

## Estimating Bed Load Discharge Using an Acoustic Sensor for Sediment Disaster Prevention

Jong Ho Choi<sup>1#</sup>, Kye Won Jun<sup>1+</sup>, Young Ho Yoon<sup>2+</sup>, Hyeon Gyu Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do, Korea

<sup>2</sup> Dept. of Smart City & Civil Engineering, Gangwon State University, 270 Yeonju-ro, Gangneung-si, Gangwon-do, Korea

### Abstract

This study examined the possibility of estimating bed load discharge using a pipe hydrophone, an acoustic measurement sensor. To that end, a small-scale on-site hydraulic experiment device was built, and regression equations were developed based on the analysis of collision sound signals by bed load discharge, grain size distribution, and flow velocity change. They were classified into pulse and sound pressure integral-based regression equations according to the characteristic value of collision sound. To verify the regression equations, the calculated values of bed load discharge were compared with the actual values. The results showed that the regression equation based on the sound pressure integral had a higher accuracy than the pulse-based regression equation, and the error rate compared to the measured value was approximately 19%. The Index of Agreement (IoA) was found 0.83, indicating a good agreement between the changing trend and estimated value of bed load discharge. It is believed that sediment disasters could be prevented by incorporating various experimental conditions and establishing a corrective relationship with the actual bed load discharge in the river.

**Key words:** hydraulic experiment, pipe hydrophone, bed load collision sound, bed load discharge estimation

### 1. 서론

최근 이상기후에 따른 영향으로 산지에서 발생한 토사가 하류의 하천으로 연계되어 대규모의 재해로 발생할 가능성이 증대되고 있다. 실제로 2019년 10월 강원도 삼척시 남부 동해안 지역에 시간당 최대 100 mm가 넘는 폭우가 쏟아져 산지에서 발생한 대량의

토사가 하류 민가로 유입되어 인명 및 재산상에 큰 피해를 입은 사례가 있다. 이처럼 토사재해로 인한 피해 예방과 방재구조물의 적지 및 규모 등을 선정하기 위해서는 하천 상류에서부터 연속적이고 정확한 유사량의 파악이 중요하다(National Institute of Forest Science, 2018). 그러나 2018년 한국수문조사연보에 의하면 수문조사(강수량, 유량, 유사량, 수위, 토양수분량, 증발

<sup>#</sup> The 1st author: Jong Ho Choi, Tel. +82-33-570-6446, Fax. +82-33-570-6501, e-mail. apt105@kangwon.ac.kr

<sup>+</sup> Corresponding author: Kye Won Jun, Tel. +82-33-570-6816, e-mail. kwjun@kangwon.ac.kr

Young Ho Yoon, Tel. +82-33-6600-8242, e-mail. yhyoon@gw.ac.kr

산량) 개소 수 합계 대비 유사량 관측 개소 수는 1.2 %에 불과한 것으로 나타났다. 또한 10년 이상 유사량을 정기적으로 계측한 지점은 1개소에 불과한 것으로 확인되었다(Ministry of Environment, 2019). 아울러 수문조사기본계획 수립 보고서(2010년~2019년)에 따르면 유사량 계측장치에 대한 국내의 기술수준은 이상적 기술수준 대비 40 %로 선진국의 85 %에 비해 현저히 낮은 것으로 확인되었다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008). 특히 유사량 중에서도 현재 소류사의 계측은 부유사에 비해 상대적으로 어렵고 정확도 또한 낮아 일반적으로 수행되지 않고 있다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2016). 하지만 하천 시스템의 퇴적물 중 굵은 입자가 하천의 형태와 방호 및 조정 능력을 담당하기 때문에 소류사량을 정량화하는 것은 중요하다(Hilldale, *et. al.*, 2014). 이처럼 국내에서 소류사량 조사가 원활히 이루어지지 않고 있는 가장 큰 이유는 재래식 샘플러를 이용한 직접계측 방법이 이용되고 있기 때문이다. 이 방법은 계측 절차상 위험성이 높고 비경제적일 뿐만 아니라 계측자료의 신뢰도가 매우 낮다. 또한 연속적인 소류사량의 변화를 파악하는 데 기술적으로 많은 한계가 있다. 이에 체계적인 데이터 관리와 신뢰도를 확보하기 위해서는 소류사량을 연속적으로 모니터링할 수 있는 계측 기술의 개발과 확립이 필요하다.

최근 국내·외에서는 재래식 샘플러를 이용한 직접계측방법의 한계를 보완하기 위해 센싱기법을 활용하여 소류사량을 간접추정하는 방법이 개발·검토되고 있다. 대표적인 계측 센서로 하상면에 설치된 파이프에 소류사 입자가 충돌할 때 발생하는 음향정보를 계측하여 소류사량을 연속적으로 추정할 수 있는 파이프 하이드로폰이 있다. 이러한 장치들은 보통 중량식 소류사 모니터링 장치인 Pit 샘플러와의 교정관계 확립을 통해 정량적인 소류사량 추정이 가능해진다. 하지만 직접 교정이 불가능한 경우에도 소류사 이송

의 시작 및 중단, 소류사 이송 강도에 대한 정성적 정보를 제공할 수 있다(Raven, *et. al.*, 2010; Beylich & Laute, 2014). 아울러 재래식 샘플러와는 달리 계측 용량에 제한이 없으며, 연속적인 계측이 가능하여 실시간 모니터링 기술과 데이터 확보가 가능하다는 장점이 있다(Rickenmann, 2017). 실측 소류사량과의 성공적인 교정관계 보고 사례 중 하나로, Mao, *et. al.*(2016)에 의하면 5~40 mm, 100 mm의 계측 가능한 10개의 입자 크기를 포함하여 약 0.001~1 kg/s/m의 넓은 범위의 소류사량에 대해 적용 가능한 것으로 나타났다.

