

다공관 및 다공형 소음기의 음향학적 특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Acoustic Characteristics of Perforated Tube and Perforated Tube Muffler

윤 두 병*, 김 양 한**

(Doo-Byung Yoon*, Yang-Hann Kim**)

요 약

실험 및 모의실험을 통하여 무차원파수(ka)와 상대어드미턴스(AZ)들이 균일 및 비균일 공극분포를 가지는 다공관 및 다공형 소음기의 음향학적 특성을 대표적으로 표현할 수 있는 물리적 인자임을 확인하였다. 구체적으로는 다공관에 분포한 공극의 임피던스와 여러가지 배열형태를 가지는 다공관의 투과손실을 실험적으로 측정하였으며 이를 통하여 다공관의 투과손실은 ka 와 상대어드미턴스 AZ 의 함수임을 확인하였다. 다공형 소음기의 투과손실 또한 실험적으로 측정하였으며 Sullivan의 모델^[2,3]을 기초로 한 수치해석방법과의 비교를 통하여 제시된 다공형 소음기 모델의 타당성을 입증하였다.

ABSTRACT

The acoustic characteristics of perforated tube muffler are studied in terms of non-dimensional wavenumber ka and admittance-ratio AZ . This study includes not only the case of perforated tubes having uniform hole distribution along the length but also the case of having non-uniform hole distributions. The acoustic hole impedance and transmission loss of perforated tube of which has various hole distributions were measured. The experimental results demonstrated that the transmission loss of perforated tube is a function of non-dimensional wave number ka and admittance-ratio AZ . The transmission loss of perforated tube muffler is predicted by the numerical method which is based on Sullivan's^[2,3] and compared with the experimental ones.

I. 서 론

다공형 소음기는 반사형 소음기에 비하여 비교적 작은 배압을 유발하는 장점으로 인하여 실제 상용화된 제품으로 많이 사용되고 있다. 일반적으로 다공형 소

음기에 포함된 다공관은 같은지름의 공극들이 균일한 간격으로 배열된 형태를 지니고 있으며 균일분포 다공관의 성능해석에는 Sullivan^[1,2,3]이나 K. Jayaraman과 K. Yam^[4]에 의한 수치해석 방법들이 주로 이용되어 왔으며 타당성 또한 인식되어 있다. 이러한 균일분포를 가지는 다공형 소음기의 음향학적 특성은 주로 다공관의 표면적에 대한 전체 공극면적의 비로 정의되는 유공률로 표현되어 왔으며 다공관

*한국과학기술원 기계공학과 대학원

**한국과학기술원 기계공학과

접수일자 : 1994년 10월 15일

에 분포하는 공극들의 공간적인 분포형태가 다공관의 주파수별 투과손실 특성에 미치는 영향은 크게 고려되지 않았다. 이는 다공관 길이에 비해 입사되는 음파의 파장이 상대적으로 긴 저주파영역에서는 공극들의 분포형태에 따른 영향이 크게 중요하지 않은 물리적 이해로부터 타당하다고 받아들여져 왔으나 다공관의 길이에 비해 음파의 파장이 상대적으로 작은 고주파 영역에서는 공극의 공간적 배열형태에 따른 영향이 나타날 것으로 추측할 수 있다. 마찬가지로 비균일 공극지름과 비균일 공극분포를 가지는 다공관의 특성은 공극분포부분에서의 공극에 의한 국부임피던스의 크기와 이러한 국부임피던스들의 공간적인 배열형태에 따른 영향을 받을 것이다.(Fig.1) 주위에서 쉽게 접할 수 있는 피리를 예로 들면, 어느 공극을 열고서 연주를 하나에 따라 발생하는 소리가 달라지는 것을 관찰할 수 있으며 전술한 다공관의 국부임피던스의 크기 및 배열의 중요성을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

이러한 이해를 토대로 하여 본 연구에서는 균일 및 비균일 공극분포를 가지는 다공관 및 다공형 소음기의 음향학적 특성에 대한 연구를 진행하였으며 실험인자로서 국부임피던스의 배열을 표현할 수 있으리라 기대되는, 다공관에 입사되는 음파의 파수 k 와 공극분포부분들 사이의 거리 a 의 곱으로 표시되는 ka 와, 또한 국부임피던스를 표현할 수 있는 다공관의 어드미턴스(admittance)와 공극분포부분 어드미턴스의 상대적인 비인 상대어드미턴스 AZ 를 사용하였다. 또한 다공관에 분포하는 공극들의 임피던스 모델링을 위하여 다공관에 분포하는 공극들의 임피던스

를 공극지름과 주파수를 바꾸어 가면서 실험적으로 측정하였다.

이론적인 부분에서는 Sullivan의 다공관 및 다공형 소음기 모델^[2,3]을 이용하여 여러가지 공극분포 형태 변화에 따른 음향학적 특성을 고찰해 보았으며 이를 실험결과와 비교하였다.

II. 실험인자

다공관에 입사된 음파의 감쇠는 다공관에 분포한 공극의 존재에 의해 나타나게 되므로 다공관의 음향학적 특성을 나타낼 수 있는 실험인자는 다공관의 어드미턴스에 대한 공극들의 어드미턴스를 나타내는 상대어드미턴스 AZ 와 그러한 공극분포부분들의 공간적 분포상태를 나타낼 수 있는 ka 가 적절할 것이다.

