

5 MHz 신호를 이용한 부유물의 농도에 따른 후방산란강도 측정

5-MHz Volume Backscattering Strength Measurements from Suspended Sediment Concentrations

이찬길, 최지웅[†]

(Changil Lee and Jee Woong Choi[†])

한양대학교 해양융합과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2012년 8월 6일; 수정일자: 2012년 10월 8일; 채택일자: 2012년 11월 10일)

초 록: 연안 및 하구지역은 퇴적물의 침식, 부유, 이동이 활발하게 이루어지며, 이로 인해 유성머드와 같은 고농도의 부유퇴적물 환경이 조성된다. 유성머드는 주로 실트, 점토와 같이 매우 작은 입자들로 이루어져 있는 10 g/l 이상의 고농도 환경으로써, 유성머드의 분포 및 특성 파악을 위해 초음파와 같이 분해능이 우수한 높은 주파수 특성을 이용한 연구가 필요하다. 음파가 부유퇴적물에 의해 산란될 때, 부유퇴적물의 농도가 높아질수록 후방산란강도의 세기가 증가하지만, 점성 및 산란에 의한 감쇠도 함께 증가하기 때문에 농도에 따른 올바른 감쇠계수 보상이 요구된다. 본 논문에서는 5 MHz 주파수 특성을 바탕으로 간이 수조에서 농도에 따른 가상의 유성머드 환경을 조성한 뒤, 후방산란강도를 측정하였다. 또한 Richards의 감쇠계수 모델을 이용하여 부유물의 특성 및 농도에 따른 감쇠계수를 계산하였고, 이를 후방산란강도를 계산하는 소나방정식에 적용하여 부유물 농도에 따른 후방산란강도를 예측하였다. 그 결과 부유물에 의한 감쇠를 보상하지 않았을 경우 부유물 농도 증가에 따라 후방산란강도 값이 함께 증가하는 경향을 보이다가 일정 농도(20 g/l) 이후부터는 부유물의 농도가 증가하여도 후방산란강도가 더 이상 증가하지 않았다. 반면, 농도에 따른 감쇠계수를 보상해 주었을 경우는 부유물 농도 증가에 따라 후방산란강도가 연속적으로 증가하였다. 이러한 결과는 고농도의 부유퇴적물 환경에서 음파에 의한 산란강도를 정확히 예측하기 위해서는 부유물 농도에 따른 감쇠효과 고려가 필요함을 보여준다.

핵심어: 부유퇴적물 농도, 유성머드, 후방산란강도, 감쇠계수

ABSTRACT: The erosion, suspension, and transport of sediment frequently occur in the coastal waters and estuarine. These processes often generate the so-called fluid mud layer, which is defined as a high-concentration aqueous suspension of fine grained sediment (> 10 g/l), consisting mainly of silt and clay-size particles. Therefore the high-resolution ultrasound is mostly used to detect or monitor the fluid mud layer. Because the sound attenuation tends to increase rapidly with the suspended sediment concentration, it is necessary to consider the accurate attenuation correction to estimate the backscattering strengths from the suspended sediment layers. In this paper, the volume backscattering strengths with various suspended sediment concentrations were measured using 5-MHz ultrasound signal in a small-scale water tank. The sound attenuation due to the viscosity and scattering from suspended sediment particles was predicted by the Richard's model and applied to the sonar equation to estimate the volume backscattering strengths from the suspended sediment concentrations. For the case that the additional attenuation was not considered, the volume backscattering strengths increased to the concentration of 20 g/l, and over this point, the backscattering strengths were roughly constant. However, for the case that the attenuation due to the suspended sediment concentration was considered, the backscattering strengths increased with the concentration.

Key words: Suspended sediment concentration, Fluid mud, Volume backscattering strength, Attenuation coefficient

PACS numbers: 43.30 Ft, 43.30 Es

[†]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: 82-31-408-6255)

I. 서 론

연안 및 하구지역은 퇴적물의 침식, 부유, 이동이 매우 활발하게 이루어지는 지역이며, 이러한 특성으로 인하여 고농도의 유성머드(fluid mud)가 형성되기도 한다. 부유퇴적물의 농도는 연안 및 하구지역에서 발생하는 퇴적층의 물성 변화를 파악하는데 매우 용이한 특성을 가진다.^[1,2] 유성머드는 10 g/l 이상의 매우 높은 농도와 1,080~1,200 kg/m³의 밀도 특성을 가지고 있으며, 일반적으로 해저면으로부터 약 1~2 m의 두께를 가지고 분포하고, 경우에 따라 약 7m의 두께를 형성하기도 한다.^[3,4] 약 63 μm 이하의 작은 크기의 입자들이 유성머드의 약 50~70%를 구성하고 있으며, 실트와 점토순으로 양이 분포되어 있다. 모래와 같이 입자 크기가 큰 성분들도 유성머드를 구성할 수 있지만, 빠른 침강속도로 인해 부유된 입자들이 대부분 빠르게 침강하여 채취된 유성머드의 시료에서는 매우 적은 양만이 존재하게 된다.^[3]

