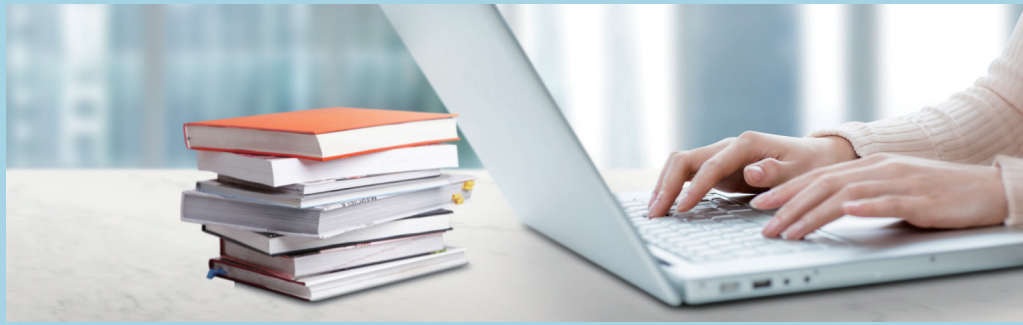




초음파 기반 자동 유사량 산정 기술 개발 및 적용



손근수
한국수자원조사기술원
연구개발실
전임연구원
geunsoo87@kihs.re.kr



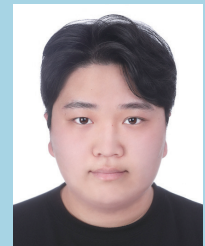
노영신
한국수자원조사기술원
연구개발실
연구위원
rohys@kihs.re.kr



정호근
(주)리버앤씨
기업부설연구소
연구소장/이사
hkchung@rnsea.com



김동수
단국대학교
토목환경공학과
교수
dongsu-kim@dankook.ac.kr



최수인
단국대학교
토목환경공학과
박사과정
suin.c@dankook.ac.kr

01 개요

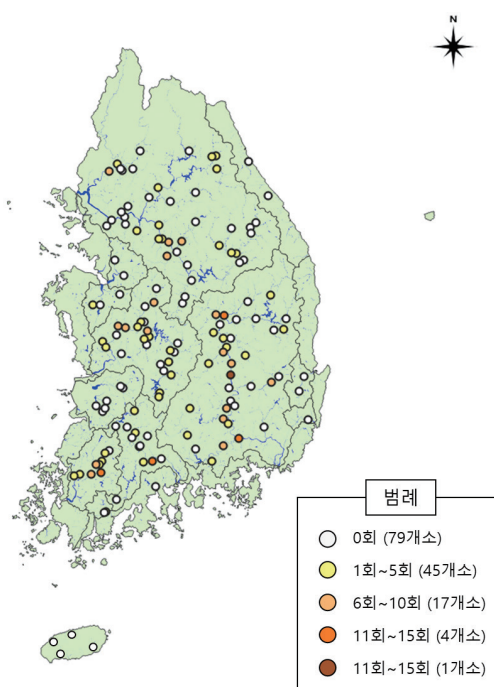
하천 유사량 정보는 유량과 함께 홍수터, 유사이송, 하상변동, 수생태계 해석, 수체혼합 분석 등 하천 거동을 해석하는 데 가장 필수적인 자료로, 하천 구조물 설계 및 해석, 수자원개발 및 관리 등 하천 계획 및 관리 전반에 활용되고 있다. 최근 기후변화로 인한 강수 패턴 변화와 극한 홍수사상의 빈도 증가로 인해 하천 유사량의 변동성이 크게 증가하고 있으며, 대하천 사업으로 대규모 준설/재퇴적으로 하상의 근본적 변화가 발생함에 따라 이에 따른 하천환경 변화를 추적하고 이를 관리하기 위한 대책을 수립할 필요가 있다. 국내 하천의 퇴적 및 침식 등의 하상변동 분석과 이를 토대로 한 대책 수립을 위해서는 하천 주요 지점에서의 유사량 계측자료를 지속적으로 확보하는 것이 매우 중요하다.

현재 국내 유사량 조사는 예산, 인력 등 한계로 전국 유사량 관측망 146개소 중에서 매년 25개소 내외에서만 직접조사가 수행되어 전국 주요 하천에 대한 전체적인 유사량 조사가 이루어지지 못하고 있다. 표 1에서와 같이 국가 유사량조사망 중에서 '06년 ~ '23년

동안 최소 1회 이상 유사량 측정 수행 지점은 67개소(약 46%), 측정이 이루어지지 않은 지점이 79개소(54%) 절반 이상이며, 6개년 이상 지속적인 측정이 이루어진 지점은 22개소로 15%에 불과하다.