국내의 소류사량 간접계측 장치의 도입은 Lee, *et. al.*(2013)이 국외 소류사량 계측장치의 적용사례 조사를 통한 기초적인 자료를 제공하면서부터 도입되었으며, Jun, *et. al.*(2015)은 파이프 하이드로폰을 이용하여 유량변화에 따른 소류사 입경별 충돌음향에 대한 인지범위를 구분한 바 있다. Seo(2019)는 산림유역의 환경에 따라 산림훼손 유형(산불, 사면붕괴, 벌채)과 국내 대표적 모암 유형(화성암, 변성암, 퇴적암)으로 구분하고 파이프 하이드로폰과 Pit 샘플러를 활용하여 각 특정 유형에 대한 소류사 유출 특성을 분석한 바 있다. 위와 같이 현재 국내의 경우 파이프 하이드로폰을 이용한 소류사량 추정 연구가 일부 진행되고 있으나, 기초 수준단계로 명확한 소류사의 유출특성과 유출량에 대한 관계분석이 부족한 상태이다. 이에 국내 환경에 적합한 계측방법을 개발하고 신뢰성 검토에 관한 연구가 활발히 수행된다면 소류사량을 정량적으로 계측 및 분석할 수 있는 기술 확보가 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 파이프 하이드로폰을 활용하여 실외실험이 가능하도록 소규모 현장 수리실험장치를 구축하고 소류사량 및 입도분포, 유속 변화에 따른 파이프 하이드로폰에서 인지되는 음향특성을 분석하여 소류사량 추정 가능성 여부를 검토하는 데 목적이 있다.

## II. 기본이론

### 1. 파이프 하이드로폰을 이용한 소류사량 추정 방법

#### 1) 소류사량 계측 원리

파이프 하이드로폰을 이용한 소류사량 계측시스템은 <Figure 1>과 같다. 시스템의 구성은 소류사의 충돌음을 취득하는 센서부, 충돌음의 파형을 정형하는 1차 처리부, 소류사량을 추정하기 위한 2차 처리부로 구성된다.

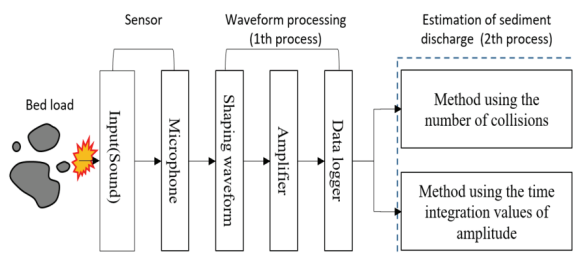


Figure 1. Operational flow diagram for the pipe hydrophone system

시스템에 따른 소류사량 계측 원리는 다음과 같다. 파이프 하이드로폰 내부에 견착되어 있는 마이크로폰 (Microphone)이 소류사의 충돌음을 감지하여 전기신호로 변환한다. 변환된 신호는 <Figure 2>와 같이 양의 진폭값을 추출하고 신호의 정점을 연결한 포락선 (Envelope)을 생성한다. 생성된 포락선은 증폭기 (Amplifier)에 의해 2, 4, 16, 64, 256, 1024배의 배율로 증폭되는데, 이는 증폭배율에 따라 감지 가능한 소류

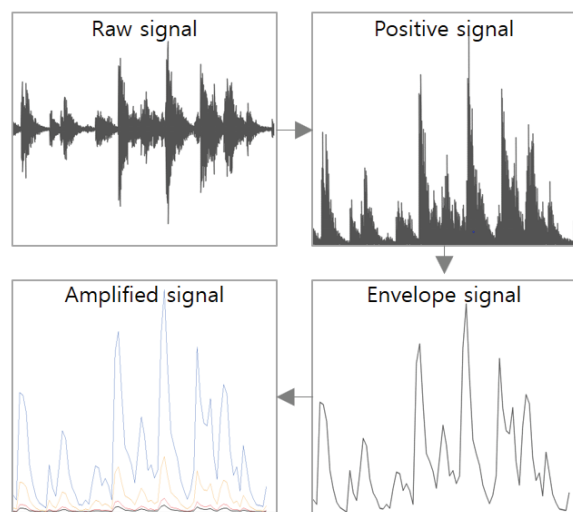


Figure 2. Conversion process of raw waveform

사의 입경 범위가 달라지기 때문이다. 이러한 여러 배율의 증폭신호와 원시신호는 데이터로거(Data logger)에 의해 지속적으로 기록 된다.

#### 2) 소류사량 추정 방법

데이터로거에 의해 기록된 증폭신호와 원시신호를 이용하여 소류사량을 추정하는 방법은 크게 두 가지로 분류된다.

첫 번째는 사전에 정의된 특정 단일 임계치를 초과하는 증폭신호에 대해 펄스 수를 검출하여 소류사량을 추정하는 방법이다. <Figure 3>에 여러 배율의 증폭신호와 임계치의 관계로부터 검출되는 펄스 수를 나타내었다. 64배 배율의 신호에서 검출되는 펄스 수는 13개, 16배에서는 3개, 나머지 신호의 경우 0개가 기록된 것을 볼 수 있다. 이 방법은 검출률(펄스 수/입자 수)을 가장 양호하게 나타내는 특정 배율의 신호를 선정하여 소류사량을 추정하는 방법이다.

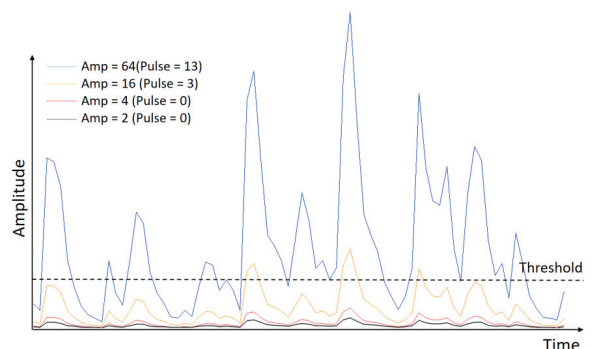


Figure 3. Number of pulses for collision sound signal

두 번째는 <Figure 4>와 같이 원시신호의 특정 시간 간격에 대한 진폭의 적분치(음압적분치)와 실측 소류사량과의 관계 분석을 통해 소류사량을 추정하는 방법이다.

현재 국내외에서 운용되고 있는 파이프 하이드로폰 시스템의 대부분은 펄스 수와 소류사량의 상관관계를 분석하는 연구가 주를 이룬다. 그러나 Suzuki, et al.(2013)은 이송되는 소류사량이 많을 경우 신호 파형의 중첩으로 인하여 펄스 수가 감소할 가능성이 있으므로 소류사량 추정시 면밀한 검토가 필요하다고 제

안하였다. 이에 본 연구에서는 소류사량 추정을 위해 보다 적용성이 높은 방법을 도출해 내고자 펄스 수와 음압적분치를 이용한 소류사량 추정 방법에 대해 비교·검토를 수행하였다.

