

부유물 농도 변화에 따른 초음파 신호의 감쇠계수 측정

Measurements of Ultrasound Attenuation Coefficient at Various Suspended Sediment Concentrations

이찬길, 최지웅[†]

(Changil Lee and Jee Woong Choi[†])

한양대학교 해양융합학과와 해양음향연구실

(접수일자: 2013년 8월 21일; 수정일자: 2013년 9월 24일; 채택일자: 2013년 9월 26일)

초 록: 하구와 연안은 육지와 근접성으로 인해 강이나 하천 등에 의한 퇴적물 공급이 외해에 비해 활발하게 이루어지는 지역으로서 때로는 고농도의 부유퇴적물이 조성되기도 한다. 부유퇴적물은 외부 작용으로부터 쉽게 환경이 변하는 특성을 가지기 때문에 부유물층 탐지 및 연구를 위해 주로 음향 장비를 이용하지만 고농도 부유물 환경에서는 음파 감쇠가 심하고, 이로 인해 음파의 이동 거리가 크게 감소한다. 따라서 부유물 환경에 대한 연구를 하기 위해서는 부유물 환경 특성과 주파수 변화에 따른 감쇠계수 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 간이수조 내에서 고품토 가루를 이용하여 다양한 농도의 부유물을 조성한 후, 초음파 대역 (3.5, 5, 7.5 MHz)에 대한 감쇠계수를 측정하였으며, 감쇠계수 모델과 비교하였다. 감쇠계수 모델의 입력인자인 부유물의 평균입자 크기를 다양하게 변화시키며 실측값과 비교한 결과 평균 입자 크기 (D50)을 기준으로 약±20% 범위 내에서 비교적 일치하였다. 이러한 오차 발생 원인은 부유물은 다양한 크기의 입자들로 구성되어 있으며, 음파 감쇠는 특정주파수에 우세한 영향을 미치는 크기의 입자 분포에 영향을 받기 때문으로 판단된다.

핵심용어: 부유퇴적물, 부니층, 초음파 대역 감쇠계수, 입자분포 특성

ABSTRACT: Coastal water including estuaries has distinctive environmental characteristics where sediments are transported and deposited by flowing river water, providing an environment in which fluid mud layers can be formed. Acoustic method is mostly used to detect or monitor the fluid mud layer. However, since sound propagating in this layer suffers severe attenuation, it is important to estimate the accurate attenuation coefficient for various concentrations of fluid mud layer for the successful use of the acoustic method. In this paper, measurement results of attenuation coefficient for 3.5, 5, and 7.5 MHz ultrasounds were presented. The measurements were made in a small-size water tank in which suspended sediment samples with various sediment concentrations were formed using kaolinite powder. The results were compared to the model predictions obtained by attenuation coefficient model in which the mean grain size (called as Mass-median-diameter, D50) was used as input parameter. There were reasonable agreements between measured attenuation coefficients and model outputs predicted using the particle range of D50 ±20%. The comparison results imply that although the suspended sediments consist of various-sized particles, sound attenuation might be greatly influenced by amount of particle with a size which has a larger attenuation than that of any particle in the suspended sediments for the frequency used.

Keywords: Suspended sediment, Fluid mud, Ultrasound attenuation coefficient, Particle size distribution

PACS numbers: 43.30.Es

1. 서 론

[†]Corresponding author: Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)
Department of Marine Sciences and Convergent Technology,
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-Ro, Sangnok-Gu, Ansan
Gyeonggi-Do 426-791, Republic of Korea
(Tel: 82-31-400-5531, Fax: 82-31-406-6458)

연안은 육지와 근접한 위치 특성으로 인해 강이나 하천 등에 의한 퇴적물 공급이 외해에 비해 활발하

게 이루어지는 지역이다. 특히 한국 서해안은 수심이 얕고 해안선의 출입이 복잡한 리아스식 해안으로 강과 하천의 유입이 상대적으로 많고, 조석간만의 차가 큰 특성을 가진다. 이러한 영향으로 인해 작은 크기의 입자들로 구성된 부유물의 운동이 활발하게 이루어지며, 때로는 부니층(fluid mud) 환경이 조성되기도 한다. 고농도 부유퇴적물은 부유 특성으로 인해 대부분의 구성성분이 실트(silt)와 점토(clay) 같은 크기가 작은 입자들이며, 일반적으로 약 1~2m의 두께로 해저면 상부에 층을 형성하면서 존재하지만, 조류 등의 외부적인 작용에 의해서 수층의 넓은 범위로 확장되기도 한다.^[1] 해양에 존재하는 고농도 부유물층을 음파가 통과할 경우 심한 음파 감쇠가 발생하여 장거리 전파를 방해할 뿐만 아니라 산란 등으로 인해 왜곡된 음향 특성 분석을 초래할 수 있다.^[2,5] 이러한 영향은 안전상 항로의 정확한 수심을 필요로 하는 선박의 운항 및 이를 위한 준설작업에 잘못된 수심 정보를 제공하여 안전 문제 및 불필요한 비용 낭비를 유발시킬 수 있으며, 부유물층 내의 오염물질 축적으로 인한 환경 문제를 발생시킬 수 있으므로 고농도 부유물 환경 특성 연구 및 탐지에 대한 관심이 지속적으로 증대되고 있다.^[4] 최근 들어 시간 소비가 많고 환경을 교란시킬 수 있는 직접 채취(direct sampling) 및 공간 분해능(spatial resolution)이 나쁜 광학적 접근법의 단점들로부터 자유로운 음파를 이용한 연구가 진행되고 있는 추세이다.^[6,7] 음파는 시·공간적 분해능이 우수하고 비간섭적(non-intrusive)인 운용 특성을 가지고 있어 외부 작용으로부터 쉽게 환경이 변화하는 부유물 특성을 연구하는데 적합하다.

