

하이드로폰을 이용한 산림유역 소류사 유출량 산정 및 현장 적용성 검토

서준표¹, 김기대¹, 우충식¹, 이창우^{1*}, 이현호²
¹국립산림과학원 산림방재연구과, ²영남대학교 산림자원학과

Evaluation of Field Application and Estimation of Bedload Discharge in the Forest Watershed using the Hydrophone

Jun-Pyo Seo¹, Ki-Dae Kim¹, Choong-Shik Woo¹, Chang-Woo Lee^{1*}, Heon-Ho Lee²

¹Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

²Department of Forest Resources, Yeungnam University

요약 본 연구에서는 산림유역의 소류사 유출량을 산정하기 위해 음향센서를 이용한 하이드로폰을 사용하였다. 하이드로폰의 수로실험과 현장실험을 통해 반응 특성을 분석하고 정량적 소류사 유출량을 산정하여 실측된 유출량과 비교·분석하였다. 하이드로폰 반응은 유량 변화에 따라 펄스값이 변하였지만 모래에는 반응하지 않았다. 입자 크기와 무게에 따라 펄스값이 다르게 나타났는데 크기와 무게에 따라 적합한 반응을 나타내는 특정 채널이 있었다. 또한 무게와 부피 변화에 따른 반응도 적합하게 나타났지만 특히, 무게 추정에 적절한 것으로 분석되었다. 현장에 설치된 하이드로폰에 대해서 자동충격전달 장치를 이용하여 채널별 반응 특성 분석으로 센서의 정상작동 여부 및 채널별 출력값의 적합성을 확인하고 소류사 유출량 산정을 위해 적합한 채널을 선정하였다. 하이드로폰 펄스와 평균유량을 이용하여 소류사 유출량 산정식을 개발하고 개발된 식과 현장에 실측된 유출량과 비교한 결과 전체적으로 실측값과 유사하게 나타났다. 하이드로폰을 산림유역의 소류사 모니터링에 활용한다면 유출되는 소류사량의 무게를 정량적이고 지속적으로 산정하는데 효율적인 것으로 검토되었다. 국내 산림유역에서 음향센서가 내장된 하이드로폰을 이용하여 소류사 등 토사유출 모니터링에 활용성을 검증함으로써 관련 분야의 연구 및 기술개발 증진에 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract In this study, hydrophones using acoustic sensors were used to estimate the amount of bedload discharge in a forested watershed. The reaction characteristics were analyzed through hydrophone flume tests and field tests, and the quantitative bedload discharge was calculated and compared with that measured by a pit sampler. The hydrophone reaction changed the pulse according to the flow rate change, but did not react to standard sand. The pulse was different depending on the particle size and weight, and accordingly, there was a specific channel showing a suitable response. For a hydrophone installed in the field, by using an automatic impact device, the reaction characteristics of each channel were analyzed to confirm normal operation of the sensor and the suitability of the output value of each channel. In addition, a suitable channel was selected for the estimation of bedload discharge. The bedload discharge formula was developed using a hydrophone pulse and the average flow rate, and was compared with the measured data in the pit sampler in the study site. As a result of the study, if a hydrophone is used for monitoring the bedload in forested watersheds, it is considered effective in quantitatively estimating the weight of bedload discharge.

Keywords : Acoustic Sensor, Bedload Discharge, Forest Watershed, Flume test, Hydrophone

*Corresponding Author : Chang-Woo Lee(National Institute of Forest Science)

email: leecwfr@korea.kr

Received October 28, 2020

Accepted December 4, 2020

Revised December 2, 2020

Published December 31, 2020

1. 서론

기후변화로 인해 국내 봄철의 고온·건조 일수가 증가하고 여름철의 국지성 집중호우와 태풍으로 자연재해가 빈번히 발생하고 있다[1].

국내의 자연재해는 강우가 집중되는 여름철에 발생하는 풍수해가 대부분이다. 그중에서도 인명피해 등 사상자를 유발하는 대표적인 재해는 산사태라 할 수 있다.

1976년부터 2019년까지 국내에서 발생한 산사태는 연평균 371.5ha로 매년 산사태로 인한 피해가 발생하고 있다. 특히 올해는 54일간의 긴 장마기간으로 인해 전국 곳곳에서 산사태가 발생해 많은 인명과 재산 피해가 발생했다.

산사태로 인한 피해를 방지하기 위해서 가장 효과적인 방법은 사방댐을 시공하는 것이다[2]. 그러나 사방댐의 과다시공에 대한 문제가 제기되고 있는데 합리적이고 과학적인 규모로 사방댐이 시공되기 위해서는 상류에서 하류로 유출되는 토사량을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다.

산림유역에서 하류로 유출되는 토사는 이송 형태에 따라 소류사, 부유사, 세류사로 구분되고 사력의 이동은 부유보다 소류력에 의존한다. 소류사란 소류력에 의해 하상면 가까이에서 활동·전동·도약하면서 이동하는 토사류를 의미한다[3]. 산지계곡에서 발생하는 토석류도 소류의 형태이기 때문에 소류사 모니터링을 통하여 소류사 유출 특성을 분석하는 것은 사방댐 설계에서 중요하게 사용될 수 있다.

소류사를 모니터링하는 방법에는 직접적 방법과 간접적 방법이 있는데 직접 소류사를 측정하는 방법은 정확도는 높지만, 인력·시간·비용이 많이 소요되고 때로는 위험성 문제도 있다. 간접적 방법은 몇 가지의 수문 자료를 유수량 공식에 활용하거나 간접측정 장비를 이용하는 방법으로 인력·시간·비용이 적게 소요되는 장점이 있다[4-6].

세계적으로 간접적 방법에 대한 기술개발이 활발히 진행되고 있는데 특히, 일본과 유럽에서는 음향센서, 가속도계를 사용하여 유사가 충돌할 때 발생하는 음향과 진동으로 소류사 유출량과 특성을 분석하는 장비를 개발하여 활용하고 있다[7-8].

