음기의 음향성능 해석

°윤제원°, 김준호°, 김영찬°, 김두훈°

## Acoustic Performance Analysis of The Absorptive Mufflers

Je-Won Yoon, Joon-Ho Kim, Young-Chan Kim, Doo-Hoon Kim

### ABSTRACT

Acoustic performance of the absorptive mufflers used in air-conditioning and ventilating ducts, gas turbines, industrial fans influenced by the design parameters such as the length of mufflers, lining thickness, properties of the acoustic lining, and so forth. So we predicted the acoustic performance according to the design parameters. For the analysis, we assumed the radial propagation constant is locally reacted to the acoustic lining, and analyzed the acoustic performance based on the plane wave theory by using four-pole parameters.

### 1. 서론

흡음형 소음기는 반사형 소음기에 비해 배압의 영향이 작고, 중·고주파 대역에서 소음성능이 우수해 산업용 팬이나, 가스터빈, 공조설비등에 설치되어 널리 사용되고 있다.

흡음형 소음기의 음향성능은, 흡음재의 재질, 두께, 길이, 개구율, 유속등 여러 가지 파라미터에 의해 좌우되며, 이의 변화에 따른 흡음재 내에서의 음파 거동을 해석해야 예측이 가능하다. 따라서, 이상의 영향을 고려하여 여러 연구가 진행되어 왔으며, 많은 이론 및 시험식이 제안되어 왔다.

Sabin은 흡음형 소음기의 음향성능을 예측하기 위해 식(1)을 제안한 바 있다<sup>(1)</sup>. 여기서,  $\alpha$ 는 잔향실에서 측정된 시료의 Sabin 흡음율이며, P는 흡음물레 길이[m], S는 공기통과유로 단면적[m<sup>2</sup>], L은 소음기 길이[m]이다.

$$IL = 1.05 \alpha^{1.4} \frac{P}{S} L \quad [dB] \quad (1)$$

그러나, 이 식은  $l_p/\lambda < 0.1$  ( $l_p$ : 공기통과유로직경)을 만족하는 경우에 성립하는 식으로 고주파의 경우에는 많은 오차가 발생함을 언급하고 있다.

또한 흡음재를 내장한 단순팽창형 소음기의 음향성능을 예측하기 위해 식(2)를 사용하기도 하지만, 고주파로 갈수록 흡음재 특성으로 인한 음향성능의 증가 영향을 나타내지 못하는 단점이 있다. 여기서,  $m$ 은 단면적비율,  $TL$ 은 투과손실을 나타낸다.

$$TL = 10 \text{Log}_{10} \left\{ \left[ \cosh \frac{\alpha_0 L}{2} + \frac{1}{2} \left( m + \frac{1}{m} \right) \sinh \frac{\alpha_0 L}{2} \right]^2 \cos^2 kL + \left[ \sinh \frac{\alpha_0 L}{2} + \frac{1}{2} \left( m + \frac{1}{m} \right) \cosh \frac{\alpha_0 L}{2} \right]^2 \sin^2 kL \right\} \quad (2)$$

S.Krenk<sup>(2)</sup>는 유한요소법에 의해 흡음형 소음기의 음향성능 예측을 수행한 바 있으나, 소음기 크기 및 주파수가 증가하면 계산시간의 폭증으로 인하여 음향성능을 예측하는데 어려움이 있다.

본 논문은 M.L.Munjal이 제시한 평면파 이론에 근거하여 흡음형 소음기의 음향성능을 예측하고자 한다. 평면파 이론은 고차모드가 발생하는 고주파 부분에 대해서는 해석이 난해한 단점이 있지만, 다른 방법에 비해 용이하다. 해석을 수행하기 위해 우선 흡음재의 특성 임피던스 및 전파상수를 시험에 의해 구하였으며, 이를 이용해 삽입손실을 계산하였다. 또한 흡음형 소음기의 설계에 도움을 주고자 음향성능에 영향을 주는 여러 가지 파라미터 즉, 소음기 길이, 개구율, 관 직경, 흡음재 종류등의 변화에 따른 삽입손실을 예측하였다.

\* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

## 2. 관련이론

### 2.1 삼입손실

음향시스템은 식(3)과 같이 사단자 정수를 이용해  $2 \times 2$  전달행렬의 연속적인 곱으로 해석이 가능하다. 즉, 입력과 출력간의 음압 및 입자속도의 관계는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 음원임피던스( $Z_s$ )와 방사임피던스( $Z_r$ )를 고려하여 최종 삼입손실을 정량적으로 구하기 위한 식은 (4)와 같다. 이때, 첨자는 소음기가 없을 경우를 나타낸다<sup>(3)</sup>.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{in} \\ U_{in} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}_2 \dots \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}_n \\ &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}_{total} \begin{bmatrix} P_{out} \\ U_{out} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$$IL = 20 \text{Log}_{10} \left| \frac{Z_r T_{11} + T_{12} + Z_s Z_r T_{21} + Z_s T_{22}}{Z_r T_{11} + T_{12} + Z_s Z_r T_{21} + Z_s T_{22}} \right| \quad (4)$$

### 2.2 흡음형 소음기의 사단자 정수

흡음재가 부착되어진 소음기의 사단자 정수는 입구단과 출구단의 음압과 입자속도 관계로부터 식(5)와 같이 유도된다<sup>(4)</sup>. 이때, 소음기의 축방향 파동정수( $k_z$ )를 구하기 위해서는 반경방향의 파동정수( $k_r$ )를 구해야 한다.

$$\begin{bmatrix} p(0) \\ v_z(0) \end{bmatrix} = \frac{e^{j(k_z^+ - k_z^-)l}}{Y^+ + Y^-} \cdot [T] \cdot \begin{bmatrix} p(l) \\ v_z(l) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} Y^+ e^{-jk_z^+ l} + Y^- e^{+jk_z^- l} & Y^+ Y^- (e^{+jk_z^- l} - e^{-jk_z^+ l}) \\ e^{+jk_z^+ l} - e^{-jk_z^- l} & Y^- e^{-jk_z^+ l} + Y^+ e^{+jk_z^- l} \end{bmatrix}$$

$$k_{z,m,n}^\pm = \frac{\mp M k_o + [k_o^2 - (1 - M^2)(k_{r,m,n}^\pm)^2]^{1/2}}{1 - M^2} \quad (6)$$

$$Y^\pm = Y_o \frac{k_o \mp M k_z^\pm}{k_z^\pm}, \quad Y_o = \frac{c}{S} \quad (7)$$

반경방향의 파동정수는 식(9)와 같이 흡음재의 특성임피던스( $Z_c$ )와 전파상수( $\gamma$ )로 계산가능한 수직입사 음향임피던스( $Z_w$ )의 항으로 표현되며, 이는 흡음형 소음기의 음향성능을 해석하기 위해 음파가 흡음재에 대해 locally reacting으로 작용한다고 간주하여 해석함을 의미한다. 이때, 마하수( $M$ )가 0이고 차단주파수 이내( $m=0$ )에서 해석하고자 하는 경우 반경방향의 파동정수는 식(10)과 같다.

$$\frac{Z_w}{\rho c} \frac{1}{k_o r_o} = -j \frac{J_m(k_r r_o)}{(k_r r_o) J_m(k_r r_o)} \left(1 \mp \frac{M k_z^\pm}{k_o}\right)^2 \quad (8)$$

for  $M=0, m=0$  then

$$\frac{(k_r r_o) J_1(k_r r_o)}{J_0(k_r r_o)} = j \frac{(\rho c) k_o r_o}{Z_w} \quad (9)$$

$$(k_r r_o)^2 \approx \frac{96 + 36jQ \pm \sqrt{9216 + 2304jQ - 912Q^2}}{12 + jQ} \quad (10)$$

$$Q = (k_o r_o) \frac{\rho c}{Z_w}$$

$$Z_w = -j Z_c \cot(\gamma d)$$

where,  $d$  : 흡음재 두께

$r_o$  : 관 중심에서 흡음재까지의 거리

### 2.3 특성 임피던스 및 전파상수

배후공기층이 있는 음향관내에서 흡음재의 특성 임피던스 및 전파상수, 음향임피던스 관계는 식(11)과 같이 표현 가능하다<sup>(5)</sup>. 이때, 식(11)을 전파상수의 항으로 표시하면 식(12)와 같고, 동일한 흡음재의 배후공기층 두께를 변화시키는 경우에 대한 평행방정식은 식(13)과 같이 성립되며, 이로부터 식(14), (15)와 같이 특성임피던스 및 전파상수를 구할 수 있다.

