

## 차음시트의 음향투과손실 측정에 관한 연구

이동훈\*, °강 문\*\*, 이주원\*\*\*, 정갑철\*\*\*, 권영필\*\*\*\*

### A Study on the Sound Transmission Loss Measurement of Sound Isolation Sheets

Dong-Hoon Lee, Moon Kang, Ju-Weon Lee, Gab-Cheol Jung, Young-Pil Kwon

#### ABSTRACT

A new impedance tube method is presented for the measurement of transmission loss of sound isolation sheets. The two-microphone method based on the sound decomposition theory proposed by Seybert and Ross is reviewed in this impedance tube method, which has been used for the determination of absorption coefficient of absorptive materials as well as transmission loss of automotive mufflers. Sound transmission losses for rubber, polyvinyl and asphalt sheets are measured in an impedance tube and reverberation room facility, respectively. By comparing two measurement methods, the reliability of impedance tube method used in this study is validated. From the experimental results, it is shown that the accuracy of sound isolation capability obtained by the impedance tube method depends upon the microphone spacing and the distance of the first microphone from the test sample surface.

#### 1. 서 론

최근에 건설되는 호텔, 주상복합아파트, 공동주택 그리고 오피스텔과 같은 각종 건축물은 초고층화, 다기능화, 고급화 및 경량화를 추구함에 따라 기존의 공간설계와 설비방식에 커다란 변화를 야기시키고 있다. 이러한 공간설계와 설비방식의 변화로 인해 파생된 가장 심각한 문제의 하나로 소음공해를 꼽을 수 있다. 그러나 환경문제를 중시하는 최근의 상황으로 볼 때 종래의 건축물에 사용했던 흡.차음재를 이용하여 현대의 건축구조나 설비변화로부터 야기된 소음문제를 해결하는 데는 한계성을 갖는다. 따라서 변화된 공간설계와 설비방식에 능동적으로 대처할 수 있는 친환경적 흡.차음재를 연구개발하여 실용화하는 것이 시대적으로 절실하게 요청되고 있다.

흡.차음재의 음향특성이나 성능에 대한 이론적 연구는 오래전부터 이루어져 왔으며<sup>(1)</sup>, 이와 병행하여 이론결과를 검증하기 위한 측정장치의 개발이나 측정기법에 대한 연구도 꾸준히 발전되어 왔다<sup>(2)</sup>. 특히 흡음재의 경우는 성능평가에 전통적으로 이용되고 있는 잔향실법<sup>(3)</sup>을 비롯하여 흡음재의 특성임피던스와 전파상수의 측정에 사용되어 온 정재파법<sup>(4)</sup> 그리고 최근에 발표된 두 개의 음향센서를 이용한 스펙트럴밀도법<sup>(5,6)</sup>과 음향전달함수법<sup>(7,10)</sup>이 있다.

한편 흡음재의 음향특성을 평가하기 위한 다양한 측정기법이 발표되고 있는 것과는 달리 차음재의 성능평가를 위한 새로운 측정기법이나 장치개발을 시도한 연구문헌은 발표된 바 없다. 단지 예전부터 전통적으로 사용해 오던 잔향실법과 최근에 개발된 음향인텐시티 프로브법을 이용하고 있는 정도이다<sup>(11)</sup>. 그러나 중소기업 차원에서 잔향실과 같은 대형 측정시설을 구축하거나 음향인텐시티 프로브와 같은 고가의 음향계측 장비를 확보하여 차음재의 성능과 특성을 평가하는 데는 경제적 부담이 너무 크다고 판단된다. 더구나 잔향실을 이

