# 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관법을 이용한 차음시트의 음향투과손실 측정

이 동 훈†, 용 호 택, 이 승*
서울산업대학교 기계공학과, *서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

# Sound Transmission Loss Measurement for Sound Isolation Sheets by Two-Microphone Impedance Tube Method

**Dong-Hoon Lee†, Ho-Taek Yong, Seung Lee***
*Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea*
**Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Industry and Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea*

*(Received July 23, 2001; revision received Novemer 29, 2001)*

**ABSTRACT**: The main objective of this study is to propose a practical two-microphone impedance tube method to measure the sound transmission loss for flexible sound isolation sheets without the use of the time-consuming and expensive reverberation room. This method was based on the sound decomposition theory developed by Seybert using the spectral density functions of the incident and reflected sound waves. In order to verify the validity of the experimental results, the measured sound transmission losses from the proposed method were compared with the measured data from the reverberation room method and the calculated data from the theory satisfying the mass law of sound isolation material. The resulted trends of the sound transmission losses versus frequencies for several different sound isolation sheets were almost same for each other and agreed quite well in both methods except at some low frequency region. From the experimental results, it was found that the accuracy of sound isolation capability obtained by two-microphone impedance tube method depends upon the microphone spacing, the distance from the first microphone to the test sample surface and the test sample location.

**Key words**: Impedance tube method(임피던스관법), Mass law(질량법칙), Reverberation room method(잔향실법), Sound isolation sheet(차음시트), Sound transmission loss(음향투과손실), Sound transfer function(음향전달함수)

## 기 호 설 명

$c$ : 음속 [m/sec]
$f$ : 주파수 [Hz]
$H_{12}$ : 두 마이크로폰 사이의 전달함수
$I_i$ : 입사음의 음향세기 [W/m$^2$]
$I_r$ : 반사음의 음향세기 [W/m$^2$]
$I_t$ : 투과음의 음향세기 [W/m$^2$]
$k$ : 파동수($=2\pi f/c$)

† Corresponding author
Tel.: +82-2-970-6331; Fax: +82-2-949-1458
*E-mail address*: Ldh@plaza1.snut.ac.kr

$m$ : 면밀도 [kg/m$^2$]
$R_p$ : 음향세기(또는 파워) 반사계수
$s$ : 두 마이크로폰 사이의 거리 [m]
$S_{11}$ : 첫번째 마이크로폰의 음압 스펙트럼 [Pa$^2$]
$S_{AA}$ : 입사파의 음향파워 스펙트럼 [Pa$^2$]
$S_{BB}$ : 반사파의 음향파워 스펙트럼 [Pa$^2$]
$TL$ : 음향투과손실 [dB]
$x_1$ : 시료면으로부터 첫번째 마이크로폰까지의 거리 [m]
$x_2$ : 시료면으로부터 두번째 마이크로폰까지의 거리 [m]

## 그리스 문자

$\theta$ : 입사음의 입사각 [rad]
$\rho$ : 공기 밀도 [kg/m$^3$]
$\tau$ : 음향세기(또는 파워) 투과계수
$\omega$ : 각주파수 [rad/sec]

## 1. 서 론

호텔, 주상복합아파트, 공동주택, 그리고 오피스텔과 같은 각종 건축물의 실내소음 차단용으로 다양한 종류의 차음시트가 개발되어 사용되고 있다. 특히 폴리비닐이나 고무에 특수합금 분말을 배합하여 성형한 두께가 얇은 시트형 차음재는 차음성능, 내구성 및 제조의 용이성을 만족시킬 수 있는 차음재로서 시공이 간편할 뿐만 아니라 기존 제품의 문제점인 공간낭비를 최소화시킬 수 있는 잇점 때문에 최근에 건설되는 각종 건축물에 폭넓게 쓰이고 있다.[1,2]

차음재의 성능척도는 투과음에 대한 입사음의 강도비에 대수를 취한 음향투과손실로 표현하며, 성능평가에는 전통적으로 잔향실법을 주로 이용하고 있다. 그러나 개발중인 차음재를 일일이 잔향실에서 음향투과손실을 측정한다는 것은 많은 시간과 비용이 드는 문제점이 있다. 또한 잔향실을 이용하여 시험할 경우에는 국제규격[3]으로 정한 크기가 매우 큰 시료가 필요하므로 제품개발 단계에서 성능시험용 시료의 제조에 과도한 비용이 투입될 뿐만 아니라 시료준비에 많은 시간을 허비하는 단점이 있다. 따라서 잔향실과 같은 대형의 측정시설을 이용하지 않고도 차음재의 음향투과손실을 정확하면서도 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 측정장치나 측정기법의 개발이 요구되고 있다.[4,5]