$$Z_o = Z_c \frac{Z_1 \cosh(\gamma d) + Z_c \sinh(\gamma d)}{Z_1 \sinh(\gamma d) + Z_c \cosh(\gamma d)} \quad (11)$$

$$\frac{Z_o + Z_c}{Z_o - Z_c} \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = \exp(2j\gamma d) \quad (12)$$

$$\frac{Z_o + Z_c}{Z_o - Z_c} \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = \frac{Z_o' + Z_c}{Z_o' - Z_c} \frac{Z_1' - Z_c}{Z_1' + Z_c} \quad (13)$$

$$Z_1 = -j Z_{air} \cot(kL)$$

$$Z_1' = -j Z_{air} \cot(kL')$$

$$Z_c = \pm \left( \frac{Z_o Z_o' (Z_1 - Z_1') - Z_1 Z_1' (Z_o - Z_o')}{(Z_1 - Z_1') - (Z_o - Z_o')} \right)^{1/2} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{1}{2jd} \ln \left( \frac{Z_o + Z_c}{Z_o - Z_c} \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \right) \quad (15)$$

where,

$Z_o$  : 배후공기층 두께가  $L$ 인 경우 표면 음향임피던스

$Z_o'$  : 배후공기층 두께가  $L'$ 인 경우 표면 음향임피던스

$d$  : 흡음재 두께

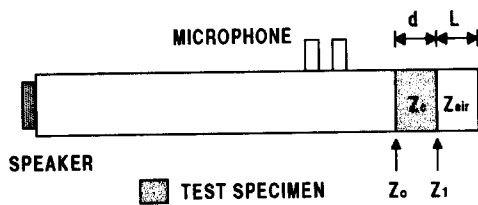
$L$  : 배후 공기층 두께

### 3. 시험장치

#### 3.1 특성 임피던스 및 전파상수의 측정

흡음재의 특성임피던스 및 전파상수를 구하기 위해 마이크로폰을 이용한 전달함수법에 근거하여 음향임피던스를 측정하였고, FFT에서 발생시킨 random noise를 음원으로 사용 하였다.

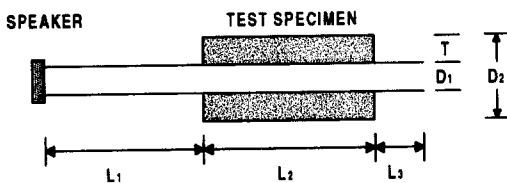
시험에 사용된 임피던스관은 상한 주파수가 5,700 [Hz]이며, 이 주파수 이내의 데이터를 분석에 이용 하였다. 이때, 흡음재의 두께는 20[mm]로 고정 하였으며, 배후 공기층 두께는 각각 25, 50[mm]로 변화 시켰다. 시험에 사용된 흡음재는 건축자재로 쓰이고 있는 것으로, 사용이 편리하여 본 시험에 이용하였다.



[Fig.1] Schematic diagram of the experimental apparatus

#### 3.2 삽입손실의 측정

삽입손실을 측정하기 위한 시험장치는 그림 2와 같이 구성하였으며, 동일 위치에서 소음기가 있을 경우와 없을 경우에 대한 음압레벨의 차로 그 값을 구하였다. 시험에 사용된 소음기의 크기는 Table 1 과 같다.



[Fig.2] Experimental apparatus for insertion loss test

[Table 1] Specification of absorptive mufflers [mm]

L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	T
900	75 125 175	180	35	75	20

### 4. 결과분석

흡음형 소음기의 음향성능을 예측하기 위해서는 우선 음파의 거동에 대한 해석이 선행되어야 한다.

공기가 소음기를 통과하는 경우 흡음재 내부로의 속도성분은 nonlocally reacting한다. 즉, 음파는 흡음재내부로 반경방향에 수직하게만 작용하지 않고 주위에도 영향을 미친다. 이를 해석하기 위해서는 흡음재 내·외부에서의 음파의 거동을 연성적으로 해석해야 하는 어려움이 있다. 그러나, 흡음재 내부로의 속도성분이 locally reacting으로 작용한다면, 반경방향의 전파상수는 수직입사임피던스( $Z_w$ )의 항만으로 나타낼 수 있다.

K.U.Ingard<sup>(6)</sup>는 흡음재와 공기통과유로 경계면에서 음압과 입자속도의 상호관계로부터 연속방정식을 유도 하여 반경방향의 파동정수( $k_r$ )를 구하였다. 즉, 식(16)과 같이 음파가 locally reacting으로 작용하는 경우에는 반경방향 파동정수를 수직입사임피던스의 항만으로 나타낼 수 있지만, 음파가 nonlocally reacting으로 작용하는 경우에는 식(17)과 같이 흡음재 내·외부에서 음파의 거동을 연성적으로 해석해야 함을 제안하였다.