일본에서는 음향센서가 내장된 하이드로폰을 개발하여 입자충돌시 발생하는 펄스수가 입자크기, 유출량 등 센서 특성에 미치는 영향을 연구하였다[9]. 최근에는 수로실험을 통해 하이드로폰의 문제점과 개선방향에 대한

실험적 연구가 진행되었다[10-13].

국내에서 소류사 모니터링과 관련된 연구는 하천을 대상으로 일부 수행되었지만 산지 계곡에서의 연구는 미진한 수준이다[14]. 선행연구에서는 로드셀 센서를 이용하여 산지 계곡에서 하류로 유출되는 토사량을 정량적으로 산정하였다. 그러나 샘플러 용량 한계로 연속측정이 어렵기 때문에 시계열적 소류사 유출 특성을 분석하기는 어려운 단점이 있다[15].

본 연구에서는 수로실험과 현장실험을 통하여 하이드로폰의 반응 특성을 분석하고 국내 산림유역 현장에서의 적용성을 검토하였다. 또한, 하이드로폰을 이용한 정량적 소류사 유출량 산정식을 개발하여 실측값과 비교하고, 센서·통신 기술을 이용한 산림유역의 유출량 산정을 통하여 관련 산업계의 발전에 기여하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 하이드로폰

하이드로폰은 유사가 파이프에 충돌할 때 발생하는 충돌파형을 기록하여 유사이동을 연속적으로 모니터링하는 장치이다(Fig.1).

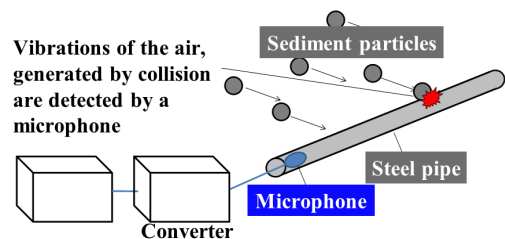


Fig. 1. Particle measurement principle of hydrophone

하이드로폰은 유수가 하류로 흘러갈 때 물속 토사의 충돌을 감지하는 음향센서와 충돌신호를 데이터로 변환해 주는 컨버터로 구성되어 있다. 컨버터는 일반적인 유수와 부유물로 인한 노이즈를 감쇠시키고 데이터 기록에 적합한 신호를 출력한다.

신호처리는 신호증폭, 잡음감쇠, 신호검출, 데이터 출력 순으로 이루어진다(Fig.2).

하이드로폰에 관측된 데이터는 펄스(pulse)와 음압(sound pressure) 두 가지 형태의 자료로 데이터 로거에 기록된다. 토사의 충돌 신호는 주파수 계열(frequency)의 자료이며 이는 컨버터의 고속 푸리에 변

환을 거쳐 토사 이동의 양적 특성 및 시간적 특성을 해석할 수 있는 시계열 자료로 변환된다.

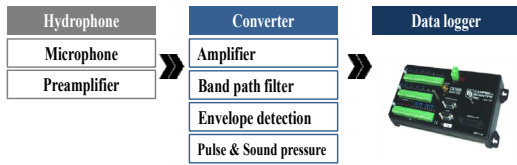


Fig. 2. Data processing of hydrophone

펄스는 마이크로폰이 감지한 충돌 신호가 단위시간 동안 임계치(threshold)에 이른 횟수를 기록하는 것으로 신호 증폭율에 따라 여러 개의 채널로 출력되며 각 채널 별 증폭율은 Fig. 3과 같다. 음압은 유사가 부딪힐 때 발생하는 진동의 크기에 대응하는 값이다.

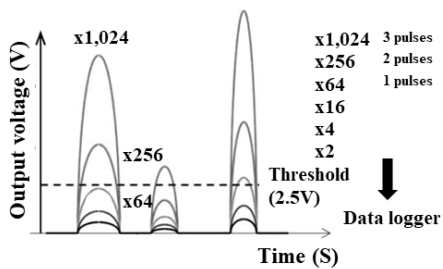


Fig. 3. Pulse measurement method of hydrophone

연구에는 일본 Hydrotech社에서 제조한 하이드로폰을 사용하였다. 데이터로 변화해주는 컨버터는 6채널의 대역필터를 통해 처리되는 전압(200mV)을 생성하고 각 채널은 이전보다 낮은 채널에 비해 2배 또는 4배의 증폭율을 갖는다. 대역필터는 하위(2.5V) 및 상위(5V)의 임계값을 가지며 채널의 출력이 2.5V를 초과하면 펄스가 생성된다[7,17].

2.2 실내 수로실험 및 현장 실험장치

실내 수로실험과 현장 실험을 위하여 실험용 하이드로폰과 자동충격 전달 장치를 제작하였다.

2.2.1 실험용 하이드로폰 및 실험수로

수로실험을 위하여 50cm 하이드로폰과 모르타르를 이용하고 현장 설치 매뉴얼을 준용하여 제작하였다[18]. 자체 제작한 실험용 하이드로폰 장치는 길이 90cm × 폭 10cm × 높이 10cm, 무게 22.2kg 이다.

연구에는 실험목적에 따라 두 가지 수로를 이용하였다. 첫 번째 실험은 하이드로폰의 반응 특성 분석을 목적으로 수행하였고(수로 I), 두 번째 실험은 하이드로폰이 설치된 현장에서 채취한 시료를 이용하여 무게와 부피에 따른 하이드로폰 반응 특성 분석을 목적으로 수행하였다(수로 II). 실험에 사용된 수로의 모습과 제원은 아래 Fig. 4와 Table 1과 같다.

