

수중 원통형 다공성 모래퇴적물의 음향특성

Acoustic Characteristics of Sand Sediment with Circular Cylindrical Pores in Water

이 용 주*, 노 희 설*, 윤 석 왕*
(Yong-Joo Lee*, Heui-Seol Roh*, Suk-Wang Yoon*)

*성균관대학교 물리학과 음향학연구실, BK21 물리 연구단
(접수일자: 2001년 8월 9일; 수정일자: 2002년 1월 8일; 채택일자: 2002년 1월 23일)

수중퇴적물의 투과음향특성을 실험실 조건에서 고찰하였다. 물로 포화된 입자지름 0.5 mm 이하의 모래퇴적물을 (재질의 두께가 1 mm이고 부피가 100 mm×100 mm×42 mm인 아크릴상자 안에) 형성시켜 수중 모래퇴적물 시료를 제작하였다. 수중 모래퇴적물 시료의 다공율을 조절할 수 있도록 퇴적물 내부에 내경 3 mm, 길이 42 mm인 원통형 관들을 이용하여 물로 채워진 관을 위치시켜서, 원통다공율이 각각 0%, 5%, 11%, 18%, 26%인 다섯 개의 수중 모래퇴적물 시료를 만들었다. 수중 모래퇴적물 시료의 음향특성을 다공율과 0.3 MHz에서 4 MHz의 구간에서 주파수의 함수로 분석하였다. 수중 모래퇴적물 시료를 투과한 음향신호는 시료 전체로부터 나온 첫번째파 (first-kind wave)와 관을 통하여 나온 두번째파 (second-kind wave)를 구분하여 관측하였다. 중심주파수 1 MHz에서는 첫번째파가 지배적이었으나 중심주파수 2.25 MHz에서는 두번째파가 지배적이었다. 첫번째파의 경우, 다공율이 증가되면 음압투과계수는 작아지고 음속은 물의 음속에 가깝게 낮아지며, 주파수가 증가되면 투과계수는 점차 작아지나 음속의 변화는 없었다. 두번째파의 경우, 다공율이 커지면 투과계수가 커지고 음속은 변화가 없었으며, 주파수가 증가되어도 투과계수와 음속의 변화는 없었다.

핵심용어: 퇴적물 음향특성, 첫번째파, 두번째파, 원통형관, 다공율, 음속, 투과계수

부고분야: 수중음향 분야 (5.3)

Acoustic characteristics of water sediment were experimentally studied in laboratory. Water saturated sand sediment less than the grain size of 0.5 mm diameter is uniformly distributed in an acryl box (100 mm×100 mm×42 mm) with material thickness 1 mm. Pores in the acryl box are modeled as the structure of cylindrical pore tubes (diameter 3 mm and length 42 mm) filled with water. Cylindrical pore tubes have porosities 0%, 5%, 11%, 18% and 26% controlled by the tube numbers. Transmitted acoustic waves through sand sediment specimen are analyzed as the functions of porosity and frequency from 0.3 MHz to 4 MHz. Transmitted acoustic waves are mixed with the first-kind wave from whole specimen and the second-kind wave from cylindrical pore tubes. For the center frequency 1 MHz, the first kind wave is dominant but for the center frequency 2.25 MHz, the second kind wave is dominant. In the case of the first-kind wave, as the porosity increases, the transmission coefficient decreases and the sound speed decreases to the sound speed of water. As the frequency increases, the transmission coefficient decreases but the sound speed is almost constant. In the case of the second-kind wave, as the porosity increases, the transmission coefficient increases but the sound speed is almost constant. The transmission coefficient and the sound speed are almost constant as a function of frequency.

Keywords: Sediment acoustic characteristics, First-kind wave, Second-kind wave, Circular cylindrical pore tubes, Porosity, Sound speed, Transmission coefficient

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.3)

I. 서론

현대 산업의 근간이 되는 에너지원인 천연가스와 석유는 지상보다 해저퇴적층에 더 많이 매장되어 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 현실적으로 해저퇴적층을 모두 파헤쳐 탐사할 수 없으므로 해저의 천연자원탐사에 어려움이 있다. 이와 같은 자원탐사를 용이하게 하는 방법으로 비침습적인 음향탐사법이 있다. 퇴적층의 탐사는 지질학적으로는 퇴적층의 내부구조를 파악함으로써 해저유전의 존재가능성을 진단하는데 그 의미가 있으며, 퇴적층의 음향학적 성질을 이용한다면 해저퇴적층을 탐사하는데 매우 큰 도움을 줄 수 있다. 음파는 임의의 매질을 전파하는 중에 음향특성임피던스가 다른 매질을 만나면 일부는 투과 또는 반사하게 된다. 수중에서 퇴적층에 입사된 음파는 퇴적층의 표면으로부터 많은 반사가 일어나며, 일부 투과된 음파는 퇴적물의 정보를 가지고 반사된다. 천연가스, 석유 등의 음향특성임피던스와 그들을 둘러싼 퇴적물의 음향특성임피던스에 대한 정보를 활용하면 퇴적층 안의 자원탐사가 보다 효율적으로 이루어질 것이다.

해저퇴적층은 여러 가지의 퇴적물로 이루어져 있으며 그 퇴적물 내부에 미생물 및 기포 등의 이물질이 존재하기 때문에 여러 매질이 복합적으로 섞여있는 퇴적층에서 반사된 신호를 분석하는 것은 쉽지 않다[1]. 따라서 이물질이 없는 순수한 수중퇴적물에서 음파의 전달에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이러한 목적으로 이미 오래 전부터 퇴적물의 밀도, 다공율 등의 물리적인 성질과 음속, 음향임피던스, 감쇠계수 등의 음향학적인 성질의 상관관계를 밝히려는 노력이 수행되어 왔다[2-4]. 또한 해저퇴적물과 같은 복잡한 구조의 다공성 매질에 대한 실험 및 이론적인 음향특성에 대한 연구가 계속되고 있으나[5-8], 그 구조 및 성질의 복잡성 때문에 여전히 이해가 부족하

다. 복잡한 퇴적물의 이해를 위해서는 보다 단순화된 구조의 퇴적물에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 다공율의 변화에 따른 수중퇴적물의 음향특성을 실험실 조건에서 살펴보기 위하여, 지름 0.5 mm 이하의 입자크기분포로 구성된 퇴적물 내부에 원통형의 다공을 인위적으로 배열한 수중퇴적물의 음향특성을 실험적으로 고찰하였다.

