

물과 공기 다공을 갖는 다공성 매질의 주파수 및 다공율 변화에 따른 음향특성

이강일*, 노희설**, 윤석왕***

성균관대학교 물리학과 음향학연구실, BK21 물리 연구단

Frequency- and Porosity-dependent Acoustic Characteristics of Porous Medium with Water- and Air-filled Pores

Kang Il Lee*, Heui-Seol Roh**, and Suk Wang Yoon***

Acoustics Research Laboratory and BK21 Physics Research Division,

Department of Physics, Sung Kyun Kwan University, Suwon 440-746, Republic of Korea

*acustica@mail.skku.ac.kr, **hroh@nature.skku.ac.kr, ***swyoon@skku.ac.kr

요약

수중에서 물과 공기 다공을 갖는 다공성 매질의 주파수 및 다공율 변화에 따른 음향특성을 고찰하였다. 다공성 매질로서 원통형 다공을 인위적으로 균일하게 배열한 판형 루사이트 (Lucite)를 사용하였다. 수중에서 음파를 다공성 매질의 원통형 다공의 축 방향과 평행하게 입사하였을 때, 빠른 파 (fast wave)는 다공 내의 매질에 영향을 받지 않으나, 느린 파 (slow wave) 및 원통형 다공을 전파하는 비평면 고차 정상 모드 파 (nonplanar higher normal mode wave)는 다공 내의 매질에 크게 영향을 받는다. 3 MHz부터 4 MHz까지의 주파수 영역에서 전체 파 (total wave), 빠른 파 및 느린 파의 음속 및 음압투과계수를 주파수 및 물과 공기 다공율 변화에 따라 측정하였다. 비강체 다공성 매질에서의 음파 전파특성에 대한 MBA (modified Biot-Attenborough) 모델의 이론 결과와 실험결과를 비교, 분석하였다.

1. 서론

기포를 함유한 다공성 매질의 음향특성에 대한 연구는 여러 목적으로 이미 오래 전부터 이루어져 왔으나 [1], 그 구조 및 현상의 복잡성으로 인하여 음파와 다공성 매질의 상호작용에 대한 기본적인 원리조차도 명확

히 이해되지 않고 있다. 최근에는 골다공증 음향진단 및 해저 퇴적층 음향탐사 등의 목적으로 구조적으로 보다 단순화된 다공성 매질의 음향특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [2, 3]. 본 연구에서는 수중에서 물과 공기 다공을 갖는 다공성 매질로서 원통형 다공을 인위적으로 균일하게 배열한 판형 루사이트 (Lucite)의 주파수 및 다공율 변화에 따른 음향특성을 이론 및 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험 방법

수중에서 물과 공기 다공을 갖는 다공성 매질의 음속 및 음압투과계수와 같은 음향특성을 주파수 및 물과 공기 다공율 변화에 따라 측정하였다. 본 연구에서 사용된 다공성 매질은 반경 2 mm의 원통형 다공을 인위적으로 균일하게 배열한 판형 루사이트이며, 그 크기는 100 mm × 100 mm × 30 mm이다. 이때 시료의 다공율은 각각 0, 0.056, 0.155, 0.304의 값을 갖도록 제작하였다.

다공성 매질의 음향특성을 측정하기 위하여 그림 1과 같이 수조 내에 동일한 중심주파수를 갖는 한 쌍의 음파변환기를 그 축이 일치하도록 위치시켰으며, 음파변환기 사이의 거리는 50 mm이다. 또한 음파를 다공성 매질의 원통형 다공의 축 방향과 평행하게 입사하기 위하여 시료를 원통형 다공의 축 방향이 음파변환기의 축

방향과 평행하도록 위치시켰다. 그림 1과 같이 직경 25.4 mm, 중심주파수 3.5 MHz (Panametrics V380)의 음파 변환기와 초음파 발신기-수신기 (Panametrics 5072PR)을 사용하여 펄스를 발신 및 수신하였으며, 수신된 신호는 디지털 오실로스코프 (LeCroy LT322)를 사용하여 분석하였다.