음파를 이용한 부유물 특성을 파악을 위해서는 두 개의 음향 센서를 서로 마주보며 운용하는 양상태 측정 방법이 있으나 해양에서 두 개의 센서를 정밀하게 운용하는데 따른 어려움으로 인해 하나의 센서만을 사용하여 후방산란강도를 측정 후 이를 이용하는 연구가 많이 진행되고 있다.^[8-10] 후방산란강도는 부유물 농도 및 입자 크기 변화에 높은 상관성을 보이지만 부유물 농도가 증가함에 따라서 감쇠 또한 함께 증가하므로 정확한 음향자료 분석을 위해서는 매질과 운용 주파수에 대한 정확한 감쇠값이 보상되

어야 하며, 부유물의 감쇠계수에 대한 연구는 다양한 방법으로 활발하게 진행되고 있는 추세이다.^[11-14]

본 논문은 고농도 부유물 환경에서 초음파 사용시 음파감쇠 특성을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 본 논문에서는 4φ(125 μm) 이하의 작은 입자들로 이루어진 고령토(kaolinite) 가루를 이용하여 다양한 농도의 부유물층을 형성한 다음, 농도에 따른 초음파 신호의 감쇠계수 측정을 실시하였고, 실험을 통해 획득한 결과와 기존의 감쇠계수 모델과의 비교 분석을 수행하였다.

II. 감쇠계수 모델링

해양에 존재하는 부유물층은 대부분 작은 입자들로 구성되어 있으므로 상대적으로 분해능이 우수한 초음파 대역의 음파를 이용한다. 하지만 초음파 대역은 청수(pure water)에서의 감쇠뿐만 아니라 탁도 변화에 따른 감쇠 영향도 중요하다. 부유물 환경에서 초음파 대역의 감쇠 특성은 부유물을 구성하고 있는 입자 크기, 모양, 구성 성분 그리고 농도 등에 의해 크게 변화하는 양상을 보인다.^[2,7] 따라서 부유물에 의한 음파 감쇠 특성을 파악하는 것은 음향을 이용한 부유물 특성 연구에 수행되어야 할 중요한 연구 영역 중 하나이다.

부유물이 존재하는 환경에서 총 감쇠계수(total attenuation coefficient) α_t 는 식(1)과 같이 청수와 부유물에 의한 감쇠계수의 합으로써 표현할 수 있으며, 부유물에 의한 감쇠계수는 또 다시 식(2)와 같이 점성손실(viscous absorption)과 산란손실(scattering loss)의 합으로써 나타낼 수 있다.^[2]

$$\alpha_t = \alpha_w + \alpha_s, \quad (1)$$

$$\alpha_s = \alpha_{visc} + \alpha_{scat}, \quad (2)$$

여기서 α_w 는 청수에 의한 감쇠계수(단위 dB/cm)로서 3.5, 5 그리고 7.5 MHz의 주파수에서는 각각 약 0.027, 0.055, 0.122 dB/cm의 값을 사용할 수 있다.^[15] α_s 는 부유물에 의한 감쇠계수이고, α_{visc} 와 α_{scat} 는 각각 점성손실 계수와 산란손실 계수를 나타낸다.

부유물 환경에서 점성손실에 의한 영향은 식(3)과 같은 표현될 수 있으며,^[3]

$$\alpha_{visc} = \frac{kM}{2\rho_s} (\sigma - 1)^2 \left(\frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right), \quad (3)$$

여기서 k 와 M 은 각각 사용 음파의 파수(wave number)와 질량농도(mass concentration), σ 는 ρ_s/ρ_w 로서 ρ_s 와 ρ_w 는 각각 매질과 부유물의 밀도를 나타낸다. s 는 $(9/4\beta r_s)(1+(1/(\beta r_s)))$, δ 는 $0.5(1+(9/2\beta r_s))$ 이고, β 는 $\sqrt{\omega/(2v)}$ 로서 표현되며 ω 와 v 는 각각 각주파수(angular frequency)와 매질의 동점도(kinematic viscosity)를 나타낸다. 또한 r_s 는 부유물을 구성하고 있는 입자의 평균 반지름이다.

산란손실에 의한 감쇠계수는 식(4)로부터 예측 가능하다.^[16]

$$\alpha_{scat} = \frac{1.5M}{r_s \rho_s} \frac{0.29x^4}{0.95 + 1.28x^2 + 0.25x^4}. \quad (4)$$

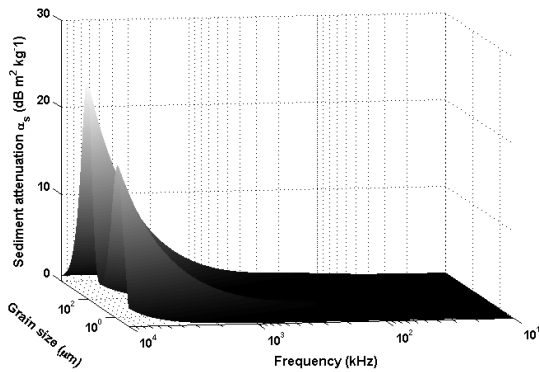


Fig. 1. Attenuation coefficient predictions as functions of sediment particle size and frequency.

