

Hydrophone을 이용한 소류사 계측에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Bed Load Measurement Using Hydrophone

Kye Won Jun*, Young Ho Yoon**, Jong Ho Choi***

*,***Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University,

346 Joogang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do, Korea

**Dept. of Civil Engineering, Gangwon Peovincial College,

270 Yeonju-ro, Gangneung-si, Gangwon-do, Korea

Abstract

Currently in Korea, there are two methods of estimating the quantity of bed load: one based on empirical formulas and the other on actual measurements. The method based on actual measurements involves risks and complications pertaining to the installment and operation of measuring equipment as well as the requirement of a capable workforce. This method has a higher risk and requires larger cost and time. The method based on the empirical formula hosts the risk of producing false values that are tens or hundreds times different from each other. Thus, this study adopts the Hydrophone, a measuring device that estimates the quantity of bed load indirectly by acquiring and analyzing sound data generated upon a crash of sediment on a metallic pipe with a microphone in it. This study improves the level of understanding the characteristics of the Hydrophone through a series of waterway experiments.

Key words: bed-load, hydrophone, hydraulic model experiment, acoustic energy

* Tel. +82-33-570-6816. E-mail. kwjun@kangwon.ac.kr

** Corresponding author. Tel. +82-33-660-8242. E-mail. yhyoon@gw.ac.kr

*** Tel. +82-33-570-6447. E-mail. apt105@kangwon.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: Oct. 20, 2015 / Revised: Nov. 5, 2015 / Accepted: Nov. 13, 2015

국문초록

현재 우리나라는 소류사량을 산정하기 위해 경험식에 의한 방법과 실측에 의한 방법을 이용하고 있다. 그러나 실측에 의한 방법은 측정 장비의 설치 및 운영에 따른 위험성이 동반되고 많은 인력, 경비, 시간이 소요되는 등 많은 문제점을 내포하고 있으며, 경험식에 의한 방법 또한 대상 하천 유역에 어떠한 유사량 공식을 사용하는지에 따라 결과 값이 수십에서 수백 배의 차이가 나는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 소류사량 산정 방법의 문제점을 보완하기 위해 최근 국외에서 개발·검토 되고 있는 마이크로폰을 내장한 금속관에 유사가 충돌 할 때의 음향데이터를 취득 해석하여 소류사량을 간접적으로 추정하는 관측 기기인 Hydrophone을 이용하여, 유량 및 입경의 크기에 변화를 주었을 때의 일련의 수로실험을 거쳐 Hydrophone의 기본 특성을 파악하고, 시료 입자의 크기별로 인지할 수 있는 음향에너지의 범위를 구분하고 향후 입경별 소류사량 산출을 위한 기초 자료를 제시하는데 목적이 있다.

주제어: 소류사, Hydrophone, 수리모형실험, 음향에너지

1. 서론

국토의 70%가 산지로 구성되어 있는 우리나라의 지형학적 특성상 평탄지가 부족하여 가용토지로 개발 하려는 각종 개발 사업으로 인한 무분별한 산지 훼손으로 토양침식에 취약한 상태에 있으며, 최근 전 지구적인 이상기후의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강도를 가진 국지성 호우가 빈번히 발생하여 토양침식이 가속화 되고 있다. 이에 따른 영향으로 산지에서 하천 하류로 유입되는 유사유출량의 증가는 각종 수공구조물에 세굴을 발생시키고 마모시키는 등 하천의 방호능력을 저하시켜 홍수의 위험성을 증대시킬 뿐만 아니라 저수지로 유입되는 유사의 퇴적으로 저수용량을 감소시키는 등 많은 문제점을 야기 시키고 있다. 따라서 유사유출량의 산정은 수공구조물의 설계 및 유지관리, 저수지 설계 및 운영, 수자원 개발 및 관리 등 종합적 치수 및 이수 계획 수립을 위해서 반드시 고려되어야 할 사항이며, 유량과 마찬가지로 유사량 또한 정량적이고 신뢰성 있는 산정이 요구된다.