고농도의 부유물층은 태양광선의 투과를 방해하여 해저층의 산소농도를 희박하게 하거나 무산소 환경으로 변화시키고, 부영양화의 원인이 된다. 또한 부유물 내에 존재하는 일부 오염물질들은 해양생물에 직접적으로 영향을 미쳐 해양생태계에 좋지 않은 영향을 주기도 한다. 또한 고주파 다중 측심기를 이용하여 측정된 수심을 참조하는 선박의 항해나, 준설작업 등에도 실제 수심과의 오차를 발생시켜 안전 확보에 문제를 발생시킬 수 있다.^[3]

부유물층의 특성 파악을 위해 사용되는 대표적인 방법으로는 시료를 직접 채취하여 측정하는 직접 측정 방법과 광학과 음파를 이용하는 간접 측정 방법이 있다. 직접 채취 방법은 채수 과정에서 실제 환경이 교란될 가능성이 높고, 시·공간적 분해능이 낮을 뿐 아니라, 많은 분석 시간과 노력이 요구된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 광학을 이용한 기기들이 많이 이용되고 있으며, 시간적인 분해능이 높기 때문에 연속적인 변화의 관측이 용이하다.^[5] 하지만 이 방법 역시 한 위치의 값만을 측정하는 제한점이 있다. 최근에는 위의 두 방법의 문제점을 모두 해결하기 위해 음파를 이용한 측정 방법이 사용되고 있다. 음파를 이용한 방법은 측정하려는 공간의 환경을 인

위적으로 교란시킬 위험성이 낮으며, 한 점이 아닌 넓은 공간에 대한 측정이 가능하고, 시·공간적인 분해능이 매우 높은 장점을 가지고 있다.^[6,7]

음파를 이용하여 물체를 탐지하기 위해서 운용 주파수는 물체의 크기와 음파의 파장, 연구 목적 및 실험 해역의 환경 특성 등을 고려하여 선정해야 한다. 일반적으로 매우 작은 크기의 입자들이 고농도의 부유물층을 구성하고 있는 수층에서 부유물의 음향학적 특성을 파악하기 위해 음파를 이용할 경우 분해능이 좋은 고주파수의 사용이 요구되지만 그에 따른 감쇠현상을 고려해야 한다. 따라서 부유물의 농도, 입자 크기, 주파수에 따른 감쇠계수에 대한 선행 연구가 필요하며, 이를 바탕으로 농도에 따른 후방산란강도 연구가 진행되어야 한다.

본 논문에서는 기존의 감쇠계수 모델을 바탕으로 실험에 사용된 주파수, 농도, 입자 크기에 따른 감쇠계수 모델링을 수행하였고, 이를 전달손실에 보상한 후, 후방산란강도를 평가하여 부유물의 농도가 후방산란강도에 미치는 영향을 연구하였다.

II. 감쇠계수 모델링

음파의 감쇠계수는 고주파수 대역으로 갈수록 증가하는 양상을 보이며, 매질의 탁도에 의해서도 변화한다. 특히 초음파 대역의 주파수를 사용할 때는 매질에서의 음파 감쇠 때문에 전달거리가 매우 짧아지게 된다. 부유물에 의한 감쇠계수는 입자의 크기, 모양, 구성 성분, 농도, 사용된 주파수 등의 복합적인 관계에 의해서 변화하기 때문에 이에 대한 감쇠 특성 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[8-10]

부유물이 존재하는 환경에서의 감쇠계수 α_t 는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서 α_w 와 α_s 는 각각 수층과 부유물에 의한 감쇠계수를 나타낸다. 수층에서의 감쇠계수는 문헌들에 보고된 감쇠계수 모델로부터 쉽게 계산할 수 있으며,^[11,12] 5 MHz의 경우 약 0.055 dB/cm이다. 부유물에 의한 감쇠계수는 점성감쇠(viscous absorption) 계수

와 산란손실 (scattering loss) 계수의 합으로써 표현되며, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

