

실내 모형실험을 통한 토석류 퇴적 특성 연구

A Study on the Deposition Characteristics of Debris Flow Using Small-scaled Laboratory Test

장형준¹⁾ · 유국현[†] · 이호진²⁾

Hyungjoon Chang · Kukhyun Ryou · Hojin Lee

Received: December 10th, 2020; Revised: December 16th, 2020; Accepted: January 28th, 2021

ABSTRACT : This study was conducted to understand the deposition characteristics of debris flow and to analyze the reduction effect of debris flow damage by installing a berm. Flume experiments were performed in consideration of various channel slope and volumetric sediment concentration. In order to analyze the reduction effect of debris flow damage by installing a berm, the cases of not installing a berm and the cases of installing a berm were compared. In this study, the runout distance, total travel distance, and mobility ratio were analyzed among the deposition characteristics of debris flow. First, the deposition characteristics of debris flow according to the change of the channel slope were analyzed, and the deposition characteristics of debris flow due to the change of volumetric sediment concentration were analyzed. In addition, the change rate of debris flow deposition characteristics when a berm was installed was calculated based on the case when a berm was not installed. As a result of the experiments, it was confirmed that the channel slope and volumetric sediment concentration had a significant effect on the deposition characteristics of debris flow. In addition, when a berm is installed on the slope, the runout distance and mobility ratio of debris flow are greatly decreased, and the total travel distance is increased. This means that installing a berm delays the movement of debris flow and reduces the potential mobility of debris flow. The results of this study will provide useful information for understanding the deposition characteristics of debris flow. Furthermore, it is expected to help in the design of a berm.

Keywords : Berm, Reduction effect, Volumetric sediment concentration, Mobility ratio

요지 : 본 연구는 토석류의 퇴적 특성을 파악하고 소단을 설치함에 따른 토석류 피해의 저감효과를 분석하기 위해 수행되었다. 다양한 수로경사 및 토사체적농도를 고려하여 수로실험을 수행하였으며, 소단 설치에 따른 토석류 피해의 저감효과를 분석하기 위해 소단을 설치하지 않은 경우와 소단을 설치한 경우를 비교하였다. 본 연구에서는 토석류의 퇴적 특성 중 도달거리, 총 이동거리 및 이동비에 대한 분석을 진행하였다. 먼저 수로경사 변화에 따른 토석류의 퇴적 특성을 분석하였고, 토사체적농도 변화에 따른 토석류의 퇴적 특성을 분석하였다. 또한, 소단을 설치하지 않은 경우를 기준으로 소단을 설치한 경우의 퇴적 특성 변화율을 산정하였다. 실험결과, 수로경사와 토사체적농도가 토석류의 퇴적 특성에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 사면에 소단을 설치할 경우 토석류의 도달거리와 이동비가 크게 감소하였으며, 총 이동거리가 증가하였다. 이는 소단을 설치하는 것이 토석류의 이동을 지연시키고, 토석류의 잠재적인 이동성을 감소시키는 것을 의미한다. 본 연구의 결과는 토석류의 퇴적 특성을 이해하는 데 유용한 정보를 제공할 것이며, 나아가 소단의 설계에 도움을 줄 것으로 기대된다.

주요어 : 소단, 저감효과, 토사체적농도, 이동비

1. 서론

최근 이상기후로 인하여 전 세계적인 지구 온난화 현상이 발생함에 따라 집중호우, 폭염, 가뭄 등의 발생빈도가 증가하여 많은 자연재해가 일어나고 있다. 국내에서도 기후변화에 따른 자연재해가 빈번히 발생하고 있으며, 이들의 한 종류인 산지토사재해의 발생량이 증가하고 있다. 산지토사재해는 산사태 피해와 토석류 피해로 구분할 수 있으며, 토

석류는 최근 국내에서 발생하는 산지토사재해의 대부분을 차지하고 있다(이창우, 2014). 토석류는 다양한 입경의 입자와 물의 혼합물로, 중력의 영향을 받아 하류로 이동하며 인적·물적 피해를 초래할 수 있는 재해이다.

집중호우의 발생빈도와 강우강도의 증가는 토석류의 발생량과 피해규모에 직접적인 영향을 미친다(국토교통부, 2016). 토석류는 불규칙적으로 발생하기 때문에 예측이나 대응이 어렵고(Archetti & Lamberti, 2003; Proske et al., 2011), 짧

1) Post doctor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

† Researcher, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : rgh0126@naver.com)

2) Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

은 시간 동안 많은 양의 물과 토사를 이동시킬 수 있어 작은 규모라도 상당한 인명 및 재산피해를 발생시킬 수 있다(D'Agostino et al., 2010). 따라서 토석류 피해를 예측, 대응 및 저감하기 위해 방호대책의 수립이 필요하다.

토석류 피해를 저감시키기 위한 방호대책으로는 구조적 대책과 비구조적 대책이 있다(Proske et al., 2011). 구조적 대책에는 사방댐, 링네트 및 소단 설치 등이 있으며, 비구조적 대책으로는 토석류 피해에 대한 위험 예·경보가 있다(You, 2006; 이창우, 2014). 국내에서는 매년 발생하는 토석류 피해를 줄이기 위해 주로 사방댐을 시공하고 있다(Kim et al., 2009). 사방댐을 비롯한 토석류 대책구조물의 시공은 증가하고 있지만, 토석류 대책구조물에 대한 설계기준과 토석류 거동 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다(Kim et al., 2009; Eu, 2016).

효과적인 토석류 대책구조물 설계를 위해서는 토석류의 잠재적인 발생량, 충격력, 유속, 침투유량, 총 이동거리, 도달거리, 이동비 등 주요 매개변수를 산정하여야 한다(Rickenmann, 1999; Proske et al., 2011). 특히 토석류의 도달거리와 총 이동거리는 토석류 피해를 분석하는 데 직접적인 영향을 주고, 이동비는 토석류의 잠재적인 이동성을 파악하는데 중요한 퇴적 특성이다(D'Agostino et al., 2010). 국외에서는 토석류의 퇴적 특성에 관한 연구(Iverson, 1997; D'Agostino et al., 2010; Johnson et al., 2012; de Haas et al., 2015)가 활발히 진행되어 하류부에서의 토석류 퇴적과정을 비교적 정확하게 추정하고 있지만, 국내의 토석류 퇴적 특성 관련 연구는 미진한 실정이다.