Table 1. Input parameters used to estimate the attenuation in suspension.

Parameter	Value
Frequency (MHz)	3.5, 5, 7.5
Mean particle size (μm)	24
Mass concentration (g/l)	0-100
Sediment density (g/m ³)	2.65
Water density (g/m ³)	1.00
Water temperature (°C)	24.2

여기서 x 는 $(kr_s)/2$ 이다. Fig. 1은 Table1의 입력인자를 바탕으로 식(3)과 (4)를 이용하여 주파수와 부유물 입자 크기의 함수로서 표현된 부유물층에서의 음파 감쇠계수 모델링 결과이다. 부유물에 의한 감쇠계수는 주파수와 부유물을 구성하고 있는 입자 크기 변화에 의해 변동하는 특성을 보인다. 감쇠계수는 주파수가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 수 MHz 이상의 초음파 대역에서는 주파수 증가에 따른 감쇠계수 증가 폭이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 부유물을 구성하고 있는 입자 크기 변화에 대한 감쇠계수 변화는 증가하였다가 감소하는 양상이 모든 주파수 대역에서 각각 두 번씩 나타나는 특성을 보이고 있다. 이는 점성손실과 산란손실에 영향을 미치는 입자 크기가 다르기 때문이다. 즉, 비교적 작은 입자에서는 점성손실에 의한 영향이 우세하다가 입자의 크기가 커질수록 점성손실에 의한 영향은 줄고 산란손실에 의한 영향이 증가하는 특성을 보인다.^[7] 이로 인해 입자 크기 변화에 따라서 감쇠계수는 항상 두 개의 모드(mode)를 가지게 되며, 이러한 양상은 주파수에 변화에 상관없이 나타나지만 주파수가 낮아질수록 부유물에 의한 감쇠 영향은 크게 줄어들게 된다.

Fig. 2는 부유물의 농도가 10 g/l일 때, 3.5, 5 그리고 7.5 MHz 주파수에서 부유물과 청수에 의한 감쇠계수 비를 나타낸다. 주파수가 증가할수록 부유물에 의한 감쇠계수가 점차 증가하나, 청수에 의한 감쇠

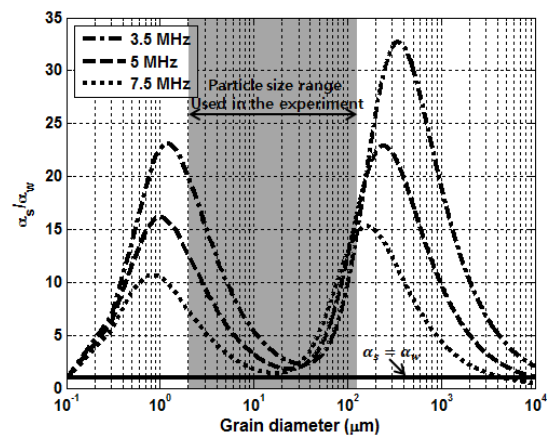


Fig. 2. The attenuation coefficient ratio of water and sediment predicted for the case of 10 g/l of suspended sediment concentration.

계수도 주파수가 증가함에 따라 역시 증가한다. 주파수 변화에 따른 감쇠계수 증가 폭은 부유물에 비해 청수에서 상대적으로 크지만 부유물의 농도가 약 10 g/l 일 경우를 기준으로 부유물에 의한 감쇠계수는 청수에 의한 감쇠계수와 비교할 때 주파수 3.5, 5 그리고 7.5 MHz에 대해 각각 최대 약 33, 23, 15 배 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 고농도의 부유물 환경에서 수 MHz 대역은 청수와 비교할 때 매우 큰 감쇠가 발생하여 음파의 장거리 전파가 불가능할 것이라는 것을 의미한다. 또한 부유물을 구성하고 있는 입자 크기에 따라서 점성손실과 산란손실 특성이 달라진다. 예를 들어, 3.5, 5 그리고 7.5 MHz에서 점성손실과 산란손실이 가장 클 때의 입자 크기는 각각 1.3, 1.1, 0.9 μm 와 350, 245, 163 μm 로써 주파수가 증가할수록 감쇠에 영향을 주는 입자의 크기가 점차적으로 작아지는 특성을 보인다.

III. 감쇠계수 측정 실험

부유물 농도에 따른 감쇠계수 측정을 위해 수중펌프가 외부에 부착된 42×10×20 cm 크기의 소형 아크릴 모형 안에 3.5, 5, 7.5 MHz 초음파 센서(A381S, A308S, A321S, PANAMETRICS, Waltham, MA, USA)를 설치한 뒤, 부유물의 농도 변화에 따른 초음파 신호의 감쇠계수 측정을 실시하였다(Fig. 3). 초음파 센서는 아크릴 모형의 양끝 단에서 41.5 cm의 거리를 유지한 채 서로 마주보게 설치하였다. 또한 부유물이 전 수층 내에서 균질하게 분포하는 환경을 조성하기 위하여 수중펌프로부터 연결된 플라스틱 관을

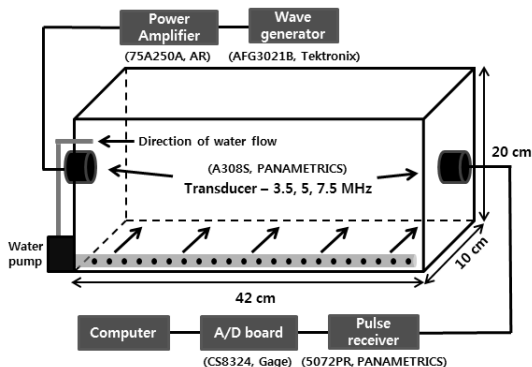


Fig. 3. Experimental layout.