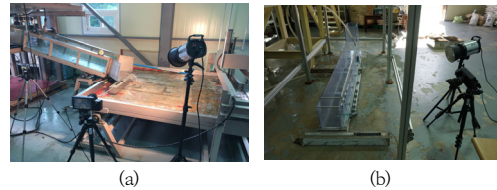


Fig. 4. Image of flume used in the experiment (a) flume I (b) flume II

Table 1. Specifications of the flume used in the experiment

	Flume I	Flume II
Length(m)	1.2	2.0
Height(m)	0.3	0.3
Width(m)	0.3	0.2
Slope range of flume(°)	0 ~ 25	0 ~ 45

2.2.2 수로실험 조건

실험은 4가지 목적으로 구분하여 실험하였으며 세부 실험조건은 Table 2와 같다. 실험 I에서는 유량변화에 따른 하이드로폰 반응성 변화를 분석하기 위해 같은 수로에서 유량만 변화시켜 반응성을 비교·분석하였다. 실험 II에서는 표준사(standard sand)에 대한 반응성 분석을 위해 동일한 유량을 공급하면서 모래를 유하시켰다. 실험 III은 입자 크기와 무게에 따른 변화를 비교·분석하고자 규격화된 자갈(3~5mm, 8mm, 12~15mm)과 현장에서 채취한 시료를 실험에 이용하였다. 또한, 실험IV는 혼합입자 무게와 부피에 따른 하이드로폰 반응 특성 분석을 위해 현장에 설치된 소류사 모니터링 시스템 상류 경사도를 재현하고 현장에서 채집한 시료를 실험에 사용하였다.

2.2.3 자동충격 전달 장치

음향센서가 내장된 파이프형 하이드로폰은 파이프 재질과 고정방법에 따라서 관내 공기의 진동에 영향을 미친다[10]. 하이드로폰은 설치된 환경에 따라서 반응성이

다르게 나타날 수 있기 때문에 각 현장에 대한 채널별 반응성을 파악할 필요가 있다.

현장에 설치된 하이드로폰 반응성을 실험하기 위해 자동충격전달 장치를 제작하였다(Fig.5). 자동충격전달 장치의 타격부 무게는 38g의 추가 있고, 충격은 2.5초 간격으로 전달된다. 이때 공급 전압은 18.2V를 유지하고 출력력은 2.6V로 일정하게 출력된다.

이 장치는 일정한 속도로 동일한 힘을 하이드로폰 파이프에 가하여 인위적인 충격을 발생시키는데 사용하였다.

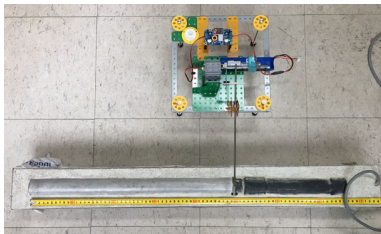


Fig. 5. Simple hydrophone and automatic impact device fabricated in-self

2.3 연구대상지

연구는 국내의 소류사 모니터링 시스템이 구축된 두 개의 산림유역을 대상으로 하였다. 연구대상지에 대한 위치, 면적 등 기본개황은 Table 3과 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3. General characteristics of watersheds in the study site

	Site 1	Site 2
Year when monitoring started	2014	2014
Watershed area	29.3 ha	140.9 ha
Coordinates	35° 45' 28.14" 127° 51' 50.50"	36° 59' 06.04" 129° 44' 48.59"
Location	Geochang	Gyeongsan
Bedrock	Igneous	Igneous
Forest type	Mixed	Mixed
Forest age class	4	6
Slope of flow	16.5° 5.4°-31.1°	14.7° 2.9°-27.6°
Slope range of flume(°)	0 ~ 25	0 ~ 45

Table 2. Experimental conditions based on the purpose of the flume experiment

Experiments purpose	(Exp. type) No. case	Samples	Particle size (mm)	Weight (g)	Volume (cm ³)	No. particles (total)	Flow velocity (m/s)	Water level (cm)	Discharge (ml/s)	Gradient (°)	No. flume
I	(#1) 1	-	-	-	-	-	-	-	386.7	15	I
	(#2) 2		-	-	-	-	-	-	1,073.3		
II	(#3) 3~7	-	Standard sand	500	-	-	1.0	0.5	1,073.3	15	I
III	(#4) 8	Standardized sample	3~5	0.4	-	1	0.84	1.5	836.3	3	II
	(#5) 9		8	0.8							
	(#6) 10		12~15	5.6							
	(#7) 11	Field sample	13	2.0							
	12		15	2.0							
	13		19	2.0							
	14		21	2.0							
15	30	6.0									
IV	(#8) 16	Site 1	-	1,685	1,326.7	-	0.84	1.5	836.3	5	II
	17			266	331.7						
	18			1,186	597.0						
	19	Site 2		826	597.0						
	20			2,164	1,459.3						
	21			377	437.8						
	22	Site 3		1,257	862.3						
	23			667	398.0						
	24			502	452.2						
	25	Site 4		237	339.1						
	26			2,017	1,243.4						
	27			961	623.5						
	28			2,056	1,194.0						
	29	Site 5		1,073	928.7						
	30			79	265.3						
	31			2,039	1,459.3						
	32			636	464.3						
	33	Site 6		175	265.3						
34	4,125		2,388.0								

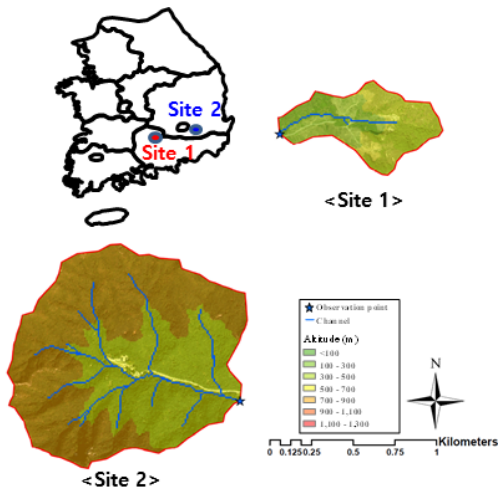


Fig. 6. Location and watershed map of the study sites

연구대상지에는 하이드로폰과 함께 퇴적무게를 측정하는 피트 유사계, 수위계, 유속계, 강우량계, 탁도계, CCTV가 설치되어 있고 이들을 통틀어 소류사 모니터링 시스템이라 하였다. 각각의 연구대상지에 설치된 소류사 모니터링 시스템 모습은 Fig. 7과 같다.