본 연구에서 정의한 천공률은 다공관의 단면적에 대한 전체공극면적의 비이며 다음식과 같다.

$$\text{천공률} = \text{전체공극수} \times \text{공극면적} / \text{다공관의 단면적} \quad (1)$$

다공관에 분포되어 있는 공극들은 어드미턴스(Admittance)를 가지고 있으며 음파가 이러한 공극어드미턴스가 분포되어 있는 공극분포부분을 진행하면서 투과손실이 발생한다. 따라서 같은 공극지름, 공극두께를 갖는 다공관의 투과손실 특성비교에 천공률을 사용함으로써 전체적인 투과손실의 크기를 예측할 수 있다. 공극어드미턴스는 공극지름, 공극두께, 주파수에 따라 달라지게 되므로 서로 다른 공극지름, 공극두께를 갖는 다공관의 투과손실을 비교할 때에

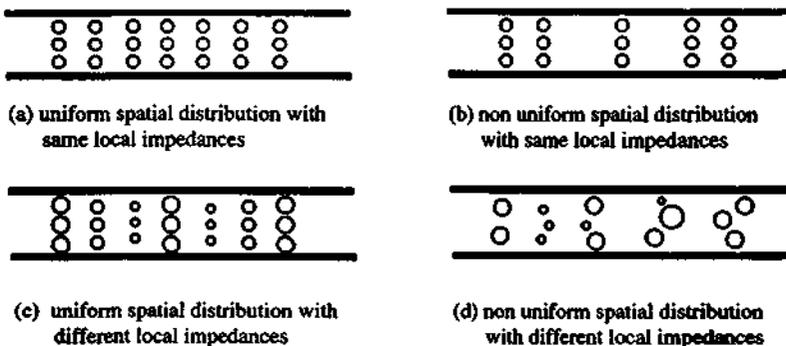


Fig.1 Perforated pipe with various configurations.

는 천공률보다는 다공관의 어드미턴스와 공극분포부분에 존재한 공극어드미턴스와의 상대적인 비로 정의되는 상대어드미턴스 AZ 가 더욱 적절한 실험인자로 사용될 수 있을 것이다.

다공관에 평면파가 입사되어 다공관을 따라 진행할때 원주방향으로 분포되어 있는 공극들에 의한 효과는 개개의 공극임피던스들의 병렬연결로 생각할 수 있으며 입사되는 음파의 파장 λ 가 식(2)의 조건을 만족하면 다공관내를 잘 통과할 수 있을 것이다.

$$\frac{n\lambda}{2} = a + \Delta_{eff} \quad (n=1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

a 는 공극분포부분들 사이의 간격을 나타내며 Δ_{eff} 는 다공관에 분포한 공극들의 어드미턴스에 의한 Effective length의 증가량이다. 식(2)의 조건을 무차원변수 ka 로 나타내면 식(3)과 같으며 ka 가 $n\pi$ 의 배수보다 약간 작은 지점에서 투과손실의 골이 나타나게 될 것으로 예측할 수 있다.

$$ka = \pi \left(n - \frac{2}{\lambda} \Delta_{eff} \right) \quad (3)$$

III. 다공관 모델

균일 및 비균일 공극분포를 가지는 다공관 및 다공형 소음기의 음향학적 특성에 대한 모의실험 및 이론적인 해석을 위하여 Sullivan의 모델^[2,3]을 이용하였으며 다공관 및 다공형 소음기를 공극분포부분에 해

당하는 N 개의 공극분포부분과 공극분포부분들 사이의 $N-1$ 개의 직관부분으로 분할하고, 각부분들 양단 사이의 압력, 체적속도에 대한 전달매트릭스를 구하여 전달 매트릭스의 연속적인 곱으로써 다공관과 다공형 소음기를 모델링하고 이를 컴퓨터를 사용하여 모의실험 하였다.^[2,3,5](Fig.2)

다공관의 j 번째 공극분포부분의 전달매트릭스 G_j 는 식(4)와 같이 공극임피던스 Z_{bj} 에 대한 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} P_{2j} \\ U_{2j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{bji}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{2j-1} \\ U_{2j-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

다공관의 $j+1$ 번째 공극분포부분과 j 번째 공극분포부분을 연결하는 직관요소에 대한 전달매트릭스 H_j 는 식(5)와 같으며 직관요소의 길이 L_j 에 대한 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} P_{2j+1} \\ U_{2j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kL_j & jZ \sin kL_j \\ jZ^{-1} \sin kL_j & \cos kL_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{2j} \\ U_{2j} \end{bmatrix} \quad (5)$$

다공관의 j 번째 공극분포부분에 위치한 i 번째 공극의 임피던스 Z_{bji} 는 공극에서의 압력에 대한 체적속도의 비로 정의된다. 자유음장내에 위치한 다공관에 한 개의 공극이 있을때의 이론적인 공극임피던스식은 식(6)과 같다.^[6]

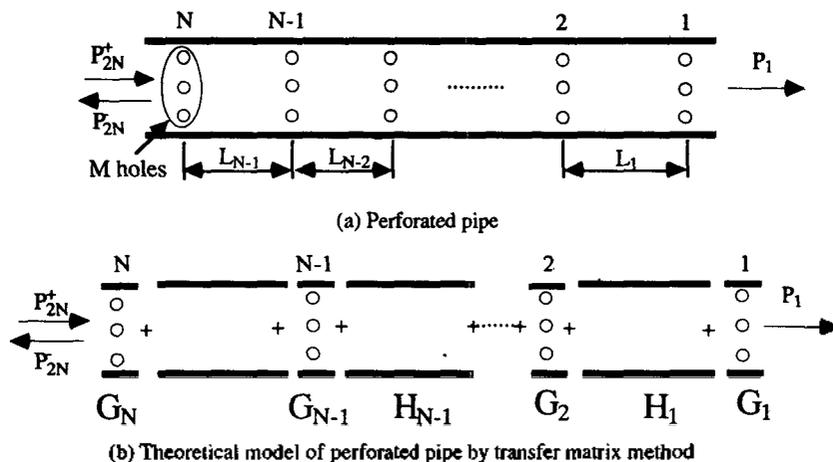


Fig.2 Perforated pipe and its theoretical model

$$Z_{bji} = \frac{4\rho c}{\pi d_i^2} \left(\frac{(0.5kd_i)^2}{4} + jk(t+0.75d_i) \right) \quad (6)$$

k, t, d_i 는 각각 다공관에 입사된 음파의 파수, 공극두께, 공극지름을 나타내며 식(6)의 실수항은 다공관 외부로의 방사임피던스(Radiation impedance)를 나타낸다.