유사는 지각의 풍화작용 및 강우와 유수의 작용에 의해 침식, 유송, 퇴적의 작용을 거쳐 이송되는 모든 형태의 토사로서, 이송 형태에 따라 크게 난류확산작용에 의해 수중을 부유하며 이동하는 작고 가벼운 물질인 부유사와 하상면을 전동, 활동, 도약 하며 이동하는 굵은 입자의 소류사로 분류된다. 특히, 소류사는 이송되는 과정에서 소류작용으로 중·횡 침식과 유사유출량을 가중 시키는 원인이 되고 있다(Park, 2015). 현재 우리나라의 유사량 조사는 각각의 수문조사기관에서 자료의 이용목적에 따라 간헐적으로 수행되어 오고 있는 실정이며, 체계적이고 지속적인 조사가 이루어지지 않아 타 수문자료에 비해 측정자료 구축 현황은 상당히 미비한 상태에 있으며, 측정자료 또한 부유사의 실측자료는 있으나 소류사 측정자료는 거의 전무한 상태이기 때문에 신뢰성 있는 총 유사량을 산정하기에는 많은 어려움이 있다.(Lee, et al., 2008). 부유사에 비해 상대적으로 측정이 어려운 소류사량을 산정하는 방법으로는 경험식에 의한 방법과 실측을 통한 직접적인 방법 그리고 간접 측정에 의한 방법으로 크게

분류된다. 직접 측정에 의한 방법은 하천을 유하하는 유사를 기계식 소류사 채취기 등을 이용하여 직접 채취하는 방법을 말하며, 간접 측정에 의한 방법은 인력이 필요 없이 어떠한 매체를 이용하여 취득된 데이터를 소류사량으로 변환하여 산정하는 방법을 말한다. 현재 우리나라는 소류사량을 산정하기 위해 경험식에 의한 방법과 실측에 의한 방법을 이용하고 있다. 그러나 실측에 의한 방법은 측정 장비의 설치 및 운영에 따른 위험성이 동반되고 실제 측정이 용이하지 않다는 점과 많은 인력, 경비, 시간이 소요되는 등의 문제점을 내포하고 있어 일반적으로 경험식에 의한 방법을 주로 이용하고 있다. 하지만, 이 방법 또한 적용 대상 하천에 어떤 공식을 사용 하는지에 따라 결과 값이 수십에서 수백 배 이상 차이가 나게 되어 실제 적용시 어느 공식을 사용할 것인지에 대해서는 매우 어려운 실정해 있다.

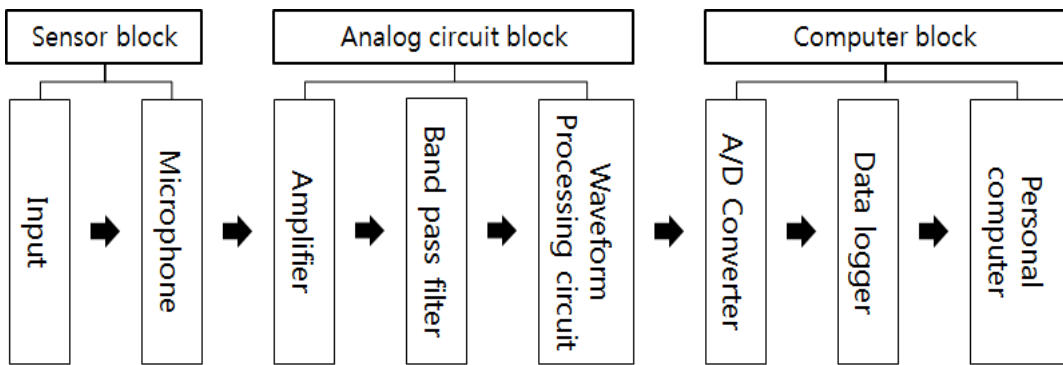
이러한 기존의 소류사량의 측정 방법의 문제점을 보완하기 위해 일본 및 여러 유럽 국가에서는 음향 및 진동의 원리를 이용하여 간접적으로 소류사량을 측정하는 모니터링이 활발히 이루어지고 있다. 일본의 경우 토사 재해의 방지 및 종합적인 토사 관리를 목적으로 하상에 설치한 금속 파이프에 굵은 입자의 유사가 충돌할 때 발생하는 음향 펄스 수에서 소류사량을 간접적으로 추정하는 관측 기기인 Hydrophone이 개발되어(Kurahara, *et. al.*, 1992) 실용화를 위한 검토와 정량적인 소류사량 측정을 위해 일본 각지에서 연구가 진행되고 있다(Mizuyama, *et. al.*, 2008; Tsutsumi, *et. al.*, 2013). 스위스, 오스트리아 등 유럽 국가에서는 시계열적인 소류사량을 파악하기 위하여, 1986년 스위스 연방 연구소 WSL에서 개발된 PBIS(Piezoelectric bed load impact sensor)를 이용하여 소류사량 모니터링이 이루어져 왔다. PBIS는 약 20mm보다 큰 직경을 가진 소류사 입자가 금속판 위를 충돌할 때의 진동을 기록하여 소류사량의 상대적인 대소를 알 수 있는 관측 기기이다. 그러나 PBIS는 감지할 수 있는 입자 크기의 한계, 내구성 부족, 시스템 보정의 번거로움 등의 단점을 가지고 있어, 2000년대에 이르러 이러한 문제점을 보완한 Geophone이 개발되어 소류사량 모니터링을 위한 관측기기로 대체되어 이용되고 있다(Rickenmann, 2010). 국내의 연구 동향으로, (Lee, *et. al.*, 2013)는 토사유출량 관측을 위한 음향식 소류사 장치와 중력식 소류사 측정 장치의 국외 적용사례를 조사하여 국내 도입을 위한 기초적 자료를 제공하였고, Park(2015)는 산림유역에서 발생하는 토사유출량을 정량적으로 관측하기 위해 Hydrophone을 이용하여 소류사량의 변화를 모니터링 하였다.

