

흡음성능의 측정방법

김철환

(한국도로공사 도로교통연구원)

1. 머리말

재료의 흡음특성은 수직입사, 사(斜)입사, 랜덤 입사 등 음의 입사조건에 따라 달라지며, 그에 따라 다른 측정방법이 제안되어 있다. 이번 강좌에서는 음의 입사조건에 따른 재료의 흡음특성 측정방법에 대해 소개한다.

2. 수직입사 흡음률

수직입사 흡음률의 측정은 음향관을 이용하는 방법이 이용되며, 측정방법으로는 정재파법과 전달함수법이 있다. 단, 이들 방법에서는 음향관 내부에서 1차원 음장(평면파 전파)의 조건을 성립시킬 필요가 있으므로 음향관의 직경(D)과 음의 파장(λ)이 $D < 0.59\lambda$ 의 조건을 만족하는 음

향관이 측정에 이용된다. 따라서, 넓은 주파수 범위의 특성을 측정하기 위해서는 직경이 다른 복수의 음향관을 이용할 필요가 있으며, 이 측정방법의 대상이 되는 흡음재는 균질(homogeneous)하여야 한다.

(1) 정재파법

그림 1에 나타난 것과 같은 1차원 음장에서, 재료에 입사하는 정재파(x 방향으로 진행)의 음압 $p_i(t, x)$ 는 다음과 같다.

$$p_i(t, x) = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

여기서, A 는 음압진폭, ω 는 각속도($=2\pi f$)를 의미한다. 재료의 복소 음압 반사계수를

$$r_p = |r_p|e^{j\gamma} \quad (2)$$

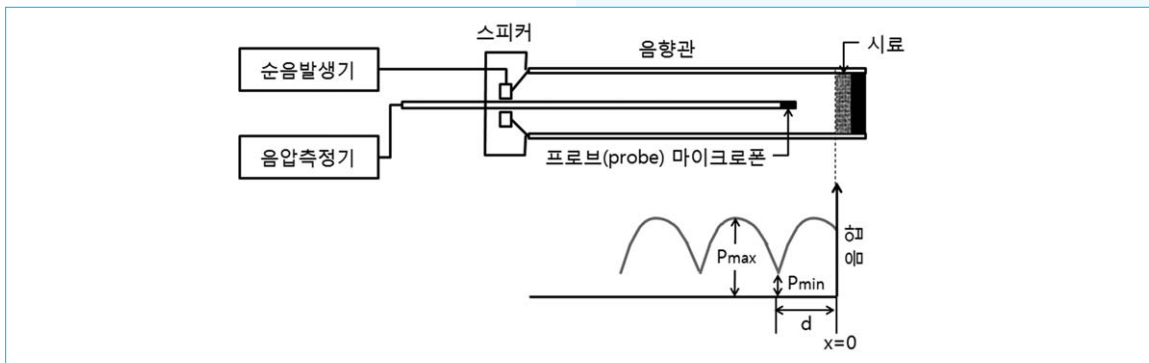


그림 1 정재파법에 의한 흡음률 측정

기초강좌

라고 하면, 재료면에서 반사되는 음파의 음압 $p_r(t, x)$ 는 다음 식으로 표현 할 수 있다.

$$p_r(t, x) = r_p A e^{j(\alpha x + kx)} = |r_p| A e^{j(\alpha x + kx + \gamma)} \quad (3)$$

여기서, γ 는 재료 표면에서 반사가 일어날 때의 위상차를 의미한다. 음향관 내부의 음장은 입사파와 반사파의 합이며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$p(t, x) = A e^{j(\alpha x - kx)} + r_p A e^{j(\alpha x + kx)} \quad (4)$$

$$= A \sqrt{1 + |r_p|^2 + 2|r_p| \cos(2kx + \gamma)} e^{j\alpha x}$$

이 식을 보면 x 의 함수와 t 의 함수가 분리된 형태로 되어 있고, 음압진폭이 위치에 따라 결정되는 정재파로 되어 있음을 알 수 있다. 이 경우 음압의 최대값 p_{\max} 와 최소값 p_{\min} 은 다음과 같이 표현되고, $\lambda/4$ 마다 교대로 정렬된다(단, $n = 0, 1, 2 \dots$).

