지반의 세립분 함유량 및 네트형 사방댐 격자크기가 토석류 거동에 미치는 영향

Effect of Ground Conditions and Mesh Size of Net-type Barrier on Debris Flow Behavior

김형진* · 이지성** · 김윤태***

Kim, Hyeong-Jin*, Lee, Ji-Sung**, and Kim, Yun-Tae***

Abstract

Debris flow is a type of landslide that occurs mainly in mountain valley areas during heavy rainfall. Various types of barriers have been installed in South Korea to reduce the damage caused by debris flows. However, there is no reasonable design standard when installing the barrier, and an experimental study for the performance evaluation of barriers is insufficient. In this study, the performance of the net-type barrier was evaluated by analyzing the effect of the ground conditions and mesh size of the net-type barrier on the debris flow behavior by reducing the front velocity and deposition volume. As a result, for areas with less fine content, the efficiency of the net-type barrier increased as the mesh size of the net-type barrier decreased. Accordingly, the ground conditions and mesh size of the net-type barrier significantly influence the performance of the net-type barrier. The damage caused by debris flow can be sufficiently reduced through the reasonable design of a net-type barrier.

Key words : Debris Flow, Net-type Barrier, Front Velocity, Deposition Volume

요 지

토석류는 집중강우 시 산지 수로부에서 주로 발생하는 산사태의 한 종류로 우리나라에는 토석류로 인한 피해를 저감하기 위해 다양한 종류의 사방시설물이 설치되어 왔다. 하지만 사방시설물 설치 시 합리적인 설계기준이 제시되어 있지 않고 사방댐의 성능평가를 위한 실험적 연구도 충분치 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통해 지반조건과 네트형 사방댐의 격자크기가 토석류 거동에 미치는 영향을 분석하여 유출속도 및 퇴적부피 저감을 통해 네트형 사방댐의 성능을 평가하였다. 연구 결과, 지반의 세립분 함유량이 적은 지역에서 네트형 사방댐의 격자크기가 작을수록 네트형 사방댐의 성능은 더욱 높았다. 이에 따라 지반조건과 네트형 사방댐의 격자크기는 사방댐의 성능에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 합리적인 네트형 사방댐 설계를 통해 토석류로 인한 피해를 충분히 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 토석류, 네트형 사방댐, 유출속도, 퇴적부피

1. 서 론

최근 우리나라의 경우 기후변화와 도시화로 인한 산지개발로 자연재해 발생이 증가하고 있으며 이에 따라 재산피해

및 인명피해 또한 증가하고 있다. 1990년대 이전에 비해 2000년대 이후 2011년 집중강우, 2012년 태풍 산바(SANBA), 2020년 집중강우 등으로 인해 국가적으로 많은 피해가 발생하였으며, 특히 2020년에는 전국적으로 30건의 산사태가

*정회원, 부경대학교 스마트인프라기술연구소 전임연구원(E-mail: khj_oho@naver.com)

Member, Researcher, Smart Infrastructure Technology Research Center, Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 스마트인프라기술연구소 전임연구원(E-mail: js3497@naver.com)

Member, Researcher, Smart Infrastructure Technology Research Center, Pukyong National University

***교신저자, 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

발생하였다.

토석류는 여름철 우기 시 집중강우로 인해 주로 발생하며 강우 시 지반으로 물이 침투하여 지반의 크고 작은 입자와 물이 혼합되면서 포화되어 흙의 흐름이 발생하는 현상을 말하며 주로 가파른 경사를 가지는 산지 계곡부에서 발생한다(O'Brien and Julien, 1988). 또한 지반 층이 포화됨으로 인해 갑작스럽게 발생하므로 발생 시기를 예측하기가 어렵고 매우 빠른 속도를 가지고 이동한다. 특히 국내의 경우 강우 시 사면파괴 등으로 인해 붕괴된 흙이 산지 수로부에 흐르는 물과 혼합되어 토석류로 발전되고, 흐름에 따라 토석류 연행효과가 발생하여 토석류로 인해 산지와 인접한 민가 및 사회기반시설에 큰 피해를 입는 형태가 주를 이루고 있다. 2011년 중부지방을 중심으로 한 집중강우로 인해 서울 우면산, 춘천, 밀양 등에서 산사태가 발생하였고 이로 인해 총 58명의 인명피해(사망자 18명)와 약 1,500억 원의 복구비용이 발생하였다. 따라서 정부 및 각 지자체는 산사태로 인한 피해를 최소화하기 위한 대책마련에 많은 노력을 기울이고 있다.