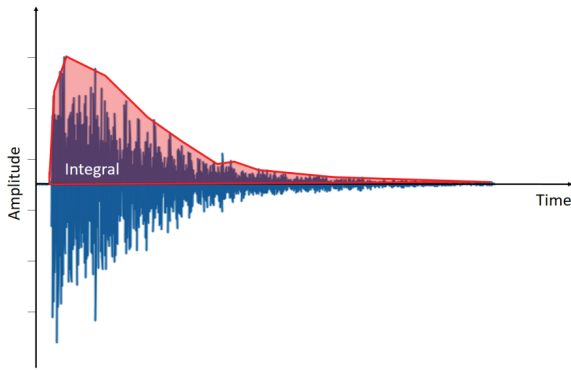


Figure 4. Integral value of amplitude for collision sound signal

### III. 실험장치의 구성 및 방법

#### 1. 실험장치의 구성

##### 1) 파이프 하이드로폰

파이프 하이드로폰은 <Figure 5>와 같이 33.6 cm의 길이를 갖는 스테인리스 스틸 재질의 원형 금속관(외경 25 mm, 내경 20 mm)의 형상을 가지고 있으며, 금속관의 절반이 수중으로 노출되어 있는 소류사 충돌부와 마이크로폰이 내장된 수밀성 구조를 갖는 본체로 구성된다.

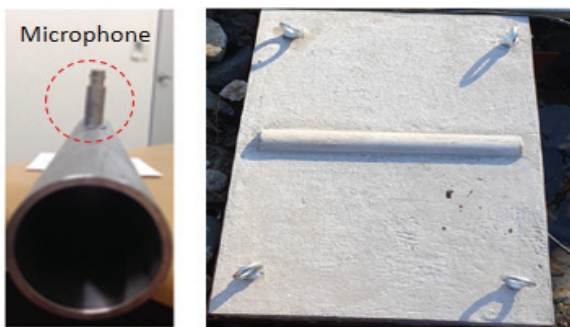


Figure 5. Pipe hydrophone

금속관은 유수에 의한 변위 발생 방지와 고정을 위해 콘크리트 박스를 제작한 후 박스 중앙부를 절개하여 매립하는 방식으로 고정하였다. 마이크로폰은 금

속관의 중앙부에 홀을 내어 거치하였고 사양은 <Table 1>과 같다. 소류사의 충돌음은 분당 25,600개의 샘플링레이트로 데이터로거에 수집되도록 설정하였다. 해리 나이퀴스트(Harry Naquist) 이론에 의하면 12,800 Hz까지 분석할 수 있다. 아울러 <Figure 6>과 같이 소류사의 충돌음을 계측하기 위해 National Instrument사의 LabVIEW언어를 이용하여 데이터 수집 및 저장 프로그램을 구축하였고, 데이터로거에 기록된 충돌음 신호에서 펄스 및 음압적분치를 검출하기 위한 음향 특성치 추출 프로그램을 구축하였다.

Table 1. Microphone specifications

Specification	
Frequency response	20~20,000 Hz
Sensitivity	39.7 mV/Pa
Temperature range	-10~+50 °C
Excitation voltage	18~30 VDC
Inherent noise(A weighted)	<30 dB
Dynamic range(3% Distortion limit)	>122 dB
Constant current excitation	2~20 mA
Output bias voltage	5.5~14 VDC
Output impedance	<150 Ohm

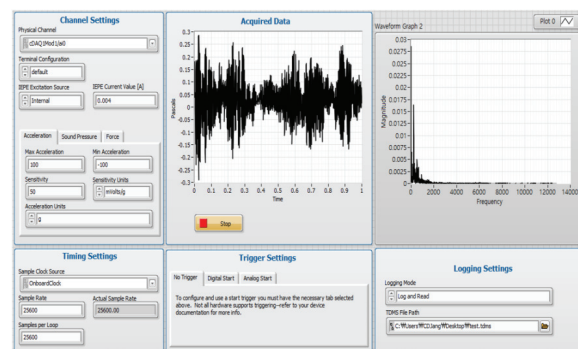


Figure 6. GUI for data collection and storage program

#### 2) 실험수로 및 실험장치

실험장치는 상시 유수가 흐르고 산지하천의 특성을 띄고 있는 강원도 삼척시에 소재한 구룡골에 설치하였다. 실험수로는 <Figure 7>과 같이 구형단면수로의 형태로 제작하였으며, 유심부의 일부를 굴착하여 하천 종단방향의 하상구배에 맞추어 설치하였다. 실험수로

의 제원은 길이 5.3 m, 폭 0.34 m, 높이 0.5 m, 경사 1/99 %이다. 파이프 하이드로폰은 소류사의 흐름 안정 구간을 고려할 수 있도록 수로 유출부에서 1.5 m 지점에 거치공간을 확보하여 설치하였다.



Figure 7. Experimental flume

소류사의 충돌음 특성을 정량화하기 위한 실험장치는 수위계와 유속계, 비디오카메라, 데이터로거 등으로 구성되어있다. 유량 설정의 경우 실험수로 측면에 간이 배수로를 조성한 뒤 모래 사대를 이용하여 공급량을 조절하였다(<Figure 8>).

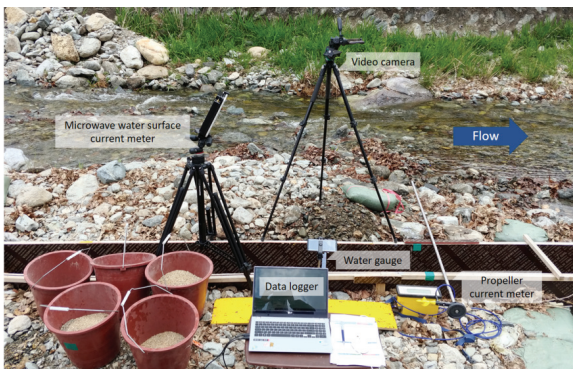


Figure 8. Configuration of the experimental device

### 3) 실험재료

실험재료는 현장에서 채집한 시료를 <Figure 9>와 같이 체가름 시험기를 이용하여 6종류의 입경(2.0, 4.75, 9.5, 13.2, 19.0, 26.5 mm)으로 세분화하여 사용하였다. 각 입경에 대한 제원은 <Table 2>에 나타내었다. 건조밀도는 평균 2.58 g/m<sup>3</sup>로 실제 유사입자의 평균 건

조밀도 2.5 ~ 2.65 g/m<sup>3</sup>에 해당하는 것으로 나타났다. 또한 실험재료의 형상은 모든 입경에서 구형과 비구형이 공존하는 천이형태의 형상을 가지는 것으로 확인되었다.



