

수조에서 입자 매질의 평면파 반사계수 측정과 Biot 이론에 의한 예측

Measurement of the Plane Wave Reflection Coefficient for the Saturated Granular Medium in the Water Tank and Comparison to Predictions by the Biot Theory

이 근 화*
(Keunhwa Lee*)

*서울대학교 공과대학 조선해양공학과
(접수일자: 2006년 7월 18일; 채택일자: 2006년 7월 24일)

평면파 반사 계수는 수중에서의 음파에너지에 관한 해저 바닥의 모든 정보를 담고 있고 음향 해석 모델의 입력 값으로도 사용할 수 있는 음향학적 물리량이다. 본 연구에서는 실험실 수조 환경에서 입자 매질 (세 종류의 유리구슬, 모래)의 평면파 반사 계수, 음속 및 감쇠계수를 측정했다. 반사 실험은 수조의 한계를 고려해 28~53°의 입사각과 중심 주파수 100kHz의 협대역 신호를 이용해 수행했다. 자기 교정법 (Self-calibration method)을 이용해 측정된 자료로부터 반사 계수를 계산했고 측정된 반사 계수의 정향 및 실험의 불확실성을 서술했다. 입자 매질의 음속 및 감쇠계수는 거리 수신 신호 간의 회귀분석을 통해 계산했다. Biot 이론을 이용해 측정된 음속과 감쇠계수로부터 다공율과 침투율을 추정하고 실제 지질학적 측정값과의 유사성을 확인했다. 최종적으로 추정된 다공율, 침투율을 이용해 이론적인 반사 계수를 계산하고 반사 실험의 측정값과 비교했다. 본 실험 결과는 Biot 이론으로 일관성 있게 입자 매질의 음향학적 물성을 설명할 수 있음을 입증한다.

핵심용어: 평면파 반사 계수, Biot 이론, 자기 교정법, Biot 인자 추정.

주요분야: 수중 음향 분야 (5.3)

The plane wave reflection coefficient is an acoustic property containing all the information concerning the ocean bottom and can be used as an input parameter to various acoustic propagation models. In this paper, we measure the plane wave reflection coefficient, the sound speed, and the attenuation for saturated granular medium in the water tank. Three kinds of glass beads and natural sand are used as the granular medium. The reflection experiment is performed with the sinusoidal tone bursts of 100 kHz at incident angles from 28 to 53 degrees, and the sound speed and attenuation experiment are performed also with the same signal. From the measured reflection signal, the reflection coefficient is calculated with the self calibration method and the experimental uncertainties are discussed. The sound speed and the attenuation measurements are used for the estimation of the porosity and permeability, the main Biot parameters. The estimated values are compared to the directly measured values and used as input values to the Biot theory in order to calculate the theoretical reflection coefficient. Finally, the reflection coefficient predicted by Biot theory is compared to the measured reflection coefficient and their characteristics are discussed.

Key words: Plane wave reflection coefficient, Biot theory, Self calibration method, Estimation of biot parameters.

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.3)

I. 서론

바닥의 기본적인 생김새는 유체로만 이루어진 해양과 사뭇 다르다 [1]. 해저 바닥의 상부는 퇴적물 입자와 유체가 뒤섞여 현탁 매질 (Suspension)을 이루고 있는 경우가 많고 조립질 퇴적물일수록 강성을 띄는 시슬 구조를 형성한다. 해저 바닥의 하부는 입자 매질이 고결되어 굳어진 퇴적암이나 혹은 화산암으로 구성되어 있으며 암석이 해저 바닥 상부에 노출되기도 한다. 음향학적으로 해저 바닥은 수중 도파관의 하부 경계로써 취급된다 [2]. 천해와 같이 해양/해저 바닥과의 음향학적 상호 작용이 중요한 해양 환경에서는 도파관의 하부 경계의 영향을 무시할 수 없다. 실제로 해저 지뢰 매설 및 탐지, 해안 방어 체계, 음탐 거리 예측, 대잠 체계, 수중 통신 등에서 해저 바닥은 수중 도파관의 음향 해의 정확성을 좌우하는 주요 인자 중의 하나이다.

해저 바닥의 정보를 수중의 음향 모델 (음파 전달 모델, 반사 손실 모델, 산란 손실 모델 등)에 입력 값으로 넣기 위해서는 우선 해저 바닥의 물성을 측정해야 한다 [3]. 수중 음향에서는 주로 모델 기반의 지음향 역산을 이용해 해저 바닥의 물성을 추정해 왔다. 지음향 역산은 해저 퇴적물 분류, 음원의 위치 추적 등에서 합리적인 결과를 제공하긴 하나 해저 바닥의 구조를 a priori로 접근한다는 한계가 있다. 또한 역산 문제는 근본적으로 비안정적인 적분 방정식의 해를 구하는 문제가 되므로 역산 해가 해양 환경의 변화에 민감할 가능성이 있다.

그래서 몇몇 연구자는 해저 바닥에서 평면파 반사 계수를 직접 측정해 음향 모델의 입력 값으로 사용하는 방안을 연구하고 있다 [4-8]. 평면파 반사 계수는 음압과 속도를 이용해 표현되는 물리량으로 해양과 해저 바닥 사이의 경계 조건은 평면파 반사 계수로 변환이 가능하다. Bucker [6]는 간단한 도파관에서 평면파 반사 계수를 경계 조건으로 갖는 정상 모드 해를 유도했으며 이와성 [7]은 다층구조에서 직접행렬법과 부분행렬법의 혼합을 통해 해저 바닥의 평면파 반사 계수를 입력 값으로 갖는 파수 적분법 모델을 개발했다. 반사 모델이나 산란 모델에서는 공식에 의해 평면파 반사 계수를 직접적으로 입력 값으로 사용할 수 있다 [9-10]. 반사 계수를 입력 값으로 사용한다면 해저 바닥의 음속, 밀도, 층의 개수를 결정해야 하는 과정은 생략할 수 있다.

그 동안 해저 바닥의 평면파 반사 계수를 직접 측정하는 것은 상당히 어려운 일로 여겨져 왔다 [11]. 수중에서의 음파의 굴절 때문에 현대역 빔을 사용할 경우 측정이 어려우며, 구형파 반사의 영향을 무시할 수 없고, 음파

의 간섭에 의해 반사파의 교란이 발생할 수 있기 때문이다. 하지만 최근에는 해양 및 음향 기술의 발전과 더불어 ROV에 장착된 전 방향의 소스와 리시버를 사용해 평면파-구형파 변환, 간섭파 제거 기법, 역산 기법 등의 방법으로 평면파 반사 계수를 예측하거나 직접 측정할 연구 결과들이 발표되고 있다 [4-5][8][12].

본 논문에서는 실험실 수조에서 100kHz 의 주파수를 사용해 28~53° 의 입사각에 대해 입자 매질의 평면파 반사 계수 측정 실험을 수행하고 동일한 주파수에 대해 음속 및 감쇠 계수를 측정했다. 우선 Biot이론을 이용해 음속 및 감쇠계수 측정값으로부터 다공율과 침투율을 추정하고, 추정된 값으로부터 각 매질에 대해 이론적인 평면파 반사 계수를 계산했다 [13-14]. 그리고 계산된 반사 계수 결과를 실험에서 측정된 평면파 반사 계수와 비교했다. 입자 매질로는 2.5, 1.5, 0.98의 평균 입도(ϕ)를 갖는 유리 구슬 (glass beads), 1.51의 평균 입도를 갖는 모래를 사용했다. 3종류의 유리 구슬은 입자 크기에 따른 음향학적 물성의 변화를 보기 위해 선택했고 모래 매질은 유리 구슬과의 비교를 위해 선택했다.