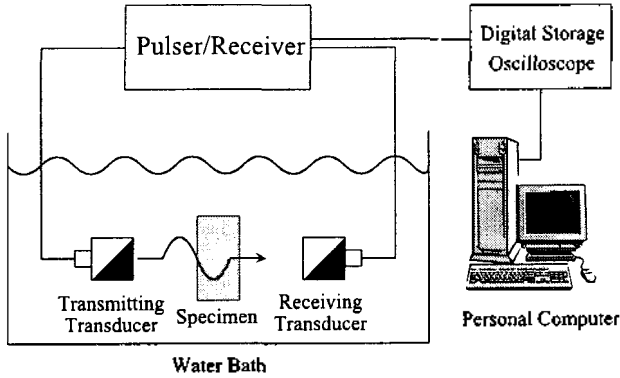


그림 1. 수중에서 다공성 매질의 음향특성을 측정하기 위한 실험장치도.

3. 결과 및 분석

3.1 파의 종류

수중에서 펄스를 다공성 매질의 원통형 다공의 축 방향과 평행하게 입사하였을 때, 빠른 파 (fast wave) 및 느린 파 (slow wave)뿐만 아니라 원통형 다공을 전파하는 비평면 고차 정상 모드 파 (nonplanar higher normal mode wave)가 구분되는 것을 확인하였다.

그림 2의 (a)는 중심주파수 3.5 MHz의 펄스가 각각 다공율 0, 0.056, 0.155, 0.304의 물 다공을 갖는 시료를 투과한 신호이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 가장 먼저 수신된 신호는 시료의 다공을 제외한 루사이트만을 투과한 것으로서 빠른 파이며, 빠른 파 이후에 수신된 신호들은 물 다공을 투과한 것으로서 비평면 고차 정상 모드 파와 느린 파로 구분될 수 있다. 빠른 파와 느린 파의 구분은 루사이트 (2650 m/s)와 물 (1481 m/s)에서의 음속에 기인하며, 비평면 고차 정상 모드 파의 존재는 시료의 원통형 다공이 원통형 도파관의 역할을 하는 것으로 설명될 수 있다 [3].

그림 2의 (b)는 중심주파수 3.5 MHz의 펄스가 각각 다공율 0, 0.056, 0.155, 0.304의 공기 다공을 갖는 시료를 투과한 신호이며, (c)는 물과 공기 다공을 동시에 갖는 전체 다공율 0.304의 시료를 투과한 신호이다. 수중에서 음파가 공기 다공만을 갖는 시료를 투과하는 경우에는 물 다공을 갖는 시료를 투과한 신호에서 관측할 수 있

는 느린 파의 음속에 비하여 매우 작은 음속을 갖는 느린 파의 존재를 예측할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 수중에서 공기 다공을 투과한 느린 파는 물과 공기의 임피던스차로 인하여 매우 작은 진폭을 가지므로 관측되지 않았다.

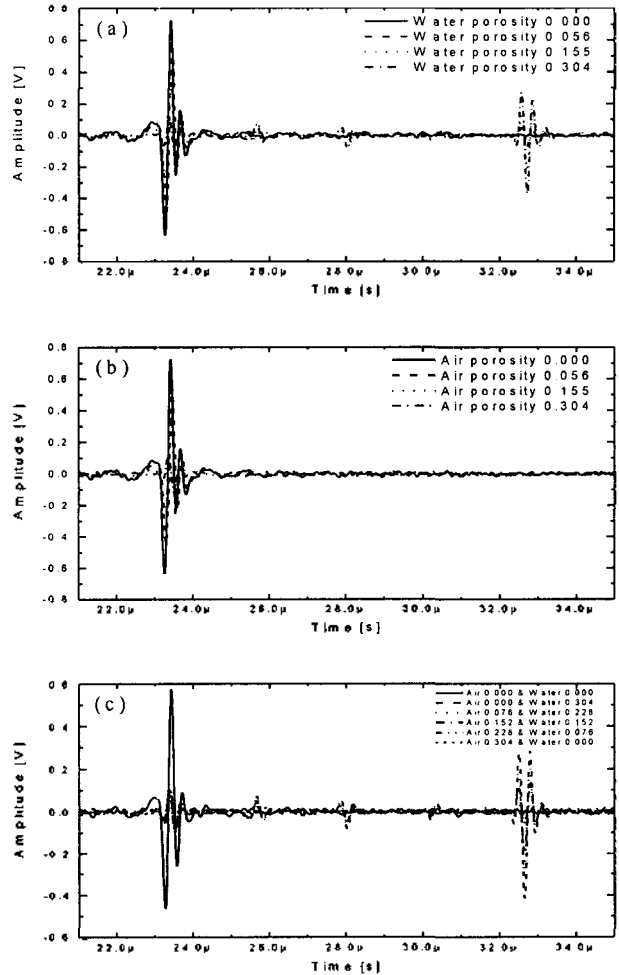


그림 2. 중심주파수 3.5 MHz의 펄스가 (a) 다공율 0, 0.056, 0.155, 0.304의 물 다공을 갖는 시료를 투과한 신호; (b) 다공율 0, 0.056, 0.155, 0.304의 공기 다공을 갖는 시료를 투과한 신호; (c) 물과 공기 다공을 동시에 갖는 전체 다공율 0.304의 시료를 투과한 신호.

