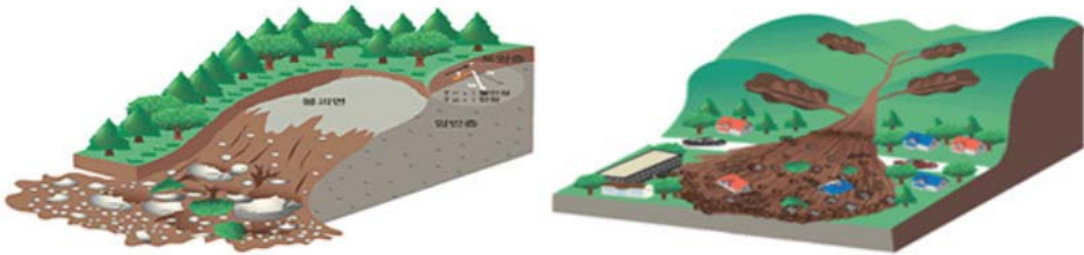


1.1 토석류: 집채만 한 돌이 흐른다고?

□ 토석류란?

토석류(土石流, debris flow)는 산지 경사면의 토층이 오랫동안 내린 비로 포화된 상태에서 낙뢰 등 충격이 가해지면서 하류방향으로 흘러내리는 현상을 말한다. 이때 토석류는 모래 등 토양뿐만 아니라 돌 덩어리 등 집채만 한 바위와 함께 완전히 새로운 유체를 형성하여 하류로 흘러간다. 토석류는 속도가 매우 빨라 가공할만한 파괴력을 보이며 평지에 도달해서는 주변 환경을 매몰시켜 엄청난 인명 및 재산 피해를 유발한다.



산사태와 토석류 발생 개념

[그림] 토석류 개요도

□ 토석류와 산사태

토석류는 일반 산사태와 다르다. 토석류와 산사태 모두 강우로 인해 무거운 토체가 하류로 무너져 내리는 것은 비슷하기 때문에 구별이 어렵다. 그러나 산사태는 토층이 중력에 의해 안정이 파괴되어 무너져 내리는 현상이고, 토석류는 물과 섞여 새로운 유체로 변화되어 빠르게 흐른다는 점이 다르다. 즉, 토석류는 물이 매개가 되어 이전의 토층과는 다른 새로운 유체가 형성되고 긴 거리를 흘러갈 수 있다.

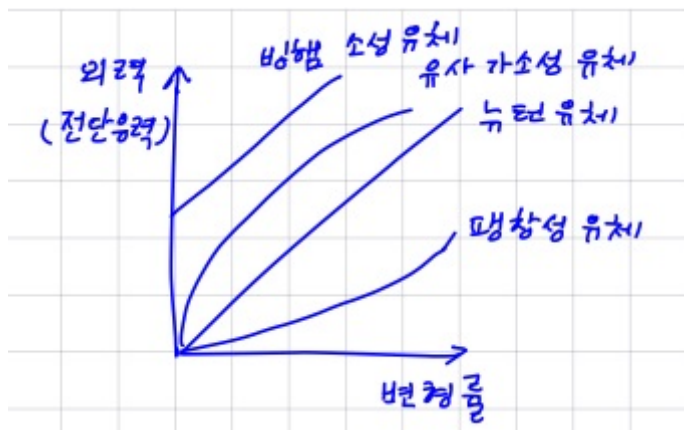
□ 액체와 유체

그렇다면 흙과 집채만한 돌이 섞여 어떻게 새로운 종류의 유체를 만들까? 모든 물질은 온도에 따라 다른 상(相, phase)을 보인다. 예를 들어, H₂O의 경우 저온에서는 얼음, 상온에서는 물, 그리고 고온에서는 수증기로 각각 고체상, 액체상, 기체상을 보인다. 일반적으로 유체는 상과는 상관없이 흐르는 물체를 의미한다. 정재승의 “과학콘서트”에 모래 입자들이 유체처럼 흐르는 비슷한 현상이 잘 소개되어 있다 (브라질 땅콩 효과: 모래 더미에서 발견한 과학). 전자현미경을 이용하여 모래 더미의 경사면을 촬영해 보면 재미있는 사실을 발견할 수 있다. 모래 더미를 쌓아놓고 모래를 계속해서 부으면 경사면의 얇은 층은 마치 액체처럼 흘러내리고 안쪽은 고체의 상태를 유지하는 것처럼 보인다. 즉, 모래의 위치에 따라 서로 다른 성질을 나타낸다는 것이다. 토석류의 경우도 큰 돌덩이가 흙, 자갈과 함께 흘러가면서 성질이 다른 유체로 변화되는 것이다.