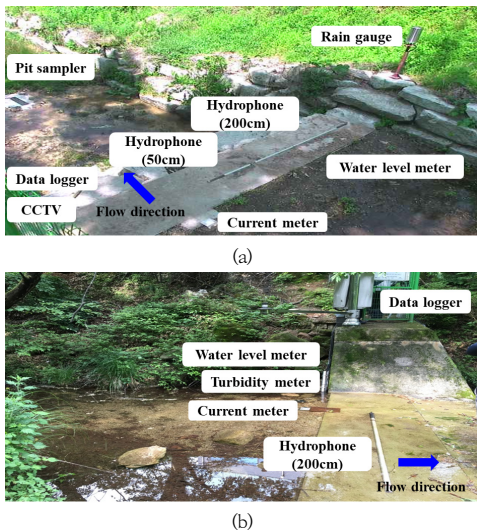


Fig. 7. Images of bedload monitoring system used in the study site
(a) site 1 (b) site 2

2.4 소류사 유출량 산정

하이드로폰을 이용한 소류사 유출량 산정 방법에는 펄스를 이용하는 방법[19-20]과 음압을 이용하는 방법[21]

이 있지만, 본 연구에서는 데이터 처리가 용이하고 비교적 쉽게 유출량을 산정할 수 있는 펄스법을 적용하였다.

하이드로폰 펄스는 증폭율에 따라 여러 개의 채널이 있다. 분석에 활용된 채널 선정에는 선행연구 방법에 따라 직접 관측의 유사량 무게와 펄스 반응이 잘 나타나는 채널을 선정하였다[22].

소류사 유출량 산정식을 도출할 때는 펄스와 수문환경을 다중회귀분석으로 유도하였으며 산정식은 아래 식 1과 같다.

$$Q_s = aP_{ch} \pm bH_E \quad (1)$$

여기서, Q_s = 소류사 유출량(kg), P_{ch} = 하이드로폰 특정 채널의 펄스 수, H_E = 수문환경(수위, 유속, 유량 등), a, b = 계수 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유량변화 및 모래에 의한 하이드로폰 반응 특성

유량변화 실험 #1, #2는 유량을 제외한 경사도, 바닥 거칠기 등 모든 조건은 동일하게 하였다.

실험 #1에서 채널 1(증폭율, $\times 1,024$), 2($\times 256$)의 펄스값은 낮게 나타났고, 실험 #2에서는 실험 #1보다 높은 펄스값으로 나타났다(Fig.8). 유량이 많을수록 하이드로폰 펄스에 영향을 미쳤고 증폭율이 높은 채널의 반응성이 더 크게 나타났다.

실험 #3에서는 실험 #2의 유량조건에 표준사(standard sand) 500g을 추가하여 하이드로폰 반응성을 분석하였다. 주문진 표준사에는 하이드로폰이 반응하지 않았고 유량에 따른 반응성과 유사하게 나타났다(Fig.8). 이는 하이드로폰이 부유사와 모래에는 반응하지 않고 소류사 모니터링에 적합한 증폭율이 설정되어 있는 것으로 나타났다.

선행연구의 유수 노이즈에 대한 실험에서는 수심이 커지자 소음이 커진 것으로 나타났는데 본 실험에서도 동일하게 나타났다[13]. 수로 폭 등 제한된 공간에서 진행되는 수로실험에서 공급되는 유량이 많아지면 수위가 높게 형성되고 유속도 빨라져 에너지가 증가하기 때문에 하이드로폰 반응성도 증가한 것으로 판단된다.

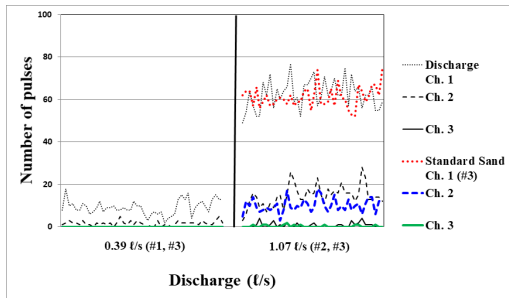


Fig. 8. Relationships among hydrophone pulse, flow rate, and standard sand

3.2 단일입자 크기 및 무게에 의한 하이드로폰 반응 특성

실험 #4~#6에서 규격 자갈 3~5mm의 펄스수는 채널 1에서 54회, 채널 2에서 4회이고, 8mm 입자는 채널 1에서 57회, 채널 2에서 13회, 채널 3에서 5회, 12~15mm 입자는 채널 1에서 121회, 채널 2에서 29회, 채널 3에서 12회, 채널 4에서 2회, 채널 5에서 1회 순으로 각각 나타났다.

또한, 실험 #7에서 19mm, 21mm, 30mm 입자는 상대적으로 크기가 큰 입자이지만 증폭율이 높은 채널 1의 펄스값이 크기가 작은 15mm 보다 낮게 나타난 경우도 있었지만, 채널 2에서는 펄스값이 대체로 크게 나타났다 (Fig.9).

증폭율이 낮아질수록 입자크기에 의한 펄스값 차이는 줄어들기 때문에 크기가 큰 입자의 분석에는 증폭율이 높은 채널보다는 증폭율이 낮은 채널을 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

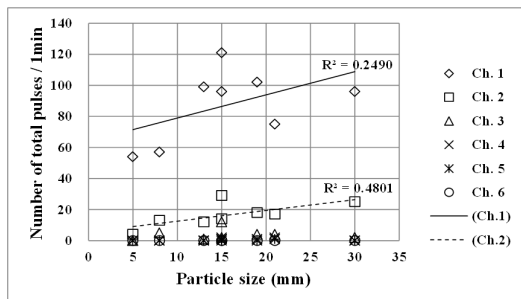


Fig. 9. Relationship between particle size and total number of pulses

입자 무게에 따른 펄스 반응을 분류한 결과 가장 무거운 6g(30mm)의 시료를 제외하고는 입자 무게에 따른

펄스 반응이 잘 나타났다(Fig.10).