Figure 9. Classification of grain sizes using sieve shaker

Table 2. Microphone specifications

Grain size (mm)	B-axis (mm)	Average weight (g)	Dry density (g/m <sup>3</sup> )
2.0	2.0-4.75	13.2 of 200 particles	2.55
4.75	4.75-9.5	94.28 of 100 particles	2.57
9.5	9.5-13.2	3.86	2.56
13.2	13.2-19.0	11.78	2.56
19.0	19.0-26.5	23.68	2.59
26.5	26.5-37.5	45.22	2.60

### 2. 실험방법

실험은 목적에 따라 혼합입경 연속 충돌 실험과 유속변화에 따른 소류사 임의공급 실험으로 구분된다.

혼합입경 연속 충돌 실험은 입도분포, 유속, 소류사량의 변화에 따른 충돌음의 특성치(펄스, 음압적분치)와 공급 소류사량과의 관계분석을 통해 소류사량 추정 관계식을 개발하기 위한 목적으로 수행되었다. 실험은 <Table 3>, <Table 4>와 같이 여섯 종류의 입경에 대해 4종류의 혼합비(Mix-A, B, C, D)를 구성하고, 수위를 11 cm로 일정하게 고정시킨 상태에서 2.94, 8.82, 14.71 kg/min/m를 공급하였다. 실험케이스 수는 혼합비 4종류, 소류사량 3종류, 유속 3종류, 실험횟수 3회로 총 108회의 실험을 수행하였다. 소류사의 공급은 모든 실험조건에서 동일하게 파이프 하이드로폰 상류 2 m지점에서 인력에 의해 공급되었다.

Table 3. Experimental conditions

Grain size (mm)	W (kg/min/m)	Q (m <sup>3</sup> /s/m)	V (m/s)
2.0	2.94	0.18	1.65
4.75		0.24	2.14
		0.27	2.47
9.5	8.82	0.18	1.65
13.2		0.24	2.14
		0.27	2.47
19.0	14.71	0.18	1.65
26.5		0.24	2.14
		0.27	2.47
Mixing ratio for field(E)	147.06 (10min supply)	Random	Random

Table 4. Ratio of grain size distribution to experimental conditions

Grain size (mm)	Ratio of grain weight of each range to total grain weight (%)				
	Mix-A	Mix-B	Mix-C	Mix-D	Mix-E
2.0	16.7	10.0	10.0	30.0	18.6
4.75	16.7	10.0	10.0	30.0	17.7
9.5	16.7	10.0	30.0	10.0	2.2
13.2	16.7	10.0	30.0	10.0	27.1
19.0	16.7	30.0	10.0	10.0	25.0
26.5	16.7	30.0	10.0	10.0	9.4

소류사 임의공급 실험은 소류사량 추정 관계식의 검증에 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위해 <Table 4>의 Mix-E와 같이 실험현장의 입도분포를 고려한 147.06 kg/m의 시료를 준비하고 10분에 걸쳐 1분 간격으로 11.76, 11.76, 22.06, 22.06, 17.65, 17.65, 14.71, 14.71, 7.35, 7.35 kg/min/m의 소류사량을 공급하였다. 아울러 하천수를 지속적으로 조절하여 유속에 변화를 주었다.

#### IV. 실험결과 및 분석

##### 1. 소류사량 추정 관계식 개발

###### 1) 펄스 검출을 위한 증폭배율 선정

소류사의 충돌음에서 펄스 수를 검출하기 위해서는 특정 단일 임계치의 설정이 필요하다. 이를 위해 Nakaya(2009)가 제시한 방법과 같이 파이프 하이드로

폰에서 계측되는 충돌음의 신호를 여섯 가지의 배율 (2, 4, 16, 64, 256, 1024배)로 증폭시키고 각 증폭신호가 임계치를 초과했을 때의 펄스 수를 검출하였다. 임계치는 Koshiba, *et. al.*(2018)이 제시한 방법과 같이 실험재료 중 가장 큰 입경인 26.5 mm의 실험에서 계측된 최대 음압의 2배가 되는 값(78 mV)으로 설정하였다. 이는 모든 실험 입경에 대한 펄스 수를 검출하기에 충분한 크기이기 때문이다. 본 연구에서는 소류사량 계측에 가장 적합한 특정 증폭 배율의 신호를 선정하기 위해 상관분석을 수행하였다. 그 결과를 <Table 5>에 나타내었다.

Table 5. Correlation coefficients for pulse and bed load discharge

	Signal amplification (times)					
	2	4	16	64	256	1024
Bed load discharge	-	0.165	0.723*	0.885*	0.887*	0.843*

\* : The correlation is significant at the 0.01 level

각 증폭신호에서 검출된 펄스 수와 공급 소류사량 간의 상관분석을 수행한 결과, 2와 4배율의 증폭신호를 제외한 모든 신호에서 유의적인 상관관계를 나타내고 있다. 특히 256 배율의 상관계수가 0.887로 가장 높게 나타나 소류사량 계측을 위한 증폭신호로 선정하였다.

##### 2) 충돌음 특성치와 공급 소류사량간의 관계유도

<Figure 10>은 혼합입경 연속 충돌 실험을 통해 획득한 소류사 충돌음 특성치와 공급 소류사량간의 관계를 나타낸 것이다. 데이터의 산포도를 살펴보면 동일한 소류사량에 대해서도 충돌음의 특성치가 차이는 것을 알 수 있다. 이는 유속과 입도분포의 구성에 따른 영향으로 해석할 수 있다. 이러한 경향은 기존 국내외 선행연구에서도 확인할 수 있으며, 특히 유속의 증가는 충돌음 특성치의 양적인 증가와 관련 있는 것으로 확인되었다(Rickenmann, 2010; Tsakiris, *et. al.*, 2014). 본 연구에서는 이와 같은 특성을 활용하여 유

