인위적 다공물질의 흡음특성 연구

A study on the absorption coefficient of an artificial perforated material

*표 순 찬(Pyo, S. C.)
*윤 석 왕(Yoon, S. W.)

요 약

체적기공도가 큰 다공성 빨대 묶음에 대한 흡음특성을 이론 및 실험적으로 연구 고찰하였다. Zwikker와 Kosten의 이론과 Poiseuille 흐름을 고려한 Biot의 이론을 적용시켜 수직입사파에 따른 시료의 흡음률을 이론적으로 예측하였다. 실험적 측정은 '임피던스 튜브 방법'을 이용하였으며, 거리에 따른 감쇠효과를 고려하였다. 다공성 빨대에 대한 흡음률의 이론예측값은 시료의 길이가 120㎜ 이하이고 진동수가 700Hz 이하인 경우, 실험측정값과 잘 일치했다. 시료뒤의 공기층에 의한 흡음에 미치는 효과의 연구 고찰에 있어, 동일한 길이의 시료에 대해 시료뒷면에 공기층을 크게함으로써 저진동수영역에서 흡음률을 높일 수 있었다. 시료와 공기층의 총 길이가 150㎜인 경우, 공기층보다 시료길이의 효과가 흡음률을 높이는데 크게 기여함을 밝혔다.

ABSTRACT

The absorption coefficients of various length bundles of straws simulating perforated material were studied both theoretically and experimentally. For the theoretical predictions Zwikker and Kosten's theory was modified by adapting Biot's theory based on Poiseuille flow. The experimental data were collected using an impedance tube where the attenuation along the length of the tube was considered. The theoretically predicted values agreed very well with the experimentally measured ones for frequencies lower than 700Hz with bundles shorter than 120mm in length placed against the rigid end of the impedance tube. Configurations with an air gap between the end of a bundle and the rigid end were also investigated. Absorption coefficients were higher for 150mm bundles than for those of combined /air gap configurations with a total length of 150mm. Also for the fixed bundle lengths, absorption was found to increase with increasing air gap.

*, **성균관대학교 물리학과 음향학 연구실

Ⅰ. 서 론

다공성 빨대묶음내에서 음의 전파에 따른 흡음특성은 시료의 내경, 시료의 길이, 시료뒷면의 공기층 그리고 시료의 기하학적 배열등과 같은 시료의 구조에 영향을 받는다. 음향변수와 시료의 구조사이에 기본관계식을 유도하여 흡음물질의 흡음특성 분석은 Beranek[1], Zwikker와 Kosten[2] 그리고 Biot[3] 등에 의해 주로 연구되어져왔다.

본 연구에서는 시료의 구조-시료의 내경, 길이, 체적기공도 그리고 공기층-와 음향변수를 이용한 Zwikker와 Kosten, Biot, Hovem과 Ingram[4]그리고 Lambert[5][6]의 이론들을 근거로 하여 원형튜브내에서 다공성 빨대(perforate straw)에 대한 흡음률을 이론적으로 예측하여 실험측정값들과 비교 분석해 보았다.

흡음률의 측정은 가장 널리 사용되는 '임피던스 튜브 방법'[7][8][9]을 이용하였으며, 음압의 거리에 따른 감쇠효과를 고려하였으며, 거리감쇠효과를 고려하지 않은 경우와 흡음률 측정값들을 서로 비교해 보았다.

Ⅱ. 이론적 배경

Zwikker와 Kosten[2]은 시료의 골격과 시료내의 유체사이에 경계를 갖는 다공성물질에 대해 운동을 기술하기 위하여 유체의 1차원적 z축 방향의 운동에 대해 운동방정식과 연속방정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$-\frac{\partial p_f}{\partial z} = \rho_f \frac{\partial v_f}{\partial t} + S\,(v_f - v_s) \tag{1}$$

$$-\frac{\partial p_f}{\partial t} = \frac{\Omega}{K_f}\frac{\partial v_f}{\partial z} + (1-\Omega)\left(\frac{1}{K_f} - P_o\right)\frac{\partial v_s}{\partial z} \tag{2}$$

여기서 p_f : 유체의 압력

ρ_f : 유체의 밀도

v_f : 유체의 속도

v_s : 경계면의 속도

S : 결합상수

Ω : 체적기공도

$1/K_f$: 유체의 체적탄성률

P_o : 유체의 평형상태 압력

Zwikker와 Kosten은 점성력을 시료의 기하학적 형태에 따른 변화의 고려없이 단순히 포괄적인 결합상수S를 도입하여 유체속도와 경계면의 속도 사이의 상대속도에 비례하는 관계로 보았다.