$$k_r D \tan(k_r D) = -jk_o D \eta_i, \quad (\eta_i = Z_{air}/Z_w) \quad (16)$$

$$k_r D \tan(k_r D) = -j(\bar{\rho}/\rho) q_r D \tan(q_r d) \quad (17)$$

where,  $D$  : 관 내부에서의 공기통과 지름

$\bar{\rho}$  : 흡음재 내부에서의 공기 밀도

$q_r$  : 흡음재 내부에서의 반경방향 전파상수

$d$  : 흡음재 두께

Fig.3은 음파의 거동을 locally와 nonlocally로 작용한다고 가정할 경우 각각에 대한 단위길이당의 감음량 값을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 locally reacting으로 가정하는 경우가 nonlocally reacting으로 가정하는 경우에 비해 감음량의 최대값이 약간 큰 것과, 고주파 부분에서의 감음량 값이 약간 작은 것을 제외하고는 전체적으로 비슷한 결과를 보여주고 있다. 이는, 흡음형 소음기의 음향성능 해석시 음파의 거동을 locally reacting으로 가정하여 측정 및 예측이 가능한 수직입사임피던스 항만으로 계산해도 큰 오차가 없음을 의미한다.

따라서, 본 논문에서는 흡음재 내부로 입사하는 음파의 거동을 locally reacting으로 작용한다고 가정한 후, Munjal이 제안한 평면파 이론에 근거해 사단자 정수를 이용하여 흡음형 소음기의 음향성능을 예측하였고, 그 값을 시험값과 비교하여 보았다.

Fig.4는 단순팽창형 소음기의 삽입손실 값을 측정 한 것으로, 길이의 변화에 따른 산과 골의 위치변화를 제외하고는 전체적으로 비슷한 음향성능 값을 보이고 있으며, 5,500[Hz] 이상에서는 고차모드의 영향으로 삽입손실이 현저하게 감소하고 있다.

Fig.5는 흡음재를 삽입한 팽창형 소음기의 삽입손실을 측정한 것으로, 단순팽창형 소음기에 비해 고주파로 갈수록 또한 소음기의 길이가 증가할수록 삽입손실이 증가하고 있으며, 단순팽창형 소음기에서 나타나는 차단주파수 이상에서도 비교적 높은 음향성능을 보이고 있다. 또한, 소음기 길이에 의해 나타나는 반복적인 삽입손실의 최저값은 흡음재의 영향으로 점차적으로 높아지고 있다.

Fig.6 및 7은 전달함수법에 의해 시험재료의 음향임피던스를 측정 한 후 특성임피던스 및 전파상수를 구하여 글라스울의 값과 비교한 것이다. 이때, 사용한 글라스울의 특성임피던스 및 전파상수 값은 다음과 같이 Miki가 제안한 식을 이용하였으며, 유동비저항( $\sigma$ )은 12,000 mks[rayl/m]로 가정하였다<sup>(7)</sup>.

$$Z_c/Z_{air} = 1 + 0.079\xi^{-0.632} - j0.12\xi^{-0.632} \quad (18)$$

$$\gamma/k_o = 0.18\xi^{-0.618} - j[1 + 0.122\xi^{-0.618}] \quad (19)$$

$$\text{where, } \xi = \frac{f_o}{\sigma}$$

그림에서 보는 바와 같이 글라스울의 특성임피던스 및 전파상수 절대값이 시험에 사용된 재료보다 큰 값을 보이고 있다.

Fig.8은 배후공기층(L)의 변화에 따른 흡음율을 나타낸 것으로, 배후공기층이 0인 경우 주파수가 증가할수록 흡음율을 값이 증가하며, 4,000[Hz] 부근에서 약 0.6 정도의 흡음율을 보이고 있다. 이는 주파수가 증가할수록 흡음형 소음기의 삽입손실이 함께 증가함을 의미한다.

Fig.9는 단순팽창형 소음기에 대한 삽입손실을 시험값과 이론값으로 비교한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig.10~12는 흡음형 소음기의 길이가 각각 75, 125, 175[mm]인 경우에 대한 삽입손실을 시험값과 이론값으로 비교한 것으로 잘 일치하고 있다. 이것은 흡음재에 작용하는 반경방향 전파상수를 locally reacting으로 가정하여 수직입사 임피던스 항만으로 계산해도 비교적 정확한 음향성능 해석이 가능함을 의미한다.

Fig.13~16은 흡음형 소음기의 설계시 고려되는 여러 가지 파라미터 즉, 흡음재의 길이, 개구율, 관

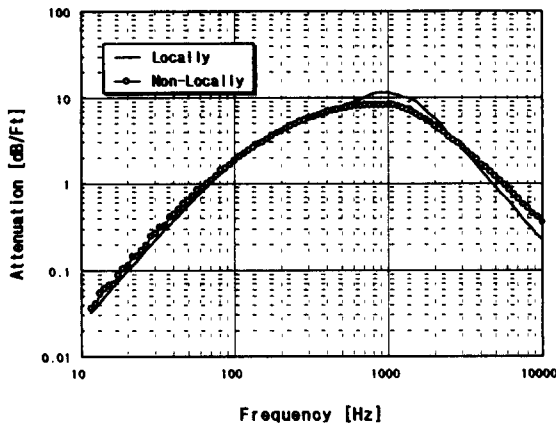
의 외경, 흡음재 재질등의 변화에 따른 삽입손실 값을 예측한 것이다.