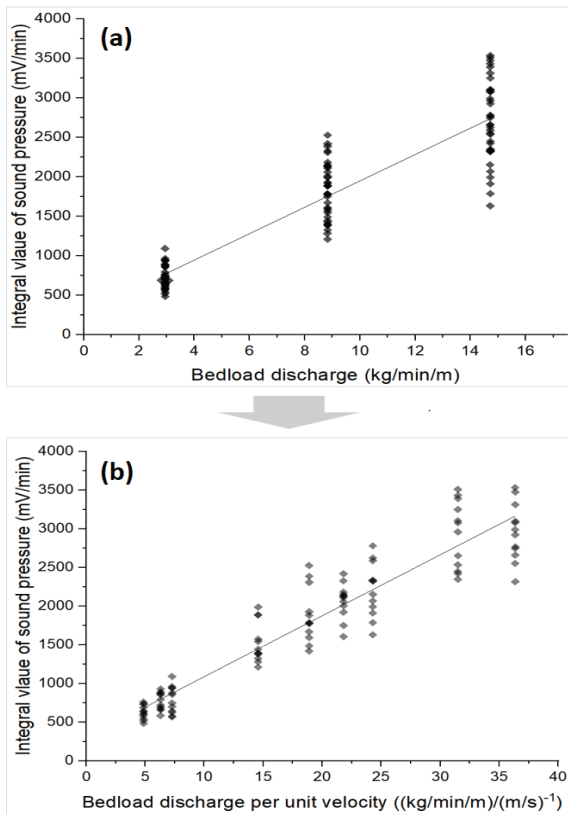


Figure 10. Standardization of bed load discharge for unit velocity. (a) raw data; (b) standardized data

Table 6. Regression models for bed load discharge estimation

Type of regression	Equation
Linear	$Y = \alpha + \beta X + \epsilon$
Log-Log	$\log Y = \alpha + \beta \log X + \epsilon$
Power	$Y = \alpha X^\beta + \epsilon$
Exponential	$Y = \alpha \exp^{\beta X} + \epsilon$

속변화와 관계없이 소류사량 추정이 가능하도록 소류사량을 단위유속에 대해 표준화하였다.

Table 7. Regression analysis for bed load discharge estimation

Division		Coefficient		$R^2$	df	F-test		t-test		RMSE	MAPE
		Constant	Sound			F	Sig.	t	Sig.		
Pulse	Linear	59.01	12.89	0.75	1,106	316.6	0.000	17.792	0.000	8.77	30.50
	Log-Log	3.32	0.82	0.82	1,106	479.4	0.000	21.89	0.000	8.59	30.56
	Power	35.04	0.75	0.76	2,106	953.8	0.000	14.456	0.000	8.43	28.98
	Exp.	138.46	0.04	0.68	2,106	702.9	0.000	0.038	0.000	9.17	34.50
Integral S.P	Linear	299.98	78.84	0.89	1,106	862.8	0.000	29.374	0.000	8.50	33.34
	Log-Log	5.13	0.81	0.93	1,106	1330	0.000	36.460	0.000	10.24	36.08
	Power	181.54	0.79	0.90	2,106	2451	0.000	23.739	0.000	10.34	35.74
	Exp.	779.07	0.04	0.83	2,106	1478	0.000	20.476	0.000	8.13	33.92

충돌음 특성치와 소류사량 간의 관계를 유도하기 위해 유량-유사량 관계곡선식 작성 시에 이용되고 있는 단변량 회귀모형(선형, 양대수형, 거듭제곱형, 지수형)을 활용하였다(<Table 6>).

회귀분석 결과는 <Table 7>과 같다. 펄스 및 음압 적분치 기반 관계식들에 대한 모형 전체의 유의성과 회귀계수의 유의성을 검토하기 위해 F-검정과 t-검정을 수행하였다. 분석결과 모든 관계식이 99%의 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났으며, 결정계수 또한 0.68에서 0.93의 범위로 설명력이 높은 것으로 나타났다.

소류사량 추정에 적합한 회귀모형을 선별하기 위해 실측치와 추정치의 차이를 다룰 때 보통 사용되는 RMSE(Root Mean Square Error)와 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 평가지표로 활용하였다. RMSE와 MAPE의 산정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - S_i)^2} \tag{1}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i - S_i}{Q_i} \right| \tag{2}$$

위 식에서  $n$ 은 데이터 수,  $Q_i$ 는 공급 소류사량,  $S_i$ 는 추정 소류사량을 의미한다. RMSE와 MAPE는 값이 작을수록 좋은 추정성능을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 평가지표를 산출하기 위해 소류사 임의 공급 실험(Mix-E)의 데이터를 이용하였다.

펄스 수 기반 관계식의 경우 거듭제곱형 > 양대수형 > 선형 > 지수형의 순으로 추정성능이 우수한 것으로 분석되었다. 거듭제곱형의 RMSE와 MAPE는 각각 8.43, 28.98로 산출되어 공급 소류사량 대비 약 29%의 오차율을 나타내었다. 음압적분치 기반 관계식의 경우 선형 > 지수형 > 양대수형 > 거듭제곱형의 순으로 높은 추정성능을 나타내었고, 선형 관계식의 경우 RMSE 8.50, MAPE 33.34로 산정되어 공급 소류사량 대비 약 33%의 오차율을 나타내었다.

이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 펄스 기반의 경우 거듭제곱형, 음압적분치 기반의 경우 선형관계식을 선정하였다.

앞서 선정된 관계식들이 높은 결정계수와 유의성을 확보하였다고 하더라도 회귀분석의 기본가정인 등분산성과 정규성 가정을 만족하지 못하면 신뢰성을 확보할 수 없다. 아울러 추정 결과에 영향을 미치는 이상치(Outlier)에 대한 진단이 필요하다. 이러한 관계식의 신뢰성 검토를 위해 수행되는 일련의 과정을 잔차분석이라 하며, <Figure 11>, <Figure 12>와 같이 잔차와 예측치의 관계를 나타내는 잔차 산점도와 Q-Q

도표를 이용하여 분석이 가능하다. 우선 이상치의 식별을 위해 산점도의 잔차가 절대값 2를 크게 상회하거나, Q-Q 도표의 사선에서 크게 벗어나는 데이터를 이상치로 판단하였다.

펄스 및 음압적분치 기반 관계식에 대한 이상치는 108개의 데이터 중 각각 10개 및 9개로 식별되었다. 다음으로 이상치가 제거된 데이터를 이용하여 등분산성 검정과 정규성 검정을 수행하였다. 등분산성은 잔차의 산점도에서 데이터들이 어떠한 규칙과 추세 없이 무작위로 분포되어 있어야 가정을 만족할 수 있다. 또한 정규성은 Q-Q 도표상에서의 사선을 중심으로 데이터가 균일하게 분포되어 있어야 한다. 분석결과 펄스 및 음압적분치 기반 관계식 모두 산점도가 0을 중심으로 특정한 패턴 없이 고르게 분포되어 있는 것으로 확인되었다. 또한 Q-Q 도표를 살펴보면 잔차가 비교적 정규분포를 잘 따르고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과에 의해 두 관계식 모두 회귀모형의 기본가정을 만족하는 것으로 나타났다.