아크릴 수조 바닥을 가로질러 설치하였고, 플라스틱 관의 양쪽에 일정 간격으로 작은 구멍들을 뚫어 펌프로부터 분출되는 물이 수조 내로 균질하게 섞이도록 하였다.

부유물의 농도 변화에 따른 초음파 신호의 감쇠계수 측정 전에 부유물이 공간적으로 균질하게 섞이는지에 대한 검증 실험을 먼저 실시하였다. 실험 시 부유물의 농도를 1g/l 조절하기 위해 필요한 시료의 양은 약 6.3 g으로써 시료의 무게는 정밀저울을 이용하여 계산하였다. 실험에 사용된 고령토 가루를 이용하여 20, 40, 60, 80, 100 g/l의 농도가 되도록 환경을 조성한 뒤, 수중펌프 가동 후 세 지점(센서와 동일 수심의 10, 20, 30 cm 위치)에서 피펫(pipet)을 실시하여 실질 농도를 파악하였다. 그 결과 공간적으로는 최대 약 1.2 g/l 이내의 오차로 균질한 환경이 조성되지만, 투입한 시료의 일정 양이 바닥에 가라앉으므로 인해 투입된 시료의 양에 비해 낮은 농도의 환경이 조성되었다. 이에 따라 매 실험 시 각각의 농도마다 음향 실험을 실시하기 전에 피펫을 수행하여 실질 농도를 파악하였다.

감쇠계수 실험은 각각의 주파수 별로 2회씩 실시하였다. 중심 주파수가 각각 3.5, 5, 7.5 MHz인 센서로부터 파형 발생기(AFG3021B, Tektronix, Beaverton, OR, USA)를 사용하여, 펄스 길이(pulse length)가 2 μs 인 연속파(continuous wave) 신호를 생성한 뒤, 증폭기(75A250A, Amplifier Research, Bothell, WA, USA)를 통해 증폭된 신호를 1초당 2 ping씩 송신하였다. 송신된 신호는 Pulse/receiver(5072PR, PANAMETRICS, Waltham, MA, USA)를 통해 주파수에 따라 0 ~ 10 dB 사이에서 증폭된 뒤, 50 MHz로 샘플링 되어 각 셋(set)마다 100 ping씩 저장되었다. 실험 시 발생하는 수온 변화 관측을 위해 수조 내에 온도계(TESTO 735-1)를 설치하였다. 그 결과, 실험 초기 수온은 약 23.4°C이었으나 점차 증가하여 실험 후반에는 약 25.1°C까지 상승하였다. 온도가 증가한 이유는 수중펌프를 가동할 때 발생하는 열에 의한 영향으로 부유물이 수중펌프를 통해 순환되면서 수온 증가가 발생한 것으로 판단된다.

부유물 농도 범위는 0~100 g/l로 설정하였지만, 피펫 분석 결과 실험 시 실질 농도는 0~51.3 g/l로써 약

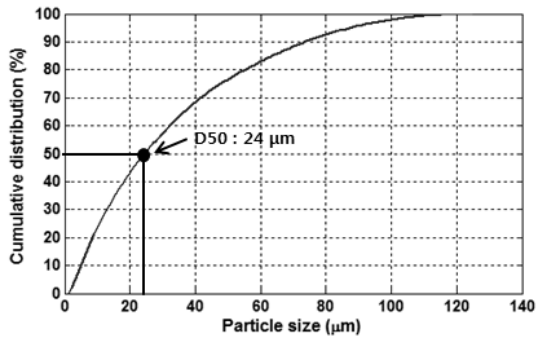


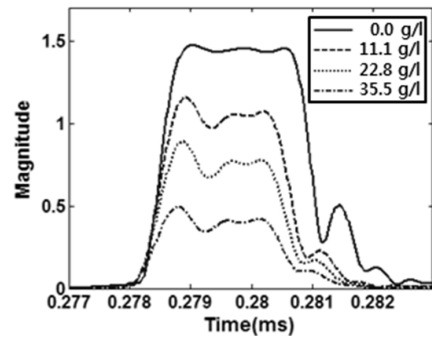
Fig. 4. Cumulative distribution of kaolinite particle size.

50%의 고령토 입자만이 부유되어 전 수층에서 균질하게 분포하는 것으로 분석되었다. 실험에 사용된 고령토는 4ϕ ($125\ \mu\text{m}$) 이하의 작은 입자들로 구성되어 있다. 정확한 입자 크기 특성을 확인하기 위해 입도 분석을 수행하였고, 그 결과 D_{50} (cumulative distribution = 50%)은 약 $24\ \mu\text{m}$ 인 것으로 분석되었다(Fig. 4). 이 결과는 감쇠계수 모델링 입력 인자로 사용되었다.