본 논문은 고주파에서 입자 매질의 세 가지 음향학적 물성 (평면파 반사 계수, 음속, 감쇠계수)을 일관성 있게 Biot 이론으로 설명할 수 있음을 보였다. 본 논문의 결과는 최근의 해저 퇴적물의 분산 관계식에 대한 논란에서 Biot 이론의 적합성을 입증하는 자료 [15-16] 및 실험 해역에서 평면파 반사계수 측정 실험의 벤치마크로도 사용할 수 있다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 본 연구에 사용된 실험 장비 및 실험 환경에 대해 서술했다. III장에서는 측정된 신호 분석에 대한 내용을 담고 있고 IV장은 반사 손실, 음속, 감쇠계수의 계산 및 실험의 불확실성에 대해 서술했다. V장에서는 다공율 및 침투율의 추정과 측정된 반사 계수와의 비교에 대해 기술했다. VI장은 결론이며 부록에서는 Biot 이론으로 유도되는 음향학적 물성치에 대한 간략한 요약을 기술했다.

II. 실험 환경 및 실험 장비

음향 실험은 크게 평면파 반사계수 측정 실험, 음속 및 감쇠계수 측정 실험으로 나누어 실시되었다.

2.1. 평면파 반사계수 측정 실험

평면파 반사계수 측정 실험은 1.2m×0.9m×0.7m (길

표 1. 시료의 지질학적 특성 값.

Table 1. Geophysical properties of each granular media.

시료	평균 입도 (Φ)	함량비(%)			분급도	다공율	입자밀도 (kg/m^3)
		Gravel	Sand	Mud			
시료 1	2.5	0	100	0	0.08	0.37	2430
시료 2	1.5	0	100	0	0.03	0.37	2460
시료 3	0.98	0	100	0	0.50	0.38	2480
모래	1.51	0	99.96	0.04	0.37	0.44	2610

이, 너비, 높이)의 크기를 갖는 음향 수조에서 수행되었다. 음향 수조의 바닥에는 입자 매질을 담을 수 있는 상자를 놓았다. 상자는 1cm두께의 나무로 만들어진 상부가 뚫린 직사각형 모양의 상자로 내부 크기는 약 $0.52m \times 0.42m \times 0.09m$ 이다. 실험에 사용된 입자 매질은 세 종류의 유리구슬과 모래를 사용했다. 유리구슬은 Sigmund사에서 제조한 것으로 주성분은 모래와 같은 규소로 이루어져 있다. 3종류의 유리구슬은 서로 입자 크기가 다르며 각각 '시료1 (Sample I)', '시료2 (Sample II)', '시료 3 (Sample III)'로 표기하며 물성치는 표 1에 주어졌다. 모래 매질은 일반 모래를 사용했으며 본 논문에서는 '모래 (Sample IV)'로 표기한다. 실험에 앞서 각 시료에 섞여 있는 오염물과 먼지 등을 제거하기 위해 거친 체를 이용해 시료를 걸러냈다. 불순물을 제거한 시료는 물로 여러 번 씻어 깨끗한 상태의 시료를 만들었다. 이 과정에서 유리구슬에 붙은 먼지, 곤충의 사체, 얇은 크기의 입자나 모래에 포함된 진흙 성분, 소금기 등을 제거하였다. 시료를 깨끗하게 한 후에 시료의 기본적인 물성을 측정하였다. 이 물성 값은 부경 대학교의 도움을 얻어 측정하였고 표 1에 정리되어 있다. 표 1에 정리된 값은 입자 매질의 평균값에 해당하며 유리구슬에 관해서는 구입사인 Sigmund사에서 제공한 물성표와 유사한 값을 주는 것을 확인했다.

반사 계수 측정 실험에 사용된 장비 세팅은 그림 1과 같다. 송신기와 수신기로는 각각 GRAS사의 10CS 청음기를 사용했다. 청음기의 방향성은 그림 2에 도시했다. 송수신기의 음향 중심 (acoustic center)은 입자 매질로부터 약 17.3cm 위에 위치해 있으며 송수신기는 금속 지지대로 고정되어 있다. 각각의 지지대는 스텝모터로 구동되는 선형스테이지에 연결되어 있고 선형 스테이지는 수평으로 직선운동을 하며 송수신기의 거리를 변화시킨다. 본 실험에서는 송수신기간의 초기 거리를 약 18.8cm로 두고 각 단계마다 1cm씩 간격을 늘려가며 28번 측정을 했다. 송수신기 간의 최소 및 최대 간격은 입자 매질에서 첫 번째로 반사되는 반사파가 주변의 다른 간섭파

에 오염되지 않도록 선택된 값이다. 위의 조건으로 획득할 수 있는 반사파의 입사각 영역은 약 $28 \sim 53^\circ$ 사이이며 입계각 이전 영역에 해당한다.

실험에 사용된 음파는 100kHz의 주파수를 갖는 sine형상의 펄스이다. Agilent 33250A의 신호 발생기로 발생시켰으며 파장을 λ 라 할 때 $0 < t < 3\lambda$ 의 시간의 펄스크기를 갖도록 설정했고 유효 대역폭은 약 28kHz이다. 음파는 각 단계마다 반복적으로 6번 발생되어 그 값의 평균을 취해서 측정값으로 삼았다. 수신된 음파는 Conditioning 앰프 및 95kHz - 105kHz의 대역통과 Butterworth 아날로그 필터를 거쳐 Lecroy 9310CM의 오실로스코프에 수신된다. 오실로스코프에 수신된 측정 데이터는 GPIB포트를 통해 컴퓨터에 저장된다. 선형 스테이지를 비롯해 모든 실험 장치는 GPIB 통신 포트를 이용해 컴퓨터로 자동 제어했으며 소프트웨어는 Matlab을 사용했다.

각 시료에 대한 반사계수 측정 실험은 다음과 같은 순서로 진행했다.

1. 수조에 물을 채우고 실험실 온도와 같아지도록 일정 시간 놓아두어 송수신기 및 수조 벽에 생기는 기포를 제거한다. 실험 기간 동안 실험실 온도는 $22^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$ 사이를 유지했다.
2. 시료 상자를 넣지 않은 상태로 음파 측정 실험을 실시한다. 이 실험 결과는 물의 음속 측정과 송수신기간의 초기 간격 추정을 위해 사용했다.
3. 비어있는 시료 상자를 수조에 넣고 물 밖에서 시료를 흔들려가며 상자에 담는다. 이것은 시료를 상자에 넣는 과정 중 포함될 수 있는 기포 등을 제거하기 위함이다. 시료는 수조 안의 상자에 담긴 상태로 다시 한번 섞어 주어 기포를 제거하고 봉진동기를 이용해 시료를 골고루 섞는다.
4. 시료 상자의 폭보다 길이가 긴 평행한 플라스틱 막대기를 이용해 시료의 표면을 평평하게 다듬고 수조 안이 안정될 때까지 장시간 놓아둔다.
5. 컴퓨터 자동 제어 시스템을 이용해 거리 간격을 넓혀가며 평면파 반사 계수 측정 실험을 실시하고 위의 1에서 5까지의 과정을 1회 반복해 반복 실험을 실시한다.

2.2. 음속 및 감쇠계수 측정 실험

입자 매질에 대한 음속 및 감쇠계수 측정 실험은 Costley와 Bedford의 실험과 동일한 방법으로 진행했다

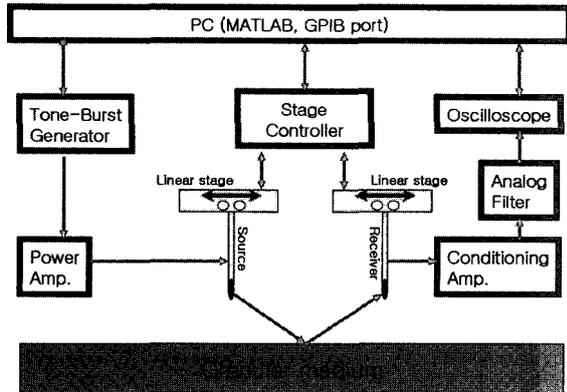


그림 1. 반사 계수 실험 개략도.
Fig. 1. Schematic of the reflection experimental equipment.