3.2 음속

수중에서 물과 공기 다공을 갖는 다공성 매질의 음속을 측정하기 위하여 펄스가 시료 없이 물만을 투과하였을 때 수신된 신호와 다공율 0, 0.056, 0.155, 0.304의 시료를 투과하였을 때 수신된 신호에서 구분되는 빠른 파 및 느린 파의 도달 시간차를 이용하였다. 또한 음속에

대한 실험결과를 비강체 다공성 매질에서의 음파 전파 특성에 대한 MBA (modified Biot-Attenborough) 모델 [2]로부터 얻을 수 있는 이론결과와 비교하였다.

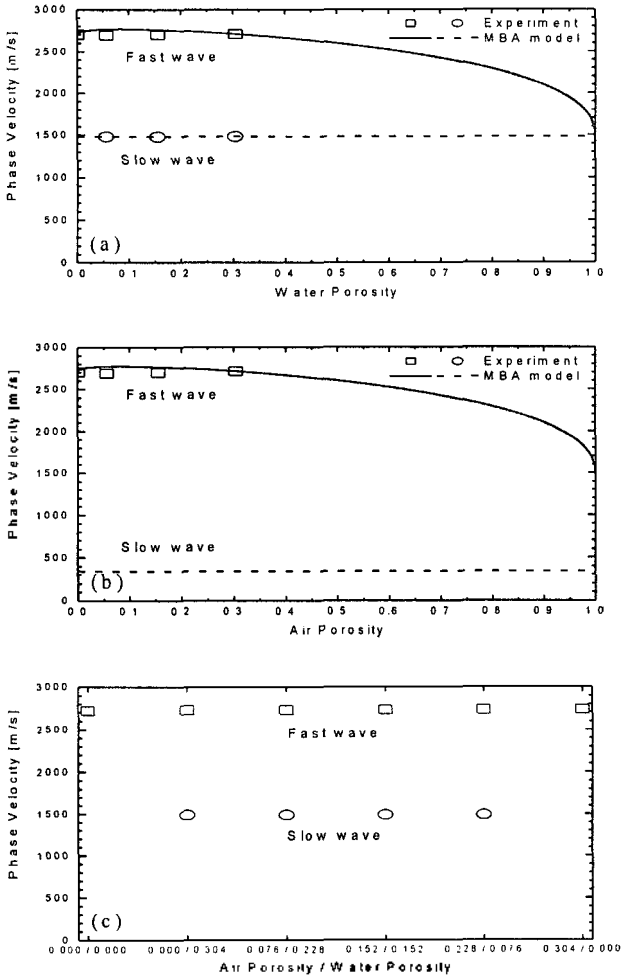


그림 3. 주파수 3.5 MHz에서 빠른 파 및 느린 파의 (a) 물 다공율 함수에 대한 음속; (b) 공기 다공율 함수에 대한 음속; (c) 공기/물 다공율 함수에 대한 음속.

그림 3의 (a), (b)와 (c)는 각각 주파수 3.5 MHz에서 빠른 파 및 느린 파의 물과 공기 다공율 함수에 대한 음속 및 공기/물 다공율 함수에 대한 음속을 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 빠른 파의 음속은 물과 공기 다공율이 작은 영역에서는 거의 일정하며, 다공율이 큰 영역에서는 다공율이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 반면 느린 파의 음속은 물과 공기 다공율 변화에 거의 의존하지 않음을 알 수 있다. 수중에서 공기 다공율 투과한 느린 파는 물과 공기의 임피던스차로 인하여 관측되지 않았으므로 느린 파의 공기 다공율 함수에 대한 음속은 MBA 모델의 이론결과만을 나타내었다.