<Figure 13>, <Figure 14>에 최종적으로 소류사량 추정을 위해 개발된 관계식을 도시하였으며, 관계식으로 추정할 수 있는 예측구간(Prediction interval: PI) 및 95% 신뢰구간(Confidence interval: CI)을 나타내었다.

펄스 및 음압적분치를 이용하여 산출된 소류사량 추정 관계식은 각각 다음 식 (3), (4)와 같다.

$$Q_s = \left( \frac{Pulse}{31.242} \right)^{\frac{1}{0.789}} \times \frac{1}{V} \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{Sp - 235.129}{82.783} \times \frac{1}{V} \quad (4)$$

위 식에서  $Q_s$ 는 단위 폭당 소류사량 (kg/min/m),  $V$ 는 유속 (m/s)을 나타낸다. 식 (3)에서 *Pulse*는 1분 간격으로 계측된 펄스 수를 나타내며, 식 (4)에서  $Sp$ 는 음압적분치 (mV/min)를 나타낸다.

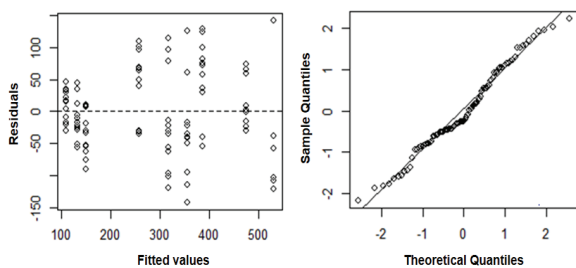


Figure 11. Residual analysis of regression equation for estimating bed load discharge(based on pulse)

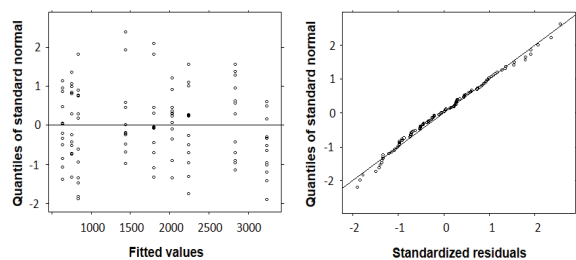


Figure 12. Residual analysis of regression equation for estimating bed load discharge(based on integral value of sound pressure)

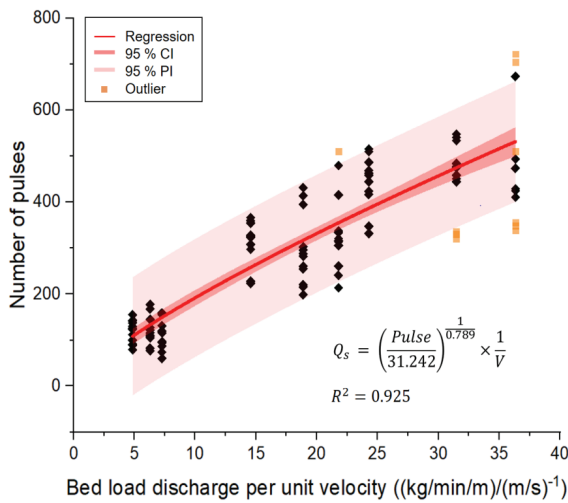


Figure 13. Regression equation for estimating bed load discharge (based on pulse)

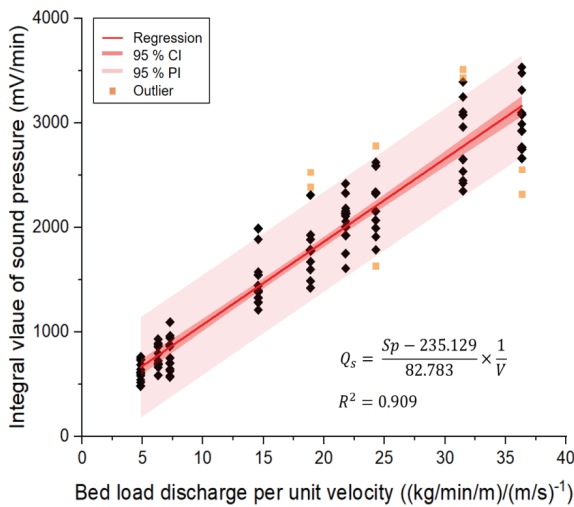


Figure 14. Regression equation for estimating bed load discharge (based on integral value of sound pressure)

## 2. 소류사량 추정 관계식 검증

소류사량 추정 관계식의 적합도 평가 및 신뢰성 검증을 위해 RMSE, IoA(Index of Agreement, IoA) 등의 통계적 기법을 이용하여 분석하였다. 여기서 IoA는 수문분야에서 많이 사용되는 통계지표로서 개발모형의 추정치와 실측치 사이의 일치성 또는 적합성을 판단하는 데 주로 사용된다(Wilmott, *et. al.*, 2012). IoA는 1에 가까울수록 적합도가 높은 것을 의미하며, 공식 (5)에 의해 산출되었다.

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Q_i - \bar{S}| + |S_i - \bar{S}|)^2} \quad (5)$$

위 식에서  $N$ 은 데이터 수,  $Q_i$ 는 공급 소류사량,  $S_i$ 는 추정 소류사량,  $\bar{S}$ 는 소류사 추정량의 평균값을 의미한다.

소류사량 추정 관계식에 의해 산출된 추정량과 공급 소류사량과의 비교·분석한 결과를 <Table 8>과 <Figure 15>에 나타내었다. 그림에서 표현된 검은색 실선은 공급 소류사량을 나타낸 것이며, 파선으로 표현된  $Q_s(Pulse)$ 와  $Q_s(S.p)$ 는 각각 펄스 및 음압적분치 기반 관계식에 의해 추정된 소류사량을 의미한다.