\* 서울산업대학교 기계공학과, ldh@duck.snut.ac.kr

\*\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

\*\*\* (주)대우건설 기술연구소

\*\*\*\* 숭실대학교 기계공학과

용하여 개발중인 차음재의 음향투과손실을 측정하기 위해서는 국제규격으로 정한 크기가 매우 큰 시료가 필요하므로<sup>(12)</sup> 시료제조에 과도한 비용이 투입될 뿐만아니라 측정준비 단계에서도 많은 시간을 허비하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 잔향실내지는 음향인텐시티 프로브와 같은 대형의 측정시설이나 고가의 음향계측 장비를 이용하지 않고도 차음재의 음향투과손실을 비교적 정확하게 측정할 수 있는 실용적인 측정법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 Seybert와 Ross<sup>(5,6)</sup>가 제안한 스펙트럴 밀도법을 기반으로 한 음파분리이론을 이용하여 차음재의 음향투과손실을 구하였다. 특히 측정결과의 신뢰성을 입증하기 위하여 잔향실법으로 구한 음향투과손실값과 비교하였다. 측정시료로는 시중에 판매되고 있는 연질의 얇은 시트형 차음재를 이용하였다. 또한 차음재의 성능측정에 앞서 Seybert와 Ross가 제안한 측정이론의 신뢰성을 검증하고, 측정에 수반되는 오차요인, 즉 음향센서의 위치와 센서간격에 대해서도 검토하였다. 임피던스관의 말단조건 및 차음재의 설치위치 변화에 따른 공명발생과 이로 인한 상류측 음장변화에 대해서는 이미 연구 검토한 바 있다<sup>(13)</sup>.

## 2. 이론검토

### 2.1 연질차음재의 질량법칙

차음재는 입사음의 투과를 억제하기 위한 음향재료로서 굽힘강성(bending stiffness)측면에서 연질차음재와 경질차음재로 나눌 수 있다. 판재형 차음재와 같이 굽힘강성을 무시할 수 없는 경우는 주파수 증가에 따라 차음성능의 영역이 세가지 형태로 뚜렷하게 나뉘어 진다. 즉 판재의 강성과 연관된 공진영역, 판재의 면밀도에 비례하여 차음성능이 증가하는 질량법칙(mass law)을 만족하는 영역 그리고 입사파의 파장과 판재의 굴곡운동에 의한 굴곡파(bending wave)의 파장이 일치하는 일치효과(coincidence effect) 영역으로 구분된다. 그러나 본 연구의 차음재는 굴곡강성이 아주 작은 연질의 얇은 시트형 차음재이므로 굴곡파에 의한 일치효과는 무시할 수 있다. 따라서 다음과 같은

연질차음재의 질량법칙(limp-wall mass law)<sup>(14)</sup>을 이용하여 음향투과손실(STL)을 구할 수 있다.

$$STL(\theta) = 10 \log \frac{1}{\tau(\theta)} \quad (1)$$

$$\cong 10 \log \{1 + (\omega m \cos \theta / 2\rho_0 c_0)^2\}$$

식 (1)에서  $\tau$ 는 입사음에 대한 투과음의 음향파워비인 음향투과계수,  $\omega$ 는 각주파수,  $m$ 는 단위 면적당 질량(통상 면밀도라 부른다),  $\theta$ 는 차음재 시트면의 법선방향으로부터 접선방향에 이르는 음의 입사각도 그리고  $\rho_0$ 와  $c_0$ 는 각각 공기밀도와 음속을 나타낸다. 본 연구에서와 같이 임피던스관내를 전파하는 평면파 음장조건에서는 차음재에 음파가 수직입사( $\theta=0$ )되므로, 식 (1)에서 보는 바와 같이 법선방향에서의 음향투과손실값이 가장 크게 된다.

### 2.2 음파분리이론<sup>(5,6)</sup>

Fig. 1은 관출구단에 대한 미지의 음향특성을 얻기 위해 두 개의 음향센서가 부착된 임피던스관의 개략도를 나타낸 것이다.

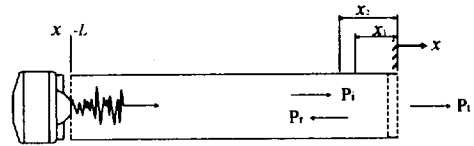


Fig. 1 Schematic of acoustic impedance tube.