결합상수S가 내포된 식(1)을 Biot[3]는 원형튜브내에서 유체의 정성률η를 고려하여 3차원 운동방정식, 식(3)으로 수정하였다.

$$\rho_f \frac{\partial v_f}{\partial t} = -\frac{\partial p_f}{\partial z} + \eta \nabla^2 v_f \tag{3}$$

원형튜브내에서 유체의 흐름은 튜브의 축 즉, z축에 대해 대칭이다. 원통좌표계에서 Laplacian 연산자는 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}$ 이다. 원형튜브의 축 방향으로 음이 전파할 경우, 원형튜브의 경계면에서 상대속도는 영이 된다. 경계면의 속도와 유체의 속도 사이에 상대속도는 층밀리기 변형을 일으키며, 층밀리기 변형력(Shear stress)은 상대속도의 측면기울기에 비례한다. Biot는 튜브의 경계면에서 층밀리기 변형력 τ가

$$\tau = \frac{4}{a}\eta F(k)\,(v_s - v_f) \tag{9}$$

임을 보였다. a는 튜브의 반경이고 F(k)는 Poiseuille 흐름에서 진동수에 의존하는 Biot함수이다.

$$F(k) = \frac{1}{4}\,\frac{kT(k)}{1+i\left(\frac{2}{k}\right)T(k)} = F_r(k) + iF_i(k) \tag{5}$$

여기서 $T(k)=(ber'(k)\cdot ibei'(k))/(ber(k)\cdot ibei(k))$= Kelvin함수 (6)

$$k = a(\omega\rho_f/\eta)^{1/2} \quad (7)$$

$i = \sqrt{-1}$, ω : 각진동수

$F_r(k)$: Biot함수의 실수부

$F_i(k)$: Biot함수의 허수부

반경a인 원형튜브내의 유체흐름의 투과률은 Darcy 법칙에 따른다. 단위시간당 단위면적당 유체흐름의 전체 체적은 압력기울기에 비례하고 점성률에 역비례하며, 비례상수로서 Darcy투과상수 $B_o'=a^2/8$를 도입하면 식(4)의 층밀리기 변형력 τ는 식(8)로쓰여진다.

$$\tau = \frac{\eta}{B_o'}\left(\frac{a}{2}\right)F(k)(v_s-v_f) \quad (8)$$

여기서 a/2는 원형튜브인 경우 단위표면적당 체적의 비이다. 그러므로 점성력에 의한 단위체적당 힘 τ_v는

$$\tau_v = \frac{\eta}{B_o'}F(k)(v_s-v_f) \quad (9)$$

이며 식(3)의 우변 둘째항에 대치된다.

원형튜브내에 모래와 같은 다공성 시료인 경우 Hovem[4]과 Lambert[6]등은 식(8)의 a를 평균공극크기(pore mean size)로 수정하였으나, 본 연구에서는 내부가 직선으로 뚫려진 다공성 빨대의 평균반경 a_s로 볼 수 있다.

원형튜브내에 체적기공도가 크고 반경 a_s인 다공성 빨대들도 채워진 경우 Darcy통과상수 B_o'는 전체체적에 대한 공기가 차지하는 체적의 비 값인 체적기공도 Ω를 고려한 Darcy투과상수 $B_o=\Omega a_s^2/8$로수정가능하다.[4] 음의 전파로 인해 빨대는 거의 움직이지 않으므로 경계면의 속도 $v_s=0$로 간주할 수 있다. 원형튜브내에 다공성 빨대 목음으로 채워져 있는 경우 유체의 압력 p_f는 $p_f\Omega$로, 유체의 속도 v_f는 $\frac{1}{\Omega}v_f$로, 유체의 밀도 ρ_f는 $\Omega\rho_f$로 수정가능하다.[5] 이와같은 수정항들을 이용하여 식(2)와 식(3)을 다음과 같이 변경시킬 수 있다.

$$-\Omega\frac{\partial p_f}{\partial z} = \rho_f\frac{\partial v_f}{\partial t} + \frac{\eta}{B_o\Omega}F(k)v_f \quad (10)$$

$$-\Omega\frac{\partial p_f}{\partial t} = \frac{1}{K_f}\frac{\partial v_f}{\partial z} \quad (11)$$

튜브내의 시료에 각진동수 ω를 갖는 평면파가 수직입사될 경우 음향전파상수 Γ와 특성임피던스 Z는 식(12)와 식(13)으로 주어진다.

$$\Gamma = \omega\left[\rho_f K_f + \frac{\eta}{B_o\omega\Omega}K_f F_i(k) - i\frac{\eta}{B_o\omega\Omega}K_f F_r(k)\right]^{1/2} \quad (12)$$

$$Z = \frac{1}{\omega K_f\Omega}\Gamma \quad (13)$$

길이 ℓ인 시료뒤에 시료보다 훨씬 큰 임피던스를 가진 판이 있다면 표면임피던스는 아래와 같다.

$$Z_{in} = Z\coth(-i\Gamma\ell) \equiv R_{in} + iX_{in} \quad (14)$$

여기서 R_{in} : 음향저항

X_{in} : 음향리액턴스

본 연구는 공기중에서의 흡음특성에 관한 것이므로 공기의 특성임피던스 $\rho_o c_o$와 재질의 표면임피던스 Z_{in}의 관계에서 흡음률 A_n은 다음과 같이 주어진다.

$$A_n = \frac{4R_{in}\rho_o c_o}{[(\rho_o c_o + R_{in})^2 + X_{in}^2]}$$

Ⅲ. 실험조건 및 방법

실험에서 사용된 시료는 상업적으로 유통되고 있는 다공성 빨대묶음으로 내경이 2mm에서 7mm사이인 빨대를 택하여 시료의 길이변화와 시료뒤의 공기층을 변화시켜 흡음효과를 알아보았다. 시료의 길이변

화는 각각 150mm에서 70mm사이까지 10mm 간격으로 줄였으며, 시료뒤의 공기층변화는 내경이 2.84mm, 4.34mm인 시료에 대하여 일정한 시료길이에 공기층을 10mm씩 증가시켜 시료길이와 공기층길이의 총합이 180mm인 경우까지 측정하였다. 사용한 시료의 내경, 체적기공도는 표(1)과 같다.