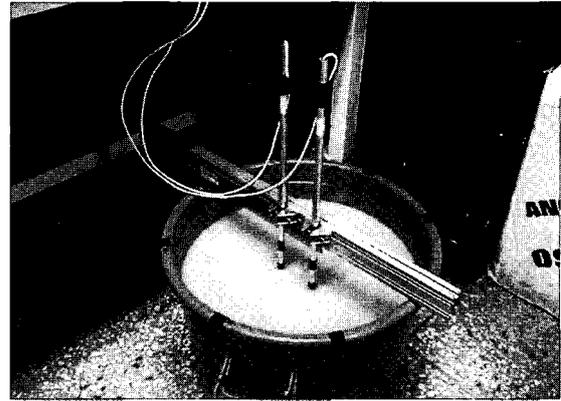


그림 3. 입자 매질에서 음속 및 감쇠계수의 측정 실험.
Fig. 3. Measurements of the sound speed and the attenuation in granular medium.

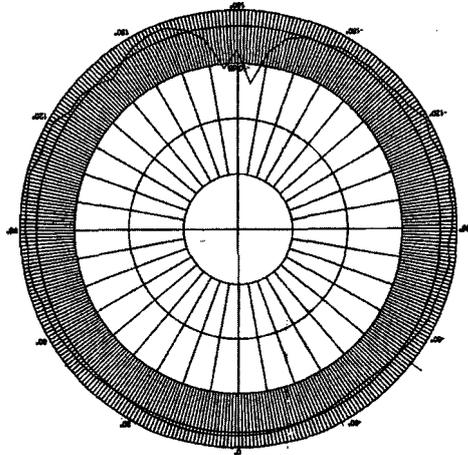


그림 2. GRAS 10CS 의 방향성.
Fig. 2. Directivity of GRAS 10CS.

[17]. 반사 계수 실험을 끝낸 후 시료 상자의 시료를 지름 30cm, 높이 33cm의 원형 플라스틱 통에 담아 높이 25cm까지 채우고 나머지 높이는 물로 채운다. 기포의 영향이 없도록 시료는 끌고루 섞어 준다. 그리고 금속 지지대로 고정된 송수신기 (GRAS 10CT)를 원형 통 안에 넣는다. 그림 3은 실험 장비의 모습을 보여준다. 송수신기는 그림 3과 같이 간격을 조정할 수 있는 횡 지지대로 고정되어 있다. 횡 지지대 때문에 송수신기는 시료 안으로 약12cm깊이에 위치하게 된다. 기타 실험에 사용된 실험 장비 및 설치 조건은 반사 계수 실험과 같다.

음속 및 감쇠계수 측정은 시료 속의 송수신기 간의 직접 전달되는 음파를 분석해서 얻어진다. 송수신기 간격을 1cm씩 늘려가며 총 13번 음파를 측정해 그 결과를 분석하고 반복 실험을 1회 수행했다. 이때 송수신기 간격의 명목상 최소길이는 5cm이고 최대 길이는 18cm로 설정하였다. 그러나 손으로 조작하는 횡 지지대의 한계상 정확하게 간격을 조절하는데 어려움이 있어 실제 송수신기 간격은 수 mm에 해당하는 오차가 발생한다. 이 오차

는 직접 송수신기 사이의 거리를 측정해 얻을 수 있다. 실제 데이터 해석에 사용된 값은 명목상의 길이가 아닌 실제 측정된 거리를 이용했다. 한편, 음속 및 감쇠계수 측정 실험을 하는 도중 수신 신호의 크기가 갑자기 줄어드는 현상을 관찰할 수 있었다. 이것은 순수하게 신호의 크기만 변화 시킬 뿐 위상에는 영향을 주지 않았다. 우리는 이 현상이 청음기를 시료에 삽입할 때 과 압력이 가해졌거나 또는 입자 매질과 청음기간의 연성효과에 의해 나타나는 일시적인 음압저하라 추측하고 있다. 이와 같은 돌연한 크기 감소가 일어났을 경우 시료와 실험 환경을 재정비하고 음파 측정 실험을 했다는 것을 밝힌다.

III. 측정 신호의 분석

측정 신호를 분석하기에 앞서 본 실험의 환경에 사용된 송수신기가 거리에 대해 구형 확산을 하는 것을 실험적으로 확인했다. 구형 확산일 때 음압 p 는 거리 r 과 $p \sim 1/r$ 의 관계를 만족한다. 데시벨로 표기하는 경우 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\log_{10} |p/p_{ref}| = -\log_{10} |r/r_{ref}| + C. \tag{1}$$

여기서, p_{ref} 와 r_{ref} 는 무차원화를 위한 참고 음압과 거리로 편의상 1 Pa과 1m를 선택했다. C는 임의의 상수이다.

우리는 수중 음속 추정을 위해 실험한 데이터를 이용해 측정값이 식 (1)의 관계식을 만족하는지 확인했다. 그림 4는 측정값을 선형 회귀 분석한 결과이다. 측정값의 기울기는 -1.013으로 -1에 가깝다. 그러므로 현 실험 환경에서 송수신기의 음파는 구형 확산을 한다고 판단할 수 있

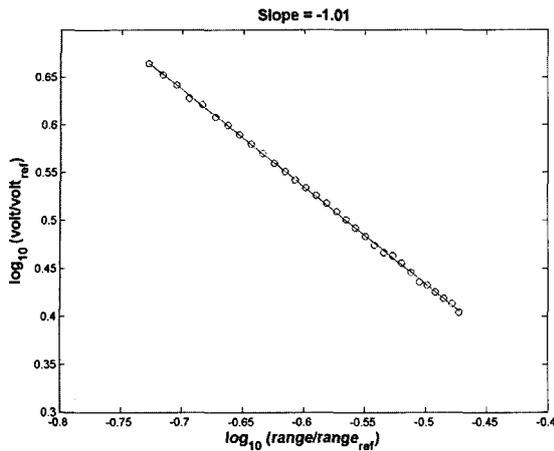


그림 4. 100kHz에서 구형 확산.
Fig. 4. Spherical spreading at 100 kHz.

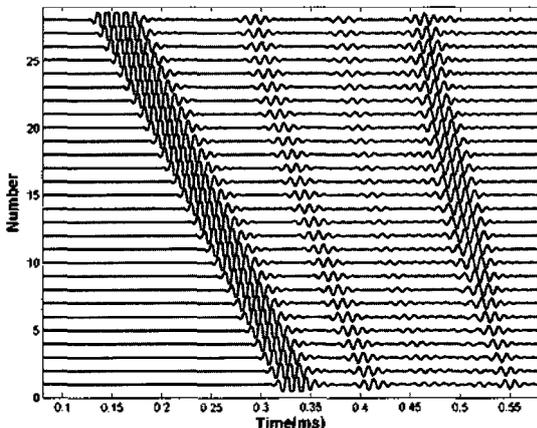


그림 5. 시료1의 반사 실험 측정 자료.
Fig. 5. Reflection experimental data of Sample 1.

다. 특별히 예시하지 않았지만 구형 확산은 음속 및 감쇠 계수의 실험 환경에서도 성립한다는 점을 밝혀둔다.

그리고, 실험 기간 중 물의 음속은 언제나 1490m/s ~1492m/s 사이를 유지했다. 우리는 최빈값인 1492m/s를 택했다. 이후 측정 자료 분석에서도 1492m/s를 물의 음속으로 사용했다.

3.1. 평면파 반사 신호의 분석

그림 5는 송수신기의 간격에 따라 측정된 반사 시계열 신호의 예이다. 그림 5에서 첫 번째 도달하는 신호는 송신기와 수신기간에 직접적으로 도달하는 신호 (direct wave)이고 두 번째 신호는 입자 매질에서 첫 번째로 반사되는 반사파이다. 세 번째 신호는 시료에 투과된 파로 시료 상자의 밑바닥을 맞고 들어오는 신호이다. 네 번째 신호는 수조의 상부 공기 면을 맞고 들어오는 신호로 여러 가지 산란 및 간섭파들에 의해 오염되어 있다.