이와 관련하여 종래의 잔향실법에 비하여 한층 발전된 측정기법으로는 Crocker et al.,[6] 그리고 Wang and Crocker[7]이 제안한 음향세기 측정법을 들 수 있다. 이들은 음원실인 잔향실의 한쪽 개구벽에 시험하고자 하는 대상차음재를 설치한 상태에서 차음재를 투과하여 실외부로 전파하는 투과음의 음향세기를 두 개의 마이크로폰을 이용하여 측정하고, 음원실의 음향세기는 잔향실에서 측정한 평균 음압레벨로부터 구하여, 두 음향세기의 차이로부터 차음재의 음향투과손실을 구하는 방법을 제시하였다. 그러나 이들의 측정기법에서는 음원실인 잔향실 하나를 반드시 필요로 한다. 또한 최근에 들어와서 Bolton et al.[8]은 잔향실 대신에 임피던스관을 이용하여 자동차용 음향재료의 흡음율과 투과손실을 보다 간편하게 측정할 수 있는 측정기법을 제안한 바 있다. 즉 자동차용 음향재료로 쓰이는 폴리우레탄폼과 같은 다공성 흡음재료를 임피던스관의 중간부에 설치하고, 상류단과 하류단의 임의의 위치에 부착된 두 마이크로폰간의 전달함수 측정값을 이용하여 흡음계수와 투과계수를 구하는 방법이다. 그러나 이들의 측정법은 다공성 음향재료에만 국한되어 쓰일 수 있으며,[1] 본 연구에서와 같은 차음시트의 성능측정에는 적용의 한계성을 갖는다.

따라서 본 연구에서는 잔향실을 이용하지 않고도 차음시트의 음향투과손실을 정확하면서도 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 실용적인 측정법을 제안하고자 한다. 본 연구에 이용된 측정장치는 두 개의 마이크로폰과 임피던스관 그리고 스피커와 주파수분석기로 구성된다. 시험용 차음시트는 실제 건축물의 실내소음 차단용으로서 시중에 판매되고 있는 연질의 얇은 시트형 차음재 4종류를 이용하였다. 특히 본 연구로부터 얻어진 측정결과의 신뢰성은 질량법칙에 근거한 이론계산 결과뿐만 아니라 잔향실법으로 구한 성능시험 결과와의 상호비교를 통하여 검증된다. 또한 본 연구의 측정법으로부터 야기될 수 있는 오차요인, 즉 마이크로폰의 설치위치와 차음시트의 설치위치 등이 측정결과에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서도 검토하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1 측정이론

Fig. 1은 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관의 개략도를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보듯이 임피던스관의 출구측에는 시험대상체인 차음시트가 부착되어 있으며, 시험시료의 표면으로부터 두 마이크로폰까지의 거리는 각각 $x_1$과 $x_2$, 그리고 $s$는 두 마이크론폰 간의 간격이다.

$x_1$과 $x_2$ 지점간의 음향전달함수 $H_{12}(f)$, 그리고 $x_1$ 지점에서 측정한 자기스펙트럼 밀도함수 $S_{11}(f)$를 이용하여 입사파와 반사파에 대한 음향파워스펙트럼 $S_{AA}(f)$와 $S_{BB}(f)$를 구하면 다음과 같다.[9]

$$S_{AA}(f)=\{S_{11}(f)\cdot[1+|H_{12}(f)|^2 -2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos k(x_1-x_2) +2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin k(x_1-x_2)]\}/4\sin^2 k(x_1-x_2) \quad (1)$$

$$S_{BB}(f)=\{S_{11}(f)\cdot[1+|H_{12}(f)|^2 -2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos k(x_1-x_2) -2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin k(x_1-x_2)]\}/4\sin^2 k(x_1-x_2) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)는 Seybert[9]가 제안한 스펙트럴 밀도법을 기반으로 한 음파분리 이론식이다. 식에서 Im과 Re는 전달함수의 허수부와 실수부를 뜻하며, $f$는 주파수, $k=2\pi f/c$는 파동수, 그리고 $c$는 음속이다. 또한 식(1)과 식(2)를 각각 입사음의 음향세기 $I_i(f)$와 반사음의 음향세기 $I_r(f)$로 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_i(f)=\{S_{11}(f)\cdot[1+|H_{12}(f)|^2 -2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos k(x_1-x_2) +2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin k(x_1-x_2)]\}/4\rho c\sin^2 k(x_1-x_2) \quad (3)$$

$$I_r(f)=\{S_{11}(f)\cdot[1+|H_{12}(f)|^2 -2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos k(x_1-x_2) -2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin k(x_1-x_2)]\}/4\rho c\sin^2 k(x_1-x_2) \quad (4)$$

식(3)과 식(4)에서 $\rho c$는 공기의 특성 임피던스이다. 식(3)과 식(4)의 관계를 이용하여 $x_1$ 지점에서의 음향세기 반사계수 $R_{p,1}(f)$을 구하면 다음과 같다.

$$R_{p,1}(f)=\frac{1+|H_{12}(f)|^2-2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos ks-2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin ks}{1+|H_{12}(f)|^2-2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos ks+2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin ks} \quad (5)$$

식(5)의 음향세기 반사계수는 관 단면적이 같다면 음향파워 반사계수와도 같다. 따라서 Chung and Blaser[10]의 음향전달함수법으로 구한 복소반사계수 $R_{c,1}(f)$과 비교하면 $R_{p,1}(f)=|R_{c,1}(f)|^2$의 관계가 됨을 알 수 있다. 그러므로 Chung and Blaser의 음향전달함수법은 Seybert에 의해 제안된 음파분리이론에 포함되는 특별한 하나의 경우로 간주할 수 있다.