사방댐은 일반적으로 산지 계곡부에 설치되어 산사태나 홍수의 운동에너지 감소를 위한 역할을 하며 산사태 위험 지역에서 주로 토석류로 인한 피해를 줄이기 위해 시공된다. 사방댐의 종류로는 불투과형 사방댐과 투과형 사방댐이 있다. 과거에는 토석류의 완벽차단을 위해 불투과형 사방댐을 주로 시공하였으나 최근에는 경관성, 생태계 유지관리 등의 환경적 영향으로 인해 각 산지 수로의 특성에 맞게 다양한 형태의 투과형 사방댐도 시공하고 있다.

산사태 및 토석류에 관한 연구는 우리나라에 비해 산사태가 자주 발생하는 유럽, 중국, 일본 등 해외에서 현장 모니터링, 소형 토석류 실험, 수치해석, 추정식 제안 등을 통해 이루어져 왔다(Takahashi, 1981; Hungr et al., 2001; Rickenmann et al., 2003; Highland, 2004; Wendeler et al., 2008; Iverson et al., 2010). 일반적으로 토석류의 속도, 퇴적 거리, 퇴적높이, 퇴적부피, 충격압 등은 흙의 종류(자갈, 모래, 세립분), 함수비, 초기부피 등에 의존한다. Takahashi (1981), Hungr et al. (2001)은 토석류 피해 예측을 위해 실제 토석류 발생 지반 조건을 통해 지반의 입도분포, 토석류 흐름높이, 수로 경사 등과 토석류 흐름속도의 관계를 분석하여 추정식을 제안하였다. 하지만 실제 토석류 발생지의 정보를 통해 추정식을 제안하는 것은 토석류 발생사례의 한계, 토석류 발생순간의 지반조건을 파악하기 힘들어 불확실성을 가질 수 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 많은 연구자들은 소형 토석류 실험 장비를 제작하여 토석류 연구를 수행하였다. 스케일 축소를 통해 소형 토석류 실험을 수행하면 현장과 유사한 지반 조건을 갖추어 실험할 수 있고 짧은 시간에 다수의 실험을 통해 다양한 지반조건에 대한 토석류 거동 데이터를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 현재 토석류 실험에 대한 장비 규모 및 형태의 정확한 기준이

정립되어 있지 않기 때문에 일반적으로 각 실험실 여건에 맞게 수로 길이, 형태, 폭, 경사 등을 설정하여 실험이 수행되고 있다(Wendeler et al., 2008; Iverson et al., 2010; De Haas et al., 2015; Hurlimann et al., 2015). 특히 Iverson et al. (2010)은 현재까지 가장 큰 규모인 수로 폭 2 m, 수로 높이 1.2 m, 수로 길이 95 m에 달하는 실·대형 장치를 제작하여 토석류 실험을 수행하고 토석류 거동 특성을 파악하였다. Wendeler et al. (2008)은 스위스의 Milibach 강에서 발생한 토석류의 시료를 채취하여 다양한 격자 크기의 네트형 사방댐을 설치하고 총 6회의 실험을 수행하였다. 이와 같은 실험 결과는 연구 대상지역의 사방댐 설계 및 구축 시 유용한 정보로 활용되었다.

또한 우리나라에서도 2011년 우면산 산사태 이후 여러 연구자들에 의해 토석류 연구가 활발히 진행되고 있으며 앞서 언급한 소형 토석류 실험의 장점을 적극 활용하여 토석류 거동에 관한 실험적 연구 또한 많이 이루어졌다(Kim et al., 2010; Eu and Im, 2017; Lee et al., 2017; Choi et al., 2018; Kim et al., 2019; Kim, 2020; Kim and Kim, 2020). Choi et al. (2018)은 실험을 통해 토석류 거동에 대한 슬릿형 사방댐의 배치(형태 및 각도) 영향을 조사하였고, Kim et al. (2019)은 원통형 대책 구조물을 수로부에 설치하여 구조물의 설치변화(원통형 대책 구조물의 종 방향 열 개수 및 높이)가 토석류 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Kim and Kim (2020)은 서로 다른 지반공학적 특성을 가지는 두 지역의 시료를 채취하여 레오미터 실험을 통해 토석류 유변물성을 산정하고 소형 토석류 실험 결과를 고찰하여 유변물성에 따른 토석류 거동특성을 분석하였다.