본 실험에서 설정한 환경에서는 언제나 그림 5처럼 음파가 수신된다. 직접 들어오는 직접파 (direct wave)와

입자 매질을 맞고 들어오는 반사파는 송수신기 간격에 상관없이 언제나 시간 영역에서 분리되어 나타나도록 실험 환경을 설계했다. 나머지 파들은 그림에서 보듯 송수신기 위치에 따라 서로 간섭하기도 한다. 그림 5에서 반사파와 직접파는 정규화해서 함께 그리면 거의 구분하기 힘들만큼 같은 모양을 하고 있다. 특별한 산란에 의한 tail이나 간섭 현상을 관찰하지 못했다.

구형 확산을 고려할 때 입자 매질에서 반사되어 수신기에 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$P_R(t) = \frac{AB_{SBR}R}{r_{SBR}} F\left(t - \frac{r_{SBR}}{c} + \theta_{SBR}\right). \tag{2}$$

여기서 $P_R(t)$ 은 송신기의 위치 r_S 일 때 수신기의 위치 r_R 에서 시간 t 에 대해 들어오는 반사 신호를 뜻한다. A 는 송신기의 소스 크기, R 은 평면파 반사 계수의 절대값, r_{SBR} 은 송신기 (S)-입자 매질 경계 (B)-수신기 (R)의 경로를 가지는 반사 신호의 구형 확산 거리, $F\left(t - \frac{r_{SBR}}{c} + \theta_{SBR}\right)$ 는 최대값이 1인 펄스 형상을 나타낸다. B_{SBR} 은 S-B-R 경로에서 방향 함수 (directivity function)이다. θ_{SBR} 은 송수신기의 전달 함수 및 반사에 의해 발생하는 위상 성분을 나타낸다.

우리는 100kHz의 협대역 신호와 95kHz~105kHz의 협대역 대역통과 필터를 사용했고, 낮은 입사각 영역에서 실험을 수행했으므로 반사 계수의 절대값은 식 (2)의 시계열 신호 벡터의 임의의 성분을 취해 계산할 수 있다. 그 중에서 특별히 신호 대 잡음비가 가장 크다고 판단되는 음압의 최대값을 이용하면 반사 계수의 절대값은 다음과 같이 표현된다.

$$R \cong \frac{\max(P_R(t)) \cdot r_{SBR}}{AB_{SBR}}. \tag{3}$$

위 식에서 A 는 수신기에서 측정된 직접파 (direct wave)의 최대 음압을 이용해 표현할 수 있다. 직접파는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$P_D(t) = \frac{AB_{SR}}{r_{SR}} F\left(t - \frac{r_{SR}}{c} + \theta_{SR}\right). \tag{4}$$

여기서 $P_D(t)$ 은 송신기의 위치 r_S 일 때 수신기의 위치 r_R 에서 시간 t 에 대해 들어오는 직접파를 뜻한다. r_{SR} 은 송신기 (S)-수신기 (R)의 경로를 가지는 직접파의 구형

확산 거리, $F(t - \frac{r_{SR}}{c} + \theta_{SR})$ 은 최대값이 1인 펄스 형상을 나타낸다. B_{SR} 은 S-R 경로에서 방향 함수이다. θ_{SR} 은 송수신기의 전달 함수에 의해 발생하는 위상 성분이다.

식 (4)를 이용하면 식 (3)의 반사계수의 절대값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R \cong \frac{\max(p_R(t)) \cdot r_{SRR} \cdot B_{SR}}{\max(p_D(t)) \cdot r_{SR} \cdot B_{SRR}} \quad (5)$$

식 (5)는 자기 교정법 (Self-calibrating method)로 추정된 반사 계수의 절대값을 나타낸다. 식 (5)를 보면 전 방향의 송수신기를 사용하는 장점을 알 수 있다. 전 방향의 송수신기는 협대역 빔의 송수신기보다 얻어지는 정보량이 많다. 만약 반사파가 직접파와 간섭이 되지 않도록 실험 환경을 구성할 수 있다면 반사파와 더불어 직접파, 다중 반사파 등을 분리하여 수신할 수 있다. 이 신호들을 분석하면 송수신기의 위치 정보, Calibration, 해양의 상태 등에 대해 추가적인 정보를 얻을 수 있다.

한편 반사 손실 (reflection loss) RL 은 식 (5)를 이용해 다음과 같이 표현된다.

$$RL = -20 \log_{10} R = -20 \log_{10} \left(\frac{\max(p_R(t)) \cdot r_{SRR}}{\max(p_D(t)) \cdot r_{SR}} \right) - 20 \log_{10} \frac{B_{SR}}{B_{SRR}} \quad (6)$$

식 (6)의 두 번째 성분은 송수신기의 빔 패턴이 완전한 전 방향 (omni-directional) 일 때는 0이 된다.

3.2. 음속 및 감쇠계수 분석

그림 6는 시료 안에서 거리에 따라 측정한 신호의 양상을 한꺼번에 보여준다. 그림 6에서 보면 거리를 증가

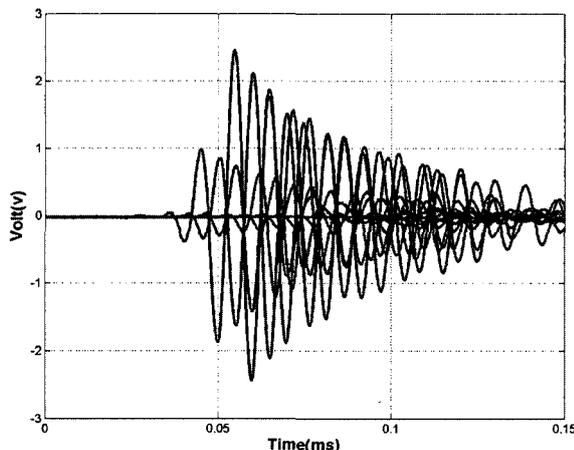


그림 6. 음속 및 감쇠계수 실험의 측정 신호 양상
Fig. 6. Eye diagram of the measured signal in the sound speed and attenuation experiment.

시킬 때마다 직접파의 도달 시간의 변화와 크기의 감소가 확연히 나타난다.

시료의 음속 (phase speed)은 직접파의 도달 시간과 송수신기 간의 거리의 비례 관계를 이용해 계산했다. 파의 형상이 변하지 않는다는 가정하에서 도달 시간 t_d 과 거리 d 는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$d = ct + C. \quad (7)$$

여기서 c 는 음속, C 는 상수이다.

사실 식 (7)은 비 분산 매질 (non-dispersive medium)에서 성립하는 식이다. 주파수에 따른 분산이 강한 매질이라면 식 (7)로 계산한 음속은 엄밀히 말해 군속도 (group wave speed)에 가까운 값이다 [19]. 그러나 입자 매질의 분산은 약한 분산 (weak dispersion)로 이고, 또한 본 실험에서는 협대역 펄스를 사용했으므로 군속도와 위상속도의 차이는 무시했다.

식 (7)을 이용해 얻어진 자료를 측정 시간과 측정 거리에 대해 선형회귀분석을 하면 직선의 기울기를 계산할 수 있고 이 값은 매질의 음속이 된다.

한편 감쇠가 있는 매질에서 음파가 전파할 때 거리 확산 손실과 더불어 감쇠 손실이 발생한다. 이때 음압을 p , 감쇠계수를 α 라 할 때 다음과 같은 식이 성립한다.

$$p \cong \frac{AB_{SR}}{r_{SR}} e^{-\alpha(f)r_{SR}} F\left(t - \frac{r_{SR}}{c} + \theta\right). \quad (8)$$

여기서 f 는 주파수, θ 는 송수신기 전달 함수의 위상이다.