먼저 입구측의 스피커로부터 정상 불규칙 음향신호(stationary random sound signal)를 관에 공급하면 관내에서는 입사파  $p_i$ 와 반사파  $p_r$ 의 형태로 전파하게 된다. 음향센서의 위치는 관끝을 기준점으로 하여 첫 번째와 두 번째 음향센서까지의 거리를  $x_1$ 과  $x_2$ 라 한다. 이 때 정현파의 각주파수  $\omega$ 로 표현되는 시간함  $e^{j\omega t}$ 을 생략하고 두 지점에서의 총음압(total sound pressure)을 나타내면 다음과 같이 입사파와 반사파의 합으로 각각 표현할 수 있다.

$$p(x_1, t) = a(t)e^{-jkx_1} + b(t)e^{jkx_1} \quad (2a)$$

$$p(x_2, t) = a(t)e^{-j k x_2} + b(t)e^{j k x_2} \quad (2b)$$

식 (2)에서  $a(t)$ 와  $b(t)$ 는 시간영역에서의 임의 크기를 갖는 입사파와 반사파의 음압진폭이며,  $k$ 는  $\omega/c_0$ 로 표현되는 파동수(wave number)를 뜻한다. 한편 식 (2)를 유한시간  $T$ 에 대하여 푸리에 변환하면 주파수  $f$  영역에서의 음압값으로 나타낼 수 있다.

$$P_1(f, T) = A(f, T)e^{-j k x_1} + B(f, T)e^{j k x_1} \quad (3a)$$

$$P_2(f, T) = A(f, T)e^{-j k x_2} + B(f, T)e^{j k x_2} \quad (3b)$$

또한 측정점 1과 측정점 2에서의 각각의 자기스펙트럼 밀도함수  $S_{11}(f)$ 과  $S_{22}(f)$  그리고 측정점 1과 2사이의 상호스펙트럼 밀도함수  $S_{12}(f)$ 의 실수부  $C_{12}(f)$ 와 허수부  $Q_{12}(f)$ 는 스펙트럼 밀도함수의 정의로부터 다음과 같이 표현된다.

$$S_{11}(f) = S_{AA}(f) + S_{BB}(f) + 2[C_{AB}(f) \cos 2kx_1 + Q_{AB}(f) \sin 2kx_1] \quad (4a)$$

$$S_{22}(f) = S_{AA}(f) + S_{BB}(f) + 2[C_{AB}(f) \cos 2kx_2 + Q_{AB}(f) \sin 2kx_2] \quad (4b)$$

$$C_{12}(f) = [S_{AA}(f) + S_{BB}(f)] \cos k(x_1 - x_2) + 2[C_{AB}(f) \cos k(x_1 + x_2) + Q_{AB}(f) \sin k(x_1 + x_2)] \quad (4c)$$

$$Q_{12}(f) = [-S_{AA}(f) + S_{BB}(f)] \sin k(x_1 - x_2) \quad (4d)$$

식(4)의 스펙트럼 밀도함수를 파워스펙트럼으로 바꾸어 표현하면 다음과 같다.

$$S_{AA} = [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k(x_1 - x_2) + 2Q_{12} \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (5a)$$

$$S_{BB} = [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k(x_1 - x_2) - 2Q_{12} \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (5b)$$

$$C_{AB} = [-S_{11} \cos 2kx_2 - S_{22} \cos 2kx_1 + 2C_{12} \cos k(x_1 + x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (5c)$$

$$Q_{AB} = [-S_{11} \sin 2kx_2 - S_{22} \sin 2kx_1 + 2C_{12} \sin k(x_1 + x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (5d)$$

식 (5)를 다음과 같이 실수부  $\text{Re}$ , 허수부  $\text{Im}$  그리고 전달함수의 크기관계를 이용하여

$$\text{Re}(H_{12}) = \frac{C_{12}}{S_{11}}, \quad \text{Im}(H_{12}) = \frac{Q_{12}}{S_{11}}, \quad |H_{12}|^2 = \frac{S_{22}}{S_{11}}$$

전달함수  $H_{12}(f)$ 의 항으로 고쳐쓰면 다음과 같다.

