

횡단 배수로 내 토석류 퇴적 양상의 실험 연구

Experimental investigation of depositional patterns of debris flow

김영일*, 백중철**
Youngil Kim, Joongcheol Paik

요 지

토석류는 산간지역에서 발생할 수 있는 가장 위험한 자연재해 중 하나로 입자-유체 혼합물인 토석류가 중력에 의해 매우 빠른 속도로 이동하는 현상을 의미한다. 산간지역에서의 토석류 발생은 도로의 횡단 배수 구조물의 통수능을 저하시키게 되며 그 결과 도로의 유실 등 막대한 피해를 발생시킨다. 잠재적인 토석류 발생 지역에서의 피해 저감을 위해서는 진보된 설계 기준이 마련되어야 하며 이를 위해 토석류의 횡단 배수구조물 내에서 토석류의 동적 거동 특성을 파악하는 것이 선행되어야 할 것이다. 이번 연구에서는 수리 실험을 통하여 횡단 배수구조물 내에서 토석류의 퇴적 특성을 파악하고자 한다. 수리 실험 장비는 폭이 일정한 사각형 수로로 접근 수로와 하류부 수로로 구성되어 있으며 접근수로의 상단부에서 일정한 유량의 토석류를 연속적으로 유입시켜 경사가 급변하는 하류부 수로 내에서의 토석류 퇴적 특성을 파악하였다. 실험 결과로 토석류의 거동 특성은 토석류의 체적 농도, 입자의 특성, 그리고 접근수로와 하류부 수로의 바닥 경사에 종속됨을 정량적으로 알 수 있었다. 또한, 토석류의 체적 농도나 수로 바닥경사 등과는 상관없이 토석류의 퇴적은 하류부 수로의 종단부인 자유 낙하 지점에서부터 시작되었고 시간이 경과함에 따라 퇴적 지점이 접근수로 쪽으로 이동하며 퇴적량이 크게 증가하는 현상을 보였다. 이 때, 하류부 수로 내 퇴적된 토석류는 약 12~15°의 경사를 보였다.

핵심용어 : 토석류, 퇴적 양상, 횡단 배수구조물, 수로 바닥경사, 유사체적농도

1. 서 론

토석류는 수 미터에서 마이크로미터까지 다양한 입도 분포를 가진 입자와 유체의 혼합물로 이동 시 액체와 같은 형태로 흐르게 되며 바닥 경사가 작아짐에 따라 이동을 멈추게 된다. 이 때 퇴적된 토석류는 딱딱하게 굳은 상태를 보이게 된다(Iverson, 1999). 토석류는 위치에너지를 가지고 있는 토석이 호우 등의 영향으로 분리 및 세굴 되는 과정에서 위치에너지가 운동에너지로 전환되어 중력에 의해 흘러 내려오며 토석류가 형성되고 바닥 경사가 감소함에 따라 토석류가 바닥표면과의 마찰이 증가하게 되어 토석류는 결국 마찰 저항으로 인해 정지하게 된다(Takahashi, 2007). 이러한 토석류의 퇴적은 산간지역 도로의 횡단 배수구조물에 큰 영향을 미치며 배수구조물의 파괴나 통수능 저하로 인해 배수구조물이 본래의 역할을 하지 못하여 많은 인명과 재산의 피해가 발생하게 된다. 이를 예방하기 위해서는 배수구조물 내 토석류의 퇴적 특성의 이해가 필요하다. 토석류의 퇴적이 발생하는 주요한 원인은 여러 가지가 있으나 수로의 경사 감소, 토석류의 구속력 감소 그리고 방해물로 인한 흐름 변화 등을 들 수 있다. 이 원인들은 토석류의 이동 속도를 감소시키게 되며 이어 퇴적을 일으킨다. 특히 수로의 경사 변화에 따라 토석류의 퇴적이 발생한다는

* 정회원 · 강릉원주대학교 석사 · E-mail : annre@hanmail.net

** 정회원 · 강릉원주대학교 조교수 · E-mail : paik@gwnu.ac.kr

다양한 연구 결과들이 있는데, Takahashi(1983)는 하류부와 상류부 수로의 경사의 비가 운동 내부 마찰각과 정지 내부마찰각의 비보다 작을 경우($\tan \theta_u / \tan \theta_d < \tan \alpha / \tan \phi$) 퇴적이 시작된다고 하였으며, Ikeya(1981)은 수로의 경사가 10° 이하가 될 때부터 퇴적이 시작되며, 상류부와 하류부 수로 경사의 비(θ_u / θ_d)의 값으로 4를 제시하였다. 이 연구에서는 토석류의 퇴적 특성을 이해하기 위해 폭이 일정한 사각형 수로 내에서 토석류의 퇴적 특성을 관찰하였다.