식 (8)은 협대역 펄스일 때 근사적으로 성립하는 식이다. 광대역 펄스라면 감쇠계수의 주파수 의존성 때문에 스펙트럴 영역에서의 해석이 필수적이다. 식 (8)은 참고 음압을 이용해 다음과 같이 변형 된다.

$$-\ln \left(\frac{\max(p) \cdot r_{SR}}{P_{ref} \cdot r_{ref}} \right) = \alpha(f)r_{SR} + C. \quad (9)$$

여기서 C 는 일정한 상수이다. 편의상 P_{ref} 을 1Pa, r_{ref} 을 1m로 생각한다.

실험의 측정값을 식 (9)와 같이 변형한 후 선형회귀분석을 하면 기울기를 구할 수 있으며 이때 기울기는 주파수 f 에서의 감쇠계수가 된다.

IV. 음향학적 물성 계산 및 실험의 불확실성

4.1. 반사 손실의 계산 및 불확실성

식 (6)을 이용해 각 시료에 대한 반사 손실을 계산했다. 식 (6)에서 송수신기의 빔 패턴은 GRAS사에서 제공한 10CS의 수직방향 방향 패턴을 이용해 계산했다. 10CS는 전 방향의 하이드로폰으로 방위각에 따른 빔 패턴의 최대 최소의 차이가 3dB 이내로 거의 일정하다고 볼 수 있는 전 방향 송수신기이다. 실험역 실험에서는 주변소음의 영향, 전달 손실의 오차 등의 불확실성이 존재해 빔 패턴의 변화가 측정 값에 가장 중요한 오차 요인은 아니다 [18]. 그러나 주변소음의 영향이 작고 전달 손실의 오차가 날 확률이 비교적 작은 수조 실험에서는 위의 빔 패턴의 변화가 측정값의 주된 불확실성의 요인이 된다. 특히 식 (6)은 Self-calibration에 의해 계산되기 때문에 빔 패턴의 영향은 상대적으로 확대되어 나타날 수 있다.

GRAS사에서 제공한 방향 패턴은 $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 사이에서는 부드러운 빔 패턴을 보인다. 본 실험에 반사파 해석에 사용된 $28 \sim 53^{\circ}$ 의 각도는 위의 범위에 포함되며 이때 빔 패턴은 평균적으로 -3dB 이고 각도에 따른 변화는 $\pm 0.5\text{dB}$ 이내이다. 직접파의 경로에 해당하는 $\pm 90^{\circ}$ 근처는 -1.2dB 의 빔 패턴을 갖는다. 이 값을 이용해 식 (6)의 두 번째 항을 계산하면 $20 \cdot \log_{10} |B_{SR} / B_{3SR}| = 2 \times (-1.2\text{dB} - (-3\text{dB})) = 3.6\text{dB}$ 이 된다. 이 값은 송수신기가 정확히 수직으로 위치해 있다고 가정할 때 나오는 값이다. 반사 계수 실험에서 송수신기는 수직방향으로 고정된 상태로 놓여 있고 수평방향으로만 이동하기 때문에 위의 값은 신뢰성은 갖는다. 선형 스테이지로 이동한 수평 거리와 직접파를 이용해 실제 계산한 거리는 최대 1mm이내의 오차를 보였다. 그러나 송수신기의 빔 패턴이 수직 방향에 대해 완벽한 대칭성을 띄고 있지 않아 생기는 오차가 있을 수 있으며 송수신기의 고정 과정 중에 발생하는 상대적인 방위각의 오차도 존재할 수 있다. 본 실험에서는 방위각 오차의 영향은 계량적으로 확인하지 못했다. 만약 실험역 실험을 하는 경우 빔 패턴에 의한 오차를 억제하기 위해서는 보다 정확한 $\pm 1\text{dB}$ 이내의 빔 패턴의 변화를 갖는 전 방향의 송수신기를 사용해야 하며 여러 번 반사 신호를 측정하여 통계적인 값을 사용할 필요가 있다 [5][18]. 또 다른 오차 요인으로 송신기 음압 크기의 변동을 들 수 있다. Holland [19]는 실 해역 실험에서 송신기 음압의 변동이

주파수에 따라 달라지는 것을 측정했다. 그러나 본 실험에서는 송신기의 변동이 무시할 만큼 미미한 수준으로 $\pm 0.01\text{dB}$ 이내였다.

평면파 반사 손실을 계산할 때는 구형파 반사 (spherical reflection)의 효과에도 유의해야 한다 [20-21]. 구형파 효과는 임계각 근처에서 발생하며 매질 간의 음속 차이가 작은 경우 전반사 영역에까지 영향을 준다. Westwood [22]에 의하면 임계각 근처의 영역에서는 송수신기와 경계 면과의 수직높이의 합이 100λ 이상 일 때 비로소 구형파 효과가 사라진다고 기술하고 있다. 본 실험 환경도 충분히 구형파 효과가 발생할 수 있는 실험 환경이다. 그러나 본 실험에서 측정된 입사각 영역은 임계각 이전 영역에 해당되므로 구형파 효과는 무시할 수 있다. 한편, 비록 측정 신호가 오염되어 신뢰성이 낮아 발표하지 않았지만, 우리는 유사한 실험 환경에서 직접파 제거기법을 이용해 임계각 이상의 영역에서 입사파보다 반사파가 커지는 소위 '음의 반사 손실 (negative reflection loss)' 을 확인했음을 밝힌다 [8][23].

그림 7은 식 (6)을 이용해 각 시료에 따라 측정된 반사 손실을 계산한 것이다. 그림 7 (a)는 시료 1, 그림 7 (b)는 시료 2, 그림 7 (c)는 시료 3, 그림 7 (d)는 모래를 나타낸다. 이 그림은 각 시료에 대해 2번의 반사 실험 결과를 각각 그린 것이다. 그림에서 보면 $30 \sim 40^{\circ}$ 부근에서는 모든 시료에 비슷한 변동이 나타난다. 하지만 각도가 커질수록 이 패턴은 사라진다. 그래서 우리는 $30 \sim 40^{\circ}$ 부근의 변동 현상이 물리적인 현상이기 보다는 크기가 일정한 전기 및 음향학적인 상관 소음에 의한 교란으로

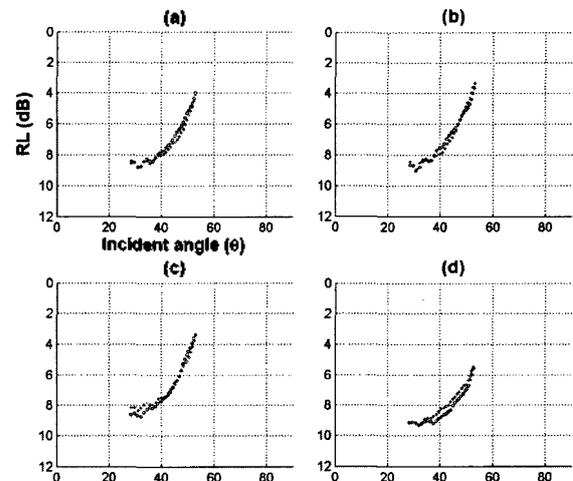


그림 7. 자기 교정법을 이용해 반사 측정 신호로부터 계산된 반사 손실: (a) 시료 1, (b) 시료 2, (c) 시료 3, (d) 모래.

Fig. 7. Reflection loss calculated from the measured reflection signal by the self-calibration method: (a) Sample I, (b) Sample II, (c) Sample III, (d) Sample IV.

표 2. 음속 및 감쇠계수의 회귀분석.

Table 2. Regression analysis of the sound speed and attenuation.

시료 종류	음속(m/s)	감쇠계수(1/m)
시료1(2.5Φ)	1808	2.40
시료2(1.5Φ)	1810	1.75
시료3(0.98Φ)	1810	0.88
시료4(1.51Φ)	1717	1.70

추측한다. 시료 1은 시료 2와 3에 비해 53°에서 반사손실이 0.5dB높게 측정되었고 시료 2는 시료 1, 3에 비해 배 부분의 곡률이 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 각도에 따른 측정값의 대략적인 경향은 시료 1-3이 유사한 것을 알 수 있다.

