

원통형 다공을 갖는 판형 루사이트의 음향 특성

백 재 윤 , 노 희 설 , 윤 석 왕

성균관대학교 물리학과 음향학연구소

Acoustic Characteristics of Lucite Slab with Circular Cylindrical Pores

Jae Yoon Baik , Heui-Seol Roh , Suk Wang Yoon

Acoustics Research Laboratory, Department of Physics, SungKyunKwan University

cla100@nature.skku.ac.kr

요 약

임의의 매질에서 음파의 전파는 매질의 고유물성 및 구조적 특성에 영향을 받게 된다. 본 연구는 의공학에서 관심을 가지는 골다공증 진단의 기초 물리적 음향 특성을 이해함에 목적을 두고 있다. 따라서 구조적 특성의 중요한 요소인 매질의 다공성에 초점을 두고 있으며, 비강체의 다공성 물질로써 루사이트 판에 원통 형태의 관을 균일하게 배열시켰고 이 관들의 배열을 다공성 구조로 간주하였다. 다공도는 본 연구에서 의미있는 범위, 약 0%~30%에 제한하였으며, 다공도에 따른 음향 특성 변화를 관찰하기 위하여 다공도의 차이를 두었고, 관의 직경에 따른 음향 특성 변화를 관찰하기 위하여 같은 다공도와 두 종류의 관의 크기를 갖는 다공성 루사이트를 제작하였다. 실험은 수중에서 음파의 입사각에 대한 의존도를 배제하기 위하여 수직 입사에 대하여 수행하였고 사용된 주파수는 880kHz이다. 다공도 및 관의 크기의 변화에 따른 음파의 투과 계수의 변화를 관측하여 다공도 및 관의 크기의 변화에 따른 음향 특성 변화의 상관 관계를 고찰함으로써 골다공증 진단에의 응용 가능성을 연구하였다.

1. 서론

최근 임의의 매질을 통과한 음파의 특성 연구를 통하여 그 매질의 정보를 얻는데 많은 관심을 가지고 있다. 매질의 특성으로는 매질의 음속 변화, 밀도, 음향 특성 임피던스 그리고, 구조적 특성을 들 수 있다. 균질한 매질에서는 밀도와 음속을 통한 음향 특성 임피던스가 중

요한 변수로 알려져 있으나, 실제의 매질은 일반적으로 복잡한 구조를 가지고 있으므로 구조적 음향 특성 연구가 필요하다.

현재 의공학에서 관심을 가지고 있는 분야로 골다공 진단을 들 수 있다[1,2]. 다공이란 구조적 골격이 영성하게 배치되어 있는 것을 의미하며, 중상의 정도는 다공도와 골격의 밀도로써 평가된다. 현재까지 구조적 문제에 대하여 많은 연구를 해 온 것으로 알려져 있으나 그 복잡성에 의하여 명확한 이해는 아직 이뤄지지 않고 있다. 본 연구의 목적은 구조적 문제, 즉 다공도 및 관의 크기에 따른 음향 특성 변화를 관찰하고 이에 따른 골다공 진단의 기초적 이해를 얻고자 하는데 있다.

II. 이론

(그림1)과 같이 매질 I과 매질 II, 그리고 매질 III의 세 매질로 이루어진 조건에서 음파 투과계수를 구하고자 한다 [3]. 매질 I에서 II로 평면음파가 수직하게 x 축 방향으로 입사된다면 입사된 음파는

$$p_i = P_i e^{j(\omega t - k_1 x)}$$

이고, 이 음파가 매질 I과 II의 경계면에 부딪혔을 때, 생기는 반사파는

$$p_r = P_r e^{j(\omega t + k_1 x)},$$

그리고 매질 II로 투과된 파, 매질 III의 경계면에서 반사된 파, 매질 III로 투과된 파는 각각

$$p_a = A e^{j(\omega t - k_2 x)},$$

$$p_b = B e^{j(\omega t + k_2 x)}$$

$$p_i = P_i e^{j(\omega t - k_3 x)}$$

이다. 여기서, $k_1 = \omega/c_1$, $k_2 = \omega/c_2$, $k_3 = \omega/c_3$ 이며, c_1 , c_2 , c_3 는 매질I, 매질II, 매질III에서의 음속이다.