Table 8. Comparison of bed load discharge estimate and actual values

Regression equation	W (kg/min/m)		RMSE (kg/min/m)	IoA
	Actual	Estimate		
Pulse	147.06	136.60	4.89	0.52
Integral S.p		175.17		

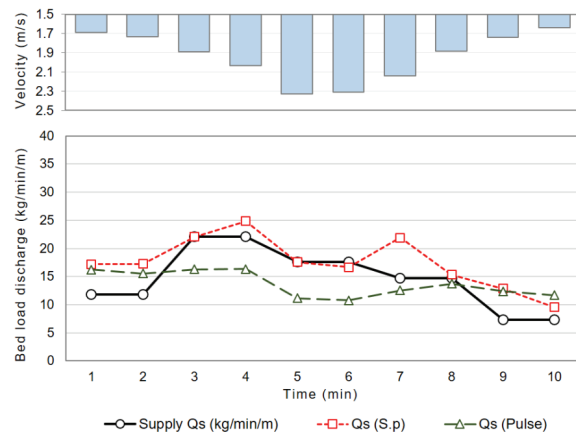


Figure 15. Comparison of bed load discharge estimate and actual values

펄스 기반 관계식의 경우 RMSE 4.89 kg/min/m, IoA 0.52로 나타났고, 공급 소류사량 대비 추정 오차는 약 7.1 %로 공급 소류사량의 총량과 거의 일치하는 것으

로 나타났다. 음압적분치 기반 관계식은 RMSE 3.94 kg/min/m, IoA 0.83으로 매우 양호한 적합도를 보여주고 있다. 실측치 대비 오차는 16.1 %로 약간 과대 추정하는 것으로 나타났으나 <Figure 15>와 같이 공급 소류사량의 변동 경향과 추정량이 양호한 수준으로 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 <Table 9>에 1분 간격의 공급 소류사량과 추정량 간의 AE(Absolute Error) 분석 결과를 나타내었다. 펄스 기반 관계식의 경우 유속과 공급 소류사량이 증가함에 따라 AE가 커지는 경향으로 나타났다. 특히 공급 소류사량과 유속이 상대적으로 높은 3~7분 구간에 대한 추정 소류사량은 과소 평가되는 것을 확인할 수 있다. 이 구간에 대한 평균 AE는 4.67 kg/min/m로 실측 대비 큰 오차율을 보인다. 반면 음압적분치 기반 관계식의 경우 동일 구간에 대한 평균 AE는 1.94 kg/min/m로 매우 양호한 수준의 추정률을 나타내었다. 이에 파이프 하이드로폰으로 소류사량을 추정할 시에는 음압적분치를 이용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

Table 9. Absolute error analysis for bed load discharge estimate and actual values of 1 minute intervals

T (min)	V (m/s)	W (kg/min/m)	AE (kg/min/m)	
			Qs (Pulse)	Qs (S.p)
1	1.69	11.76	4.46	5.45
2	1.73	11.76	3.76	5.46
3	1.89	22.06	5.80	0.01
4	2.03	22.06	5.72	2.77
5	2.33	17.65	6.50	0.07
6	2.31	17.65	6.86	0.98
7	2.14	14.71	2.16	7.21
8	1.88	14.71	0.98	0.60
9	1.74	7.35	5.02	5.50
10	1.64	7.35	4.33	2.18

## V. 결론

본 연구에서는 파이프 하이드로폰을 활용하여 실외 수리실험장치를 구축하고 소류사량, 입도분포, 및 유속변화에 따른 충돌음 특성치의 변화량을 분석하였

다. 분석결과를 토대로 소류사량 추정 관계식을 개발하였으며, 개발된 관계식에 의해 추정된 소류사량과 실제 공급 소류사량에 대해 비교·검토를 수행하였다. 연구의 수행과정을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

소류사량 추정 관계식은 충돌음의 특성치에 따라 펄스 및 음압적분치 기반 관계식으로 구분된다. 펄스 기반 관계식의 경우 거듭제곱형, 음압적분치의 경우 선형모형이 가장 적합한 모형으로 선정되었고, 두 관계식 모두 회귀모형의 기본가정인 선형성, 등분산성, 정규성 가정을 만족하는 것으로 확인되었다. 개발된 관계식을 적용하여 산출된 추정 소류사량과 공급 소류사량을 비교·검토한 결과, 음압적분치 기반 관계식의 추정 오차율이 16.1 %, RMSE 3.94 kg/min/m, IoA 0.83으로 가장 양호한 적합도를 나타내었다. 반면 펄스 기반 관계식으로 추정된 소류사량은 공급 소류사량의 총량과 거의 일치하는 것으로 나타났으나, 유속과 공급 소류사량이 높은 구간에 대해서는 과소 추정하는 것으로 확인되었다. 이에 파이프 하이드로폰으로 소류사량을 추정하기 위해서는 공급 소류사량과의 시간 변화에 대한 일치성이 높고 오차율도 상대적으로 양호한 음압적분치를 이용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 파이프 하이드로폰으로 정량적인 소류사량의 검토가 가능하다는 것을 확인하였고, 지속적인 추가 연구가 수행된다면 토사재해로 인한 피해예방과 소류사량에 대한 연속계측 기술 확보를 통해 기초 수문데이터의 양적 및 질적 확보가 가능할 것으로 사료된다. 아울러 본 연구에 대한 한계는 다음과 같다.

하천의 하상에는 미세한 점토부터 전석에 이르기까지 다양한 크기의 하상재료가 존재하는데, 본 연구의 실험재료는 자갈질 입경 범위에 해당하는 좁은 범위(2~26.5 mm)의 소류사만을 대상으로 하고 있다. 현재 국외에서는 2~200 mm 범위의 소류사 입경에 대해 0.018~180 kg/min/m의 넓은 범위의 소류사량에 대한 체계적인 실험과 현장 모니터링이 이루어지고 있다.

반면, 본 연구에서 개발한 소류사량 추정 관계식은 1.65~2.47 m/s의 좁은 유속 범위와 2.94~14.71 kg/min/m의 소류사량에 대해서만 적용할 수 있다는 한계를 가지고 있다. 따라서 향후에는 평상시부터 홍수기에 이르기 까지 실제 하천에서 이송되는 소류사량 추정이 가능하도록 다양하고 넓은 범위의 실험조건을 고려한 지속적인 보완 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 행정안전부/국립재난안전연구원(프로젝트번호 2020-MOIS32-032-00000000-2020)과 행정안전부의 재난관리분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 작성되었음.