α_{visc} 와 α_{scat} 는 각각 점성감쇠 계수와 산란손실 계수를 나타내며, 최종적으로 부유물에 의한 감쇠손실은 α_s 로 계산 가능하다. 여기서, c 는 g/l 단위의 부유물 농도이며, r 은 cm단위의 부유물까지의 음파 전달거리이다. 점성감쇠 계수와 산란손실 계수를 예측하기 위하여 본 논문에서는 Richards 등이 제안한 모델(이후 Richards의 모델이라 함)을 이용하였다.^[8] Richards 등은 산란손실 계수를 예측하기 위해서 부유물의 모양이 불규칙하고 비균질하다는 가정하에 Johnson이 제안한 ‘High-pass 모델’^[13]을 바탕으로 경험적 방법으로 수정한 모델을 제시하였으며, 점성감쇠 계수를 예측하기 위해서는 음파의 전파경로를 따라 감쇠가 일정하게 발생하고 모든 부유입자들이 같은 크기로 존재한다는 가정하에 Urick^[14]이 제안한 모델을 기초로 한 모델을 제시하였다. Fig 1은 Richards 모델로부터 예측된 5 MHz 주파수에 대한 부유물 입자 크기에 따른 점성감쇠 계수, 산란손실 계수, 그리고 두 계수의 합으로 표현되는 부유물에 의한 감쇠 계수를 나타낸다. 5 MHz 주파수에서는 부유물 입자의 크기가 약 1 μm 와 230 μm 일 때 점성감쇠 계수와 산란손실 계수가 가장 크다. 부유물 입자의 크기에 따라서 점성감쇠와 산란손실에 의해 서로 다르며,

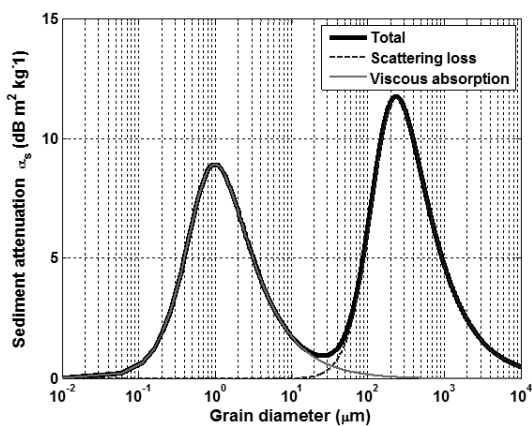


Fig. 1. 5 MHz Attenuation coefficient of sediment particle size.

입자 크기가 34.3 μm 이하에서는 점성감쇠가 우세하게 작용하고, 34.3 μm 이상에서는 산란손실이 감쇠에 우세하게 작용하는 것을 알 수 있다. 또한 위의 결과로부터 부유물에 의한 감쇠계수는 부유물의 입자 크기에 따라 비선형적으로 변화함을 알 수 있으며, 정확한 감쇠계수를 추정하기 위해서는 부유물 입자 크기를 정확하게 파악해야 한다. 본 논문에서는 실험으로부터 측정된 부유물의 농도와 입자 크기를 적용하여 Richards의 감쇠모델 및 식(1)과 (2)를 이용하여 감쇠계수를 추정하고 후방산란강도를 계산하였다.

III. 후방산란강도 측정 실험

88 × 52 × 29 cm 크기의 수조 안에 5 MHz 센서와 수중펌프가 부착되어 부유물을 균질하게 섞어줄 수 있는 12 × 12 × 24 cm 크기의 아크릴 소형수조를 설치한 뒤, 부유물의 농도에 따른 후방산란강도 측정을 실시하였다(Fig. 2). 센서와 마주보고 있는 소형수조의 앞면은 아크릴이 아닌 0.1 mm 두께의 폴리프로필렌 (polypropylene) 필름을 부착하여, 센서로부터 32.2 cm 떨어진 위치에 설치하였다. 수조의 크기가 커질수록 부유물의 농도를 증가시키기 위해 많은 양의 시료가 필요하게 되며, 균질하게 혼합된 상태를 유지하는데도 어려움이 따르게 된다. 이와 같은 제한점을 극복하기 위해 순수 수층과 부유물이 포함된 수층 환경으로 분리시켰고, 분리된 환경의 경계면을 음파가 투과할 시 경계면 투과손실을 최소화하기 위해 아크릴판에 비해 투과손실이 훨씬 적은 폴리프로필렌 필름을 사용하였다. 실험 시 사용한 주파수 대역에서 폴리프로필렌 필름에 의한 정확한 감쇠를 파악하기 위해 수층에서 폴리프로필렌 필름이 있을 때와 없을 때 송·수신한 신호의 크기를 비교하였고, 그 결과 폴리프로필렌 필름에 수직으로 음파가 입사될 경우 5 MHz 신호에 대해 2.0 dB의 투과손실이 발생하는 것을 확인하였으며, 추후 후방산란강도 계산식에서 이에 대한 감쇠를 보상하였다.