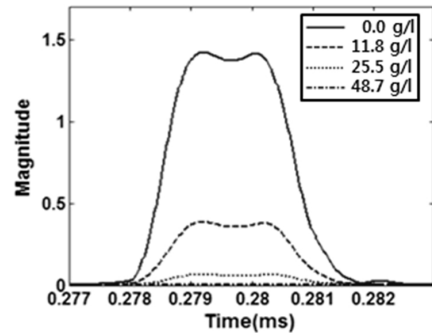
IV. 실험결과 및 토의

산출된 감쇠계수는 부유물이 섞이지 않은 청수에서 수신된 신호 준위와 부유물층에서 수신된 신호 준위의 데시벨(decibel) 차이로부터 계산되었다. 기준이 되는 청수에서의 감쇠계수는 측정상의 어려움으로 인해 직접 측정하지 않고 Krautkrämer의 식을 이용하여 계산된 값을 적용하였다.^[15]

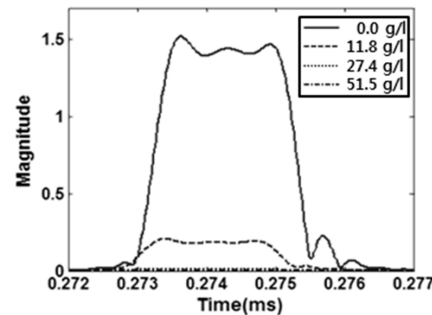
Fig. 5는 부유물 농도 증가에 따른 주파수 별 수신 신호를 나타내며, 대역통과 필터(band pass filter)를 통과시킨 후 포락선(envelope)을 취한 결과로써 부유물 농도 변화에 따른 신호의 에너지 감쇠 특성을 보여준다. 주파수가 증가할수록 부유물 농도 증가에 따른 수신신호의 에너지 감쇠로 인해 수신신호의 크기가 급격히 감소하는 경향을 보인다. 예를 들어 실질농도가 유사한 경우인 3.5 MHz의 11.1 g/l, 5 MHz의 11.8 g/l, 7.5 MHz의 11.8 g/l 수신신호는 청수에서의 수신신호 크기에 비해 각각 약 28, 73, 87 % 감소한 것을 확인할 수 있다. 정확한 감쇠계수 산출을 위해 실험 결과에 영향을 줄 수 있는 환경에 대한 오차 분석을 수행하였다. 분석 결과에 영향을 줄 수 있는 요인은 총 두 가지로서 각각 시스템과 농도에 의한 오차



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Amplitude changes of the received signals with varying suspended sediment concentration for the frequencies (a) 3.5 MHz, (b) 5 MHz and (c) 7.5 MHz.

이다. 먼저 시스템 오차는 초음파 센서로부터 송신되는 신호의 안정성 분석으로부터 평가되었다. 본 실험에서는 청수에서 송·수신된 각각의 주파수에 따른 100 핑에 대한 신호를 바탕으로 시스템의 안정성을 평가하였으며, 평가 결과 모든 주파수 대역에서 약 0.1 dB 이내의 변화폭을 보이면서 신호가 수신되었으며, 이러한 결과로부터 시스템은 매우 안정적이었음을 확인하였다. 또한 실험이 실시되는 간이수조 내에서 실험 전 일정 농도마다 피펫을 수행하였으며, 그 결과 부유물의 농도는 약 1.2 g/l의 오차를 가

지고 공간적으로 균질하게 섞이는 것을 확인하였다. 본 실험에서 사용된 3.5, 5, 7.5 MHz의 주파수에서 부유물의 농도가 1.2 g/l 변화할 때 발생하는 감쇠계수 오차는 실험 시 가장 큰 부유물 농도였던 약 51 g/l에서조차도 각각 약 0.003, 0.004, 0.009 dB/cm 인 것으로 계산되며, 따라서 무시 가능한 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 부유물의 농도에 따른 감쇠계수 모델링 결과와 실험을 통해 측정된 감쇠계수 결과의 비교이다. 모든 주파수에서 모델링과 실험 결과의 양상이 비교적 유사하게 나타나며 특히 7.5 MHz에서 가장 잘 일치하였다. 주파수 3.5 MHz 경우는 모델링 결과에 비해 측정치가 약간 낮으나, 주파수 5 MHz 경우는 실험값이 모델링 결과에 비해 약간 높게 나타나는 서로 반대되는 양상을 보인다. 이러한 상반되는 결과의 원인은 앞서 언급한 시스템 및 부유물 농도 오차만으로는 설명하기 힘들다. 이러한 오차들은 모든 주파수 및 농도에 대해 대부분 일정하게 한 방향으로 편향(bias)되거나 랜덤하게 작용하기 때문에 특정 주파수에 대해 반대되는 양상에 대한 설명으로는 충분하지 않다. 앞에서 언급한 바와 같이 부유물 입자 크기에 따라서 모든 주파수 대역에서 각각 두 번의 감쇠계수 모드가 존재하며, 본 실험에서 사용된 주파수 및 부유물 입자 크기 분포 범위(4~10 ϕ)에서는 감쇠계수가 점성손실 감소에 의해 감소하다가 산란손실 증가에 의해 다시 증가하는 경향을 보인다. 3.5, 5 그리고 7.5 MHz에서 감쇠계수 기울기가 0이 될 때 즉, 음에서 양으로 변화할 시점의 입자 크기는 농도와는 무관하게 각각 약 34, 25, 17 μm 이다. 또한 모든 주파수에서 부유물의 농도가 증가할수록 감쇠계수가 선형적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 10 g/l의 농도

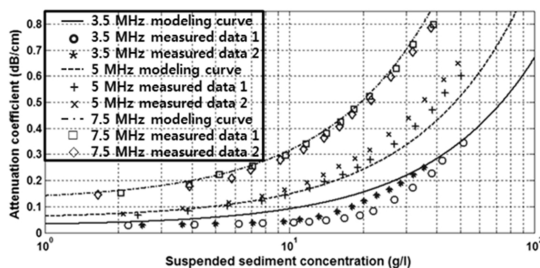


Fig. 6. Comparison between predictions and measurements of the attenuation coefficient as a function of suspended sediment concentration.