3.3 음압투과계수

그림 4와 5에 음압투과계수에 대한 실험결과를 MBA 모델에 의한 이론결과와 비교하여 나타내었다. 그림 4의 (a), (b)와 (c)는 각각 주파수 3.5 MHz에서 전체 파, 빠른 파, 느린 파 및 전체 파의 물과 공기 다공율 함수에 대한 투과계수 및 공기/물 다공율 함수에 대한 투과계수를 나타낸 것이다.

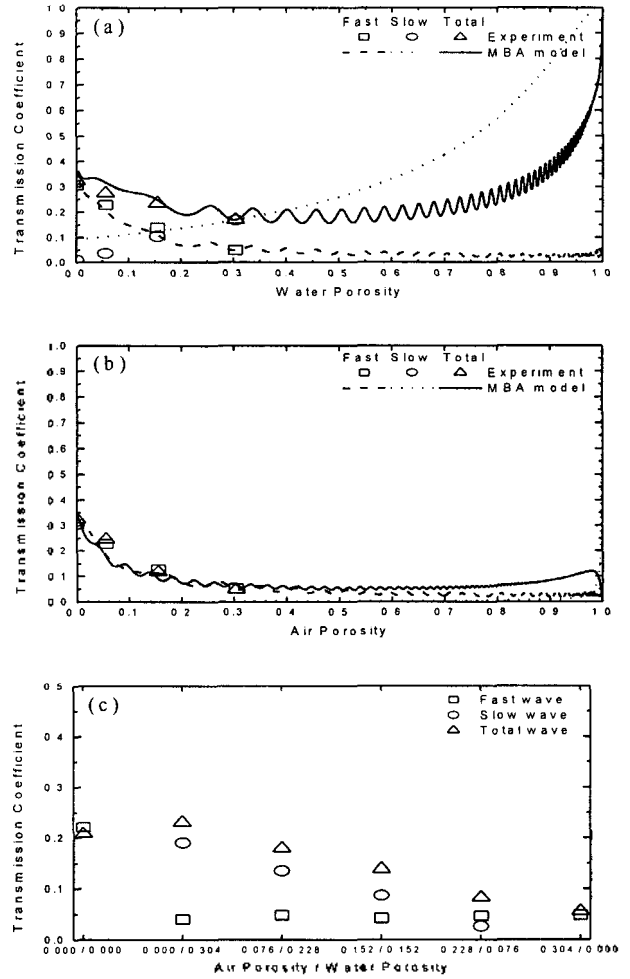


그림 4. 주파수 3.5 MHz에서 빠른 파, 느린 파 및 전체 파의 (a) 물 다공율 함수에 대한 투과계수; (b) 공기 다공율 함수에 대한 투과계수; (c) 공기/물 다공율 함수에 대한 투과계수.

그림 4의 (a)로부터 물 다공율이 증가함에 따라 빠른 파의 투과계수는 감소하는 반면에 느린 파의 투과계수는 증가함을 알 수 있다. 또한 전체 파의 투과계수로부터 물 다공율이 작은 값을 갖는 영역에서는 빠른 파의 영향이 지배적이며, 물 다공율이 큰 값을 갖는 영역에서는 느린 파의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 이로부터 물 다공율 변화에 따른 전체 파의 투과계수 변화를

설명할 수 있다. 즉, 물 다공율이 작은 값을 갖는 영역에서는 물 다공율이 증가함에 따라 다공성 매질의 유효 임피던스 (effective impedance)가 증가하는 반면, 물 다공율이 큰 값을 갖는 영역에서는 물 다공율이 증가함에 따라 유효 임피던스가 감소한다.

또한 그림 4의 (b)로부터 공기 다공율 변화에 따른 빠른 파의 투과계수는 물 다공율 변화에 따른 빠른 파의 투과계수와 거의 동일함을 알 수 있으며, 공기 다공율 변화에 따른 느린 파의 투과계수는 거의 0으로서 공기 다공율 변화에 의존하지 않음을 알 수 있다.