한편 차음시트가 Fig. 1과 같이 관출구단에 부착되어 있을 때 차음시트를 투과하여 외부로 방사된 음이 관내로 다시 입사하지 않는다면 그리고 차음시트 자체의 흡음력을 무시할 수 있다면 임피던스관 내의 입사음과 반사음에 대한 음향세기의 차이는 곧바로 투과음의 음향세기 $I_t(f)=I_i(f)-I_r(f)$가 되므로 음향세기 투과계수 $\tau(f)$는 차음시트로부터 반사되는 음향세기 반사계수

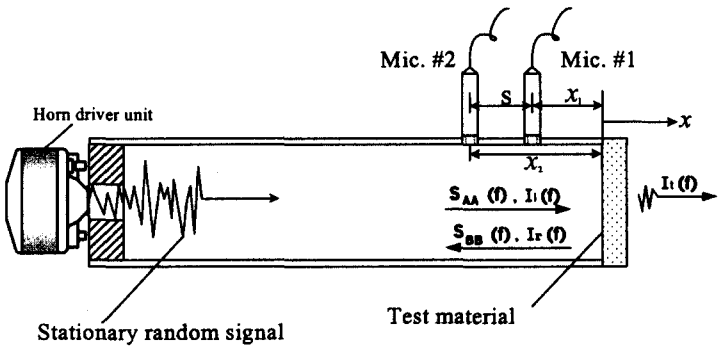



Fig. 1 Schematic of an impedance tube.

$R_{p,1}(f)$와 다음의 관계를 갖는다.

$$\tau(f) = \frac{I_t(f)}{I_i(f)} = \frac{I_i(f) - I_r(f)}{I_i(f)} = 1 - R_{p,1}(f) \quad (6)$$

식(5)와 식(6)의 관계를 이용하여 수직입사음에 대한 차음시트의 음향투과손실 $TL_m(f)$에 대하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$TL_m(f) = 10\log_{10}[\{1 + |H_{12}(f)|^2 - 2\mathrm{Re}[H_{12}(f)]\cos ks + 2\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin ks\}/4\mathrm{Im}[H_{12}(f)]\sin ks] \quad (7)$$

식(7)에 보듯이 차음시트의 음향투과손실을 구하는데는 두 지점간의 음향전달함수 $H_{12}(f)$만의 측정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

### 2.2 차음재의 질량법칙

차음재는 굽힘강성(bending stiffness) 측면에서 연질차음재와 경질차음재로 나눌 수 있다. 본 연구에서 사용한 차음재는 굽힘강성을 거의 갖지 않는 연질의 얇은 시트형 차음재이므로 굴곡파에 의한 일치효과의 영향을 무시할 수 있다. 따라서 질량법칙(mass law)을 만족하는 영역에서의 음향투과손실은 다음 식으로 계산할 수 있다.[11]

$$TL(\theta, f) = 10\log_{10}\{1 + (\omega m \cos\theta / 2\rho c)^2\} \quad (8)$$

식(8)에서 $\omega$는 각 주파수, $m$는 차음시트의 단위면적당 질량(통상 면밀도라 부른다.), 그리고 $\theta$는 차음재 시트면의 법선방향으로부터 접선방향에 이르는 입사음의 입사각도를 나타낸다. 또 입사음의 입사각도에 따라 차음성능은 수직입사음($\theta=0$)에 대한 음향투과손실 $TL_{normal}(f)$와 난입사음($\theta=0°\sim90°$)에 대한 음향투과손실 $TL_{random}(f)$로 분류할 수 있다. 그러나 통상 차음재로 입사되는 입사음은 입사각도의 제한을 받기 때문에 난입사음에 대한 음향투과손실로 차음성능을 나타내기보다는 아래에 제시된 유효입사범위에서 질량법칙(field-incidence mass law)을 만족하는 유효입사음($\theta=0°\sim78°$)에 대한 음향투과손실 $TL_{field}(f)$로 차음성능을 평가한다.[12]

$$TL_{field}(f) \cong 20\log_{10}(mf) - P \quad (9)$$

식(9)에서 $P$는 식(8)에 포함된 상수, 그리고 협대역의 차음성능을 옥타브 대역으로 변환할 때의 옥타브 보정계수값을 포함하는 파라메터이다. 본 연구에서는 주파수 분석기의 해상도를 16 Hz로 하여 분석하였으므로 파라메터 $P$를 48 dB로 하여 계산하였다. 또한 차음재의 음향투과손실이 15 dB 이상일 때는 수직입사음에 대한 음향투과손실 $TL_{normal}(f)$와 유효입사음에 대한 음향투과손실 $TL_{field}(f)$의 관계는 다음과 같다.[13]

$$TL_{normal}(f) \cong TL_{field}(f) + 5\,\mathrm{dB} \quad (10)$$

## 3. 실 험

두 개의 마이크로폰을 이용하여 두 지점 간의 음향전달함수를 측정하고자 할 때는 측정하고자

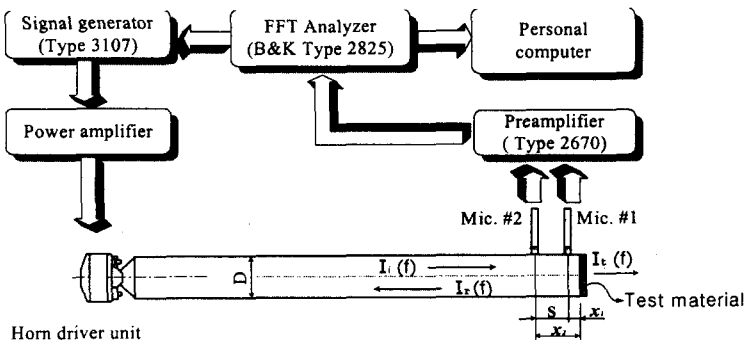



Fig. 2 Experimental setup for sound transmission loss measurement of sound isolation sheets.