센서의 주파수 특성 및 센서면의 반지름 크기에 따라서 고유의 임계거리(critical distance)가 존재한다. 원거리 음장(far-field)과 근거리 음장(near-field)을 구분 지을 수 있는 임계거리는 a^2/λ 로 정의되며, 여

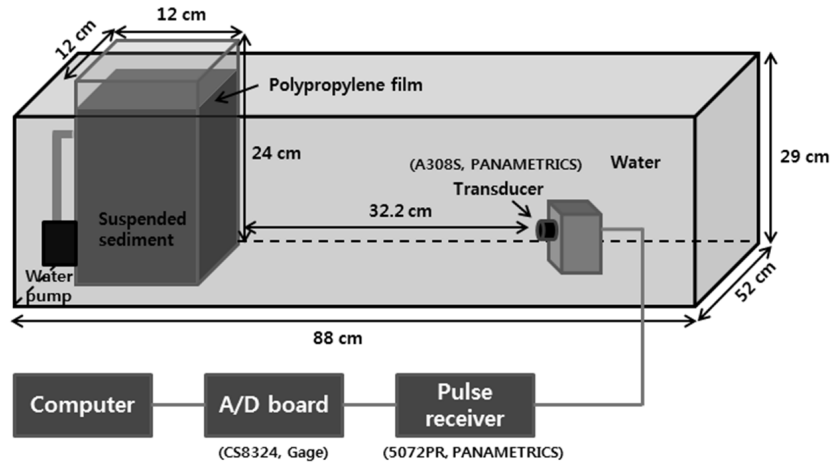


Fig. 2. Experimental layout.

기서 a 와 λ 는 각각 센서면의 반지름과 파장을 나타낸다.^[15] 실험에 사용된 센서의 임계거리는 약 30 cm로 계산되므로 센서와 부유물이 담긴 소형수조의 거리가 32.2 cm 유지되도록 설치한 후, 임계거리 이후에서 부유물의 농도에 따른 후방산란강도를 측정하였다.

Pulse/receiver(5072PR, PANAMETRICS, Waltham, MA, USA)을 사용하여 중심 주파수가 5 MHz이고 펄스 길이가 0.5 μ s인 펄스 신호를 생성한 뒤, 5 MHz 트랜스듀서(A308S, PANAMETRICS, Waltham, MA, USA)를 이용하여 농도 변화에 따라 각각 50평씩 송·수신하였다. 수신신호는 50 MHz로 샘플링 되었으며, 50 dB 증폭하여 저장되었다. 실험 시 정확한 수온 변화 관측을 위해 수조 내에 온도계(TESTO 735-1)를 설치하였으며, 평균 수온은 약 13.9°C로 측정되었다. 부유물의 농도를 조절하기 위해 325 메쉬(mesh) 채를 통과한 작은 입자의 고령토(kaolinite) 가루를 사용하였고, 농도의 범위는 0~100 g/l로 설정하였다. 아크릴 모형과 같이 좁은 공간에서 수중펌프의 출력을 높여 주게 되면 부유물이 균질하게 섞일 수 있으나, 이와 함께 발생하는 공기방울의 영향이 수신신호에 영향을 줄 수 있다. 이러한 영향을 최소화하고 부유물이 균질하게 분포하고 있는지를 파악하기 위하여 수중펌프를 가동시킨 후 일정 시간이 지난 다음 20, 40, 60, 80, 100 g/l의 농도에서 상층, 중층, 하층으로 구분하여 실질농도를 측정하였다. 그 결과 대부분의 경우 약 0.5 g/l 이내의 오차로 매우 균질하게 섞였으나, 수

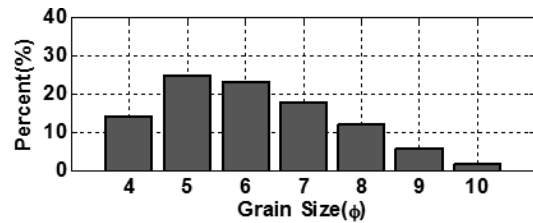


Fig. 3. Particle size distribution of suspended sediment sample.

압의 영향을 받지 못한 일부 공간에서 침전 현상이 발생하였다. 이러한 이유 때문에 음향실험 시 정확한 농도값 측정을 위해 매 농도마다 실질농도를 파악하였고, 그 결과 0~100 g/l 농도로 조절된 시료의 실제 실험 시 농도는 0~74.1 g/l임을 확인하였다.

