

등가류체모형에 의한 다공성매질의 흡음특성연구

안은경, 리운선

지난 시기 다공성매질들에서의 음파의 전파에 대한 이론적연구가 많이 진행된 결과 이론이 비교적 완성되고 그것에 따르는 실험적검증에서도 성과가 이룩되었다.[1]

그러나 일반적으로 다공성매질에서의 음파의 전파특성은 주기적인 균질화방법을 리용 [2]하는것이 기본이었으며 기체-고체경계에서 골격진동은 무시되었다.

우리는 기체-고체경계에서 골격진동을 고려한 류체력학적모형을 리용하여 다공성매질의 흡음특성을 이론적으로 해석하고 그 결과를 컴퓨터프로그램에 의하여 계산함으로써 선행이론의 제한성을 극복하였다.

1. 이론적기초

이제 다공도 ϕ 를 가진 조화적이며 등방적인 다공성매질이 밀도가 ρ_f , 점성계수가 η 인 압축성점성류체로 둘러싸여있다고 하자.

이때 다공성고체의 골격은 음향학적파동에 의해서 변형되지 않는다고 가정한다.

실지로 골격밀도가 크거나 매우 큰 체적탄성률 또는 약한 류체-고체쌍을 가지는 다공성매질들에서는 다공성고체의 골격이 음향학적파동에 의하여 변형되지 않는다.

한편 음파의 파수가 구멍의 크기나 매질알갱이보다 훨씬 큰 경우 탄성에 대하여 선형성이 성립한다고 볼수 있다.

이런 다공성매질에서는 음파가 류체속에서만 전파된다고 볼수 있다.

등가류체모형은 이런 다공성매질을 류체-고체호상작용에 의해 재규격화된 밀도나 체적탄성률을 가지는 물질로 생각할수 있게 한다.

기체-고체경계에서 골격진동을 고려한 류체력학적모형을 리용하면 계의 상태방정식(단열방정식)에 관계되는 오일러방정식과 질량보존법칙을 등가류체모형의 기초방정식으로 정할수 있다.

$$\begin{aligned}\rho_f \alpha(\omega) \frac{\partial v_i}{\partial t} &= -\nabla_i p \\ \frac{\beta(\omega)}{K_a} \frac{\partial p}{\partial t} &= -\nabla \cdot \mathbf{v}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 \mathbf{v} 와 p 는 립자속도와 음압, $K_a = \rho P_0$ 은 류체의 누름계수, $\alpha(\omega)$ 와 $\beta(\omega)$ 는 매질의 력학적교임률과 다공성물질에 포함된 공기의 력학적압축률이다.

이 2개의 응답인자들은 주파수 $f = \omega/2\pi$ 에 세계 의존하는 복소수함수들로서 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\alpha(\omega) = \alpha_{\infty} \left(1 + \frac{\eta\phi}{j\omega\alpha_0\rho_f k_0} \sqrt{1 + j \frac{4\alpha_{\infty}^2 k_0^2 \rho_f \omega}{\eta\Lambda^2 \phi^2}} \right) \quad (2)$$

$$\beta(\omega) = \gamma - (\gamma - 1) \times \left(1 + \frac{\eta\phi}{j\omega\rho_f k_0' \text{Pr}} \sqrt{1 + j \frac{4k_0'^2 \rho_f \omega \text{Pr}}{\eta\phi^2 \Lambda'^2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

여기서 $j^2 = -1$, γ 는 단열상수, Pr 는 프란틀수, α_{∞} 는 꼬임률, k_0 은 정적침투도, k_0' 는 열적침투도, Λ , Λ' 는 각각 점성 및 열특성길이이다.

이 모형은 점성효과뿐만아니라 열효과까지 고려한것이며 파라미터 k_0' 는 구멍겉면에서 류체와 골격사이의 열전달에 의한 음파의 감쇠를 나타내는 파라미터이다.

한편 $\alpha(\omega)$ 와 $\beta(\omega)$ 는 공기와 음향학적매질에서 감쇠되는 소리에 대해 작용하는 골격사이에서 점성 및 열교환을 나타낸다. 이 교환들은 한편으로는 류체-골격련관운동과 파동운동에 의해 생겨난 공기의 압축-팽창으로 발생한다.

이 점성 및 열교환이 적용된 류체부분들은 매질의 미세특성길이의 비 실례로 점성 및 열침투성두께 $\delta = (2\eta/\omega\rho_0)^{1/2}$ 과 $\delta' = (2\eta/\omega\rho_0\text{Pr})^{1/2}$ 에 대한 구멍의 크기로써 계산할수 있다.

또한 점성효과에 대하여 이 류체부분들은 속도분포가 점성류체와 정지하고있는 골격사이의 경계면에서의 마찰력에 의하여 산란되는 류체구역에 대응되며 열효과에 대하여 그것은 다공성매질들의 두 상사이에서 열교환에 작용하는 류체체적이다.

이러한 모형에서는 음파의 전파가 5개 파라미터 ϕ , α_{∞} , $\sigma = \eta/k_0$, Λ , Λ' 에 의해 완전히 결정된다.

한편 다공성매질에서 음속도는 식 (2), (3)으로부터 다음과 같이 쓸수 있다.

$$c(\omega) = \sqrt{\frac{K_a}{\rho_f \alpha(\omega) \beta(\omega)}} \quad (4)$$

또한 점성층두께 $\delta = (2\eta/\omega\rho_0)^{1/2}$ 이 구멍의 크기 r 보다 훨씬 클 때($\delta/r \gg 1$)를 저주파대역이라고 부른다.