Fig.13은 흡음형 소음기의 길이 변화에 따른 삽입손실 값을 예측한 것으로, 그 길이가 증가할수록 삽입손실이 증가함을 볼 수 있으며, 특히 저주파보다는 고주파 영역에서의 성능이 증가함을 알 수 있다. 이것은 흡음형 소음기가 중·고주파 영역에서 성능이 우수하지만, 저주파 소음을 제어하기는 어려우며 이를 해결하기 위해서는 반사형 소음기와 결합된 형태의 소음기를 사용해야 함을 의미한다. 이때, 삽입손실은 길이의 증가분에 대해 정비례하는 특성을 갖지 않으며, 또한 삽입손실의 증가 기울기는 점차 감소함을 볼 수 있다. 이는 고차모드의 음파성분이 먼저 감음되고, 보다 감음되기 어려운 저주파 성분이 길이의 증가에 따라 조금씩 감음되기 때문이다.

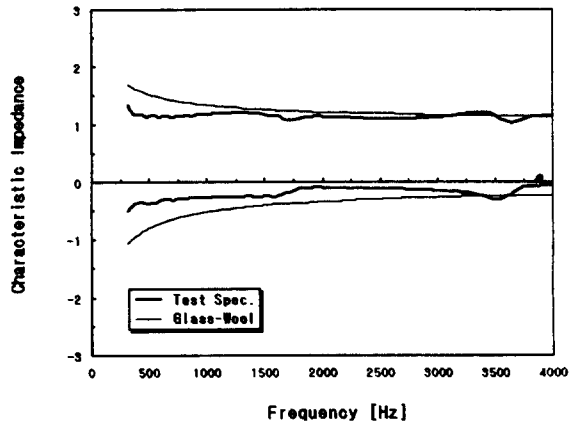
Fig.14는 흡음형 소음기의 개구율 변화에 따른 삽입손실의 변화를 나타내고자 개구부 지름에 대한 파장의 비로  $x$ 축을 무차원화시켜 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 개구율이 감소할수록 즉, 흡음재의 두께가 증가할수록 저주파 부분에서의 삽입손실 값이 증가하며, 그 곡선이 평탄해 지고 있는데, 이는 흡음재의 두께를 증가시킬수록 음향성능이 전 주파수 범위에서 고르게 나타남을 의미하며, 저주파소음을 제어하기 위해서는 흡음재의 두께를 증가시켜야 함을 의미한다. 그러나, 그 피크치는 감소함을 알 수 있다. 이때, 실제 설계에 있어서 개구율을 작게하면 유속이 빨라지고 압력손실 또한 유속의 2승에 비례하여 증가하기 때문에 주의하지 않으면 안된다.

Fig.15는 소음기의 길이 및 흡음재 두께가 일정하고, 소음기 단면적비를 1로 하는 경우 외경의 변화에 따른 삽입손실의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 외경이 감소할수록 즉, 유로폭이 감소할수록 삽입손실은 증가하고 있으며, 특히 그 증가폭은 외경의 감소에 따라 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

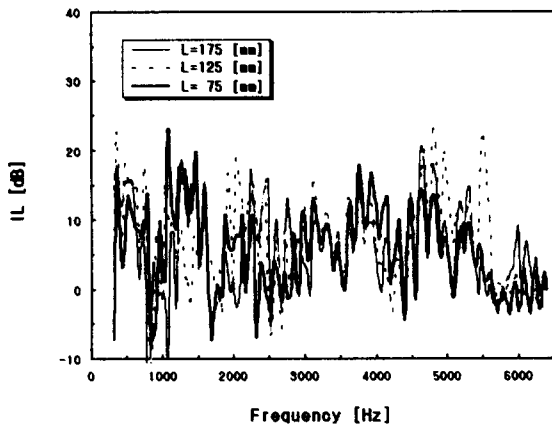
Fig.16은 흡음재의 종류에 따른 삽입손실의 변화를 예측하여 비교한 것으로, 본 시험에 사용된 재질보다도 글라스울의 경우가 더 큰 삽입손실 값을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이것은 Fig.7에 나타낸 바와 같이 음의 감소와 관계되는 전파상수값이 글라스울의 경우가 크기 때문이다. 또한, 이것은 흡음재의 특성임피던스 및 전파상수를 구하면 실제의 소음기를 제작하지 않고도 삽입손실을 예측할 수 있음을 의미한다.