하는 상한주파수를 평면파의 차단주파수(cut-off frequency) 이내로 하고 그리고 차음시트의 응답특성을 고려하여 임피던스관의 출구 지름을 선정[14]해야 한다. Fig. 2는 이러한 조건을 고려하여 설계/제작된 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관을 도시한 것으로 측정기기의 구성도를 결과에 함께 나타내었다. 임피던스관의 지름은 50 mm로 하였으며 관 길이는 1,000 mm로 하였다. 시험용 차음시트는 관출구에 부착된 두께 10 mm이고 크기가 300 mm×300 mm인 정방형의 배플판과 동일크기의 보조판 사이에 삽입하여 고정시킨다. 이때 배플판과 배플판에 부착된 차음시트 사이로의 음누수를 방지하기 위하여 배플판의 가장자리를 접착제나 점토를 이용하여 밀봉시켰다. 보조판에 뚫린 구멍 지름은 임피던스관의 지름보다 크기가 큰 지름 60 mm로 하였으며 임피던스관의 출구와 동심이 되도록 고정하였다. 또한 임피던스관에 설치된 1/4인치 압력형 마이크로폰(4938 B&K)은 어댑터를 이용하여 관의 내면과 정확히 일치하도록 설치하였다.

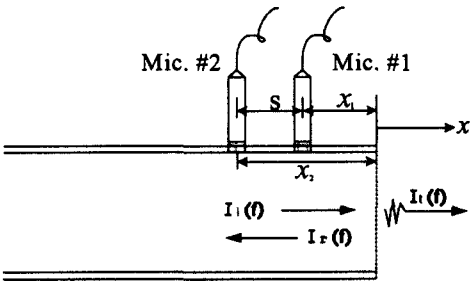
한편 음신호발생기에서 발생된 정상불규칙 음향신호는 증폭기를 거쳐 증폭된 다음에 스피커를 통해 임피던스관으로 입사되어 관내를 전파하게 된다. 이때 관출구에 설치된 두 개의 마이크로폰을 이용하여 전달함수를 측정하였다. 주파수 분석기의 분석주파수 범위는 6,400 Hz, 그리고 해상도는 16 Hz로 설정하였다. 전달함수 측정시에 random 오차의 영향을 배제시키기 위하여 400개 이상의 음향신호를 채집하여 시간 평균을 취하였으며 매회 coherence를 확인하며 측정하였다. 또한 두 개의 마이크로폰을 이용하여 전달함수 $H_{12}(f)$를 측정할 때는 마이크로폰뿐만 아니라 증폭기 및 분석기의 위상과 게인을 포함한 입력라인 전체에 걸쳐서 보정되어진 전달함수를 구하는 것이 무엇보다도 중요하다. 보정방법에는 마이크로폰 스위칭법, 기준 마이크로폰법, 하나의 마이크로폰을 이용하는 방법, 그리고 전달함수 역변환법 등이 있으나,[14] 본 연구에서는 측정의 정확성이나 편리성 측면에서 두 마이크로폰의 위치를 상호교환시켜 전달함수를 구하는 마이크로폰 스위칭법(microphone switching method)을 사용하였다. Fig. 3에 스위칭법에 대한 마이크로폰의 배치와 보정관계식을 나타내었다. 먼저 두 지점 간의 전달함수 $H_{12}^{O}(f)$를 측정한 다음에, 마이크로폰의 위치를 서로 교환시켜 측정한 전달함수 $H_{12}^{S}(f)$와의 평균을 취하여 얻은 $\overline{H}_{12}(f)$ 결과로부터 보정된 전달함수 $H_{12}(f)$를 구하는 방식이다.

Table 1은 본 연구에 쓰인 차음시트의 종류에 따른 제원과 물성치를 나타낸 것이다. Table 1에서 보듯이 시트의 종류는 망간과 여러 가지의 금속산화물이 배합된 폴리비닐계 차음시트 2종류와 주원료인 고무에 산화철분말이 첨가된 고무시트 그리고 주원료인 아스팔트에 얇은 폴리비닐과 스틸와이어 메쉬가 배합된 차음시트이다.

Table 1에서 보듯이 면밀도는 고무시트가 가장 크며, 두께는 아스팔트 시트가 가장 두껍다. 또한 차음시트의 유연한 정도의 기준으로 본 연구

Table 1 Specifications of test materials used for this study

| Sample name | Surface density (kg/m$^2$) | Thickness (mm) | Stiffness (kg/mm) |
|---|---|---|---|
| Polyviynl A | 2.442 | 1.25 | 0.268 |
| Polyvinyl B | 2.286 | 1.25 | 4.631 |
| Rubber | 3.482 | 2 | 0.177 |
| Asphalt | 3.204 | 2.7 | 0.441 |




$$\overline{H}_{12}(f)=\sqrt{H_{12}^{O}(f)\times H_{12}^{S}(f)}$$

$$H_{12}(f)=H_{12}^{O}\div\overline{H}_{12}(f)$$

Fig. 3 Two-microphone switching method for obtaining the calibrated transfer function.