표 1 시료의 특성

시료의 종류	내 경	체적기공도
STRAW-A	2.84 mm	0.847
STRAW-B	4.34 mm	0.881
STRAW-C	5.39 mm	0.903
STRAW-D	6.28 mm	0.930

앞으로 편의상 내경이 2.84mm, 4.34mm, 5.39mm, 6.28mm인 각 시료들을 내경의 근사적인 값 3mm, 4mm, 5mm, 6mm인 시료들로 부르겠다.

흡음률 측정은 가장 널리 사용되고 있는 임피던스 튜브 방법을 이용하였다. 임피던스 튜브는 직경이 105mm이고 길이가 1320mm이며, 튜브내에 입사된 음이 평면파를 형성하는 진동수영역은 200Hz부터 1900Hz까지이다.[8][9] 흡음률 측정에서 거리 감쇠효과를 고려한 Kathuriya와 Munjal[7]은 최대음압점들과 최소음압점들을 각각 연결하여 임의 위치에서 최대음압(P_{max})과 최소음압(P_{min})의 차를 얻고 그 위치에서 최대음압과 최소음압의 비인 정상파 비(Standing Wave Ratio: SWR)는 다음과 같이 주어진다.

$$SWR \equiv \left|\frac{P_{max}}{P_{min}}\right| = \frac{e^{\alpha z}+R_o e^{-\alpha z}}{e^{\alpha z}-R_o e^{-\alpha z}} \tag{16}$$

z : 시료표면으로부터의 거리

R_o : 시료표면의 압력반사계수

그러나 실제로 최대음압과 최소음압은 같은 위치에서 존재하지 않으므로 정상파 비는 다음과 같이 쓰여져야 한다.

$$SWR = \frac{e^{\alpha z_2}+R_o e^{-\alpha z_2}}{e^{\alpha z_1}-R_o e^{\alpha z_1}} \tag{17}$$

$$= \frac{e^{\alpha z_1}e^{\alpha \Delta z}+R_o e^{-\alpha z_1}e^{-\alpha \Delta z}}{e^{\alpha z_1}-R_o e^{-\alpha z_1}} \tag{18}$$

여기서 z_1과 z_2는 시료표면으로 부터 각각 최소, 최대음압이 나타나는 위치까지의 거리이다. Δz는 z_1과 z_2사이의 거리 차이이다.

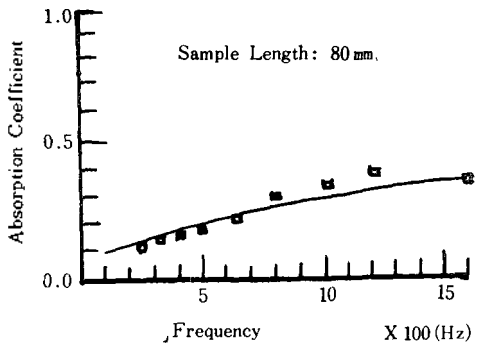
식(16)과 식(18)의 비교에서 Kathuriya와 Munjal방법의 문제점은 $e^{\alpha z}$와 $e^{\alpha \Delta z}$의 차수의 크기는 큰 차이가 없으나, $e^{\alpha \Delta z}$는 1로 간주하고, $e^{\alpha z}$는 전부 고려하였으므로 일관성을 보이지 않고 있다. 거리 감쇠효과 및 최대, 최소음압의 형성위치의 차를 고려한 본 연구의 방법은 $e^{\alpha z}$과 $e^{\alpha \Delta z}$을 같은 정도의 정확도 즉, $1+\alpha z$과 $1+\alpha \Delta z$까지 고려하였으며, α가 매우 작으므로 z의 1차항까지만 고려하더라도 허용가능한 도내에서 충분히 정확한 값으로 근사할 수 있다.

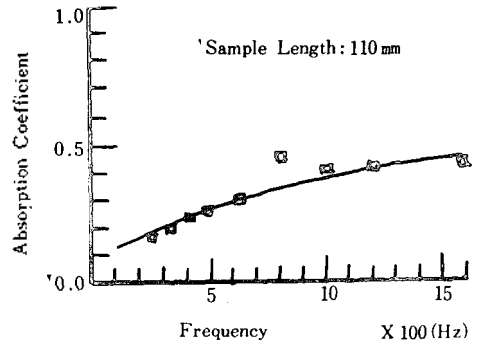
Ⅳ. 실험결과 및 고찰

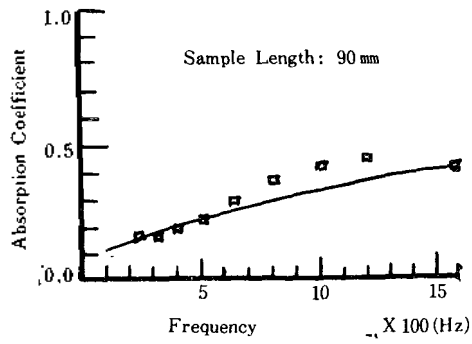
거리에 따른 감쇠효과를 고려하지 않은 경우와 거리에 따른 감쇠효과를 고려한 Kathuriya와 Munjal의 방법 그리고 본 연구의 방법에 대해 흡음률의 실