토석류 피해를 저감하고 토석류의 거동 특성을 이해하기 위하여 토석류 대책구조물을 고려한 많은 연구가 발표되고 있다. Wendeler et al.(2019)은 실내실험과 현장 실규모 실험을 통해 링네트에 대한 토석류의 하중 모형을 개발하였다. Hu et al.(2020)은 모형실험을 통해 토석류가 모형 사방댐 및 슬릿 댐에 미치는 충격과정을 분석하였으며, 슬릿의 크기가 충격 하중에 미치는 영향을 분석하였다. Tan et al.(2020)은 링네트 구조물의 성능을 연구하고, 링네트 구조물의 적절한 설계방법을 제안하기 위해 실규모의 링네트를 사용하여 실험을 수행하였다.

또한, 토석류 피해를 저감하기 위하여 최근 여러 연구자들이 소단 또는 계단식 수로에 관한 연구를 발표하고 있다. Kim et al.(2013)은 유한차분법을 적용해 수치모의를 수행하여 소단의 길이 변화에 따른 하류부에서의 토석류 거동 및 메커니즘을 분석하였으며, Kurovskaia et al.(2019)은 토석류 영상자료를 분석하여 계단식 수로의 하류부에 위치한 오스트리아 Firgen 지역에서의 토석류 피해를 분석하였다.

Li et al.(2020)은 현장관측과 수로실험을 수행하여 계단식 수로에서의 토석류 침식 특성을 분석하였다.

본 연구에서는 수로경사, 토사체적농도 및 소단의 설치 유·무에 따른 토석류의 퇴적 특성을 분석하기 위하여 실내 모형실험을 수행한 후, 토석류의 도달거리, 총 이동거리, 이동비 등에 관한 결과를 분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 토석류의 퇴적 특성

Iverson(1997)과 Takahashi(2014)는 토석류가 질량이동의 일종이며, 중력의 영향을 받아 하류로 이동하며 이동경로상의 토사, 물 및 하상재료를 침식시켜 흐름의 규모를 증대시키는 동적 현상이라 정의하였다. Takahashi(2014)는 토석류가 토사와 물의 혼합물이기 때문에 점성을 직접적으로 측정하기 어렵다고 하였으며, 토사체적농도의 개념을 이용해 점성을 간접적으로 추정하였다. 토사체적농도는 토석류의 총 체적에 대한 토사 체적의 비를 의미한다.

Fig. 1은 본 연구에서 토석류의 자료분석에 필요한 주요 매개변수를 나타내고 있다. 여기서 R 은 도달거리, L 은 총 이동거리, H 는 낙차, α 는 수로경사, β 는 마찰 에너지선의 평균경사를 의미한다. 도달거리는 토석류의 퇴적 시점에서 퇴적 종점까지의 거리를 의미하며, 총 이동거리는 토석류의 발생지점에서 퇴적 종점까지의 수평거리를 의미한다.

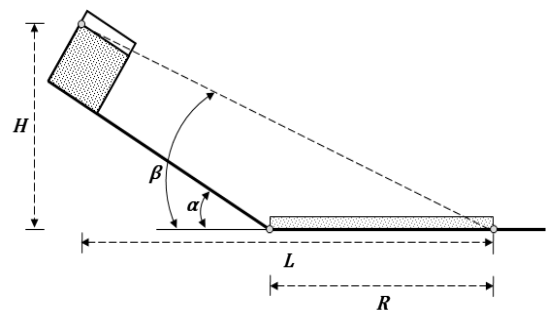


Fig. 1. Schematic diagram of main parameters for data analysis in flume experiments

2.2 토석류 실험장치의 구성

본 연구에서 활용한 토석류 모형실험 장치는 Fig. 2와 같으며, 실내 모형실험장치 및 실험실 환경 제약조건으로 인하여 소단의 길이 및 설치 위치에 관한 다양한 실험조건을 구성하는 데 한계성을 내포하고 있다. Fig. 2(a)는 소단을 설치하지 않은 경우의 실험장치를 나타내며, Fig. 2(b)는 소