모래 시료는 유리 구슬 시료보다 반사 손실이 30-40° 부근에선 1dB, 50° 부근에선 2dB 더 크다. 모래가 유리 구슬보다 약한 매질에 해당한다고 볼 수 있다. 또한 50° 이후에서 반사 손실의 궤적을 관찰할 때 시료1-3과 모래는 서로 다른 음속을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 마지막으로 각 시료마다 실시한 2번의 반복 실험 사이에 변화가 나타나는 것도 흥미로운 점이다. 이 원인으로는 재 실험의 과정 중에 송수신기의 방위각에 오차가 생겼을 가능성이 있고, 두 번째는 시료를 다시 섞고 준비하는 과정 중 시료의 표면이나 내부에 교란이 생겼을 가능성이 있다. 아쉽게도 반복 실험에서 나타나는 차이는 불확실성의 오차 이내의 변화이기 때문에 차후 보다 정밀한 실험 환경에서 관찰할 필요가 있다.

4.2. 음속 및 감쇠계수의 계산 및 불확실성

음속 및 감쇠계수는 각각 식 (7)과 식 (9)를 이용해 선형회귀분석으로 구했다. 그림 8은 음속 및 감쇠계수의 선형회귀분석의 예이다. 그림에서 보듯 음속은 데이터의 상관성이 높게 측정되었으나 감쇠계수는 음속보다는 분산이 심한 것을 볼 수 있다. 음속 측정의 불확실성은 송수신기 간의 거리 오차가 주 원인이다. 수작업으로 진행하는 실험 특성 상 위의 오차는 실험자의 숙련도와 밀접한 관련이 있어 계량화하기는 힘들다. 그러나 본 실험에서 여러 번의 측정 결과를 살펴 볼 때 음속의 오차는 최대 7m/s를 넘지 않았다. 감쇠계수 측정값의 불확실성은 송수신기의 빔 패턴, 송수신기와 입자매질과의 연성 등과 관련이 깊다. 본 실험에서 사용한 기계적인 횡 방향 간격 조절 장치는 송수신기 간의 방위각의 변화까지 보장하지 않는다. 하지만 유리 구슬에 대한 과거의 감쇠

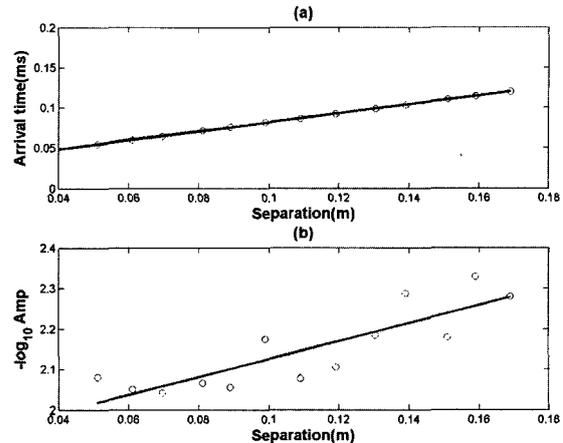


그림 8. 음속 및 감쇠계수 추정을 위한 회귀분석 (시료 1).
Fig. 8. Regression analysis of the sound speed and attenuation (Sample 1).

계수 측정 자료를 볼 때 본 실험의 측정값은 합리적이라 판단한다 [17][24].

각 시료에 대한 음속 및 감쇠계수의 측정 결과는 표 2에 기술했다. 시료 1-3의 음속은 거의 일정하게 나온다. 그러나 감쇠계수는 입자의 크기가 클수록 커지는 경향을 보인다. 이러한 경향은 이미 여러 연구자들에 의해 보고된 결과로 유체와 입자 매질간의 상대운동의 효과로 설명할 수 있다 [1][13]. 모래의 음속은 유리 구슬의 음속에 비해 낮게 나온다. 그러나 흥미롭게도 감쇠계수는 입자 크기가 비슷한 시료 2와 비슷한 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

V. 다공율, 침투율의 추정 및 반사 계수의 비교

5.1. 다공율, 침투율의 추정

본 절에서는 Biot 이론을 이용해 표 2의 음속과 감쇠계수로부터 각 시료의 다공율 (β)과 침투율 (k_s)을 추정했다. 여기에는 두 가지 목적이 있다. 첫 번째는 이론적인 반사 계수를 계산하기 위해 Biot인자 중 가장 중요한 변수인 다공율과 침투율이 필요하기 때문이고, 두 번째는 Biot 이론으로 표 1의 직접 측정한 다공율을 예측할 수 있는지 확인하기 위해서다.

Biot 이론에는 13개의 변수가 필요하다 [1]. 이들 중 공극 크기 인자는 Johnson [25]이 제안한 식을 사용하는 것이 유용하기 때문에 실질적으로 필요한 변수는 12개다. 12개중에 공극 안의 유체인 물과 관련된 변수는 쉽게 구할 수 있다. 물의 밀도 (ρ)와 점성계수는 실험

실의 온도로부터 결정할 수 있으며 물의 부피탄성계수는 물의 음속 측정값으로부터 유추할 수 있다. 입자와 관련된 변수 중 입자 밀도 (ρ_s)는 표 1에서 측정한 값을 사용했다. 입자의 부피 탄성 계수에 관해서는 Richardson [26]은 $(3.2 \sim 4.9)e+10Pa$ 의 범위에서 측정된다고 발표했다. 이 범위에서 입자 탄성 계수의 민감도는 본 논문에서 추정하려고 하는 다공율의 민감도에 비하면 작은 수준이다. 그래서 입자의 부피 탄성 계수는 규소 매질의 탄성 계수인 $3.6e+10Pa$ 를 사용했다. 다공성 프레임과 관련된 변수인 횡탄성계수, 부피탄성계수 (푸아송 비), 횡 비손실, 부피 비손실도 미지의 변수이다. 그러나 여러 연구자들의 연구에 의하면 높은 주파수 영역에서 강성이 약한 매질의 프레임 변수들은 낮은 민감도를 갖고 있다 [27]. 본 논문에서는 Costley와 Bedford가 사용한 값을 그대로 사용했다. 이들의 값은 Stoll 등이 해저 퇴적물의 음속과 밀도를 예측할 때 사용하는 범위에서 크게 벗어나지 않는다. 마지막으로 결정해야 하는 변수는 부가 질량 인자이다. 부가 질량 인자는 고주파 영역에서 다공율, 침투율 다음으로 민감도가 높은 인자이다. 부가 질량 인자는 직접 측정할 수 있는 값이나 실험 장비의 미비로 본 논문에서는 모래 입자에 사용하는 경험적인 값인 1.25를 사용했다. 부가 질량 인자의 불확실성으로 인한 오차는 다공율과 침투율 추정 오차에 반영될 수 있다. 표 3은 표 1의 입자밀도와 다공율과 침투율을 제외한 10개의 Biot인자의 값을 보여준다. Biot이론에 의한 음속과 감쇠계수 이론 식은 부록에 기술했다. 부록의 (A-2)와 (A-4)식을 이용해 다공율 및 침투율은 다음과 같은 최적화 함수의 최소값을 만족하도록 결정했다.

$$\Theta(\beta, k_s) = |\text{Re}[c_1(\beta, k_s)] - c_{1,m}| / c_{1,m} + |\alpha_1(\beta, k_s) - \alpha_{1,m}| / \alpha_{1,m} \quad (10)$$

여기서 첨자 m은 측정된 음속 및 감쇠 계수를 의미한다. 표 4는 식 (10)으로부터 추정된 다공율과 침투율을 나타낸다. 표 4의 다공율은 표 1의 직접 측정된 값과 거의 같게 나온다. 가장 큰 오차를 보이는 시료는 시료 3으로 다공율에서 약 0.06의 오차가 나타난다. 표 4의 침투율은 시료 1-3의 유리구슬에 대해서는 입자크기가 커짐에 따라 증가한다. 이러한 경향은 기존의 해저 퇴적물에 대한 측정 결과와 부합한다 [1][28].

