토석류의 이동시간 및 확산범위 분석을 위한 실험적 연구

Study for Analyzing Travel Time and Runout Distance of the Debris Flow

전상현* · 최준식** · 권혁재*** · 박병수****

Jun, Sanghyun* · Choi, Joonsik** · Kwon, Hyukjae***, and Park, Byungsoo****

Abstract

In this study, model experiments in laboratory were performed to analyze the behavior of debris flow that included the travel time and deposit area according to the change in topographic conditions and rainfall intensity. According to the experimental results, the travel time at failure initiation was shortened owing to the increased channel slope and rainfall intensity. Similarly, runout distance of the debris flow increased when the length of slope and thickness of the soil increased. Further, deposit area of the debris flow was increased as the channel slope, length of slope, and thickness of soil increased, and the analysis on deposit area was related to the increase in the amount of debris flow. According to the experimental result of the various topographical conditions, the deposit area was increased linearly as the travel time increased. Moreover, increase in the rainfall intensity resulted in decreased travel time and increased debris amount.

Key words : Debris Flow, Model Experiment, Influencing Factor, Travel Time, Deposit Area

요 지

본 연구에서는 토석류의 이동 및 확산범위를 분석하기 위하여 사면형성 조건과 강우강도 등 주요 영향인자를 변화하면서 실내 토석류 모형실험을 수행하였다. 사면경사의 증가 및 강우강도 증가에 따라 사면파괴가 빠르게 시작하는 것으로 분석되었고, 사면길이 및 지층두께의 증가에 따라 토석류의 이동시간을 증가시키는 것으로 나타났다. 사면 형성조건과 연관되는, 경사와 사면의 길이 및 지층두께의 증가에 따라 토석류의 퇴적물 확산범위가 증가하였으며, 이는 토석류 발생량의 증가와 연관되는 것으로 분석되었다. 사면형성 조건의 변화에서는 토석류의 이동시간 증가에 따라 토석류 발생량이 선형적으로 증가하였다. 강우강도의 증가는 토석류 이동 시간 단축과 발생량 증가를 일으키는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 토석류, 모형실험, 영향인자, 이동시간, 확산범위

1. 서 론

최근 빈번하게 발생하는 집중호우 및 국지성호우에 의해 사면재해의 발생이 증가하고 있으며 특히, 토석류는 대규모 피해의 원인으로 지목되고 있다. Jun and Yune (2015)이

2011년부터 2014년까지 발생한 185건의 사면재해를 유형별로 분석한 자료는 사면재해 중 토석류의 발생이 41.6%로 상당한 비중을 차지하고 있는 것을 보여주고 있다.

최근 토석류 발생현상이 급증함에 따라 현장조사를 통한 토석류 연구가 다양하게 진행되었다(Yune et al., 2010; Yoo

*교신저자, 정회원, 포스코건설 인프라사업본부 부장(Tel: +82-70-8898-9010, Fax: +82-31-527-1941, E-mail: clays@poscoenc.com)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Leader, Infra Division, POSOC E&C.

**강릉시청 건설과 주무관(E-mail: cjs1851b@korea.kr)

Public Officer, Department of Construction, Gangneung City

***정회원, 청주대학교 토목공학과 교수(E-mail: hjkwon@cju.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University

****정회원, 강원도립대학교 스마트시티건설과 교수(E-mail: claynsand@hanmail.net)

Member, Professor, Department of Smart City & Civil Engineering, Gangwon State University

et al., 2012; Kim et al., 2013; Jun and Yune, 2015; Jang et al., 2017). 다만, 현장조사 연구는 지형 특성에 기인한 경우가 많아 지역별로 구분하여 검토하는 것이 타당하다고 알려져 있다(Kang et al., 2015). 현장조사 연구에 의한 토석류 발생원인 규명과 대책방안 수립도 중요한 연구방향이나, 토석류 발생의 영향인자가 그 거동에 미치는 영향을 규명하는데 있어 실내의 모형실험도 중요한 연구의 일환이라 할 수 있다.