저주파대역에서 파동방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\alpha_0 \gamma}{c_0^2} \right) \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \left(\frac{\phi \sigma}{\rho_f \alpha_0 c_0^2} \right) \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (5)$$

2. 계산결과 및 분석

다공성매질에서 음에너지는 점성 및 열산란의 두가지 단계를 거쳐 흡수된다고 볼수 있다.

일반적인 다공성매질에서의 음전파특성은 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 다공성매질에서 음속도의 허수부는 증가하다가 5 000Hz근방에서 극대값을 가지고 점차 감소하며 실수부는 급격히 커지다가 완만해진다.

다음 기체-고체경계에서 골격진동을 고려한 류체력학적모형을 리용하여 속도곡선을 그리고 저항모형에 의한 속도곡선 및 실험값과 비교하였다.(그림 2)

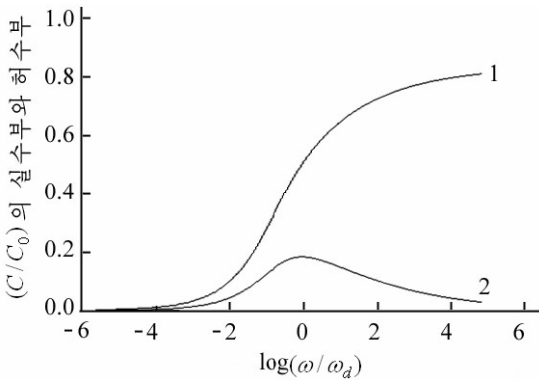


그림 1. 다공성매질의 음전파특성
1—실수부, 2—허수부

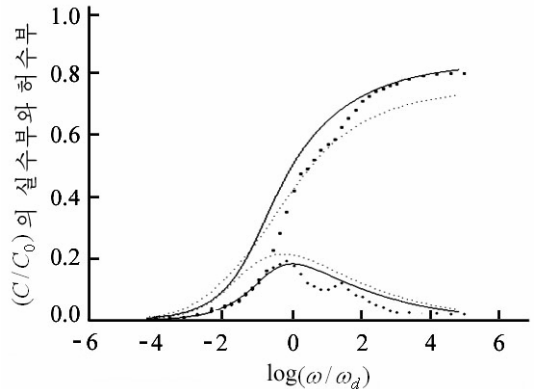


그림 2. 다공성매질에서의 음전파특성비교
실선과 점선은 각각 류체모형과 저항모형,
●—실험점

그림 2에서 보는바와 같이 다공성매질을 류체모형화하여 얻은 음전파특성곡선을 저항모형을 리용하여 얻은 곡선 및 실험값과 비교해볼 때 음속도의 실수부는 거의 변하지 않지만 허수부는 변한다. 즉 류체모형에 의한 곡선이 저주파수구간에서 실험값에 보다 가까운 결과를 준다.

그것은 주파수가 낮을수록 침투성깊이가 커지므로 다공성매질을 끈기류체로 볼수 있는 이론적근거가 더욱 명백해지기때문이다.

음속도의 허수부에 대하여 우리가 이론적으로 계산한 값과 실험값과의 차이는 표와 같다.

표에서 보는바와 같이 다공성매질을 류체모형화하여 음파의 전파특성을 밝히면 낮은 주파수구간에서 음파의 흡수에 대한 보다 정확한 결과를 예측할수 있다는것을 알수 있다.

표. 주파수에 따르는 음속도의 허수부비교

주파수/Hz	250	500	2 500	5 000	10 000
실험값	0.065	0.126	0.186	0.175	0.133
저항모형	0.13	0.18	0.20	0.193	0.182
류체모형	0.067	0.130	0.192	0.179	0.172

우리가 계산한 이론값과 실험값이 차이나는 원인은 우선 리론전개에서 근사모형을 리용하였기때문이다. 다시말하여 다공성매질구조의 복잡성으로 하여 우리는 기체로 포화된 굳은 다공성매질을 끈기류체로 모형화하여 음파의 전파특성을 해석하였다.

그 원인은 또한 공기의 국부적인 비압축성조건을 가정하였기때문이다. 다시말하여 나비에—스톡스방정식을 적용하기 위하여 음압이 매우 작고 다공들이 파장에 비하여 매우 작기때문에 공기가 국부적으로 비압축성을 가진다고 보았다.

맺는 말

1) 다공성매질에서 음파의 흡수특성에 대하여 보다 정확히 해석하기 위하여 기체—고체결합진동을 고려한 다공성매질의 류체력학적모형을 제기하였다.

2) 저주파수구간에서 다공성매질에서의 음파의 흡수특성에 대하여 보다 간단하고 정확히 밝힐수 있는 이론적기초를 마련하였다.

참 고 문 헌

- [1] F. C. Sgard et al.; Journal of Sound and Vibration, 243, 4, 659, 2001.
[2] S. Cheinet et al.; Journal of the Acoustical Society of America, 132, 2198, 2012.

주체104(2015)년 6월 5일 원고접수

**The Study on the Absorption Characteristics of the Porous Media
by the Equivalent Fluid Model**

An Un Gyong, Ri Un Son

We suggested an equivalent fluid model of the porous media including a gas-structure coupled vibration to explain about the absorption characteristics of the sound wave more correctly.

We established the basis of the theory to explain about the absorption characteristics of porous media in the range of low frequency.

Key words: porous media, fluid model