부유물에 의한 감쇠계수를 계산할 때 중요한 요소 중 하나가 부유물의 입자 크기이다. 실험에 사용된 고령토의 입자 크기를 측정하기 위해 입도분석을 수행하였으며, 그 결과 5~7 ϕ 의 크기를 가진 입자가 우세하였고, 평균 약 6.1 ϕ 로써 22.3 μ m의 입자 크기 특성을 갖고 있는 것을 확인하였다(Fig. 3). 이와 같은 크기는 5 MHz의 감쇠계수 특성에서 감쇠가 상대적으로 약하면서 점성감쇠와 산란손실에 의한 영향이 모두 존재하는 입자 크기이다(Fig. 1).

IV. 실험 결과

부유물의 농도에 따른 후방산란강도 분석에 앞서

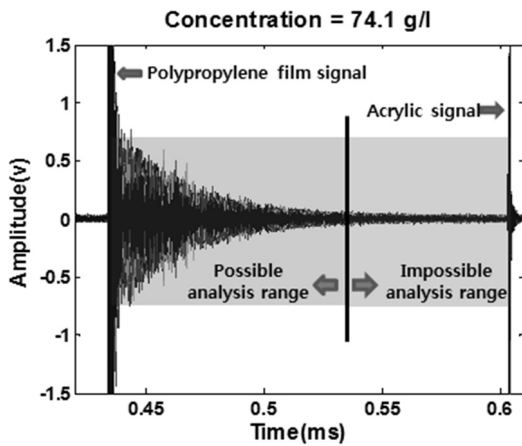


Fig. 4. Received signal measured at the highest suspended sediment concentration.

분석 범위를 선정하였다. 폴리프로필렌 필름에 의한 영향이 없고, 신호대 잡음비가 0보다 큰 분석 범위를 선정하기 위해 실험 시 가장 높은 농도에서의 결과를 바탕으로 이를 확인하였다. Fig. 4는 74.1 g/l일 때의 후방산란신호를 나타낸다. 폴리프로필렌 필름 신호(0.43 ms)와 아크릴 벽 신호(0.61 ms) 사이에 부유물에 의한 산란신호가 수신되며, 고농도 부유퇴적물에 의하여 시간에 따라 산란신호가 급격히 감쇠됨을 관찰할 수 있다. 센서와 폴리프로필렌 필름 사이의 거리는 32.2 cm이고, 부유물에 의해 산란신호가 감쇠되어 신호대 잡음비가 0보다 작아지는 부분은 38.7 cm이기 때문에 33~38 cm 사이를 분석가능 범위로 선정하였다. 이 때 잡음준위는 부유물이 존재하지 않는 수층을 통과할 때의 수신신호 준위를 바탕으로 하였으며, Fig. 4의 경우 송신 후 폴리프로필렌 필름에 의한 반사신호 이전까지의 신호준위를 잡음준위로 가정하였다. 농도가 증가할수록 감쇠계수도 증가하기 때문에 실험 시 가장 높은 농도에서의 수신신호를 바탕으로 선정한 분석 범위는 모든 농도에서도 분석 가능한 범위가 된다.

원거리에서 후방산란강도를 구하는 소나 방정식은 식(3)과 같이 표현된다.^[16]

$$S_v = RL - SL + 2TL - 10\log_{10} V. \quad (3)$$

여기서, S_v 는 후방산란강도, RL 은 수신음압준위, SL 은 음원준위이며, TL 과 V 은 각각 전달손실과 음파

조사체적(insonified volume)을 나타낸다. 하지만 음원과 물체 사이의 거리가 근거리 음장일 때 식(3)은 식(4)와 같이 표현될 수 있다.^[17]

$$S_v = RL - SPL_n + TL_2 - 10\log_{10} V. \quad (4)$$

SPL_n (sound pressure level)은 음원준위와 음원과 산란체 사이에서 발생하는 전달손실의 합으로써 표현된다. 73×36×45 cm 크기의 수조에 송신기와 초음파 수신기(TNU001A, NTR Systems, Inc., RVS -242.05 dB re 1 V μPa^{-1})를 동일한 수심에 설치한 뒤, 수신기를 0.05 mm 간격으로 6 cm부터 50 cm까지 거리를 변화시키며 SPL_n 을 측정하였다(자세한 측정 방법은 참고문헌 [17], [18]에 기술되어 있다). TL_2 는 산란체에서 음원까지의 전달손실을 나타낸다. 식(4)는 수층에서의 후방산란강도 계산식이며, 부유물의 농도에 따른 감쇠계수를 보상해줌으로써 최종적으로 아래와 같이 표현될 수 있다.^[1]