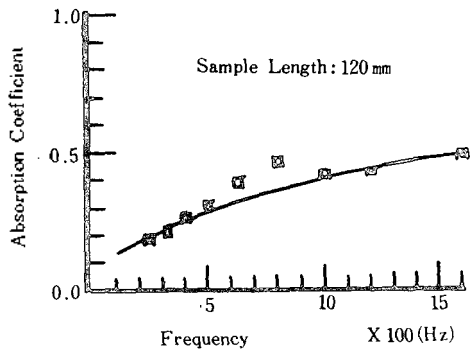
표 2 거리감쇠 효과에 대한 세가지 방법의 흡음률 비교 시료의 길이 150mm : 공기층 0mm : 내경 3mm

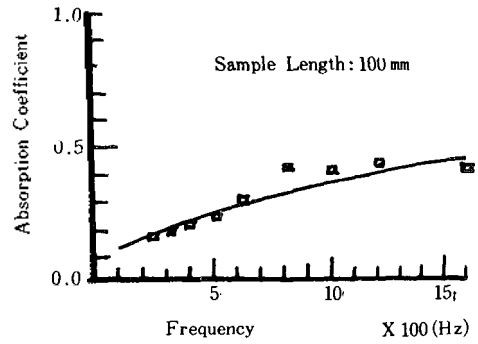
	거리감쇠고려무	Kathuriya 방법	본연구의방법
250 Hz	0.2634	0.2658	0.2658
315 Hz	0.2948	0.2975	0.2976
400 Hz	0.3678	0.3711	0.3712
500 Hz	0.4414	0.4370	0.4372
630 Hz	0.4823	0.4806	0.4807
800 Hz	0.4684	0.4662	0.4665
1000 Hz	0.4208	0.4203	0.4204
1200 Hz	0.4606	0.4607	0.4609
1600 Hz	0.6418	0.6360	0.6370