$$2kx + \gamma = -2n\pi \text{ 일 경우, } p_{\max} = A(1 + |r_p|)$$

$$2kx + \gamma = -(2n+1)\pi \text{ 일 경우, } p_{\min} = A(1 - |r_p|)$$

이며, 여기서 p_{\max} 와 p_{\min} 의 비 n_s (정재파비)

$$n_s = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{1 + |r_p|}{1 - |r_p|} \quad (5)$$

를 측정하면 다음 식에서 음압 반사계수의 절대값 $|r_p|$ 가 구해진다.

$$|r_p| = \frac{n_s - 1}{n_s + 1} \quad (6)$$

이 결과로부터 수직입사 흡음률 α_0 는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\alpha_0 = 1 - |r_p|^2 = 1 - \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2 = \frac{4}{n_s + \frac{1}{n_s} + 2} \quad (7)$$

p_{\min} 이 처음 발생하는 위치는 $x = -\lambda/4 - \lambda/(2k)$ 이며, 완전 반사성의 경우($\gamma = 0$)와 비교할 때 $\delta = \gamma/(2k)$ 만큼 재료의 표면으로부터 거리가 달라지게 된다. 따라서, 이 δ 를 측정하면 γ 가 계산되고 식 (6)의 결과와 함께 복소 음압 반사계수 r_p 가 구해진다. 여기서, 재료 표면에서의 음압과 입자속도는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$p(t, 0) = A(1 + r_p) e^{j\alpha x} \quad (8)$$

$$u(t, 0) = \frac{A}{\rho c} (1 - r_p) e^{j\alpha x} \quad (9)$$

여기서, ρc 는 공기의 특성 임피던스이다. 음압과 입자속도의 비(比)로부터, 다음 식에 의해 재료의 수직(normal) 음향 임피던스(재료에 수직방향의 비음향 임피던스) Z_n 이 계산된다.

$$Z_n = \frac{p(t, 0)}{u(t, 0)} = \frac{1 + r_p}{1 - r_p} \rho c \quad (10)$$

실제 측정에서는 그림 1에 나타난 것과 같이 음향관의 한쪽 끝에 재료를 설치하고 다른 끝에 설치한 스피커로부터 순음(pure tone)의 음파를 방사하여 프로브(probe) 마이크로폰으로부터 음향관 내에 발생한 정재파의 p_{\max} 와 p_{\min} 을 여러 지점에서 측정한다. 또, 수직 음향 임피던스를 구하는 경우에는 재료 표면에서 최초의 p_{\min} 이 발생하는 지점까지의 거리 d 를 측정한다. 이 측정에서는, 음향관의 길이는 측정하고자 하는 주파수 파장의 3/4 이상이 되어야 한다. 이 측정방법에 대한 상세한 내용은 ISO 10543-1에 규정되어 있다.