$$S_v = RL - SPL_n + TL_2 + 2\alpha_s cr - 10\log_{10} V. \quad (5)$$

여기서 α_s 는 2장에서 언급하였듯이 부유물의 농도, 입자의 크기, 주파수에 따라 값이 달라진다. Fig. 5는 부유물의 농도에 따른 후방산란강도 계산에 적용된 세 가지의 전달손실을 나타낸다. Fig. 5(a)는 음원에서부터 부유물까지의 전달손실을 나타내며, 음원과 수신기의 거리를 변화시키며 실측한 결과이다. 33 cm를 기준으로 거리가 44 cm까지 멀어질 때, 약 3 dB의 손실이 발생하였다. Fig. 5(b)는 산란체로부터 음원까지 음파가 되돌아 올 때 발생하는 전달손실을 나타내며, 이 값은 구형분산의 전달손실 계산식($20\log_{10}r + \alpha_w r$, r : 음파전달거리)을 이용하여 거리에 따라 계산할 수 있다. Fig. 5(c)는 주파수 특성이 5 MHz이고, 평균 부유물 입자의 크기가 22.3 μm 일 때 식(2)로부터 계산된 부유물의 농도에 따른 감쇠계수 모델링 값을 나타낸다. 농도가 증가함에 따라 부유물에 의한 감쇠계수가 커지는 것을 알 수 있고, 수층에 의해 발생하는 감쇠계수와 비교했을 때, 부유물의 농도가 약 6 g/l 이상인 환경에서는 부유물에 의한 감쇠가 우세하게 작용한다. 따라서 고농도의 환경에

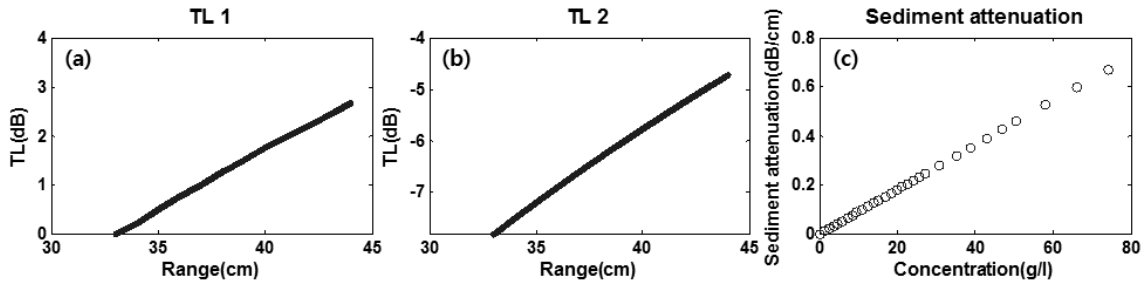


Fig. 5. Attenuation factors (a) Forward transmission loss from source to receiver, (b) backward transmission loss from receiver to source, (c) 5 MHz Attenuation coefficient as a function of suspended sediment concentration.

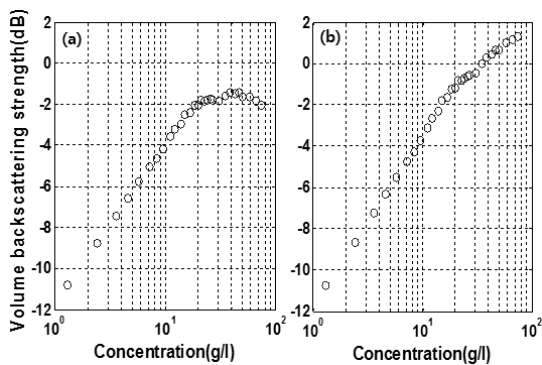


Fig. 6. Volume backscattering strengths as a function of suspended sediment concentration (a) without and (b) with suspended sediment attenuation correction.

서는 부유물의 농도에 의한 감쇠가 지배적이며, 이에 대한 영향이 후방산란강도 값에 가장 큰 영향을 주게 되는 것으로 추정된다.