$$S_{AA} = S_{11} \cdot [1 + |H_{12}|^2 - 2 \text{Re}(H_{12}) \cos k(x_1 - x_2) + 2 \text{Im}(H_{12}) \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (6a)$$

$$S_{BB} = S_{11} \cdot [1 + |H_{12}|^2 - 2 \text{Re}(H_{12}) \cos k(x_1 - x_2) - 2 \text{Im}(H_{12}) \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (6b)$$

$$C_{AB} = S_{11} \cdot [-\cos 2kx_2 - |H_{12}|^2 \cos 2kx_1 + 2 \text{Re}(H_{12}) \cos k(x_1 + x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (6c)$$

$$Q_{AB} = S_{11} \cdot [-\sin 2kx_2 - |H_{12}|^2 \sin 2kx_1 + 2 \text{Re}(H_{12}) \sin k(x_1 + x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \quad (6d)$$

### 2.3 음향투과손실계산

차음재의 흡음력은 거의 무시할 수 있으므로 입사음과 반사음의 음향세기차는 곧바로 투과음(transmitted sound)의 음향세기  $I_t = I_i - I_r$ 가 되므로 음향투과계수는 차음재로부터 반사되는 음향과위반사계수  $R_p(f)$ 와 다음의 관계를 갖는다.

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - |R_p(f)|^2 \quad (7)$$

한편 식 (6)에 제시된 입사음과 반사음의 파워스펙트럼  $S_{AA}$ 와  $S_{BB}$ 를 음압과 입자속도의 시간평균인 평면파의 음향세기  $I = \overline{pu}$  관계를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$I_i = |S_{11} \cdot [1 + |H_{12}|^2 - 2 \text{Re}(H_{12}) \cos k(x_1 - x_2) + 2 \text{Im}(H_{12}) \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2)| / \rho_0 c_0 \quad (8a)$$

$$I_r = |S_{11} \cdot [1 + |H_{12}|^2 - 2 \text{Re}(H_{12}) \cos k(x_1 - x_2) - 2 \text{Im}(H_{12}) \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2)| / \rho_0 c_0 \quad (8b)$$

식 (1), 식 (7) 그리고 식 (8)의 관계에서 보듯이 입사음과 반사음의 음향세기만을 알면 음향투과손실은 쉽게 계산된다. 특히 결과에서 음향과위반사계

수나 음향세기를 구하는 데는 자기스펙트럼 밀도함수  $S_{11}(f)$ 와 두 지점간 음향전달함수  $H_{12}(f)$ 만의 측정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

### 3. 측정장치 및 측정방법

앞 절에서는 두 개의 음향센서를 이용하여 자기스펙트럼 밀도함수와 두 지점간 음향전달함수의 측정을 통하여 음향투과손실을 구할 수 있는 음파분리이론을 검토하였다. 이와 같이 음향전달함수와 자기스펙트럼 밀도함수를 측정하고자 할 때는 측정에 대한 상한 주파수  $f_m$ 을 평면파의 차단주파수  $f_c$ 이내로 선정해야 한다. 관단면이 원형일 때 초기에 발생하는 고차모드의 차단주파수는 다음식으로 구한다.

$$f_c = 1.84 c_o / \pi D \quad (9)$$

식 (9)에서  $D$ 는 관의 안지름으로서 본 연구에서는 지름  $50mm$ 의 관을 사용하였으므로 차단주파수는  $3985Hz$ 가 된다. 또한 두 음향센서간의 거리  $s = x_1 - x_2$ 는 식 (8)의 관계로부터

$$ks = m\pi \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

이므로 상한주파수의 반파장보다 적은  $s < c_o / 2f_m$ 이 되도록 해야 한다. 그리고 시료로부터 첫 번째에 위치한 음향센서는 근음장의 영향을 받지 않는 한도내에서 피시험체에 가깝게 위치시켜야 한다.