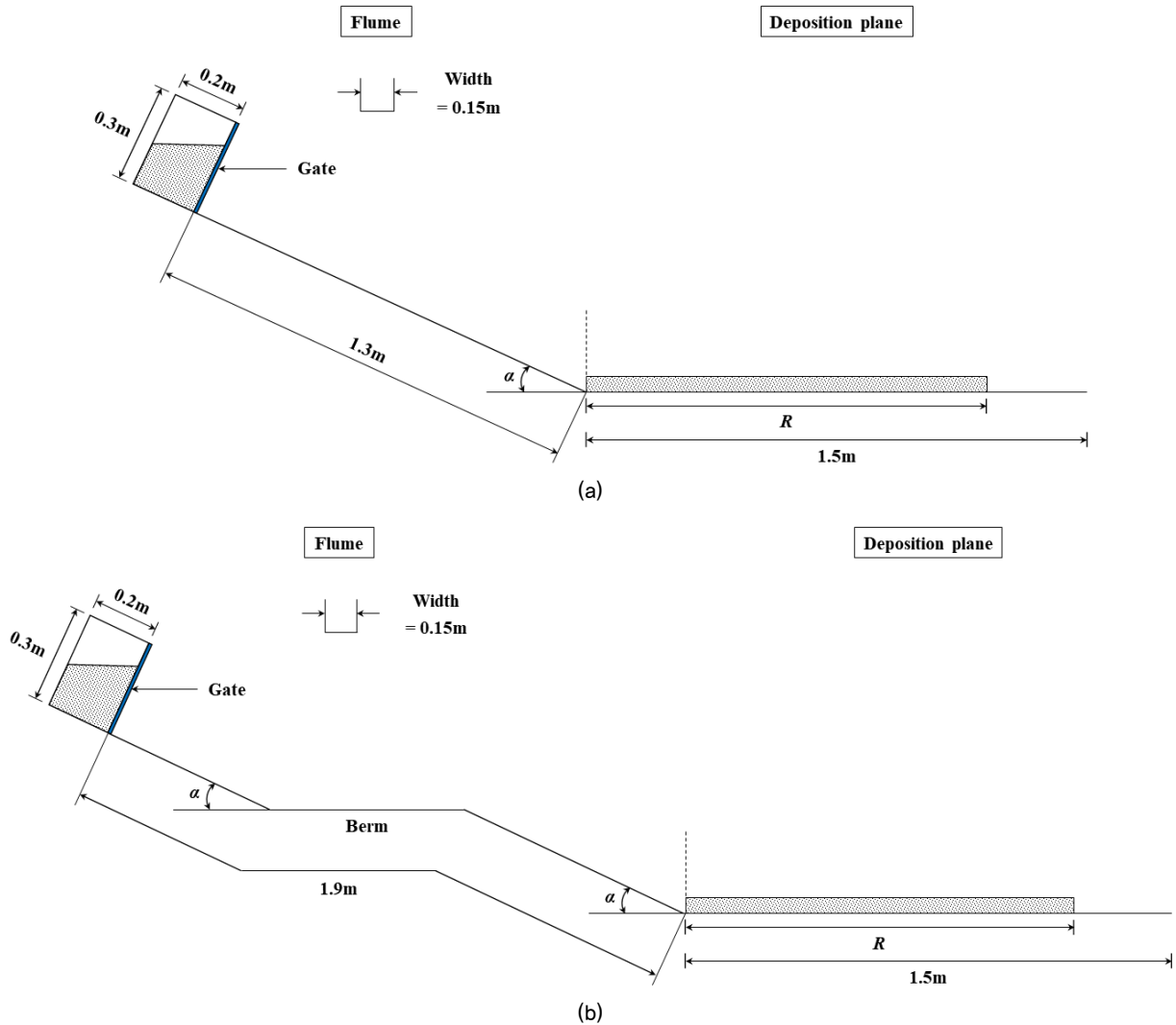


Fig. 2. Schematic diagram of experimental devices used in this study. (a) Dynamic test without berm, (b) Dynamic test with berm

단을 설치한 경우의 실험장치를 나타낸다. 실험수로는 실험 유형에 따라 길이 1.3~1.9m, 폭 0.15m, 높이 0.3m로 구성하였다. Kim et al.(2013)의 연구에 착안하여 상류부 수로와 하류부 수로 사이에 소단의 설치를 고려할 수 있도록 각각의 실험장치를 분리가 가능하도록 제작하였다. 본 연구에서 사용한 소단의 길이는 0.6m이며, 폭은 상류부 수로 및 하류부 수로와 동일한 0.15m이다. 실험장치는 토석류의 강한 침식성을 고려하여 강철로 제작하였으며, 토석류의 퇴적 특성을 분석하기 위해 퇴적판에 가로, 세로 5cm 크기의 격자를 조성하였다.

2.3 토석류 실험조건의 구성

본 연구에서는 기 진행된 연구(D'Agostino et al., 2010; Fairfield, 2011; de Haas et al., 2015; Lee et al., 2015; Eu, 2016)를 참고하여 실험조건을 구성하였다. 실험조건은 실험유형, 수로경사 및 토사체적농도를 고려하여 구성하였다

Table 1. Experimental cases conducted in this study

Test type	Dynamic test without berm				Dynamic test with berm			
	10	15	20	25	10	15	20	25
Channel slope (°)	40	40	40	40	40	40	40	40
Volumetric sediment concentration (%)	50	50	50	50	50	50	50	50
	60	60	60	60	60	60	60	60

(Table 1). 실험유형은 상류부 수로와 하류부 수로 사이에 소단을 설치하지 않은 경우와 소단을 설치한 경우로 구성하였다. 수로경사는 10°~25°의 범위로 구성하였으며, 5°도 단위로 조절하였다. 토석류 혼합시료의 토사체적농도는 40%~60%의 범위로 구성하였고 10% 단위로 조절하였다. 총 24개의 실험조건을 고려하였으며, 실험결과의 정도를 높이고자 각각의 실험조건에 대하여 5회씩 실험을 수행하였다.

또한, 특정 토석류가 아닌 일반적인 토석류에 대한 모형 실험을 진행하였기 때문에 본 연구와 실험규모가 유사한 연

구(Fairfield, 2011; Kwon, 2013)를 참고하여 혼합시료를 구성하였다. 혼합시료는 주로 모래와 자갈로 구성되며, 체분석을 통해 분석한 입경별 토사의 중량비는 Table 2와 같이 나타났다. Fig. 3은 혼합시료의 입도분포곡선을 나타내며, Table 3은 토사체적농도에 따른 혼합시료의 구성재료별 중량을 나타내고 있다. 여기서 C_V 는 토사체적농도, ρ 는 혼합시료의 밀도를 의미한다. 모형실험에 활용한 혼합시료의 부피는 $4,500\text{cm}^3$ 이며, 혼합시료의 밀도는 토사체적농도에 따라 $1.578\sim 1.867\text{g/cm}^3$ 의 범위를 보였다.