Sullivan이 외부확장관을 가지는 다공관실험을 통하여 제시한 공극임피던스식은 식(7)과 같으며 실수항은 공극에서의 점성에 의한 저항을 나타낸다.

$$Z_{bji} = \frac{4\rho c}{\pi d_i^2} (6.0 \times 10^{-3} + jk(t+0.75d_i)) \quad (7)$$

본연구에서는 공극임피던스 측정실험결과와 기존의 공극임피던스식을 고려하여 자유음장내에 위치한 다공관 모의실험에는 식(8)을 사용하였고 다공형 소음기 모의실험에는 식(7)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} Z_{bji} &= \frac{4\rho c}{\pi d_i^2} \left(6.0 \times 10^{-3} + \frac{(0.5kd_i)^2}{4} + jk(t+0.75d_i) \right) \\ &= \frac{4\rho c}{\pi d_i^2} (Z_r + jZ_i) \end{aligned} \quad (8)$$

공극분포부분이 한개일때 투과손실식을 정리하여 나타내면 식(9)와 같다.

$$TL = 20 \log |1 + AZ| \quad (9)$$

여기서 AZ 는 식(10)으로 표현되며 다공관의 어드미턴스에 대한 공극들의 어드미턴스를 나타낸다. 여기서 D_1 은 다공관의 지름을 나타낸다.

$$AZ = \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{D_1^2(6.0 \times 10^{-3} + 0.25(0.5kd_i)^2 + jk(t+0.75d_i))} \quad (10)$$

공극분포부분이 2개이고 그사이 간격이 a 일때의 투과손실식은

$$TL = 20 \log | (1 + AZ) e^{jka} + j \sin ka (AZ)^2 | \quad (11)$$

으로 쓸수 있고 공극분포부분이 3개일때의 투과손실은 식 (12)로 표현된다.

$$TL = 20 \log | (1 + 1.5AZ + (AZ)^2) e^{j2ka} - (0.5 \sin^2 ka AZ + \cos^2 ka) (AZ)^2 | \quad (12)$$

위의 식들에서 볼 수 있듯이 상대어드미턴스 AZ 와 ka 에 의해서, 다공관 투과손실의 크기와 산과 골의 위치가 정해짐을 알 수 있으며 기존에 사용되던 주파수대신 무차원변수 ka 를 사용함으로써 투과손실곡선의 산과 골의 위치를 비교적 효과적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 균일공극분포를 갖는 다공관의 특성은 AZ 와 ka 를 이용하여 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

IV. 실험장치 및 실험방법

본연구를 수행하면서 사용한 실험장치는 Fig.3과 같다. 실험에 사용한 다공관은 지름 D_1 이 32mm, 두께 t 가 1.5mm인 것을 사용하였으며 다공관에 분포하는 공극지름 d_i , 공극분포부분수 N , 공극분포부분들 사이의 간격 a 를 여러가지로 바꾸어 가며 실험하였다. 다공형 소음기실험에 사용한 확장관은 지름 D_2 가 190mm 이고 길이 L_2 가 540mm인 것을 사용하였으며, 실험장치에 사용된 주요장비는 Table. 1에 나타나 있다.

본연구에서 다공관의 감음성능을 평가하기 위해 사용한 투과손실은 다음식으로 정의할 수 있다.(Fig.4)

$$TL = 10 \log \frac{S_{aa}}{S_{cc}} \quad (dB) \quad (13)$$

S_{aa} 는 다공관에 입사되는 입사스펙트럼을 S_{cc} 는 다공관을 통과하는 투과스펙트럼을 나타낸다. 투과손실 측정에 이용한 Two Microphone 방법¹⁷⁾은 입사되는 음파가 평면파이프 마이크로폰 사이의 간격 ΔX 가 입사되는 음파의 반파장보다 클때 성립하므로 실험장치에 의해 결정되는 임계주파수와 차단주파수를 고려하여 실험주파수대역을 0~6kHz로 하고 ΔX 를 25mm로 하여 실험을 수행하였다.

실험방법은 각 주파수마다 충분한 파워로 스피어 커를 구동시키기 위해서 HP3563A Analyzer내의 Sine sweep 기능을 이용한, Sine sweep 방법을 이용하였으며 다공관에 입사되는 음압은 120dB 정도로 하여 실험하였다. 출구단에는 음파의 반사를 최소로 하기 위하여 무반사출구단(Anechoic termination)을 설치하였다. 또한 마이크로폰간의 보정(Microphone calibration)을 하기 위하여 센서스위칭 방법(Sensor switching method)을 이용하였으며 실험장소는 워