일반적으로 토석류 거동 메커니즘은 지반특성에 따라 차이를 보인다. 따라서 대상지역의 시료를 통한 토석류 연구는 필수적으로 수반되어야 한다. 특히 서울 우면산, 부산 황령산 등과 같은 대도시의 경우 산지와 인접한 지역에 다수의 민가가 밀집되어 있어 집중강우에 의해 토석류가 발생했을 시 경제적인 피해뿐만 아니라 대규모 인명 피해가 발생할 수 있으므로 각 지역의 지반특성에 따른 토석류 거동을 명확히 규명해야 한다. 또한 우리나라의 경우 토석류 피해를 줄이기 위한 사방댐 설계 시 사방댐의 설치 위치, 종류, 규모 등에 있어 합리적인 기준이 제시되어 있지 않고 전문가의 경험적 설계에 의존하고 있으며, 이는 사방시설물 설계 시 과다설계로 인한 경제적인 손실 및 환경 파괴로 이어질 수 있다. 이에 따라 지반특성을 고려한 사방댐의 규모, 종류, 설치 위치와 관련된 합리적인 사방댐 설계기준을 정립하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 도심지와 인접한 부산 황령산 및 서울 우면산 지역의 시료를 채취한 후 실험을 통해 채취된 연구지역 시료의 세립분 함유량 및 투과형 사방댐 중 하나인 네트형 사방댐의 격자크기에 따른 사방댐의 성능(유출속도 및 퇴적부피 저감)을 평가하여 지반조건과

네트형 사방댐의 격자 크기가 토석류 흐름에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 채취시료의 물리적 특성

Fig. 1은 부산 황령산(Mt. Hwangnyeong)과 서울 우면산(Mt. Umyeon)에서 시료를 채취한 위치를 나타낸다. 시료 채취 위치는 황령산 및 우면산 지역의 산사태 위험지도와 산사태 이력을 검토하여 각 산지에서 산사태 발생 위험이 큰 지역의 상류부로 선정하였다(Pradhan et al., 2018; Ngyuen and Kim, 2019). Table 1에 채취된 각 시료의 지반공학적 특성을 도시하였다. 입도분포의 경우 황령산 시료는 세립분 함유량이 약 72.6%, 우면산 시료는 약 24.5%로 우면산 시료에 비해 황령산 시료의 세립분 함유량이 훨씬 많았다. 일반적으로 세립분 함유량이 많을수록 액성한계는 크게 나타난다. 이에 따라 황령산 시료의 경우 액성한계 48.8%, 우면산 시료의 경우 액성한계 33.3%로 확인한 차이를 보였다. 토석류는 집중강우 시 물이 지반으로 침투하면서 흙 입자와 물이 혼합되고 유체처럼 거동하여 흐름이 발생하는 현상으로 일반적으로 액성한계 이상의 함수비에서 발생한다. 즉, 황령산 시료와 우면산 시료의 지반공학적 특성에 따라 세립분 함유량이 많은 황령산 시료의 액성한계가 우면산 시료에 비해 높고 이는 곧 우면산 시료에 비해 황령산

시료가 유체처럼 거동하기 위한 기본 함수비가 더 크다고 볼 수 있다.