2g 시료 4개는 채널 순으로 각각 99, 12, 1회 (13mm), 96, 14, 2, 1회(15mm), 102, 18, 4, 1회 (19mm), 75, 17, 4, 2, 1회(21mm)의 펄스값이 나타났다. 이러한 결과는 무게에 의해 각 채널별 반응성이 정확하게 일치하지는 않지만 유사하게 나타난 것을 알 수 있었다.

같은 무게에 대한 채널별 반응성이 정확하지 않은 이유는 실험에 사용된 입자 크기가 서로 다르기 때문에 파이프에 충돌하는 표면적 차이가 영향을 미친 것으로 추정된다. 이는 간접적 측정법의 보정에서 충격의 수는 입자의 질량과 상관관계가 있다는 선행연구와 유사한 결과였다[23].

따라서 국내 산림유역의 모니터링에는 입자 크기 분석 보다는 유출량에 대한 무게 분석에 활용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

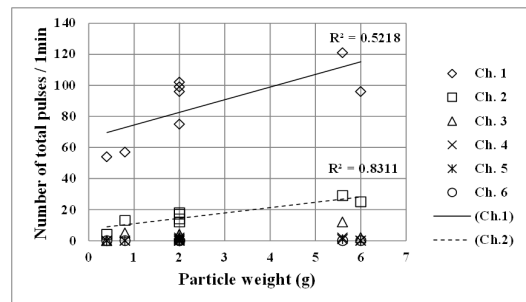


Fig. 10. Relationship between particle weight and total number of pulses

3.3 혼합입자 무게와 부피에 의한 하이드로폰 반응 특성

실험 #8의 혼합입자 무게 변화에 따른 하이드로폰 반응 특성 실험은 최대한 산림유역 현장조건을 재현하고자 하였다. 현장에 설치된 소류사 모니터링 시스템의 경사도를 재현하고 현장에서 채집한 시료를 실험에 사용하였다. 실험에는 수로II를 사용하였고 총 19개 시료에 대해 무게와 부피를 측정하였다.

무게가 높아질수록 펄스의 각 채널 반응성이 좋은 것으로 나타났다. 특히, 채널 1과 2의 반응성이 잘 나타났는데 두 채널에 대해 회귀분석한 결과 결정계수(R^2) 값이 각각 0.79, 0.73으로 나타났다(Fig.11).

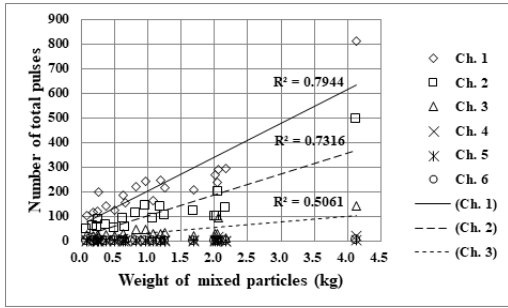


Fig. 11. Relationship between weight of mixed particles and total number of pulses

부피에 따른 반응성은 무게변화 보다 좋지 않았지만 채널 1과 2에서 결정계수(R^2) 값이 각각 0.70, 0.63으로 나타나 하이드로폰 펄스의 반응이 부피를 어느 정도는 반영할 수 있는 것으로 나타났다(Fig.12).

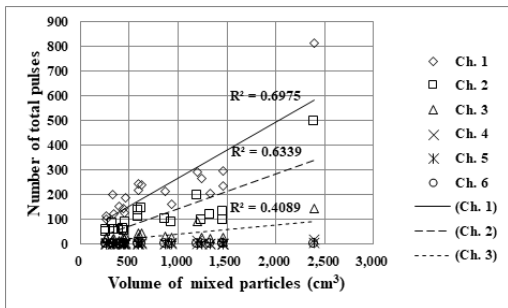


Fig. 12. Relationship between volume of mixed particle and total number of pulses

본 실험에 사용한 수로II와 이동형 하이드로폰을 이용하여 소류사 무게(식 2)와 부피(식 3)를 추정할 수 있는 식을 유도하였다.

$$y_1 = 0.0058x_1 - 0.1494 \quad (2)$$

$$y_2 = 3.059x_1 + 124.05 \quad (3)$$

여기서, y_1 = 소류사 무게(kg), y_2 = 소류사 부피(cm^3), x_1 = 하이드로폰 채널 1의 총 펄스수 이다.

실험을 통해 산출된 식을 현장에 직접적으로 적용할 수는 없지만 반응 특성 실험을 통해 하이드로폰은 입자 크기, 무게, 부피에 따라서 반응성이 다르게 나타나는 것을 확인하였다.

실험은 국내 산림유역의 적용에 앞서 센서 반응 특성

에 대한 기초자료를 확보하고 현장 모니터링 결과의 과학적 분석 자료로 활용될 수 있다. 하이드로폰 펄스를 이용하여 소류사 모니터링 시스템 현장에서 유출되는 소류사량을 무게단위로 모니터링이 가능한 것으로 판단되었다.

3.4 자동충격 전달 장치를 이용한 하이드로폰 현장 충격력 실험

Site 1과 2에 설치된 200cm 하이드로폰에 대해 10cm 간격으로 현장 충격력 실험을 통하여 각 채널별 관계를 분석하였다.

Site 1과 2에서 하이드로폰 펄스의 출력값을 채널별로 비교한 결과 1:1 비교선을 기준으로 증폭율이 큰 부분에 펄스값이 모두 위치했기 때문에 각 채널별 반응성이 잘 나타나 현장 설치가 적합하게 된 것으로 판단된다(Fig.13,14).

Site 2에서의 증폭율이 낮은 채널은 Site 1보다 반응성이 좋지 않았으며 결정계수도 낮게 나타났다. Site 2에서 소류사 유출 특성을 분석할 때에는 채널 1, 2, 3과 같은 증폭율이 높은 채널을 이용하는 것이 정확한 결과를 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

연구대상지에 설치된 하이드로폰에 자동충격 전달 장치를 이용하여 각 채널별 반응 특성을 분석한 결과 설치된 현장에 따라서 반응하는 채널 종류, 펄스값이 다르게 나타났다. 선행연구에서도 하이드로폰의 고정 방법, 고정 크랩 위치에 따라서 반응 특성이 다르게 나타났다[10].