표 1. 국가 유사량조사망 측정 현황

계	권역				
	한강	낙동강	금강	섬진강	영산강
146	46	38	28	13	21



[연도별 유사량 조사 현황(2006~2023)]

연도	소계	관 할			
		한강	낙동강	금강	영산강
2006	6	2	2	1	1
2007	6	2	2	1	1
2008	6	2	2	1	1
2009	7	2	2	1	2
2010	20	4	8	4	4
2011	20	4	9	3	4
2012	15	3	7	2	3
2013	15	4	7	2	2
2014	26	4	10	2	10
2015	22	4	9	3	6
2016	17	3	8	2	4
2017	14	3	5	3	3
2018	14	3	7	2	2
2019	44	9	19	8	8
2020	24	6	9	5	4
2021	27	7	9	6	5
2022	25	10	5	6	4
2023	25	6	8	6	5
합계	333	78	128	58	69

환경부에서 수립한 2020~2029년 제2차 수문조사기본계획에서는 중점 추진 과제 중의 하나로 수문조사 첨단화를 통해 홍수기 유사량 조사 자동화 기술을 개발하고 이를 확대하도록 하고 있으며, 2020~2022년 환경기술개발사업인‘수요 대응형 물공급서비스 연구사업’의 일환으로‘비접촉식 유속계와 초음파센서를 이용한 하천 유량 및 유사량 조사기술 개발’사업을 통해 유량측정 목적의 도플러 방식 초음파유속계(H-ADCP, Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler)를 활용한 유사량 연속 측정 기술에 대한 실증화 연구가 추진되었다. 관련 연구에서는 기존 설치 운영 중인 자동유량관측소의 H-ADCP로부터 10분 단위 초음파산란도(acoustic backscatter)를 감쇄보정하고 이를 부유사 농도 지표로 초음파산란도-부유사 농도 관계를 활용하는 연속 측정 기술을 적용하였으며, 지식천의

나주시(남평교) 등 자동유량관측소에 시범 적용하여 기존 샘플링 기반의 부유사 농도 대비 80% 이상 정확도를 보이는 것으로 확인되었다. 다만, 초음파산란도와 실측 부유사 농도 관계를 활용하는 방식은 실측 부유사 농도의 정확도와 관계식의 상관성이 정확도에 영향을 미치기 때문에 실측 부유사 농도의 정확도를 개선할 뿐만 아니라 AI 및 머신러닝 등 다양한 분석 기법을 도입하여 기법 활용에 따른 정확도를 개선할 필요가 있다. 이를 목적으로 2024년 ‘미래변화 대응 수자원 안정성 확보 기술개발사업’의 일환으로 ‘초음파 및 광학기반 하천 유사량 연속 자동측정 기술개발(2024~2027)’이 추진 중에 있다.

본 고에서는 하천 유사량 연속 측정 기술과 관련하여 초음파유속계의 초음파산란도를 활용한 유사량 연속 측정 기술과 관련 연구 개발사업을 통해 진행 중인 기술 개발 현황을 소개하고자 한다.

02

초음파산란도 활용 연속 유사량 측정 기술 및 연구개발 주요 내용

2.1 초음파산란도를 활용한 부유사 농도 측정 기술

H-ADCP는 수중에서의 음파의 변화 특성을 이용하여 유속을 측정하는 장비로, 음파의 반향음을 수집하여 도플러 효과에 의한 음파의 주파수 변화로부터 유속을 측정한다. 수중을 지나는 음파는 부유사 및 음파 장비의 특성에 따라 산란되거나 감쇄하는데, 이는 음파가 지나가는 범위 내에서 유사 농도, 입경, 형태, 밀도 등에 따라 변화한다. 이러한 음파의 감쇄는 수중 흡수, 빔 퍼짐, 유사에 의한 감쇄로 발생하며, 각각의 감쇄에 대한 보정을 통해 초음파산란도를 계산한다. 유사에 의한 감쇄 보정된 초음파산란도(SCB, Sediment Corrected Backscatter)는 부유사 농도의 지표로써, 초음파산란도-부유사 농도 관계의 변수값으로 활용된다(Landers et al., 2016).

그림 1과 같이 자동유량관측소의 H-ADCP는 유속 측정값에 대한 품질 관련 매개변수로 이러한 음파의 후방산란에 대한 측정값을 연속 저장하며, 이를 활용 SCB를 보정할 수 있다. 실측된 부유사 농도와 초음파산란도의 관계식을 개발되면, 초음파산란도를 변수로 연속적인 부유사 농도를 계산하고, 실시간 계측되는 유량을 활용하여 부유사량과 유사량을 계산할 수 있다.

