

실험수로에서 신호대잡음비와 부유사농도의 상관관계 분석

서강현* · 김동수** · 손근수***

Seo, Kanghyeon*, Kim, Dongsu**, Son, Geunsoo***

Correlation Analysis of Signal to Noise Ratio (SNR) and Suspended Sediment Concentration (SSC) in Laboratory Conditions

ABSTRACT

Monitoring sediment flux is crucial especially for maintaining river systems to understand morphological behaviors. Recently, hydroacoustic backscatter (or SNR) as a surrogate to empirically estimate suspended sediment concentration has been increasingly highlighted for more efficient acquisition of sediment dataset, which is difficult throughout direct sediment sampling. However, relevant contemporary researches have focused on wide range solution applicable for large natural rivers where H-ADCPs with relatively low acoustic frequency have been widely utilized to seamlessly measure streamflow discharge. In this regard, this study aimed at investigating hydroacoustical characteristics based on a very recently released H-ADCP (SonTek SL-3000) with high acoustic frequency of 3 MHz in order to capitalize its capacity to be applied for suspended sediment monitoring in laboratory conditions. SL-3000 was tested in a laboratory flume to collect SNR in conjunction with LISST-100X for actual sediment concentration and particle distribution in both sand and silt sediment injection in various amount. Conventional algorithms to correct signal attenuations for water and sediment were carefully tested to validate whether they can be applied for SL-3000. As result of analyzing the SNR-SSC correlation trend, through further study in the future, it is confirmed that SSC can be observed indirectly by using the SNR.

Key words : Laboratory condition, SSC, SNR, H-ADCP, LISST-100X

초 록

유사량 자료는 하천을 유지·관리하기 위하여 지속적으로 확보할 필요가 있다. 최근 해외에서는 유사량 자료 확보의 효율성 제고를 위해 초음파 도플러유속계를 이용하여 간접적으로 유사량을 관측하는 연구가 시도되고 있다. 그러나, 기존 연구의 경우 주파수가 낮은 저주파 초음파도플러 유속계를 이용하여 대하천 및 실제 하천에서만 연구가 수행되었다. 이에 본 연구에서는 3 MHz의 높은 주파수가 적용된 수평초음파도플러유속계(H-ADCP)를 유량과 유사량 통제가 가능한 실험수로에 적용하여 획득한 신호대잡음비(SNR)를 이용하여 입경에 따른 초음파의 반사특성을 규명하고, 대하천을 기반으로 개발된 신호대잡음비 보정 알고리즘의 적용성 검토를 실시하며, 보정된 신호대잡음비를 활용하여 실험수로 규모의 하천에서 유사량 측정 가능성을 검토하였다. 이를 위해, 레이저부유사측정기(LISST-100X)를 활용하여 실험 부유사농도 데이터를 획득하고 신호대잡음비와의 상관관계를 분석하였다. 또한, 수로 전 단면에 균일한 유사를 공급하기 위해 실험수로 규격에 맞게 유사공급장치를 제작하였으며, 초음파 반사특성 규명을 위해 입경이 다른 두 종류의 유사(Silt, Sand)를 활용하여 실험을 수행하였다. 기존 신호대잡음비 보정 알고리즘을 실험수로 측정결과에 대해 적용성 검토를 실시한 결과, 적절한 보정 결과를 보여 보정 알고리즘이 실험수로 규모에도 적용 가능함을 확인하였으며, 보정된 신호대잡음비와 부유사농도 사이의 상관관계 경향을 분석한 결과, 실트와 모래에 대해 전체적으로 일정한 연관성을 보여, 향후 추가적인 연구를 통해 신호대잡음비를 이용한 간접적인 유사량 관측이 가능할 것으로 사료된다.

검색어 : 실내실험조건, 부유사, 신호대잡음비, 수평초음파도플러유속계, 레이저부유사측정기

* Dankook University · gh0962yj@naver.com

** 정회원 · 교신저자 · Dankook University · 토목환경공학과 조교수 (Corresponding Author · dongsu-kim@dankook.ac.kr)

*** 정회원 · Dankook University · 토목환경공학과 박사과정 (geunsoo87@dankook.ac.kr)

Received January 10, 2017/ revised February 9, 2017/ accepted August 22, 2017

1. 서론

하천에서 물의 흐름에 의해 상류로부터 이동되거나 저면으로부터 부상하여 수중에서 이동되는 토사를 일컬어 부유사라 한다 (George, 1999). 부유사는 하천의 수리학적 특성과 하상을 변화시키므로 하천을 유지·관리하기 위해서 지속적으로 관측할 필요가 있다. 하지만 국내의 경우, 조사기술과 연구 개발성과의 부족으로 인해 유사량 자료가 유량자료에 비해 자료가 현저히 부족하여 유사 거동을 해석함에 있어서 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이에 해외에서는 유사량 측정 효율성 제고를 위해 초음파도플러유속계를 이용하여 간접적으로 유사량을 추정하는 연구가 다양하게 시도되고 있다(Wall et al., 2006; Maureen, 2009; Thorne et al., 1997; Guerrero et al., 2013).

기존의 연구에서 초음파도플러유속계를 이용하여 유사량을 관측하는 원리는 다음과 같다. 초음파도플러유속계에서 발사된 초음파는 하천에 부유하고 있는 입자에 부딪혀 되돌아오는 비율을 이용하여 SNR (Signal to Noise Ratio, 신호대잡음비)을 측정하게 된다. 이때, 하천에 부유하고 있는 부유물의 농도가 높아질 경우, 이에 비례하여 SNR 값이 증가하게 되고, 이를 부유사농도 추정의 지표로 하여 실측 부유사농도와와의 관계식 구축을 통해 하천의 부유사농도를 예측하는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 초음파도플러유속계의 SNR로부터 부유사농도를 추정하는 선행 연구를 통해 SNR의 신호 손실을 보정하는 알고리즘을 제시하였으며(Gartner, 2004; Wall et al., 2006; Maureen, 2009), 초음파도플러유속계의 보정된 SNR로부터 부유사농도 측정 가능성을 확인하였다(Kim and Voulgaris, 2003). 그러나, 기존 연구는 RDI 사의 초음파도플러유속계를 활용하여 하폭이 넓은 대하천에서만 수행하여 SNR을 보정하는 보정 공식을 본 연구지역 또는 대하천에만 적용 가능하다는 한계점을 명시하였으며(Wall et al., 2006; Maureen, 2009), 실제 하천에서만 연구를 수행하여 유량과 유사량을 통제할 수 있는 조건에서 정밀한 측정을 통해 보정 알고리즘에 대한 검증 및 보완이 필요함을 확인하였다. 또한, 상대적으로 높은 주파수(고주파)의 입경에 따른 초음파 반사특성을 규명할 필요가 있으며, 기존 연구를 통해 검증된 RDI 사의 초음파도플러유속계가 아닌 현재 국내에 유량측정을 목적으로 55 개소에 설치되어 사용 중인 SonTek 사의 초음파도플러유속계에 대한 검증 및 적용 가능성을 검토할 필요가 있다.

따라서, 본 연구를 수행하기에 앞서, SonTek사에서 최근에 개발한 3MHz로 상대적으로 높은 주파수와 저유속용 신호처리 방식인 Pulse-to-Pulse coherent 방식(Zedel, 2008)이 복합적으로 적용된 측정 장비인 SL-3000 (SonTek, 2014)을 유량과 유사량 통제가 가능한 한국건설기술연구원 인동하천실험센터의 직선수로

에 적용하여 SonTek 사 초음파도플러유속계의 측정 정확도 검토와 SNR을 활용한 부유사농도 예측의 가능성을 확인하였다(Seo et al., 2016). 그러나 현장 실험 여건상, 수로 전체가 아닌 수로 중앙에 국한하여 유사를 공급하였으며, 공급한 유사 또한 혼합사를 사용하였기 때문에 SL-3000의 3MHz의 입경에 따른 초음파의 반사특성을 규명하기에는 한계가 있었다.