II. 실험 및 결과

2.1. 수중 원통형 다공성 퇴적물상자 시료의 제작

(1) 퇴적물의 물리적 특성

실험에 사용된 퇴적물은 직경이 0.5 mm 이하의 입자크기로 이루어진 중간입자의 모래 (medium-size grain sand) [2]로서, 구멍의 크기가 0.500 mm, 0.354 mm, 0.250 mm 인 세 가지 체를 이용하여 측정된 입자크기 분포도는 표 1과 같다. 퇴적물 시료의 주 구성성분은 입자크기 0.5 mm 에서 0.25 mm 사이인 퇴적물입자가 전체의 96% 이상을 차지하고 있다.

시료로 사용된 퇴적물의 밀도는 다음과 같다. 습윤전밀도 (wet bulk density)는 1900 kg/m³, 건조전밀도 (dry bulk density)는 1544 kg/m³, 입자밀도 (grain density)는 2616 kg/m³으로 측정되었고, 물로 포화된 퇴적물의 다공

표 1. 퇴적물시료 모래의 입자 크기의 분포도
Table 1. Distribution of sand sediment grain size.

입자크기(mm)	분포도(%)
0.500 - 0.354	78.2
0.354 - 0.250	18.5
0.250 - 0.063	3.3

표 2. Hamilton의 모래퇴적물의 입자크기에 따른 밀도와 다공율[2]

Table 2. Density and porosity from the variation of sand sediment grain size by Hamilton[2].

모래종류	퇴적물 입자의 지름(mm)	입자밀도(kg/m ³)	습윤전밀도(kg/m ³)	다공율(%)
fine sand	0.21	2650	1910	45.7
medium sand	0.30	2680	2000	40.9
coarse sand	0.64	2740	2080	38.3

율은 43.4 %로 측정되었다. 여기서 퇴적물의 습윤전밀도와 물로 포화된 퇴적물의 다공율은 다음과 같이 정의되었다.

$$\text{퇴적물의 습윤전밀도}(kg/m^3) =$$

$$\frac{\text{퇴적물상자안에 물로 포화된 퇴적물입자들의 질량}}{\text{퇴적물상자안에 물로 포화된 퇴적물입자들의 부피}}$$

$$\text{퇴적물의 다공율}(\%) =$$

$$\frac{\text{물로 포화된 퇴적물의 전체부피} - \text{퇴적물입자들의 전체부피}}{\text{물로 포화된 퇴적물의 전체부피}}$$

× 100

본 연구에서 사용된 퇴적물의 입자크기에 따른 밀도와 다공율은 Hamilton[2]에 의한 퇴적물의 입자크기에 따른 밀도와 다공율에 대한 결과(표 2)와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

(2) 원통형 관을 가진 퇴적물상자의 제작

일반적으로 퇴적물의 다공율 변화는 퇴적물입자크기에 따라 변화하므로, 다공율과 입자크기의 두 함수로 주어진다. 본 연구에서는 퇴적물을 다공율의 함수로만 고려하기 위해, 그림 1과 같이 원통형 관을 삽입한 퇴적물상자를 제작하여, 퇴적물입자크기를 일정하게 유지하며, 원통형 관을 이용하여 퇴적물의 다공율을 변화시켰다.

재질의 두께가 1 mm인 아크릴을 이용하여 100 mm × 100 mm × 42 mm 크기의 직사각형상자를 제작하였고, 퇴적물 투입을 위하여 윗면을 개방하였다. 재질의 두께가 0.15 mm이고, 길이 42 mm, 직경 3 mm인 플라스틱 원통형 관들을 퇴적물상자 안에 설치하였다. 실험에 사용된 음파의 주파수를 고려했을 때 관은 음파전달에 큰 영향이 없음을 가정하였다. 원통형 관은 음파의 입사 단

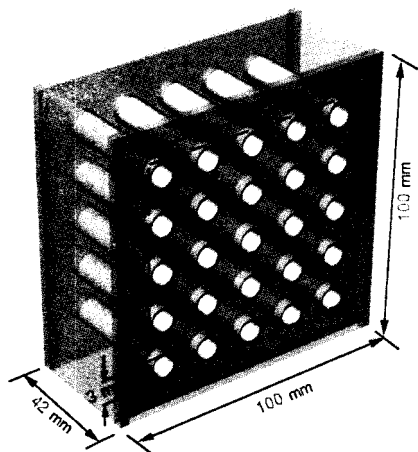


그림 1. 원통형 관을 가진 모래퇴적물상자
Fig. 1. Sand sediment box with circular cylindrical tubes.

표 3. 원통형 관을 가진 퇴적물 상자의 종류

Table 3. Sediment box classification with circular cylindrical tubes.

상자 종류	상자 수량
관의 개수 : 0	2
관의 개수 : 36	1
관의 개수 : 64	1
관의 개수 : 100	1
관의 개수 : 144	1

면적을 고려하여 전체부피 중 중간부분인 60 mm × 60 mm × 42 mm의 부피 안에 음파가 입사되는 방향과 그 축이 평행하게 설치하였고, 원통형 관의 개수를 조절하여 표 3과 같이 다섯 종류의 퇴적물상자를 제작하였다. 퇴적물상자의 재질을 아크릴로 선택한 것은 가공과 음파의 투과실험이 용이하기 때문이다. 퇴적물상자의 제작으로 퇴적물의 표면에 음파의 수직입사가 가능하였고, 음파송수신기사이에 시료 교환이 용이하였다.

(3) 시료의 종류

시료로 제작된 퇴적물상자는 물로 포화된 퇴적물 (water saturated sediment) 안에 있는 물로 채워진 원통형 관을 이용하여 다공율을 변화시켰으며, 시료의 종류와 명명법을 표 4에 나타내었다. 표 4의 원통형 다공성 퇴적물상자의 다공율은 다음과 같이 측정하였다. 그림 1과 같이 60 mm × 60 mm × 42 mm인 부피 안에 원통형 관이 형성되어 있으며, 인접한 임의의 두 원통형 관의 간격만큼 가로와 세로 길이를 길게 하여 변화된 부피에 대한, 원통형 관에 채워진 물의 부피의 비율로서 다공율을 정의하였다. 예로, 원통형 관의 개수가 36개인 경우 인접한 임의의 두 원통형 관의 사이 간격이 8.4 mm이므로 기준 전체부피를 68.4 mm × 68.4 mm × 42 mm로 하고, 전체부피 중에 원통형 관에 채워진 물의 부피의 비율로서 다공율을 결정하였다. 또한 퇴적물상자에 퇴적물이 아닌 스펀지로만 가득 채워져 있는 원통다공율 0 %인 시료와, 스펀지 안에 물로 채워진 원통형 관을 설치하여 원통다공율 약 10 %의 스펀지상자 시료를 준비하였다. 수중에서 스펀지는 음파의 완벽한 차단이 목적이며, 공기를 함유하게 되어 원통형 관을 통한 투과 외엔 음파의 차단효과가 높다. 이러한 스펀지상자 시료는 원통형 관만을 투과한 음파를 관찰하기 위한 것이다.