현재 환경부에서 운영 중인 자동유량관측소는 101개소이며, 이 중에서 H-ADCP를 활용하는 관측소는 66개소로, 이를 활용하면 추가적인 장비 설치 없이 기구측된 인프라를 활용하여 연속적인 부유사 농도 측정이 가능하며, 이를 기반으로 총유사량을 연속적으로 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

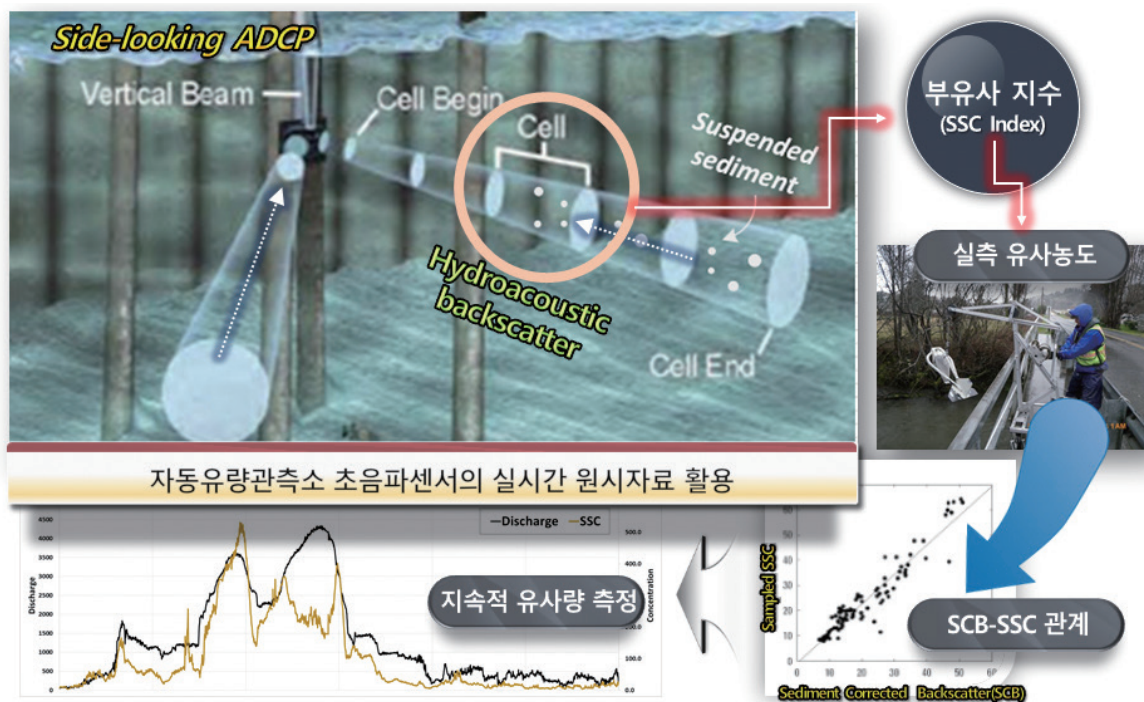


그림 1. 초음파산란도-부유사 농도 관계를 활용한 연속 유사량 측정

2.2 초음파산란도 활용 기술 고도화

언급한 바와 같이 현재 환경부에서 추진하고 있는 ‘초음파 및 광학기반 하천 유사량 연속 자동측정 기술개발(2024~2027)’사업은 초음파산란도를 활용한 연속 유사량 측정 기술의 정확도를 개선하기 위해 기존에 개발된 기술의 고도화를 추진하고 있다. 그림 2는 해당 연구의 주요 내용에 대한 모식도이며, 초음파산란도 보정 기술, 실측 부유사 농도의 정확도 개선, AI 기반 초음파산란도-부유사 농도 관계 상관성 개선을 주요 내용으로 하고 있다. 관계식에 활용되는 실측 부유사 농도는 본 기술의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 요소로, 이를 해당 연구에서 추진하고 LISST 활용 기술, ADCP 이동측정 기술 및 펌핑형 자동채수시스템 개발을 통해 실측자료의 정확도를 개선할 예정이며, 이는 ‘유사 샘플링 대체기술 개발’편에서 다루고 있다.

이론적으로 초음파산란도에서 양방향 손실을 보정한 후방산란 강도를 계산하면 부유사 농도를 산정할 수 있으나, 실제 현장에서는 입자 특성(입자 특성, 입도분포, 유기물 함량 등)의 영향으로 인해 과거 이론식의 적용이 어렵다. 이에 선행 연구인 ‘비접촉식 유속계와 초음파센서를 이용한 하천 유량 및 유사량 조사기술 개발’과제에서는 다중 회귀 분석을 활용하여 수위를 추가 변수로 고려함으로써 기존

부유사채집기를 통한 실측 부유사 농도 대비 약 80%의 정확도를 달성한 바 있으며, 홍수사상에서 발생하는 이력현상을 분석한 바 있다(손근수 등, 2025). 또한, 최근 해외 연구에서는 감쇄 보정뿐만 아니라 유사 감쇄계수와 후방산란계수를 고려한 ABR(attenuation to backscatter ratio)을 통해 비선형적인 관계로부터 부유사 농도를 측정하는 방법을 제시한 바 있다(Guerrero et al., 2016; Aleixo et al., 2020). 이는 결국 하천환경마다 유사 특성이 다르며, 단순한 이론에 기반한 방법으로는 정확한 부유사 농도 예측이 어렵다는 점을 의미한다.

