

토석류의 정의와 분류



윤 찬 영
강릉원주대학교
토목공학과 조교수
(yune@nukw.ac.kr)



김 경 석
한국도로공사
도로교통연구원 전임연구원



이 재 웅
강릉원주대학교
토목공학과 석사과정

1. 서론

국토의 2/3 이상이 산지로 이루어진 우리나라는 여름철 장마, 태풍, 집중호우 시 사면파괴, 산사태, 토석류에 의한 토사유출로 재산 및 인명피해가 자주 발생한다. 특히 강원 도는 산지 면적이 89%를 차지하는데 2002년 태풍 '루사' 와 2003년 '매미', 그리고 2006년 7월 발생한 '집중호우' 에 의해 전국대비 가장 큰 재산 및 인명 피해가 발생한 바 있다. 최근 전 세계적인 관심사인 지구온난화로 인하여 국 내의 기후특성이 국지성 호우를 유발하는 아열대성 기후 로 변화하고 있다는 기상청의 자료를 참고할 때 강우에 기 인한 토사유출 피해는 앞으로도 증가할 것으로 예상된다.

특히, 계곡부와 소하천을 따라 다량의 토사가 유출되는 토석류는 강우에 기인한 산사태 피해의 대부분을 차지할 정도(박덕근 등, 2000)로 발생 빈도가 높고 큰 피해를 유발 한다는 점에서 특별히 관심을 가질 필요가 있다. 국내에서도 토석류와 관련된 번역서, 연구보고서, 논문 등이 최근 들어 발표되고 있긴 하지만 아직 국내의 토석류 연구역사 는 그리 길지 않고 양적, 질적인 측면에서도 자료가 매우 부 족한 것이 현실이다. 이러한 국내 자료에서는 토석류 현상

을 표현하기 위해 '산사태', '토석류', '토석사태', '이류', '토사류', '계곡형 토석류', '수로형 토석류', '사면형 토석 류' 등의 다양한 용어들이 뚜렷한 정의 없이 사용되고 있는 데 이는 아직까지 토석류를 구분하고 정의하는 방법론이 국 내 연구자들 사이에서 정립되어 있지 않기 때문일 것이다.

토석류 현상에 대해 학술적, 기술적으로 통일되고 체계 적인 접근을 위해서는 토석류 분류를 체계화시키고 용어 를 명확히 정의하는 것이 필요한데, 본 기술기사에서는 국 내 · 외의 토석류 관련 문헌자료를 토대로 토석류 현상의 정의와 분류법 그리고 토석류와 관련된 용어들을 정리해 보고자 하였다.

2. 토석류의 정의

토석류(土石流, debris flow)는 용어 자체에서 알 수 있듯 이 토석의 흐름을 나타내며, 구체적으로는 토석 및 부유물 등 이 중력에 의해 경사면을 따라 흐르면서 형태와 규모가 바뀌 는 동적인 현상이다. 토석류에 대한 체계를 수립하기 위해서 는 현상에 대한 분명한 정의와 명칭이 필요한데 여기에서는

국의 문헌에서 나타난 토석류 현상의 정의를 정리해 보았다.

토석류라는 용어는 오스트리아의 지질학자인 Stiny(1910)가 Die Muren(영문명: debris flow)이라는 그의 저서에서 처음으로 언급하였는데, 그는 부유물과 유사한 다량으로 운반하는 산지의 홍수유출을 토석류로 정의한 바 있다. 미국에서는 Sharpe(1938)가 토석류와 토석사태(土石沙汰, debris avalanche)를 구분하여 정의하였는데, 토석류는 경사가 급한 수로에서 물로 포화된 토석의 흐름현상으로 정의하였고 토석사태는 눈사태(avalanche) 현상과 유사하게 급경사 사면에서 얇은 사면 파괴 토체가 빠르게 흐르는 현상으로 정의한 바 있다.