본 연구에서는 하천 하상에 설치한 금속 파이프에 유사가 충돌할 때의 소리를 취득·해석하여 간접적으로 소류사를 관측하는 장비인 Hydrophone을 이용하여 일련의 수로실험을 거쳐 Hydrophone의 기본 특성을 파악하고, 시료 입자의 크기별로 인지할 수 있는 음향에너지의 범위를 구분하여 향후 입경별 소류사량 산출을 위한 기초 자료를 제시하는데 목적이 있다.

II. 실험장치의 구성 및 방법

1. Hydrophone

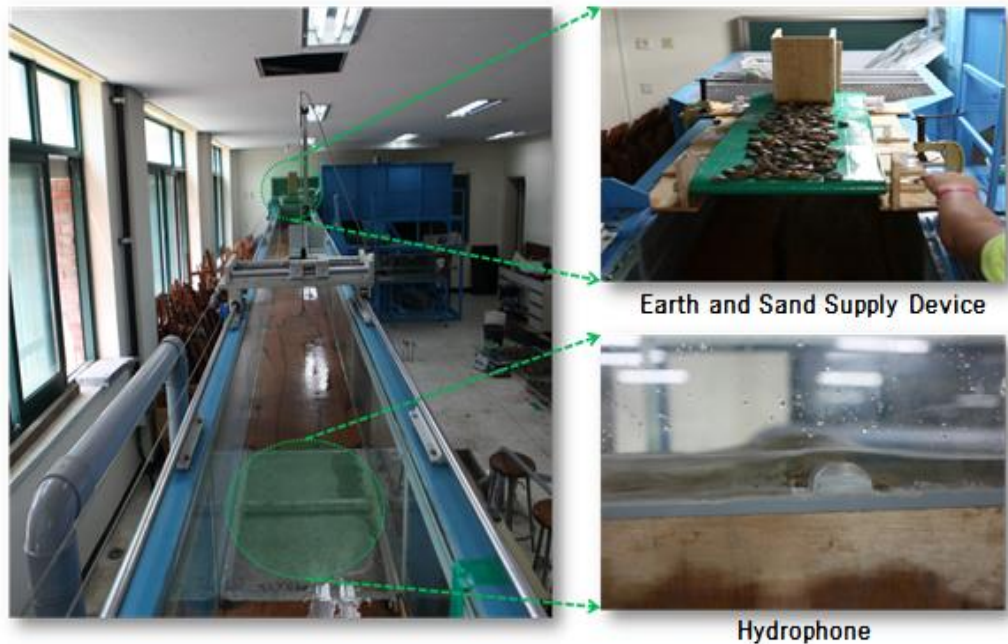
Hydrophone은 하상에 설치된 금속관에 모래나 자갈입자가 충돌할 경우에 발생하는 소리를 취득·해석하여 소류사량의 상대적인 대소를 알 수 있는 음향식 소류사 관측 기기이다. Hydrophone의 시스템 구성 및 작동 원리에 대한 내용을 <Figure 1>에 나타내었다. Hydrophone의 시스템은 유사의 충돌을 음향 신호로 채취하는 센서부, 음향 신호를 아날로그 신호로 처리하는 아날로그 회로부와 디지털 신호로 변환 후 소류사량을 추정하는 컴퓨터 처리부로 구성된다. 아날로그 회로부는 음향 신호의 크기를 증폭 시키는 증폭기(Amplifier), 불필요한 신호를 제거하여 특정 주파수만을 통과 시키는 대역 통과 필터(Band pass filter), 일정하게 설정된 진폭의 역치 값을 기준으로 관측에 유효한 신호만을 검출하는 파형처리회로로 구성된다. 컴퓨터 처리부는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D변환기, 음향에너지 및 충돌 횟수를 기록하는 데이터로거, 기록된 데이터를 바탕으로 음향에너지와 소류사량과의 관계를 분석하여 소류사량을 추정하는 컴퓨터로 구성된다.