(2) 전달함수법

정재파법은 마이크로폰을 음향관 내부에서 이 동시켜 음압분포를 측정해야 하지만, 음향관에

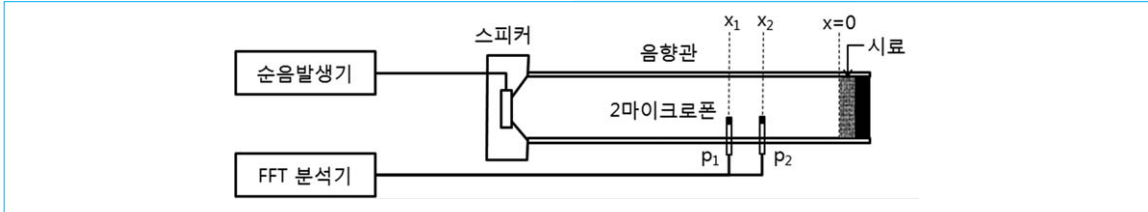


그림 2 전달함수법에 의한 흡음률 측정

고정된 2개의 마이크로폰을 이용하여 흡음률을 측정하는 방법이 고안되어 ISO 10543-2에 그 방법이 규정되어 있다. 재료에 대한 입사음의 음압을 p_i , 반사음의 음압을 p_r 라 하면 p_i 와 p_r 는 다음 식으로 나타낼 수 있다(시간항 $e^{j\omega t}$ 생략).

$$p_i = \hat{p}_i e^{-jkx} \quad (11)$$

$$p_r = \hat{p}_r e^{-jkx} \quad (12)$$

여기서, \hat{p}_i 와 \hat{p}_r 는 재료표면 ($x=0$)에 있어서의 p_i 와 p_r 의 진폭(complex amplitude)을 의미한다. 2개의 마이크로폰의 위치 x_1 과 x_2 에서의 음압 p_1 와 p_2 는 다음 식으로 표현된다.

$$p_1 = \hat{p}_i e^{-jkx_1} + \hat{p}_r e^{jkx_1} \quad (13)$$

$$p_2 = \hat{p}_i e^{-jkx_2} + \hat{p}_r e^{jkx_2} \quad (14)$$

여기서, 전체 음장에 있어서의 p_1 에 대한 p_2 의 비를 전달함수 H_{12} 로 하면, 식 (13)과 (14) 및 $\hat{p}_r = r_p \hat{p}_i$ 의 관계로부터 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{-jkx_2} + r_p e^{jkx_2}}{e^{-jkx_1} + r_p e^{jkx_1}} \quad (15)$$

여기서, 입사음에 대해 고려한 점1에서 점2까지의 전달함수를 H_i , 반사음만을 고려한 점1에서 점2까지의 전달함수를 H_r 이라 하면, 다음식과 같이 k 와 $(x_1 - x_2)$ 로부터 구할 수 있다.

$$H_i = \frac{p_{2i}}{p_{1i}} = e^{jk(x_1 - x_2)} \quad (16)$$

$$H_r = \frac{p_{2r}}{p_{1r}} = e^{-jk(x_1 - x_2)} \quad (17)$$

식 (15), (16), (17)로부터

$$r_p = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{-2jkx_1} \quad (18)$$

따라서, 재료의 음압 반사계수 r_p 는 파수(파장정수) k 및 $(x_1 - x_2)$ 를 알고 있다고 한다면, 전달함수 H_{12} 와 거리 x_1 을 측정하여 구할 수 있다 (단, 음향관의 벽면에 의한 감쇠를 고려할 때에는 파수를 복소수로 하여야 함). 이 결과로부터 α_0 과 Z_n 을 계산할 수 있다.

4. 랜덤입사 흡음률

재료의 표면에 음파가 랜덤한 각도로 입사할 때를 가정한 흡음률을 랜덤입사 흡음률(random incident sound absorption coefficient)라고 한다. 실제로 이러한 입사조건을 완전하게 구현하는 것은 어렵고, 근사적인 방법으로 잔향실을 이용한 방법이 ISO 354에 규정되어 있다. 이 방법에 의해 측정된 흡음률을 잔향실법 흡음률이라 한다. 실내 음향설계 등에 있어서는 일반적으로 이 흡음률이 많이 이용된다. 측정 원리는 다음의 세이빈-

기초강좌

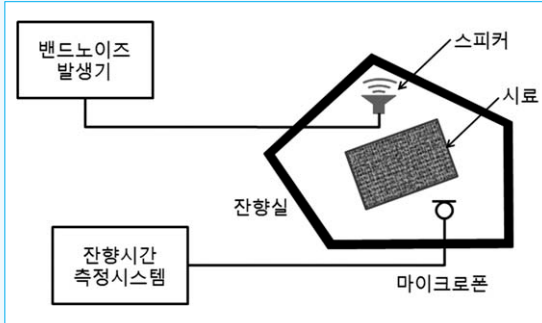


그림 3 잔향실법에 의한 흡음률 측정

누드슨(Sabin-Knudsen)의 잔향식에 바탕을 두고 있다.