5.2. 반사 계수의 비교

5.1절에서 추정한 다공율, 침투율 및 표 3의 Biot 인자

표 3. 다공율, 침투율, 입자 밀도를 제외한 10개의 Biot 인자.
Table 3. Ten Biot parameters excluding the porosity, the permeability, and the grain density.

Biot 인자	기호	인자 값
물 부피탄성계수	K_L	$2.22e+9Pa$
물 밀도	ρ_L	$998kg/m^3$
물 점성 계수	η	$1e-3kg/m \cdot s$
입자 부피탄성계수	K_s	$3.6e+10Pa$
프레임 횡탄성계수	μ_r	$8e+7Pa$
푸아송 비	n	0.25
횡 비손실	δ_μ	0.1
부피 비손실	δ_b	0.1
부가질량인자	τ	0.25
공극크기인자	a	$a = \sqrt{8k_s \tau / \beta}$ [25]

표 4. 추정된 다공율 및 침투율.
Table 4. Estimated porosity and permeability.

시료 종류	다공율	침투율(m^2)
시료1(2.5Φ)	0.3771	$1.16e-11$
시료2(1.5Φ)	0.3740	$2.46e-11$
시료3(0.98Φ)	0.3749	$1.22e-10$
시료4(1.51Φ)	0.4391	$5.24e-11$

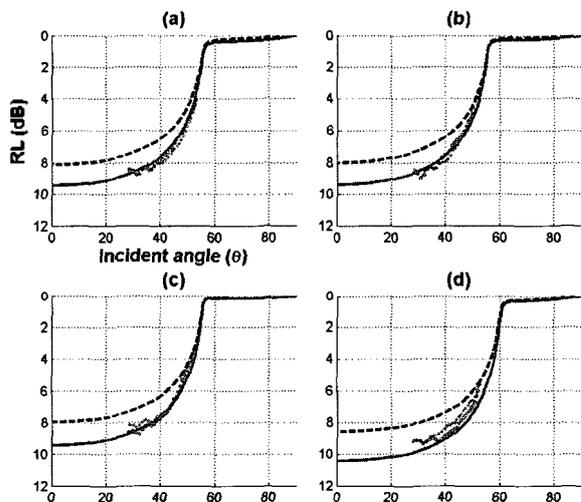


그림 9. 반사 손실 측정값과 Biot 이론에 근거한 반사 손실 예측 값의 비교: (a) 시료 1, (b) 시료 2, (c) 시료 3, (d) 모래. (실선: Biot 이론으로 예측한 이론 값, 점선: 유체 모델로 예측한 이론 값)

Fig. 9. Comparison of the measured reflection data and the theoretical reflection data predicted by Biot theory: (a) Sample I, (b) Sample II, (c) Sample III, (d) Sample IV. (Solid line: the reflection loss predicted by Biot theory, dash line: the reflection loss predicted by the fluid theory)

를 입력 값으로 사용해 Biot 이론에 의한 이론적인 반사 계수 예측 값을 계산하고 실제 측정값과 비교해 보았다. 이론적인 반사계수는 부록의 식 (A-5)와 (A-6)을 이용해 계산했다. 그림 9은 반사 계수의 비교 결과를 보여준다. 그림 9에서 기호로 표시된 그래프는 그림 8과 같은 반사 계수 측정값이며, 실선은 Biot이론에 의해 예측한

이론 값 (식 (A-5)), 점선은 유체 이론에 의해 예측한 이론 값 (식 (A-6))을 나타낸다. 그림 9에서 보면 시료 1-3의 측정값은 Biot이론에 의해 예측한 값과 잘 일치한다. 그러나 모래에 대해서는 약 0.4dB 의 불일치가 나타난다. 이 불일치는 반사 실험의 불확실성의 오차인 $\pm 0.5\text{dB}$ 내에 해당하는 값이기 때문에 실험 자체의 오차인지 실험 값 분석의 오차인지 추정하기는 힘들다. 하지만 위의 편차는 식 (6)의 빔 패턴 값을 오차 범위 내에서 조정하여 충분히 보정할 수 있는 양이며 최적화를 이용할 수도 있다.

한편 반사 계수 측정값을 유체 이론의 예측 값과 비교해 보면 곡선의 경향이나 크기에서 명확하게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 특히 낮은 입사각 영역에서 유체 이론에 의한 값은 Biot 이론에 의한 값보다 언제나 반사 손실이 1~2dB 작고 패턴이 전혀 다르다. 이와 같은 결과는 적어도 100kHz 근처의 고주파에서는 Biot 이론이 입자 매질의 음향학적 물성을 예측하는데 적합하다는 것을 실험적으로 입증한다.

VI. 결론

본 논문에서는 수조 환경에서 입자 매질 (세 종류의 유리구슬과 모래)에 대해 평면파 반사 계수 측정 실험, 음속 및 감쇠계수 측정 실험을 수행했다. 반사 실험 환경은 컴퓨터로 자동 제어되었고 음속 및 감쇠 계수 측정은 기계적 장치를 이용했고 실험 환경에 대한 불확실성이 고찰되었다.

음속 및 감쇠계수 측정 실험을 통해 각 시료에 대한 음속과 감쇠 계수를 결정하고, Biot 이론을 이용해 Biot 인자 중 민감도가 높은 다공율과 침투율을 추정했다. 추정된 다공율은 시료에서 직접 측정된 값과 거의 같다는 확인했으며 입자 크기에 따른 추정된 침투율의 거동은 기존 연구와 유사한 경향을 보인다.

추정된 값으로부터 이론적인 반사 계수를 예측하고 실험에서 측정한 반사 계수와 비교했다. 반사 계수 예측에는 Biot 이론과 유체 이론이 사용되었다. Biot 이론의 예측 값은 측정된 반사 계수와 오차 범위 내에서 매우 비슷한 경향을 보인다. 그러나 유체 이론의 예측 값은 낮은 입사각 영역에서 1~2dB에 해당하는 편차를 보인다. 이러한 결과는 고주파 영역에서 입자 매질의 세 가지 음향학적 물성 (반사계수, 음속, 감쇠계수)을 일관성

있게 Biot이론으로 설명 할 수 있다는 것을 보여준다.

부록. Biot 이론에 의한 음향학적 물리량

Biot 이론에 필요한 13가지 계수의 가호는 표 3과 5.1 절을 참고하기 바란다. 이때 Biot 탄성 계수는 다음과 같이 표현된다 [29].

$$\begin{aligned} M &= K_r / (1 - K_b / K_r + \beta(K_r / K_L - 1)) \\ C &= (1 - K_b / K_r)M \\ H &= (1 - K_b / K_r)C + K_b + (4/3)\mu. \end{aligned} \tag{A-1}$$

여기서 K_b , μ 은 다공성 매질의 고체 영역의 점탄성 효과를 고려하여 복소수 값으로 표현되며 $K_b = (1 - i\delta_b)K_{br}$, $\mu = (1 - i\delta_\mu)\mu_r$, $K_{br} = (2n/(1 - 2n) + 2/3)\mu_r$ 이다.

Biot 이론에 의해 예측되는 음파는 빠른파 (c_1), 느린파 (c_2), 횡파 (c_s)이며 다음과 같이 복소 음속으로 표현된다.

$$c_{1,2}(f) = \sqrt{\frac{(mH + \rho M - 2\rho_f C) \pm A'^2}{2(\rho m - \rho_f^2)}} \tag{A-2}$$

$$c_s(f) = \sqrt{\frac{\mu m}{\rho m - \rho_f^2}} \tag{A-3}$$

여기서 $A = (m'H + \rho M - 2\rho_f C)^2 - 4(\rho m - \rho_f^2)(HM - C^2)$ 이고 $m' = \tau\rho_f / \beta + (j\eta F(\kappa) / k_s \omega)$ 이다. $F(\kappa)$ 는 점성 보정 함수로 $F(\kappa) = -\frac{\sqrt{i\kappa}T(\kappa)}{4(1 - 2T(\kappa) / \sqrt{i\kappa})}$ 이고, $T(\kappa) = J_1(\sqrt{i\kappa}) / J_0(\sqrt{i\kappa})$, $\kappa = a\sqrt{\omega\rho_f / \eta}$ 로 표현된다. ρ 는 전체 밀도로 물의 밀도 ρ_f , 입자의 밀도 ρ_s 를 이용해 $\rho = (1 - \beta)\rho_s + \beta\rho_f$ 로 정의된다.