<Figure 1> Configuration and operational flow diagram of the Hydrophone System

2. 실험수로

본 연구에서 사용된 실험수로의 전경을 <Figure 2>에 도시 하였다. 수로는 폭 0.4m, 길이 10m, 경사 1/30의 Hydrophone을 직교하는 구형단면수로이다. 수로의 상단부에는 시료를 일정하게 등 간격으로 공급할 수 있도록 시료 공급 장치가 설치되어 있고, 수로의 하류 단에는 외경 25mm, 내경20mm의 원형 금속관인 Hydrophone이 설치되어 있다. 시료의 이송 특성을 관측하기 위해서 Hydrophone의 전면 및 측면에 비디오카메라를 배치하였고, 시료가 Hydrophone에 충돌할 때의 수리특성을 파악하기 위해 Hydrophone 상류 1m 지점에 포인트 수위계와 실험용 프로펠러 유속계를 설치하였다.



<Figure 2> Hydraulic model experiment equipment

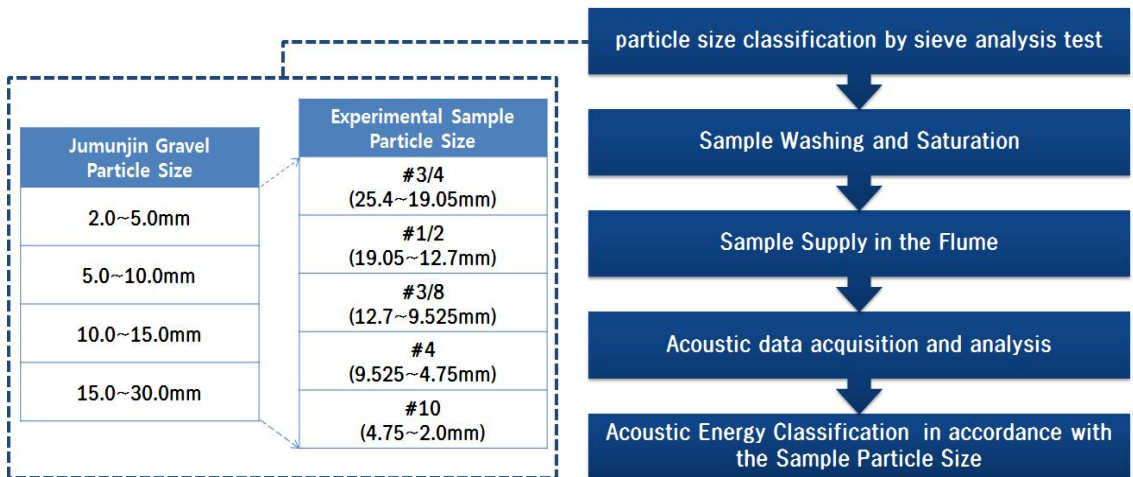
3. 실험방법

본 연구의 실험케이스를 <Table 1>에 도시하였다. 실험 케이스는 총 24케이스이며, 4단계의 유량 변화에 따른 각 입경별 음향데이터의 인지범위를 파악하기 위한 것이다. 케이스 1~4는 유수가 금속관을 충돌할 때의 소리를 기본적 잡음으로 처리하기 위해 실시한 케이스 이고, 실험 관측 오차를 줄이기 위해 1케이스 당 3번씩 실험을 수행하여 산술평균한 데이터를 이용하였다.