Varnes(1954, 1978)는 산사태에 포함되는 재료와 운동 형태에 따라 산사태를 분류한 바 있는데, 토석류의 경우 흐름운동(flow)으로 분류하고 재료에 따라 암석류(rock flow), 토석류(debris flow), 토사류(earth flow)로 구분하였다. 암석류(rock flow)는 불연속면을 따라 압곡이 비교적 서서히 움직이는 현상으로서 크립 현상과 유사한 흐름을 일컫고, 토석류(debris flow)는 집중강우나 응설에 의한 급류에 다량의 토석이 섞여 흐르는 현상으로 정의하였으며 토사류(earth flow)는 세립질의 실트, 점토, 점토질 모래에서 발생하는 파괴와 더불어 토체 전체가 액상화되면서 흐르는 현상으로 정의하였다. Varnes는 기존의 토석류와 유사한 토사운동현상을 표현하기 위해 사용하는 용어의 차이도 설명하였는데 토석활동(debris slide)은 비교적 물의 함량이 적고 운동형태가 느린 현상이고, 토석사태(debris avalanche)는 토석활동(debris slide)과는 달리 운동형태가 빠른 현상으로 설명하였다. 이 외에도 물이 없는 건조상태에서의 토사흐름을 나타내기 위해 dry sand flow, dry silt flow라는 용어를 사용하기도 하였다.

영국에서는 Hutchinson(1968)이 Varnes가 구분하여 설명한 토석류와 토석사태에 대응하는 개념으로 수로형 토석류(channelized debris flow)와 사면형 토석류(hillslope debris flow)로 구분하여 정의하였는데, 발생 형태가 쉽게 구분되기 때문에 국내에서도 주로 사용되고 있는 구분방법이다. 사면형 토석류(hillslope debris flow)는 토석활동(debris slide)과 현상적으로 유사한데 사면형 토석류가 함수비가 높고 빠른 흐름의 형태인 반면 토석활동은 상대

적으로 함수비가 작고 이동 속도가 느린 형태로 구분될 수 있다. 하지만 파괴가 발생한 후의 현장조사에서 사면형 토석류와 토석활동을 구분하는 것은 쉽지 않은데, 이에 따라 Hungr 등(2001)은 이 두 가지 형태를 동일한 범주에 포함시켜 토석사태(debris avalanche)라는 하나의 용어로 정의하기도 하였다(표 2참고).

동일한 시기에 몇몇 연구자들은 실트, 점토와 같은 세립질이 많이 포함된 토석류 흐름을 이류(泥流, mudflow)라는 용어로 정의한 바 있으며, 특히 화산폭발로 미세한 입자와 자갈이 물과 완전히 섞여 흐르는 흐름을 화산이류(volcanic mudflow or pyroclastic flow) 또는 lahar라는 용어로 사용하기도 한다 (Blackwelder, 1928; Bull, 1964; Crandell, 1957). 고산지에서 응설과 더불어 많은 유량이 세립분 및 자갈과 함께 흘러내리면서 발생하는 토석류를 고산지 이류(alpine mudflow)라고 정의한 경우도 있다(Broscoe & Thomson, 1969).

캐나다 북서 태평양 연안의 급경사 산지에서는 부유목이 많이 포함된 토석류가 발생하기도 하는데 Swanston(1974)은 이를 토석급류(debris torrents)라고 정의하였으며 이후 캐나다의 Hungr(1984)도 이러한 용어를 사용한 바 있으나 현재는 점차 사용 빈도가 감소하고 있는 듯하다(Slaymaker, 1988).

수리학적 관점에서 토석류를 정의하는 경우도 있는데, 하상유사를 다양 포함하는 홍수와 토석류가 연속적인 연관성을 가지고 있다는 사실에 주목하여 그 중간상태를 고농도류(hyperconcentrated flood)라는 용어로 정의하기도 한다(Beverage & Culbertson, 1964). 오스트리아의 Aulitzky(1980)도 비슷한 관점에서 토석홍수(debris flood)와 토석류(debris flow)를 구분하였는데 토석홍수는 비교적 작은 입자를 포함하며 주된 흐름의 주체가 물인 반면, 토석류는 큰 압편을 많이 포함하며 액상화된 토석이 큰 운동성과 충격력을 가지고 흐르는 현상으로 구분하였다.