Fig. 6은 부유물의 농도에 따른 후방산란강도 값을 나타낸 것으로서, 부유물의 농도에 대한 감쇠계수 보상이 후방산란강도 값에 미치는 영향을 보여준다. Fig. 6(a)는 부유물의 농도에 따른 감쇠계수를 보상하지 않은 결과로써 약 20 g/l까지는 농도가 증가함에 따라 후방산란강도 값이 약 -11~-2 dB까지 점차 증가하는 경향을 보이지만, 20~60 g/l에서는 농도가 증가해도 후방산란강도 값이 약 -2 dB에서 일정한 값을 나타내며, 그 이후부터는 농도가 증가할수록 오히려 점차 감소하는 경향을 보인다. 부유물 농도에 대한 감쇠계수 보상이 이루어진 결과인 Fig. 6(b)에서는 부유물의 농도가 증가함에 따라서 후방산란강도 값이 약 -11~1 dB까지 점차적으로 증가하는 경향을 보인다. 즉, 부유물의 농도에 따른 감쇠 영향 때문에 부유물에 의한 후방산란강도가 변하게 되며, 이

와 같은 영향을 보상해줌으로써 부유물의 농도에 따른 후방산란강도를 보다 정확히 측정할 수 있다. 그러나 Fig. 6 (b)의 결과로부터 증가하는 후방산란강도의 기울기가 약 20 g/l의 농도를 기준으로 달라지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상에 대한 이유로는 부유물에 의한 감쇠계수 모델은 부유물의 평균 입자 크기를 사용하지만 실제로 실험에 사용된 부유물은 특정한 입자 크기 분포를 가지고 존재하기 때문에 발생하는 오차일 수 있으며, 따라서 감쇠의 영향이 상대적으로 큰 고농도 환경에서 이와 같은 오차가 발생된 것으로 판단할 수 있다. 또한 사용된 음파의 주파수가 0.5 ms 길이의 신호를 사용하였으므로 주파수 대역폭은 2 MHz가 된다. 반면 감쇠 고려 시에는 중심주파수인 5 MHz만을 사용하였기 때문에 후방산란강도 측정 시 음파의 이동거리를 고려할 경우 최대 약 1 dB 이내의 감쇠손실 오차가 발생할 수 있다.

V. 결론 및 토의

연안 및 하구지역에서 주로 발생하는 부유퇴적물은 매우 작은 입자들로 구성되어 있기 때문에 음파를 이용한 부유퇴적물 연구에서는 초음파와 같이 분해능이 높은 고주파수가 주로 이용된다. 하지만 이러한 고주파수 대역에서는 음파전달 시 감쇠 영향을 크게 받으며, 부유물의 농도가 증가함에 따라서 이에 대한 영향은 더욱 더 증가한다. 고농도의 부유물 환경에서는 수 cm 이내에서도 모든 음파가 소멸될 수 있으며, 이로 인해 임계거리 이후부터는 부유물에 의해 산란된 신호를 수신하는데 제약을 받을 수도 있다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 수조 내

에 부유물이 담긴 수조를 따로 분리하여 설치함으로써 임계거리 이전과 이후의 음파가 전달되는 매질의 특성을 각각 순수 수층과 부유물이 포함된 수층 환경으로 분리시켰다. 또한 두 수층을 분리할 때 실험에 사용된 주파수의 감쇠 특성을 고려하여 내수성이 우수하고 두께가 얇은 폴리프로필렌 필름을 이용하였고, 이로 인한 감쇠 영향을 후방산란강도 식에서 보상함으로써 보다 정확한 부유물에 의한 후방산란 측정을 가능하게 하였다.

본 논문에서는 부유물에 의한 후방산란강도를 크게 두 가지로 평가하였다. 우선 부유물의 농도에 따른 감쇠를 고려하지 않은 상태로 후방산란강도를 예측하였다. 이 경우 부유물의 농도가 증가하여도 일정 농도 이후부터는 후방산란강도 값이 증가하지 않았으며, 이러한 특성은 부유물 증가에 따른 감쇠 보상을 정확히 고려하지 않음으로써 발생하는 오차이다. 저농도의 부유물 환경에서는 상대적으로 작은 감쇠 영향으로 부유물에 의한 산란 신호에 큰 영향을 미치지 못하였으나 부유물 농도가 증가함에 따라서 산란 신호의 세기가 증가하지만, 감쇠손실 또한 증가하기 때문에 정확한 감쇠 보상이 필요하다. 두 번째로는 Richards의 감쇠모델을 이용하여 부유물의 농도에 따른 감쇠를 보정한 후 후방산란강도를 평가하였다. 부유물에 의한 감쇠계수가 보상된 후방산란강도 값은 농도가 증가함에 따라서 안정적으로 증가하는 특성을 보이며, 저농도부터 고농도까지의 전반적인 후방산란강도 준위가 플랑크톤과 같이 해양에 존재하는 매우 작은 생물의 후방산란강도 특성^[15]에 비해 상대적으로 높은 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 초음파를 이용하여 해양에 존재하는 부유물 환경의 탐지가 가능하다는 것을 의미한다. 후방산란강도에 영향을 미치는 부유물에 의한 감쇠손실은 부유물을 구성하고 있는 입자 크기와 주파수에 따라 특성이 변화하며, 동일한 주파수에서도 부유물의 입자 크기가 변화함에 따라서 감쇠계수 특성이 크게 달라진다. 후방산란강도를 이용한 부유물 특성의 올바른 해석을 위해서는 감쇠계수에 대한 연구가 필요하다. 부유물에 의한 감쇠는 부유물을 구성하고 있는 입자 크기에 의해 큰 영향을 받으며, 해상에 존재하는 부유물 환경은 서로 다른 크기를 가