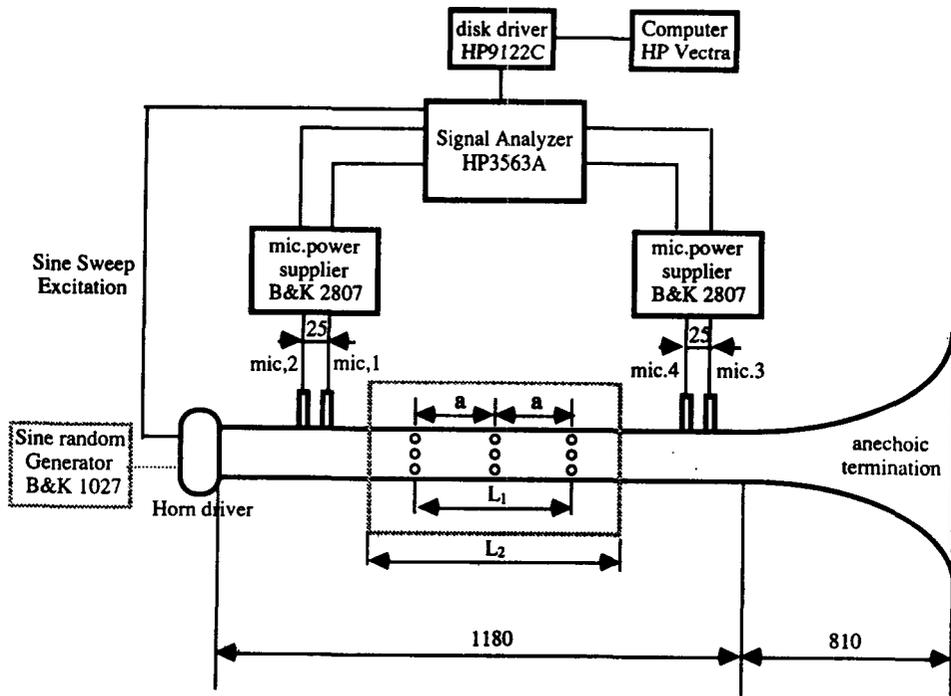


Fig.3 Experimental Setup
(unit in mm, dashed line : outer chamber)

Table. 1 Experimental Equipments

Microphone	B&K 4165 B&K 4135
Microphone Power Supplier	B&K 2807
Sine Random Generator	B&K 1027
Signal Analyzer	HP 3563A
Horn Driver	Sammi
Computer	HP Vectra PC ES/12 AT

부에서의 잡음 (noise)이나 반사파에 의한 영향을 줄이기 위해 cutoff 주파수가 100Hz인 무향실을 이용하였다.

Fig.5는 공극임피던스를 측정하기 위한 실험장치를 나타내고 있다. 공극분포부분 전후의 압력, 체적 속도 간의 관계는 식(14)와 같이 나타낼 수 있으며

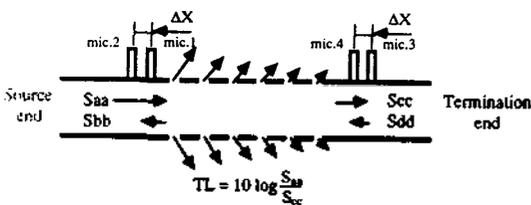


Fig.4 Transmission loss of perforated pipe

- Saa : autospectrum of incident wave in source end
- Sbb : autospectrum of reflected wave in source end
- Scc : autospectrum of transmitted wave in termination end
- Sdd : autospectrum of reflected wave in termination end
- ΔX : microphone separation distance

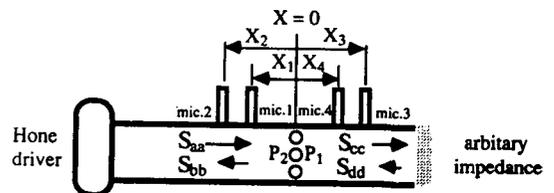


Fig.5 Experimental setup for hole impedance measurement

- Saa : autospectrum of incident wave in source end
- Sbb : autospectrum of reflected wave in source end
- Scc : autospectrum of transmitted wave in termination end
- Sdd : autospectrum of reflected wave in termination end

이때 공극분포부분에서의 임피던스 조건은 식(15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{j=1}^M \frac{1}{Z_{bji}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^M \frac{1}{Z_{bji}} = \frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1} \quad (15)$$

이때 하첨자 1은 공극분포부분의 오른쪽단면 ($x=0^+$)을 나타내고 하첨자 2는 공극분포부분의 왼쪽단면 ($x=0^-$)을 나타낸다. Two Microphone 방법을 사용하여 공극분포부분 양단의 임피던스 Z_2, Z_1 을 측정^[7]하고 식(15)를 이용하여 공극임피던스 Z_{bji} 에 대한 식으로 정리하면 공극임피던스를 구할 수 있다.

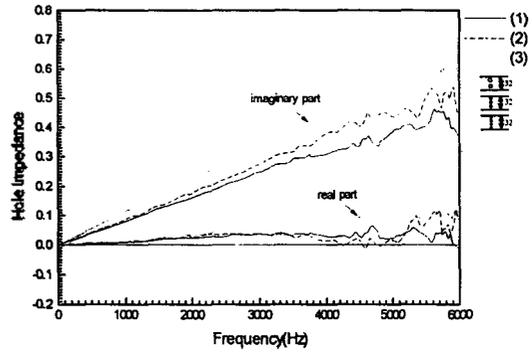
한개의 공극분포부분에 M 개의 동일한 지름을 가지는 공극들이 분포되어 있을때 공극임피던스 Z_{bji} 는 식(16)과 같다.

$$Z_{bji} = \frac{Z_1 Z_2}{M(Z_1 - Z_2)} \quad (16)$$

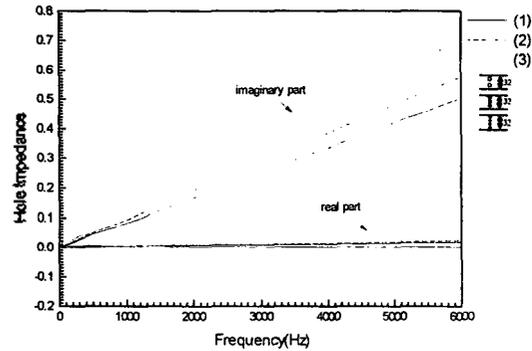
V. 실험결과

5.1 공극임피던스 측정

Fig.5와 같은 실험장치를 이용하여 공극분포부분 양단에서 다공관의 임피던스를 측정함으로써 공극 임피던스를 구하였으며 Fig.6은 공극지름을 4.1mm, 5.0mm, 7.1mm로 변화시키면서 공극임피던스를 측정한 결과이다. 이 결과들은 외부확장관이 없을때 한개의 공극분포부분에서 측정한 결과로써 공극지름의 변화와 주파수의 변화에 따라서 공극임피던스가 달라지는 것을 관찰할 수 있으며 실수항보다 허수항이 더 큰값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험결과를 식(8)과 비교해 보면 식(8)이 저주파영역에서의 실제 공극임피던스를 잘 표현하고 있다고 판단된다. 실험결과의 실수부는 고주파영역에서 식(8)과 큰차이를 보이고 있으며 이는 고주파영역에서의 공극 어드미턴스(공극임피던스의 역수)가 저주파영역에서의 공극어드미턴스보다 상대적으로 매우 작은 값을 가지므로 식(15)를 이용하여 공극어드미턴스를 구할때 측정잡음(Sensing noise)이나 측정오차에 의한 영향을 받기 때문이라고 판단된다.