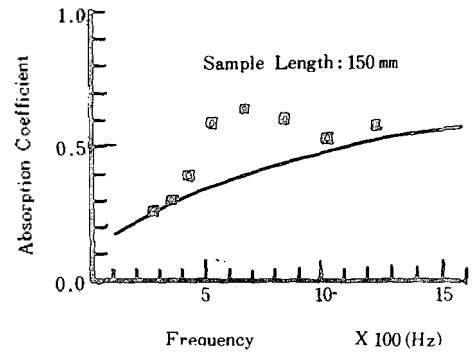


그림 1 내경 3㎜의 빨대 길이변화에 따른 흡음률
□: 실험측정값 실선: 이론 예측값

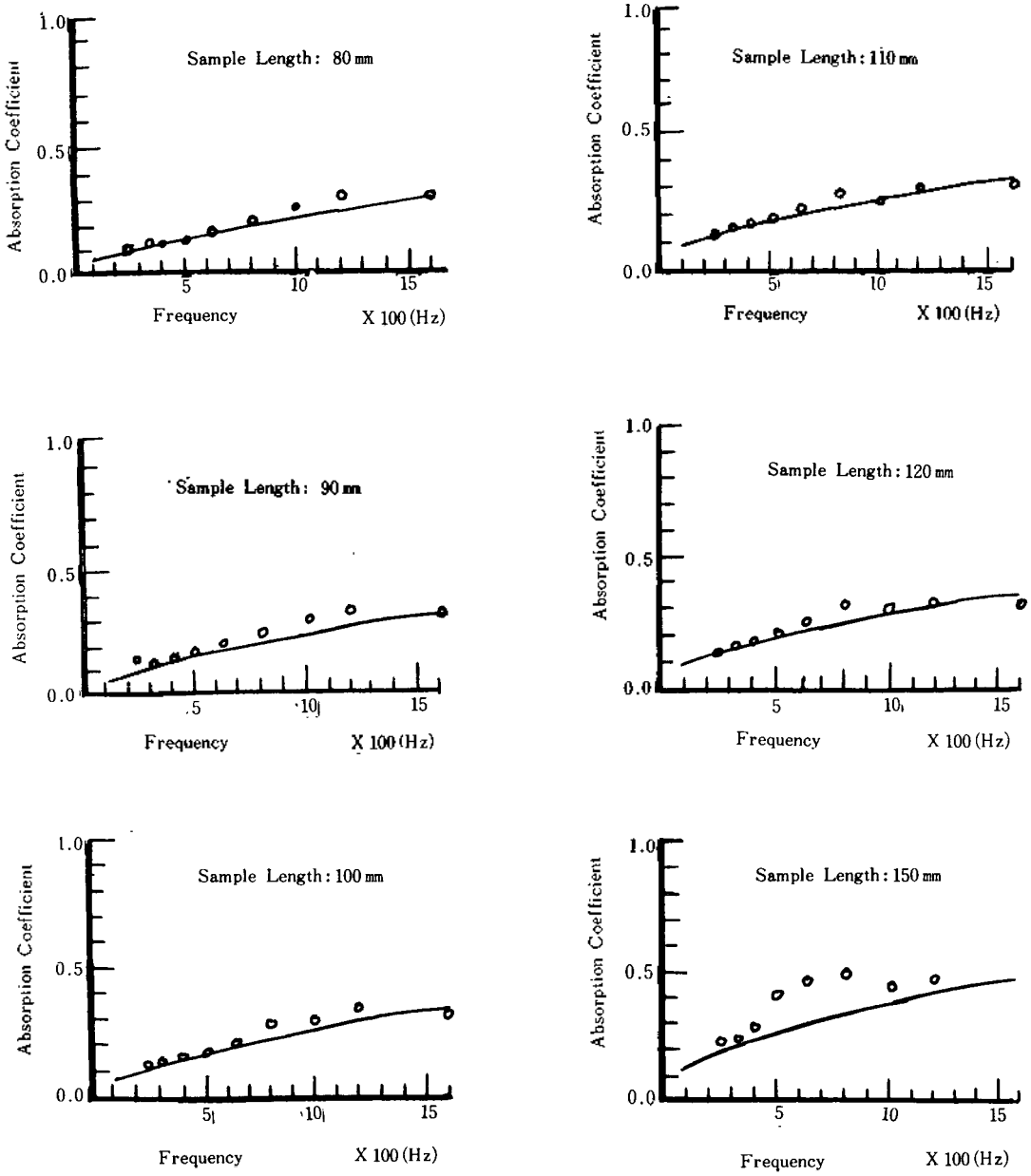


그림 2 내경 4mm의 빨대 길이변화에 따른 흡음률
○ : 실험측정값 실선 : 이론 측정값

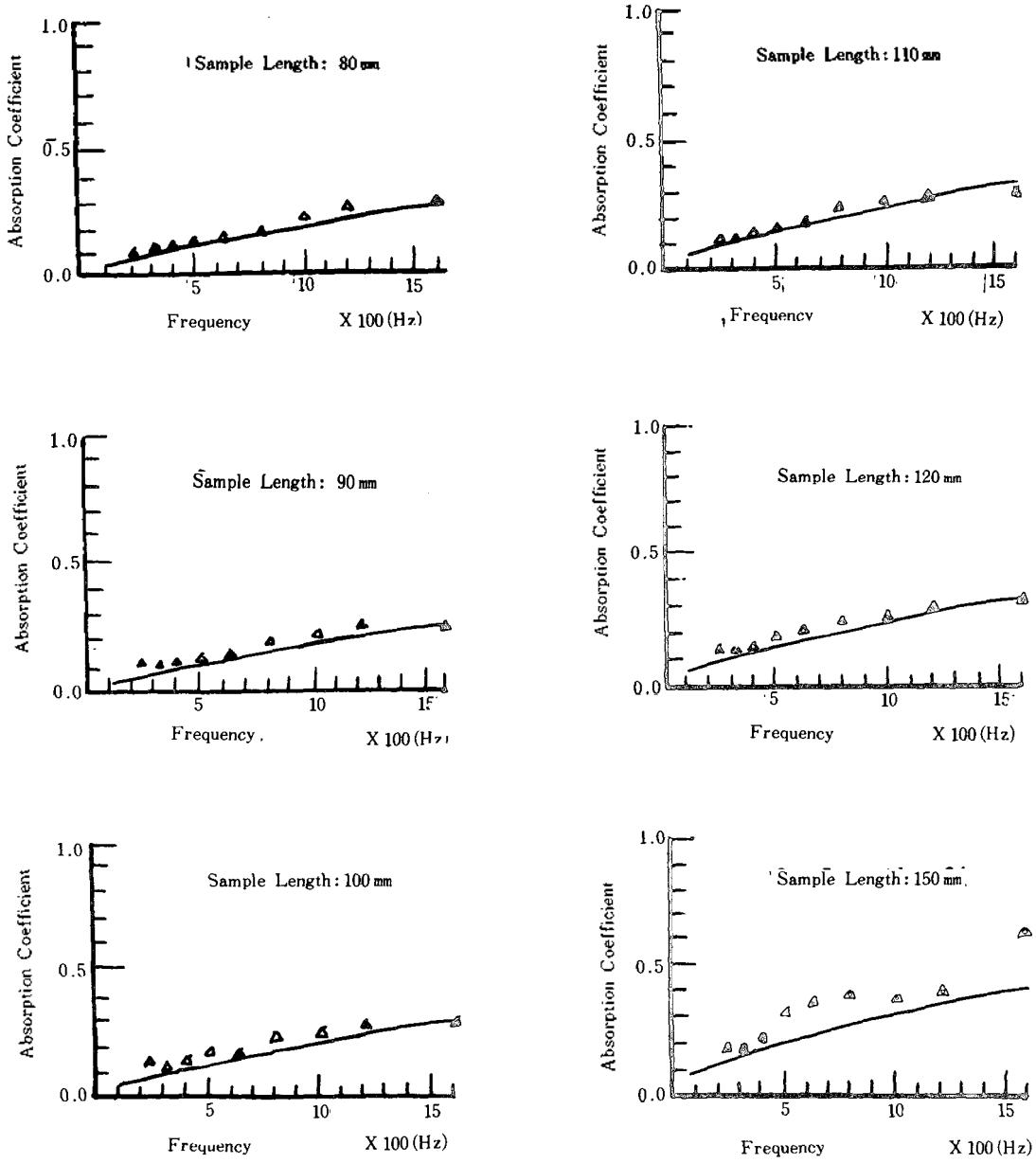


그림 3 내경 6mm의 빨대 길이변화에 따른 흡음률
△ : 실험측정값 실선 : 이론 예측값

표 3 거리감쇠 효과에 대한 세가지 방법의 흡음률 비교
시료의 길이 90mm : 공기층 0 mm : 내경 5 mm

	거리감쇠고려무	Kathuriya 방법	본연구의방법
250 Hz	0.1434	0.1444	0.1445
315 Hz	0.1317	0.1332	0.1333
400 Hz	0.1473	0.1497	0.1497
500 Hz	0.1827	0.1746	0.1747
630 Hz	0.2122	0.2056	0.2057
800 Hz	0.2634	0.2583	0.2584
1000 Hz	0.2891	0.2830	0.2831
1200 Hz	0.3321	0.3282	0.3284
1600 H z	0.3183	0.3108	0.3109

	거리감쇠효과무	Kathuriya 방법	본연구의방법
250 Hz	0.1400	0.1407	0.1407
315 Hz	0.1324	0.1341	0.1341
400 Hz	0.1595	0.1619	0.1619
500 Hz	0.2006	0.1919	0.1919
630 Hz	0.2409	0.2356	0.2356
800 Hz	0.2877	0.2825	0.2826
1000 Hz	0.2948	0.2889	0.2890
1200 Hz	0.3049	0.3014	0.3015
1600 Hz	0.3123	0.3048	0.3049