토석류에 대한 모형실험 연구는 국내외에서 여러 연구자에 의해 진행되고 있다. Mainali and Rajaratnam (1994), Lacerda and Abelar (2003), Chae et al. (2006), Lee et al. (2007), Kim et al. (2008), Kim and Paik (2010)와 Kim et al. (2018) 등은 길이 1.8 m ~ 5.0 m, 폭 50 mm ~ 1.0 m 규모의 토조를 이용한 모형실험을 수행하여 토석류 발생시점의 간극수압 분포 등을 연구하였다. Choi et al. (2014), Wang et al. (2017)와 Kim et al. (2019) 등은 방호시설이 설치된 실내 모형실험을 수행하여 피해 저감시설의 효율에 대한 연구를 수행하였으며, Bowman et al. (2006)와 Bilesavar (2008) 등은 원심모형실험기를 이용하여 입자별 거동 속도를 분석하거나 정적인 액상화 현상을 관찰하기도 하였다. Moriwaki et al. (2004)는 길이 23 m, 폭 3 m의 초대형 토석류 실험으로 실규모 사면의 파괴거동을 분석하여, 경사면 하단에서 초기이동이 발생하며 중앙에서 간극수압의 변화가 파괴시점과 일치함을 확인하였다.

본 연구는 국내의 토석류 특성을 감안하여 다양한 조건의 실험이 가능하도록 개발된 토석류 실험장치를 이용하여, 사면 형성과 관련된 인자와 토석류 발생에 주요 원인인 강우강도 등을 변화하면서 토석류의 흐름 특성을 분석하였다. 특히, 토석류의 확산범위 분석에 초점을 맞춰 진행함으로써 향후 사방시설 연구와 연계될 수 있도록 분석하였다.

2. 실험조건

2.1 토석류 모형실험 장치

본 연구에 적용된 토석류 모형실험 장치는 Fig. 1과 같다. 이 실험장치는 강우를 재현하기 위한 인공강우장치와 다양한 형태의 경사면의 조성을 위한 굴절토조, 흙을 일시에 방출할 수 있는 토사방출장치 등으로 구성되었다.

인공강우장치는 수조펌프에 연결된 공기압과 노즐의 개폐로 강우강도를 조절하도록 되어있다. 수조펌프는 Fig. 2(a)와 같으며, 인공강우장치는 Fig. 2(b)와 같다. 강우장치는 토석류가 이동하는 굴절토조 상부에 위치하며, 10 cm 간격으로 설치된 49개의 파이프 각각에 65 cm 간격으로 총 490개의 노즐이 설치되어 있다(Figs. 2(c), 2(d)). 인공강우장치로 구현할 수 있는 강우강도는 5~280 mm/hr이다. 또한, 구현된 강우가 지면에 균등하게 분사되도록 유도하기 위하여 노즐

(a) Photograph

(b) Schematic overview

Fig. 1. Experiental Device for Debris Flow

(a) Pressure regulator tank

(b) Apparatus for rainfall

(c) Location the apparatus

(d) Nozzles for rainfall

Fig. 2. Apparatus of the Artificial Rainfall

에 진동장치를 연결하였다.

산사태의 사면을 형성하거나 토석류의 이동부를 모사할 굴절토조 실험장치는 폭 600 mm, 높이 550 mm, 길이 800 mm의 개별토조 10개를 힌지로 연결하여 Fig. 3과 같이 제작하였다. 벽체는 투명의 Polycarbonate로 제작하여 사면의 형성 및 거동의 관찰이 용이하도록 하였다. 굴절토조의 바닥은 파괴경계면의 조건에 따라 변경할 수 있도록 Sand Paper 등의 탈부착이 가능하다. 10개의 힌지로 연결된 개별토조는 각 토조에 부착된 유압실린더를 이용하여 다양한 형상을 구현할 수 있다.

Fig. 3. Articulated Flow Channel

인공강우장치와 굴절형 토조, 토석방출장치로 구성된 토석류 모형실험기는 Fig. 4(a)의 컨트롤 패널에서 제어된다. 계측기는 디스플레이 패널, 앰프 모듈, 센서연결모듈 등으로 구성된 Fig. 4(b)의 데이터 수집장치와 연결되며, 센서종류에 따라 모듈의 교체가 가능한 시스템으로 구성되었다.

Fig. 4. Control and Acquisition System

토석류의 확산량을 측정하기 위한 장치로 Fig. 5와 같이 굴절토조 선단부에 폭 2 m, 길이 4 m 크기의 확산 측정판을 설치하였다. 확산 측정판에는 10 cm 단위의 격자가 그려져 있어 토석류 실험에 따라 확산되는 과정과 확산범위의 길이, 폭, 면적 등을 측정할 수 있도록 하였다. 카메라는 정면에서 토조를 촬영하는 1대, 측면에서 토조를 촬영하는 1대 및 확산판을 촬영하는 1대 총 3대를 고정위치에 설치하여 분석하였다.