이에 본 연구에서는 SonTek 사의 SL-3000을 더 작은 규모의 실내 실험수로에 적용하여 다음과 같은 연구 성과를 달성하고자 한다. 1) 입도분포에 따른 초음파의 반사특성을 규명하고 2) 기존에 개발된 SNR의 감쇠를 보정하는 알고리즘을 실험수로의 측정 결과에 적용하여 SNR 보정 여부를 확인하고 3) 보정된 SNR과 실측된 부유사 농도와의 상관관계 경향을 파악하여, 추가적인 연구를 통해 향후 우리나라에 다수 설치되어 있는 H-ADCP를 활용한 지속적인 유사량 관측의 토대를 마련하고자 한다.

2. 실험 내용

2.1 대상 지역 및 실험 조건

본 연구는 Fig. 1과 같이 수로의 폭이 0.8m인 직사각형 단면의 실험수로에서 진행하였다. 실험수로의 총 연장은 16m이고, 하상경사는 0.002189이다. 본 실험수로의 가능 최대 공급 유량은 0.1m³/s 이나, 본 실험에서는 0.072m³/s를 사용하였으며, 상류로부터 공급되는 유량의 안정화와 하류 수문 게이트의 영향이 가장 적다고 판단되는 수로 중앙인 최상단으로부터 약 8m 정도 하류지점에서 측정 실험을 수행하였다. 이때의 단면 평균 유속은 0.35m/s, 수심은 0.27m이다.

2.2 측정 장비 소개

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 SonTek사의 SL-3000을 실험수로에 부착하여 측정을 실시하였다. SL-3000은 25°로 기울어진 2개의 빔에서 수평으로 3000kHz의 초음파를 발사하고 도플러 편차를



Fig. 1. Laboratory Flume to Test Hydroacoustical Characteristics in Terms of Estimating Suspended Sediment Concentration Based on SNR Observation as a Surrogate, Where LISST-100X was Utilized for Validation and Establishment of SNR-SSC Relation

이용하여 1m/s 미만에서도 $\pm 0.005\text{m/s}$ 정도의 오차를 갖는 신뢰도가 높은 횡단 유속분포를 제공하며(SonTek, 2014), 하천 부유물의 농도에 따른 초음파의 산란 정도를 나타내는 SNR 값을 제공한다. 또한, 장비 위쪽에 위치한 1개 빔과 압력 센서를 이용하여 측정된 수위 데이터를 부가적으로 획득할 수 있다. SL-3000은 막음거리(Blanking distance)를 제외하고 최소 0.1m부터 최대 5m인 중-소 하천 및 실험수로에서 최소 4cm의 공간 정밀도로 최대 128 지점에 대해 유속과 SNR의 횡방향 공간분포를 정밀하게 측정 할 수 있어, 중-소하천 및 실험수로에 적합한 장비라 할 수 있다. SL-3000은 실제로 초당 1회 빈도로 유속, SNR 및 수위를 측정하지만 SonTek사에서 제공하고 있는 소프트웨어에서는 1분 평균된 측정 자료를 제공하기 때문에 측정된 결과를 1분 단위로 시간평균 한 데이터를 분석에 활용하였다. 또한, 몇 차례의 예비 실험결과, SL-3000의 수직 빔에 유사가 쌓여 측정이 중단되는 경우가 발생하였기 때문에, 본 실험에서는 유사에 의해 측정이 방해되지 않도록 센서 상단에 유사퇴적 방지 구조물을 제작하여 설치하였다.

본 연구에서는 입경에 따른 SL-3000의 초음파의 반사특성을 규명하고, SL-3000을 활용하여 측정된 SNR과 실측 부유사농도 사이의 경향을 분석하여, 향후 SNR을 이용한 간접적인 부유사농도 예측의 토대를 마련하는 것을 목표로 하므로, 실측 부유사농도

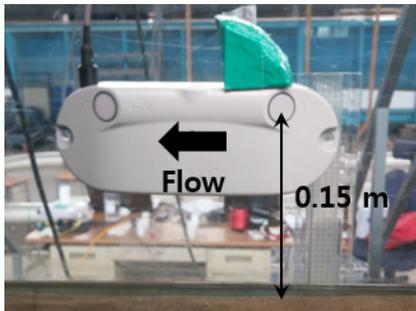


Fig. 2. Installation of SonTek SL-3000 in the Laboratory Flume



Fig. 3. Installation of Sequoia LISST-100X in the Laboratory Flume

데이터 획득을 위해 Fig. 3과 같이 부유사농도와 입도분포를 동시에 측정할 수 있는 Sequoia 사의 레이저부유사측정기(LISST-100X: Laser In-Situ Scattering and Transmissometry)를 이용하여 입도 분포와 부유사농도 자료를 획득하였다.

LISST는 특정 크기의 입자는 특정 각도로 빛을 회절시키고, 회절된 각도는 입자의 크기와 반비례하며, 특정 각도에서 회절된 빛의 강도는 입자의 수와 관련되어 있다는 물리학적 원리인 레이저 회절의 원리를 이용하여(Yoon et al., 2013) 측정지점의 입도분포와 입도 구간별 체적농도를 비교적 정확하고 신속하게 측정할 수 있는 장비이다(Sequoia, 2012; Gartner et al., 2001; Traykovski et al., 1999; Thonon et al., 2005; Van Wigaarden and Roberti, 2002). Gartner et al. (2001)는 실험실과 실제 하천에서의 부유사 측정 연구를 위한 장비로 LISST의 효용성을 고찰하였는데 LISST는 허용 가능한 범위 내에서 부유사 농도와 입도분포를 정확하게 결정할 수 있다고 보고하였다. Traykovski et al. (1999)는 LISST의 결과와 전통적인 방법인 체가름, 여과, 가중치 기술을 이용한 결과를 비교하기 위하여 실험실에서 자연의 유사를 이용하여 3-4번의 실험을 수행하였고, 그 결과 LISST가 자연의 유사에 대하여 적절하게 전통적인 방식과 거의 일치하는 입도분포 및 부유사 농도를 제공할 수 있다고 입증하였다.

본 연구에서 사용한 LISST-100X는 LISST 제품군의 일종으로 1-250 μm 사이의 입경을 32 구간으로 분할하여 입도 분포와 입도 구간별 체적 농도, 전체 부유사농도 자료를 초당 1회의 빈도로 측정 가능한 장비이다. 본 연구에서는 LISST-100X를 이용하여 연속적으로 측정된 실측 부유사농도 값을 SL-3000과 동일한 시간간격인 1분 단위로 시간 평균하여 분석에 활용하였다.

또한, 유사를 전 단면에 균등하게 공급하기 어려웠던 현장 실험의 한계를 극복하고자 수로에 안정적으로 유사를 공급하기 위해 Fig. 4와 같이 실험수로의 규격에 맞게 아크릴 판을 이용하여 유사공급장치를 제작하였다. 유사공급장치는 하단 모서리의 슬릿의 크기에 따라 공급하는 유사량을 조절 할 수 있으며, 일정 시간동안 수로

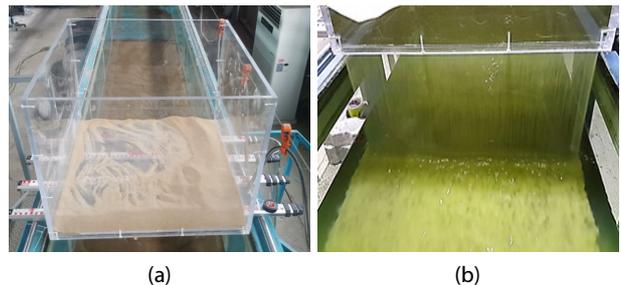


Fig. 4. A Customized Equipment for Continuous Supply of Sediment Particles for the Entire Cross-Section of the Given Flume: (a) Overall Feature of the Equipment Before Sediment Supply; (b) Sediment Supply Toward the Flume

전체 횡단면에 균등하게 유사를 공급할 수 있어, 측정 단면의 상류에 거치시킨 후 실험이 진행되는 동안 유사 공급의 문제로 실험이 중단되는 일이 없도록 하였다.

2.3 실험 방법

본 연구에서는 현장실험에서 입도분포에 따른 초음파의 반사특성을 규명하기 위해 D50이 0.38mm인 모래와 D50이 0.025mm인 실트로 구분하여 두 번의 측정 실험을 수행하였다. 또한, 실험수로의 규격에 맞게 자체적으로 제작한 유사공급장치의 공급 유사량을 조절하여 Fig. 5와 같이 네 단계의 유사농도(편의상 No Sediment, Low Sediment, Medium Sediment, High Sediment)로 공급하여 SL-3000과 LISST-100X를 이용하여 각각 SNR과 연직 부유사농도 데이터를 수집하였다. 각각 측정된 SNR과 부유사농도 결과 값은 상관관계 경향 분석의 기초 자료로 활용하였다.