Table 2. Weight ratio of sediment by particle size

Particle size (mm)	Weight ratio (%)
4.750-9.500	25.0
2.000-4.750	25.0
0.850-2.000	10.7
0.425-0.850	20.6
0.250-0.425	13.6
0.150-0.250	3.6
0.075-0.150	1.0
< 0.075	0.5

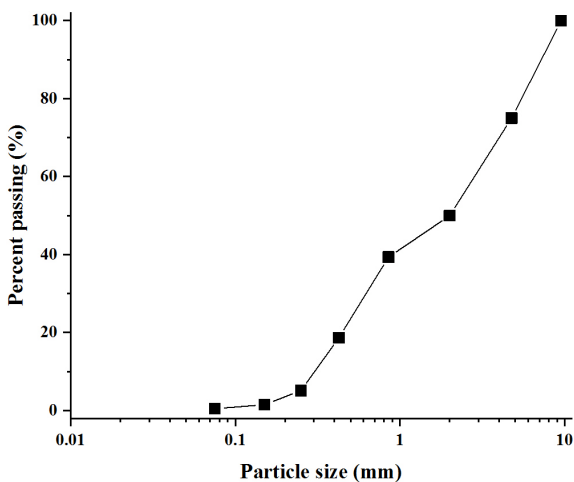


Fig. 3. Grain-size distribution curve of the mixed sample

Table 3. Composition of the mixed sample by volumetric sediment concentration

C_V	Sediment (g)			Water (g)	ρ (gcm^{-3})
	< 2mm	2-5mm	5-10mm		
0.40	2,200	1,100	1,100	2,700	1.578
0.50	2,750	1,375	1,375	2,250	1.722
0.60	3,300	1,650	1,650	1,800	1.867

2.4 실험방법

Fig. 4는 본 연구에서 수행한 토석류 모형실험의 모식도를 나타내고 있다. 먼저 실험조건에 적합한 혼합시료를 구

성하여 시료통에 조성한 후, 시료통의 분리벽을 제거하여 토석류를 수로에 공급하게 되며, 토석류의 퇴적 특성을 관측하였다. 또한, 소단을 설치하지 않은 경우와 소단을 설치한 경우의 퇴적 특성을 비교·분석하였다.

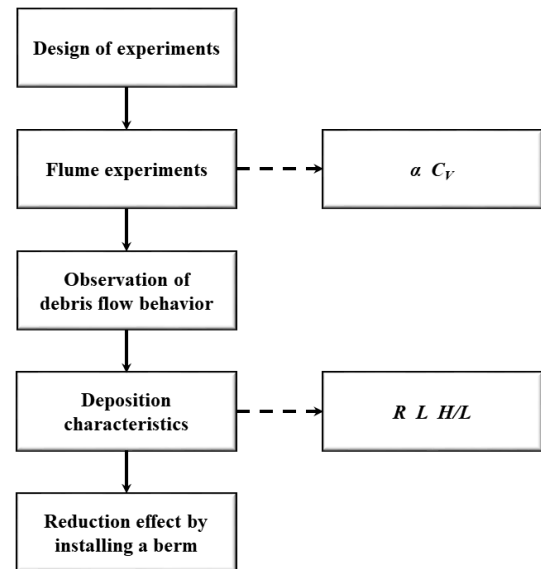


Fig. 4. Flow chart of laboratory tests

3. 실험결과 및 분석

토석류 모형실험을 통하여 각각의 실험조건에 대한 토석류의 도달거리, 총 이동거리 및 이동비를 산정하였으며, 관측결과를 Table 4와 같이 나타냈다. 여기서 N 은 실험번호, H/L 은 이동비를 의미한다. 소단을 설치하지 않은 경우, 모든 실험조건에서 토석류가 퇴적판에 도달하였다. 하지만 소단을 설치한 경우, 수로경사가 15° 이하이고 토사체적농도가 0.60일 때 토석류가 수로상에 퇴적되었다. Costa(1984)와 Jun et al.(2012)이 언급한 토석류의 퇴적 발생경사 15° 가 실내 모형실험에도 상당한 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.1 토석류의 도달거리

Fig. 5는 실내 모형실험을 통하여 관측된 토석류의 도달거리 및 소단 설치에 따른 도달거리의 감소율을 수로경사 및 토사체적농도의 변화에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)는 수로경사의 변화에 따른 토석류의 도달거리를 나타내고 있다. 토사체적농도가 0.40, 0.50인 경우에는 소단의 설치와 관계없이 수로경사가 증가할 때 도달거리의 증가폭이 유사하게 나타나지만, 토사체적농도가 0.60인 경우에는 수로경사 증가에 따른 도달거리의 증가폭이 감소하

Table 4. Observed data from the flume tests

Test	<i>N</i>	α (°)	β (°)	C_r	<i>R</i> (m)	<i>L</i> (m)	<i>H</i> (m)	<i>H/L</i>
Dynamic test without berm	1	10	9.03	0.40	1.005	2.459	0.391	0.159
	2	10	10.10	0.50	0.740	2.194	0.391	0.178
	3	10	12.38	0.60	0.326	1.780	0.391	0.220
	4	15	10.92	0.40	1.213	2.630	0.507	0.193
	5	15	12.23	0.50	0.922	2.339	0.507	0.217
	6	15	16.05	0.60	0.346	1.763	0.507	0.288
	7	20	13.11	0.40	1.290	2.661	0.620	0.233
	8	20	14.38	0.50	1.046	2.417	0.620	0.256
	9	20	19.35	0.60	0.394	1.765	0.620	0.351
	10	25	14.88	0.40	1.423	2.739	0.728	0.266
	11	25	16.68	0.50	1.113	2.429	0.728	0.300
	12	25	21.83	0.60	0.501	1.817	0.728	0.400
Dynamic test with berm	13	10	7.66	0.40	0.853	2.907	0.391	0.134
	14	10	9.44	0.50	0.295	2.349	0.391	0.166
	15	10	-	0.60	-	-	-	-
	16	15	9.69	0.40	0.952	2.969	0.507	0.171
	17	15	11.03	0.50	0.585	2.602	0.507	0.195
	18	15	-	0.60	-	-	-	-
	19	20	11.35	0.40	1.118	3.089	0.620	0.201
	20	20	13.33	0.50	0.646	2.617	0.620	0.237
	21	20	16.74	0.60	0.090	2.061	0.620	0.301
	22	25	12.97	0.40	1.243	3.159	0.728	0.230
	23	25	15.37	0.50	0.731	2.647	0.728	0.275
	24	25	19.19	0.60	0.175	2.091	0.728	0.348

였다.