표 4. 시료의 종류와 명명법

Table 4. Classification and nomenclature of specimens.

시료의 종류		명명법
물로만 채워진 퇴적물상자	다공율 100 %	b
	다공율 0 %	sb
물로 포화된 퇴적물로 채워진 퇴적물상자	다공율 5 %	sb5
	다공율 11 %	sb11
	다공율 18 %	sb18
	다공율 26 %	sb26
	다공율 0 %	sp
스펀지로 채워진 퇴적물상자	다공율 10 %	sp10

2.2. 실험장치 및 방법

수중퇴적물의 음향특성 측정을 위하여 그림 2와 같이 수조 안에, 음파송신기 (Panametrics A302S, A304R)와 음파수신기 (Panametrics A302, V304)를 동축선 상에 거리 70 mm가 되도록 위치시켰다. 음파송신기는 초음파송수신구동장치 (Panametrics 5072PR)를 이용하여 펄스형태로 구동하였고, 퇴적물로 인한 음파의 감쇠가 심하므로 출력신호를 출력증폭기 (ENI 2100L)로 증폭하였으며, 오실로스코프 (LeCroy LT322)로 수신하여 관측하고 분석하였다.

실험환경인 물과 퇴적물을 둘러싼 상자의 음향특성측정에 대한 영향을 확인하기 위하여 물과 아크릴의 음속을 추가로 측정하였다. 물의 음속은 음파송수신기사이의 거리와 음파의 도달 시간 차이를 이용하여 측정하였다. 두께를 알고 있는 아크릴과 퇴적물을 음파송수신기 사이에 위치시켰을 때, 물과 비교한 음파의 도달 시간 차이를 이용하여 아크릴과 퇴적물의 음속을 실험적으로 결정하였다. 감쇠계수 측정방법은 두께가 서로 다른 두 가지의 물

로 포화된 퇴적물 시료를 이용하여 두 시료를 투과한 음파 음압의 spectral ratio를 비교함으로써 단위거리 당 음파의 감쇠로 퇴적물의 감쇠계수를 실험적으로 결정하였다.

실험장치에서 음파송수신기 사이에 원통형 관이 없는 퇴적물상자를 공기로 채운 시료를 위치시켜 퇴적물상자에 대한 회절과 반사의 영향을 확인하였다. 표 4와 같이 다공율이 서로 다른 8가지 시료를 음파송수신기 사이에 위치시켜 다공율과 주파수의 함수로 음향특성을 측정, 분석하였다.

2.3. 실험결과

(1) 물, 아크릴, 퇴적물의 음향특성

수중퇴적물의 음향특성을 측정하기 위한 그림 2와 같은 실험장치에서 물, 아크릴, 퇴적물의 음향특성인 감쇠계수와 음속을 구하여 표 5에 나타내었다. 표 6의 Hamilton의 퇴적물종류에 따른 음향특성[2]과 비교하면 음속이 유사한 결과를 보인다. 본 실험에서는 사용된 음파송수신기의 중심주파수 1 MHz와 2.25 MHz의 음파에 대한 퇴적물에서의 감쇠계수를 실험적으로 결정하였다. 본 실험의 1 MHz 음파의 감쇠계수는 Hamilton의 논문[9]에서 1 MHz 이하 음파에 대한 퇴적물에서의 감쇠계수와 근접한 값을 가짐을 알 수 있다. 2.25 MHz 음파에 대한 퇴적물에서의 감쇠계수는 Hamilton의 논문에 나타나지 않아 비교하지 못하였다. 퇴적물상자의 재질인 아크릴에 의한 음

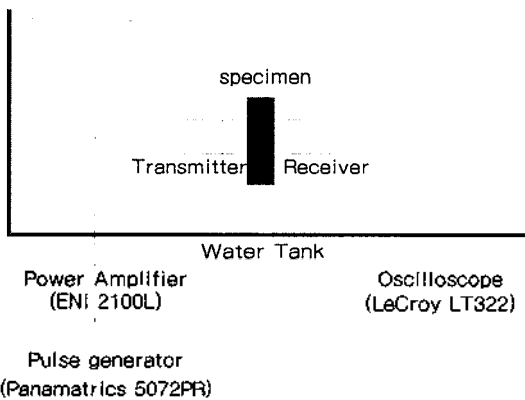


그림 2. 모래퇴적물시료의 음향특성측정을 위한 장치도
Fig. 2. Block diagram of experimental apparatus for acoustic characteristic measurement of sand sediment specimen.

표 5. 물, 아크릴, 퇴적물의 음향특성

Table 5. Acoustic characteristics of water, acryl and sediment.

시료 종류	퇴적물 입자의 지름	음속(m/s)	감쇠계수(dB/m)
물(15℃)	-	1464	-
아크릴	-	2985	-
퇴적물	0.50 mm이하	1614	636 (1 MHz)
			1821 (2.25 MHz)

표 6. Hamilton의 퇴적물 종류에 따른 음향특성[2]
Table 6. Acoustic characteristics of sediment by Hamilton[2].

시료 종류	퇴적물 입자의 지름	음속(m/s)
fine sand	0.21 mm이하	1647
medium sand	0.30 mm이하	1644
coarse sand	0.64 mm이하	1725

파의 감쇠는 그림 3~5에서 보여주었듯이 측정에 큰 영향을 주지 않았다.

(2) 각 시료로부터 투과된 신호

물에서 공기로 음파가 입사되는 경우 20 °C에서 두 매질의 음향특성임피던스는 각각 $1.48 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$ 와 $415 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$ 로 경계면에서 거의 음파의 투과가 없음을 알 수 있다. 원통형 관이 없는 퇴적물상자에 공기로 채워

진 시료를 이용하여 신호가 수신되지 않음을 확인하므로 시료에 의한 회절과 반사가 거의 없음을 확인하였다.

그림 3은 중심주파수 1 MHz의 펄스가 물과 시료 b, sb, sb11, sb26을 투과한 신호를 같은 시간 축 상에 위치시킨 그림이다. 음파가 송수신기 사이의 물만을 투과한 경우에 가장 진폭이 크고, 시료 b를 투과한 신호는 퇴적물상자의 재질인 아크릴에 의한 진폭의 감소가 발생하며, 아크릴의 음속이 물보다 빠르므로 보다 빠르게 수신되었음을 보이고 있다. 그 다음의 신호들은 퇴적물상자 안에 퇴적물이 포함된 시료 sb, sb11, sb26을 투과한 것이다.