에서는 각 차음시트에 대한 강성값을 측정하였다. Polyvinyl B의 강성값이 가장 큰 것은 적층된 부직포가 시트후면에 부착되어 있기 때문이다. 특히 두께 1.8 mm인 아크릴판의 강성값이 20.87 kg/mm인 점을 고려하면 본 연구에 쓰인 4종류의 차음시트는 매우 유연하다는 것을 알 수 있다.

또한 본 연구의 측정결과에 대한 신뢰성을 입증하기 위하여 Table 1에 제시된 차음시트의 성능을 잔향실법으로 구하였다. 잔향실은 (주)대우건설 기술연구소의 시험실을 이용하였으며, 실체적 325 $m^3$인 음원실의 차단주파수는 100 Hz이며, 실체적 249 $m^3$인 수음실의 차단주파수는 125 Hz이다. 시험용 차음시트는 가로와 세로의 크기가 1.5 m×1.82 m였다.

## 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 마이크로폰의 간격이 측정결과에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위한 것으로 관단이 개방된 개구단의 반사계수를 측정하여 이론계산값과 비교한 결과이다. 반사계수의 측정값은 개구단의 출구로부터 $x_1$=50 mm, 그리고 $s$=100 mm 지점에 마이크로폰을 위치시키고 측정한 음향전달함수값을 식(5)에 대입하여 구하였다.

결과에서 측정값이 대체로 이론값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나, 1,700 Hz와 3,400 Hz 부근에서 이론값으로부터 크게 벗어나는 피크치(오차)를 볼 수 있다. 이것은 식(5)의 분모항에서 마이크로폰의 간격이 $ks = m\pi(m=1, 2, 3\cdots)$일 때 존재하는 특이해의 영향이 측정결과에 반영되었기 때문이다. 즉 마이크로폰의 간격 $s$=100 mm일 때의 특이주파수를 계산하면 $m$=1일 때 1,700 Hz, 그리고 $m$=2일 때 3,400 Hz가 된다. 이와 같은 측정오차를 피하려면 두 마이크로폰의 간격을 측정하고자 하는 상한주파수 $f_m$보다 반파장 작은 $s < c/2f_m$이 되도록 해야 한다. 본 연구에서 사용한 임피던스관의 지름이 50 mm이기 때문에 측정 가능한 상한주파수는 약 3,985 Hz가 되므로 두 마이크로폰 간의 최대간격은 43 mm를 초과할 수 없다.

한편 두 마이크로폰의 간격을 상한주파수의 반파장보다 작게 하더라도 차음시트로 입사되거나 반사되는 음파의 압력절점이 두 마이크론폰의 위치 $x_1$ 및 $x_2$와 일치할 때는 Bias 오차가 발생하게 된다. Bias 오차의 발생을 피하기 위해서는 마이크로폰을 시험대상체의 기준면 가까이로 위치시켜야 하지만 마이크로폰이 피시험체에 너무 가까이 위치하게 되면 오히려 근음장의 영향을 받게 된다. 따라서 두 개의 마이크로폰을 이용하여 차음시트의 음향투과손실을 측정할 때에는 마이크로폰의 최적위치 선정이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 수차례의 예비실험을 통하여 $s$=20 mm, 그리고 $x_1$=50 mm가 최적위치임을 확인하였다. 이후에 서술되는 모든 측정결과는 이들 위치에 마이크로폰을 고정시키고 음향성능이나 음향특성값을 구한 결과이다.

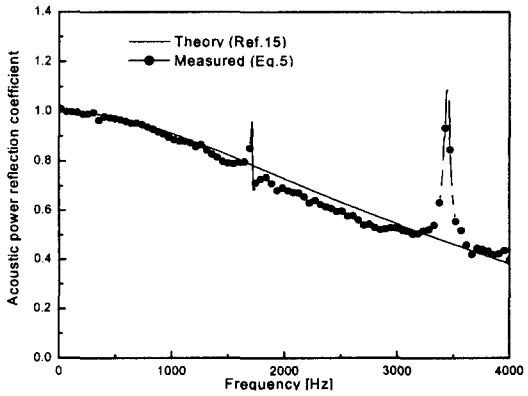



Fig. 4 Effect of the microphone spacing on the measured acoustic reflection coefficient.

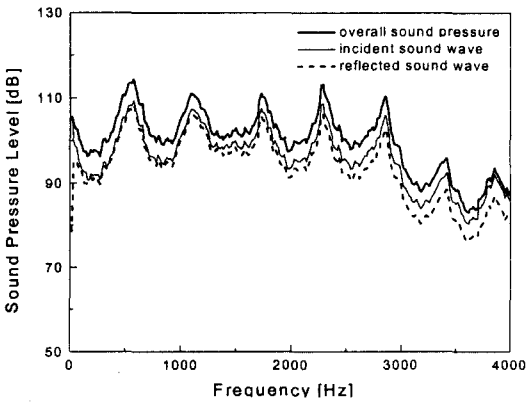



Fig. 5 Sound pressure spectra decomposed into the incident and reflected sound waves.