2. 토석류 수리 실험

2.1 수리 실험 장치

이 연구에서는 배수구조물 내에서의 토석류 퇴적 특성을 파악하기 위해 총 길이 8m, 높이 5m의 수리 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치는 크게 재료 공급 장치와 교반 장치를 포함하고 있는 접근 수로와 배수구조물 역할을 하는 하류부 수로로 나눌 수 있다. 수리 실험 장치에서는 1m^3 의 표준용량을 가지는 재료 공급 장치를 통해 유입되는 토석류가 교반 장치를 거쳐 경사가 급한 접근수로에서 비교적 경사가 낮은 하류부 수로로 이동하면서 발생하는 토석류의 퇴적 특성을 파악하고자 한다. 산간지역 도로의 횡단 배수구조물은 지역 특성의 고도차로 인해 종단부가 대부분 자유낙하 형태로 설치되어 있기 때문에 실험 수로의 종단부 역시 같은 형태로 설정하였다. 실험의 원활한 관측을 위해 토석류의 퇴적 변화가 가장 큰 곳에 수위 센서를 다수 설치하였으며 나머지 구간은 초고속 카메라를 이용하여 전체적인 퇴적 양상을 관찰할 수 있도록 하였다.

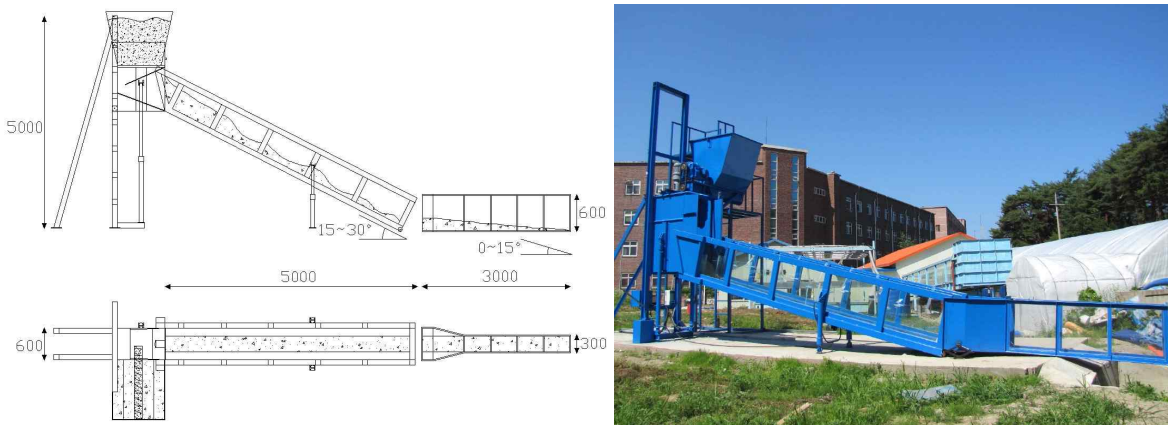


그림 1. 토석류 수리 실험 장치

2.2 실험 조건

실험은 접근 수로의 바닥경사에 따라 두 가지 경우로 나눌 수 있으며 각각의 실험 조건은 표 1과 같다. 토석류의 유사체적농도는 실험이 가능한 범위 내(56~83%)에서 설정하였으며, 접근 수로의 경사는 강원도 44번 국도 구간의 현장 조사를 통해서 획득한 토석류가 발생한 지역의 직상류부 접근수로와 유역의 평균 수로 경사이다.