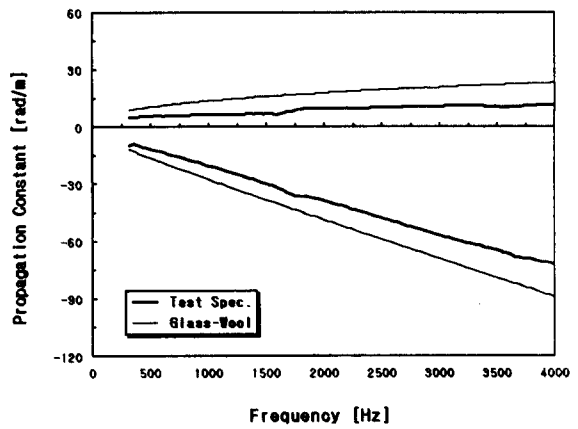
[Fig.3] Attenuation of locally and nonlocally reacting absorptive muffler



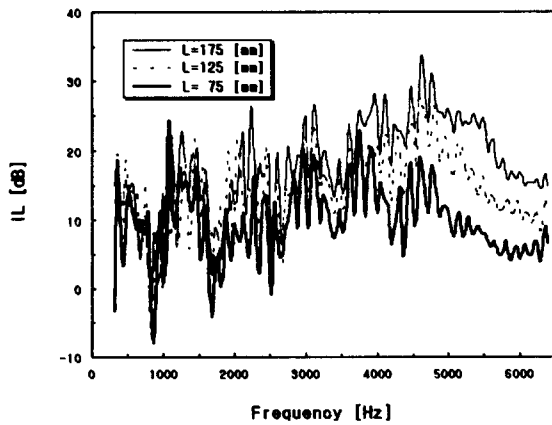
[Fig.6] Characteristic impedance of test specimen and glass-wool



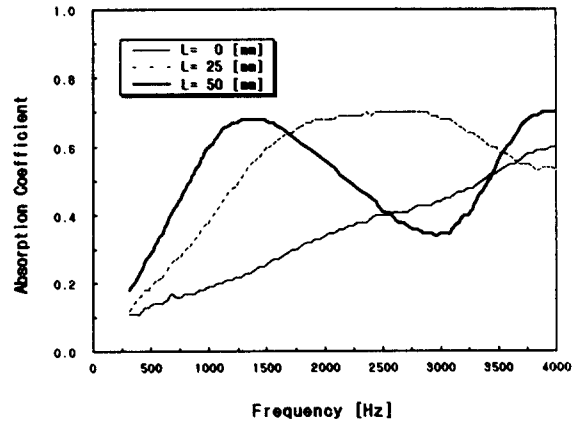
[Fig.4] Insertion loss of simple expansion mufflers according to the length of muffler ( $L=75, 125, 175$ [mm])



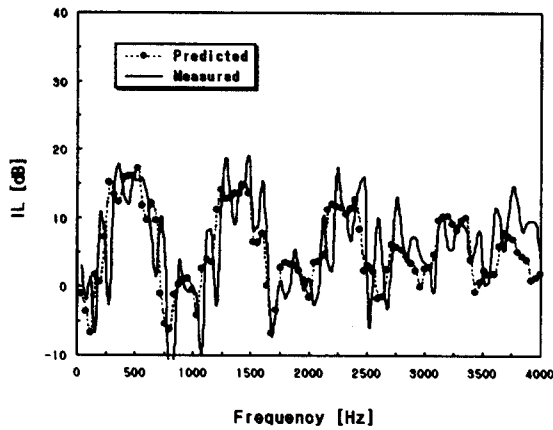
[Fig.7] Propagation constant of test specimen and glass-wool



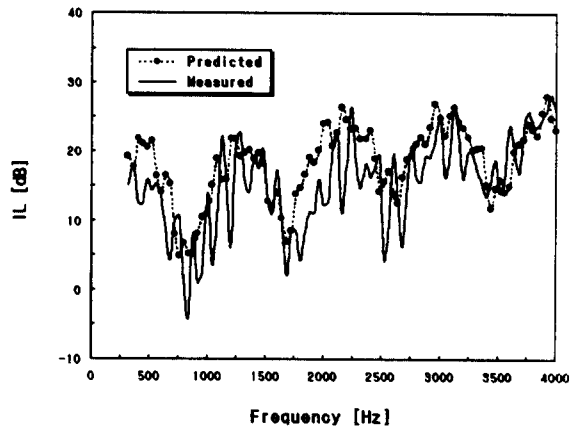
[Fig.5] Insertion loss of absorptive mufflers according to the length of muffler ( $L=75, 125, 175, T=20$ [mm])