3. 실험 방법 및 실험 조건

3.1 소형 토석류 실험 장비 및 네트형 사방댐

본 연구에서 사용한 소형 토석류 실험 장비(small-scale debris flow experiment equipment)는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)의 소형 토석류 실험 장비는 경사 조절이 가능하다.(17°-45°) 폭 0.15 m, 길이 2 m의 사각 단면으로 수로가 제작되었으며 수로 상부에는 실험시료에 흐름을 발생시키기 위한 폭 0.15 m, 길이 0.4 m, 높이 0.4 m의 시료상자(soil box)가 연결되어 있다. 또한 퇴적부피를 알아보기 위하여 폭 1.0 m, 길이 1.5 m의 퇴적부(deposition part)도 제작되었다. 수로부 및 퇴적부에는 10 cm 간격으로 주 눈금이, 1 cm 간격으로 보조눈금이 표시되어 있어, 수로부 촬영 영상을 통해 토석류 유출속도를, 퇴적부에 퇴적된 토석류 퇴적 높이를 통해 토석류 퇴적부피를 측정하였다.

네트형 사방댐의 설치를 통한 토석류 거동 저감 효과를 분석하기 위해 소형 토석류 실험 장비에 네트형 사방댐을 설치하여 토석류 실험을 수행하였다. 네트형 사방댐 설치에 따른 소형 토석류 실험장비의 모식도는 Fig. 2(b)와 같다. 네트형 사방댐의 설치 위치는 수로 하단부에서 40 cm 떨어진

(a) Mt. Hwangnyeong

(b) Mt. Umyeon

Fig. 1. Location of Soil Samples

Table 1. Geotechnical Properties of Soil Samples

Location	Gravel (%)	Sand (%)	Silt and clay (%)	Liquid limit, LL (%)	Plastic index, PI (%)	Specific gravity, Gs
Mt. Hwangnyeong	7.2	20.2	72.6	48.8	11.6	2.63
Mt. Umyeon	10.0	65.5	24.5	33.3	8.4	2.68

(a) Detail of experiment equipment

(b) Schematic diagram of net-type barrier

Fig. 2. Small-Scale Debris Flow Experiment Equipment

지점이며 사방댐 전·후 토석류 속도를 세부적으로 관찰하기 위해 수로 상단에 두 대의 카메라를 설치하여 영상을 촬영하였다. 또한 네트형 사방댐의 격자 크기에 따른 토석류 저감 효과를 분석하기 위해 격자크기가 다른 두 네트형

사방댐을 제작하였으며(Fig. 3), 제작된 네트형 사방댐을 소형 토석류 실험장비에 설치한 후 실험을 수행하여 네트형 사방댐의 격자 크기에 따른 토석류 거동 저감 효과를 분석하였다.

(a) Barrier 1 (Mesh size: 1.2 cm)

(b) Barrier 2 (Mesh size: 1.5 cm)

Fig. 3. Net-Type Barrier

3.2 실험 조건

소형 토석류 실험에서 변화 가능한 실험 조건은 시료의 함수비, 초기부피, 실험장비의 수로경사, 입도분포 변화에 따른 자갈, 모래 및 세립분의 구성비 등이 있다. 본 연구에서는 부산 황령산 및 서울 우면산에서 채취된 액성한계의 차이가 있는 두 시료의 함수비 조건을 변화시켜 토석류 거동을 분석하였다. Table 2는 실험 시 적용된 두 시료의 함수비 조건과 네트형 사방댐의 격자크기 등의 실험조건을 나타낸다. 함수비 조건은 각 시료의 액성한계 이상의 함수비에서 모사된 토석류가 수로를 통과하여 퇴적부까지 충분히 흐를 수 있는 조건으로 설정되었다. 또한 모래 및 세립분 함유량에 비해 자갈의 함유량이 적어 시료의 일관성이 떨어지고 반복 실험 시 결과의 통일성이 부족할 것으로 판단되어, 현장에서 채취된 풍화토 시료를 완전 건조한 후 4번체로 통과시킨 모래와 세립분만을 이용하여 수행하였다. 사방댐 설치 후 함수비 조건은 사방댐을 설치하지 않은 경우의 함수비 조건 이내로 설정하여 실험을 수행하였다. 황령산 시료의 경우 네트형 사방댐을 설치하지 않은 경우 60%에서