이와 같이, 현장마다 초음파산란도와 부유사 농도 간의 관계가 비선형적인 특성을 보이기 때문에, 본 연구에서는 AI 분석 및 머신러닝 기법을 활용하여 보다 정밀한 보정 모델을 구축하고자 한다. 이를 통해 기존 부유사채집기 방식 대비 측정 정확도를 향상시키고, 최종적으로 85% 이상의 정확도를 목표로 하고 있다.



그림 2. 초음파산란도 활용 연속 유사량 측정 기술 고도화 내용

2.3 총유사량 산정 기법 및 개선

실무에서는 단순 부유사 농도 데이터뿐 아니라, 부유사량과 소류사량을 합한 총유사량 자료가 필요하다. 본 연구에서는 H-ADCP 데이터를 활용하여 총유사량을 산정하는 두 가지 방법을 적용하고자 한다. 첫 번째 방법은 기존 실무에서 활용되는 수정 아인슈타인 방법(Modified Einstein Procedure)을 적용하는 것이며, 두 번째 방법은 머신러닝 및 AI 기술을 활용한 총유사량 산정 알고리즘의 개발이다.

선행 연구에서는 수정 아인슈타인 방법을 적용하여 총유사량을 산정한 바 있으나, 이는 나주시(남평교) 지점 단일 사례만을 대상으로 수행되었기 때문에 다양한 지점에서 분석을 통한 적용성 검토가 필요하다. 또한, 최근 해외 연구에서는 수정 아인슈타인 방법 외에도 SEMEP(Series Expansion Modified Einstein Procedure)과 같은 개선된 방법이 적용된 바 있으며(Shah-Fairbank et al., 2011), 본 연구에서도 이와 같은 연구를 참고하여 총유사량 산정 방법을 보완하고 개선하고자 한다.

그리고 머신러닝 및 AI 기반 총유사량 산정 알고리즘을 개발하여 실측 총유사량 자료와 자동유량관측소에서 획득할 수 있는 다양한 변수(유속, 유량, 부유사 농도, 수위 등)를 통합하여 분석을 수행할 계획이다. 이를 통해 총유사량을 실시간으로 산출할 수 있는 시스템을 구축하고, 기존 방법과 비교하여 실무적 활용성을 극대화할 수 있도록 연구를 수행할 계획이다.

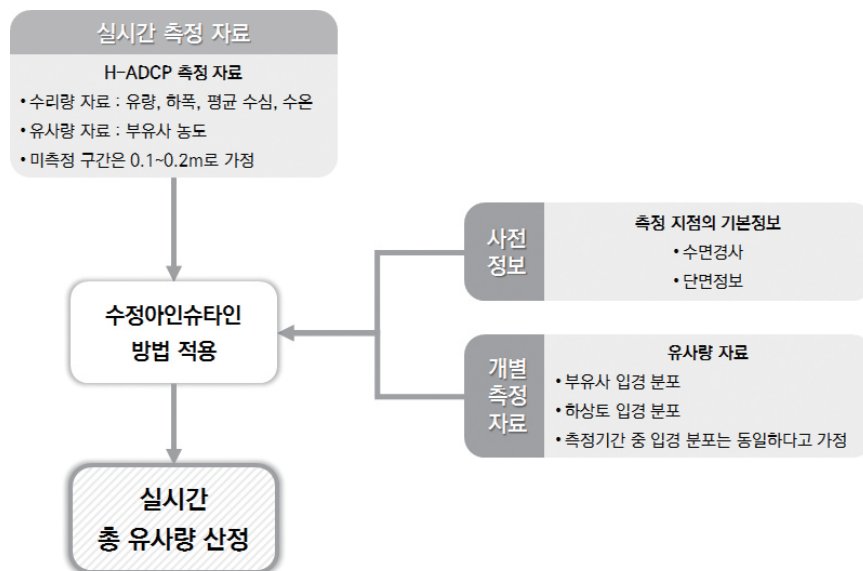


그림 3. H-ADCP 기반 총유사량 산정 과정: 수정 아인슈타인 방법 적용

03

시험지점 구축 및 실시간 유사량 측정 시스템 개발

3.1 초음파산란도 활용 기술 개발 시험지점 구축

본 연구에서는 개발 기술의 활용성 증대를 목적으로 다양한 조건의 실제 하천에서 검증할 수 있도록 수계별로 총 8개소의 시험지점을 구축하였다. 시험지점은 H-ADCP 방식의 자동유량관측소 중에서 유사량 측정이 수행되는 지점을 선정하였으며, 과거 유사량 측정 자료가 확보되는 지점을 우선으로 하였다. 특히, 낙동강 본류의 구미시(구미대교)는 2019년부터 현재까지 매년 유사량 측정이 이루어지는 지점으로 초음파산란도 활용 기술 뿐만 아니라 본 과제에서 개발하고