본 연구에서의 측정 장비의 위치 및 간격을 나타내면 Fig. 6과 같다. 우선, Fig. 6(a)와 같이 SL-3000과 LISST-100X를 운용할 위치에 노끈을 묶어 측선을 표시해 두었으며, 노끈의 중앙(수로 중앙)에 검정 테이프를 감아 LISST-100X의 측정 위치를 표시하였다. 또한, Fig. 6(b)와 같이 측선으로부터 약 2.5m 상류 지점에 유사공급장치를 거치시켜 수로 전단면에 균등하게 유사를 공급하

였다.

이 때, SL-3000은 25°로 기울어진 두 개의 송신기에서 초음파를 상·하류 방향으로 발사하여 유속과 SNR을 측정하게 되는데 Fig. 6(b)와 같이 LISST-100X와 동시에 동일한 측선 상에서 시범 측정해 본 결과, 하류 방향 빔에서는 LISST-100X에 의해 흐름이 교란되어 이상치가 나타남을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 동일 측선 상에서 동시에 측정된 결과를 이용하여 경향성 분석을 실시하고자, SL-3000과 LISST-100X를 동일 측선 상에서 동시에 측정하되, 붉은색 빔금 처리된 SNR2와 LISST-100X의 측정 결과인 부유사농도 데이터를 활용하여 상관관계 경향성 분석을 실시하였다. 이때 SL-3000과 LISST-100X를 활용하여 각각 측정된 SNR과 부유사농도 값은 1분 단위로 시간 평균하여 분석에 사용하였다. 즉, 측정시간 동안 유사공급장치를 통해 수로 전단면에 일정하게 유사공급이 이루어졌으며, 공급된 유사가 바닥에 바로 가라앉지 않고 부유하고 있어 SL-3000 상류 방향 빔의 측정 위치와 LISST-100X의 측정 위치에서의 유사량이 같다고 가정할 때 상호 비교가 가능할 것으로 판단된다.

또한, SL-3000과 LISST-100X를 활용하여 측정된 수심 별 위치는 Fig. 7과 같다. SL-3000은 Fig. 7(a)와 같이 수로 바닥으로부터 약 0.15m 위의 한 지점(수심 0.12m)에 고정하여 1분 간격으로

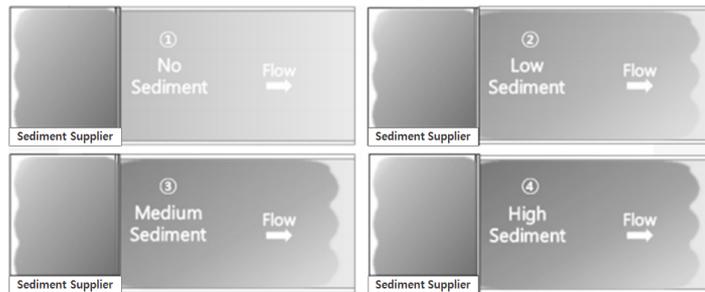
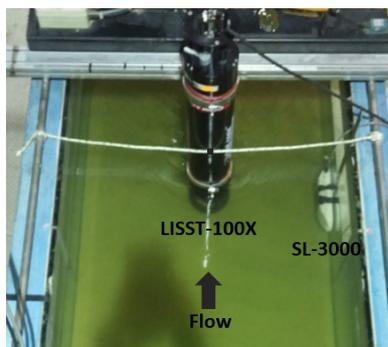
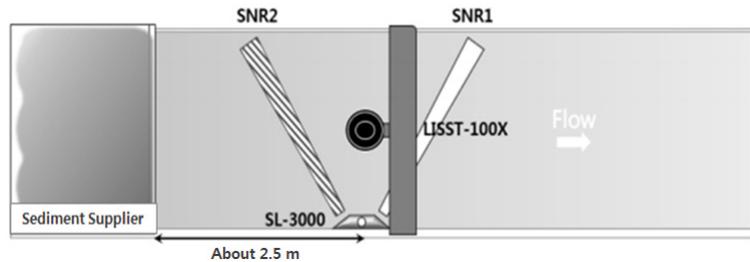


Fig. 5. Schematic Diagram of Sediment Supply in 4 Different Concentration



(a)



(b)

Fig. 6. Configuration of SonTek SL-3000, LISST-100X, Sediment Supplier in the Flume: (a) Picture of LISST-100X and SL-3000 During the Measurement; (b) Plan View of Equipments

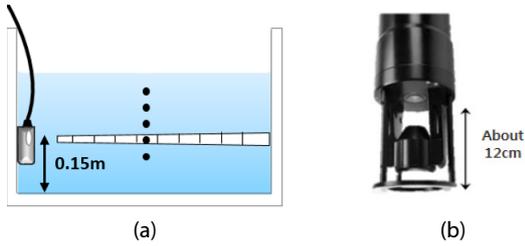


Fig. 7. Measurement Configuration of LISST-100X: (a) Location of Points with Vertical Spacing of 3cm; (b) Lag Distance of LISST-100X as Default Measurable Distance Down to Bed

SNR 자료를 수집하였으며, LISST-100X는 수로 외측 벽의 영향이 가장 적다고 판단되는 수로 중앙부에 거치하여 약 3cm 간격으로 연직 부유사농도를 측정하였다. LISST-100X의 측정 시간은 SL-3000의 SNR 측정 결과와 상호 분석을 위해 1분 단위로 시간 평균된 데이터를 분석에 사용하였다. 이때, LISST-100X는 Fig. 7(b)와 같이 구조상 수로 바닥으로부터 약 12cm 위 지점부터 측정이 가능하였기 때문에, 바닥으로부터 12cm 위 지점부터 3cm 간격으로 총 5지점에 대해 부유사농도를 측정하였다.

3. 실험 결과 분석

3.1 LISST-100X 연직 부유사농도 측정 결과

본 연구에서는 실험수로에서 LISST-100X를 이용하여 연직 부유사농도를 측정하기에 앞서, LISST-100X의 기저 부유사농도 값을 확인하기 위해 맑은 물에서 1분 동안 측정된 결과, 2.79ppm을 나타냈다. 그리고, 두 종류의 유사(Sand, Clay)를 4단계의 농도로 나누고 실험수로에 투입한 후, 중앙부에서 농도 별로 LISST-100X를 이용하여 연직으로 부유사농도를 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. 이때, Fig. 8에서 붉은색으로 표시된 지점은 SL-3000과 동일한 수심에서 동시간대에 측정된 부유사농도 결과로 추후 분석에 사용될 지점이다. 이 때, LISST-100X를 활용한 부유사농도 측정값은 SL-3000의 SNR 측정 결과와 상관관계 분석을 통해 연관성 및 경향성을 파악해야하기 때문에 1초 빈도로 측정된 부유사 농도 값을 SL-3000과 동일한 측정 시간인 1분 단위로 시간 평균하여 경향성 분석을 실시하였다.

