2000년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제19권 제1(s)호

수직 및 랜덤입사 흡음률에 관한 연구

강 현 주, 김 봉 기, 김 상 렬
한국기계연구원 음향연구그룹

Study on Normal and Random incidence Absorption Coefficient

Hyun-Ju Kang, Bong-Ki Kim, and Sang-Ryul Kim
Acoustics Research Group, KIMM
kanghj@mailgw.kimm.re.kr

요약문

흡음률을 예측 및 평가하기 위한 연구로서 우선 수직입사 흡음률을 예측하는 경험식 모델에 대한 비교 연구를 수행하였다. 비교결과는 Voronina 가 제안한 경험식이 상대적으로 실험치와 잘 일치하고 있다. 한편 수직입사와 랜덤입사와의 상관관계를 실험 연구를 통하여 조사하였다. 이 상관관계는 주파수에 따라서 다르게 나타나고 있다. 저주파수 대역에서는 랜덤 입사가 수직입사 보다 크게 나타나고 있지만 고주파수에서는 수평입사 성분의 영향으로 랜덤입사에서는 감소하는 경향을 보이고 있다.

ABSTRACT

Comparison for various empirical models of normal incident absorption was made, along with experiments. Comparative result indicates that Voronina model which is function of fiber diameter and porosity is more suitable than the other models. An investigation for correlation between normal and random incident absorption was carried out by experiment and analysis. It appears that at the low frequencies, the random incident absorption is higher than the normal one, whileas at the high frequencies, the random incident absorption is decreased due to the effect of grazing incident components.

1. 서 언

최근에 환경친화적 혹은 내화성의 우수한 흡/차음재에 대한 관심이 증대하고 있다. 새로운 흡음재를 개발하고 이를 평가할려면 우선 수직입사 흡음률을 예측하고 평가해야 한다. 수직입사 흡음률에 대한 수치해석을 통해서 개발대상 시편의 주요 물성치(흐름저항, 기공율)가 결정되면 이를 토대로 시편의 밀도, 두께 등을 정할 수 있다. 이로부터 제작 된 시편을 임피던스 튜브를 이용하여 수직입사 흡음률을 평가한다.

수직입사 흡음률은 실제 설치현장의 흡음성능과는 당연히 큰 차이가 있다. 왜냐하면 실제 음장에서 흡음재에 입사하는 음파는 수직입사 보다는 랜덤입사에 근사하다고 볼 수 있으며 이로부터 흡음재의 거동은 수직입사시의 거동과는 판이하게 다를 수 있기 때문이다.

대상 시편의 수직입사 흡음률을 해석하는 여러 가지 모델이 발표되고 있다. 경험식으로서 대표적인 것은 Delany & Bazely[1] 모델을 들 수 있다. 이 모델은 흐름저항에 대한 데이터만 알면 수직입사 흡음률을 예측할 수 있다. 이 모델이 저주파수 해석한계를 수정한 모델을 Miki[2]가 제시하였다. 이 모델들은 일견 단순하고 효율적으로 보이지만 주파수별 흡음특성을 제대로 표현하지 못하는 경우가 있으며 또한 흐름저항 측정의 정확도가 문제가 된다. 현재까지도 흐름저항에 대한 정의가 분명치 않으며 더욱이 측정오차는 order만 맞아도 다행인 것

이 현실이다. 이 문제점에 대해서 Voronina[3]는 좀더 정확히 측정할 수 있는 변수인 기공율과 fiber의 직경을 주요 변수로 하는 예측모델을 발표하였다..

본 연구에서는 수직입사 흡음률에 관하여 예측 모델 사이의 특성을 수치해석 및 실험적으로 조사한다. 또한 수직입사 및 랜덤입사 흡음률 사이의 상관관계를 수치해석 및 실험적으로 비교하고 있다.