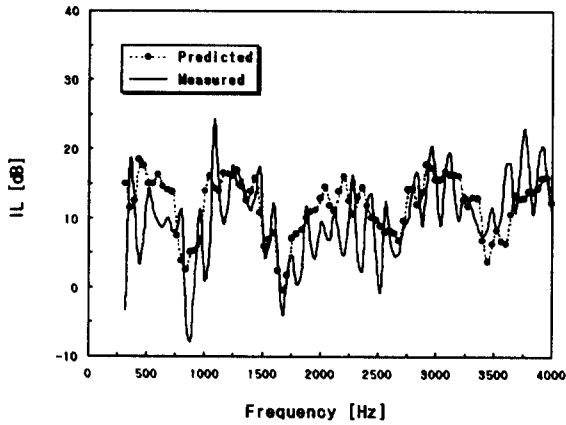
[Fig.8] Absorption coefficient of test specimen according to the thickness of air gap ( $T=20$ [mm])



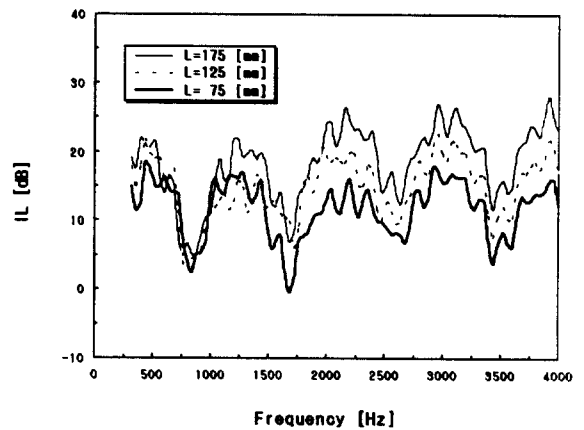
[Fig.9] Predicted and measured insertion loss of a simple expansion muffler (L=175[mm])



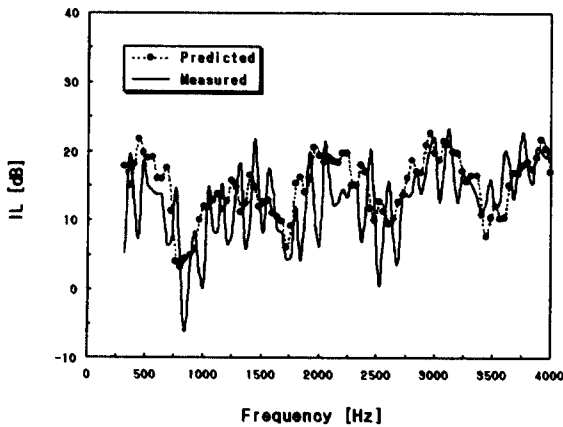
[Fig.12] Predicted and measured insertion loss of an absorptive muffler (L=175[mm])



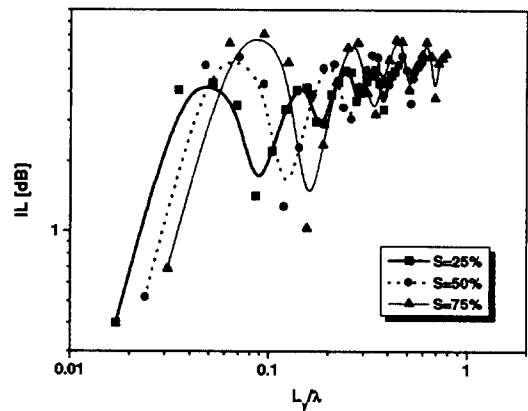
[Fig.10] Predicted and measured insertion loss of an absorptive muffler (L=75[mm])



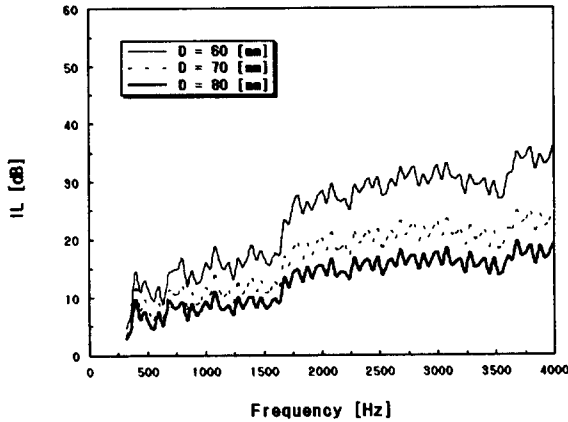
[Fig.13] Predicted insertion loss of absorptive mufflers according to the length of muffler (L=75, 125, 175[mm])