$$T = \frac{55.3}{c} \cdot \frac{V}{A + 4mV} \quad (19)$$

여기서, T 는 잔향시간(sec), c 는 음속(m/sec), V 는 잔향실 용적(m^3), A 는 재료의 등가 흡음면적(m^2), m 은 공기흡수에 의한 감음계수(m^{-1})을 의미한다. 그림 3에 나타난 것처럼, 잔향실이 공실(空室)인 상태와 재료를 설치했을 때의 잔향시간을 각각 T_1 , T_2 라고 하면, 식 (19)로부터 다음의 관계가 성립된다.

$$A_1 = \frac{55.3V}{c_1 T_1} - 4m_1 V \quad (20)$$

$$A_2 = \frac{55.3V}{c_2 T_2} - 4m_2 V \quad (21)$$

여기서, A_1 는 잔향실 고유의 등가 흡음면적(m^2), A_2 는 재료를 포함한 잔향실의 등가 흡음면적(m^2), c_1 , c_2 는 각각 공실시와 재료 설치시의 음속(m/sec), m_1 , m_2 는 각각 공실시와 재료 설치시의 공기흡수에 의한 음의 감쇠계수(m^{-1})을 의미한다. 식 (20)과 (21)로부터 재료의 등가 흡음면적 A 는 다음 식에 의해 계산된다(단, 잔향실내의 총표면적에 비해 재료의 면적이 충분히 작다고 가정).

$$A = 55.3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4(m_2 - m_1)V \quad (22)$$

잔향실 내부의 온도 및 습도가 공실시와 재료 설치시가 다른 경우, 각각의 상태에서 온도와 상대습도를 측정하여 식 (22)에 대입하면 된다. m 은 ISO 9613-1에 계산방법이 기술되어 있다. 온도 및 상대습도가 재료 설치전·후에서 거의 일정한 경우, A 는 다음 식에 의해 계산된다.

$$A = \frac{55.3V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (23)$$

단, 위 식을 적용하기 위해서는 온도 및 상대습도의 변화가 거의 없어야 하며, ISO 354에서는 측정시의 잔향실내의 조건이 기온 15°C 이상, 상대습도 30% 이상 90% 이하를 규정하고 있다. 하지만, 이 범위내에서도 온도, 습도의 조건이 크게 변하면 고주파수 영역에서는 상당히 큰 영향이 발생하므로 주의가 필요하다. 측정대상 재료가 홀(hall)용 의자 등과 같은 흡음체의 경우에는 측정된 등가 흡음면적을 재료의 개수로 나누고 1개당 등가 흡음면적으로 표시한다. 또한, 일반적인 흡음재료의 경우에는 다음식에 의해 잔향실법 흡음을 α_r 을 구한다.

$$\alpha_r = \frac{A}{S} \quad (24)$$

여기서, S 는 재료의 면적(m^2)을 의미한다. 이 잔향실을 이용한 방법은 거의 모든 종류의 흡음재료 및 흡음체를 대상으로 할 수 있지만, $10 m^2$ 정도의 재료면적을 필요로 한다. 또한 재료면적이 작아질수록 에지(edge)효과(재료의 테두리 효과)에 의해 잔향실법 흡음률이 크게 측정되는 경향이 있다. 또한, 홀(hall)용 의자 등을 대상으로 하는 경우에는 잔향실에 설치할 수 있는 개수가 한

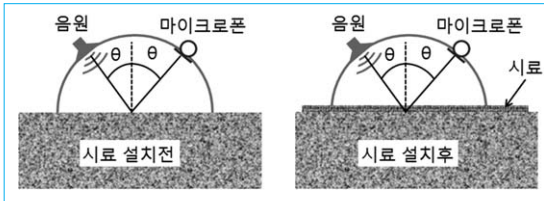


그림 4 사입사 흡음률 측정 방법

정되므로 흡음률은 홀 등에 다수 배열한 경에 비해 크게 측정된다. 이 차이를 작게 하기 위해서 ISO 354에서는 잔향실에서 측정할 때에는 재료를 나무 등으로 둘러싸는 방법을 규정하고 있다.