본 연구의 실험 절차는 <Figure 3>에 도시한 바와 같다. 먼저, 다양한 입경에 대한 Hydrophone의 인지능력을 파악하기 위하여 주문진 여과사리 2~5mm, 5~10mm, 10~15mm, 15~30mm의 시료를 체가름 실험을 실시하여 #10(2.0~4.75mm), #4(4.75~9.525mm), #3/8(9.525~12.7mm), #1/2(12.7~19.05mm), #3/4(19.05~25.4mm)로 입경을 세분화 하였고, 수중을 부유하며 이동하는 미세 물질로 인한 유량 공급 장치의 마모 방지를 위해 시료 세척 과정을 거친 뒤, 시료의 공극을 포화시켜 현장 시료의 조건으로 맞춰 주었다. 그 다음, 시간에 따라 유량의 변화가 없도록 유량 공급 장치를 이용하여 수로 내로 일정한 양의 유량을 공급하고, 세척 및 포화과정을 거친 시료를 수로 상단에 설치된 시료 공급 장치를 이용하여 입경별로 일정하게 연속적으로 공급시켜 Hydrophone에 충돌할 때부터의 음향데이터를 데이터로거를 통해 1분간 측정하였다. 마지막으로, 데이터로거로 취득한 음향에너지 파형의 최대 진폭 값을 각 입경별로 산술 평균하여 음향에너지 대역을 분류하였다.

<Table 1> Experimental case

Case No.	Sample	Weight of Sample (kg/min)	Discharge (m ³ /s)	Velocity of Flow (m/s)	Water Level (cm)
1	water		0.0309	1.782	4.337
2	water	-	0.0243	1.673	3.631
3	water		0.0178	1.454	3.068
4	water		0.0130	1.321	2.454
5	#3/4		0.0309	1.782	4.337
6	#3/4	8.928	0.0243	1.673	3.631
7	#3/4		0.0178	1.454	3.068
8	#3/4		0.0130	1.321	2.454
9	#1/2		0.0309	1.782	4.337
10	#1/2	9.264	0.0243	1.673	3.631
11	#1/2		0.0178	1.454	3.068
12	#1/2		0.0130	1.321	2.454
13	#3/8		0.0309	1.782	4.337
14	#3/8	9.030	0.0243	1.673	3.631
15	#3/8		0.0178	1.454	3.068
16	#3/8		0.0130	1.321	2.454
17	#4		0.0309	1.782	4.337
18	#4	9.606	0.0243	1.673	3.631
19	#4		0.0178	1.454	3.068
20	#4		0.0130	1.321	2.454
21	#10		0.0309	1.782	4.337
22	#10	8.640	0.0243	1.673	3.631
23	#10		0.0178	1.454	3.068
24	#10		0.0130	1.321	2.454