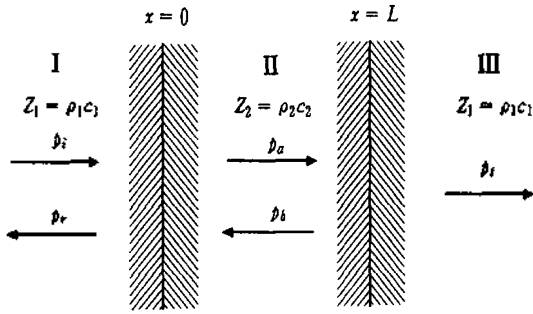


그림 1. 세 매질의 경계면에 수직으로 입사된 음파의 반사와 투과.

두 개의 매질에서와 같이 $x=0$ 에서의 경계조건을 적용하면,

$$\frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = \frac{Z_2}{Z_1} \frac{A+B}{A-B}$$

이며 Z_1, Z_2, Z_3 는 매질 I, II, III에서의 특성 임피던스를 가르킨다. 유사하게 $x=L$ 에서

$$\frac{Ae^{-jk_2L} + Be^{jk_2L}}{Ae^{-jk_2L} - Be^{jk_2L}} = \frac{Z_3}{Z_2}$$

이다. 따라서 음압 투과계수 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{2}{(1 + \frac{Z_1}{Z_3})\cos k_2L + j(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2})\sin k_2L}$$

매질 I과 매질 III이 같은 매질인 경우, $Z_1 = Z_3$ 이므로 투과계수는

$$T = \frac{2}{2\cos k_2L + j(\frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2})\sin k_2L} \quad \text{--- ①}$$

으로 주어진다.

III. 실험

실험은 단순화된 다공성 매질의 시료를 제작하여 수행하였다. 사용된 매질로는 앞으로 이루어질 뼈의 적용을 고려하여 제작의 용이성과 비교적 비슷한 음향 임피던스를 가지는 루사이트를 사용하였다. (표1)은 루사이트와 돼지 뼈의 음향 특성을 나타낸다. 다공의 관은 기초

표 1. 뼈와 시료의 음향 특성.

음향특성 \ 종류	루사이트	뼈(돼지)
밀 도 (kg/m^3)	1220	2230
음 속 (m/s)	2228	2895
특성임피던스 ($10^6 rayls$)	2.72	6.46

적 이해를 위하여 단순화된 구조로서 대칭구조를 갖는 원통형으로 제작하였으며, 그 원통형 관의 반경 및 개수에 따라 다공도의 여러 종류를 제작하였다. 다공도는 0%, 5.6%, 9.9%, 15.5%, 22.3% 그리고 30.4%를 가지는 6가지로 제작하였고, 관의 크기는 1mm 와 2mm 두 종류를 선택했으며, 각각의 크기는 같은 다공도를 가지도록 제작하였다. 루사이트의 전체 크기는 $100 \times 100mm$ 이며 그 두께는 4.7mm이다. (그림2)는 제작된 시료의 모형도이다.

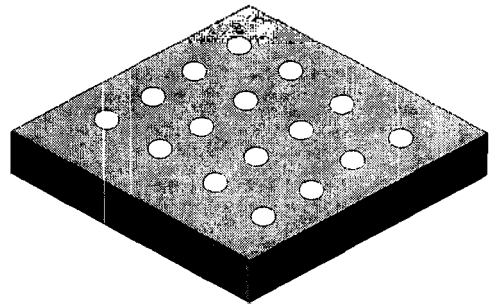
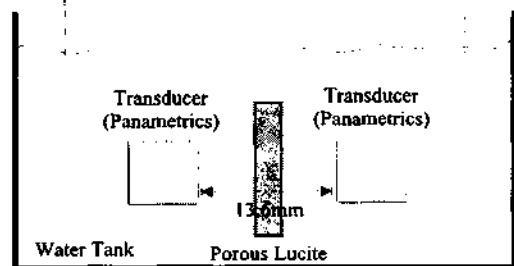


그림 2. 원통형 다공을 갖는 판형 루사이트.