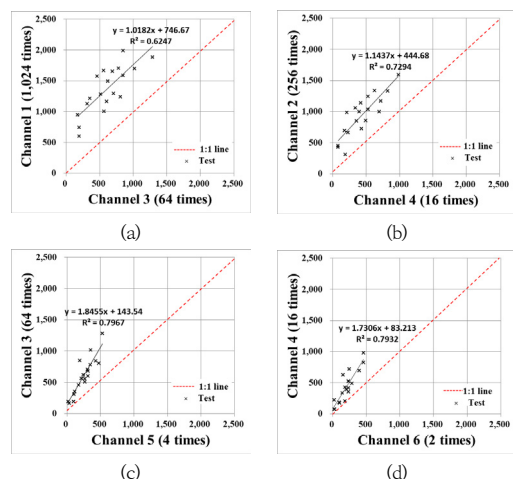


Fig. 13. Reaction characteristics of hydrophone channel at site 1
(a) channel 1 and 3 (b) channel 2 and 4 (c) channel 3 and 5 (d) channel 4 and 6

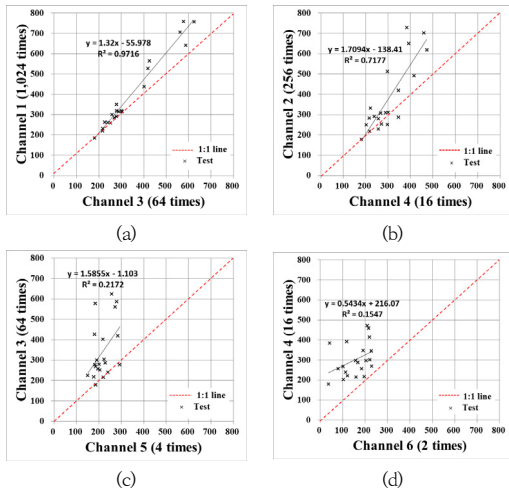


Fig. 14. Reaction characteristics of hydrophone channel at site 1
 (a) channel 1 and 3 (b) channel 2 and 4 (c) channel 3 and 5 (d) channel 4 and 6

증폭율이 서로 다른 채널별 반응 특성 관계는 특정 채널에서의 관측 왜곡 등 데이터의 노이즈 보정에 사용할 수 있을 것으로 판단된다[5,7]. 또한, 소류사 모니터링 시스템이 설치된 현장은 산림유역내의 자연환경에 노출되어 있기 때문에 정기적인 총저력 검사를 통하여 채널별 관계식을 수정·보완하는 것은 모니터링 데이터의 분석에 중요할 것으로 판단된다.

3.5 산림유역 소류사 유출량 산정식 개발

하이드로폰을 이용한 소류사 유출량 산정식을 도출하

기 위해서 펄스법을 이용하였다[20]. 본 연구에서는 하이드로폰의 모든 채널을 사용하지 않고 가장 적합한 반응을 보이는 채널을 선정하여 분석하였다.

정확한 채널을 선정하기 위해 연구대상지의 피트 유사 계에 퇴적된 실측량(kg)과 하이드로폰 각 채널을 회귀분석 하여 결정계수가 가장 높은 채널을 소류사 유출량 산정에 적합한 채널로 선정하였다(Fig.15).

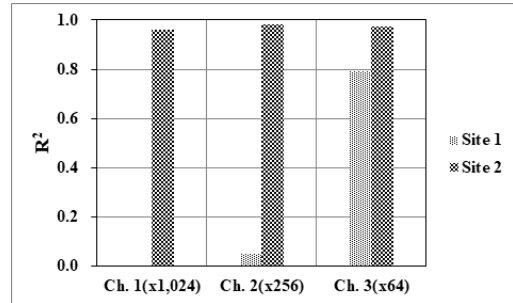


Fig. 15. Relationship between each channel of hydrophone and determination coefficient when sediment discharge occurred in sites 1 and 2

Site 1에서는 채널 3이 결정계수(R^2) 0.79로 반응성이 가장 좋게 나타났고, Site 2에서는 채널별 반응성 차이가 크지는 않았지만 채널 2가 결정계수(R^2) 0.98로 가장 높게 나타나 소류사 유출량 산정식에 적합한 채널로 분석되었다.

소류사 유출에 영향을 미치는 수문환경 인자를 선정하기 위해서 Site 1과 2에서 소류사 실측량(kg)과 평균수

Table 4. Analysis results of correlation between amount of bedload discharge and hydrological factors in damaged forest watersheds

	Average	Standard deviation	Bedload weight	Avg. Water level	Avg. Flow velocity	Max. Water level	Max. Flow velocity	Total discharge	Avg. Dis-charge
Bedload weight	68.4	112.9	1						
Avg. Water level	0.1	0.0	.8632	1					
Avg. Flow velocity	2.8	1.6	.4654	.7752	1				
Max. Water level	0.2	0.1	.8948	.8931	.5798	1			
Max. Flow velocity	7.1	5.9	.3732	.4586	.4784	.5977	1		
Total discharge	15,154.0	22,693.1	.9290	.8948	.6127	.9379	.5659	1	
Avg. Dis-charge	3.6	5.3	.9445	.9188	.5413	.9612	.4181	.9323	1

위, 평균유속, 최대수위, 최대유속, 총유량, 평균유량간의 상관관계를 분석하였다(Table 4).

평균유량(m³/s)이 상관계수 .9445로 소류사 무게와의 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다. 다음으로 총유량, 최대수위, 평균수위 순으로 상관성이 나타났고 평균 유속, 최대유속은 소류사 유출량과는 다른 인자들보다 상대적으로 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

지금까지 결과를 바탕으로 하이드로폰 펄스 채널과 평균유량을 각각의 독립변수로 다중회귀분석을 통하여 아래 식 4, 5와 같이 소류사 유출량 산정식을 도출하였다.

$$y_{site1} = 0.0373x_1 - 28.3828x_3 + 15.1594 \quad (4)$$

$$y_{site2} = 0.0005x_2 + 6.0995x_3 + 9.7955 \quad (5)$$

여기서, y_n = 소류사 유출량(kg), x_1 = 채널 3의 총 펄스수, x_2 = 채널 2의 총 펄스수, x_3 = 평균유량(m³/s)이다.