(a) Experiment



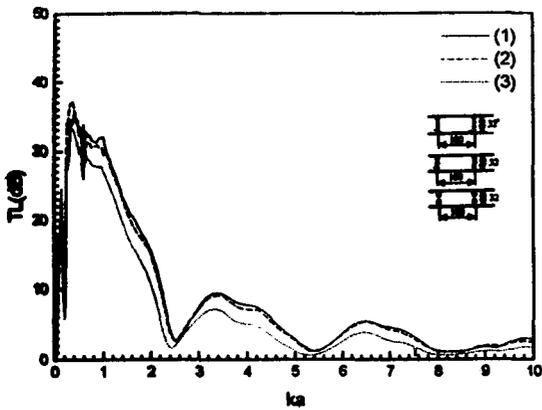
(b) Plot of Equation(3)

Fig.6 Individual hole impedance of various perforated pipe with equal porosity $D_1 = 32\text{mm}$, $t = 1.5\text{mm}$, $N = 1$, Z_r : real part, Z_i : imaginary part

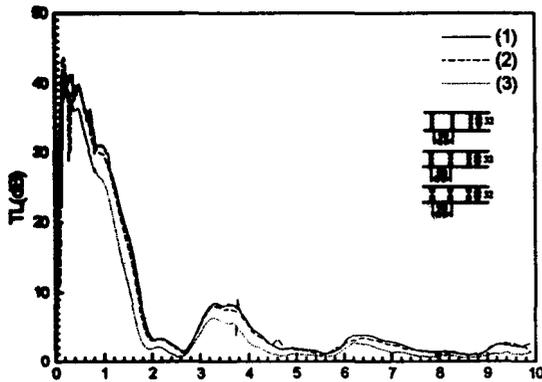
- (1) $d_i = 4.1\text{mm}$, $M = 12$
- (2) $d_i = 5.0\text{mm}$, $M = 8$
- (3) $d_i = 7.1\text{mm}$, $M = 4$

5.2 다공관의 실험결과

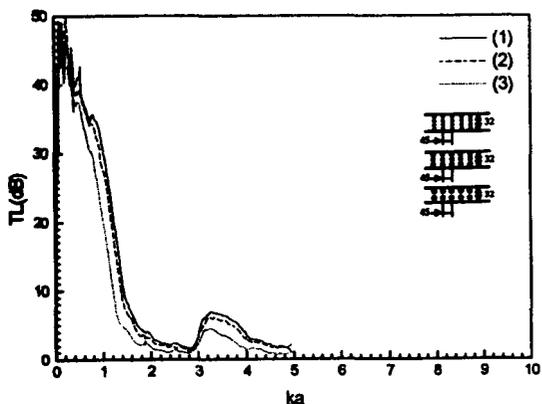
Fig.7은 천공률이 같을때 공극지름이 달라짐에 따른 투과손실의 변화를 나타내고 있다. 세개의 다공관은 모두 같은 천공률을 가지고 있지만 각기 다른 투과손실 특성을 보이고 있으며 특히 전체적인 투과손실크기와 끝부분의 위치가 다른것을 관찰할 수 있다. 이는 식(10)에서 볼 수 있듯이 천공률이 같더라도 공극임피던스가 공극두께 t 와 공극지름 d_i 의 함수이므로 투과손실의 크기를 결정하는 상대어드미턴스 AZ 가 달라지기 때문이다. 천공률이 같은 경우에 공극지름이 커지면 상대어드미턴스의 절대값 $|AZ|$ 의 크기가 작아지고 그에 따라 투과손실의 크기가 작아짐을 볼 수 있다. 또한 상대어드미턴스의 크기가 작아짐에



(a) $N = 2, a = 180\text{mm}$ (Experiment)



(b) $N = 3, a = 90\text{mm}$ (Experiment)



(c) $N = 5, a = 45\text{mm}$ (Experiment)

Fig.7 Transmission loss of various perforated pipe with equal porosity(different AZ) $D_1 = 32\text{mm}, t = 1.5\text{mm}$

- (1) $d_i = 4.1\text{mm}, M = 12$
- (2) $d_i = 5.0\text{mm}, M = 8$
- (3) $d_i = 7.1\text{mm}, M = 4$

따라서 투과손실의 골이 앞으로 이동하며 Δ_{eff} 가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이때 Δ_{eff} 는 직관요소 양단에 부과되는 Effective length의 증가량으로 상대어드미턴스의 크기가 극단적으로 큰 경우에는 직관요소의 양단에 정확히 압력노드(Pressure node)가 생기고 Δ_{eff} 는 0이 될 것이다. 그러나 상대어드미턴스의 크기가 작아지면 음파의 대부분이 인접한 직관요소로 진행하므로 직관요소 양단지점에서 압력노드가 생기지 않고 직관요소의 길이 a 보다 더 긴지점에서 가상의 압력노드가 생기게 되며 Δ_{eff} 는 증가할 것이다.