실험은 음파의 효율적 전파를 위하여 수중에서 수행하였다. 사용된 음파 발생기 및 수신기는 880kHz부근에서 공진을 가지며, 평면파를 발생시켰다. 그리고, 펄스 파형 발생 모드가 동일한 것으로 사용하였다. 입사파로는 투과파의 신호 분석을 위하여 반파장을 가지는 펄스를, 입력전압은 Function Generator를 통하여 10V를 입력시



Function Generator (HP3314A) Oscilloscope (LeCroy LT322) Pre-Amplifier (Panametrics)

그림 3. 음향 특성 측정을 위한 수조 실험 장치도.

켰다. (그림3)과 같이 음파 발생기와 수신기의 거리는 13.6mm이며 원통형 다공성 매질인 루사이트를 그 가운데 음파의 각에 따른 기여도를 배제하기 위하여 수직 입사 조건하에 위치시켰다. 투과율은 입사 음압과 매질을 통하여 나온 투과 음압의 비율로 정의된다. 따라서 입사 음압은 실험실의 같은 조건하에 다공성 루사이트가 없을 때 수신된 신호를 의미한다. 연속파의 진폭은 시간에 따라 일정한 진폭을 가지고 있는 반면, 반파장의 펄스는 시간에 따른 진폭을 명확히 구분하기에 어려움이 있어 주파수분석을 통해 입사 주파수에서의 진폭값을 데이터로 얻었다. 수신된 신호는 Pre-Amplifier를 통하여 14dB 증폭을 시켰다.

IV. 결과분석

(그림4), (그림5)와 (그림6)은 각각 관의 반경이 1mm, 부분확대 그리고 2mm에 대한 880kHz에서 다공도에 따른 투과 음파의 시간 함수로서의 파형이다.

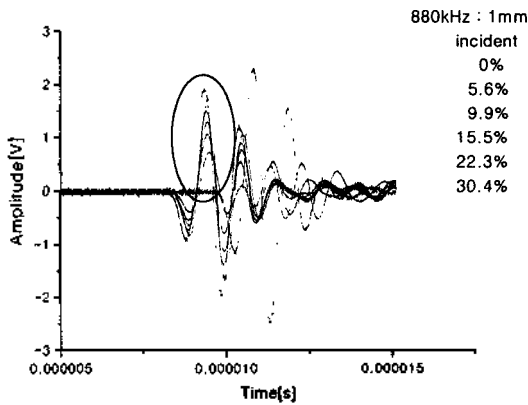


그림 4. 반경 1mm크기 관의 다공도에 따른 투과 음파.

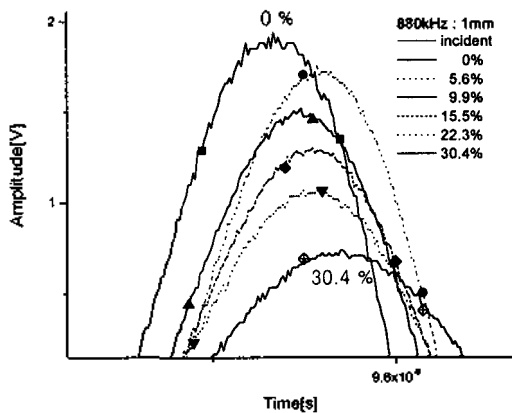


그림 5. (그림4)의 타워 부분을 확대한 그림.