소류사 유출량 산정식 도출 결과 Site 1과 Site 2에서 결정계수가 각각 0.84, 0.99로 설명력이 높은 것으로 나타났다.

산림유역의 소류사 유출량 산정에 관한 연구가 부족하고 특히, 현장 관측 데이터가 전무한 상황에서 본 연구에서 도출한 산출식을 이용한다면 하이드로폰을 이용한 소류사량 추정에 합리적인 방법이 될 것으로 판단된다.

소류사 산정식을 이용한 유출량과 피트 유사계에 실측된 유출량을(Site 1 : 4개 이벤트, Site 2 : 7개 이벤트) 비교한 결과 전체적으로 실측값과 유사하게 나타났다(Fig.16).

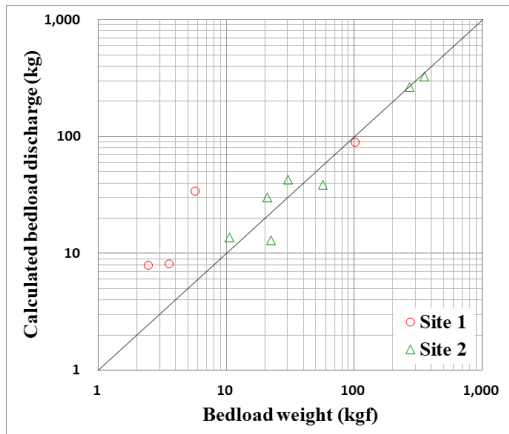


Fig. 16. Relationship between directly measured and calculated weight of bedload in sites 1 and 2

산지계류를 포함하는 산림유역에서는 사면에서의 침식과 계류에서의 침식·퇴적이 국소 지역적으로 반복되기 때문에 유출량을 정량적으로 예측하는 것은 어렵다. 그러나 본 연구의 하이드로폰을 이용한 간접적 모니터링을 통하여 효율적인 정량적 소류사 유출량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 입자크기, 무게, 부피에 따른 하이드로폰 반응 특성에 대한 연구로 향후 혼합입자 농도, 혼합입자 크기별 혼합도 등에 대한 추가적인 연구가 수행될 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 산림유역의 소류사 유출량을 산정하기 위해 음향센서를 이용한 하이드로폰의 현장 적용성을 검토하였다. 이를 위해 수로실험과 현장실험을 통하여 하이드로폰의 반응 특성을 분석하고, 소류사 유출량 추정식을 개발하여 실측된 양과 비교·분석하였다.

하이드로폰의 반응 특성은 유량·모래, 입자 크기 및 무게, 혼합입자 무게 및 부피에 따른 펄스값을 분석하였다. 그 결과 유량변화에 따라 펄스값이 변화하였고 모래에는 반응하지 않았다. 또한, 입자 크기와 무게에 따라서 펄스값이 달랐는데 적합한 반응을 나타내는 특정 채널이 있는 것으로 나타났다. 따라서 모니터링 결과 분석에는 모든 채널을 이용하기보다는 적합한 반응을 나타내는 채널을 선정하여 활용하는 것이 실측값에 유사한 것으로 판단된다.

현장에 설치된 하이드로폰에 대해서 자동충격전달 장치를 이용하여 각 채널별 반응 특성을 분석함으로써 센서의 정상 작동 여부와 채널별 출력값의 적합성을 확인하였다. 이러한 결과는 센서의 미비한 파손 등 훼손에 따른 측정값 왜곡이 있을 때 채널별 관계식을 통하여 보정하는데 활용할 수 있다.

하이드로폰을 이용한 소류사 유출량 산정을 위해 연구 대상지에 적합한 채널과 수문환경 인자인 평균유량을 이용하여 소류사 유출량 산정식을 개발하였다. 개발된 식과 현장에 실측된 유출량과 비교한 결과 전체적으로 실측값과 유사하게 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

하이드로폰을 산림유역의 소류사 모니터링에 활용한다면 유출되는 소류사량을 정량적이고 지속적으로 산정하는데 효율적인 것으로 검토되었다. 특히, 유출되는 유사의 부피보다는 무게 추정에 적합하였다.

수로실험과 현장실험을 통한 하이드로폰의 반응 특성 결과는 국내에서 하이드로폰을 적용하는데 있어 과학적 기초자료를 확보하고 모니터링 결과 분석에 정확도를 높일 수 있다. 또한, 국내 산림유역에 적용된적 없는 음향센서가 내장된 하이드로폰에 대한 소류사 등 토사유출 모니터링에 활용성을 검증함으로써 관련 분야의 연구 및 기술개발 증진에 도움이 될 것이다.