Fig. 5는 관내로 전파하는 음파의 분리를 확인하기 위하여 한쪽이 닫힌 관에 흡음재인 유리섬유를 부착한 상태에서 측정점 1에서의 자기스펙트럼 밀도함수와 두 지점 간의 전달함수 측정값을 식(1)과 식(2)에 대입하여 관내에서 전파하는 입사파와 반사파의 음압스펙트럼을 구한 결과이다. 참고로 측정점 1에서의 총음압레벨값도 결과에 함께 도시하였다.

결과에서 보듯이 입사파와 반사파가 정확히 분리되는 것을 볼 수 있으며, 입사파와 반사파의 음압의 합이 총음압과 같게 되는 것을 확인할 수 있다. 특히 흡음재의 흡음효과로 인하여 주파수가 증가할수록 반사파의 음압레벨이 입사파에 비하여 점차 감소하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 차음시트의 설치위치의 영향을 알아보기 위하여 임피던스관의 관로 도중에 차음시트를 설치하고 두 마이크로폰 간의 전달함수 측정값을 식(7)에 대입하여 음향투과손실을 구한 결과이다. 시험에 이용된 차음시트는 폴리비닐 차음시트 B이다. 측정결과에서 볼 수 있듯이 오차에 해당하는 다수의 불연속 피크치의 발생으로 정확한 음향투과손실의 측정이 어렵다는 것을 알 수 있다. 이것은 차음시트를 투과한 음파와 하류관의 공명주파수와의 상호간섭에 의해 야기된 강한 공명작용이 측정결과에 반영되었기 때문이다. 이러한 공명작용에 의한 투과손실의 불연속 피크치의 발생원인을 보다 상세히 확인하기 위하여 차음시트 하류측에 길이가 각기 다른 50 mm, 80 mm, 그리고 130 mm인 관을 부착하고 음향투과손실을 구하였으나, 관길이 변화와 대응하는 투과손실의 피크치를 분명하게 구별할 수 없었다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 차음시트를 관출구에 설치한 상태에서 출구조건을 각기 다르게 하면서 음향투과손실을 측정한 결과이다. 제시된 결과를 Fig. 6의 결과와 비교해 볼 때 특정주파수에서 나타난 투과손실의 피크치가 상당히 제거된 것을 알 수 있다. 이 결과로 미루어 볼 때 Fig. 6에 도시된 투과손실의 피크치는 하류관의 공명에 기인된 오차임이 분명하다. 이러한 하류관의 영향은 폴리비닐 차음시트 A, 고무차음시트, 그리고 아스팔트 차음시트에 대한 측정결과에서도 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 7의 결과에서 차음시트가 부착된 관출구의 후방에 방음상자(sound enclosure)와 무반사단 역할을 하도록 흡음재가 채워진 음향나팔(acoustic horn)을 설치한 경우와 그렇치 않은 경우의 측정값이 거의 같은 것을 볼 수 있다. 이것은 차음시트를 투과한 음이나 외부소음이 차음시트의 성능측정에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 측정장치의 단순화를 위해 임피던스관의 출구단에 차음시트만을 부착하고 음향투과손실을 구하였다. 또 Fig. 7의 결과에서 4,000 Hz 가까이에서 나타난 투과손실의 피크치는 본 연구의 평면파범위 밖의 값으로 1/3옥타브 대역으로 변환시에는 이 값을 포함시키지 않았다.

Fig. 8(a)부터 Fig. 8(d)까지의 결과는 Table 1에 제시된 서로 다른 4종류의 차음시트에 대하여 음향투과손실을 측정하고 계산한 결과를 1/3옥타

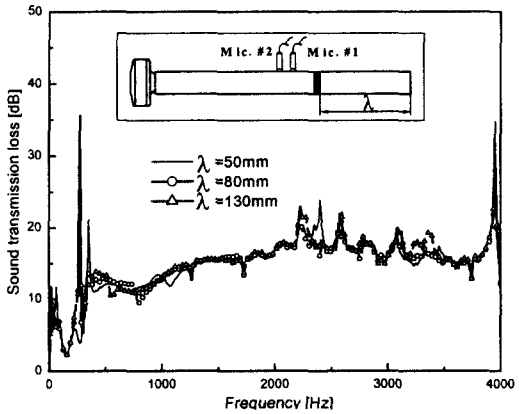



Fig. 6 Effect of the downstream tube on the measured sound transmission loss.