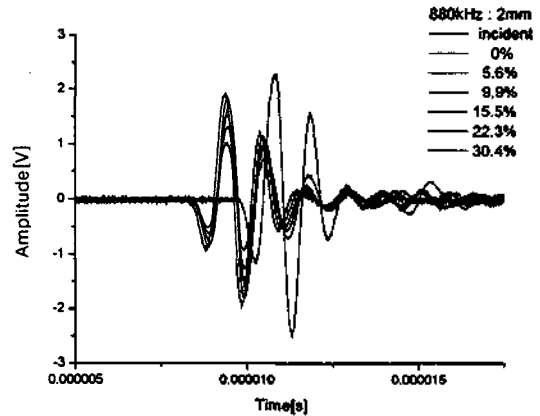


그림 6. 반경 2mm크기 관의 다공도에 따른 투과 음파.

이 파들은 각각 Function Generator로부터 시간지연을 보기 위하여 동기화 시킨 것으로 실선의 파는 루사이트 매질이 없는 순수 물을 통해 진행한 음파이며 이를 제외한 파들은 다공도에 따른 루사이트 매질을 통과한 후의 음파이다. 물만을 통과한 입사파는 다공성 루사이트 매질을 통과한 파에 비하여 약 $2.4 \mu\text{sec}$ 정도 뒤에 나올 수 있다. 이는 루사이트 매질 통과시의 음속이 물 통과시의 음속보다 빠름을 의미하며, 따라서 다공도의 증가에 따라 시간지연이 일어남을 알 수 있다.

(표1)과 같이 물의 음속은 20°C 에서 약 1490m/s 를 가지며 순수 루사이트의 음속은 약 2300m/s 를 가진다. 이 시간차에 의한 거리를 대략적으로 계산하면 물을 통과하면 약 3.7mm , 루사이트 매질을 통과하면 약 5mm 를 의미한다. 따라서 사용된 루사이트 시료의 두께가 약 5mm 인 점을 고려하면 시간지연의 효과는 물과 루사이트 각각의 매질을 통한 음속 차이(약 800m/s)에 의한 것으로 볼 수 있다. 그리고 파형에서 1차신호와 2차신호로 대략 구분될 수 있다. 1차신호는 루사이트를 통한 것이고, 2차신호는 원통형 관 내의 물을 통한 것으로 위에 언급한 음속 차에 의한 시간지연에 의하여 구분하였다. 다공도에 따른 음압 차이를 보기 위하여 투과율은 1차신호, 2차신호 그리고 1차와 2차 전체를 포함한 전체신호 3가지의 경우로 나누어 주파수 분석(FFT)을 통하여 얻었다. (그림7)과 (그림8)에 의하면 다공도가 커짐에 따라 1차신호는 감소, 2차신호는 증가함을 볼 수 있다. 원통형 관의 반경에 대한 의존도를 보면 전체신호와 1차신호의 투과율은 2mm 에 비하여 1mm 의 다공도에 따른 투과율 곡선의 기울기가 약 1.5배 크게 감소하는 반면, 관을 통한 2차신호의 투과율은 약 3배로 증가함을 볼 수 있다. 이는 다공도가 증가함에 따라 투과

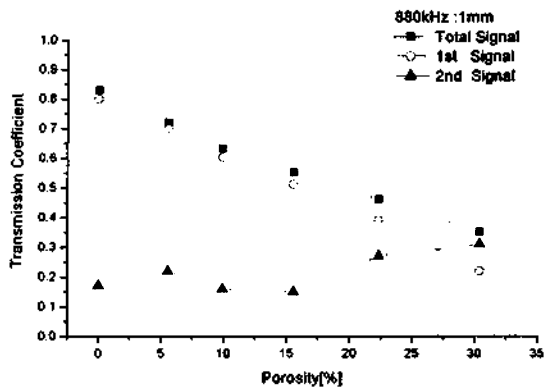


그림 7. 반경 1mm크기 관의 다공도에 따른 1차신호, 2차신호, 전체신호의 투과율.