2. 수직입사 흡음률

가. 파수 및 특성 임피던스

흡음재 내부의 파동전파는 전파속도와 임피던스의 항으로 표현할 수 있다. 전파속도, $c^2 = K(\omega)/\rho(\omega)$ 로서 유효밀도와 체적탄성률에 의해서 결정된다. 음압을 평면파라고 가정하면 $p = e^{j(\omega t - \gamma x)}$ 으로 쓸 수 있고 이때 파수(wave number), $\gamma = \omega/c = k' - jk''$를 구 할 수 있다. 여기서 k'는 전파상수(propagation constant), 즉, 공간상의 주파수를 의미하며, k''는 감쇠상수(attenuation constant)로서 파동이 공간상으로 진행시 감쇠율을 나타낸다. 따라서 파수는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\omega}{c} = j\omega\left[\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}\right]^{1/2} \qquad (1)$$

한편 파동방정식으로부터 특성 임피던스는 다음과 같이 구해진다.

$$Z_c = \frac{p}{v} = [\,\rho(\omega)\,K(\omega)]^{1/2} \qquad (2)$$

(2)식으로부터 외부 음압에 대한 흡음재의 응답을 구할 수 있다. 즉 (1) 및 (2)식을 이용하여 재료의 음향학적인 성질을 예측할 수 있다. 위의 값을 구하기 위한 여러 가지 이론적 혹은 경험적 모델이 존재한다. 본 연구에서는 경험적인 모델들로부터 파수와 임피던스를 구하여 흡음재의 특성을 설명하고 있다.

나. 파수 및 특성 임피던스에 대한 경험식

Delany와 Bazley[1]는 공극률이 1에 가까운 많은 섬유 재료의 전파 상수와 특성 임피던스를 측정하여 이로부터 이들 인자가 주파수와 재료의 유동 비저항의 함수로 표현될 수 있음을 밝혀냈다. 이로부터 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\gamma = \frac{\omega}{c_o}[1 + 0.0978X^{-0.7} - j0.189X^{-0.595}]$$

$$Z_c = \rho_o c_o[1 + 0.0571X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732}] \qquad (3)$$

여기서, ρ_o, c_o는 각각 공기의 밀도와 속도를 나타내며 $X = \rho_o f/R_1$로서 f는 주파수, R_1은 유동 비저항(flow resistive, 혹은 흐름저항)이다. 또한 Delany와 Bazley가 제안한 유효 범위는 $0.01 < X < 1.0$와 같다.

이 경험식은 제한된 주파수 범위에서 특정한 재료에 제한적으로 이용될 수 있지만 다른 모델과 비교하여 볼 때, 직접 측정이 가능한 인자인 유동 비저항만으로 이루어져 있는 장점을 가지고 있다.

위의 방식과 유사하게 Miki[2]는 저주파수 영역의 제한성을 극복할 수 있는 수정된 경험식을 제시하였다. 다층 구조로 되어있는 재료의 해석 시, Delany-Bazley 모델이 저주파수 영역에서 표면 임피던스의 실수부가 간혹 음수가 되는 경우가 발생하였는데 Miki는 이를 보완하였다. Miki의 경험식은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\omega}{c_o}[1 + 0.109(f/R_1)^{-0.618} - j0.16(f/R_1)^{-0.618}]$$

$$Z_c = \rho_o c_o[1 + 0.07(f/R_1)^{-0.632} - j0.107(f/R_1)^{-0.632}] \qquad (4)$$

이들 식도 Delany와 Bazley의 경험식과 유사하게 유동 비저항만으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

비교적 최근에 Voronina[3]는 기공율과 fiber의 직경을 주요 매개변수로 하는 경험식을 제안하였다.

1) fiberous material

$$Z_c = \rho_o c_o(HQ - jQ),\quad \gamma = k' - jk''$$

$$Q = (1-H)q_o\frac{1}{HD}\sqrt{\frac{8\mu}{k\rho_o c_o}},\quad q_o = \frac{1 + 0.25*10^{-4}}{(1-H)^2}$$

$$k' = k(1+Q),\quad k'' = kQ\frac{2+Q}{1+Q}$$

.....(5)

2) porous material

$$Z_c = \rho_o c_o(Z_{re} - jZ_{im}),\ \gamma = k' - jk''$$

$$Z_{re} = 1 + Q,\quad k' = k[1 + Q(HB)]$$

$$Z_{im} = Q/2,\qquad k'' = kQ \qquad \text{for } Q < 1$$

$$Z_{im} = \frac{Q}{2+a},\quad k'' = \frac{2kQ}{2+a} \qquad \text{for } Q > 1$$

$$B=(60x^2-120x+61.5)^{-1},\ a=\frac{Q}{(1+\sqrt{Q})^2}$$

$$x=120\frac{m}{y(1+Q)},\ y=\sqrt{D\frac{\rho_o c_o}{\mu}}$$

$$m=1000(1-\rho_o/\rho_f),\quad Q=\frac{1-H}{HD}\sqrt{200\frac{\mu}{k\rho_o c_o}}$$

.....(6)

여기서 $k=\omega/c_o$, ρ_f=강체 프레임의 밀도, D는 fiber 혹은 pore의 직경, μ는 동점성계수, H는 기공율을 나타낸다.