<Figure 3> Experiment procedure

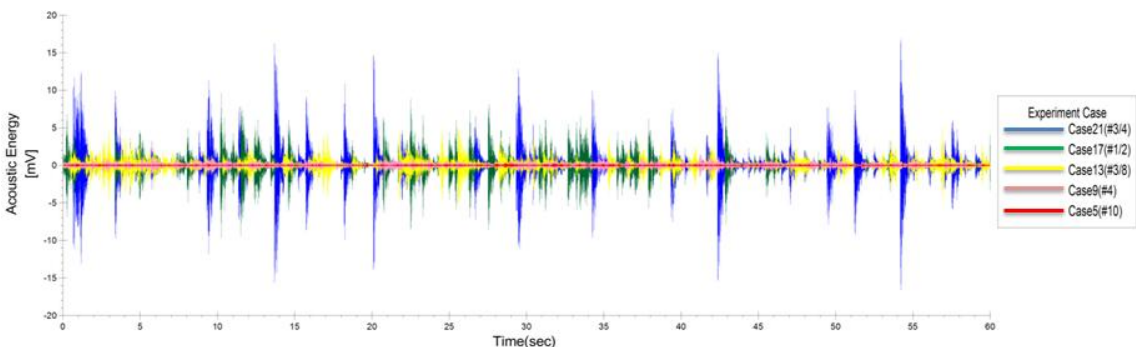
III. 실험결과 및 분석

1. 입경별 음향에너지 대역 분류

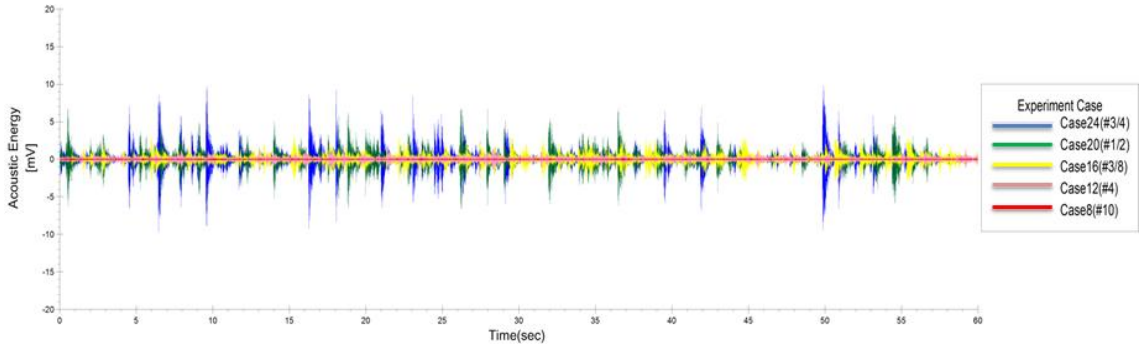
자연하천에서 유수에 의해 이송되는 소류사는 다양한 입경의 토사가 혼합되어 흐르기 때문에, 혼합 토사의 입도 분포 추정을 위해서는 시료의 입자 크기별 감도에 관한 실험이 우선적으로 선행 되어야 한다. 따라서 본 실험에서는 정류 상태에서의 Hydrophone 위를 통과하는 다양한 입경에 대한 음향에너지 인지 범위를 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

<Figure 4>와 <Figure 5>는 Hydrophone으로 동일하게 1분간 취득한 입경별 음향에너지의 파형을 나타낸 것이다. <Figure 4>는 본 실험케이스에서 유량($Q = 0.0309m^3/s$)이 가장 높을 때의 실험케이스이고, <Figure 5>는 유량($Q = 0.0130m^3/s$)이 가장 낮은 조건일 때의 실험케이스이다. 유량 값의 차이에 따라 각 입경별로 인지할 수 있는 음향에너지의 대역이 구분되는 것을 확인할 수 있다.