Fig. 2는 시트형 차음재의 음향투과손실을 측정하기 위한 측정장치의 구성도를 나타낸 것이다. 도시된 그림에서 보듯이 시료는 관끝에 설치하였고, 끝단이 무반사조건이 되도록 흡음재가 충진된 음향나팔을 부착하였다. 시료부착은 접착본드를 이용하여 음의 누수가 생기지 않도록 관출구단에 강하게 접착시켰다. 음향센서는 관의 내부면에 정확하게 접하도록 관의 표면에 어댑터를 설치하였다.

실험에 이용한 음향센서는 1/4인치로서 압력형 마이크로폰(pressure type microphone)이다. 주파수분석기의 분석주파수범위는  $6400 Hz$ 이며, random오차와 bias오차를 줄이기 위하여<sup>(15)</sup> 음향

센서의 위치와 주파수대역폭 그리고 음향센서의 간격이 다소간 조절된다. 특히 분석기를 포함한 음향센서의 개인 및 위상보정을 위하여 음향센서의 위치를 스위칭시키면서 자기스펙트럼 밀도함수와 상호스펙트럼 밀도함수를 측정하였다.

한편 본 연구에서 구한 음향투과손실값의 신뢰성을 입증하기 위하여 잔향실법으로 구한 결과와 비교하였다. 잔향실은 (주)대우건설 기술연구소에서 보유한 ISO 국제규격을 만족하는 공인된 시험시설을 이용하였다.

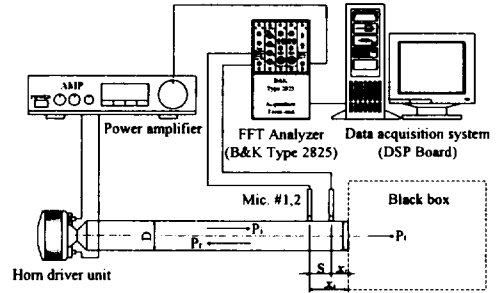


Fig. 2 Experimental apparatus for measuring sound transmission loss of sound isolation sheets.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 음파분리이론을 검증하기 위하여 한쪽이 닫힌관(closed tube)에 흡음재인 유리섬유를 소량 부착하고, 측정점 1에서의 자기스펙트럼 밀도함수와 두 지점간의 전달함수 측정값을 식 (5a)와 식 (5b)에 대입하여 관내에서 전파하는 입사파와 반사파의 음압스펙트럼을 분리시킨 결과이다.

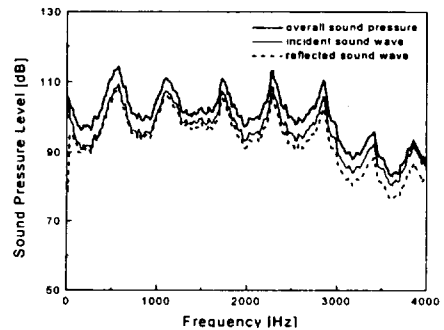


Fig. 3 Result of decomposed sound waves.

결과에서 보듯이 입사파와 반사파가 정확히 분리되는 것을 볼 수 있다. 흡음재의 부착으로 반사파의 음압진폭값이 입사파에 비하여 주파수가 증가할수록 점차 감소하고 있음을 제시해 주고 있다.

Fig. 4부터 Fig. 7까지는 두 개의 음향센서가 부착된 임피던스관 및 잔향실을 이용하여 측정된 각각의 시료에 대한 음향투과손실 결과를 비교 도시한 것이다. 잔향실 결과는 (주)대우건설 기술연구소에서 측정된 것으로서, 측정에 사용한 시료크기는  $1500\text{mm} \times 1820\text{mm}$  이다. 음원실과 수음실에는 각각 5개의 마이크로폰을 설치하였고, 측정은 ISO 기준에 의거하여 수행하였다. 한편 두 개의 음향센서가 부착된 임피던스관을 이용한 음향투과손실 측정에서는 시료크기를 판지름보다 다소 큰  $60\text{mm}$ 로 하였다.

먼저 Fig. 4는 주원료인 고무에  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 다량 배합된 차음시트에 대한 측정결과로서, 시트두께  $2\text{mm}$  그리고 면밀도  $3.682\text{kg}/\text{m}^2$ 이다. 이 때 음향센서의 간격과 첫 번째 음향센서로부터 시료면까지의 거리는 각각  $20\text{mm}$ 와  $30\text{mm}$ 로 하였다.