LISST-100X를 활용하여 측정된 부유사농도 결과를 보면, 유사를 공급하지 않았을 경우에는 연직으로 부유사 농도 값의 변화가

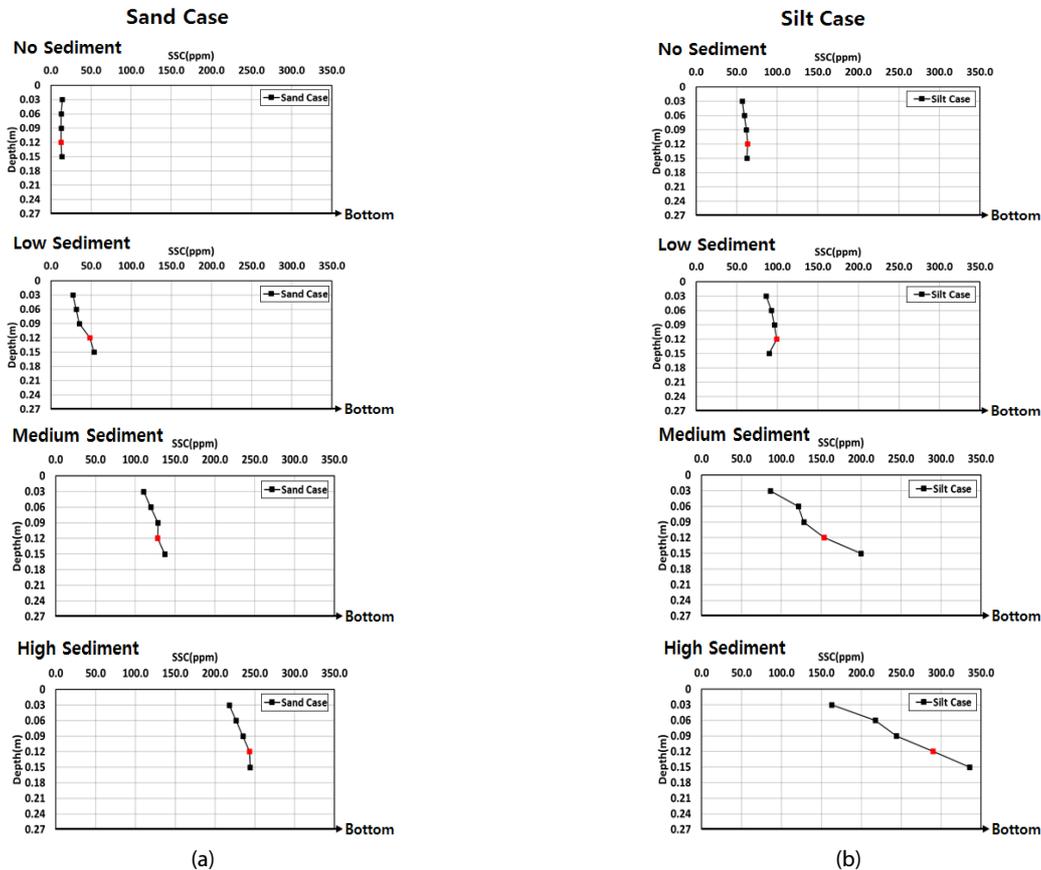


Fig. 8. Vertical Profile of Suspended Sediment Concentration from LISST-100X for Different Amount of Sediment Injection where red Indicator Denoted the Location SL-3000 Measured SNR: (a) Cases for Sand Supply; (b) Cases for Silt Supply

거의 없으나, 수로에 유사를 공급했을 경우에는 수로에 공급하는 유사량이 증가할수록 이에 비례하여 LISST-100X를 통해 측정되는 부유사농도 값도 커지는 것을 확인 할 수 있으며, 일부 이상치 값을 제외하면 바닥부근으로 갈수록 부유사 농도 값이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

두 종류의 유사에 대하여 측정한 결과 중 SL-3000과 동일한 수심에서 LISST-100X를 활용하여 측정한 입도 분포는 모래와

실트에 대해 각각 Figs. 9(a) and 9(b)와 같다. 측정 결과를 보면, 모래와 실트가 가지는 입도분포를 보이며 구분되어 나타남을 알 수 있고, 전체적으로 모래의 경우보다 실트의 경우에 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 실험을 수행한 수로가 순환식 수로이므로 유사를 한 번 공급하면 무거운 입자는 바닥에 가라앉고 가벼운 입자는 흐름에 의해 부유하여 순환 수로를 따라 부유물이 계속 이동하여 다음 실험에 영향을 미치게 된다. 따라서 모래를 이용한

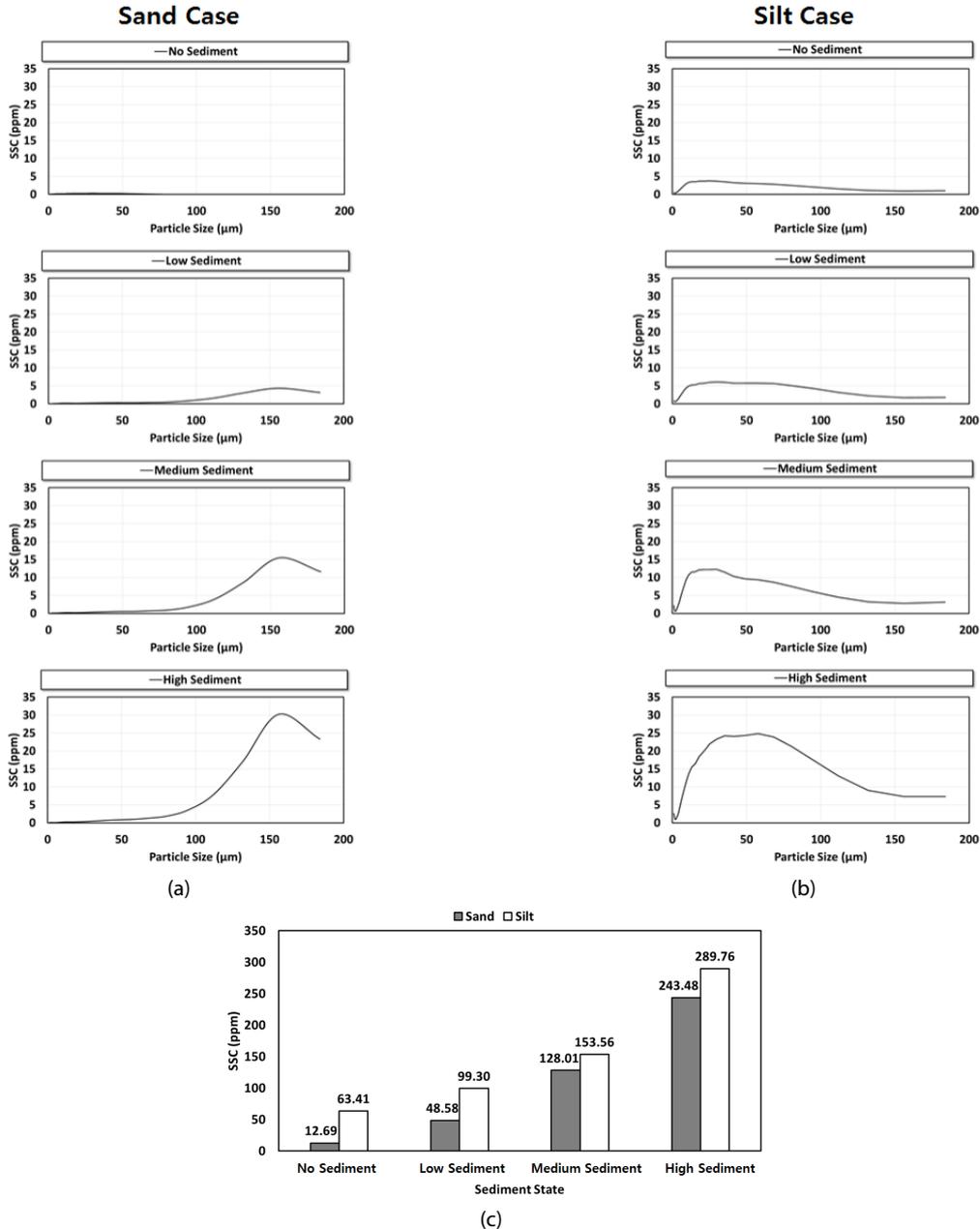


Fig. 9. Particle Size Distribution and SSC at the Same Measurement Location of SL-3000 for Different Amount of Sediment Injection: (a) Particle Size Distribution for Sand Supply; (b) Particle Size Distribution for Silt Supply; (c) Comparison of Suspended Sediment Concentration for Different Amount of Sediment Injection in Both Sand and Silt

실험 이후에 실트를 이용한 실험을 진행하기 전에, 먼저 사용되었던 모래의 영향을 없애고자 수로에 퇴적되어 있던 모래를 제거하고 수중펌프를 이용해 저수조의 물을 재공급하여 실트를 이용한 측정 실험을 실시하였으나, 저수조에 제거되지 못하고 남은 모래 일부가 재공급된 측면이 있다. 따라서, Fig. 9(c)와 같이 부유사 농도도 실트의 경우가 모래의 경우보다 전체적으로 크게 나타났다.