에서 3.5 MHz와 7.5 MHz의 감쇠계수는 각각 약 0.1 dB/cm, 약 0.3 dB/cm 지만, 20 g/l에서는 각각 약 0.15 dB/cm, 약 0.5 dB/cm 로 나타난다. 3.5 MHz는 농도가 10 g/l 증가할 때 감쇠계수가 약 0.05 dB/cm 증가하였지만, 7.5 MHz는 0.2 dB/cm 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 주파수가 증가할수록 부유물의 농도 변화에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 입자 크기를 변화시키며 모델링을 수행한 뒤 실험값과 비교한 결과이다. 모델링에 사용된 입자 크기는 각각 D40, D50, D60 그리고 D70에 해당하는 18, 24, 32, 42 μm 이다. Fig. 7(a)-(c)는 각각 3.5, 5, 7.5 MHz에 대한 비교 결과로써 3.5 MHz는 18 μm 와 32 μm 사이의 입자 크기 범위에서는 감쇠계수가 점차 감소하는 경향을 보이다가 42 μm 에서는 증가하는 특성을 보이고, 5 MHz는 18 μm 와 24 μm 사이의 입자 크기 범위에서는 감쇠계수 특성이 감소하다가 32 μm 부터는 다시 증가하며, 7.5 MHz는 18 μm 에서 42 μm 까

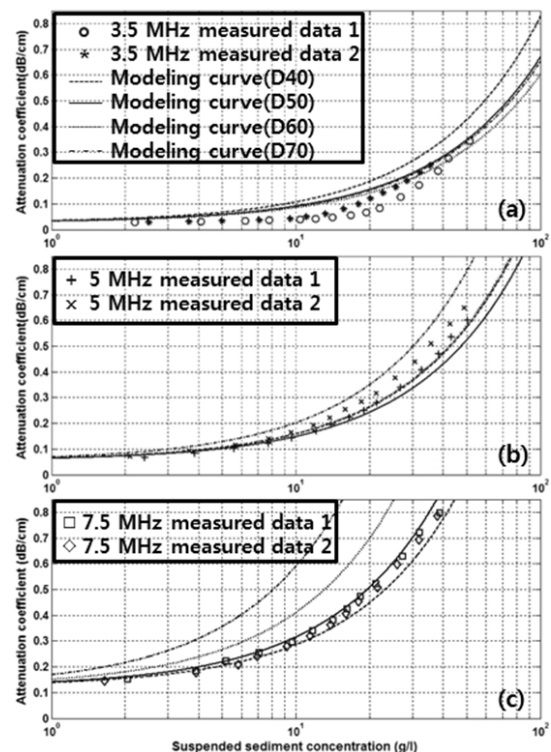


Fig. 7. Comparison between measurements of the attenuation coefficient and the predictions obtained using several particle sizes, as a function of suspended sediment concentration, for the frequencies (a) 3.5 MHz, (b) 5 MHz and (c) 7.5 MHz.

지 입자 크기가 커짐에 따라서 감쇠계수도 함께 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 감쇠 계수의 증감 반전은 각각의 주파수마다 감쇠계수 기울기가 0이 될 때의 입자 크기인 약 34, 25, 17 μm 에서 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 부유물의 분포가 단일 크기로 이루어지지 않고 일정한 크기 분포를 가질 경우 평균크기나 D50에 해당하는 입자크기로 부유물층을 묘사하는 것이 부유물층에서의 음파 감쇠를 예측하는데 적절치 않을 수도 있음을 의미한다. 비록 3.5 MHz에서는 측정값이 모델 예측 값들에 비해서 약간 낮았지만 전반적으로 주파수 3.5, 5, 7.5 MHz에 대해서 각각 약 18~32, 24~42, 18~24 μm 의 입자 크기 범위 내에서 모델링 결과와 유사한 경향을 보였다.

같은(또는 유사한) 부유물 농도에 대해 주파수 3.5와 5 MHz의 경우 약 15 g/l 이후부터 첫 번째 측정 결과가 두 번째 측정 결과에 비해 약간 낮게 측정되었다(Fig. 7). 이러한 이유는 모든 실험 셋 마다 부유물을 새롭게 조성한 뒤 측정을 진행하였으므로 이로 인해 매 실험마다 입자 크기 분포 특성이 조금씩 달라졌기 때문으로 판단된다. 특히 3.5 MHz는 감쇠계수가 가장 낮은 경우인 감쇠계수 기울기가 0인 입자 크기를 기준으로 예측된 모델 결과보다도 약 4~20 g/l의 농도 구간에서 약간 낮은 감쇠계수를 보이는 것을 확인할 수 있다[Fig. 7(a)]. 이러한 이유는 실험에 사용된 고령토 가루는 다양한 크기의 입자들로 구성되어 있고, 각각의 주파수마다 영향을 받는 부유물의 입자 크기가 다르기 때문이다. 3.5 MHz는 실험에 사용된 주파수중에서 가장 저주파수이며, 펌프를 가동하여 균질한 환경을 조성하여도 입자 크기에 따라서 부유하는 정도가 다를 것이며, 이러한 실험적 오차로 인해 3.5 MHz의 실험 결과가 모델값에 비해 비교적 낮은 측정값이 나온 것으로 판단된다.