70%의 함수비 범위에서 3가지 조건으로 수행되었고 격자크기가 1.2 cm인 Barrier 1을 설치하여 63%에서 68%의 함수비 범위에서 3가지 조건, 격자크기가 1.5 cm인 Barrier 2를 설치한 후 62%에서 68%의 함수비 범위에서 3가지 조건으로 실험이 수행되어 각각 3회씩 총 27회 실험을 수행하였다. 우면산 시료의 경우도 황령산 시료의 실험과정과 동일하게 실험을 진행하였으며 네트형 사방댐을 설치하지 않은 경우 40%에서 52%의 함수비 범위에서 6가지 조건으로 수행되었고 격자크기가 1.2 cm인 Barrier 1을 설치하여 45%에서 52%의 함수비 범위에서 3가지 조건, 격자크기가 1.5 cm인 Barrier 2를 설치한 후 42%에서 49%의 함수비 범위에서 3가지 조건으로 실험이 수행되었다. 네트형 사방댐을 설치하지 않은 경우와 네트형 사방댐을 설치한 후 각 3회씩 총 36회 실험을 수행하여 실험결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한 함수비 조건, 사방댐 설치 유·무 및 격자크기를 제외한 초기부피(8,600 cm³), 수로 경사(30°) 등의 실험 조건은 동일하게 설정하였다.

Table 2. Experiment Condition

Location	Water content (w, %)	Mesh size of net-type barrier	Location	Water content (w, %)	Mesh size of net-type barrier	channel slope (°)	Initial volume (cm ³)
Mt. Hwang nyeong (H)	60	No barrier (N)	Mt. Umyeon (U)	40	No barrier (N)	30	8,600
				41			
	65			42			
				43			
	70			46			
				52			
	63	Barrier 1 1.2 cm (B1)		45	Barrier 1 1.2 cm (B1)		
	65			46			
	68			52			
	62	Barrer 2 1.5 cm (B2)		42	Barrer 2 1.5 cm (B2)		
	64			46			
	68			49			

4. 결과 및 분석

4.1 수로부 토석류 속도

네트형 사방댐 설치에 따른 각 시료의 실험장비 수로부 토석류 속도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 사방댐을 설치하지 않은 경우를 N (No barrier), 격자크기가 1.2 cm인 네트형 사방댐을 B1 (Barrier 1), 격자크기가 1.5 cm인 네트형 사방댐을 B2 (Barrier 2)라고 정의하였다. 네트형 사방댐을 통과한 직후의 토석류 속도는 토석류 흐름이 네트형 사방댐에 충돌할 때의 충격으로 인해 다소 오차가 발생하므로 앞서 3.2절에 언급 한 바와 같이 각 함수비 조건에서 수행된 3회의 반복실험 결과를 평균하여 산정하였다.

실험 결과 토석류가 네트형 사방댐을 통과한 직후 수로 1.6 m 지점에서 토석류 속도는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. B1을 설치했을 때 토석류 속도는 황령산 시료의 경우 함수비 조건에 따라 최소 35 cm/s에서 최대 61 cm/s, 우면산 시료는 최소 53 cm/s에서 최대 62 cm/s까지 감소하였다. 또한 B2를 설치한 경우 황령산 시료는 최소 19 cm/s에서 최대 31 cm/s, 우면산 시료는 최소 29 cm/s에서 최대 34 cm/s까지 감소하였다. 이와 같이 네트형 사방댐 설치 시

수로부에서 토석류 속도는 각 함수비 조건에서 네트형 사방댐에 의해 속도가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 또한 황령산에 비해 세립분 함유량이 적은 우면산 시료의 네트형 사방댐 통과 직후 속도 감소가 크고 두 시료 모두 B2에 비해 격자크기가 작은 B1을 설치하였을 때 토석류 속도가 더욱 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다.

4.2 유출속도 및 퇴적부피

일반적으로 토석류 실험 시 토석류의 유출속도는 수로 하단부 속도를 통해 산정된다(Prochaska et al., 2008; Eu and Im, 2017). 본 연구에서는 총 2.0 m의 수로부를 0.4 m 간격 다섯 개의 구간으로 나누어 수로부 끝단 마지막 구간의 평균속도를 토석류 유출속도로 정의하였다. Fig. 5에 지반조건 및 네트형 사방댐 격자 크기에 따른 토석류 유출속도와 퇴적부피를 도시하였다. B1을 설치했을 때, 황령산 시료의 경우 함수비 조건에 따라 유출속도의 감소범위는 73 cm/s에서 85 cm/s, 퇴적부피의 감소범위는 1,514 cm³에서 1,656 cm³이다. 우면산 시료는 유출속도의 경우 61 cm/s에서 78 cm/s의 감소범위를 보였으며, 퇴적부피는 1,541 cm³에서 2,227 cm³의 감소범위가 나타났다. 또한, B2를 설치한 경우