3.2 SL-3000 SNR 측정 결과

본 연구에서는 LISST-100X와 마찬가지로 SL-3000의 맑은 물에서 기저 SNR 값을 확인하기 위하여 측정하였고, 측정 결과 73.72~93.69dB의 범위를 나타냈다. LISST-100X와 마찬가지로 모래와 실트에 대해 농도 별로 SL-3000을 활용하여 1분 간격으로

측정한 SNR 결과는 Fig. 10과 같다. 이때, 그래프 중앙의 붉은색 점선은 수로 중앙에서 부유사농도를 측정한 LISST-100X의 위치를 나타낸다. 측정결과를 보면 유사공급장치를 이용하여 수로에 공급하는 유사량을 조절하면서 4가지 경우에 대하여 SNR을 측정 한 결과, 모래와 실트 모두 공급 유사량이 높아짐에 따라 SNR의 전체적인 횡단 분포의 절대값이 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 송신기로부터 거리가 멀어짐에 따라 물과 유사에 의한 흡수로 인해 신호 손실이 발생하여 실험수로의 경우에도 이에 대한 보정이 필요함을 확인하였다.

농도 별로 SL-3000을 이용하여 모래와 실트에 대해 측정 한 결과를 종합하여 나타내면 Figs. 11(a) and 11(b)와 같으며, 이중 신호 손실이 가장 적게 발생한 첫 번째 Cell의 SNR 측정값과

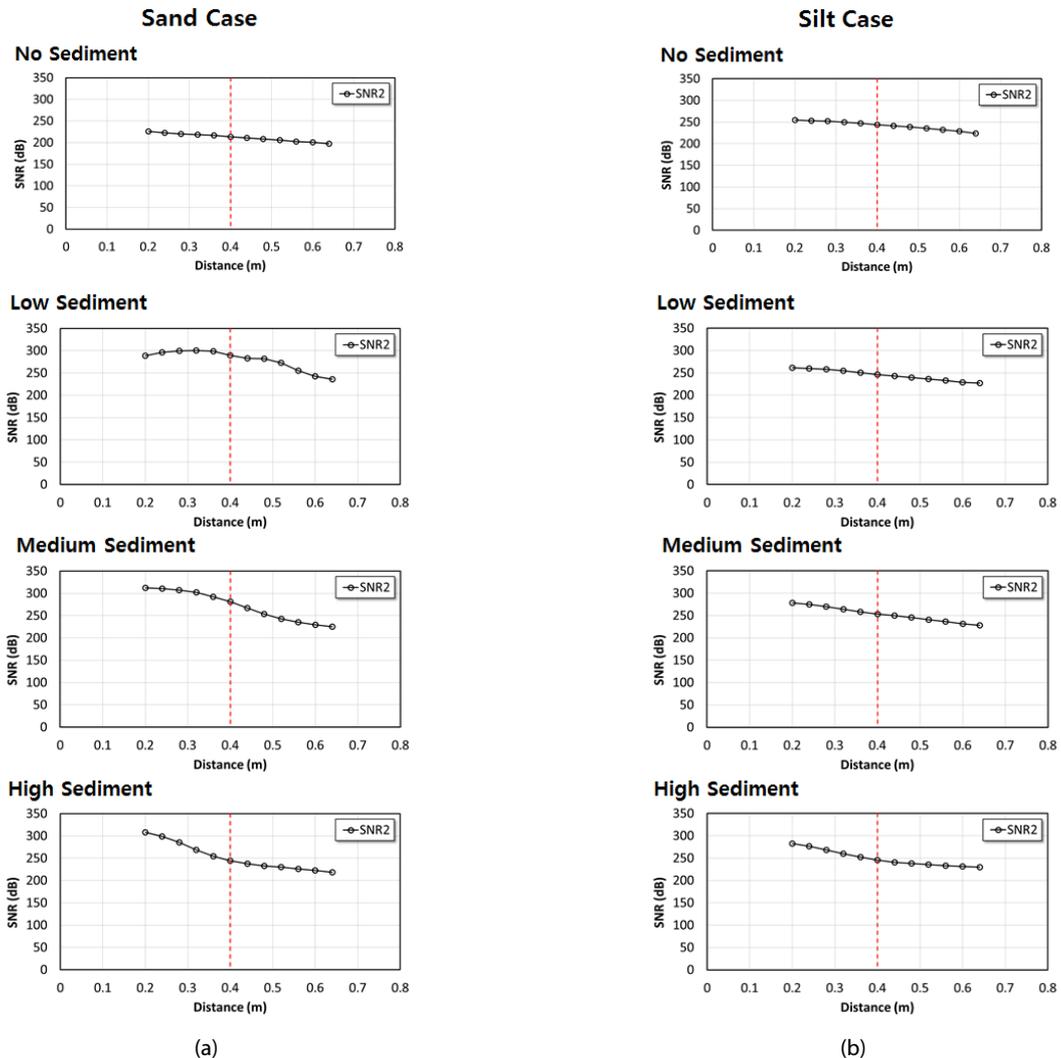


Fig. 10. Horizontal Distribution of SNR from SL-3000 for Different Amount Sediment Injection in Both Sand and Silt Supply, Where Vertical Dot Line Indicates the Center of Flume Channel where LISST-100X Measured Suspended Sediment Concentration: (a) SNR Distribution Along the Beam Path for Sand Supply; (b) SNR Distribution Along the Beam Path for Silt Supply

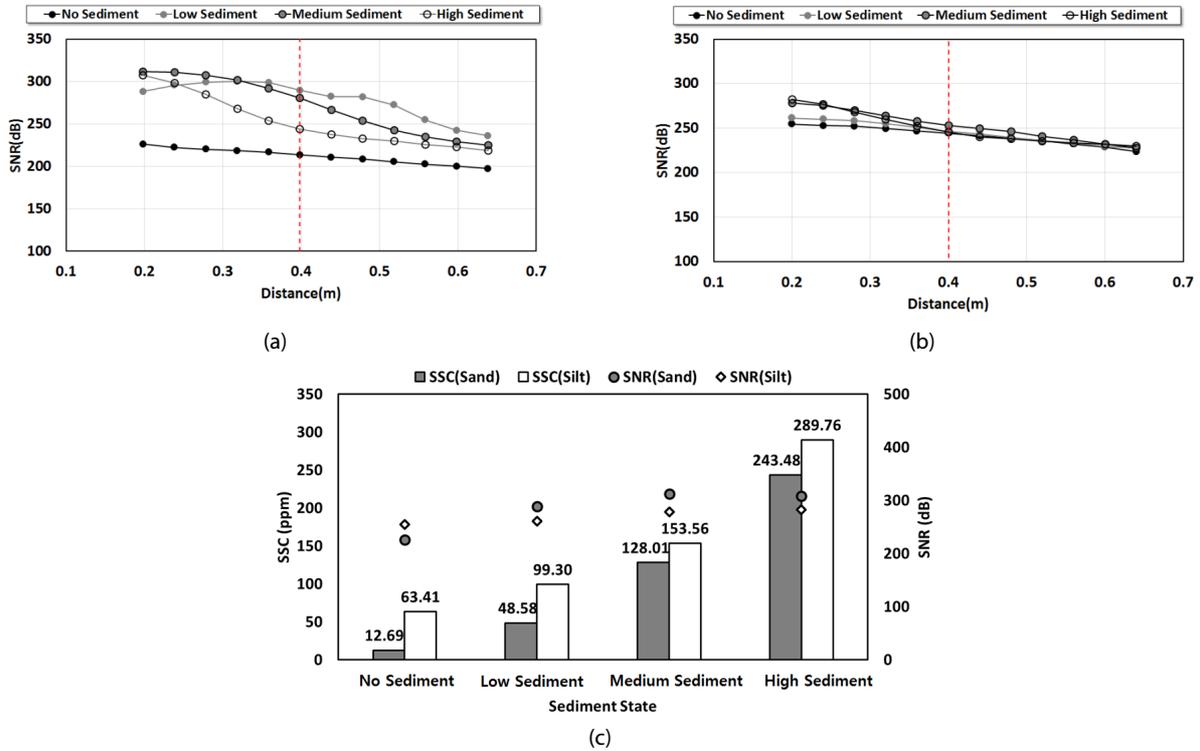


Fig. 11. Comparison of Horizontal SNR Profiles from SL-3000 for Sand and Silt Sediment Supply as well as Comparison with Respect to SSC using LISST-100X at the Channel Center: (a) SNR Profiles for Each Amount of Sand Injection; (b) SNR Profiles for Each Amount of Silt Injection; (c) Comparative Representation of SSC and SNR at the Channel Center