그림 4는 그림 3에서 시료 sb, sb11, sb26에 대한 투과 신호들을 확대한 그림이다. 다공율이 증가할수록 신호의 진폭이 감소하고, 음속이 감소하는 현상으로부터 물로 포화된 퇴적물과 물로 채워진 원통형 관으로부터 투과된

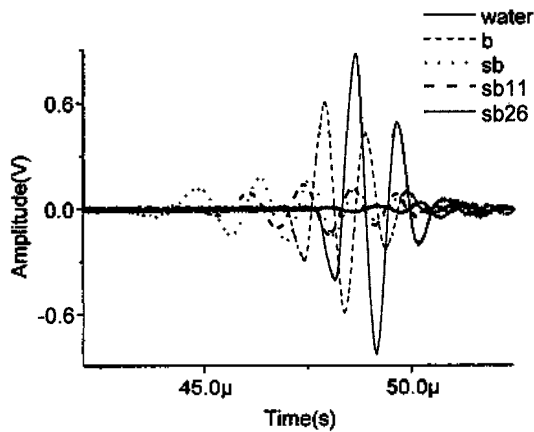


그림 3. 물과 시료 b, sb, sb11, sb26을 투과한 중심주파수 1 MHz 펄스의 시간 축 신호
Fig. 3. Temporal signal of pulse at the center frequency 1 MHz transmitted through water, b, sb, sb11 and sb26.

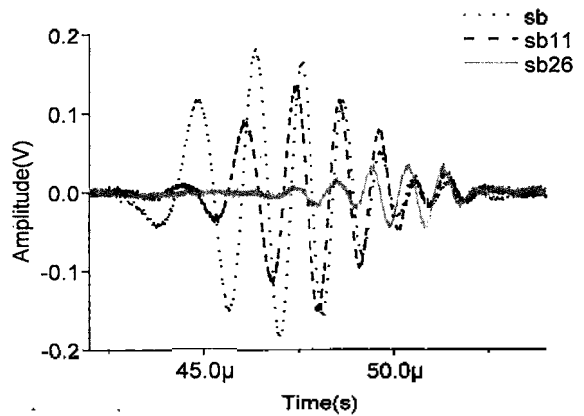


그림 4. 그림 3에서 퇴적물이 포함된 시료 sb, sb11, sb26에 대한 중심주파수 1 MHz 투과신호의 확대 그림
Fig. 4. Magnification of transmitted signal through sb, sb11 and sb26 in Figure 3.

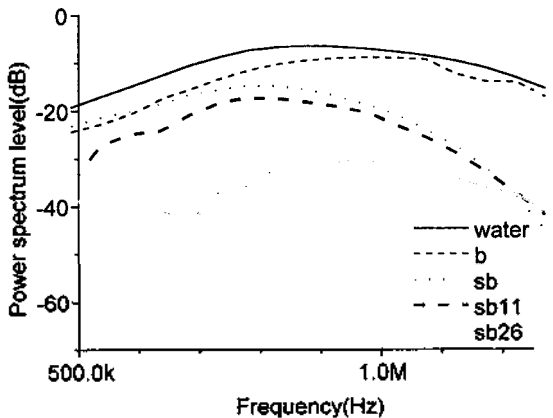


그림 5. 물과 시료 b, sb, sb11, sb26을 투과한 중심주파수 1 MHz 펄스의 주파수 스펙트럼
Fig. 5. Frequency spectrum of pulse at the center frequency 1 MHz transmitted through water, b, sb, sb11 and sb26.

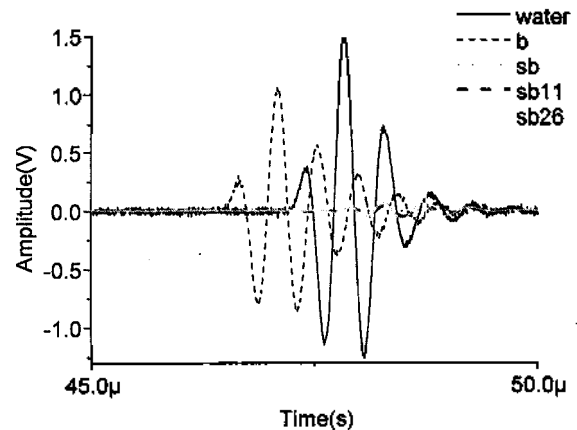


그림 6. 물과 시료 b, sb, sb11, sb26을 투과한 중심주파수 2.25 MHz 펄스의 시간 축 신호
Fig. 6. Temporal signal of pulse at the center frequency 2.25 MHz transmitted through water, b, sb, sb11 and sb26.

신호가 합쳐진 것으로 추정된다. 그림 5는 그림 3의 주파수 스펙트럼으로서, 모든 시료에 대한 투과신호가 입사된 중심주파수 1 MHz 주변에서 가장 큰 스펙트럼레벨 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 중심주파수 2.25 MHz의 펄스가 물과 시료 b, sb, sb11, sb26을 투과한 신호를 같은 시간 축 상에 나타낸 그림이다. 음파가 송수신기 사이의 물만을 투과한 경우에 가장 진폭이 크고, 시료 b를 투과한 신호는 퇴적물 상자인 아크릴에 의한 진폭의 감소가 있으며, 아크릴의 음속이 물보다 빠르므로 보다 빠르게 수신되었다. 그 다음의 신호들은 퇴적물상자 안에 퇴적물이 포함된 시료 sb, sb11, sb26을 투과한 것이다. 중심주파수 2.25 MHz의 음파가 1 MHz 중심주파수를 갖는 음파보다 퇴적물로 인한 음파의 감쇠가 더 크게 발생함을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6에서 시료 sb, sb11, sb26에 대한 투과 신호들을 확대한 그림이다. 시간 축 상에서 빠른 첫 번째 파와 느린 두 번째 파가 명확히 구분된다. 첫 번째 파는 다공율이 증가함에 따라 진폭이 감소하고, 음속이 감소하는 현상으로부터 물로 포화된 퇴적물과 물로 채워진 원통형 관으로부터 투과된 신호가 합쳐진 것이고, 두 번째 파는 다공율이 증가함에 따라 진폭이 증가하고 음속의 변화가 없는 것으로부터 물로 채워진 원통형 관만을 통해서 나온 신호로 추정된다. 그림 8은 그림 6의 주파수 스펙트럼으로서, 물과 시료 b, sb11, sb26에 입사시킨 중심주파수 2.25 MHz 주변에서 투과신호가 가장 크지만, 시료 sb는 중심주파수 1 MHz 주변에서 투과신호가 가장 큰 값을

갖는 것을 알 수 있다. 시료 sb, sb11, sb26에 대한 신호는 퇴적물로 인하여 물과 시료 b에 비하여 음파의 감쇠가 크다.