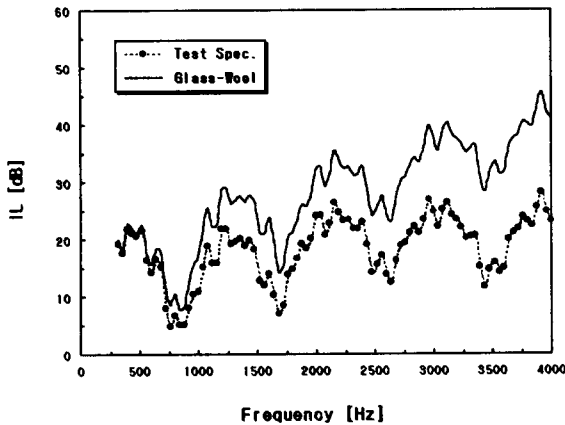
[Fig.11] Predicted and measured insertion loss of an absorptive muffler (L=125[mm])



[Fig.14] Normalized insertion loss according to the open area percentage (S=25, 50, 75[%])



[Fig.15] Predicted insertion loss of absorptive mufflers according to the variation of outer diameter (L=200, T=20[mm])



[Fig.16] Predicted insertion loss of absorptive mufflers by using test specimen and glass-wool

## 5. 결론

평면파 이론에 의한 흡음형 소음기의 음향성능 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡음재 내부로 입사하는 음파의 작용을 locally reacting으로 가정한 후 사단자 정수를 이용한 평면파 이론에 의해 흡음형 소음기의 음향성능을 해석해도 비교적 정확한 예측이 가능하다.
- 2) 흡음형 소음기는 동일한 크기의 단순팽창형 소음기에 비해 차단주파수 이상의 영역에서도 삽입손실이 증가하며, 소음기 길이의 영향으로 나타

나는 삽입손실의 최저 부분을 증가시킨다.

- 3) 흡음형 소음기의 길이가 길어질수록 저주파보다는 고주파에서의 삽입손실이 증가한다. 그러나, 그 증가폭은 소음기 길이의 증가분에 대해 정비례하지 않으며, 점차로 감소한다.
- 4) 흡음재의 두께가 증가할수록 즉, 개구율이 작아질수록 저주파 영역에서의 삽입손실은 증가하며 또한 전 주파수 범위에서 삽입손실 곡선이 평탄해진다. 이는 저주파 소음을 감음시키기 위해서는 흡음재의 두께를 두껍게 해야 함을 의미한다. 그러나, 최대 삽입손실은 점차 감소하는 경향이 있다.
- 5) 흡음재 두께 및 길이를 동일하게 하고 소음기 외경을 감소시키는 경우 즉, 공기통과 유효폭을 감소시키는 경우 고주파로 갈수록 삽입손실이 증가한다. 이때, 삽입손실의 증가폭은 외경의 감소에 따라 점차로 증가한다.
- 6) 전파상수값이 크면 삽입손실은 증가한다. 또한 흡음재의 특성 즉, 전파상수와 특성임피던스 값을 알면 흡음재의 종류에 따른 흡음형 소음기의 삽입손실을 예측할 수 있다.

## 참고문헌

- 1) Leo L. Beranek, "Noise and vibration control", McGraw-Hill Book Company, pp378~393, 1971
- 2) S.Krenk, "A recursive finite element technique for acoustic fields in pipes with absorption", J. Sound and Vib., Vol 122(1), pp107~118, 1988
- 3) 이정권, "배기소음의 음향해석 및 설계", 자동차 공학회지, Vol.16, No.5, pp10~19, 1994
- 4) M.L.Munjial, "Acoustics of ducts and mufflers", pp230~253, 1987
- 5) A.F.Seybert, "Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials", J.Acoust. Soc.Am., 86(2), pp637~643, 1989
- 6) K.U. Ingard, "Sound absorption technology", Chapter 6, 1994
- 7) Miki, Y., "Acoustical properties of porous materials -Modification of Delany-Bazley model", J.Acoust. Soc. Jpn.(E), Vol.11, pp19~22, 1990
- 8) 황철호, 정성수, 은희준, "흡음재의 특성임피던스와 전파상수의 새로운 결정방법", 한국소음진동공학회지, 제7권 제5호, pp781~787, 1997