국외의 문헌에서 사용되는 이러한 토석류 현상에 대한 다양한 용어 정의는 토석류 구성물질, 흐름속도, 발생형태에 따라 다양하게 표현되고 있으며 국내 상황과 마찬가지로 연구자별로 차이를 나타낸다. 이는 토석류라고 칭하는 현상 자체가 다양한 구성 재료의 흐름 또는 미끄러짐이 계곡부와 경사진 지형 등지에서 다양한 형태로 발생하고 있기 때문이며 전세계의 연구자별로 자신이 관찰한 토석류

현상을 주관적인 관점에서 구체적으로 구분하고자 하는 시도에 기인한 것으로 보인다.

3. 토석류의 분류

토석류에 대한 분류는 앞서 토석류에 대한 정의와 마찬가지로 연구자별로 분류기준에 따라 차이를 나타낸다. 분류기준에서는 토석류의 운동형태 및 속도, 구성 재료, 흐름의 역학적 특성을 사용하고 있는데 여기에는 국외 주요 연구자들이 토석류를 분류하는 방법을 정리해 보았다.

북미지역에서 많이 인용되고 있는 토석류 분류방법은 Varnes(1978)가 제안한 방법인데, 통상 산사태(landslide)로 칭하는 현상을 운동형태와 구성재료에 따라 표 1과 같이 분류하는 방법이다. 토석류는 흐름 운동형태를 나타내는 현상으로 분류된다.

Hungr 등(2001)은 흐름형태의 산사태를 구성물질, 함수비, 주요특징 및 흐름속도를 기준으로 표 2와 같이 분류한 바 있다. 이 분류에서는 Varnes가 제시한 산사태의 분류방법을 더 세분화시켰으며, 북미지역과 유럽에서 토석류 현상의 정의를 위해 사용한 명칭 및 토석 구성 재료를 고려하여 토석류의 분류명칭을 결정하고 있다. 아래에는 각 분류명칭의 특징을 설명하였다.

- 비액상화 흐름(non-liquified flow): 일반적인 사면의 파괴 현상, 구성물질에 따라 '비액상화 모래(실트, 자

갈, 토석) 흐름' 으로 명명함

- 흐름활동(flow slide): 파괴된 토사가 액상으로 변화하면서 흐르는 현상. 구성물질에 따라 '모래(실트, 토석, 암석) 흐름활동' 으로 명명함
- 점토흐름활동(clay flow slide): 함수비가 액성한계보다 큰 상태에서 예민비가 큰 점토가 액상으로 변화하여 흐르는 현상
- 토사류(earth flow): 주로 점토나 세립질이 많은 토사에서 함수비가 충분할 때 발생하는 느린 흐름 파괴현상
- 토석류(debris flow): 물과 비교적 높은 농도로 섞인 암석, 자갈, 모래, 흙 혼합물이 빠르게 흐르는 현상, 수로형 토석류와 사면형 토석류로 나누어지지만 Hungr 등(2001)은 수로형 토석류만을 토석류라고 명명함(그림 1과 그림 2참고)
- 이류(mud flow): 물과 비교적 높은 농도로 섞인 점토, 실트 등의 세립분이 많은 흙 혼합물이 빠르게 흐르는 현상으로 토석류와 유사함
- 토석홍수(debris flood): 점토, 실트등의 세립분이 다량의 물과 함께 섞여 흐르는 현상으로 토석류의 후속류(afterflow)가 토석홍수로 발전하기도 함
- 토석사태(debris avalanche): 부분적 포화 또는 포화된 암석, 자갈, 모래가 경사가 급한 구간을 따라 빠르게 이동하는 현상으로 사면형 토석류와 유사함
- 암석사태(rock avalanche): 비교적 건조한 암석 파쇄물이 빠른 속도로 이동하는 현상

표 1. 사면의 운동현상 분류 (Varnes, 1978)

Types of Movement		Types of material			
		Bedrock	Engineering Soils		
			Predominantly coarse	Predominantly fine	
Falls		Rock fall	Debris fall	Earth fall	
Topples		Rock topple	Debris topple	Earth topple	
Slides	Rotational	few unit	Rock slump	Debris slump	Earth slump
			Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
	Translational	many unit	Rock slide	Debris slide	Earth slide
Lateral Spreads		Rock spread	Debris spread	Earth spread	
Flows		Rock flow(deep creep)	Debris flow	Earth flow (soil creep)	
Complex		combination of two or more principal types of movement			

토석류의 정의와 분류

표 2. 흐름의 형태를 보이는 산사태 분류법(Hungri 등, 2001)