Fig. 5. Apparatus for Measuring of Deposit Area

2.2 실험방법 및 조건

토석류 모형실험은 굴절토조 장치를 이용 일정한 기울기로 경사 바닥면을 설정한 후 혼합시료로 일정한 두께의

사면을 조성하고, 인공강우를 발생하여 사면의 파괴를 유도하고, 파괴발생 시점 및 확산분포 양상을 분석하는 과정으로 수행하였다.

혼합시료는 주문진 표준사(비중 2.6, 유효경, $D_{10} = 0.21$ mm, 균등계수 1.19)와 굵은자갈(평균 직경, $D_{50} = 25$ mm), 잔자갈(평균 직경, $D_{50} = 8$ mm)을 중량비 1 : 1 : 1로 혼합한 시료이며, 자연 건조를 통하여 함수비를 3% 이하의 건조한 상태로 유지하였다. 혼합시료 조성은 형성 시 무게와 체적을 다짐을 통하여 조절하면서 16.7 kN/m^3 의 단위중량이 일정하게 유지되도록 하였다.

토석류 모형실험은 주요 영향인자인 사면의 경사(20, 30, 40°), 사면길이(0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 m), 지층두께(0.10, 0.15, 0.20, 0.30 mm) 및 강우강도(100, 200, 280 mm/hr)의 조건을 변경하면서 Table 1과 같이 총 12회를 진행하였다. 기본실험조건은 Test 1 경우로 굴절토조의 경사를 30°로 설정하고, 사면길이 2.4 m, 지층두께 0.15 m의 사면을 형성한 후 시간 당 200 mm의 강우를 강수한 조건으로 토석류의 발생을 유도한 실험이다. 여기서, 강우강도 200 mm/hr는 매우 강한 조건으로 영향인자 변경에 따른 모형사면의 원활한 파괴유도에 초점을 맞춰 계획한 실험조건이다. 향후 Choi et al. (2017)의 연구결과 등에 따라 실제 토석류 발생 시 강우강도인 30 ~ 70 mm/hr 범위를 설정한 조건에서 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

실험 개시 후 사면파괴의 시작시점은 토조전면과 측면을 촬영하는 2대의 카메라를 이용하여 지층의 이동이 시작하는 시점으로 분석하였다. 토석류 흐름 완료시점은 토조전면과 확산판을 촬영하는 2대의 카메라를 이용하여 토석류의 움직임이 종료되는 시점으로 판단하였다. 확산범위는 Fig. 5와 같이 확산 측정판에 형성된 퇴적물을 카메라 분석과 실측을 통하여 측정하였다.

이러한 실험수행 과정을 단계별로 구분하면 ① 굴절토조 장치의 경사조절, ② 인공강우장치의 강우강도 설정, ③ 혼합시료 등을 이용한 모형사면 조성, ④ 모형사면의 파괴변화를 관찰하기 위한 염색모래 삽입, ⑤ 모형사면 지표면에 표적 설치, ⑥ 카메라 및 데이터 수집장치 가동의 순서로 실험을 준비한다. 이후 ⑦ 인공강우 장치의 가동에 의한 산사태 유발, ⑧ 파괴 후 확산측정판 관찰, ⑨ 카메라 및 데이터 분석 등의 순서로 실험을 진행하였다.

3. 실험결과

토석류 발생에 영향을 미칠 수 있는 사면경사, 사면길이, 지층두께 및 강우강도 등의 조건변화에 따른 파괴발생 시작 및 종료 시간, 하부 확산측정판 위의 확산폭과 길이, 확산면적 등을 분석하였다. Fig. 6에는 기본실험조건(Test 1)에서 파괴 시작시점과 토석류 이동 중 및 토석류 흐름이 완료 후의 실험장면이다.