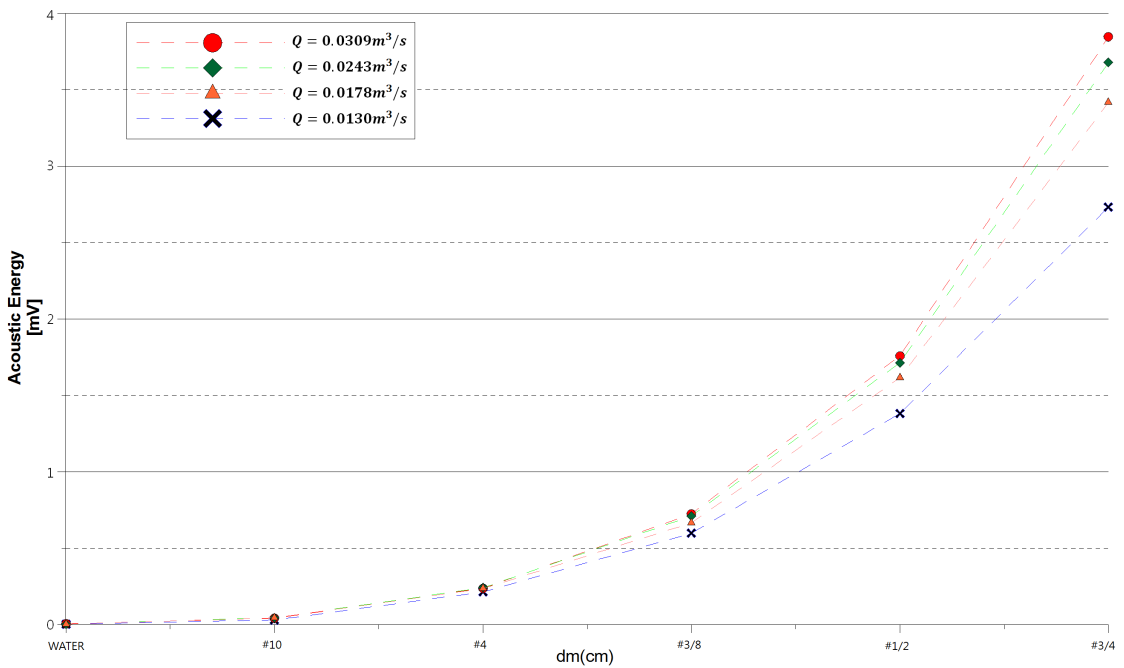
<Figure 6>과 <Table 2>는 시료의 입자 크기별로 인지할 수 있는 음향에너지의 대역을 나타낸 것으로, 음향에너지 파형의 최대 진폭 값들을 평균하여 산정된 값들을 작은 입경에서 큰 입경으로 순차적으로 필터링하여 음향에너지의 대역을 분류한 것이다. 가장 작은 입경인 #10체의 경우 유수가 Hydrophone을 충돌할 때의 음향에너지를 본 실험장치의 기본적인 소음 및 환경 노이즈로 판단(Akira ODA et al, 2005)하고, #10체에서 유수가 가지는 음향에너지 파형의 최대 진폭의 평균값을 필터링 하였다. $Q = 0.0309m^3/s$ 일 때의 유수 및 입경별 음향에너지 인지 범위는, 유수의 경우 $0.00522 \sim 0.04247[mV]$, #10체 $0.04247 \sim 0.23833[mV]$, #4체 $0.23833 \sim 0.72445[mV]$, #3/8체 $0.72445 \sim 1.75908[mV]$, #1/2체 $1.75908 \sim 3.84557[mV]$, #3/4체는 $3.84557[mV]$ 를 인지할 수 있는 최소 음향에너지로 보고 음향에너지 대역이 분류되었다. 본 실험케이스에 대한 분석결과, 입경이 클수록 인지할 수 있는 음향에너지의 대역폭이 증가하고, 공급 유량을 증가시킴에 따라 각 입경에 대한 음향에너지 값이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 시료의 입경크기가 #3/8이상일 때 공급유량 증가에 따른 음향에너지의 결정계수(R^2)가 높은 상관성을 나타내었다.



<Figure 4> Acoustic energy recognition range in accordance with the sample particle size($Q = 0.0309m^3/s$)



<Figure 5> Acoustic energy recognition range in accordance with the sample particle size ($Q = 0.0130m^3/s$)



<Figure 6> Relationship between the acoustic energy and the grain size

<Table 2> Acoustic energy recognition range in accordance with the sample particle size and flow rate

CASE	Acoustic Energy[mV]				R2
	$Q = 0.0130m/s$	$Q = 0.0178m/s$	$Q = 0.0243m/s$	$Q = 0.0309m/s$	
water	0.00365	0.00379	0.00382	0.00522	0.6481
#10	0.03020	0.04422	0.04515	0.04247	0.5555
#4	0.21409	0.23612	0.24211	0.23833	0.6964
#3/8	0.59849	0.66696	0.71146	0.72445	0.9386
#1/2	1.38083	1.61551	1.71444	1.75908	0.9032
#3/4	2.73139	3.41762	3.67846	3.84557	0.9015

IV. 결론

하천에서 유사의 이동은 하천방재적인 측면에서 매우 중요하나 현장측정이 어려움이 있어 본 연구에서는 현장측정의 문제점을 개선하기 위해 Hydrophone을 이용한 토립자의 이동에 관한 기초수리실험을 통해 토사입자의 크기변화와 유량변화에 따라 발생하는 음향에너지의 인지능력에 관한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

기존 구형단면 개수로에 균일한 시료공급을 위해 개선된 시료공급장치를 설치하고 균일입경의 시료공급 시 하단부에서 유량변화에 따른 Hydrophone의 인지능력을 측정된 결과 최소유량과 최대유량의 변화에 따른 음향에너지의 인지율의 변화는 유량이 커질수록 평균적으로 증가하는 것으로 분석되었으며 각 입경이 인지할 수 있는 최소 임계치 기준도 증가하는 것으로 나타났다.