구성물질	함수비	특징	속도	명칭
실트, 모래, 자갈, 토석(애추)	건조, 습함(moist), 포화	과잉간극수압 발생하지 않음 발생부피가 한정됨	다양함	비액상화 모래(실트, 자갈, 토석)흐름 (Non-liquefied sand/silt, gravel, debris)flow
실트, 모래, 토석, 연암	파괴 표면(rupture surface)에서 포화	액상화 가능 물질 일정한 함수비	극히 빠름 (extremely rapid)	모래(실트, 토석, 암석) 흐름활동 (Sand/silt, debris, rock)flow slide
예민 점토 (sensitive clay)	액성한계보다 큼	원위치(in situ) 액상화 일정한 함수비	극히 빠름	점토 흐름활동(Clay flow slide)
도탄, 이탄 (peat)	포화	과잉간극수압 발생	느림에서 매우 빠름 (slow to very rapid)	도탄(이탄)류(Peat flow)
점토(clay)나 토사(earth)	소성한계 근처	느린 이동 Plug flow	빠르지 않음 (less than rapid)	토사류(Earth flow)
토석(debris)	포화	기 형성된 수로 흐름 함수비 증가	극히 빠름	토석류 (Debris flow)
진흙(mud)	액성한계 혹은 그 이상	미립자 토석류	매우 빠름 이상	이류 (Mud flow)
토석(debris)	Free water 존재	홍수	극히 빠름	토석홍수 (Debris flood)
토석(debris)	부분적으로 또는 완전히 포화	수로 형성 없음 상대적으로 알고 가파른 근원지	극히 빠름	토석사태 (Debris avalanche)
암편 (fragmented rock)	다양, 대체로 건조	신선암(intact rock) 큰 체적	극히 빠름	암석사태 (Rock avalanche)

토석류와 같은 흐름운동을 나타내는 현상의 분류를 위한 중요한 구분기준은 재료의 구성물질과 함수비율로 볼 수 있으며 공학적 적용을 위해서는 구성물질과 함수상태를 구분하는 기준이 필요하다. 토석류 구성 물질은 주로 지질구성과 식생상태에 따라 좌우되며 발생지역의 지형, 지질학적 특성, 토석류 이동경로의 경사도 등에 따라 차이가 발생한다(Lister 등, 1984). 구성물질은 주로 입자크기로 구분하게 되는데 실제 토석류에는 매우 미세한 세립질에서부터 큰 암괴까지 다양한 크기의 성분이 포함될 수 있으며 수목이나 나무껍질 등의 유기물질도 포함될 수 있다.

표 3. 산사태의 속도 등급 (Cruden & Varnes, 1996)

속도 등급	명칭	속도 (mm/sec)	전형적인 속도	전형적인 사람들의 반응
7	극히 빠름	5×10^2	5m/sec	반응 없음
6	빠름	5×10^1	3m/min	반응 없음
5	보통	5×10^0	1.8m/hr	피난
4	느림	5×10^{-1}	13m/month	피난
3	매우 느림	5×10^{-2}	1.6m/year	정비(유지관리)
2	극히 느림	5×10^{-3}	1.6mm/year	정비(유지관리)
1				반응 없음

Varnes(1996)의 분류법에서 구성 물질은 큰 입자가 우세한 흙(predominantly coarse soil)을 토석(debris)으로,

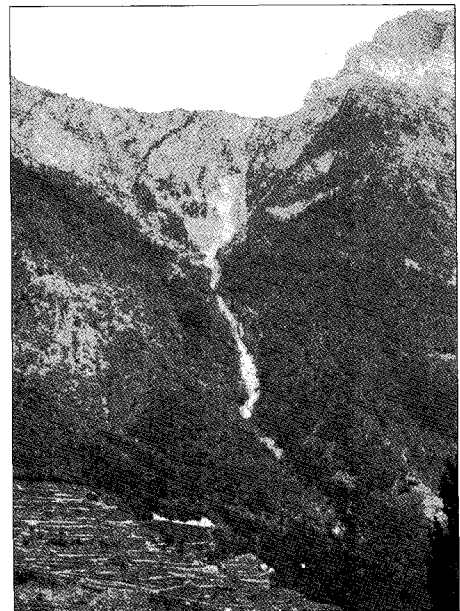


그림 1. 스위스 풀리(Fully)지역에서 발생한 수로형 토석류 (2000, www.quanterra.org/guide/guide1_9.htm)