Table 1. Experimental conditions

Cases	Channel slope		Length of slope		Thickness of soil		Rainfall intensity	
	(degree)	Ratio of parameter	(m)	Ratio of parameter	(m)	Ratio of parameter	(mm/hr)	Ratio of parameter
Test 1	30	1.00	2.4	1.00	0.15	1.00	200	1.00
Test 2	20*	0.67	2.4	-	0.15	-	200	-
Test 3	40*	1.33	2.4	-	0.15	-	200	-
Test 4	30	-	0.8*	0.33	0.15	-	200	-
Test 5	30	-	1.6*	0.67	0.15	-	200	-
Test 6	30	-	3.2*	1.33	0.15	-	200	-
Test 7	30	-	4.0*	1.67	0.15	-	200	-
Test 8	30	-	2.4	-	0.10*	0.67	200	-
Test 9	30	-	2.4	-	0.20*	1.33	200	-
Test 10	30	-	2.4	-	0.30*	2.00	200	-
Test 11	30	-	2.4	-	0.15	-	100*	0.50
Test 12	30	-	2.4	-	0.15	-	280*	1.40

* Variable condition in each test

Fig. 6. Photographs of the Experiment for Debris Flow (Test 1)

3.1 토석류 영향인자에 따른 파괴발생 및 이동시간

토석류 모형실험은 인공강우의 발생으로 시작하며, 사면의 파괴가 시작되는 시간(Time at Failure Initiation)과 토석류 흐름이 완료되는 시간(Time at Debris Flow Completion)을 각각 분석하여 Fig. 7과 Table 2에 표현하였다. 여기서 사면의 파괴가 시작되는 시간은 강우의 지속시간으로 평가할 수 있다.

Fig. 7(a)와 같이 사면경사(Channel Slope)가 증가할수록

사면파괴 시작 및 토석류 완료 시점이 빨라지는 경향을 보였다. 경사의 증가는 사면파괴 유발에 큰 영향을 주기 때문에 이에 기인하여 파괴속도가 빨라진 현상으로 판단된다. Fig. 7(c)와 같이 토사층 두께(Thickness of Soil)의 증가는 사면파괴 및 토석류 완료시점을 늦추게 하였다. 토사층 두께의 증가는 토체중량 증가에 따른 마찰력을 증가와 더불어 강우의 침투가 깊은 토층까지 진행하면서 파괴가 지연되어 발생하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 7. Time from Beginning of the Experiment

Table 2. Time from Beginning of the Experiment

Cases	Failure initiation (sec.)	Debris flow completion (sec.)	Travel time (sec.)
Test 1	509	695	186
Test 2	610	777	167
Test 3	252	398	146
Test 4	365	503	138
Test 5	342	507	165
Test 6	417	627	210
Test 7	321	560	239
Test 8	430	609	179
Test 9	586	774	188
Test 10	710	954	244
Test 11	1,049	1,329	280
Test 12	334	509	175

Fig. 7(d)에 도시한 강우강도(Rainfall Intensity)의 증가는 파괴 발생시간을 빠르게 하는 것으로 나타났으며, 이는 강우에 의해 토층 내 간극수압이 증가하여 지반의 저항력 감소와 활동력의 증가를 수반하기 때문으로 판단되었다. Fig. 7(b)에 도시한 사면 길이(Length of Slope)에 따른 사면파괴 시점 및 토석류 완료시점의 변화는 이 실험에서 유의미한 결과를 보이지 않는 것으로 나타났다. 다만, 사면길이의 증가에 따라 하부의 간극수압 증가 등이 예상되어 파괴발생 시간이 변화될 수 있음을 감안할 때, 향후 여러 조건에서의 추가실험을 통하여 상관성 여부를 규명하는 것이 바람직할 것으로

판단된다.

사면경사, 길이, 토층두께 및 강우강도 등 토석류 발생조건에 따른 파괴시작 시점과 토석류의 이동 종료시점의 차이인 토석류 이동시간(Travel Time)을 분석하여 Fig. 8에 나타내었다. 토석류 발생 조건은 Test 1의 기본실험조건을 기준으로 변화율을 분석하여 Fig. 8의 x축으로 표기하였다. 각 영향인자별 변화율은 Table 1의 Ratio of Parameter와 같다. 사면길이가 증가할수록 토석류가 이동하는 시간이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 이동하는 토석류의 양이 크기 때문에 이동에 소요되는 시간이 증가한 현상으로 판단된다.