LISST-100X의 부유사농도 측정값을 그림으로 나타내면 Fig. 11(c)와 같다. 결과를 보면, SL-3000을 이용하여 측정한 SNR이 모래의 경우 Fig. 11(a)와 같이 226.18~312.18dB, 실트의 경우 Fig. 11(b)와 같이 254.56~282.51dB 범위의 값을 나타냈으며, 이 중 실트의 경우에 농도 별로 측정한 SNR의 변화 폭이 모래의 경우에 비해 작게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 SL-3000에서 방사되는 3MHz 초음파의 반사 특성이 공급한 유사의 입경에 따라 상이한 특성을 알 수 있다. 동시간 내에 LISST-100X를 활용하여 농도 별로 부유사농도를 측정한 결과를 보면, 전체적으로 모래의 경우보다 실트의 경우에 부유사농도 측정값이 높게 나타났으며, 특히 High Sediment의 경우 모래는 243.48ppm, 실트는 289.76ppm으로 실트의 경우에 부유사농도가 높게 측정되었지만, SL-3000을 이용하여 SNR을 측정한 결과 실트가 아닌 모래의 경우에 반응값이 증가하지 못하고 일정해지는 측정 한계값을 나타냈다. 또한, 모래에서는 공급 유사량에 따라 SNR값의 변화가 크게 나타났지만 실트의 경우에는 4가지 공급유사량에 대해 SNR의 큰 변화폭을 보이지 않았다. 즉, 유사 농도 별 구분은 SL-3000의 3MHz 초음파가 입도가 굵은 모래의 경우 서로 구분이 명확하나 입자가 작은 실트의 경우 상호 구분은 가능하나 간격이

매우 좁아짐을 알 수 있다. 이는 상대적으로 점도가 높은 실트의 경우 Urick (1948)이 제시하였듯이 점성에 의한 흡수율이 모래에 비해 커져 나타난다고 볼 수 있다. 따라서, SL-3000을 실트질이 지배적인 유사를 관측하는 지표로 사용할 경우, 농도별로 구분이 명확하지 않아 유사농도에 따른 점성에 의한 감쇄를 적절히 보정해야 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

부유사농도와 SNR을 상호 비교해보면, 전체적으로 수로에 공급되는 유사량이 증가함에 따라 측정되는 SNR값도 이에 비례하여 증가하지만, 모래를 수로에 투입하면서 측정된 경우인 (●) 표식의 경향을 보면, 실측 부유사농도 값이 증가함에 따라 이에 비례하여 SNR이 증가하지만, 부유사농도가 가장 높았던 High Sediment에서 SNR 값이 Medium Sediment보다 증가하지 않고 오히려 더 낮은 값을 도출하는 것을 확인할 수 있다. 이는 수체에 일정 농도 이상으로 사질 부유물이 존재하게 될 경우, SL-3000이 측정할 수 있는 SNR 측정 한계치를 초과하게 되어, 오히려 더 낮은 SNR 값을 반환함을 의미한다고 하겠다. 본 실험 결과, 사질 부유사의 경우 SL-3000이 측정할 수 있는 SNR의 측정 한계값은 약 312dB로 나타났다.

3.3 SNR 보정 알고리즘 적용성 검토

본 연구에서 사용되고 있는 SNR 값은 송신기로부터 거리가 멀어짐에 따라 초음파의 퍼짐과 초음파가 수체를 통과하면서 물, 부유물에 의해 흡수되어 신호 손실(Transmission Loss)이 발생하여 동일한 농도에서도 초음파가 진행함에 따라 감소하는 경향을 보이기 때문에 SNR을 이용하여 정확도 높은 부유사농도를 예측하기 위해서는 이러한 신호 손실을 보정하는 과정이 필요하다. 이러한 신호 손실을 보정하기 위하여 해외에서는 이미 다양한 연구를 통해 신호 손실을 보정하는 여러 가지 공식들을 제시하였는데, 본 연구에서는 USGS (United States Geological Survey, 미국 지질 조사소)에서 권장하고 있는 대표적인 보정 알고리즘을 실험수로 적용하여 적용성 검토를 실시하였다. USGS에서 권장하고 있는 SNR 보정 알고리즘은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다(Gartner, 2004).

$$SNR_c = SNR_m + 20\log(\psi R) + 2\alpha_w R + 2\alpha_s R \quad (1)$$

여기서, SNR_c 는 신호 손실이 보정된 후의 SNR (dB), SNR_m 은 SL-3000을 이용하여 측정된 SNR (dB), $20\log(\psi R)$ 은 빔퍼짐을 보정하는 공식, $2\alpha_w R$ 과 $2\alpha_s R$ 은 각각 물과 부유물에 의한 흡수로 인한 감쇠를 보정하는 공식을 나타내며, R 은 거리(m), α_w 는 물에 의한 흡수로 인한 감쇠를 보정하는 계수(dB/m), α_s 는 부유물에 의한 흡수로 인한 감쇠를 보정하는 계수(dB/m)를 나타낸다.

이 중에서 빔 퍼짐 보정 항은 송신기에서 방사된 초음파가 수체를 통과하면서 초음파가 확산되어 발생하는 신호 손실을 보정하는 항이다. 보정계수 ψ 는 송신기 부근에서 비구형(non-spherical)으로 확산되는 초음파를 보정하기 위해 산정하며, Eq. (2)와 같이 산정 할 수 있다(Wall et al., 2006).

$$\psi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad (2)$$

$$z = \frac{r\lambda}{\pi a_t^2}$$

여기서, r 은 변환기와 측정된 Cell 사이의 거리를 의미하며, λ 는 파장, a_t 는 송신기의 반지름을 의미한다.

다음으로 물에 의한 흡수 보정은 방사된 초음파가 수체를 통과하면서 물에 의해 흡수되어 감소하는 것을 보정하는 것으로, 보정계수 α_w 를 계산함으로써 보정할 수 있다. 물에 의한 흡수 보정계수는 Wall (2006)이 제시한 공식을 통해 계산 할 수 있으며, 계산하는 방법은 Eq. (3)과 같다.

$$\alpha_w = 8.687 \times \frac{3.38 \times 10^{-6} f^2}{21.9 \times 10^{6 - \left[\frac{1520}{T+273} \right]}} \quad (3)$$

여기서, f 는 주파수(kHz), T 는 수온(°C) 그리고 8.687은 nepers단위에서 dB단위로 바꾸어 주기 위한 계수이다.

또한, 부유물에 의한 흡수는 송신기로부터 거리가 멀어짐에 따라 유사에 의해 감소되는 양을 보정하는 것으로, 보정계수 α_s 를 계산함으로써 신호 손실을 보정할 수 있다. 본 연구에서는 입도분포가 일정한 유사를 사용하여 실험을 진행하였고 유사공급장치 제작을 통해 수로에 유사를 균일하게 공급하였기 때문에, 부유사농도와 입도분포가 일정하다고 가정할 때 적절한 보정계수 산정이 가능하다고 제시된 Topping (2007)의 감쇠 보정 공식을 활용하여 유사에 의한 흡수 보정계수를 계산하였으며, 계산하는 방법은 Eq. (4)와 같다.

$$\alpha_s = -\frac{1}{2} \frac{d}{dr} (WCB) \quad (4)$$

여기서, WCB (Water Corrected Backscatter)는 측정된 SNR에 대해 빔 퍼짐에 대한 보정과 물에 의한 흡수 보정을 수행한 결과 값을 의미한다.

위의 공식을 실험수로에서의 측정 결과에 적용하여 SNR 보정 알고리즘의 적용성 검토를 실시한 결과는 Fig. 12와 같다. 보정을 실시한 결과를 보면, 전체적으로 초음파가 진행함에 따라 발생하는 신호 손실의 보정이 적절하게 이루어져 송신기로부터 거리가 멀어짐에 따라 SNR 값의 감소가 없음을 확인 할 수 있다. 다만, 모래의 경우 SL-3000을 이용하여 SNR을 측정할 결과가 거리가 멀어짐에 따라 일정한 비율로 감소하지 않고 일시적으로 증가 또는 감소하는 경향을 보여, 신호 손실을 보정했음에도 불구하고 SNR의 횡단분포가 일정하지 않게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 즉, ADCP 기종 중 상대적으로 가장 높은 주파수인 3MHz를 사용하는 SL-3000은 입자가 굵은 사질 유사를 측정할 때 반사 특성이 상대적으로 안정적인 기존 연구 결과(Topping et al., 2007; Wall et al., 2006)와 상반되는 경향을 보였다. 따라서, 이를 보정하기 위해서는 추가적인 연구를 통해, 측정 장비의 초음파와 유사의 입경 및 특성 사이의 관계를 고려한 보정공식의 개발 및 적용을 통해 보정을 실시할 필요가 있다고 사료된다.