진 작은 입자들로 구성되어 있기 때문에, 평균 입자 크기뿐만 아니라 입자 분포(particle size distribution)에 따른 음파 특성 연구가 진행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 중심 주파수가 5 MHz인 신호를 이용하여 부유물 농도에 따른 후방산란강도 특성을 파악하고자 하였다. MHz 대역의 초음파 신호는 저농도의 부유물층에 대해서도 높은 분해능을 갖는 장점이 있으나, 높은 감쇠손실로 인해 탐지거리의 한계가 존재하게 된다. 따라서 실제 해양에서 부유물층을 탐지하고 모니터링 하기 위해서는 탐지범위 및 탐지분해능에 따른 적절한 주파수 선택이 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원인 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(계약번호: 2011-0026002).

참고 문헌

1. 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," *Marine Geology* **279**, 199-209 (2011).
2. 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).
3. W. H. McAnally, C. Friedrichs, D. Hamilton, E. Hayter, P. Shrestha, H. Rodriguez, A. Sheremet, and A. Teeter, "Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior," *J. Hydrol. Eng.* **133**, 9-22 (2007).
4. G. C. Kineke, R. W. Sternberg, J. H. Trowbridge, and W. R. Geyer, "Fluid-mud processes on the amazon continental shelf," *Continental Shelf Research* **16**, 667-696 (1996).
5. J. A. C. Bunt, P. Larcombe, and C. F. Jago, "Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter," *Continental Shelf Research* **19**, 1199-1220 (1999).
6. P. D. Thorne, C. E. Vincent, P. J. Hardcastle, S.

- Rehman, and N. Pearson, "Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices," *Marine Geology* **98**, 7-16 (1991).
7. G. P. Holdaway, P. D. Thorne, D. Flatt, S. E. Jones, and D. Prandle, "Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration," *Continental Shelf Research* **19**, 421-441 (1999).
 8. 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).
 9. R. J. Urick, "The Absorption of sound in suspensions of irregular particles," *J. Acoust. Soc. Am.* **20**, 283-289 (1948).
 10. 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).
 11. F. H. Fisher and V. P. Simmons, "Sound absorption in sea water," *J. Acoust. Soc. Am.* **62**, 558-564 (1977).
 12. J. Krautkrmer and H. Krautkrmer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th ed. (Springer, New York, 1990).
 13. R. K. Johnson, "Sound scattering from a fluid sphere revisited," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 375-377 (1977).
 14. R. J. Urick, "The absorption of sound in suspensions of irregular particles," *J. Acoust. Soc. Am.* **20**, 293-289 (1948).
 15. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamental of Acoustical Oceanography* (Academic Press, Boston, 1998).
 16. R. J. Urick, *Principle of Underwater sound*, 3rd ed. (McGraw-Hill, New York, 1983).
 17. E. Kim, H. Lee, J. Na, J. W. Choi, and D. Kang, "5-MHz acoustic-backscatter measurements of *cochlodinium polykrikoides* blooms in korean coastal waters," *ICES J. Mar. Sci.* **67**, 1759-1765 (2010).
 18. J. Kim, J. W. Choi, and D. Kang, "Laboratory experiment for 5-MHz volume backscattering strength from red-tide causing microalgae *chattonella antiqua*," *Ocean Sci. J.* **47**, 173-179 (2012).

저자 약력

▶ 이 찬 길(Changil Lee)



2009년 2월: 경원대학교(이학사)
 2011년 2월: 한양대학교(이학석사)
 2011년 3월 ~ 현재: 한양대학교 박사과정
 <관심분야> 해양음파산란 및 잔향음, 해저 지음향역산

▶ 최 지 웅(Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교(이학사)
 1998년 2월: 한양대학교(이학석사)
 2002년 8월: 한양대학교(이학박사)
 2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate
 2004년 ~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원
 2009년: 한국음향학회 수중음향 학술위원장
 2011년: 한국음향학회 국제교류위원장
 2012년: 한국음향학회 회원관리위원장
 2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합과학과 부교수
 <관심분야> 해양음파산란 및 잔향음, 음파전달, 수중통신, 해저지음향역산