지층두께에 따라 토석류의 이동시간도 증가하였으며, 이 또한 토석류 양의 증가가 이동시간을 증가하는 것으로 판단되었다. 강우강도의 증가에 따라 이동시간은 감소하는 것으로 분석되었으며, 이는 많은 강우가 지반의 함수비 증가를 유발하고, 이를 통해 토석류의 유동성이 증가함에 따라 더 빠른 속도를 가지면서 이동하는 것으로 판단된다. 사면경사의 변화에 따라 이동시간은 유의미한 결과를 획득하지 못하였다. 사면경사의 증가는 속도의 증가를 보일 것으로 판단되었으나, 실험결과에서 그 경향성을 살필 수는 없었다. 향후 사면경사에 따른 추가 실험 등을 통하여 이동시간의 상관성을 분석하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 8. Travel Time of Debris Flow According to Ratio of Parameters

3.2 토석류 영향인자에 따른 퇴적물 확산범위

토석류 모형실험에서 강우에 의해 사면파괴 및 토석류의 이동이 완료된 시점에서 퇴적물의 확산범위를 실험조건에 따라 분석하였으며, 사진촬영 및 시간에 따른 확산범위 측정 결과를 Fig. 9와 Table 3에 나타내었다.

Fig. 9. Deposit Area by the Model Experiments

Table 3. Runout Width, Distance and Disposal Area as the Experiments

Cases	Runout Width (m)	Runout Distance (m)	Disposal Area (m ²)
Test 1	1.15	0.78	0.759
Test 2	0.81	0.47	0.293
Test 3	0.91	0.85	0.655
Test 4	0.86	0.47	0.345
Test 5	1.01	0.71	0.604
Test 6	1.19	1.01	1.015
Test 7	1.35	1.13	1.305
Test 8	1.10	0.85	0.802
Test 9	1.15	0.94	0.925
Test 10	1.21	1.10	1.161
Test 11	0.90	0.46	0.359
Test 12	1.18	0.92	0.933

Fig. 10은 각 조건에 따른 퇴적물의 길이와 폭을 분석한 결과이다. 토석류 실험 조건에 관계없이 퇴적물의 확산폭(Runout Width)이 확산길이(Runout Distance)에 비하여 크

게 나타났으며, 이는 실험장치의 토조 폭(0.6 m) 즉, 토석류 유로의 폭에 기인된 것으로 판단된다. 확산폭의 크기가 가장 큰 Test 7 (사면길이 4.0 m)의 실험조건에서 확산폭은 1.35 m, 확산길이는 1.13 m로 분석되었다. 실제 토조 폭(0.6 m)을 제외한 확산된 폭은 0.75 m로 확산길이 보다 작게 나타났다. 이러한 경향은 전체 실험조건에서 동일하게 나타났다. 즉, 토석류 유로폭은 퇴적물의 확산폭에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단되며, 유로폭을 제외한 확산폭은 확산길이 보다 짧게 나타는 것으로 분석되었다.

Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 사면경사가 증가함에 따라 퇴적물의 확산길이는 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 사면경사의 증가가 토석류 운동량의 증가와 직결되므로 퇴적물이 멀리까지 진행되는 것이라 판단된다. Fig. 10(b)의 사면길이 증가에 따른 퇴적물 확산길어도 증가하는 것으로 나타났다. 사면길이가 증가할수록 토석류 양의 증가하여 확산이 멀리까지 가는 것으로 분석되었다. Fig. 10(c)와 같이 토체 두께 증가에 따라 확산길어도 증가하는 경향을 보였으며, 토석류 발생량의 증가와 연관된 것으로 판단된다. Fig. 10(d) 강우강도의 증가 역시 잔류물의 확산길이도 증가로 나타나며, 이 또한 토석류 양의 증가와 연관될 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 토석류가 발생하여 평지부에 쌓이게 되는 퇴적물의 확산

Fig. 10. Runout Distance and Width

범위를 확산폭과 확산길이로 분석한 결과, 토석류 양의 증가와 직접적인 연관이 있을 것으로 판단되었다.

이는 Fig. 11의 확산범위(Deposit Area)를 분석한 결과에서도 확인할 수 있다.

사면의 경사가 증가할수록 토석류 흐름의 운동량 증가로 퇴적량이 많아지는 것으로 나타났으며(Fig. 11(a)), 사면길이의 증가는 토석류의 양이 크게 유도되므로 확산범위가 증가하는 것으로 분석되었다(Fig. 11(b)). 지층두께 증가 역시 토석류의 양의 증가로 기인되므로 퇴적물 확산면적이 크게

나타났다(Fig. 11(c)). 동일한 조건에서 강우강도의 증가에 의해 확산범위가 커지는 것을 보였으며(Fig. 11(d)), 이는 강우강도의 증가에 의해 발생하는 토석류 양 역시 증가할 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