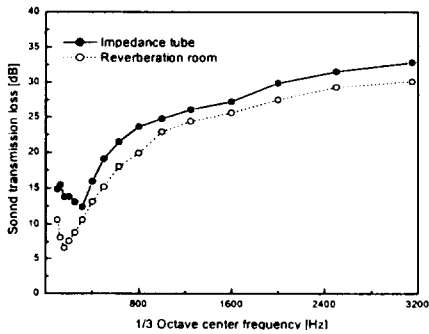


Fig. 4 Sound transmission loss of a rubber sheet.

Fig. 5는 폴리비닐에  $\text{Mn}$ 을 다량 배합시킨 외국산 차음시트에 대한 측정결과로서 차음시트의 한쪽면에 부직포가 부착되어 있다. 면밀도는  $2.422\text{kg}/\text{m}^2$  이며, 두께는  $1.25\text{mm}$ 이다. Fig. 6은 Fig. 5에 제시된 차음재와 동일한 성분으로 만들어진 차음재로서, 차음재의 한쪽면에 얇은 알루미늄 호일이 부착되어 있으며, 두께  $1.3\text{mm}$ 와 면밀도는  $2.286\text{kg}/\text{m}^2$  이다. 두 경우 모두 음향센서 간격과 첫 번째 음향센서로부터 시료면까지의 거리를 각

각  $20\text{mm}$ 와  $50\text{mm}$ 로 하였다.

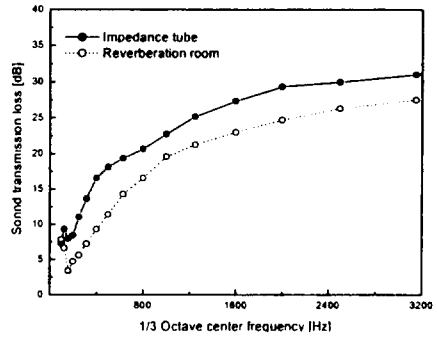


Fig. 5 Sound transmission loss of a polyvinyl sheet covered by additional woven at the back surface.

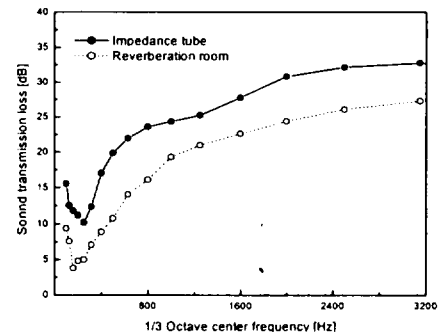


Fig. 6 Sound transmission loss of a polyvinyl sheet covered by aluminum foil at the back surface.

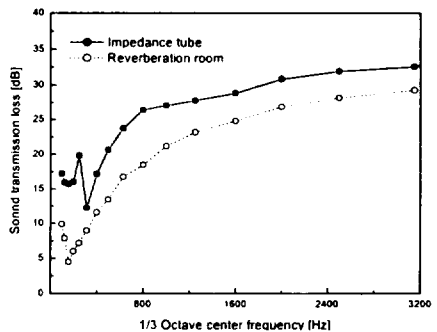


Fig. 7 Sound transmission loss of an asphalt sheet.

Fig. 7은 시트두께  $2.7\text{mm}$ , 면밀도  $3.404\text{kg}/\text{m}^2$ 인 아스팔트재로 만들어진 차음시트의 음향투과손실 측정결과이다. 음향센서 간격은  $10\text{mm}$ , 첫 번째 센서로부터 시료면까지의 거리는  $55\text{mm}$ 이다.