중심주파수 1 MHz와 2.25 MHz의 입사된 펄스가 시료를 투과한 신호의 시간 축 신호와 주파수 스펙트럼은 펄스의 중심주파수에 따라 투과신호의 특성이 달라짐을 알 수 있다. 시료를 투과한 시간 축 신호인 그림 4와 그림 7을 비교하면 그림 4의 1 MHz 투과신호는 첫 번째 파와 두 번째 파를 구분할 수 없지만, 그림 7의 2.25 MHz 투과신호는 첫 번째 파와 두 번째 파를 명확히 구분할 수 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 중심주파수 1 MHz의 펄스는 퇴적물로 인한 감쇠가 크지 않기 때문에 두 번째 파가 첫 번째 파에 가려져 있는 것으로 추정할 수 있다.

그림 9는 중심주파수 1 MHz의 펄스가 시료 sp, sp10을 투과한 신호이다. 이 때 그림 2의 음파송수신기 사이의 거리는 다른 경우와는 다르게 58 mm이었다. 물에서 스펀지로 입사되는 음파의 두 매질에서의 전파를 고려하면 두 매질의 음향특성임피던스 차이에 의해 중심주파수 1 MHz의 펄스는 스펀지를 거의 투과하지 못한다. 따라서 시료 sp를 투과한 신호는 관측되지 않고 시료 sp10에서만 원통형 관만을 통해서 나온 신호를 관측할 수 있다. 그림 4에서도 시료들에 포함된 퇴적물에 의한 음파의 감쇠가 크다면 역시 원통형 관을 통해서 나온 신호가 관측될 것이다. 그러므로 1 MHz 투과신호에도 두 번째 파가 존재하는 것으로 추정할 수 있다.

그림 5와 그림 8의 시료 sb, sb11, sb26을 비교하면,

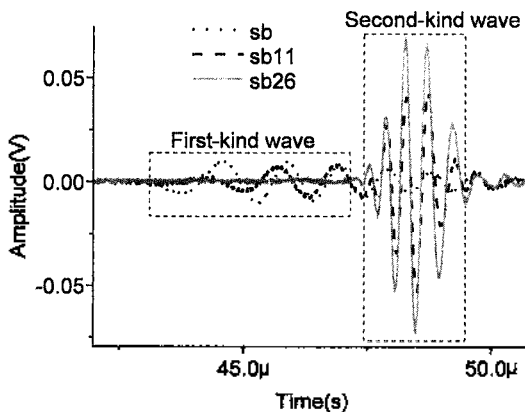


그림 7. 그림 6에서 퇴적물이 포함된 시료 sb, sb11, sb26에 대한 투과신호를 확대한 그림. 시간 축 상에서 빠른 첫 번째 파 (first-kind wave)와 느린 두 번째 파 (second-kind wave)가 명확히 구분된다

Fig. 7. Magnification of transmitted signal through sb, sb11 and sb26 in Figure 6. Fast first-kind wave and slow second-kind wave are divided in time axis.

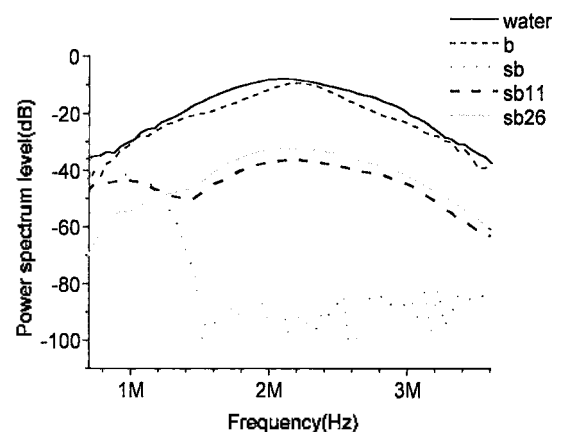


그림 8. 물과 시료 b, sb, sb11, sb26을 투과한 중심주파수 2.25 MHz 펄스의 주파수 스펙트럼

Fig. 8. Frequency spectrum of pulse at the center frequency 2.25 MHz transmitted through water, b, sb, sb11 and sb26.

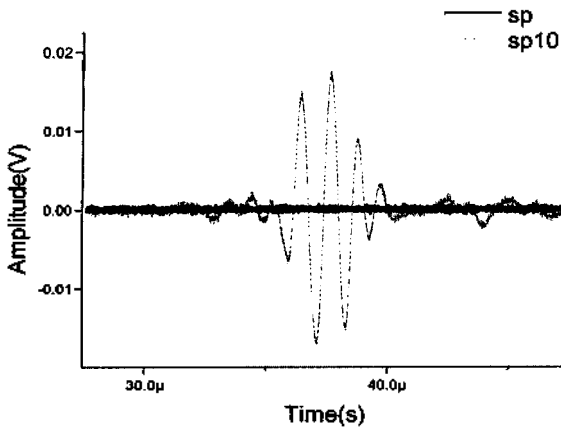


그림 9. 시료 sp, sp10을 투과한 중심주파수 1 MHz 펄스의 시간 축 신호
 Fig. 9. Temporal signal of pulse at the center frequency 1 MHz transmitted through sp and sp10.

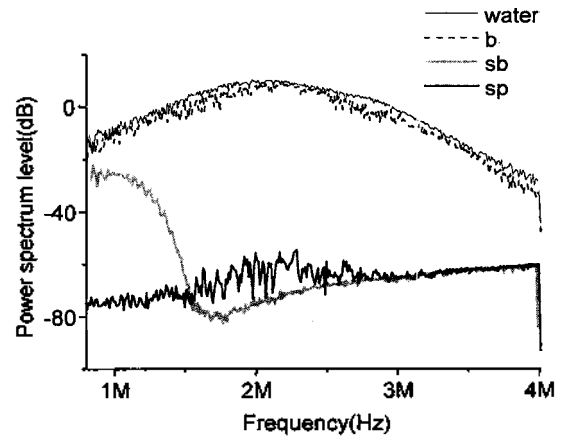


그림 10. 물과 시료 b, sb, sp를 투과한 중심주파수 2.25 MHz 펄스에 대한 주파수 쓸기 스펙트럼
 Fig. 10. Frequency sweep of acoustic wave at the center frequency 2.25 MHz transmitted through water, b, sb and sp.