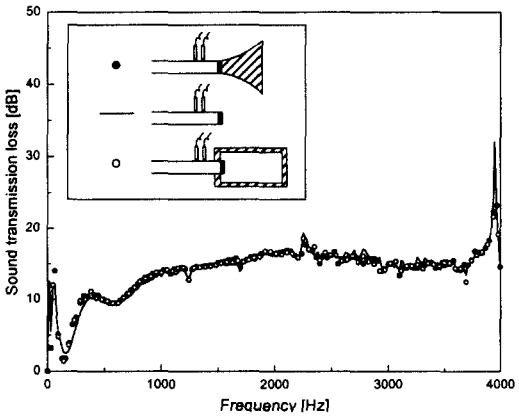
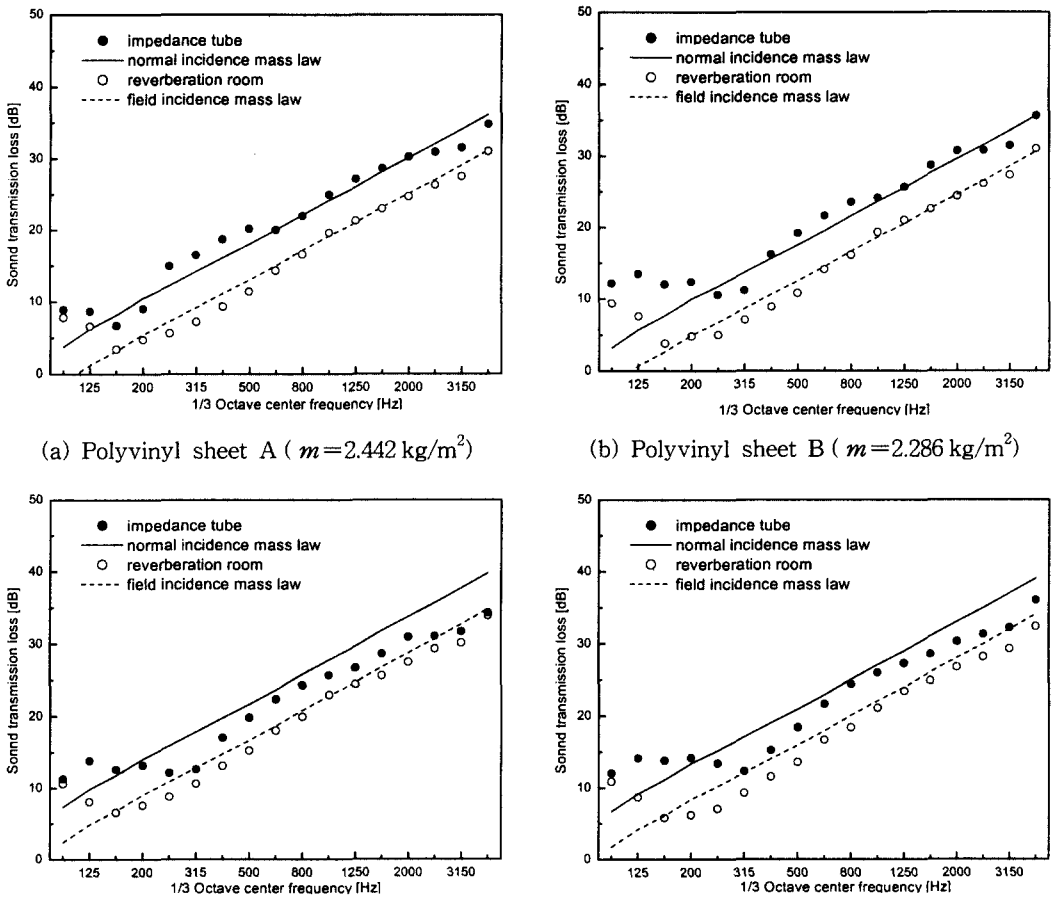



Fig. 7 Effect of the tube exit conditions on the measured sound transmission loss.




(a) Polyvinyl sheet A ( $m$=2.442 kg/m$^2$)

(b) Polyvinyl sheet B ( $m$=2.286 kg/m$^2$)

(c) Rubber sheet ( $m$=3.482 kg/m$^2$)

(d) Asphalt sheet ( $m$=3.204 kg/m$^2$)

Fig. 8 Sound transmission loss for several different sound isolation sheets.

브대역 중심주파수로 나타낸 것이다. 결과에 도시된 ●는 두 마이크로폰 간의 음향전달함수 측정값을 식(7)에 대입하여 구한 음향투과손실 결과이다. 그리고 ○는 잔향실법을 이용하여 측정한 결과를 나타낸다. 또한 결과에서 파선과 실선은 유효입사음과 수직입사음에 대한 질량법칙을 만족하는 음향투과손실값으로서 식(9)와 식(10)을 이용하여 구한 이론계산값이다.

먼저 도시된 모든 결과에서 유효입사음에 대한 음향투과손실의 측정값과 이론계산값만을 비교해 보면 낮은 주파수 대역을 제외한 모든 주파수영역에서 두 결과는 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 낮은 주파수 대역은 차음시트의 공진영역에 해당하는 것으로서 식(9)와 식(10)에 의한 이론계산값은 질량법칙을 만족하는 주파수영역에서만 유효하다는 것에 유의할 필요가 있다.

한편 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관을 이용하여 측정한 값과 수직입사음에 대한 음향투과손실의 이론계산값을 서로 비교해 보면 전반적으로 두 결과는 잘 일치하지만, 차음시트의 종류에 따라 다소간의 차이를 나타낸다. 즉 Fig. 8(a)과 Fig. 8(b)에 도시된 폴리비닐 차음시트 A와 B에 대한 결과에서는 이론계산값과 측정값이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 질량법칙을 만족하는 주파수영역에서 수직입사음과 유효입사음의 음향투과손실에 대한 측정값의 차이가 식(10)의 관계에서와 같이 거의 5 dB 정도의 차이를 갖는다. 그러나 Fig. 8(c)에 도시된 주원료가 고무로 된 차음시트와 Fig. 8(d)에 도시된 아스팔트 차음시트의 결과에서는 앞의 두 결과만

큼은 일치하지 않는다. 이러한 차이는 면밀도값에 따른 시험시료의 응답특성으로 설명할 수 있다. 즉 면밀도값이 작은 차음시트의 경우는 시료에 가해지는 음에너지에 대한 시료의 응답특성이 양호하기 때문에 비교적 정확한 측정결과를 얻을 수 있는 반면에, 면밀도값이 큰 경우는 음향가진에 대한 시료의 응답특성 부족이 측정결과에 반영된 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 임피던스관법을 면밀도값이 큰 차음시트로의 적용범위를 확대시키기 위해서는 고출력음원을 이용하여 다양한 크기의 면밀도값을 갖는 시료를 대상으로 성능측정 연구를 수행하는 것이 필요하다고 본다.