다. 표면 임피던스 및 수직입사 흡음률

흡음재의 두께가 d인 경우에 대해서 수직입사 흡음률은 흡음재 자체의 특성은 상기의 경험식들로 부터 구하면 흡음재 표면에서의 임피던스, 즉 표면 임피던스(specific surface impedance)는 다음과 같다.

$$Z_s = -jZ_c\cot(\gamma d)Z_o \qquad (7)$$

여기서 $Z_o=\rho_o c_o$로서 공기의 특성 임피던스이다. 그러면 흡음재 표면에서의 반사계수, R과 수직입사 흡음률, α_o은 다음과 같은 관계가 된다.

$$\alpha_o=1-|R|^2=1-\left|\frac{Z_s-1}{Z_s+1}\right|^2 \qquad (8)$$

Fig. 1은 25 mm 스폰지를 대상으로 앞에서 소개한 경험식들과 실험치를 비교하고 있다. 여기서 Delan-Bazeley 모델과 Miki 모델은 약 1000 Hz이하에서만 약간의 차이를 보이므로 함께 나타내고 있다. 그림에서 보면 Voronina 모델이 실험치의 경향과 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3. 랜덤 입사 흡음률

흡음률은 입사각의 함수이므로 특정주파수에 대한 흡음률은 모든 입사각에 대한 평균으로서 대상 음장을 확산음장이라고 가정하면 다음과 같다.

$$\bar{\alpha}(\omega) = \frac{\int_0^{\pi/2}\alpha(\omega,\phi)\cos\phi\sin\phi\,d\phi}{\int_0^{\pi/2}\cos\phi\sin\phi\,d\phi} = 2\int_0^{\pi/2}\alpha(\omega,\phi)\cos\phi\sin\phi\,d\phi \qquad (9)$$

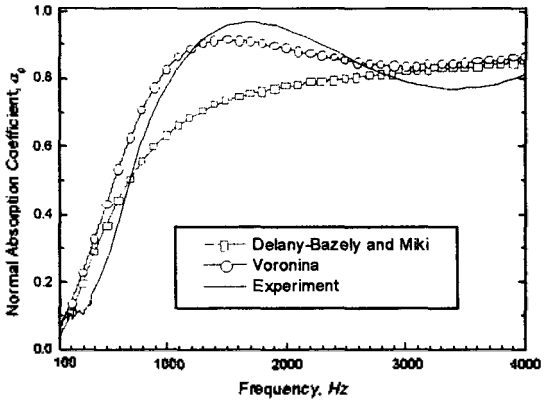

Fig.1. Comparison of the measured and predicted normal incident absorption for a sponge (25 mm).

한편 경사입사 흡음률은

$$\alpha_\phi \equiv \alpha(\omega,\phi)=1-\left|\frac{Z_s\cos\phi-1}{Z_s\cos\phi+1}\right|^2 = \frac{4Z_{s,re}\cos\phi}{(Z_{s,re}\cos\phi+1)^2+Z_{s,im}\cos^2\phi} \qquad (10)$$

여기서 $Z_s\equiv Z_{s,re}+Z_{s,im}$이다.