험측정값을 수치적으로 표(2)~표(4)에서 비교해 보았다. 표(2)~표(4)에서 보듯이 공기중에서의 감쇠상수 α가 매우 작기 때문에 튜브내에서의 음압감쇠를 고려한 효과가 흡음률에 큰 편차를 야기시키지 않음을 확인할 수 있었다.

시료의 내경이 3mm부터 6mm사이에 대해 각각의 길이변화에 따른 흡음률을 이론예측값과 실험측정값으로 (그림 1)~(그림 3)에서 비교해 보았다. 이론예측값은 시료의 내경이 클 수록 실험측정값과 좋은 일치를 보이고 있으며, 시료길이가 120mm이하이고, 700Hz이하의 진동수영역에서 이론예측값은 실험측정값과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 빨대의 길이가 150mm인 경우 각 내경변화에서 실험측정값과 이론예측값은 진동수에 따라 상당한 편차를 보이고 있다. 이와같이 실험측정값이 높게 나타나는 이유는 시료길이가 길어지므로 특정진동수영역에서 시료내부에 입사된 음이 공진현상을 일으킨 것으로 판단되며, 이론예측값은 공진현상에 대한 이론적 기술을 수용하지 못하고 있다.

실료길이와 공기층길이의 합이 150mm로 일정한 경우 내경이 3mm와 4mm인 시료에 대하여 흡음률의 실험측정값들을 (그림 4)와 (그림 5)에서 각각 비교해 보았다. 공기층의 길이가 짧고, 시료길이가 길수록 모든 진동수영역에서 흡음률이 높게 나타나고 있다. 그러므로 공기층의 효과보다는 시료길이의 효과가 흡음률에 훨씬 큰 영향을 미치고 있다고 판단된다.

시료면 뒤의 공기층 길이변화에 따른 흡음률의 실

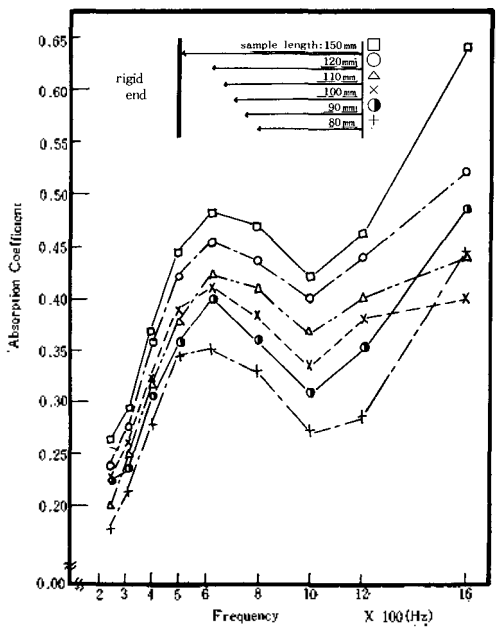


그림 4 - 내경 3mm에서 공기층과 시료길이의 합이 150mm인 경우 흡음률 비교.

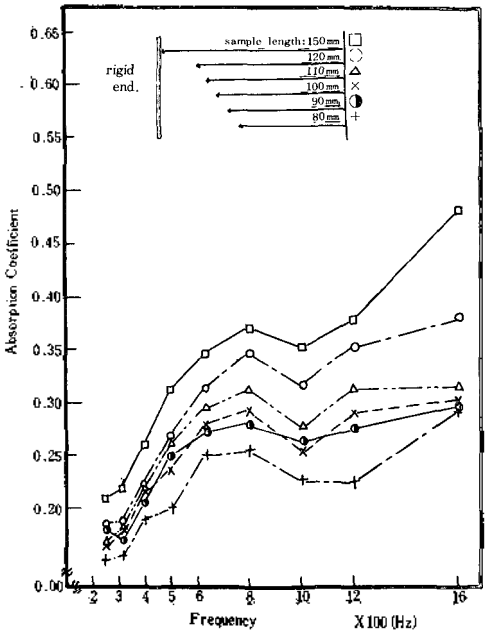


그림 5 내경 4 mm에서 공기층과 시료길이의 합이 150mm 인 경우 흡음률 비교.