Fig. 5(b)는 소단을 설치하지 않은 경우 토사체적농도의 변화에 따른 토석류의 도달거리를 나타내고 있다. 수로경사가 15°, 20°, 25°인 경우에는 토사체적농도가 증가할 때 도달거리의 감소폭이 유사하게 나타나지만, 수로경사가 10°인 경우에는 토사체적농도 증가에 따른 도달거리의 감소폭이 크게 감소하였다.

Fig. 5(c)는 소단을 설치한 경우 토사체적농도의 변화에 따른 토석류의 도달거리를 나타내고 있다. 수로경사가 20°, 25°인 경우에는 토사체적농도 증가에 따른 도달거리의 감소폭이 유사하게 나타났으며, 수로경사가 15° 이하인 경우에는 토사체적농도가 0.60일 때 토석류가 수로상에 퇴적되었다. 수로경사 15°를 기준으로 토사체적농도 변화에 따른 도달거리의 양상이 변하는 것을 확인하였다.

Fig. 5(d)는 소단 설치에 따른 수로경사별 토석류 도달거리의 감소율을 나타내고, Fig. 5(e)는 소단 설치에 따른 토사체적농도별 토석류 도달거리의 감소율을 나타낸다. 소단 설치에 따른 토석류 도달거리의 평균 감소율은 토사체적농도가 0.40, 0.50, 0.60일 때 15.7%, 42.3%, 71.1%로 나타났으며, 수로경사가 10°, 15°, 20°, 25°일 때 37.6%, 29.0%,

42.9%, 37.3%로 나타났다. 즉, 토석류의 토사체적농도가 높을수록 소단 설치에 따른 도달거리의 평균 감소율이 증가하는 것을 확인하였다. 소단을 설치할 경우, 토석류의 도달거리가 12.7%~77.2% 범위에서 감소하였다.

3.2 토석류의 총 이동거리

Fig. 6은 실내 모형실험을 통하여 관측된 토석류의 총 이동거리 및 소단 설치에 따른 총 이동거리 증가율을 수로경사 및 토사체적농도의 변화에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)는 수로경사의 변화에 따른 토석류의 총 이동거리를 나타내고 있다. 토사체적농도가 0.40, 0.50인 경우에는 소단의 설치와 관계없이 수로경사가 증가할 때 총 이동거리의 증가폭이 유사하게 나타나지만, 토사체적농도가 0.60인 경우에는 수로경사 증가에 따른 총 이동거리의 양상이 다르게 나타났다.

Fig. 6(b)는 소단을 설치하지 않은 경우 토사체적농도의 변화에 따른 토석류의 총 이동거리를 나타내고 있다. 수로경사가 15°, 20°, 25°인 경우에는 토사체적농도가 증가함에 따른 총 이동거리의 감소폭이 유사하게 나타나지만, 수로경사가 10°인 경우에는 토사체적농도 증가에 따른 총 이동거

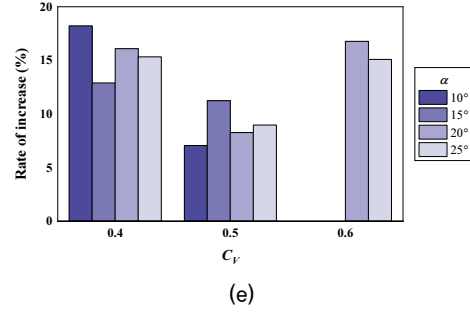
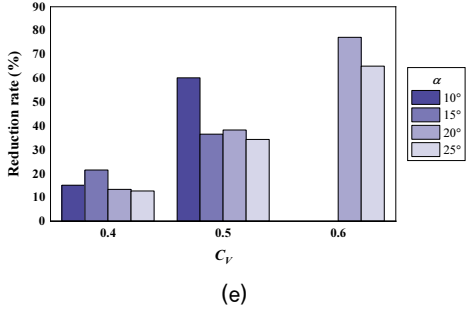
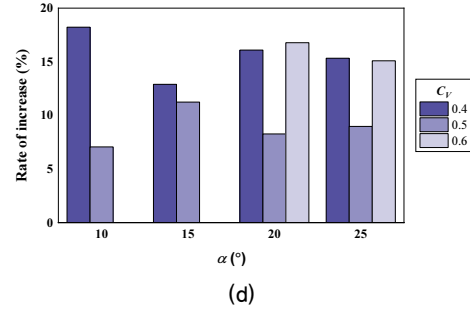
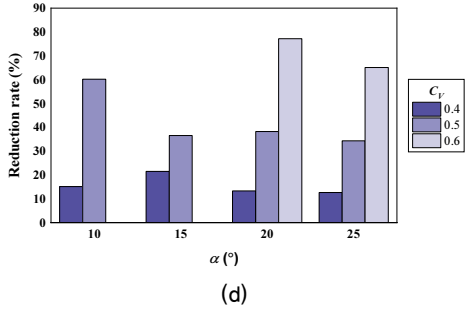
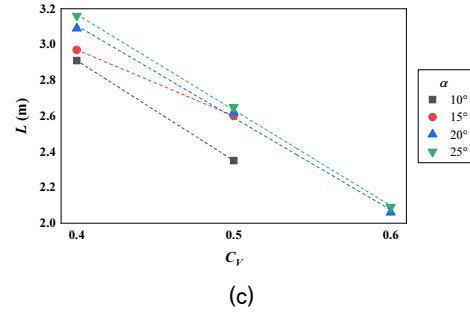
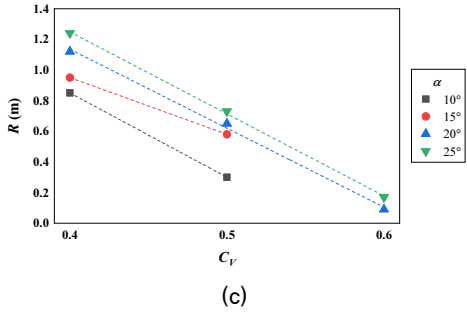
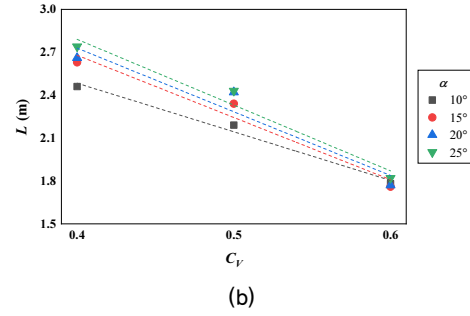
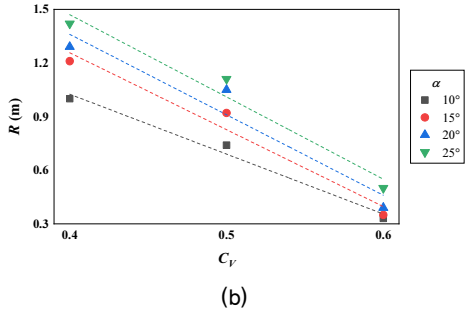
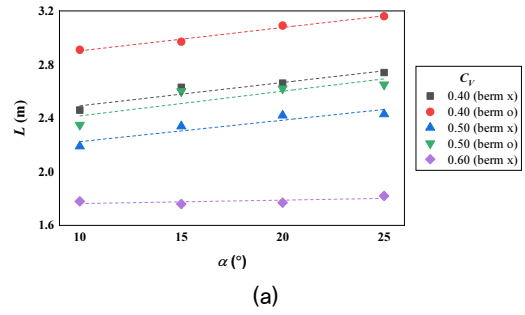
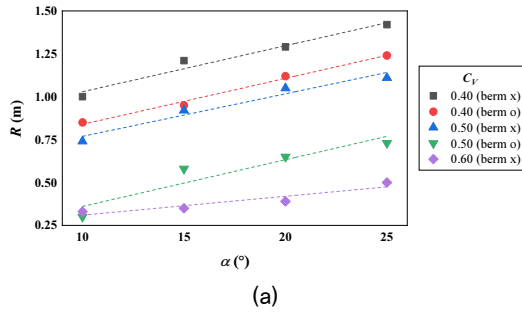