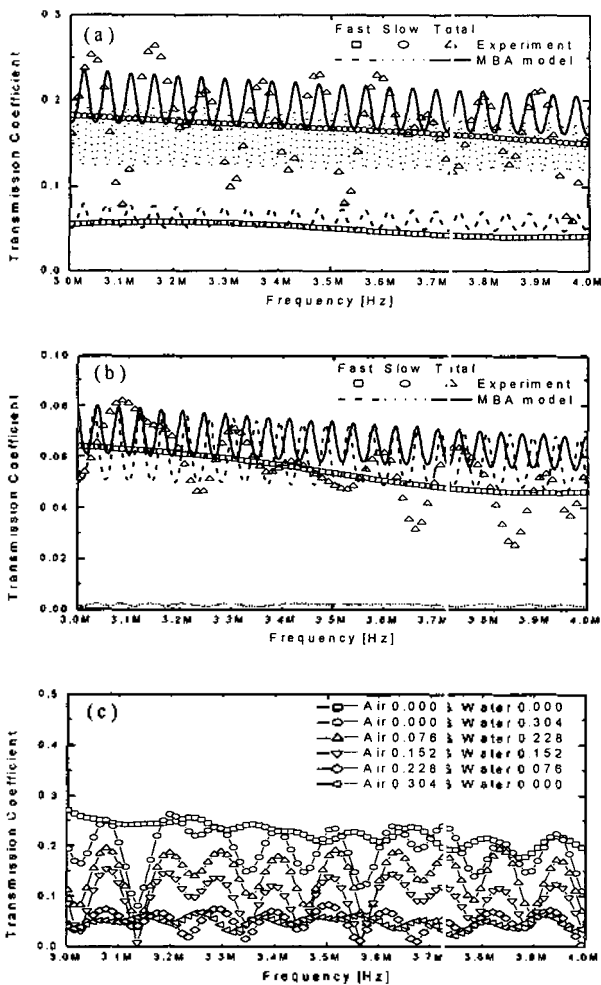


그림 5. 주파수 함수에 대한 (a) 빠른 파, 느린 파 및 전체 파의 물 다공율 0.304에서의 투과계수; (b) 공기 다공율 0.304에서의 투과계수; (c) 전체 파의 전체 다공율 0.304에서의 투과계수.

그림 5의 (a), (b)와 (c)는 각각 주파수 함수에 대한 빠른 파, 느린 파 및 전체 파의 물 다공율 0.304와 공기 다공율 0.304에서의 투과계수 및 전체 파의 전체 다공율 0.304에서의 투과계수를 나타낸 것이다. 이 그림들에

서 볼 수 있듯이 다공을 제외한 루사이트만을 투과하는 빠른 파는 다공 내의 매질에 영향을 받지 않으나, 다공을 투과하는 느린 파는 다공 내의 매질에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4. 결론

수중에서 물과 공기 다공을 갖는 다공성 매질로서 원통형 다공을 인위적으로 균일하게 배열한 관형 루사이트의 주파수 및 다공율 변화에 따른 음속 및 음압투과계수를 실험적으로 측정하였으며, MBA 모델의 이론결과와 비교, 분석하였다.

빠른 파의 음속은 물과 공기 다공율이 작은 영역에서는 거의 일정하며, 다공율이 큰 영역에서는 다공율이 증가함에 따라 감소한다. 반면 느린 파의 음속은 물과 공기 다공율 변화에 거의 의존하지 않는다. 물 다공율이 증가함에 따라 빠른 파의 투과계수는 감소하는 반면에 느린 파의 투과계수는 증가한다. 공기 다공율 변화에 따른 빠른 파의 투과계수는 물 다공율 변화에 따른 빠른 파의 투과계수와 거의 동일하며, 공기 다공율 변화에 따른 느린 파의 투과계수는 거의 0으로서 공기 다공율 변화에 의존하지 않는다. 다공을 제외한 루사이트만을 투과하는 빠른 파는 다공 내의 매질에 영향을 받지 않으나, 다공을 투과하는 느린 파는 다공 내의 매질에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 BK21 사업 및 한국학술진흥재단 (KRF-2000-015-DP0178)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] A. L. Anderson and L. D. Hampton, "Acoustics of gas-bearing sediments. I. Background," *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, 1865-1889, 1980; A. L. Anderson and L. D. Hampton, "Acoustics of gas-bearing sediments. II. Measurements and Models," *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, 1890-1903, 1980.
- [2] H. S. Roh and S. W. Yoon, "Acoustic diagnosis for porous medium with circular cylindrical pores," *J. Acoust. Soc. Kor.* **20**(1s), 415-418, 2001.
- [3] K. I. Lee, H. S. Roh, and S. W. Yoon, "Frequency- and porosity-dependent acoustic characteristics of porous medium with circular cylindrical pores," *J. Acoust. Soc. Kor.* **20**(1s), 419-422, 2001.