Fig. 11. Deposit Areas

Table 1의 실험조건 중 지형적인 변화에 따른 실험결과 (Test 1~Test 10)에서, 사면과괴 시작시간 및 토석류 이동시간과 확산면적의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)와 같이 사면과괴 시작시간 즉, 강우 지속시간과 확산면적은

Fig. 12. Correlation of Travel Time and Deposit Area by the Topographical Conditions

유의미한 상관성이 보이지 않는 것으로 분석되었다. 실험결과에서는 사면파괴의 시점에 따라 토석류의 확산면적이 영향을 받지는 않는 것으로 보이며, 이는 토석류 양과도 관계가 없음을 의미한다고 추정할 수 있다. 다만, 일부 연구에서는 강우 지속시간과 토석류 양의 관계를 분석한 내용이 있으므로 향후 추가적인 실험 등을 통하여 보다 상세한 규명이 필요할 것으로 판단된다.

토석류 이동시간과 확산면적의 관계가 Fig. 12(b)와 같이 결정계수(R^2)가 0.80으로 선형 가깝게 비례하는 경향으로 나타났다. 토석류의 이동시간이 길어질수록 확산면적이 증가하는 결과이며, 토석류의 이동시간이 길어질수록 토석류의 양이 증가한다는 의미로 볼 수 있다. 이는 지형조건에 따라 토석류의 흐름속도가 감소하더라도 토석류 발생량은 증가하는 경향이 나타날 수 있음을 보여주는 결과이다.

다만, 강우강도 변화에 의한 실험결과는 Fig. 13과 같이 이동시간이 증가함에 따라 토석류의 양이 감소하는 경향을 보였다. 이는 강우강도가 증가함에 따라 이동시간이 단축되면서 토석류 양이 증가하는 즉, 토석류의 속도가 증가하는 경향에 기인한 것으로 분석되었다.

Fig. 13. Deposit Area by Various Rainfall Intensity

4. 결 론

본 연구에서는 토석류 모형실험기를 이용하여 사면경사, 사면길이, 지층두께 및 강우강도 등 주요 영향인자의 변화에 따른 실험을 수행하였으며, 그 결과를 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 토석류 모형실험기를 이용하여 사면경사 20~40°, 사면길이 0.8~4.0 m, 지층두께 0.1~0.3 m 및 강우강도 100~280 mm/hr의 영향인자를 조절하면서 토석류 발생을 재현할 수 있었으며, 깊이방향의 염색사와 지

표면 표적에 대한 카메라 촬영 및 토조선단 확산판 등을 이용하여 사면파괴 시작 시점, 토석류 흐름 완료 시점과 확산면적 등을 분석할 수 있었다.

- (2) 사면이 파괴는 사면경사가 증가하거나, 지층두께가 감소하고, 강우강도가 증가할수록 빠르게 시작되었다. 사면의 길이 증가, 지층두께 증가에 따라 토석류의 이동시간은 증가하였으며, 이는 토석류 발생량이 증가하는 요인과 연관된 것으로 분석되었다. 강우강도의 증가에 따라 이동시간은 감소하였으며, 토석류 내 유동성 증가에 따라 빠른 속도로 토석류의 흐름이 발생한 것으로 판단되었다.
- (3) 사면 형성조건에 따른 토석류 흐름이 완료된 후 확산범위에 대하여 분석한 결과, 사면의 경사, 사면길이 및 지층두께 증가에 따라 확산범위가 증가하는 것으로 검토되었다. 이는 토석류 발생량과 직접적인 연관이 있는 것으로 토석류 발생량의 증가가 확산범위의 증가와 연관이 되는 것으로 판단할 수 있다.
- (4) 지형조건 변화에 따른 사면파괴 후 토석류의 이동시간과 확산범위를 분석한 결과 선형적인 비례관계를 보이는 것으로 분석되었다. 즉, 토석류의 이동시간이 길어질수록 토석류의 양도 많아지는 것을 보였다. 이는 지형조건에 따라 토석류의 흐름속도가 감소하더라도 토석류 발생량은 증가하는 경향이 나타날 수 있음을 보여주는 결과이다.
- (5) 강우강도의 증가는 토석류의 이동시간을 단축하면서 토석류의 발생량을 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 강우량이 많아질수록 토석류의 속도와 발생량 모두 증가하는 경향으로 분석되었다.