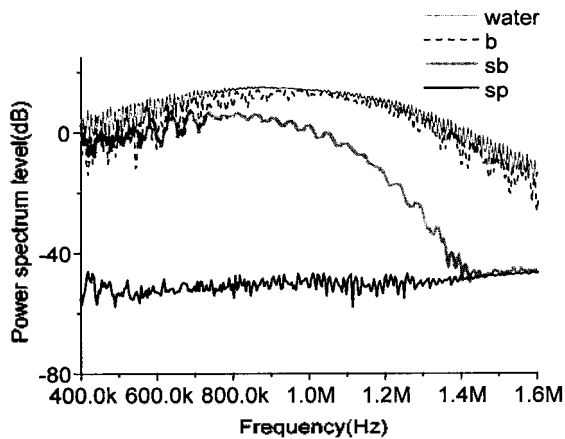


그림 11. 물과 시료 b, sb, sp를 투과한 중심주파수 1 MHz 펄스에 대한 주파수 쓸기 스펙트럼
 Fig. 11. Frequency sweep of acoustic wave at the center frequency 1 MHz transmitted through water, b, sb and sp.

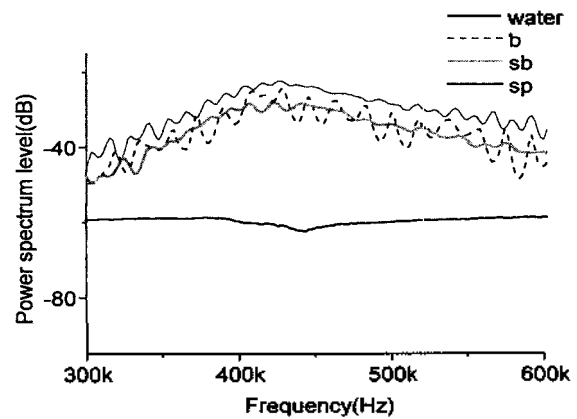


그림 12. 물과 시료 b, sb, sp를 투과한 중심주파수 0.5 MHz 펄스에 대한 주파수 쓸기 스펙트럼
 Fig. 12. Frequency sweep of acoustic wave at the center frequency 0.5 MHz transmitted through water, b, sb and sp.

그림 5에서는 입사시킨 중심주파수에 해당하는 1 MHz 주변의 주파수 영역에서만 투과신호가 크다. 그러나 그림 8에서는 입사시킨 중심주파수 2.25 MHz 주변의 주파수 영역에서만 투과신호가 큰 것은 아니다. 특히 시료 sb의 경우에 입사시킨 중심주파수가 2.25 MHz임에도 불구하고 2.25 MHz 주변의 음파는 거의 완전히 감쇠가 되어 투과되지 못하고, 1 MHz 이하의 음파는 약하게 입사가 되었지만 감쇠가 적어 투과된 음파를 관찰할 수 있다. 시료 sb11, sb26에서 2.25 MHz 주변의 투과신호를 관찰할 수 있으며, 이는 대부분 원통형 관을 통해서 투과된 것이다.

시료 sp는 퇴적물상자에 스펀지로 가득 채운 시료로서 음파가 거의 투과하지 못한다. 그림 10은 물과 시료 b, sb, sp를 투과한 중심주파수 2.25 MHz 펄스에 대한 주파

수 쓸기를 보여주고 있다. 물과 시료 b를 투과한 신호는 중심주파수인 2.25 MHz에서 가장 투과가 잘 되지만, 물로 포화된 퇴적물로만 채워진 시료 sb를 투과한 신호는 1 MHz에서는 투과가 잘 되나, 2.25 MHz 부근에서는 투과가 거의 되지 않는 것을 다시 확인할 수 있다.

그림 10, 그림 11, 그림 12는 중심주파수가 각각 2.25 MHz, 1 MHz, 0.5 MHz인 음파송수신기를 이용하여 물과 시료 b, sb, sp를 투과한 펄스에 대한 주파수 쓸기를 보여주고 있다. 각 음파송수신기가 정상적으로 구동되는 주파수 영역을 선택하였다. 물과 시료 b는 아크릴에 의한 약간의 음압의 감소만 있을 뿐이며, 사용된 모든 주파수 대역에서 주파수에 따른 변화는 없었다. 시료 sb는 1 MHz 주변부터 신호가 급격히 감소하여, 1.4 MHz 이상의 주파

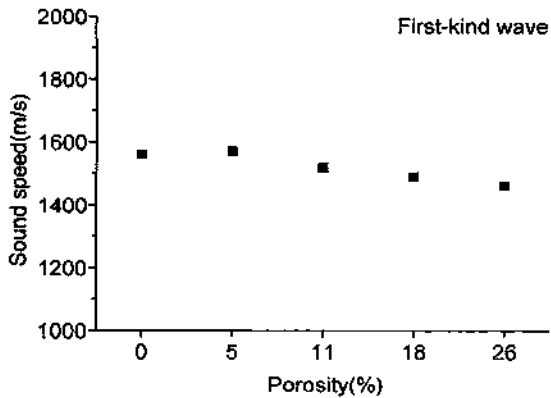


그림 13. 다공율 0 %, 5 %, 11 %, 18 %, 26 %인 시료를 투과한 중심주파수 1 MHz 펄스의 다공율에 따른 음속 분포
 Fig. 13. Sound speed of pulse at the center frequency 1 MHz transmitted through specimen with the porosity 0 %, 5 %, 11 %, 18 % and 26 %.

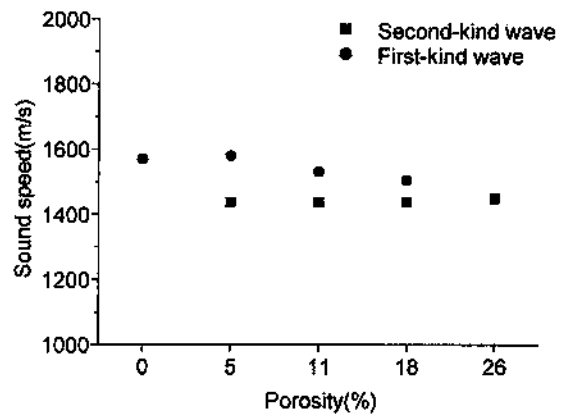


그림 14. 다공율 0 %, 5 %, 11 %, 18 %, 26 %인 시료를 투과한 중심주파수 2.25 MHz 펄스의 다공율에 따른 음속 분포
 Fig. 14. Sound speed of pulse at the center frequency 2.25 MHz transmitted through specimen with the porosity 0 %, 5 %, 11 %, 18 % and 26 %.