5. 사(斜)입사 흡음률

음파의 입사각을 고려한 흡음률을 측정하는 방법에 있어서는, 현재까지 입사음과 반사음을 분리하는 방법²⁾, 재료과 완전반사면의 표면음압을 비교하는 방법³⁾, 재료면 근방의 간섭음장을 해석하는 방법⁴⁾, 펄스(pulse)법 또는 상관법으로 구한 임펄스(impulse) 응답의 파형에서 직접음을 소거하는 방법^{5,6)} 등이 검토되고 있다. 하지만, 측정방법이 근본적으로 어렵기 때문에 표준 측정법으로는 확립되고 있지는 않다. 여기에 소개하는 방법은 일본 건설성(현 국토교통성)의 건설기술 평가에서 채용된 방법⁷⁾을 소개한다. 그림 4에 나타난 것과 같이, 완전 반사면(콘크리트 바닥 등)에 임펄스 음이 일정한 각도로 입사할 때 정반사 방향의 반사음과 그 면에 재료를 설치했을 때 같은 방향의 반사음을 각각 측정하여 다음 식에 의해 사입사 흡음률 $\alpha(\theta)$ 를 구한다.

$$\alpha(\theta) = 1 - \frac{E_s(f)}{E_r(f)} \quad (25)$$

여기서, $E_s(f)$, $E_r(f)$ 는 각각 바닥면에 재료를 설치했을 때와 반사면의 상태일 때의 반사 임펄

스의 에너지 스펙트럼을 의미한다. 위 식에서 알 수 있듯이, 여기서 말하는 흡음률은 반사면에서의 반사 에너지가 흡음재료를 설치함에 따라 감소되는 비율을 의미한다. 측정방법으로는 직접음과 반사음을 분리하는 방법으로 지속시간이 짧은 임펄스를 이용한 직접적인 방법 이외에 상호합수법이나 TSP법 등 여러 가지 방법으로 응용하여 측정이 가능하다. 당시 일본 건설성에서 채택한 방법에서는 0~45° 범위에서 15° 간격으로 $\alpha(\theta)$ 를 1/3 옥타브밴드의 중심주파수로 계산하고 산술평균치(평균 사입사 흡음율)을 구하여 도로교통소음의 A특성 스펙트럼으로 보정한 단일 수치로 평가하고 있다. **KSNVE**

참고 문헌

- (1) 橘秀樹, 2004, 環境騒音・建築音響の測定, コロナ社.
- (2) 平田能陸, 1971, 斜め入射吸音率の測定方法, 日本音響學會講演論文集, pp. 463~464.
- (3) Ingard, 1961, A Free Field Method of Measuring the Absorption Coefficient of Acoustic Materials, JASA, 23, p. 509.
- (4) 安藤四一, 1968, 干涉縞による斜め入射複素音壓反射率測定法, 電子通信學會論文誌, 51A, p. 8.
- (5) 黒岩和治, 1972, 相關法による吸音材料の吸音特性の測定法, 日本音響學會誌, 28(8), pp. 405~413.
- (6) 橘秀樹, 1978, 各種吸音構造の斜め入射吸音特性-相關法を用いた直接音除去法による測定-, 日本音響學會誌, 34, p. 1.
- (7) 上坂克己, 1997, 高性能吸音板の構造と吸音特性-建設技術評価制度の結果より-, 日本音響學會騒音・振動研究會資料, N-97-52.