본 연구는 토석류 모형실험기의 개발에 맞춰 몇 개의 영향인자에 대한 분석을 수행하였다. 향후 강우지속시간이나 사면붕괴 발생조건 및 현장조사 연구에 의한 토석류 발생조건 등을 반영한 추가 실험을 수행하여, 토석류 발생의 영향인자의 보다 상세한 규명과 토석류의 거동분석에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업 (2016002120004)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bilesavar, R.D. (2008). *Physical modelling of flowslide mobility*. Master's thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- Bowman, E.T., Laue, J., Imre, B., Zweidler, A., and

- Springman, S.M. (2006). Debris flows in a geotechnical centrifuge, physical modelling in geotechnics. *Proceedings of the 6th ICPMG*, pp. 311-316.
- Chae, B.G., Song, Y.S., Seo Y.S., Cho, Y.C., and Kim, W.Y. (2006). A test for characterization on landslides triggering and flow feature of debris using a flume test equipment. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 3, pp. 275-282 (in Korean).
- Choi, C.E., Ng, C.W.W., Song, D., Kwan, J.S.H., Shiu, H.Y.K., Ho, K.K.S., and Koo, R.C.H. (2014). Flume investigation of landslide debris-resisting baffles. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 51, No. 5, pp. 540-553.
- Choi, Y.N., Hwang, H.S., Lee, H.H., and Yoo, N.J. (2017). Estimation of magnitude of debris flow and correlation analysis between influencing factors. *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 79-87 (in Korean).
- Jang, C.B., Choi, Y.N., and Yoo, N.J. (2017). A study on behavior characteristics and triggering rainfall of debris flow. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 13-21 (in Korean).
- Jun, K.J., and Yune, C.Y. (2015). Analysis of slope hazard triggering factors through field investigation in Korea over the past four years. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 5, pp. 47-58 (in Korean).
- Kang, S.H., Lee, S.R., Nikhil, N.V., and Park, J.Y. (2015). Analysis of differences in geomorphological characteristics on initiation of landslides and debris flows. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 249-258 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Kim, J.H., Seo, J.I., Kim, S.W., Lee, S.I., Lee, Y.T., and Chun, K.W. (2018). An experimental study on changes in sediment storage pattern and peak water wave regulated by the deflecting angle of debris-flow guide bank. *Journal of Agriculture & Life Science*, Vol. 52, No. 3, pp. 27-38 (in Korean).
- Kim, K.H., Lee, D.H., Kim, D.H., and Lee, S.H. (2008). A study on model tests for debris flow characteristics. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 9, No. 5, pp. 83-89 (in Korean).
- Kim, K.S., Do, J.N., and Lee, S.R. (2013). Estimation of debris flow magnitude by flow track measurement. *Proceedings of 2013 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2709-2712 (in Korean).
- Kim, Y.I., and Paik, J.C. (2010). Experiments on debris flows in a rectangular channel. *Proceedings of 2010 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 279-282 (in Korean).
- Lacerda, W.A., and Abelar, A.S. (2003). Flume tests on sand subjected to seepage with the influence of hidden barriers. *Proceedings of the International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flow-like landslides in Natural Slopes and Earthfill*, Sorrento, Pàtron Editore, Bologna, pp. 136-144.
- Lee, S.H., Hwang, Y.C., Ji, Y.H., and Jung, J.S. (2007). Fundamental study about the landslide calibration chamber test that using artificial rainfall simulator. *Proceedings of 2007 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 771-776. (in Korean)
- Mainali, A., and Rajaratnam, N. (1994). Experimental study of debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 104-123.
- Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., and Wang, G. (2004). Failure processes in a full-scale landslide experiment using rainfall simulator. *Landslides*, Vol. 1, pp. 277-288.
- Wang, F., Chen, X., Chen, J., and You, Y. (2017). Experimental study on a debris-flow drainage channel with different types of energy dissipation baffles. *Engineering Geology*, Vol. 220, pp. 43-51.
- Yoo, N.J., Yoon, D.H., Um, J.K., Kim, D.G., and Park, B.S. (2012). Analysis of rainfall characteristics and landslides at the west side area of Gangwon Province. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 9, pp. 75-82 (in Korean).
- Yune, C.Y., Jun, K.J., Kim, K.S., Kim, G.H., and Lee, S.W. (2010). Analysis of slope hazard-triggering rainfall characteristics in Gangwon Province by database construction. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 10, pp. 27-38 (in Korean).

Received	■	April 9, 2020
Revised	■	April 10, 2020
Accepted	■	April 21, 2020