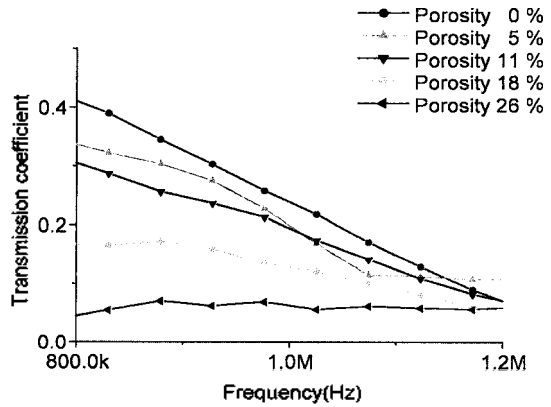


그림 15. 다공율 0 %, 5 %, 11 %, 18 %, 26 %인 시료를 투과한 중심주파수 1 MHz 펄스의 주파수에 따른 음압투과계수
 Fig. 15. Transmission coefficient as a function of frequency of pulse at the center frequency 1 MHz transmitted through specimen with the porosity 0 %, 5 %, 11 %, 18 % and 26 %.

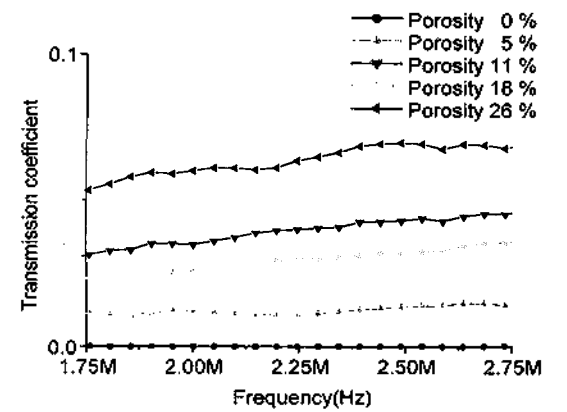


그림 16. 다공율 0 %, 5 %, 11 %, 18 %, 26 %인 시료를 투과한 중심주파수 2.25 MHz 펄스의 주파수에 따른 음압투과계수
 Fig. 16. Transmission coefficient as a function of frequency of pulse at the center frequency 2.25 MHz transmitted through specimen with the porosity 0 %, 5 %, 11 %, 18 % and 26 %.

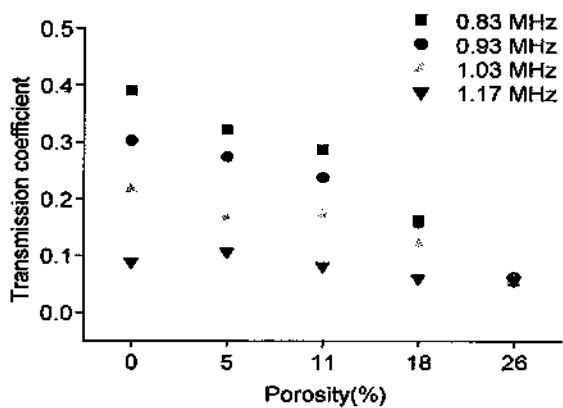


그림 17. 주파수가 각각 0.83 MHz, 0.93 MHz, 1.03 MHz, 1.17 MHz인 펄스의 다공율에 따른 음압투과계수
 Fig. 17. Transmission coefficient as a function of porosity of pulse at the frequency 0.83 MHz, 0.93 MHz, 1.03 MHz and 1.17 MHz.

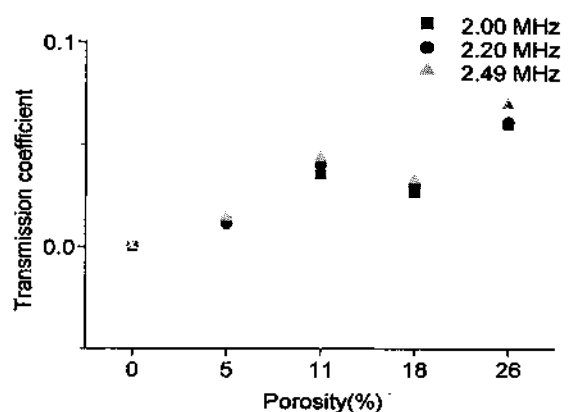


그림 18. 주파수가 각각 2.00 MHz, 2.20 MHz, 2.49 MHz인 펄스의 다공율에 따른 음압투과계수
 Fig. 18. Transmission coefficient as a function of porosity of pulse at the frequency 2.00 MHz, 2.20 MHz and 2.49 MHz.

수 영역에서는 시료 sp 보다 음압이 떨어지므로 음파의 투과가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 주파수가 감소할수록 퇴적물에 의한 감쇠도 감소하며, 700 kHz 주변 이하의 주파수 영역에서는 감쇠가 매우 작음을 알 수 있다.

(3) 다공율에 따른 음속분포

그림 13, 그림 14에 각각 중심주파수가 1 MHz와 2.25 MHz인 펄스를 이용하여 측정된 각 시료에서의 음속을 나타내었다. 그림 13에서는 첫번째파의 음속만을 나타내었는데, 그 이유는 그림 4의 시간 축 투과음파에서 두번째파가 구분되지 않기 때문이다. 첫번째파는 다공율이 증가함에 따라 음속이 감소하여 물의 음속에 가까워진다. 그림 14에서는 그림 7의 시간 축 투과음파에서 첫번째파와 두번째파가 명확히 구분되므로, 첫번째파와 두번째파의 음속을 구분하여 나타내었다. 다공율이 증가함에 따라 첫번째파는 음속이 감소하여 물의 음속에 가까워지고, 두번째파는 다공율에 상관없이 물의 음속과 거의 일치한다. 다공율이 증가함에 따라 시료는 물로 채워진 원통형 관의 부피 비율이 증가하므로 밀도가 감소하여 물의 밀도에 가까운 값을 갖게 된다. 임의의 매질은 밀도가 감소하면 음속도 감소하는 특성을 갖는다. 첫번째파도 다공율이 증가함에 따라 음속이 감소하는 것을 알 수 있다[2]. 그러므로 첫번째파는 물로 포화된 퇴적물과 물로 채워진 원통형 관으로부터 투과된 신호가 합쳐진 것이고, 두번째파는 물로 채워진 원통형 관만을 통과한 신호임을 알 수 있다.