## References

- Beylich, A. A. and K. Laute. 2014. Combining Impact Sensor Field and Laboratory Flume Measurements with other Techniques for Studying Fluvial Bedload Transport in Steep Mountain Streams. *Geomorphology*. 218: 72-87.
- Hilldale, R. C., B. T. Goodwillier, W. O. Carpenter, and J. P. Chambers. 2014. Measuring Coarse Bed Load Using Hydrophones. Research and Development Office Science and Technology Program Closeout Report SRH-2014-37.
- Jun, Kye Won, Young Ho Young, and Jong Ho Choi. 2015. An Experimental Study on the Bedload Measurement Using Hydrophone. *Korean Review of Crisis and Emergency Management*. 11(12): 215-224.
- Koshiba, T. and T. Sumi. 2018. Application of The Wavelet Transform to Sediment Grain Sizes Analysis with an Impact Plate for Bedload Monitoring in Sediment Bypass Tunnels. *E3S Web of Conferences*. 40: 04022.
- Lee, Hen Ho, Gih Wan Lee, Yu Gyeong Jung, Gi Yeong Park, Chang Woo Lee, and Jun Pyo Suh. 2013. the Investigation on External Application Instance of Bed Load Observation Device. *Summer Conference of the Korean Forestry Society*. 288-290.
- Mao, L., R. Carrillo, C. Escarriaza, and A. Iroume. 2016. Flume and Field-based Calibration of Surrogate Sensors for Monitoring Bedload Transport. *Geomorphology*. 253: 10-21.
- Ministry of Environment. 2019. 2018 Korea Annual Hydrological Report.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. 2016. Final Report on Construction of Ultrasound-based Sediment Discharge Measurement Automation Technology.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. 2008. Report(2010-2019) on the Establishment of Master Plan for Hydrological Investigation.
- Nakaya, H. 2009. Statistical Bed Load Analysis of Small-scale Floods Based on Hydrophone Observation. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 61(5): 4-11.
- National Institute of Forest Science. 2018. Establishment of Development Strategy and Analysis of the Effect of Erosion Control Business Through Actual Condition Survey in Erosion Control Field.
- Raven, E. K., S. N. Lane, and R. Ferguson. 2010. Using Sediment Impact Sensors to Improve the Morphological Sediment Budget Approach for Estimating Bedload Transport Rates. *Geomorphology*. 119(1-2): 125-134.
- Rickenmann, D. 2017. Bed-load Transport Measurements with Geophones and Other Passive Acoustic Methods. Ph.D. Dissertation. American Society of Civil Engineers.
- Rickenmann, D. and B. Fritschi. 2010. Bedload Transport Measurements Using Piezoelectric Impact Sensors and Geophones. US Geological Survey Scientific Investigations Report. 5091: 407-423.
- Seo, Jun Pyo. 2019. Analysis on the Characteristics of Sediment Discharge in Forested Watersheds Using the Acoustic Sensor and Pit Sampler. Ph.D. Dissertation. Yeungnam University.
- Suzuki, T., T. Uchida, A. Okamoto, K. Takahashi, S. Yamashita, Y. Kosuge, and A. Fukumoto. 2013. Applicability of Bedload Observation Method Using Sound Pressure Data Obtained by a Hydrophone. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 66(1): 4-14.
- Tsakiris, A. G., A. T. N. Papanicolaou, and T. J. Lauth. 2014. Signature of Bedload Particle Transport Mode in the Acoustic Signal of a Geophone. *Journal of Hydraulic Research*. 52(2):

185-204.

Willmott, C. J., S. M. Robeson, and K. Matsuura. 2012. A Refined Index of Model Performance. *International Journal of Climatology*. 32(13): 2088-2094.

*Korean References Translated from the English*

국립산림과학원. 2018. 사방분야 실태조사를 통한 발전전략 수립 및 사방사업 효과 분석.  
국토교통부. 2016. 초음파 기반 유사량 계측 자동화 기술 구축 최종보고서.

국토해양부. 2008. 수문조사기본계획 수립 보고서(2010-2019).  
서준표. 2019. 음향센세와 피트 유사계를 이용한 산림유역 토사 유출 특성 분석. 박사학위논문. 영남대학교.  
이현호, 이기환, 정유경, 박기영, 이창우, 서준표. 2013. 소류사 관측장비의 국내도입을 위한 국외 적용사례 조사. 한국임학회 하계 총회 학술발표회. 288-890.  
전계원, 윤영호, 최종호. 2015. Hydrophone을 이용한 소류사 계측에 관한 실험적연구. *Crisisonomy*. 11(12): 215-224.  
환경부. 2019. 2018년 한국수문조사연보.

---

Received: Nov. 2, 2020 / Revised: Nov. 23, 2020 / Accepted: Nov. 23, 2020

## 토사재해 예방을 위한 음향센서를 이용한 소류사량 추정 가능성 검토

**국문초록** 본 연구에서는 음향계측 센서인 파이프 하이드로폰을 이용하여 소류사량 추정 가능성 여부를 검토하였다. 이를 위해 홍수기 유속을 재현할 수 있도록 소규모 현장 수리실험 장치를 구축하였고, 소류사량 및 입도분포, 유속변화에 따른 충돌음 신호를 분석하여 소류사량 추정 관계식을 개발하였다. 관계식은 충돌음의 특성치에 따라 펄스 및 음압적분치 기반 관계식으로 구분된다. 관계식의 검증을 위해 실제 공급 소류사량과의 비교·검토를 수행한 결과, 음압적분치 기반 관계식이 펄스 기반 관계식에 비해 정확도가 높은 것으로 확인되었으며 실측치 대비 약 19%의 오차율을 가지는 것으로 나타났다. 또한 추정치와 실측치 사이의 적합성을 평가하기 위한 IoA(Index of Agreement)는 0.83으로 산정되어 공급 소류사량의 변동 경향과 추정치가 양호한 수준으로 일치하는 것으로 확인되었다. 향후 개발된 관계식에 추가적으로 다양한 실험조건을 고려하고, 실제 하천에 운송되는 소류사량과의 교정관계가 확립된다면 토사재해로 인한 피해예방과 국내 소류사량 데이터의 양적 및 질적 확보가 가능할 것으로 사료된다.

**주제어** : 수리실험, 파이프 하이드로폰, 소류사 충돌음, 소류사량 추정 관계식

**Profiles** **Jong Ho Choi** : He received his Ph.D. degree from Kangwon National University, Korea in 2020. He is a senior researcher of the Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University. His interesting subject of research is hydraulic-hydrologic modeling, sediment transportation, mountainous disaster(apt105@kangwon.ac.kr).

**Kye Won Jun** : He received his Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea in 2004. He is a professor of the Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, in which he has taught since 2004. His interesting subject and area of research and education are flood prevention, mountainous disaster prevention, and natural disaster prevention & management(kwjun@kangwon.ac.kr).

**Young Ho Yoon** : He received his Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea in 1993. He is a professor of the Gangwon State University(Dept. of Smart City & Civil Engineering). His interesting subject and area of research and education are flood prevention, and coastal disaster prevention(yhyoon@gw.ac.kr).

**Hyeon Gyu Kim** : He is a master degree course of Graduate School of Disaster Prevention in Kangwon National University(607804@kangwon.ac.kr).