Fig. 4. Results of Debris Flow Velocity Along the Channel

Fig. 5. Result of Debris Flow Behavior for Each Sample by Net-Type Barrier

황령산 시료의 유출속도 감소범위는 29 cm/s에서 61 cm/s, 퇴적부피는 287 cm³에서 564 cm³의 감소범위가 나타났으며, 우면산 시료의 경우 유출속도 감소범위는 13 cm/s에서 43 cm/s, 퇴적부피의 감소 범위는 557 cm³에서 790 cm³이다. 이와 같이 네트형 사방댐 설치 시 토석류 유출속도와 퇴적부피는 각 함수비 조건에서 네트형 사방댐에 의해 급격히 감소하는 경향을 보였다. 또한 두 시료 모두 B2에 비해 격자크기가 작은 B1을 설치하였을 때 토석류 유출속도와 퇴적부피가 더욱 크게 감소하였으며, 황령산에 비해 세립분 함유량이 적은 우면산 시료는 유출속도 대비 퇴적부피가 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다. 분석 결과, 네트형 사방댐의 격자크기가 작을수록 토석류 유출속도 및 퇴적부피가 더 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 퇴적부피는 황령산 시료에 비해 세립분 함유량이 적은 우면산 시료에서 더욱 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 함수비가 증가할수록, 격자크기가 커질수록 네트형 사방댐의 성능은 크게 감소하여 사방댐을 설치하지 않은 경우의 유출속도 및 퇴적부피 결과에 점점 수렴하는 것으로 나타났다.

4.3 유출속도 및 퇴적부피 저감률

각 함수비 조건에서의 유출속도 및 퇴적부피 저감률을 Fig. 5에 나타난 실험결과의 회귀선을 이용한 비교분석을 통해 Fig. 6에 막대그래프로 나타내었다. 토석류 거동 저감률은 네트형 사방댐을 설치하지 않은 경우의 토석류 유출속도 및 퇴적부피 결과에 대한 네트형 사방댐 설치 후 토석류 유출속도 및 퇴적부피 감소를 비율로 나타내었다. 설치 후 토석류 저감을 먼저, B1을 설치한 경우 황령산 시료는 함수비 조건에 따라 76%에서 41%로 약 35%, 우면산 시료는 66%에서 35%로 약 31% 유출속도 저감률이 감소하였다. B2를 설치한 경우 황령산 시료는 함수비가 증가함에 따라 유출속도 저감률은 70%에서 15%로 약 55% 감소하였고 우면산 시료는 55%에서 8%로 약 47% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 퇴적부피의 경우 B1을 설치했을 때 황령산 시료는 45%에서 6%로 39% 감소하였고 우면산 시료는 49%에서

27%로 약 22% 감소하였다. B2를 설치한 경우 황령산 시료는 18%에서 3%로 약 15% 퇴적부피 저감률이 감소하였고 우면산 시료는 18%에서 10%로 약 8% 감소하였다.

분석 결과, 각 시료의 지반조건과 네트형 사방댐의 격자 크기에 따른 유출속도 및 퇴적부피 저감률의 감소 경향은 다소 비슷하게 나타났다. 하지만 네트형 사방댐의 격자크기가 커질수록 토석류 유출속도 및 퇴적부피 저감률이 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 유출속도 저감률에 비해 퇴적부피 저감률은 매우 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 세립분 함유량이 많은 황령산 시료는 함수비가 증가함에 따라 우면산 시료에 비해 유출속도 저감률이 급격하게 감소하는 경향을 보였으며, 특히 유출속도 저감률에 비해 함수비 증가에 따른 퇴적부피 저감률은 우면산 시료에 비해 훨씬 낮은 것으로 나타나 세립분 함유량이 적은 우면산 시료에서의 네트형 사방댐 성능이 더 높은 것으로 나타났다.