References

- [1] National Institute of Forest Science, A prediction of forest disaster change on climate change and establishment of counter-strategy, National Institute of Forest Science, 2013, p.421
- [2] G. Piton, A. Recking, "Effects of check dams on bed-load transport and steep-slope stream morphodynamics", *Geomorphology*, Vol.291, pp.94-105, August 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.001>
- [3] J. R. Gray, J. B. Laronne, J. D. G. Marr, "Bedload-surrogate monitoring technologies", *U.S Geological Survey Scientific Investigations Report*, Vol.5091, pp.37, August 2010.
- [4] D. Rickenmann, J. M. Turowski, B. Fritschi, A. Klaiber, A. Ludwig, "Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.37, pp.1000-1011, February 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3225>
- [5] L. Mao, R. Carrillo, C. Escauriaza, A. Iroume, "Flume and field-based calibration of surrogate sensor for monitoring bedload transport", *Geomorphology*, Vol.253, pp.10-21, January 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.002>
- [6] National Institute for Land and Infrastructure Management, Recent advances in sediment discharge and hydrological observation at mountain rivers of Japan, National Institute for Land and Infrastructure Management, 2016, p.51
- [7] T. Mizuyama, J. B. Laronne, M. Nonaka, T. Sawada, Y. Satofuka, M. Matsuoka, S. Yamashita, Y. Sako, S. Tamaki, M. Watari, S. Yamaguchi, K. Tsuruta, "Calibration of a passive acoustic bedload monitoring system in Japanese mountain rivers", *Published online in 2010 as part of U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, Vol.2010, No.5091, pp.296-318, 2010.
- [8] D. Rickenmann, G. Antoniazza, C. R. Wyss, B. Fritschi, S. Boss, "Bedload transport monitoring with acoustic sensors in the Swiss Albula mountain river", *International Association of Hydrological Sciences*, Vol.375, pp.5-10, March 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5194/piahs-375-5-2017>
- [9] T. Mizuyama, A. Oda, J. B. Laronne, M. Nonaka, M. Matsuoka, "Laboratory tests of a Japanese pipe geophone for continuous acoustic monitoring of coarse bedload", *Published online in 2010 as part of U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, Vol.2010, No.5091, pp.319-335, 2010.
- [10] Y. Hasegawa, K. Miyamoto, "Experimental study natural resonance modes of sound of hydrophone and sediment discharge measurement", *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.66, No.5, pp.23-32, January 2014.
DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.66.5_23
- [11] K. Goto, T. Itoh, T. Nagayama, M. Kashi, T. Marutani, "Influences of boundary condition of pipe on acoustic wave deformation", *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.68, No.4, pp.3-11, November 2015.
DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.68.4_3
- [12] T. Uchida, N. Yoshimura, S. Hayashi, K. Tsuruta, T. Suzuki, Y. Hasegawa, J. Kanbara, T. Mizuyama, "An experiments for collision rate of hydrophone (pipe geophone)", *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.67, No.5, pp.24-29, January 2015.
DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.67.5_24
- [13] T. Iuchi, T. Uchida, N. Yoshimura, K. Tsuruta, Y. Tanaka, J. Kanbara, W. Sakurai, "Flume experiment into the influence of the noise due to water flow and non-collision against the pipe on measurement of sediment discharge using hydrophone data", *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.69, No.3, pp.4-14, September 2016.
DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.69.3_4
- [14] J. P. Seo, *Analysis on the Characteristics of Sediment Discharge in Forested Watersheds using the Acoustic Sensor and Pit Sampler*, Ph.D. Dissertation, Yeungnam University, p.203, 2019.
- [15] J. P. Seo, K. H. Lee, D. Y. Kim, C. S. Woo, C. W. Lee and H. H. Lee, "Evaluation of the applicability of sediment discharge measurement in mountain stream using the load-cell sensor", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.1, pp.644-653, January 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.1.644>
- [16] T. Uchida, "Sediment transport observations in mountain rivers", Seminar in National Institute of Forest Science, 24th June 2014, Seoul, Korea.
- [17] A. Dell'Agnese, L. Mao, F. Comiti, "Calibration of an acoustic pipe sensor through bedload traps in a Glacierized basin", *Catena*, Vol.121, pp.222-231, October 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.021>
- [18] Hydrotech Corporation, "Installation instruction for hydrophone", pp.5, 2013.
- [19] H. Nakaya, "Comparative analysis of sediment discharge estimatd by indirect methods and yearly

reservoir sedimentation in Hokuriku region”, *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.61, No.3, pp.3-14, September 2008.

DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.61.3_3

- [20] H. Nakaya, “Statistical bed load analysis of small-scale floods based on hydrophone observation”, *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.61, No.5, pp.4-11, January 2009.

DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.61.5_4

- [21] T. Suzuki, H. Mizuno, N. Osanai, R. Hirasawa, Y. Hasegawa, “Basic study on sediment rate measurement with a hydrophone on the basis of sound pressure data”, *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.62, No.5, pp.18-26, January 2010.

DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.62.5_18

- [22] H. Nakaya, “A case study of influences on the bed load detection rate of hydrophone system exerted by flow discharges”, *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.61, No.4, pp.12-20, November 2008.

DOI: https://doi.org/10.11475/sabo.61.4_12

- [23] D. Rickenmann, J. M. Turowski, B. Fritschi, C. Wyss, J. Laronne, R. Barzilai, I. Reid, A. Kreisler, J. Aigner, H. Seitz, H. Habersack, “Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravelbed streams”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.39, pp.928-942, November 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3499>

서 준 표(Jun-Pyo Seo)

[정회원]



- 2013년 2월 : 영남대학교 산림자 원학과 (이학석사)
- 2019년 2월 : 영남대학교 산림자 원학과 (농학박사)
- 2019년 7월 ~ 현재 : 국립산림과 학원 산림방재연구과 연구사

〈관심분야〉

산지토사재해, 토사유출, 사방공학

김 기 대(Ki-Dae Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 경남과학기술대학교 산림자원학과 (농학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 국립산림과 학원 산림방재연구과 연구원

〈관심분야〉

산림수문, 사방공학

우 총 식(Choong-Shik Woo)

[정회원]



- 2006년 2월 : 인하대학교 지리정 보학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 인하대학교 지리정 보학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 국립산림과 학원 산림방재연구과 연구사

〈관심분야〉

지리정보공학, RS/GIS

이 창 우(Chang-Woo Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 영남대학교 임학과 (농학석사)
- 1998년 3월 : 일본 동경대학교 임 학과 (농학박사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : 국립산림과 학원 산림방재연구과 임업연구관

〈관심분야〉

토질역학, 산지토사재해 예측, 사방연구

이 현 호(Heon-Ho Lee)

[정회원]



- 1985년 8월 : 서울대학교 산림과학부 (농학석사)
- 1990년 7월 : 일본 동경대학교 임학과 (농학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 산림자원학과 교수

〈관심분야〉

산림수문, 산림공학, 사방공학, 훼손지 복원