(10)식을 (9)식에 대입하면 입사각에 대한 평균흡음계수는 다음과 같이 정리된다.

$$\bar{\alpha}(\omega)=\frac{8Z_{s,re}}{Z_{s,re}^2+Z_{s,im}^2}\left\{1+\frac{Z_{s,re}^2-Z_{s,im}^2}{Z_{s,im}(Z_{s,re}^2+Z_{s,im}^2)}\times\tan^{-1}\frac{Z_{s,im}}{1+Z_{s,re}}-\frac{Z_{s,re}}{Z_{s,re}^2+Z_{s,im}^2}\times\ln[(1+Z_{s,re})^2+Z_{s,im}^2]\right\} \qquad (11)$$

한편 흡음재가 완전히 국부거동한다면 수직입사 흡음률로부터 표면 임피던스, Z_s를 구하는 식은 다음과 같다.

$$Z_s=\frac{1+(1-\alpha_o)^{1/2}}{1-(1-\alpha_o)^{1/2}} \qquad (12)$$

Fig.2는 자동차용 시트에 대하여 계측된 수직입사 흡음률 데이터로부터 (12)식을 이용하여 임피던스를 구하고 경사입사 흡음률, 즉 (10)식을 이용하여 계산한 결과를 보이고 있다. 저주파수에서는 입사각에 대한 흡음률의 변화가 매우 심한 반면에 고주파수는 거의 변화가 없다.

Fig.3는 Fig.2와 동일한 시편에 대한 계측된 수직입사 흡음률, 잔향실법 흡음률 및 (9)식을 이용하여 계산된 값들을 보이고 있다. 임피던수 튜브 즉 수직입사와 잔향실의 데이터를 비교해보면 저주파수 대역에서는 잔향실 데이터가 높게 나타나고 있지만 고주파수 대역에서는 반대 현상이 보이고 있다. 한편 고주파수 대역에서 잔향실 데이터가 감소하는 경향은 잔향실의 음장이 고주파

수로 갈수록 확산음장에 근사하게 되므로 수평입사의 영향이 증가한다. 따라서 Fig.2에서 보이는 수평입사 흡음률의 영향이 포함되기 때문에 흡음률이 감소하는 것으로 것으로 생각한다.

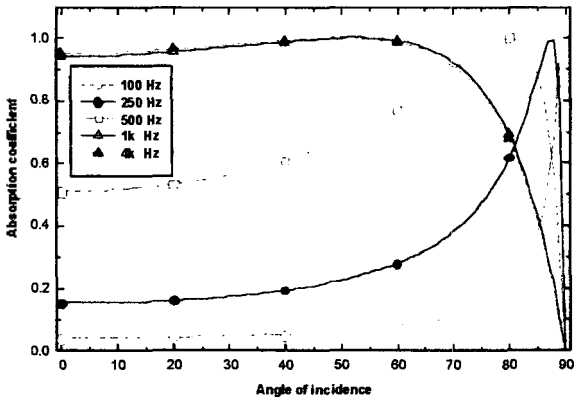

Fig.2. Variation of absorption with the angle of incidence.

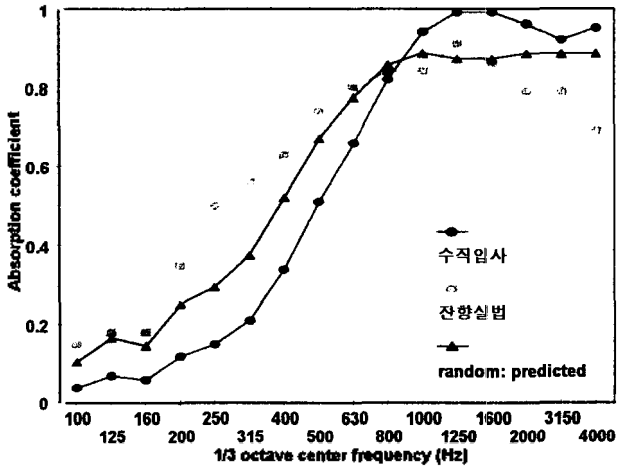

Fig.3. Comparison of the normal and random incident absorption.

4. 결언

수직입사 흡음률을 예측하기 위한 경험식 모델 중 Voronina 모델이 실험치와 가장 잘 일치하고 있다. 한편 수직입사와 랜덤입사의 상관관계는 입사각 및 주파수 및 상대적 흡음 계수에 따라 다른 경향을 보이고 있다.

후 기

본 논문은 중기청이 지원하는 기술개발사업(AI0320)으로 지원되어 수행하였습니다

참고문헌

[1] M. E. Delany and E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Appl. Acoust. **3**, 105-116 (1970).

[2] Y. Miki, Acoustical properties of porous materials - Modification of Delany-Bazley models , J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **11**, 19-24 (1990).

[3] N. Voronina, An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity, Appl. Acoust. **51**, 181-196 (1997).