Fig. 5. Runout distance and reduction rate of runout distance. (a) Runout distance according to channel slope, (b) Runout distance according to volumetric concentration in dynamic test without berm, (c) Runout distance according to volumetric concentration in dynamic test with berm, (d) Reduction rate of runout distance according to channel slope, (e) Reduction rate of runout distance according to volumetric concentration

Fig. 6. Total travel distance and increase rate of total travel distance. (a) Total travel distance according to channel slope, (b) Total travel distance according to volumetric concentration in dynamic test without berm, (c) Total travel distance according to volumetric concentration in dynamic test with berm, (d) Increase rate of total travel distance according to channel slope, (e) Increase rate of total travel distance according to volumetric concentration

리의 감소폭이 비교적 작게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 6(c)는 소단을 설치한 경우 토사체적농도의 변화에 따른 토석류의 총 이동거리를 나타내고 있다. 수로경사가 20°, 25°인 경우에 토사체적농도 증가에 따른 총 이동거리의 감소폭이 유사하게 나타났으며, 수로경사가 15° 이하이면 토사체적농도가 0.60일 때 토석류가 수로상에 퇴적되었다. 도달거리와 마찬가지로 수로경사 15°를 기준으로 토사체적농도 변화에 따른 총 이동거리의 양상이 변하는 것을 확인하였다.

Fig. 6(d)는 소단 설치에 따른 수로경사별 토석류 총 이동거리의 증가율을 나타내고, Fig. 6(e)는 소단 설치에 따른 토사체적농도별 토석류 총 이동거리의 증가율을 나타낸다. 소단 설치에 따른 토석류 총 이동거리의 평균 증가율은 토사체적농도가 0.40, 0.50, 0.60일 때 15.6%, 8.9%, 15.9%로 나타났으며, 수로경사가 10°, 15°, 20°, 25°일 때 12.6%, 12.1%, 13.7%, 13.1%로 나타났다. 토사체적농도가 0.50일 때 소단 설치에 따른 총 이동거리의 평균 증가율이 가장 낮게 나타났다. 소단을 설치할 경우, 토석류의 총 이동거리가 7.1%~18.2% 범위에서 증가하였다.

3.3 토석류의 이동비

Fig. 7은 실내 모형실험을 통하여 관측된 토석류의 이동비 및 소단 설치에 따른 이동비의 감소율을 수로경사 및 토사체적농도의 변화에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)는 수로경사의 변화에 따른 토석류의 이동비를 나타내고 있다. 토사체적농도가 0.40, 0.50인 경우에는 소단의 설치와 관계없이 수로경사가 증가할 때 이동비의 증가폭이 유사하게 나타나지만, 토사체적농도가 0.60인 경우에는 수로경사 증가에 따른 이동비의 증가폭이 크게 상승하였다. 토사체적농도가 0.60인 경우, 수로경사가 25°일 때의 이동비가 수로경사가 10°일 때의 이동비보다 1.8배 이상 크게 나타났다.