있는 모든 요소기술을 동시에 적용하고 이를 비교할 수 있는 통합테스트베드로 운영될 계획이다. 8개소의 시험지점에서는 기존 샘플링 방식 이외에도 LISST, 펌핑형 자동채수시스템, 이동형 ADCP를 활용하여 정확한 부유사 농도를 측정하고, 이를 토대로 초음파산란도와 부유사 농도와의 AI 분석 기술, 총유사량 산정 기술을 검증하고 개발 기술의 최적화 및 표준화를 진행할 계획이다.

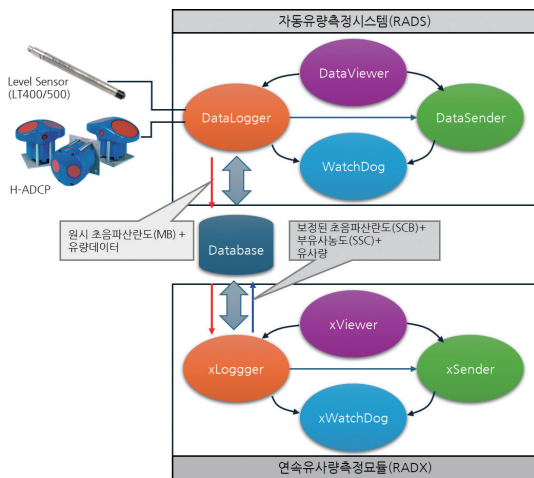


그림 4. 초음파산란도 활용 기술 개발 시험지점 구축

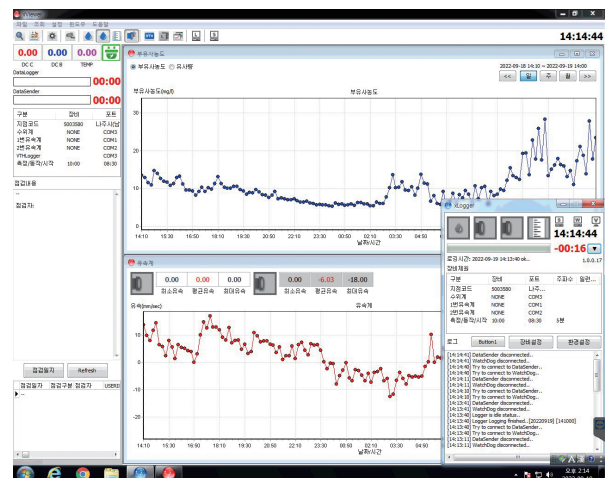
3.2 실시간 유사량 측정 시스템 개발

자동유량관측소는 10분 간격으로 H-ADCP의 원시자료를 수집하는데, 실시간 부유사 농도 및 유사량 계산을 위해 선행 연구에서는 기존 H-ADCP 원시자료의 구성을 토대로 초음파산란도 보정 및 부유사 농도 산정을 위한 원시자료의 표준 포맷을 결정하였으며, 원시자료로부터 유량과 부유사 농도를 계산하고 산출된 유량과 부유사 농도를 활용하여 실시간으로 부유사량 및 유사량을 산출하는 실시간 운영 시스템을 개발하였다. 그림 5(a)와 같이 시스템 내에 연속 유사량 측정 모듈은 자동유량제어시스템(RADS)로부터 H-ADCP의 원시자료를 수집한다. 자동유량제어시스템의 DataLogger는 H-ADCP의 유속 데이터와 수위 센서의 수위 데이터를 기반으로 유속 RawData(MB)와 유량 데이터를 생산하고

DB에 저장된다. 유수량 측정시스템은 DB에 저장된 H-ADCP의 RawData(원시 초음파산란도(MB))와 유량 데이터를 기반으로 보정된 초음파산란도(SCB)와 부유사 농도(SSC)를 산정하고, 유량측정시스템의 유량 값을 곱하여 연속 유수량을 계산한다. 그림 5(b)는 실시간 운영을 위해 개발된 자료수집 및 분석 S/W이며, 이를 통해 자동유량관측소에서 유량과 함께 부유사량 및 유수량을 실시간으로 산정한다.



(a) 실시간 유수량 측정 모듈의 구조



(b) 실시간 유수량 산정 S/W

그림 5. 실시간 유수량 측정 시스템

실시간 유수량측정시스템은 현재 8개소 시험지점에 구축되어 운영 중에 있으며, 본 과제에서 고도화가 진행 중인 AI 기반의 초음파산란도-부유사 농도 관계 분석 알고리즘과 총유수량 산정 기술을 적용할 수 있도록 개선될 예정이며, 해당 시스템은 현재 운영 중인 자동유량관측소에 바로 적용할 수 있도록 사업화 가능 모델로 개발할 계획이다.