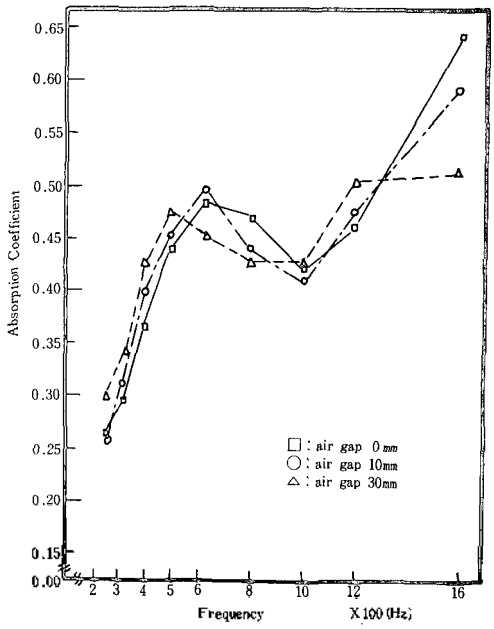


그림 6 공기층 변화에 따른 흡음률 비교. 내경 : 3 mm, 빨대길이 : 150mm

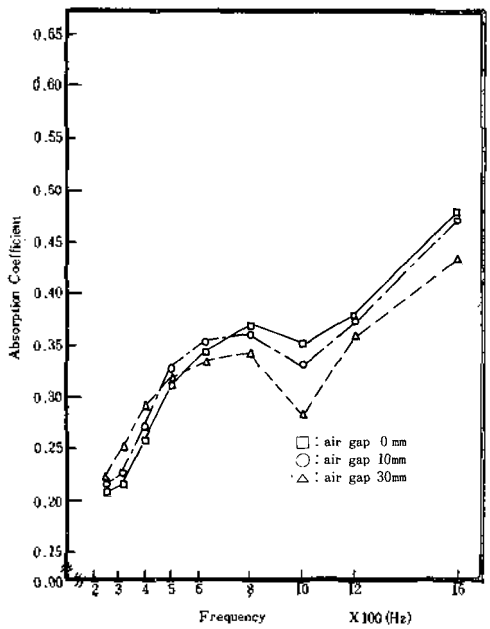


그림 7 공기층 변화에 따른 흡음률 비교 내경 : 4 mm, 빨대길이 : 150mm.

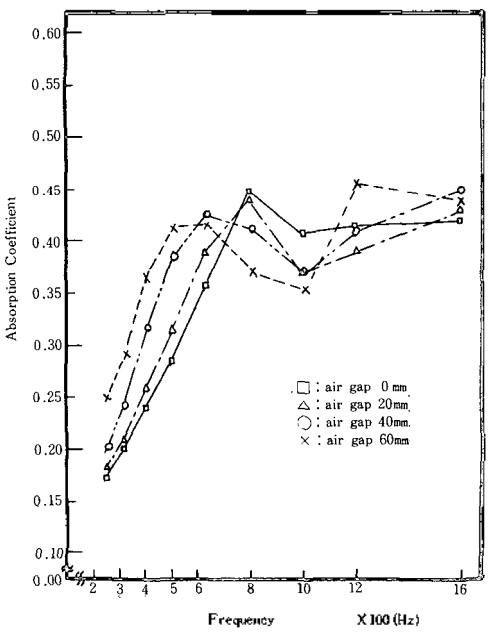


그림 8 공기층 변화에 따른 흡음률 비교 내경 : 3 mm, 빨대길이 : 110mm

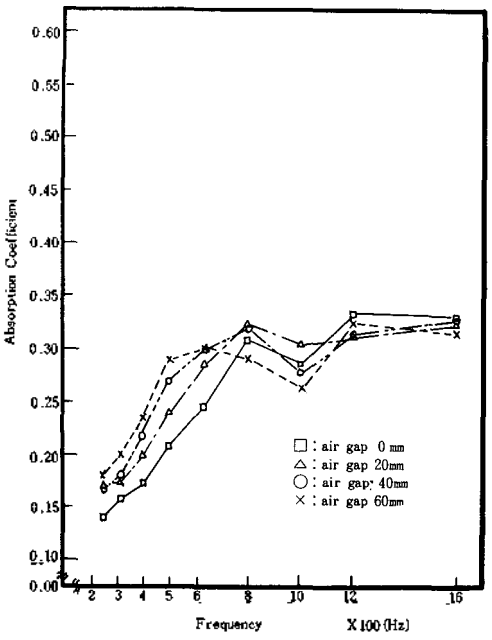


그림 9 공기층 변화에 따른 흡음률 비교
내경 : 4 mm, 빨대길이 : 110 mm.