## 5. 결 론

두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관을 이용하여 차음시트의 음향투과손실을 측정하는 연구를 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관을 이용하여 측정한 차음시트의 음향투과손실 결과는 이론계산 결과와 비교적 잘 일치하였다. 또한 본 연구의 측정법에 대한 신뢰성은 잔향실법으로 구한 성능시험 결과값과의 비교검증을 통하여 입증하였다.

(2) 본 연구에서 제안한 임피던스관법은 음향투과손실 측정에 전통적으로 사용되고 있는 잔향실법과 비교하여 크기가 매우 작은 시험용 시료를 이용할 수 있다는 점, 비교적 정확한 차음성능 측정이 가능하다는 점, 그리고 시험시간과 시험비용을 줄일 수 있다는 매우 실용적인 장점을 갖는다.

(3) 성능측정에 앞서 두 마이크로폰에 대한 최적의 설치위치를 파악하는 것이 필요하며, 본 연구에서의 최적위치는 $s=20$ mm, 그리고 $x_1=50$ mm였다. 또한 시험용 차음시트를 관로 도중에 설치하면 하류관의 공명문제로 인하여 정확한 차음성능을 얻을 수 없으므로 관출구단에 차음시트를 설치하여 차음성능을 측정하는 것이 필요하다.

(4) 본 연구의 임피던스관법은 면밀도가 비교적 작은 연질의 얇은 시트형 차음재에 국한하여 그 타당성이 입증되었다. 따라서 향후의 연구에서는 면밀도값이 큰 차음시트로의 적용범위를 확대시키기 위한 일련의 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Lee, D. H., Kim, D. W. and Seto, K., 2001, A study on measurement of sound transmission loss for sound isolation sheets by two-microphone impedance tube method, Proceedings of the 8th International Congress on Sound and Vibration, 2-6 July, Hong Kong, China, pp. 2423-2430.
2. Lee, D. H., Lee, T. K., Cheong, S. K., Lee, H. W., Kang, M. and Kim, Y. B., 2000, Development of Sound Isolation Sheets with Compound Materials, Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, Chonan Korea, pp. 415-420.
3. ASTM E90-90, 1990, Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions, ASTM, Philadelphia, PA 19103.
4. Lee, D. H., Kang, M. and Seto, K., 2000, A Study of Validity on the Sound Transmission Loss Measurement of Sound Isolation Sheets Using Two-Microphone, Proceedings of the KSAE Autumn Conference, Chonan Korea, pp. 518-523.
5. Lee, D. H., Kang, M., Lee, J. W., Jung, G. C. and Kwon, Y. P., 2000, A Study on the Sound Transmission Loss Measurement of Sound Isolation Sheets, Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, Chonan Korea, pp. 409-414.
6. Crocker, M. J., et al., 1981, Measurement of transmission loss of panels by the direct determination of transmitted acoustic intensity, Noise Control Engineering, 17(1), pp. 6-11.
7. Wang, Y. S. and Crocker, M. J., 1982, Di-

rect measurement of transmission loss of aircraft structures using the acoustic intensity approach, Noise control Engineering, 19 (3), pp. 80-85.

8. Bolton, J. S., et al., 1997, Development of a new sound transmission test for automotive sealant materials, SAE transactions, Jr. Pass. Cars., 106, pp. 2651-2658.
9. Seybert, A. F., 1988, Two-sensor methods for the measurement of sound intensity and acoustic properties in ducts, J. Acoust. Soc. Am., 83(6), pp. 2233-2239.
10. Chung, J. Y. and Blaser, D. A., 1980, Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties, I. Theory and II. Experiment, J. Acoust. Soc. Am., 68(3), pp. 907-921.
11. Heckl, M., 1981, The Tenth Sir Richard Fairey Memorial Lecture: Sound Trnasmission in Buildings, Journal of Sound and Vibration, 77(2), pp. 165-189.
12. Jones, R. E., 1979, Intercomparisons of Laboratory Determinations of Airborne Sound Transmission Loss, J. Acoust. Soc. Am., 66(1), pp. 148-164.
13. Beranek, LEO L. and VER, Istvan L., 1992, Noise and Vibration Control Engineering (Principles and Applications), Chap. 9, John Wiley & Sons, Inc.
14. Lee, S., Lee, D. H., Yong, H. T. and Suh, K. W., 2001, Sound Transmission Loss Measurement of Sound Isolation Sheets Using Impedance Tube Method, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 858-863.
15. Davies, P. O. A. L., et al., 1980, Reflection coefficients for an unflanged pipe with flow, J. Sound and Vibration, 77(4), pp. 543-546.