3.4 SNR과 부유사농도 상관관계 경향성 분석

본 연구에서는 SNR의 신호 손실 보정 결과 중 LISST-100X와 동일한 위치에서 측정된 결과와 동시간 대에 동일 측선에서 LISST-100X를 이용하여 측정된 실측 부유사농도와의 상관관계

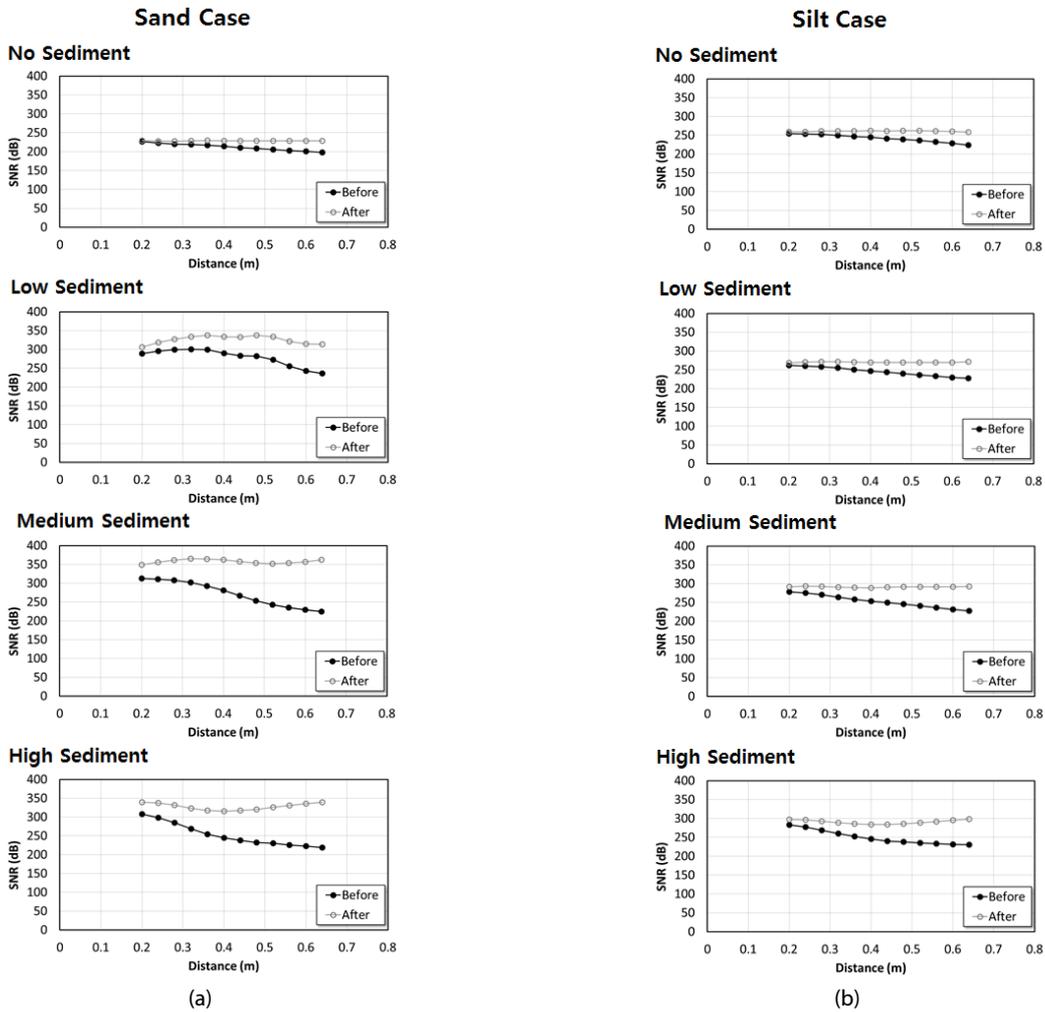


Fig. 12. Corrected SNR Profiles of SL-3000 After Applying Conventional Algorithm Compensating Attenuation by Water and Sediment Particles for Both Sand and Silt: (a) Sand Cases; (b) Silt Cases

Table 1. Relation between SNR and SSC for Different Sediment Conditions in Sand and Silt Injection Cases

Sand Case			Silt Case		
Sediment State	SNR (dB)	SSC (ppm)	Sediment State	SNR (dB)	SSC (ppm)
Clear Water	87.20	2.79	Clear Water	87.20	2.79
No Sediment	228.76	12.69	No Sediment	261.45	63.41
Low Sediment	334.03	48.58	Low Sediment	269.51	99.30
Medium Sediment	362.19	128.01	Medium Sediment	289.03	153.56
High Sediment	315.67	243.48	High Sediment	284.02	289.76

연관성 및 경향성을 분석하였다. 모래와 실트를 구분하여 유사농도 별로 측정된 SNR과 부유사농도 값을 표로 정리하면 Table 1과 같다.

두 가지 유사에 대하여 각각 측정된 SNR과 부유사농도 값을 이용하여 상관관계 경향을 분석한 결과는 Fig. 13과 같으며, 모래와

실트 모두 전체적으로 일정한 연관성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 중 모래의 경우에는 고농도 유사 주입 후 더 낮은 SNR 값이 도출되었기 때문에 상대적으로 실트의 경우보다 다소 낮은 연관성을 보인다고 할 수 있다. 향후 추가적인 실험을 통해 부족한 데이터를 보충하고, 초음파와 유사의 특성 관계를 고려한 보정 공식의 개발

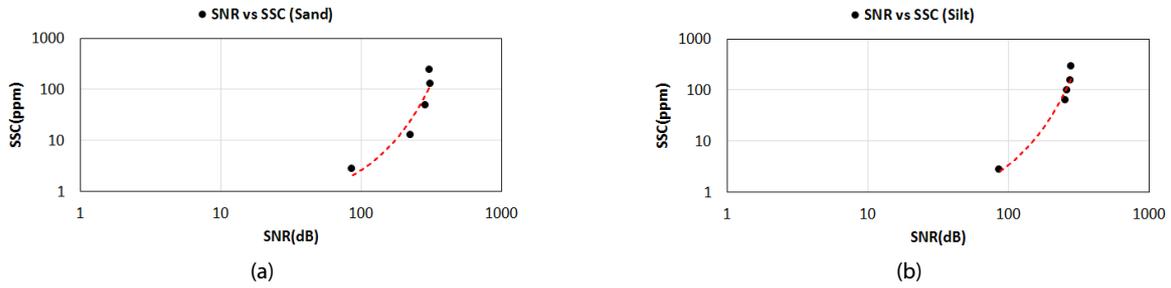


Fig. 13. Established Relationship between SNR and SSC for Both Sand and Silt Sediment: (a) Sand Case; (b) Silt Case

및 적용한다면 실제 하천뿐만 아니라 실험수로 규모에서도 간접적으로 지속적인 유사량 측정이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론 및 향후 연구