토석류 발생 시 토석류는 발생 산지 인근의 도심지에 퇴적되면서 막대한 인명 및 재산 피해를 입히게 되며 이때 퇴적부피는 토석류로 인한 피해 정도를 예측할 수 있는 척도로 사용된다(Hübl et al., 2009). 또한, 일반적으로 세립분 함유량이 적은 지역은 세립분 함유량이 많은 지역에 비해 액성한계가 작고 같은 함수비 조건에서 작은 점성과 항복응력을 가지므로 같은 강우에서 세립분 함유량이 적은 지역의 토석류 발생위험이 크다(Kim and Kim, 2020). 본 연구를 통해 네트형 사방댐의 성능은 세립분 함유량 및 네트형 사방댐의 격자 크기에 크게 영향을 받고 네트형 사방댐 설치 시 설치지역의 지반특성을 충분히 고려하여 설계해야 한다는 것을 알 수 있었다. 세립분 함유량이 많은 지역에 비해 세립분 함유량이 적은 지역에서 네트형 사방댐의 성능은 더 높았으며, 격자크기가 증가할수록 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 지반특성을 고려한 합리적인 규모의 네트형 사방댐 설계 및 설치를 통해 경제성 확보함과 동시에 추후 토석류 발생 시 토석류로 인한 피해를 충분히 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

(a) Front velocity - B1 (Barrier 1)

(b) Deposition volume - B1 (Barrier 1)

(c) Front velocity - B2 (Barrier 2)

(d) Deposition volume - B2 (Barrier 2)

Fig. 6. Reduction Ratio of Debris Flow Behavior for Each Sample by Net-Type Barrier

5. 결 론

본 연구에서는 부산 황령산 및 서울 우면산 지역에서 채취한 시료를 이용하여 소형 토석류 실험을 통해 지반 조건 및 격자크기에 따른 네트형 사방댐 설치 전·후 토석류 거동(유출속도 및 퇴적부피)을 분석하여 네트형 사방댐의 성능을 평가하였다.

- (1) 네트형 사방댐 통과 직후 수로부에서 토석류 속도는 급격하게 감소하는 것으로 나타났으며, 황령산 시료에 비해 세립분 함유량이 적은 우면산 시료의 수로부 토석류 속도가 더 크게 감소하였다.
- (2) 황령산과 우면산 두 시료 모두 네트형 사방댐 설치로 인해 각 함수비 조건에서 토석류 유출속도와 퇴적부피는 급격히 감소하였으며, B2에 비해 격자크기가 작은 B1을 설치하였을 때 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 퇴적부피는 지반특성에 따라 세립분 함유량이 적은 우면산 시료가 황령산 시료에 비해 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다.

- (3) 각 시료의 지반조건과 네트형 사방댐의 격자 크기에 따른 유출속도 및 퇴적부피 저감률의 감소 경향은 다소 비슷하게 나타났으나 토석류 유출속도 저감률에 비해 퇴적부피 저감률은 다소 낮게 나타났다.
- (4) 세립분 함유량이 많은 황령산 시료는 함수비가 증가함에 따라 우면산 시료에 비해 유출속도 저감률이 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 특히 유출속도 저감률에 대비 퇴적부피 저감률은 우면산 시료와 비교하였을 때 매우 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (5) 본 연구 결과를 통해, 네트형 사방댐의 성능은 세립분 함유량이 많은 지역에 비해 세립분 함유량이 적은 지역에서 더 높다는 것을 알 수 있었으며, 네트형 사방댐의 격자크기가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 합리적인 규모의 네트형 사방댐 설계를 통해 토석류로 인한 피해를 충분히 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 실내시험을 통해 세립분 함유량 차이에 의한 지반특성에 따른 네트형 사방댐 설치 전·후 토석류 거동을