Fig. 7(b)는 소단을 설치하지 않은 경우 토사체적농도의 변화에 따른 토석류의 이동비를 나타내고 있다. 토사체적농도가 증가함에 따라 토석류의 이동비가 증가하는 것을 확인하였으며, 수로경사가 10°인 경우에 이동비 증가율이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 7(c)는 소단을 설치한 경우 토사체적농도의 변화에 따른 토석류의 이동비를 나타내고 있다. 수로경사가 20°, 25°인 경우에 토사체적농도 증가에 따른 이동비 증가율이 유사하게 나타났으며, 수로경사가 15° 이하이면 토사체적농도가 0.60일 때 토석류가 수로상에 퇴적되었다. 도달거리 및 총 이동거리와 마찬가지로 수로경사 15°를 기준으로 토

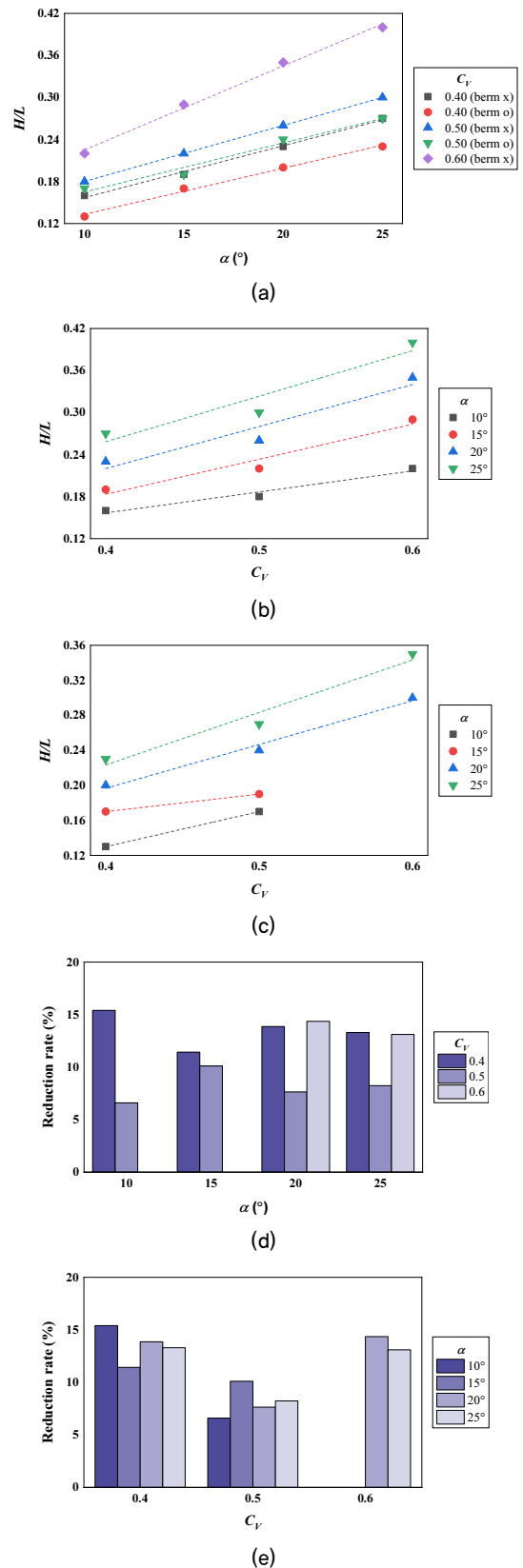


Fig. 7. Mobility ratio and reduction rate of mobility ratio. (a) Mobility ratio according to channel slope, (b) Mobility ratio according to volumetric concentration in dynamic test without berm, (c) Mobility ratio according to volumetric concentration in dynamic test with berm, (d) Reduction rate of mobility ratio according to channel slope, (e) Reduction rate of mobility ratio according to volumetric concentration

사체적농도 변화에 따른 이동비의 양상이 변화하였다.

Fig. 7(d)는 소단 설치에 따른 수로경사별 토석류 이동비의 감소율을 나타내고, Fig. 7(e)는 소단 설치에 따른 토사체적농도별 토석류 이동비의 감소율을 나타낸다. 소단 설치에 따른 토석류 이동비의 평균 감소율은 토사체적농도가 0.40, 0.50, 0.60일 때 13.5%, 8.1%, 13.7%로 나타났으며, 수로경사가 10°, 15°, 20°, 25°일 때 11.0%, 10.8%, 12.0%, 11.5%로 나타났다. 토사체적농도가 0.50일 때 소단 설치에 따른 이동비의 평균 감소율이 가장 낮은 것을 확인하였다. 소단을 설치할 경우, 토석류의 이동비가 6.6%~15.4% 범위에서 감소하였다.

4. 결 론

최근 기후변화의 영향으로 국지적으로 발생하는 극한 호우 사상은 국토의 65.2%가 산지인 우리나라에서 많은 양의 토석류를 발생시켜 상당한 피해를 야기하고 있다. 토석류에 의한 위험을 대비하기 위해서는 토석류 방호대책의 수립이 필요하며, 효과적인 토석류 방호대책을 수립하기 위해서는 토석류의 잠재적인 발생량, 충격력, 유속, 침두유량, 도달거리, 총 이동거리, 이동비 등 주요 매개변수를 산정하여야 한다. 본 연구에서는 수로경사, 토사체적농도 및 소단 설치 유·무에 따른 토석류의 퇴적 특성을 분석하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였다.

- (1) 실내 모형실험을 통하여 수로경사가 토석류의 도달거리, 총 이동거리, 이동비를 강하게 지배하는 것을 확인하였다. 수로경사가 증가할수록 토석류의 운동량 또한 증가하여 도달거리, 총 이동거리 및 이동비가 증가하였다. 또한, 소단을 설치한 경우 토석류의 퇴적 발생경사인 15°를 기준으로 토석류가 수로상에 퇴적되거나 토석류 퇴적 특성의 양상이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 소단을 설치하지 않은 경우에는 수로경사 10°를 기준으로 토석류 퇴적 특성의 양상이 다르게 나타났다. 토석류의 퇴적 발생경사로 알려진 15°가 실내 모형실험에서의 토석류 퇴적 특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 토사체적농도가 증가할수록 토석류의 점성이 증가하여 토석류의 도달거리와 총 이동거리가 감소하고 이동비가 증가하였다. 또한, 소단을 설치한 실험에서 수로경사가 15° 이하일 때 토석류의 토사체적농도가 0.60이 되면 토석류가 수로상에 퇴적되었다. 소단을 설치하지 않은 경

우에는 토사체적농도 0.60을 기준으로 토석류 퇴적 특성의 양상이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 고점성 시료일수록 전단저항과 기저마찰이 증가해 유동에 방해 받기 때문에 토석류의 운동량이 감소하여 퇴적 특성의 양상이 달라진 것으로 판단된다.