04

초음파산란도 활용 기술 현장 적용 사례

선형 연구인 '비접촉식 유속계와 초음파센서를 이용한 하천 유량 및 유수량 조사기술 개발' 과제에서는 시험지점인 지식천의 나주시(남평교) 이외에도 다양한 지점의 자동유량관측소를 대상으로 초음파산란도-부유사 농도 관계를 적용한 유수량 측정 기술의 정확도를 평가하였다. 본 고에서는 총 11개 지점, 연 단위의 27건의 분석된 데이터 중에서 한강 수계 1개소(이포보(상류))와 낙동강 수계 3개소(구미시(구미대교), 칠곡군(호국의다리), 함안군(계내리)), 금강 1개소(대전시(신구교)), 영산강 1개소(나주시(남평교))를 대상으로 분석한 결과를

소개하고자 한다.

H-ADCP 초음파산란도를 활용하여 부유사 농도를 측정한 6개소의 기존 부유사채집기를 활용한 유수량 측정횟수와 분석에 사용된 H-ADCP 모델을 나타낸 결과는 아래 표 2와 같다. 그리고 분석을 수행한 대상지점의 H-ADCP는 RDI Channel Master로 300, 600 kHz의 주파수를 사용하고 있다.

표 2. H-ADCP 부유사 농도 적용성 검토 지점 현황

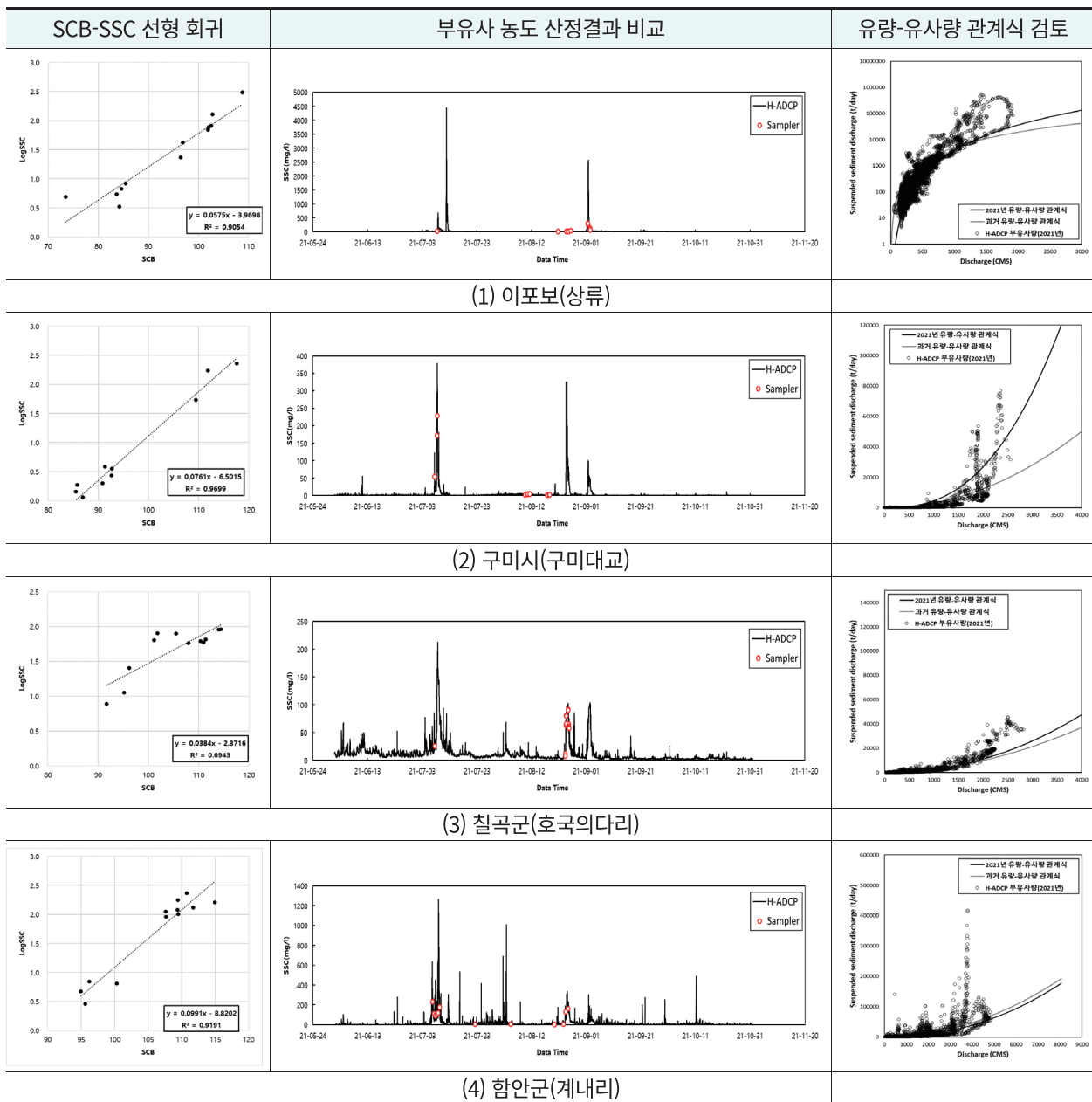
수계	하천명	지점명	관측소 코드	H-ADCP 모델	유사측정	
					자료수	측정연도
한강	한강	이포보(상류)	1007762	CM300	14	2021년
낙동강	낙동강	구미시(구미대교)	2011740	CM300	11	2020년
	낙동강	칠곡군(호국의다리)	2011750	CM300	13	2021년
	낙동강	함안군(계내리)	2020715	CM300	12	2021년
	낙동강	함안군(계내리)	2020715	CM300	12	2021년
금강	갑천	대전시(신구교)	3009793	CM300	11	2021년
영산강	지석천	나주시(남평교)	5003780	CM600	20	2019년