모델 입력인자로 사용된 고령토 가루의 입자 크기는 조성된 각 부유물 층에 대해 반복적인 입도 분석을 통해 하나의 평균값으로써 계산되었다. 반복적으로 입도 분석을 실시하였을 때, 입자 크기 분포 히스토그램(histogram)은 유사하지만 각각의 ϕ 별 입자의 분포 양은 조금씩 다른 것을 확인하였으며, 이러한 원인이 실험 결과에 영향을 미쳤을 수도 있었을 것

으로 판단된다.

매우 작은 입자들로 구성된 해양에 존재하는 고농도의 부유물층에 대한 연구는 분해능이 우수한 초음파 대역의 음향 신호가 주로 사용되지만, 심한 감쇠로 인해 농도에 따라서는 수 cm 이내에서 모든 에너지가 소멸하기도 한다. 음파를 이용한 측정 방법 중에서 후방산란강도는 측정이 비교적 간단하고, 부유물의 특성을 파악하는데 유용하며, 일반적으로 부유물의 농도와 음파의 후방산란강도는 비례되는 경향을 보인다. 하지만 일부 선행 연구 결과들에서 부유물의 농도와 후방산란강도가 비례하는 특성을 보이다가, 일정 농도 이후부터는 농도가 증가하여도 후방산란강도가 더 이상 증가하지 않고 일정하거나 오히려 감소하는 경향을 보이는 것을 보고 하였다.^[4-5] 이러한 이유는 후방산란강도뿐 아니라 부유물의 감쇠계수도 농도에 따라 증가하며, 일정 농도 이후부터는 후방산란강도의 증가에 비해 부유물에 의한 감쇠 영향이 더욱 커지기 때문으로 정확한 산란강도 산출을 위해서는 부유물 농도에 따른 올바른 감쇠계수 보상이 이루어져야만 한다.^[4]

Fig. 8은 참고문헌 4에서 제시된 5 MHz 주파수 대역의 부유물 농도 변화에 따라 측정된 후방산란강도이다(자세한 내용은 참고문헌 4 참조). 후방산란강도 측정과 감쇠 계수 측정이 개별적으로 서로 다른 날짜에 수행되었고, 사용된 부유물 또한 측정 때마다 새롭게 조성되었다. 하지만, 동일한 방법으로 조성된 부유물 시료를 사용하였으므로, 후방산란 강도를 산출을 위한 전달손실 보정에 본 실험에서 도출

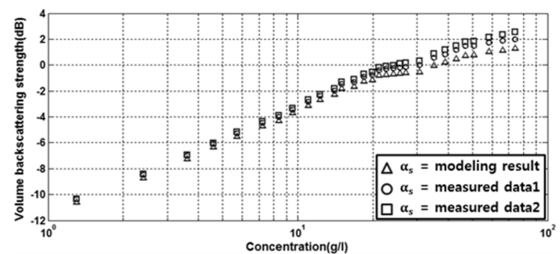


Fig. 8. Volume backscattering strengths as a function of suspended sediment concentration. Circle and square indicate the volume backscattering strengths corrected by the measured sediment attenuations, and triangle indicates the volume backscattering strengths corrected by the sediment attenuation predicted using the grain size corresponding to D50.

된 감쇠계수를 이용하여 후방산란 강도를 계산한 후 (Fig. 8의 원과 네모), 평균 입자크기를 감쇠계수 모델에 대입하여 계산한 후방산란 강도(세모)와 비교하였다. 이를 위해 선형내삽법(linear interpolation)을 이용하여 측정된 감쇠계수로부터 각각의 후방산란강도에 해당하는 감쇠계수를 산출하였다. Fig. 8에서 평균 입자크기를 사용하여 계산된 후방산란 강도는 약 20 g/l의 부유물 농도를 기준으로 증가 기울기가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 참고문헌 4에서는 이러한 오차 원인으로 부유물이 특정 크기의 단일입자가 아닌 입자크기 분포를 가지고 존재하기 때문으로 보았다. 실제로 본 논문에서 제시된 5MHz의 감쇠계수를 전달손실에 대입하여 계산된 후방산란의 경우 20 g/l 농도 이후에서의 후방산란강도 기울기 감소 경향이 상당히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 부유물 환경에 대한 음파 전달 연구를 수행하기 위해서는 해당 환경 부유물 입자분포 파악 및 이에 따른 감쇠계수 특성 파악이 선행되어야 함을 보여준다.