이상의 측정결과로부터 두개의 음향센서가 부착된 임피던스관을 이용하여 측정된 음향투과손실값

은 잔향실에서 측정된 결과와 비교적 잘 대응하고 있음을 볼 수 있다. 다만 두 개의 음향센서가 부착된 임피던스관에서 측정된 투과손실값이 잔향실에서 측정된 값보다 높은 차음성능을 갖는다는 것과 차음시료마다 그 증가폭이 다르게 됨을 보여주고 있다. 이 중에서 전자에 대한 것은 차음재로 입사하는 음의 입사형태에 따른 차이로 설명할 수 있다. 즉 식 (1)에서 보듯이 음파가 차음재의 법선방향으로 입사하는 수직입사의 경우가 법선방향에서 접선방향에 이르기까지 다양한 각도에서 입사하는 난입사의 경우보다 더 높은 투과손실을 갖기 때문이다. 한편 후자에 대한 원인으로는 시료의 사이즈 효과와 시료재질에 따른 내부손실계수값의 차이를 들 수 있다. 그러나 이에 대해서는 향후 더욱 체계적인 연구조사가 필요하다고 사료된다.

## 5. 결 론

시트형 차음재의 음향투과손실 측정에 관한 연구 수행 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

1) 크기가 작은 차음재 시료만을 이용하여 차음성능을 빠르고 쉽게 얻을 수 있는 매우 유용한 성능측정법을 도출하였으며, 측정결과의 신뢰성은 잔향실에서 측정된 결과값과의 비교를 통하여 검증하였다.

2) 수직입사의 경우가 난입사의 경우보다 음향투과손실값이 더욱 높게 되는 차음성능에 대한 일반적 이론을 본 연구의 성능측정법을 통하여 분명하게 확인할 수 있었다.

## 편집후기

본 연구의 실험장치 제작과 실험을 도와준 대학원생 이 승준과 학부생 이승현군에게 고마움을 전한다. 또한 시료를 제공해 준 한국GL산업(주)와 (주)페트로산업에 감사를 표한다.

## 참고문헌

(1) LEO L. Beranek, 1971, Noise and Vibration Control, Chap.10 and Chap.11, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York.

(2) M.L.Munjal, 1987, ACOUSTICS OF DUCTS AND MUFFLERS, Chap. 5, JOHN WILEY & SONS, New York.

(3) ISO 354-1985(E), "Acoustics- Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room."

(4) ASTM C384-90a, 1990, "Standard Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method," ASTM, Philadelphia, PA 19103.

(5) A.F. Seybert, D.F.Ross "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, 61(5), pp.1362-1370, 1977.

(6) A.F. Seybert, "Two-Sensor Methods for the Measurement of Sound Intensity and Acoustic Properties in Ducts," *J. Acoust. Soc. Am.*, 83(6), pp.2233-2239, 1988.

(7) J.Y.Chung, and D.A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(3), pp.907-913, 1980.

(8) J.Y.Chung, and D.A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(3), pp.914-921, 1980.

(9) W.T.Chu, 1986, "Transfer Function Technique for Impedance and Absorption Measurements in an Impedance Tube Using a Single Microphone," *J. Acoust. Soc. Am.*, 80(2), pp.555-560

(10) H.Utsuno, T.Tanaka, T.Fujikawa and A.F.Seybert, 1989, "Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(2), pp.637-643.

(11) R.E. Halliwell and A.C.C. Warnock, 1985, "Sound Transmission Loss: Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques," *J. Acoust. Soc. Am.*, 77(6), pp.2094-2103.

(12) ASTM E90-90, 1990, "Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions," ASTM, Philadelphia, PA 19103.

(13) 이동훈, 강 문, K.Seto, "두개의 음향센서를 이용한 차음시트의 음향투과손실 측정에 관한 타당성 연구," 한국자동차공학회, 추계학술대회 논문집, (발표예정), 2000.

(14) M. HECKL, "The Tenth Sir Richard Fairey Memorial Lecture: Sound Transmission in Buildings," *Journal of Sound and Vibration*, 77(2), pp.165-189, 1981.

(15) A.F. Seybert and Benjamin Soenarko, "Error analysis of spectral estimates with application to the measurement of acoustic parameters using random sound fields in ducts," *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(4), pp.1190-1199, 1981.