H-ADCP를 활용한 기존의 연구는 측정 장비의 한계로 인해 실제 하천에서만 이루어진 반면, 본 연구에서는 흐름조건과 유사의 공급이 통제 가능한 실험수로에서 SL-3000을 이용하여 SNR을 측정하였으며, 측정된 결과를 이용하여 기존에 개발된 SNR 보정 알고리즘을 실험수로에 대하여 적용성 검토를 실시하였다. 또한, 입경에 따른 초음파의 반사특성을 규명하고자 하였으며, 실시간 부유사농도를 측정 할 수 있는 LISST-100X를 동시에 운용하여 SNR과 SSC 사이의 상관관계 경향성 분석을 실시하였다. 본 연구에서 얻은 성과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) SL-3000을 활용한 SNR 측정 결과, 측정 거리가 멀어짐에 따라 물에 의한 음파의 흡수, 부유물질에 의한 음파의 흡수로 인해 신호의 감쇠가 발생하여 신호 손실의 보정이 필요함을 확인하였으며, 이를 보정하기 위하여 기존 연구를 통해 개발된 SNR 보정 알고리즘을 실험수로에서의 SNR 측정 결과에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 검토 결과, 전체적으로 초음파가 진행함에 따라 발생하는 신호 손실의 보정이 적절하게 이루어져 실험수로 규모에도 적용 가능함을 확인하였으나, 입자가 굵은 사질유사의 경우 SNR 보정값의 신뢰도가 낮아 유사 특성을 고려한 보정 공식의 보완이 필요함을 확인하였다.
- (2) D50이 0.025mm인 실트와 0.38mm인 모래 두 가지 유사를 이용하여 SL-3000의 반응을 테스트 해본 결과, 동일한 유사 농도에서도 입경의 차이에 따라 SL-3000에서 발사되는 초음파의 반응이 상이하게 나타남을 확인하였다. 두 가지 유사에 대하여 LISST-100X를 이용하여 부유사농도를 측정할 결과, 모래의 경우가 실트의 경우보다 실측 부유사농도 값이 전체적으로 작게 나타났으나, SL-3000을 이용하여 SNR을 측정할

결과에서는 LISST-100X의 측정 결과와는 반대로 실트의 경우보다 모래의 경우에 SNR이 더 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, SL-3000에서 발사되는 3MHz의 초음파는 상대적으로 작은 입도분포를 가지는 실트에서는 인식할 수 없는 입경이 대부분이었기 때문에 상대적으로 입경이 크고 SL-3000의 초음파가 인식할 수 있는 입경으로 구성되어 있는 모래의 경우에 SNR이 더 높게 나타난 것이라고 사료된다.

- (3) 기존에 개발된 신호 손실 보정 알고리즘을 적용하여 보정을 실시한 SNR 값과 LISST-100X로 측정된 실측 부유사농도와 상관관계 경향성을 분석한 결과, SNR은 부유사농도와 일정한 연관성을 가짐을 확인하였고, 향후 추가적인 데이터 확보를 통해 SNR로부터 정확도 높은 부유사농도의 예측이 가능함을 확인하였다.

본 연구의 결과에 비추어 볼 때, SNR의 감쇠를 보정하는 알고리즘은 실측 부유사농도 값을 변수로 포함하여 중소하천 및 실험수로에 적합하도록 개선이 필요하며, 입경에 따라 초음파의 반사 특성이 상이함을 확인할 수 있었다. 또한, 실험을 통해 획득한 신호대잡음비, 부유사농도 데이터를 활용하여 둘 사이의 상관관계 경향을 파악 할 수 있었다. 다만, 최신 관측 장비인 SL-3000과 LISST-100X를 이용하여 상관관계 연관성 및 경향성은 파악하였지만 여전히 다음과 같은 한계가 존재하므로 추가적인 연구를 통해 개선이 필요하다고 하겠다. 첫째, 신호대잡음비와 부유사농도의 추가적인 데이터 확보를 통해 신호대잡음비와 부유사농도 사이의 명확한 관계식을 제시하고 이를 규명할 필요가 있다. 둘째, 앞서 수행한 현장 실험을 통해 개발한 신호대잡음비의 흡수에 의한 보정 알고리즘을 실험수로에 대하여 적용성 검토는 실시하였지만, 실험수로에 적합하도록 개선하지 못하였으므로 향후 추가적인 연구를 통해 실험수로에 적용 가능하도록 개선할 필요가 있다. 또한, 빔피즘으로 인한 감쇠는 무시할 만큼 작다고 가정하여 보정식에서 제외시켰으나, 이와 관련된 추가적인 실험을 통해 최종적으로 실험수로에 적합한 보정 공식을 개발할 필요가 있다. 셋째, SL-3000의 초음파

가 입경에 따라 반응이 다르다는 것은 확인하였지만, 명확하게 측정 가능한 입경의 범위를 제시하지 못하였으므로 단일 입경을 가진 균일사를 활용하여 다양한 입경에 대해 분석을 실시하고 SL-3000이 측정 가능한 입경의 범위를 명확하게 제시할 필요가 있다. 넷째, 본 연구에서는 한 개의 침두를 가지는 Unimodal에 국한하여 실험을 진행하였지만, 실제 하천에서 홍수가 발생했을 경우 모래와 실트가 섞여 두 개의 침두를 가지는 Bimodal 형태의 유사가 발생하므로 Bimodal에서 초음파가 어떠한 반응을 보이는지 검토 할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B03933965).

References

- Gartner, J. W. (2004). "Estimating Suspended Solids Concentrations from Backscatter Intensity Measured by Acoustic Doppler Current Profiler in San Francisco Bay, California." *Marine Geology*, Vol. 211, pp. 169-187.
- Gartner, J. W., Cheng, R. T., Wang, P. and Richter, K. (2001). "Laboratory and Field Evaluations for the LISST-100 Instrument for Suspended Particle Size Determinations." *Marine Geology*, Vol. 175, pp. 199-219.
- George, D. F. (1999). "Measuring Suspended Sediment Characteristics to Identify Accurate Monitoring Techniques in Stormwater Runoff." master's Thesis Dissertation, The University of New Hampshire, USA.
- Guerrero, M., Szupiany, R. and Latosinski, F. (2013). "Multi-Frequency Acoustics for Suspended Sediment Studies : An Application in the Parana River." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 51, No. 6, pp. 696-707.
- Kim, Y. and Voulgaris, G. (2003). "Estimation of Suspended Sediment Concentration in Estuarine Environments using Acoustic Backscatter from an ADCP." Proc. Fifth Int. Conf. on Coastal Sediments.
- Maureen, E. A. (2009). "Evaluation of aDcps for Suspended Sediment Transport Monitoring, Fraser River, British Columbia." master's Thesis Dissertation, The University of Simon Fraser, UK.
- Seo, K. H., Son, G. S. and Kim, D. S. (2016). "Estimation of Suspended Sediment Concentration in Small Stream with Acoustic Backscatter from Horizontal ADCP based on Real-Scale Field Experiment." *Journal of Civil Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 1023-1035.
- Sequoia (2012). LISST-100X User's Manual Version 5.
- SonTek (2014). The new SonTek-SL (3G) Doppler flow meter.
- Thonon, I., Roberti, H., Middelkoop, H., van der perk, M. and Burrough, P. (2005). "In Situ Measurements of Sediment Settling Characteristics in Floodplains using a LISST-ST." *Earth Surf. Processes*, Vol. 30, No. 10, pp. 1327-1343.
- Throne, P. and Hardscastle, P. (1997). "Acoustic Measurement of Suspended Sediments in Turbulent Currents and Comparison with In-Situ Samples." *Journal of Acoustic Society and Atmosphere*, Vol. 101, No. 5, pp. 2603-2614.
- Topping, D. J., Wright, S. A., Melis, T. S. and Rubin, D. M. (2007). High-resolution measurement of suspended-sediment concentrations and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system, in Proceedings of the 10 th International Symposium on River Sedimentation, Moscow, Russia, 1-4 August, pp. 330-339.
- Traykovski, P., Latter, R. J. and Irish, J. D. (1999). "A Laboratory Evaluation of the Laser in Situ Scattering and Transmissometry Instrument using Natural Sediments." *Marine Geology* 1999, Vol. 159, pp. 355-367.
- Urick, R. J. (1948). "The Absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles." *Acoustical Society of America*, Vol. 20, pp. 283-289.
- Van Wijngaarden, M. and Roberti, J. R. (2002). "In Situ Measurements of Settling Velocity and Particle Distribution with the LISST-ST." *Proceedings in Marine Science*, pp. 295-311.
- Wall, G., Nystrom, E. and Litten, S. (2006). "Use of an ADCP to Compute Suspended Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York." USGS Scientific Investigations Report 2006-5055.
- Yoon, S. O., Hwang, S. I. and Park, C. S. (2013). "Influences of Pretreatment Procedures, and Refractive and Absorptive Indices in Grain Size Analysis of Sandy Samples by Laser Diffraction Grain Size Analyzer." *Journal of Geographic Society*, Vol. 48, No. 6, pp. 819-836 (in Korean).
- Zedel, L. (2008). "Modeling Pulse-to-Pulse Coherent Doppler Sonar." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 25, pp. 1834-1844.