표 2의 자동유량관측소를 대상으로 H-ADCP의 원시자료로부터 초음파산란도를 보정하고 동시에 측정된 실측 부유사 농도와 선형 회귀식을 개발하였으며, 초음파산란도와 함께 수위를 고려한 다중 회귀식을 적용하여 각각의 관계식에 따른 정확도를 분석하였다. 그림 6은 지점별로 개발된 다중 회귀식을 활용한 부유사 농도 산정 결과를 실측값과 비교한 것이며, 이를 토대로 유수량을 시계열로 도시한 것이며, 표 3은 지점별로 부유사 농도를 측정하기 위해 사용한 초음파산란도의 정확도를 분석한 결과이다. 측정영역에 따른 초음파산란도와 실측부유사 농도와 선형회귀를 통해 분석한 관계식과 수위를 고려한 관계식을 통해 부유사 농도를 측정한 결과를 비교한 결과, 선형회귀를 통해 산정한 관계식의 적용 결과 실측 대비 평균 정확도는 72.79 %로 나타났으며, 수위를 함께 고려한 관계식의 적용 정확도는 83.40 %로 10.61 %의 정확도 향상 효과를 보였다. 다음과 같이 수위를 고려할 경우 정확도가 향상되는 이유는 홍수사상에서 발생할 수 있는 이력현상으로 인한 부유사 농도의 변화를 반영할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 초음파산란도를 기반으로 한 연속적 모니터링 결과를 활용하여 유량-유수량 관계를 도시한 결과, loop 형태로 나타나는 이력현상에 대한 모니터링이 가능함을 확인할 수 있었다.

수위를 고려한 관계식을 적용한 초음파산란도를 활용하여 실측 부유사농도와 비교한 결과 측정 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 하지만, 수위를 고려한 관계식을 통해 산정된 부유사 농도도 기존의 연구들과 같이 저농도에서 많은

표 3. H-ADCP 부유사 농도 적응성 검토 지점 현황

수계	하천명	지점명	SCB-SSC 정확도(%)	SCB, Stage - SSC 정확도(%)
한강	한강	이포보(상류)	61.81	76.14
낙동강	낙동강	구미시(구미대교)	80.70	87.45
	낙동강	칠곡군(호국의다리)	60.64	87.69
	낙동강	함안군(계내리)	65.19	82.26
금강	갑천	대전시(신구교)	93.52	90.63
영산강	지석천	나주시(남평교)	74.88	76.24
평균			72.79	83.40