본 논문에서 측정한 음속은 (A-2)의 빠른파에 해당된다. 이때 감쇠계수는 아래의 식으로 표현된다.

$$\alpha_1(f) = \text{Im}\left(\frac{2\pi f}{c_1(f)}\right) \tag{A-4}$$

물/다공성 매질에서 평면파 반사 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$R(f) = \frac{\frac{\gamma}{\rho_L} \frac{(1 + A_1)\gamma_1 + B_1(1 + A_2)\gamma_2 + B_1(1 + A_3)k}{(C + MA_1 + (C + MA_2)B_2)}}{c_1^2 + c_2^2} \cdot \frac{\frac{\gamma}{\rho_L} \frac{(1 + A_1)\gamma_1 + B_1(1 + A_2)\gamma_2 + B_1(1 + A_3)k}{(C + MA_1 + (C + MA_2)B_2)}}{c_1^2 + c_2^2} \tag{A-5}$$

여기서 γ 는 물에서 음파의 수직 수, k 는 수평 파수이다. γ_j 는 다공성 매질에서 j 종의 음파의 수직 파수이고 $k^2 + \gamma_j^2 = k_j^2$ 의 관계가 있다. $k_j = \omega/c_j$ 는 음속이 c_j 인 음파의 매질 파수이다. ($j=1, 2, 3$: 빠른파, 느린파, 횡파)

$$A_{1,2} = -\frac{H - \rho c_{1,2}^2}{C - \rho c_{1,2}^2}, \quad A_3 = -\frac{\mu - \rho c_3^2}{-\rho c_3^2} \quad \text{이고,}$$

$$B_2 = -\frac{2\mu k^2[\gamma_3^2 - k^2 - 2\gamma_3\gamma_1] + k_1^2[(1-A_1)C + A_1M - H](\gamma_3^2 - k^2)}{2\mu k^2[\gamma_3^2 - k^2 - 2\gamma_3\gamma_1] + k_1^2[(1-A_2)C + A_2M - H](\gamma_3^2 - k^2)},$$

$$B_3 = \frac{2k(\gamma_1 + \gamma_2 B_2)}{\gamma_3^2 - k^2} \quad \text{로 표현된다.}$$

한편 유체 이론에 의한 반사 계수는 식 (A-2)의 복소 음속과 물이 찬 입자매질의 전체 밀도 ρ 를 이용해 다음과 같이 쓸 수 있다 [28].

$$R = \frac{\gamma' \rho_L - \gamma_1 \rho}{\gamma' \rho_L + \gamma_1 \rho} \quad \text{(A-6)}$$

감사의 글

입자 매질의 물성을 체크하는데 도움을 주신 부경대학교 김대철 교수님과 이광수씨께 감사드립니다.

참고 문헌

1. R. D. Stoll, *Sediment acoustics* (Springer-Verlag, NY, 1989).
2. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of acoustical oceanography* (Academic Press, Boston, 1998).
3. C. Park, W. Seong, and P. Gerstoft, "Geoacoustic inversion in time domain using ship of opportunity noise recorded on a horizontal towered array," *J. Acoust. Soc. Am.* **117** (4), 1933-1941, 2005.
4. C. W. Holland and J. Osler, "High-resolution geoacoustic inversion in shallow water: A joint time- and frequency-domain technique," *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (3), 1263-1279, 2000.
5. M. Isakson et al., "Acoustic reflection and transmission experiments from 4.5 to 50 kHz at the sediment acoustics experiment 2004 (SAX04)," in *Proc. Underwater acoustic measurements: technologies and results*, 2005.
6. H. P. Buckner, "Sound propagation in a channel with lossy boundary," *J. Acoust. Soc. Am.* **48** (3), 1187-1194, 1970.
7. K. Lee and W. Seong, "Hybrid depth solver for the wavenumber integration technique in an ocean with a porous bottom," (in preparation).
8. C. H. Harrison and P. L. Nielsen, "Plane wave reflection coefficient from near field measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* **116** (3), 1355-1361, 2004.
9. K. Ohkawa et al., "Acoustic backscattering from a sandy seabed," *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** (4), 700-708, 2005.
10. P. D. Mourad and D. R. Jackson, "High frequency sonar

equation models for bottom backscatter and forward loss," in *Proc. Ocean'89*, 1168-1175, 1989.

11. F. B. Jensen et al., *Computational ocean acoustics* (AIP, New York, 1994).
12. C. W. Holland, J. Dettmer, and S. E. Dosso, "A technique for measuring in-situ compressional wave speed dispersion in marine sediments," *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** (4), 748-768, 2005.
13. M. A. Biot, "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid," *J. Acoust. Soc. Am.* **28** (1), 168-191, 1956.
14. 이근화, 성우제, "지질 음향 자료의 수중 음전달 모델링 적용," *한국음향학회 17회 수중음향학 학술발표회논문집*, 87-90, 2002.
15. N. P. Chotiros, "An inversion for Biot parameters in water-saturated sand," *J. Acoust. Soc. Am.* **112** (5), 1853-1868, 2002.
16. K. L. Williams et al., "Comparison of sound speed and attenuation measured in a sandy sediment to predictions based on the Biot theory of porous media," *IEEE J. Oceanic Eng.* **27** (3), 413-428, 2002.
17. R. D. Costley and A. Bedford, "An experimental study of acoustic waves in saturated glass beads," *J. Acoust. Soc. Am.* **83** (6), 2165-2174, 1988.
18. N. P. Chotiros, "Normal incidence reflection loss from a sandy sediment," *J. Acoust. Soc. Am.* **112** (5), 1831-1841, 2002.
19. M. J. Buckingham and M. D. Richardson, "On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments," *IEEE J. Oceanic Eng.* **27** (3), 429-453, 2002.
20. C. W. Holland, "Seabed reflection measurement uncertainty," *J. Acoust. Soc. Am.* **114** (4), 1861-1873, 2003.
21. L. M. Brekhovskikh, *Waves in layered media* (Academic Press, New York, 1980).
22. E. K. Westwood, "Complex ray methods for acoustic interaction at a fluid-fluid interface," *J. Acoust. Soc. Am.* **85** (5), 1872-1884, 1989.
23. 이근화, 하용훈, 성우제, "모형 도파관에서 수중음향 실험의 설계와 측정," *한국음향학회 춘계학술발표대회 논문집*, 79-82, (2005)
24. A. Turgut and T. Yamamoto, "Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments," *J. Acoust. Soc. Am.* **87** (6), 2376-2383, 1990.
25. D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media," *J. Fluid Mech.* **176** (1), 379-402, 1987.
26. M. D. Richardson et al., "Dynamic measurement of sediment grain compressibility at atmospheric pressure : acoustic applications," *IEEE J. Oceanic Eng.* **27** (3), 593-601, 2002.
27. K. L. Williams, "An effective density fluid model for acoustic propagation in sediments derived from Biot theory," *J. Acoust. Soc. Am.* **110** (5), 2276-2281, 2001.
28. E. L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the sea floor," *J. Acoust. Soc. Am.* **68** (5), 1313-1340, 1980.
29. K. Lee and W. Seong, "A simplified pseudo-fluid model derived from Biot theory through low grazing angle approximation," *IEEE J. Oceanic Eng.* **27** (3), 651-659, 2005.

저자 약력

• 이근화 (Keunhwa Lee)

한국음향학회지 제25권 1호 참조