V. 결 론

본 연구에서는 입자 크기가 단일분포 특성을 갖는 고령토를 이용하여 부유물의 농도 증가에 따른 초음파 신호의 감쇠계수를 측정하고, 모델링 결과와의 비교를 수행하였다. 결과적으로 (Fig. 7에서 보여주듯이) 입자 크기가 약 D40과 약 D70 사이에서 실험과 모델링 결과가 유사한 경향을 보였다. 본 논문에서 사용된 감쇠 계수 모델은 입력인자로 부유물의 평균 입자 크기를 사용한다. 하지만 해양에 존재하는 부유물은 다양한 크기를 가진 입자들로 구성되어 있으며, 부유물층에 의한 음파 감쇠는 입자 크기와 주파수에 따라 크게 변동함으로 다양한 크기의 입자들로 구성된 부유물층을 하나의 평균값으로 대표할 경우 오차가 야기될 수 있다. 입자크기 분포 특성은 모드수에 따라서 단일분포(monomodal), 쌍봉분포(bimodal), 다봉분포(multimodal) 등으로 구분할 수 있다. 단일분포는 하나의 모드값을 가지기 때문에 D50에 해당하는 입자 크기를 사용하여도 오차가 크지 않을 수도 있지만 두 개 이상의 모드를 갖는 쌍봉분포 및 다

봉분포에서는 하나의 D50 값이 모든 최빈값을 대표할 수 없을 것이다. 예를 들어, 두 개의 모드 사이에 가장 적은 양이 존재하고 있는 입자 크기가 D50에 해당하는 입자 크기가 될 수 있으며 이를 감쇠계수 모델의 입력인자로써 사용할 경우 감쇠계수 오차를 발생시키는 원인이 될 것으로 판단된다. 향후 단일분포 외에 다양한 입자 분포 특성을 갖는 부유물 환경에 대한 연구 수행을 통하여 부유물 입자분포에 따른 음파 감쇠 영향을 지속적으로 파악하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 바탕으로 수행되었습니다(계약번호: 2010-0022815).

References

1. G. C. Kineke, R. W. Sternberg, J. H. Trowbridge, and W. R. Geyer, "Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf," *Cont. Shelf Res.* **16**, 667-696 (1996).
2. S. D. Richards, A. D. Heathershaw, and P. D. Thorne, "The effect of suspended particulate matter on sound attenuation in seawater," *J. Acoust. Soc. Am.* **100**, 1447-1450 (1996).
3. S. D. Richards, T. G. Leighton, and N. R. Brown, "Visco-inertial absorption in dilute suspensions of irregular particles," *Proc. R. Soc. Lond. A* **459**, 2153-2167 (2003).
4. C. Lee and J. W. Choi, "5-MHz volume backscattering strength measurements from suspended sediment concentrations" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **32**, 14-26 (2013).
5. H. K. Ha, W. -Y. Hsu, J. P. -Y. Maa, Y. Y. Shao, and C. W. Holland, "Using ADV backscatter strength for measuring suspended cohesive sediment concentration," *Cont. Shelf Res.* **29**, 1310-1316 (2009).
6. G. P. Holdaway, P. D. Thorne, D. Flatt, S. E. Jones, and D. Prandle, "Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration," *Cont. Shelf Res.* **19**, 421-441 (1999).
7. H. K. Ha, J. P.-Y. Maa, K. Park, and Y. H. Kim, "Estimation of high-resolution sediment concentration profiles in bottom boundary layer using pulse-coherent acoustic Doppler current profilers," *Mar. Geol.* **279**, 199-209 (2011).
8. D. M. Admiraal and M. H. Garcia, "Laboratory measurement of suspended sediment concentration using an Acoustic Concentration Profiler (ACP)," *Experiments in Fluids*, **28**,

- 116-127 (2000).
9. D. Perkey, T. Pratt, N. Ganesh, "Comparison of SSC measurements with acoustic backscatter data : West bay sediment diversion, Mississippi river," 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas (2010).
 10. H. Chanson, M. Takeuchi, and M. Trevethan, "Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary," J. Environ. Manage. **88**, 1406-1416 (2008).
 11. D. M. Hanes, "On the possibility of single-frequency acoustic measurement of sand and clay concentrations in uniform suspension," Cont. Shelf Res. **46**, 64-66 (2012).
 12. G. He, Y. Mao, and W. Ni, "A new fractal modification of ultrasonic attenuation model for measuring particle size in mineral slurries," Int. J. Miner. Process. **82**, 119-125 (2007).
 13. J. Sessarego, and R. Guillermin, "High-frequency sound-speed, attenuation, and reflection measurements using water-saturated glass beads of different sizes," IEEE J. Ocean. Eng. **37**(3), 507-515 (2012).
 14. M. Su, M. Xue, X. Cai, Z. Shang, and F. Xu, "Particle size characterization by ultrasonic attenuation spectra," Particology, **6**, 276-281 (2008).
 15. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials, 4th edn* (Springer, New York, 1990).
 16. P. D. Thorne, and R. Meral, "Formulations for the scattering properties of suspended sandy sediments for use in the application of acoustic to sediment transport processes," Cont. Shelf Res. **28**, 309-317 (2008).

저자 약력

▶ 이 찬 길(Changil Lee)



2009년 2월: 강원대학교 물리학과(이학사)
 2011년 2월: 한양대학교 해양환경과학과(이학석사)
 2011년 3월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합과학과 (박사과정)

▶ 최 지 웅(Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 지구해양과학과(이학사)
 1998년 2월: 한양대학교 지구해양과학과(이학석사)
 2002년 8월: 한양대학교 지구해양과학과(이학박사)
 2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate
 2004년 ~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원
 2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합과학과 부교수