Fig.8은 $N=2, a=180\text{mm}$ 일때 $M=8$ 이고 $d_i=5.0\text{mm}, t=1.5\text{mm}$ 인 다공관을 기준으로 M, D_1, t, d_i 를 변화시켰을 때의 투과손실을 모의 실험을 통하여 구한 것으로 상대어드미턴스를 구성하는 변수들의 변화에 따른 투과손실 크기 및 Δ_{eff} 의 변화를 관찰할 수 있다. 기준다공관(Fig.8(1))에 대해서 Fig.8(2)는 공극수가 4개로 작아짐에 따라서 투과손실의 크기가 작아지고 Δ_{eff} 가 커지는 것을 볼 수 있고 Fig.8(3)을 보면 다공관 지름이 82mm로 증가함에 따라서 투과손실의 크기가 작아지고 Δ_{eff} 가 커지는 것을 볼 수 있

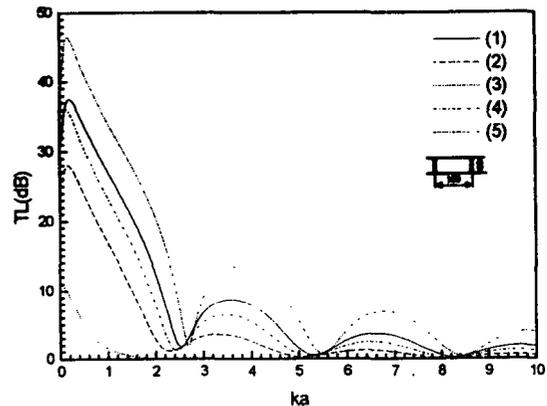
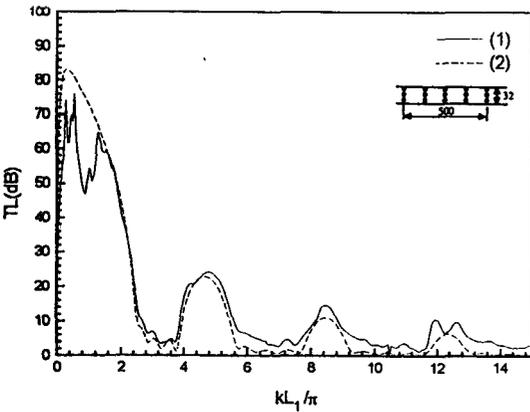


Fig.8 Variation of transmission loss with change of AZ

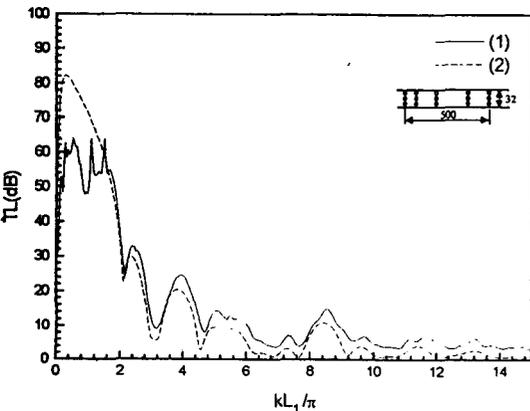
- (1) $D_1 = 32\text{mm}, t = 1.5\text{mm}, d_i = 5.0\text{mm}, a = 180\text{mm}, M = 8, \text{porosity} = 0.391$
- (2) $D_1 = 32\text{mm}, t = 1.5\text{mm}, d_i = 5.0\text{mm}, a = 180\text{mm}, M = 4, \text{porosity} = 0.195$
- (3) $D_1 = 82\text{mm}, t = 1.5\text{mm}, d_i = 5.0\text{mm}, a = 180\text{mm}, M = 8, \text{porosity} = 0.059$
- (4) $D_1 = 32\text{mm}, t = 3.0\text{mm}, d_i = 5.0\text{mm}, a = 180\text{mm}, M = 8, \text{porosity} = 0.391$
- (5) $D_1 = 32\text{mm}, t = 1.5\text{mm}, d_i = 7.1\text{mm}, a = 180\text{mm}, M = 8, \text{porosity} = 0.788$

다. Fig.8(4)에서는 다공판의 두께가 3.0mm로 증가함에 따라 투과손실의 크기가 작아지고 Δ_{eff} 가 커지는 것을 볼 수 있고 Fig.8(5)에서는 같은 공극수에 공극지름이 7.1mm로 증가함에 따라 투과손실의 크기가 커지고 Δ_{eff} 가 작아지는 것을 볼 수 있다.

Fig.9는 비균일공극분포를 갖는 다공판의 실험결과이다. Fig.9(b)와 Fig.9(c)를 균일분포를 갖는 Fig.9(a)와 비교해 보면 같은 공극지름과 같은 전체길이, 같은 천공률을 갖는 다공판이지만 각기 다른 투과손실을 나타내고 있는 것을 볼 수 있으며 모의실험을 통해서도 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig.9(b)와 Fig.9(c)를 비교해 보면 천공률이 같고 다공판을 구성하는 직관요소들의 길이가 같더라도 배열순서가 바뀔때 따라 투과손실특성이 달라짐을

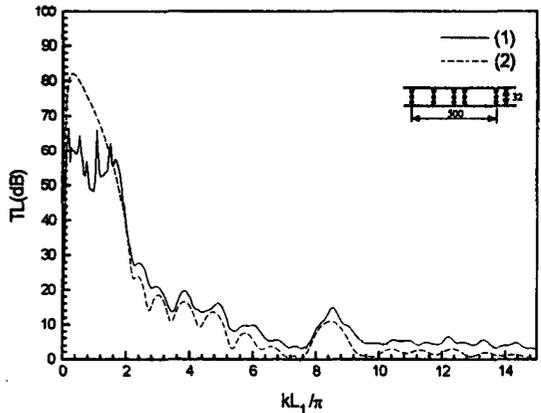


(a) a = 125mm (uniform distribution)



(b) a = 62.5mm, 125mm, 187.5mm, 125mm

관찰할 수 있다. 따라서 같은 천공률과 같은 전체길이를 가지고 있더라도 비균일 공극분포를 가지는 다공판의 특성은 직관요소들의 길이를 바꾸거나 배열순서를 바꿈에 따라서 달라지는 것을 알 수 있다.