또한 Hydrophone에 시료를 입경 크기별로 개별적으로 충돌시켰을 경우의 음향에너지 파형을 분석한 결과 최소입경에서 최대입경으로 커질수록 음향 파형의 진폭이 커지는 것으로 나타났다. 이는, 진폭의 크기에 따라 음향에너지 인지 범위가 결정되는 것을 의미하며 입경이 큰 시료일수록 인지 범위가 증가하는 것으로 분석 되었다.

향후 본 실험데이터를 바탕으로, 시료 입자 크기별로 음향에너지 파형의 진폭에 반응을 일으키는 임계치를 설정하고, 혼합 입경 실험을 실시하여 각 입경에 대한 입도 분포를 추정하고 Hydrophone에 의해 측정된 각 입경별 음향에너지와 소류사량과의 관계 분석을 통해 신뢰성 있는 소류사 추정식을 제시할 계획이다.

References

- Park, Ki-young. 2015. An Analysis of Bed Load Discharge from Hydrophone in a Landslide Area. Dept of Forest Resources Graduate school Yeungnam University.
- Lee, Jin-Won, Sin-Jae Lee, Jae-Hyeong Lee. 2008. Present Condition and Prospect on the Water Discharge Survey Project. *Journal of Korea Water Resources Association*. 41(8): 27-36.
- 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*. 2013: 288-290.
- Kurahara, Junichi and Kuniaki Miyamoto. 1992. Equipment for Sediment Discharge with Acoustic Sensor. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 44(5): 26-31.
- Mizuyama, Takahisa, Miwa Matsuoka, and Michionbu Nonaka. 2008. Bedload Measurement by Acoustic Energy with Hydrophone for High Sediment Transport Rate. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 61(1): 35-38.

- Tsutsumi, Daizo, Michinobu Nonaka, Takahisa Mizuyama, Masao Shida, Kotaro Ichida, Shusuke Miyata, and Masaharu Fujita. 2013. Quantitative Observation of Bed-load in Mountainous Streams by Hydrophones. *Kyoto University Disaster Prevention Research Institute Annual Report*. 56(B): 465-471.
- Rickenmann, D. 2010. Bedload Transport Measurements Using Pzoeletric Imapct Sensors and Geophones. *U.S. Geological Surevey Scientific Investigations Report*. 2010-5091: 407-423.
- ODA, Akira, Yuji Hasegawa, Takahisa Mizuyama, Kunuaki Miyamoto, and Michinobu Nonaka. 2005. The Application of Bed Load Measurements to Hydraulic Model Experiments Using the Hydrophones. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 58(2): 15-25.

Korean References translated from the English

- 박기영. 2015. Hydrophone을 이용한 산사태발생산지의 소류사 유출특성 분석. 영남대학교 석사학위논문.
- 이진원, 이신재, 이재형. 2008. 하천유량조사사업 현황 및 전망. *한국수자원학회지*. 41(8): 27-36.
- 이헌호, 이기환, 정유경, 박기영, 이창우, 서준표. 2013. 소류사 관측장비의 국내도입을 위한 국외 적용사례 조사. *한국임학회 하계 총회 학술발표회*. 2013: 288-890.

전계원: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발, 2004. 2), 현재 강원대학교 방재전문대학원 교수로 재직중이다. 관심분야는 풍수해 방재, 산지재해 방재, 자연재해 방재 및 관리 등이며, 자연재해란 무엇인가?(공저, 2008) 등의 저서와 주요 논문으로 “산악지역돌발홍수 기준우량 결정에 관한 기초연구(2010)”, “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구(2010)” 등이 있다 (kwjun@kangwon.ac.kr).

윤영호: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 연안류분포형상에 영향을 미치는 제인자,1993.8), 현재 강원도립대학 건설토목과 교수로 재직 중이다. 관심분야는 풍수해 방재, 연안재해 방재 등이며, 방재수리학?(공저, 2011) 등의 저서와 주요 논문으로 “kanako-ID를 이용한 토석류 재해지역의 수치모의(2011), “파랑 및 흐름에 의한 해저관로 주변에서의 국부세굴 수평한계분석(2013)”등이 있다(yhyoon@gw.ac.kr).

최중호: 강원대학교 방재전문대학원 석사과정으로 재학 중이다. 관심분야는 수리·수문 모델링, 유사현상, 산지재해 방재이다(apt105@kangwon.ac.kr).