□ 빙햄 소성유체

아래 그림은 유체를 유변학(rheology)적으로 분류한 것이다. 일반적으로 물과 같은 유체는

외력 (전단응력)에 의해 변형하는 정도 (변형률)가 비례한다. 그러나 팽창성 유체는 외력이 증가함에 따라 유체의 점성이 증가하는 경우로 젖은 모래 혹은 고농도 분말 용액이 이에 해당한다. 영화에서 악당이 높에 빠져 허우적거릴수록 더 깊이 빨려 들어가는 경우를 볼 수 있는데 이는 높이 팽창성 유체의 성질을 보이기 때문이다. 외력이 증가할수록 점성이 줄어드는 경우도 있으며 이를 유사 가소성 유체라 한다. 기계 부품의 마모를 줄이기 위해 사용하는 구리스와 음식 중의 마요네즈 등이 해당된다. 빙햄 소성 유체는 외력이 작을 때에는 고체 상태로 변형을 하지 않다가 외력이 일정한 값을 초과하게 되면 변형이 진행된다. 빙햄 소성 유체의 예로 비누 혹은 초코렛 등을 들 수 있다. 토석류도 빙햄 소성 유체에 해당하는데 외력이 작은 경우 고체로 있다가 어느 값을 초과하면 갑자기 흘러내리기 시작한다.



[그림] 유체의 유변학적 분류

□ 해외의 토석류 발생 사례

1969년 미국 버지니아주 넬슨 카운티에서 허리케인 카밀에 의해 토석류가 발생함. 폭풍과 토석류의 발생으로 인하여 150명 사망 및 1억 달러 이상의 재산 피해 발생함

1980년 미국 워싱턴 St. Helens 산에서 화산 폭발이 일어남과 동시에 토석류가 발생함. 이로 인하여 약 200가구가 피해를 입었으며 9개의 교량, 많은 구간의 고속도로가 파괴됨

1985년 콜롬비아 네바도 델 루이즈에서 화산 분출로 인하여 토석류가 발생, 2만3천명 이상 사망

1994년 미국 콜로라도주 글렌우드 스프링스 서쪽의 Storm King Mountain에서 산불이 일어나 숲이 탄 이후 강우로 인하여 토석류가 발생함. 이로 인하여 30개 차량이 토석류에 매몰되었고 인명피해를 입혔으며 70번 고속도로의 통행이 하룻동안 정지됨

1999년 2월 베네수엘라 바르가스 주에서 폭우로 인한 토석류가 발생하여 약 1만9천여명 사망

2021년 일본 시즈오카현 아타미시에서 호우로 인한 토석류가 발생하여 20명 이상의 사망/실종 피해 발생

2010년 대만의 시즈 지역 고속도로에서 관리부실로 인한 토석류 발생, 토석류가 이동중인 4대의 차량을 덮쳐 4명 사망

□ 2011년 우면산 산사태

토석류에 대한 국내 발생 사례를 소개하자면 우면산 산사태를 들 수 있다. 우면산 산사태는 2011년 7월 27일 오전에 발생하였다. 서울지역에 26일 오후부터 비가 300 mm가 넘게 쏟아져 주택과 도로가 침수되었고 강남 일대가 물에 잠기게 되었다. 7월 27일 산사태 발생 3일 전부터 강우가 시작되었는데, 7월 24일 5.5 mm, 7월 25일 20.0 mm, 7월 26일 92.0 mm, 7월 27일 241.5 mm 의 강우량을 기록하였다. 우면산 산사태는 긴 장마기간 동안 산지 사면의 흙이 포화되어 무게가 증가하였고 무거워진 사면이 붕괴되면서 촉발되었다.

설상가상으로 우면산 정상 부근 생태공원 저수지가 붕괴되면서 물이 공급되어 토석류가 발생하게 되었고 이것이 촉매가 되어 피해가 가중되었다. 우면산 정상을 중심으로 여러 방향으로 산사태로 인한 토석류가 발생하여, 결과적으로 16명이 사망하고 2명이 실종되었으며 많은 재산피해를 가져왔다.

아래 사진은 토석류로 인하여 남부순환로가 잔해가 퇴적되어 있는 것으로 이정표 입간판이 아니면 산지 계곡으로 착각할 수 있게 토사가 쌓여 있는 것을 볼 수 있다. 우측의 사진은 남부순환로를 기준으로 우면산 건너편의 아파트인데 3층까지 토석류로 인한 피해를 입어 당시 토석류의 규모를 짐작할 수 있게 해준다.



[사진] 우면산 산사태로 인하여 남부순환로가 토사로 매몰된 모습



[사진] 우면산 산사태로 인하여 우면산 건너편 아파트에 쌓인 토사 잔해

☞ 앞의 발생 사례에서도 살펴보았지만 토석류는 엄청난 인명 및 재산 피해를 가져올 수 있다. 일반적으로 토석류 재해에 대하여 예방 및 피해저감 대책을 생각할 수 있다. 우리나라의 지질학적 여건은 매우 좋은 편으로 외국에 비하여 자연적인 토석류 발생빈도는 매우 낮은 편이다. 그러나 난개발 등을 통하여 산사태 발생 위험을 높이지 않아야 하고 산사태가 토석류의 발생으로 이어지지 않도록 각별히 유의하여야 한다. 피해저감 대책으로는 산사태 발생 가능지역에 변위센서를 설치하여 지속적인 모니터링을 하고 사방댐을 건설하여 하류까지 토사 및 토석류의 이송을 막아야 한다. 또 지역에 토석류의 발생이 예상되는 경우 토석류 예경보 모형을 구축하여 수치모의를 통해 강우량에 따른 발생 가능성과 피해규모를 사전에 예측하여 대피에 활용할 수 있다.

참고문헌

정재승 (2001). 과학콘서트, 동아시아.