(c) a = 125mm, 125mm, 62.5mm, 187.5mm

Fig.9 Comparison between perforated pipe with uniform and nonuniform distribution $D_1=32\text{mm}$, $t=1.5\text{mm}$, $d_i=5.0\text{mm}$, $M=8$, $N=5$, $L_1=500\text{mm}$
(1) Experiment (2) Simulation

5.3 다공형 소음기의 실험결과

일반적으로 다공판은 외부의 확장관과 함께 사용되며 이때 투과손실을 결정하는 인자는 AZ와 ka 이외에도 확장관의 L_2 , L_a , L_b , D_2 등이 포함된다.

다공형 소음기의 모의실험에는 Sullivan의 다공형 소음기모델^[2, 3, 5]을 사용하였으며 실험결과와 비교하였다.

Fig.10은 균일공극분포 다공형 소음기의 실험 및 모의실험결과를 나타내고 있으며 투과손실특성이 다공판의 공극분포형태에 따른 ka효과 이외에도 저주파 부근에서 확장관의 존재로 인한 영향을 포함하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 실험결과와 모의실험결과를 비교해 보면 확장관의 고차모드에 의한 영향이 나타나는 $4ka$ 부근이전까지의 모의실험결과와 실험결과와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig.11(a)는 단순확장관 소음기(Simple expansion chamber)와 다공형 소음기의 투과손실을 나타내며 다공형 소음기의 경우에도 저주파영역에서는 주로 확장관에 의한 영향이 투과손실특성을 결정하

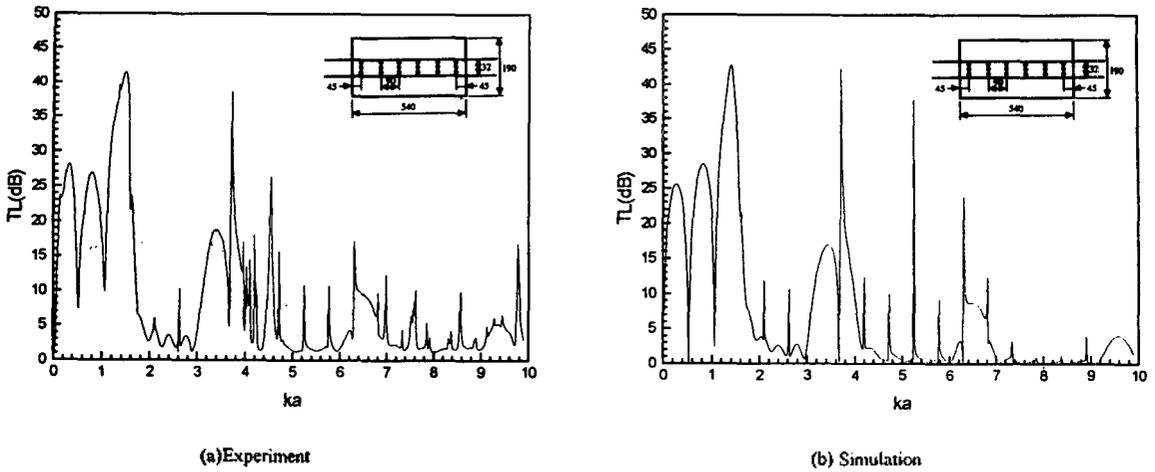
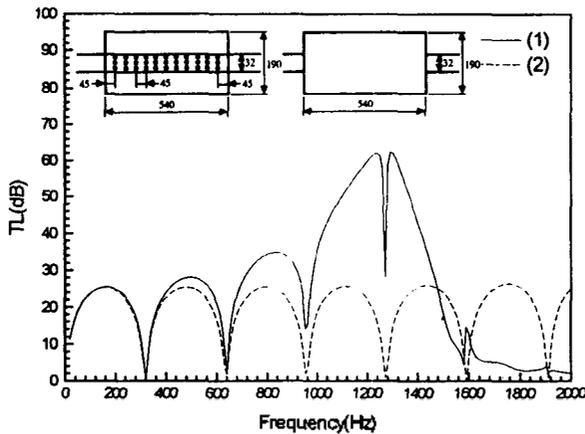


Fig.10 Transmission loss of perforated pipe with outer chamber
 $D_1 = 32\text{mm}$, $t = 1.5\text{mm}$, $d_i = 5.0\text{mm}$, $M = 8$,
 $a = 90\text{mm}$, $N = 6$
 $D_2 = 190\text{mm}$, $L_a = 45\text{mm}$, $L_b = 45\text{mm}$, $L_2 = 540\text{mm}$

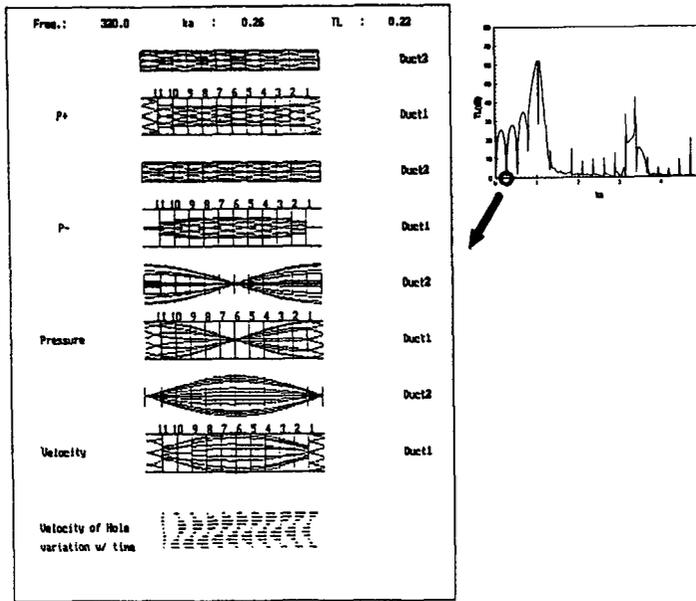
는 것을 볼 수 있다. Fig.11(b)는 다공형 소음기의 음장을 모의실험을 통해 나타낸 것으로 확장관의 존재로 인하여 단순확장관과 유사한 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Fig.12는 비균일공극분포를 가지는 다공형 소음기의 투과손실을 나타내며 확장관의 고차모드에 의한