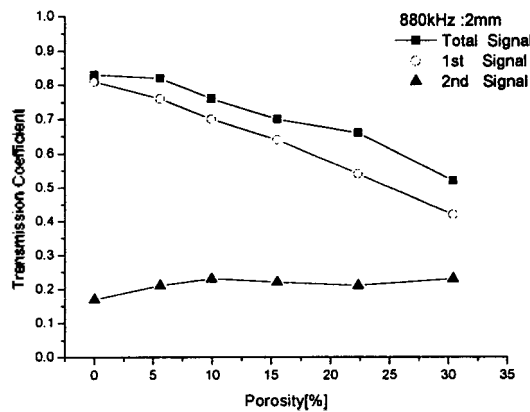


그림 8. 반경 2mm크기 관의 다공도에 따른 1차신호, 2차신호, 전체신호의 투과율.

음파는 루사이트 매질의 영향에서 물의 영향으로 점진적으로 이동함을 알 수 있다. 공극률에 따른 루사이트와 물의 함유율로써 다공성 루사이트 매질의 전체 밀도로 고려해 볼 때 다공성 루사이트 매질에서의 투과계수는 다공도의 증가에 따라 0.8에서 순수 물의 밀도와 가까워지는 투과율 1까지 점차적으로 증가할 것으로 생각하나 이는 단순한 추측임이 증명된다. 실제로 다공도 0%~30% 부분에서 전체 투과계수는 감소하는 추세를 보여준다. 이는 다공도의 증가시 순수 루사이트의 감소에도 불구하고 음향 특성 임피던스가 증가함을 보여준다. 따라서 다공성 매질을 통한 음파의 투과계수는 식 ①과 같이 균질한 매질을 통한 음파의 투과계수와 같이 분석할 수 없음을 알 수 있으며 식 ①은 (그림 7)과 (그림 8)에서 다공도가 0%인 순수 루사이트의 경우에만 유용한 식이다. 이에 따라 강체가 아닌 매질에서 다공도와 관의 크기를 반영하는 음향 특성에 대한 연구의 필요성

이 제기된다고 하겠다. 특히 다공성 강체에서의 음파 전달은 본 연구의 확장에 이용될 수 있으리라 본다 [4,5].

V. 결론

본 연구에서는 비강체 매질을 통한 음향 특성을 매질의 구조적 특성과 관련지어 살펴보았다. 균질한 매질과 달리 원통형 다공성 루사이트 매질을 통한 투과 음파에서는 루사이트를 통한 1차신호와 관 내의 물을 통한 2차신호로 구분됨을 보았으며, 다공도가 증가함에 따라 2차신호가 증가함을 알았다. 그리고 다공도에 따라 전체 투과손실은 증가함을 보았으며 관의 크기가 커짐에 따라 1차신호의 감쇠는 서서히 증가하는 반면, 2차신호의 증가도는 커짐을 알았다. 따라서 투과에 따른 음향 특성은 매질의 고유물성은 물론이고 구조적 특성 변화에 많은 영향을 받으며, 실제 골 다공도 측정에 있어서 다공도 및 관의 크기에 따른 음향 특성 변화를 통하여 골다공증의 물리적 및 구조적 상태에 대한 예측 가능성을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 교육부 BK-21프로그램과 2000 한국학술진흥재단 기초과학연구지원사업(DP0178)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] C. M. Langton, S. B. Palmer, and R. W. Porter, "The measurement of broadband ultrasonic attenuation in cancellous bone," *Eng. Med.*, **13**, 89-91 (1984).
- [2] K. Wear, "Frequency dependence of ultrasonic backscatter from human trabecular bone: Theory and experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, **106**, 3659-3664 (1999) and references therein.
- [3] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, "Fundamentals of acoustics," Chap 6, 124-130 (Third edition).
- [4] K. Attenborough, "Acoustic characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 785-799 (1983).
- [5] H. S. Roh, W. P. Arnott, J. M. Sabatier, and R. Raspet, "Measurement and calculation of acoustic propagation constants in arrays of small air-filled rectangular tubes," *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 2617-2624 (1991).