- (3) 사면에 소단을 설치한 경우, 토석류의 도달거리와 이동비가 최대 77.2%, 15.4%씩 감소하였으며, 총 이동거리가 최대 18.2% 증가하였다. 즉, 소단을 설치함에 따라 퇴적부에서의 토석류 확산거리를 나타내는 도달거리와 토석류의 잠재적인 이동성을 나타내는 이동비가 상당히 감소하였다. 또한, 총 이동거리가 증가하여 토석류 이동이 지연되는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 수로경사 및 토사체적농도 변화에 따른 토석류의 퇴적 특성을 파악하는 데 유용한 정보를 제공하며, 토석류 방호대책의 한 종류인 소단이 토석류의 퇴적 특성에 미치는 영향에 대한 정보를 제공한다. 향후 연구에서 소단의 폭과 위치를 다양하게 고려한다면, 소단 설치에 따른 토석류 피해의 저감효과를 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C141846-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. 국토교통부 (2016), 수자원장기종합계획 (2001~2020): 제 3차 수정계획, 국토교통부.
2. 이창우 (2014), 산지토사재해 방재시스템 개발 및 활용, 국립산림과학원.
3. Archetti, R. and Lamberti, A. (2003), Assessment of risk due to debris flow events, *Natural Hazards Review*, Vol. 4, No. 3, pp. 115~125.
4. Costa, J. E. (1984), Physical geomorphology of debris flows, developments and applications of geomorphology, Costa, J. E. and Fleisher, P. J., eds., Springer, Berlin, pp. 268~317.
5. D'Agostino, V., Cesca, M. and Marchi, L. (2010), Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps), *Geomorphology*, Vol. 115, No. 3, pp. 294~304.
6. de Haas, T., Braat, L., Leuven, J. R. F. W., 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.
7. Eu, S. (2016), Analysis of debris flow behavior with flume experiments, Master's thesis, Seoul National University (In Korean).
 8. Fairfield, G. (2011), Assessing the dynamic influences of slope angle and sediment composition on debris flow behaviour: An experimental approach, Master's thesis, Durham University.
 9. Hu, H., Zhou, G. G. D., Song, D., Cui, K. F. E., Huang, Y., Choi, C. E. and Chen, H. (2020), Effect of slit size on the impact load against debris-flow mitigation dams, *Engineering Geology*, Vol. 274, No. 5, pp. 105764.
 10. Iverson, R. M. (1997), The physics of debris flows, *Reviews of Geophysics*, Vol. 35, No. 3, pp. 245~296.
 11. Johnson, C. G., Kokelaar, B. P., Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G. and Gray, J. M. N. T. (2012), Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 117, No. F1, pp. 1~23.
 12. Jun, B. H., Jun, K. W. and Jang, C. D. (2012), A study on development of debris flow experimental equipment for mountainous disaster, *Crisisonomy*, Vol. 8, No. 3, pp. 137~146 (In Korean).
 13. Kim, J. H., Lee, Y. S., Cho, G. T. and Choi, W. H. (2009), Model experiment for calculation of debris flow's shock force (Use dry materials), *Proceedings of International Symposium on Urban Geotechnics*, Korean Geotechnical Society, pp. 1271~1274 (In Korean).
 14. Kim, S. D., Oh, S. W. and Lee, H. J. (2013), The study of relationship between berm width and debris flow at the slope, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 5~12 (In Korean).
 15. Kurovskaia, V. A., Sokolova, D. P., Ostashov, A. A. and Vinogradova, T. A. (2019), Comparison of debris flow characteristics obtained by using video materials and modeling, *Open Journal of Geology*, Vol. 9, No. 2, pp. 75~88.
 16. Kwon, J. h. (2013), Model experimental study with consideration for grain composition of debris flows in Korea, Master's thesis, Seokyeong University (In Korean).
 17. Lee, H. J., Kim, S. D., Jun, K. W. and Lee, M. S. (2015), The modeling of debris flow disaster according to the location of berm, *Crisisonomy*, Vol. 11, No. 9, pp. 105~118 (In Korean).
 18. Li, P., Wang, J., Hu, K. and Wang, F. (2020), Experimental study of debris-flow entrainment over stepped-gradient beds incorporating bed sediment porosity, *Engineering Geology*, Vol. 274, No. 5, pp. 105708.
 19. Proske, D., Suda, J. and Hübl, J. (2011), Debris flow impact estimation for breakers, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol. 5, No. 2, pp. 143~155.
 20. Rickenmann, D. (1999), Empirical relationships for debris flows, *Natural Hazards*, Vol. 19, pp. 47~77.
 21. Takahashi, T. (2014), *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*, 2nd edition, CRC Press, Leiden.
 22. Tan, D., Yin, J., Qin, J., Zhu, Z. and Feng, W. (2020), Experimental study on impact and deposition behaviours of multiple surges of channelized debris flow on a flexible barrier, *Landslides*, Vol. 17, No. 10, pp. 1577~1589.
 23. Wendeler, C., Volkwein, A., McArdeell, B. W. and Bartelt, P. (2019), Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 56, No. 6, pp. 893~910.
 24. You, B. O., Song, P. H. and Jung, C. G. (2006), Case study on debris flows during heavy rain in Inje, Yangyang and Pyeongchang Areas during 15~17, July, 2006, *Korean Geotechnical Society Fall Conference*, Korean Geotechnical Society, pp. 615~625 (In Korean).