(4) 다공율 및 주파수에 따른 음압투과계수

그림 15, 그림 16은 중심주파수가 각각 1 MHz와 2.25 MHz인 펄스를 입사시킨 경우에 다공율의 변화와 그 주변 주파수들에 대한 음압투과계수이다. 음압투과계수는 투과파의 음압과 입사파의 음압의 비로 정의된다. 물은 음파의 감쇠가 매우 작으므로 송수신기 사이에 시료가 없이 물만 있는 경우에 투과계수를 1로 하였다. 그림 15로부터 0%~18%의 다공율을 갖는 시료들은 주파수가 증가함에 따라 퇴적물로 인한 감쇠로 인하여 음압투과계수가 감소함을 알 수 있다. 그러나 다공율 26%의 시료는 물로 채워진 원통형 관의 영향을 많이 받기 때문에 주파수가 증가함에 따라 감쇠가 매우 작다. 그러므로 중심주파수 1 MHz 주변에서는 물로 포화된 퇴적물과 물로 채워진 원통형 관으로부터 투과된 신호가 합쳐진 첫번째파의 영향이 지배적이다. 즉, 다공율이 감소할수록 시료로부터 투과된

신호들은 퇴적물의 영향이 지배적이고, 다공율이 증가할수록 시료로부터 투과된 신호들은 물로 채워진 원통형 관의 영향이 지배적이다.

그림 16에서 볼 수 있듯이 중심주파수 2.25 MHz 주변에서는 다공율이 증가함에 따라 음압투과계수도 증가하며, 주파수의 증가에 따른 감쇠의 변화가 매우 작으므로 물로 채워진 원통형 관을 통해서 나온 투과신호인 두번째파가 지배적임을 알 수 있다[7].

그림 17과 그림 18은 그림 15와 그림 16을 각각 다공율의 함수로 다시 나타낸 것이다. 그림 17은 1 MHz 주변의 4 가지의 주파수에 대한 다공율에 따른 음압투과계수를 나타낸 것으로, 다공율이 커질수록 주파수의 영향은 적고, 다공율이 작아질수록 주파수의 영향이 큼을 알 수 있다. 그림 18은 2.25 MHz 주변의 3 가지의 주파수에 대한 다공율에 따른 음압투과계수를 나타낸 것으로, 다공율이 커짐에 따라 음압투과계수가 커지는 경향을 보이며, 주파수의존성이 작은 것을 알 수 있다.

III. 결론

해저퇴적물의 음향특성을 이해하기 위하여 실제로 복잡한 구조를 갖는 해저퇴적물의 구조를 단순화하여 실험실조건에서 주파수 및 다공율 변화에 따른 수중퇴적물의 음향특성을 고찰하였다. 수중 원통형 다공성 퇴적물상자는 물로 포화된 퇴적물과 순수한 물로 채워진 원통형 관인 두 매질로 구성되어 있으며, 원통형 관과 평행한 방향으로 입사시켜 투과된 펄스음파를 관측하였다. 두 매질에서의 음속이 다르기 때문에 시간 축 상에서 물로 포화된 퇴적물과 물로 채워진 원통형 관을 통과한 첫번째파와 물로 채워진 원통형 관만을 통과한 두번째파를 구분할 수 있었다. 물로 포화된 퇴적물과 물로 채워진 원통형 관으로부터 투과된 신호가 합쳐진 중심주파수 1 MHz에서는 첫번째파가 지배적이었는데 다공율이 증가함에 따라 투과계수는 감소하고, 음속은 시료의 밀도가 작아짐에 따라 점차 감소하여 물의 음속에 수렴하게 된다. 즉, 다공율이 감소할수록 시료로부터 투과된 신호들은 퇴적물의 영향이 지배적이고, 다공율이 증가할수록 시료로부터 투과된 신호들은 물로 채워진 원통형 관의 영향이 지배적이다. 700 kHz 이상의 주파수 영역에서는 퇴적물로 인한 음파의 감쇠가 급격히 증가하며 1.4 MHz 부근에 도달하면 음파는 퇴적물을 거의 투과하지 못한다. 중심주파수

2.25 MHz에서는 물로 채워진 원통형 관만을 통해 투과된 신호인 두번째파가 지배적이었다. 다공율이 증가함에 따라 시료 전체부피 중에 물로 채워진 원통형 관이 차지하는 부피가 증가하므로 원통형 관을 통해 투과되는 음파의 음압투과계수가 증가한다. 또한 매질이 물이기 때문에 주파수의 변화에 따른 음속과 음압투과계수의 변화는 볼 수 없었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. H. Medwin and C. Clay, *Fundamental of Acoustical Oceanography*, Academic Press, New York, pp. 341-344, 1998.
2. E. L. Hamilton, George Shumway, H. W. Menard, and C. J. Shippek, "Acoustical and Other Physical Properties of Shallow-Water Sediments off San Diego," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, pp. 1-15, 1956.
3. R. D. Stoll, "Marine sediment acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, pp. 1789-1799, 1985.
4. M. J. Buckingham, "Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, pp. 2579-2596, 1997.
5. M. A. Biot, "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 168-178, 1956, M. A. Biot, "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 179-191, 1956, M. A. Biot, "Generalized theory of acoustic

propagation in porous dissipative media," *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1254-1264, 1962.

6. K. Attenborough, "Acoustic characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73, pp. 785-799, 1983.
7. 백재윤, 노희설, 윤석왕, "원통형 다공을 갖는 판형 루사이트의 음향특성," *J. Acoust. Soc. Korea*, vol. 19, no. 2s, pp. 299-302, 2000.
8. H. S. Roh and S. W. Yoon, "Acoustic diagnosis for porous medium with circular cylindrical pores," *J. Acoust. Soc. Korea*, vol. 20, no. 1s, pp. 415, 2001.
9. E. L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the sea floor," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, pp. 1313-1340, 1980.

저자 약력

● 이 용 주 (Yong-Joo Lee)



1999년 2월: 호서대학교 물리학과 (이학사)
2001년 8월: 성균관대학교 물리학과 (이학석사)
※ 주관심분야: 수중음향

● 노 희 설 (Heui-Seol Roh)



1979년 2월: 성균관대학교 물리학과 (이학사)
1989년 5월: Univ. of Mississippi 물리학과 (이학석사)
1990년 8월: Univ. of Mississippi 물리학과 (박사 수료)
1991년 8월: Indiana Univ. 물리학과 (이학석사)
1995년 5월: Indiana Univ. 물리학과 (이학박사)
1979년~1986년: 국방과학연구소 연구원
1995년~1997년: Yukawa 연구소 (Kyoto Univ.) 특별연구원

1997년~1999년: 성균관대학교 기초과학연구소 전임연구원
2000년~현재: 성균관대학교 물리학과 연구요원
※ 주관심분야: 수중음향, 산업음향, 의학음향

● 윤 석 왕 (Suk-Wang Yoon)

한국음향학회지 제19권 제E호 참조