표 1. 토석류 수리 실험 조건

접근 수로의 경사(, °)	실험 1				실험 2			
	18				25			
하류부 수로의 경사(θ_d , °)	3.0	4.5	6.0	9.0	3.0	4.5	6.0	9.0
유사 체적 농도(v , %)	71	83	83	83	83	83	83	83
	67	77	77	77	77	77	77	
	63	71			71	71		
	56				67			

토석류 수리 실험에 사용된 재료는 지난 2006년 강원도의 토석류 발생 지역과 유사한 하상 재료를 사용하였으며, 평균 입도 분포는 약 6%의 차이가 있었으나 전체적으로 매우 유사한 입도 분포를 보여주고 있다. 실제 토석류 발생지점이나 잠재적 위험성이 있는 지역에서는 대부분 사방댐이나 링네트 등의 방재시설로 인해 큰 토석들이 배수구조물로 유입되는 것을 차단하고 있다. 그러나 방재시설이 차단하지 못하는 작은 크기의 토석들도 배수구조물에 심각한 영향을 줄 수 있으며, 실제로 작은 토석들이 연속적으로 배수구조물로 유입된다면 상대적으로 경사가 작아지는 배수구조물에서 심각한 퇴적이 발생할 수 있음을 염두 하여 실험을 진행하였다.

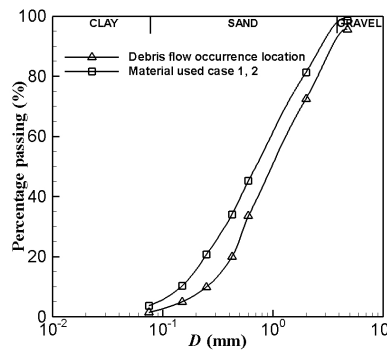


그림 2. 실제 토석류 발생 지점과 실험에 사용된 재료의 입도 분포 곡선(PSD)

3. 실험결과

그림 3는 실험 결과를 토대로 시간에 따른 토석류의 일반적인 퇴적 양상이다.

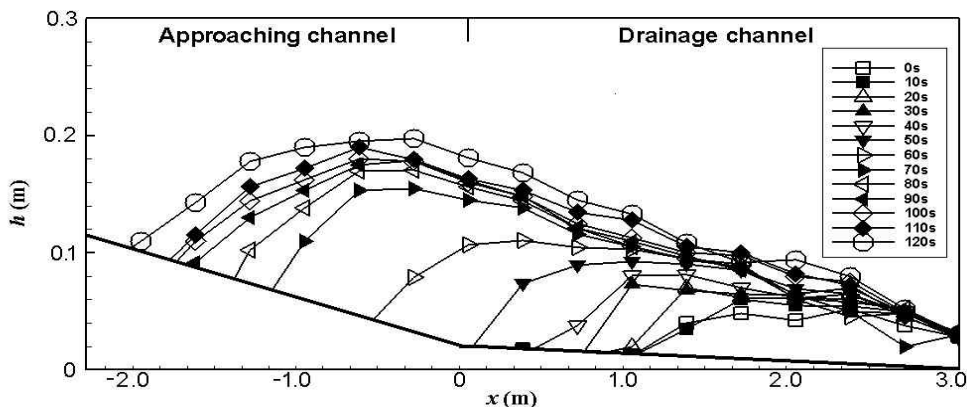


그림 3. 하류부 수로 내에서의 시간에 따른 토석류의 일반적인 퇴적 양상

표 2는 조건을 변경하여 실험을 진행하였을 때 각각의 변수이며, 그림 4는 표 2의 각 변수의 퇴적 양상을 시간 별(40s 간격)로 보여준다.

표 2. 토석류 퇴적 양상 조건

실험	θ_d	v
실험 1	18°	4.5°
실험 2	25°	4.5°
실험 3	18°	4.5°
실험 4	25°	4.5°
실험 5	18°	6.0°
실험 6	25°	6.0°