비교하여 분석한 것으로 집중강우 시 서로 다른 지반특성을 가진 지역에서 네트형 사방댐 설치에 따른 토석류 거동을 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 본 연구에서는 이상적인 수로형태를 가진 장비를 이용하여 실험을 수행하였고 시료의 초기부피, 수로경사 등의 조건을 동일하게 적용하여 실험을 수행하였다. 또한 연구 대상 지역에서 부분적으로 채취한 시료를 사용하였으므로 본 연구의 실험결과를 통해 실제 토석류 거동 및 네트형 사방댐 성능을 예측하기에는 한계가 있다. 그러므로 추후 수치해석적 연구를 통해 실제 산지에서의 토석류 거동을 예측하여 실내 실험 결과와 비교 검증할 필요성이 있다. 또한, 사방댐의 조건(사방댐 종류, 설치위치 등)을 다양하게 설정하고 자갈 및 유목을 포함한 시료를 조성하여 자갈 또는 유목의 크기 및 함유량에 따른 사방댐 성능에 대한 추가 실험을 수행한다면 더욱 세밀한 사방댐 성능 예측·분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- Choi, S.K., Lee, J.M., and Kwon, T.H. (2018). Effect of slit-type barrier on characteristics of water-dominant debris flows: small-scale physical modeling. *Landslides*, Vol. 15, No. 1, pp. 111-122.
- De Haas, T., Braat, L., Leuven, J.R., Lokhorst, I.R., and Kleinhans, M.G. (2015). Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 120, No. 9, pp. 1949-1972.
- Eu, S., and Im, S. (2017). Examining velocity estimation equations of debris flow using small-scaled flume experiments. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 106, No. 4, pp. 424-430.
- Highland, L. (2004). *Landslide types and processes*. USGS Fact Sheet 2004-3072, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA.
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., and Scheidl, C. (2009). Debris flow impact estimation. In C. Popovska, and C. Jovanovski (Eds.), *Eleventh international symposium on water management and hydraulic engineering* (Vol. 1, pp. 137-148).
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., and Hutchinson, J.N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. 7, No. 3, pp. 221-238.
- Hurlimann, M., McArdell, B.W., and Rickli, C. (2015). Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. *Geomorphology*, Vol. 232, pp. 20-32.
- Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G., and Berti, M. (2010). The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 115, No. F3, F03005. doi:10.1029/2009JF001514
- Kim, B.J., Han, K.D., Kim, H.S., Choi, C.E., and Yune, C.Y. (2019). An experimental study on cylindrical countermeasures for dissipation of debris flow energy. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 20, No. 1, pp. 57-65.
- Kim, H.J. (2020). *An experimental study to analyze the behavioral characteristics of debris flow according to the rheological properties of the soil*. Master's thesis, PuKyong National University.
- Kim, H.J., and Kim, Y.T. (2020). Debris flow behavioral characteristic based on rheological properties: a case study on Mt. Hwangnyeong and Mt. Umyeon. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 4, pp. 75-85.
- Kim, J.H., Lee, Y.S., and Park, K.B. (2010). A study on model experiment for evaluation of debris flow's impact force characteristics. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 11, pp. 5-15.
- Lee, K.S., Cho, S.H., Kim, J.H., and Yoo, B.S. (2017). Estimation of debris flow impact forces on mitigation structures using small-scale modelling. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 3, pp. 191-205.
- Ngyuen, V.B.Q., and Kim, Y.T. (2019). Rainfall-earthquake-induced landslide hazard prediction by monte carlo simulation: a case study of MT. Umyeon in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 73-86.
- O'Brien, J.S., and Julien, P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887.
- Pradhan, A.M.S., Lee, S.R., and Kim, Y.T. (2018). A shallow slide prediction model combining rainfall threshold warnings and shallow slide susceptibility in Busan, Korea. *Landslides*, Vol. 16, pp. 647-659.
- Prochaska, A.B., Santi, P.M., Higgins, J.D., and Cannon, S.H. (2008). A study of methods to estimate debris

flow velocity. *Landslides*, Vol. 5, No. 4, pp. 431-444.

Rickenmann, D., Weber, D., and Stepanov, B. (2003). Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In D. Rickenmann, and C. I. Chen (Eds.), *Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment*. Proceedings of the 3th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation (pp. 883-894). Davos, Switzerland.

Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 57-77.

Wendeler, C., McArdeell, B.W., Volkwein, A., Denk, M., and Gröner, E. (2008). Debris flow mitigation with flexible ring net barriers - field tests and case studies. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 60, No. 9, pp. 23-31.

Received	December 9, 2020
Revised	December 11, 2020
Accepted	December 23, 2020