영향이 나타나는 $4ka$ 부근 이전까지의 실험결과는 모의실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 Fig.12를 Fig.10과 비교해 보면 비균일공극분포의 영향이 나타나고 있음을 알 수 있으며 비균일공극분포 모델을 이용함으로써 비균일공극분포를 가지는 다공형소음기의 성능을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

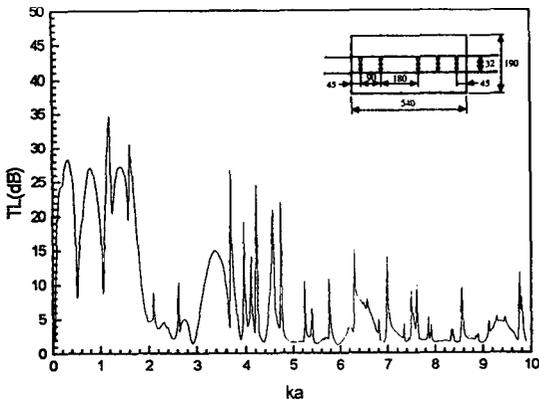


(a) TL of through flow silencer and simple expansion chamber
 (1) Through flow silencer
 (2) Simple expansion chamber

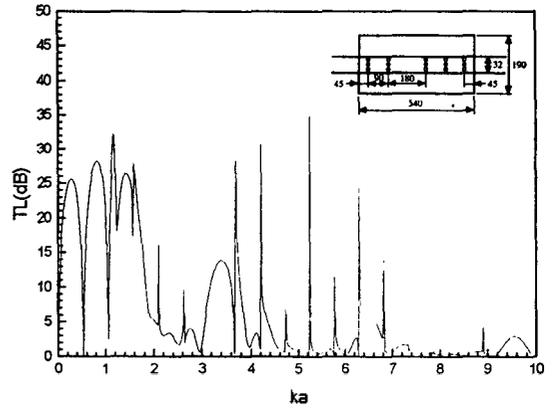


(b) Simulation of pressure field of through flow silencer (first local minimum position. 320Hz)

Fig.11 Comparison between through flow silencer and simple expansion chamber
 $D_1 = 32\text{mm}$, $t = 1.5\text{mm}$, $d_i = 5.0\text{mm}$, $M = 8$,
 $a = 45\text{mm}$, $N = 11$
 $D_2 = 190\text{mm}$, $L_a = 45\text{mm}$, $L_b = 45\text{mm}$, $L_2 = 540\text{mm}$



(a)Experiment



(b) Simulation

Fig.12 Transmission loss of perforated pipe with outer chamber
 $D_1 = 32\text{mm}$, $t = 1.5\text{mm}$, $d_i = 5.0\text{mm}$, $M = 8$, $N = 5$
 $D_2 = 190\text{mm}$, $L_a = 45\text{mm}$, $L_b = 45\text{mm}$, $L_2 = 540\text{mm}$
 $a = 90\text{mm}$, 180mm , 90mm , 90mm (nonuniform distribution)

VI. 결 론

다양한 형상을 갖는 다공관에 대한 실험 및 모의실험을 통하여 다공관의 음향학적 특성은 무차원변수 AZ와 ka로 나타낼 수 있으며 투과손실의 주파수별 특성은 ka로, 투과손실의 크기는 AZ를 사용함으로써 나타낼 수 있음을 확인하였다. 공극임피던스 측정 실험을 통하여 공극임피던스는 공극지름과 주파수의 함수이며 같은 천공률을 갖는 경우에도 공극분포부분의 공극지름과 공극수의 변화에 따라서도 투과손실의 크기와 투과손실의 골이 나타나는 위치가 바뀌어지는 것을 확인하였다. 또한 비균일 공극분포를 갖는 다공형소음기의 실험을 통하여 비균일 공극분포를 갖는 다공형 소음기는 균일분포를 가지는 소음기와는 다른 특성을 나타내며 모의실험을 통해서도 비균일 공극분포에 따른 소음기 특성의 변화를 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 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
2. J. W. Sullivan, "A Method of Modeling Perforated Tube Muffler Components. I. Theory," J. Acoust. Soc. Am., vol. 66, pp. 772-778, 1979
3. J. W. Sullivan, "A Method of Modeling Perforated Tube Muffler Components. II. Applications," J. Acoust. Soc. Am., vol. 66, pp. 779-788, 1979
4. K. Jayaraman and K. Yam, "Decoupling Approach to Modeling Perforated Tube Muffler Components," J. Acoust. Soc. Am., vol. 69, pp. 390-396, 1981
5. 윤두병, "다공관의 음향학적 특성에 대한 연구," 한국과학기술원 기계공학과 석사논문, 1993.
6. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. L. Coppens and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics(3rd edition), John Wiley and Sons, New York pp. 239, 1982
7. A. F. Seybert, "Two-Sensor Methods for the Measurements of Sound Intensity and Acoustic Properties in Duct," J. Acoust. Soc. Am., vol. 83, pp. 2233-2239, 1988

▲윤 두 병(Doo-Byung Yoon) 1969년 1월 15일생



1991년 2월 : 연세대학교 기계공학과 졸업(학사)

1993년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)

현재 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 3년

▲김 양 한(Yang-Hann Kim) 1950년 8월 21일생

현재 : 한국과학기술원 기계공학과 교수
(1988년 제7권 5호 참조)