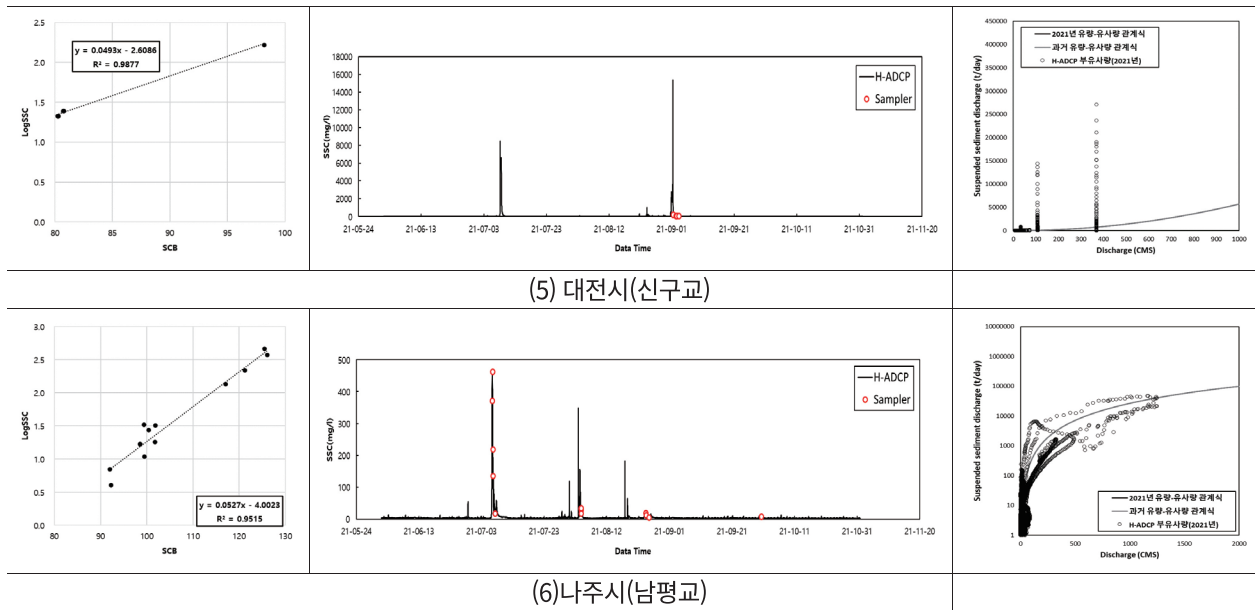


그림 6. 초음파산란도-부유사 농도 관계를 적용한 유수량 산정결과

상대적으로 오차율이 크게 측정되는 것으로 나타났으며 10mg/l 이하에서는 많은 오차가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 저농도에서는 실제 부유사채집기를 통한 부유사 농도 측정결과에 많은 오차가 발생할 수 있기 때문에 LISST와 같은 침단장비를 활용하여 저농도 조건의 부유사 농도 측정 결과의 정확도를 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 초음파산란도를 지표로 하는 관계식 개발의 경우 수위뿐만 아니라 유사 특성 반영할 수 있는 다양한 인자를 고려할 경우 정확도를 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 현재 연구가 추진 중인 과제에서는 이러한 선행연구결과를 토대로 개선 방안을 고려한 기술개발을 진행 중에 있다.

05 결론

본 고에서 기술한 초음파산란도를 활용한 유수량 측정기술은 기존의 유수량 측정방식의 한계를 극복하고 국가 차원의 하천관리가 가능하도록 유수량 측정을 확대하는 데 활용할 수 있을 것이다. 따라서 관련 기술에 대한 국가 R&D 사업에서는 자동유량관측소에 설치된 H-ADCP의 초음파산란도를 활용하여 연속적이고 자동화된 부유사 농도 및 총유수량 산정 기술을 개발하고, 이를 기존 자동유량관측소와 연계하여 실시간 유수량 자료를 제공할 수 있는 통합 시스템 구축을 목표로 하고 있다. 선행 연구를 통해 수위를 함께 고려한 다중회귀식 적용 시 기존 선형관계식 대비 부유사 농도 측정 정확도가 향상 향상됨을 확인하였으나, 저농도 조건 및 다양한 유사 특성에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 나타났다.

이에 향후 연구에서는 AI 및 머신러닝 기법을 적용한 보정 알고리즘을 개발하여 다양한 하천 환경에서도 높은 정확도를 확보하고자 한다. 이를 통해 국가하천의 자동유량관측소를 중심으로 실시간으로 총유사량 측정 시스템을 확대할 뿐만 아니라, 유사량 측정 자료의 연속성과 신뢰성을 높여나갈 계획이다. 또한, 관련 지침과 표준 운영 기준을 마련하여 효율적인 하천 유사 관리 체계를 구축할 계획이다. 이를 통한 실시간의 유사량 자료는 홍수 대응 및 하천 유지관리와 같은 실무 분야에서 효과적으로 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미래변화 대응 수자원 안정성 확보 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2024-00397970).

참고문헌

- 손근수, 김동수, 노영신. (2025). 이력현상을 고려한 H-ADCP 기반 하천 부유사 농도 측정 기법 개발 및 적용. 한국수자원학회논문집, 58(2), 141-154.
- Gellis, A. C., Fitzpatrick, F. A., & Schubauer-Berigan, J. P. (2013). Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. *Hydrological Processes*, 27(7), 1103-1118. <https://doi.org/10.1002/hyp.9255>
- Shah-Fairbank, S. C., Julien, P. Y., & Baird, D. C. (2011). Total sediment load from SEMEP using depth-integrated concentration measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12), 1606-1614.
- Landers, M.N., Straub, T.D., Wood, M.S., and Domanski, M.M. (2016). Sediment acoustic index method for computing continuous suspended-sediment concentrations. No. 3-C5, United States Geological Survey, Reston, VA, U.S.