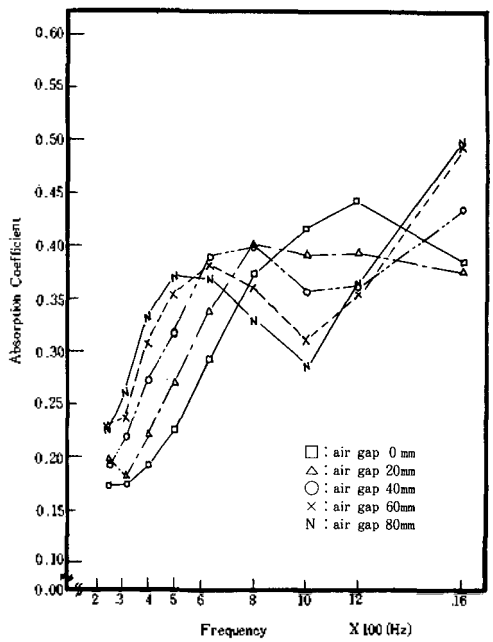


그림10 공기층 변화에 따른 흡음률 비교
내경 : 3 mm, 빨대길이 : 90mm.

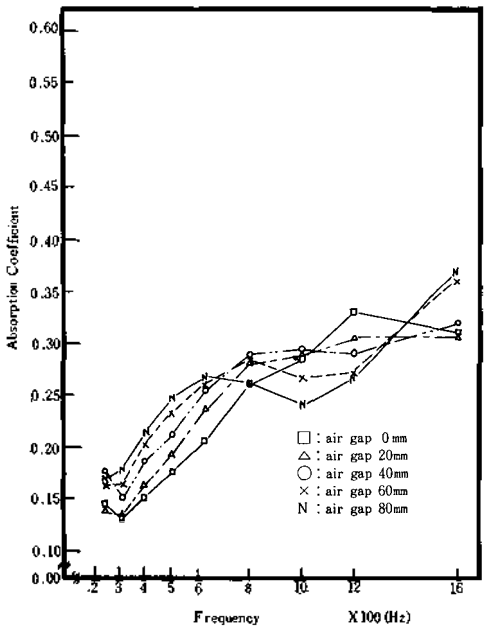


그림11 공기층 변화에 따른 흡음률 비교
내경 : 4 mm, 빨대길이 : 9, 90mm.

험측정값들을 내경이 3mm와 4mm이며, 시료의 길이가 150mm, 110mm, 90mm에 대해 (그림 6)~(그림11)에서 각각 비교해 보았다. 길이가 같은 시료에서 내경이 작은 것이 흡음률을 높게 나타내며, 공기층을 크게 할수록 저진동수에서 흡음률이 높아지며, 또한 흡음 곡선의 극대값이 저진동수쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 시료길이와 공기층길이가 진동수에 의존하여 공진현상을 일으킨 원인으로 사료된다.

V. 결 론

흡음특성을 고찰하는데 있어 구하기 쉽고, 다루기 용이하며, 구조가 단순하며, 이론식에 필요한 체적 기공도와 같은 상수값 측정이 비교적 용이한 다공성 빨대 묶음을 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, Zwikker와 Kosten의 다공성물질. 내에 유

체의 운동을 기술하기 위한 운동방정식과 연속방정식에 Biot가 도입한 점성률을 고려하고 Lambert와 Hovem이 도입한 Darcy투과상수를 수정하여 빨대묶음에 적용시킨 결과 빨대길이가 120mm 이하이며 진동수가 700Hz이하에서 이론예측값이 실험측정값과 잘 일치함을 보였다.

둘째, 흡음률 계산에 있어 한가지 측정 데이타를 이용 거리감쇠를 고려하지 않은 방법과 거리감쇠효과를 일부 고려한 Kathuriya와 Munjal의 방법 그리고 거리감쇠 및 최대, 최소음압의 형성위치의 차를 고려한 본 연구의 방법으로 분석한 결과 공기중에서의 감쇠상수가 작기 때문에 거리에 따른 감쇠효과가 극히 미약함을 알 수 있었다.

셋째, 빨대 묶음의 흡음효과에 미치는 영향은 공기층과 시료의 총 길이의 합이 일정한 경우 흡음률 측정에서 공기층의 효과보다는 빨대의 효과가 더 큼을 알 수 있었으며, 시료길이가 같은 경우 시료뒷면에 공기층을 증가시킴에 따라 저진동수영역으로 흡음률의 극대값이 이동함을 확인할 수 있었다.

參 考 文 獻

1. L.L. Beranek, "Acoustical properties of homogeneous, isotropic rigid tiles and flexible blankets," J. Acoust. Soc. Am. 19, p.556, (1947).
2. C. Zwikker and C.W. Kosten, *Sound Absorbent Materials* (Elsevier, New York, 1949).
3. M.A. Biot, "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid," J. Acoust. Soc. Am. 28, p.179, (1956).
4. J.M. Hovem and G.D. Ingram, J. Acoust. Soc. Am. 66, p.1807, (1972).
5. R.F. Lambert, "Acoustical properties of highly porous fibrous materials," NASA, N79-3205317 No. 1 (1980).
6. R.F. Lambert and J.S. Tesar, "Acoustic structure and propagation in highly porous, layered fibrous materials," J. Acoust. Soc. Am. 76, p.1231, (1984).
7. M.L. Kathuriya and M.L. Munjal, "Impedance of a Black Box," J. Acoust. Soc. Am. 58, p.451, (1975).
8. ANSI/ASTM C384-77. "Standard Test Method for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube mathod, "American National Standards Institute, New York, NY.
9. 김명수, 윤석왕, 박홍수 "Impedance tube을 이용한 흡음재의 흡음률 측정", 한국음향학회지, 5(2), p. 39, (1986).