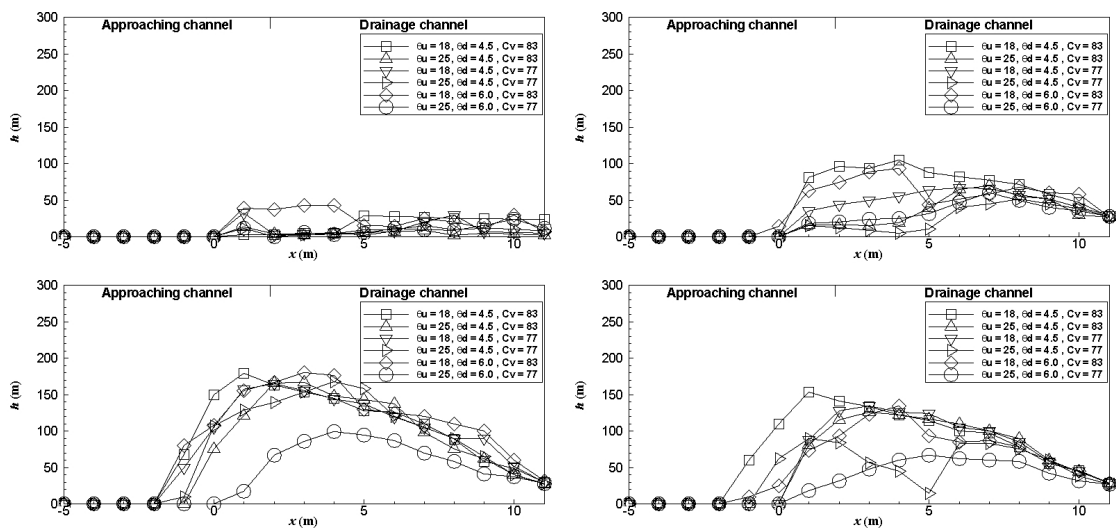


그림 5 각 변수 별 시간에 따른 토석류 퇴적 양상(왼쪽 위부터 시계 방향 0s, 40s, 80s, 120s)

4. 결론

이 연구에서 토석류 수리 실험을 통해 농도와 수로의 경사를 다양하게 변경해가며 진행하였다. 변수들에 따라 약간씩의 차이는 있었으나 대체로 다음과 같은 공통적인 퇴적 양상을 보였다: (1) 실험 수로 내 토석류의 퇴적은 하류부 수로의 종단부에서부터 시작되며 시간이 경과함에 따라 점차 접근 수로방향으로 이동하며 퇴적량이 크게 증가하는 양상을 보였다. (2) 크기가 큰 토석뿐만 아니라 사용된 재료의 d_{50} 이 0.7mm로 작았음에도 불구하고 경사가 급변하는 하류부 수로 내에서 마찰 저항의 증가로 큰 퇴적량을 보였다. (3) 자유낙하 운동을 하는 하류부 수로의 종단부에서 유출되는 토석류의 수심은 변수에 상관없이 일정한 양을 보였다. (4) 하류부 수로에서 최종 퇴적된 토석류의 경사는 공통적으로 12~15°를 보였으며, 이는 퇴적된 양과 비교할 때 퇴적 발생 시점과 토석 유입 속도가 빠를수록 퇴적량이 증가하는 것으로 나타났다. (5) 지면 제약상 그림을 삽입하지 않았지만 퇴적 발생 시점은 토석류의 농도가 클수록 접근, 하류부 수로의 경사가 작을수록 빨리 시작되는 것으로 나타났다.

추가적으로 다양한 입도 분포의 재료와 배수구조물의 기하학적 형상을 변경하여 실험을 진행할 예정이다.

감 사 의 글

이 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(과제번호# '08지역기술혁신 B-01)에 의해 수행된 수충부 및 토석류 방제기술 연구단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 박남선(2008), “강원도 토석류 산사태의 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 강원대학교.
- 이용수, 정재형(2008), “토석류를 고려한 도로배수 설계기준 개선 방안”, 한국지반환경공학회 2008 학술발표회 논문집, pp. 407-410
- Iverson, R. M. (1997). “Depositional Processes in Large-Scale Debris-Flow Experiments.”, *The Journal of Geology*, volume 105, p. 345-366
- Iverson, R. M. (1999). “Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins.” *Geological Society of America Bulletin* , Vol. 111, p. 1424-1434
- Takahashi, T. (2007). “Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures.” Taylor & Francis Group, London, UK.
- Cheng-lung Chen and Jon J. Major(2007) “DEBRIS-FLOW HAZARDS MITIGATION: Mechanics, Prediction, and Assessment.” Millpress Science Publishers, Rotterdam, Netherlands
- Ikeya, H.(1981), A Method of Designation for Area in Danger of Debris Flow, In *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands*, Proc. of the Christchurch Symp., Int. Assoc. Hydrol. Sci., Publ., N. 132, pp. 576-588.