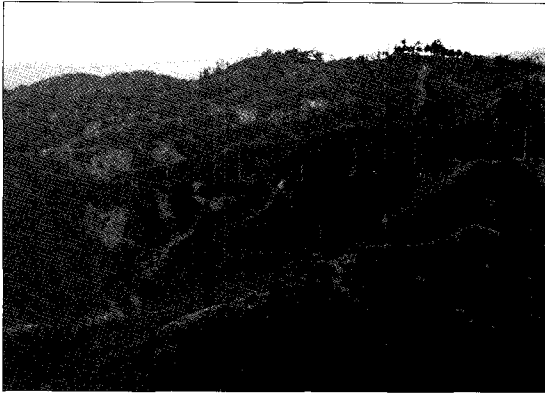


그림 2. 태풍 루사로 강릉 사천지역에서 발생한 사면형 토석류 (2002, 사진제공 - 서홍석)

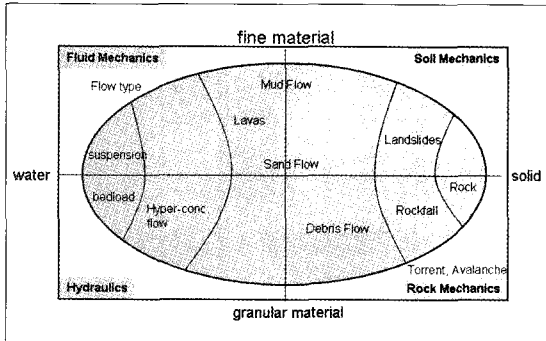


그림 3. 입자크기와 물의 혼합정도에 따른 토석류의 구분

작은 입자가 우세한 흙(predominantly fine soil)을 토사(earth)로 구분하고 있는데 이는 각각 자갈을 포함한 굵은 크기의 입자를 20%이상 함유한 흙과 굵은 크기의 입자를 20%미만 함유한 흙으로 구분된다.

Hungr 등(2001)은 이러한 분류가 임의적인 것이며 따라서 지형학적 관점에서 구성 물질을 토석(debris), 토사(earth), 진흙(mud)의 세 가지로 분류할 것을 제안하였는데 토사(earth)는 함수비가 작고(소성한계에 가깝고) 점토질 입자에서부터 풍화암까지 뒤섞여 있는(unsorted) 붕적토를 말한다. 토질역학적 분류관점에서는 점토, 실트, 모래, 자갈 등이 포함된다. 진흙(mud)은 '상당한 소성성을 지니고(소성지수 5%이상), 액성지수가 활동 중에는 50%이상인 부드럽고 재성형된(remoulded) 점토질 흙'이라고 설명했으며, 예민비가 작고 굳은(stiff) 혹은 건조한 점토질 흙이 사면의 운동 중에 진흙으로 바뀌기 위해서는 함수비가 액

성한계 혹은 그 이상으로 증가될 수 있도록 지표수와의 빠른 혼합이 필요하다고 하였다. 토석(debris)은 소성성이 없고 느슨하게 섞인 흙의 혼합물로서 흙의 파괴(붕적토), 풍화(잔적토, residual soil), 빙하 이송, 화산폭발, 혹은 인간 활동(광산개발)으로 생성된다. 토석은 용어에서 흙과 암을 의미하지만 그 외에도 나무, 나무뿌리, 덩불 등 상당한 비율의 유기물을 포함할 수도 있다.

함수비도 매우 중요한 구분기준인데, 함수비가 낮으면 고체의 운동에 가까운 낙석, 활동, 사태(fall, slide, avalanche) 현상이 발생하고, 함수비가 높으면 흐름(flow)현상 그리고 유량이 훨씬 많으면 고농도 흐름(hyperconcentrated flow), 홍수(flood) 형태로 변화하게 된다. 그림 3에는 흐름운동을 나타내는 산사태에 있어 흙입자 크기와 물의 혼합정도에 따라 발생하는 현상을 구분지어 나타내었다. 함수비는 흙과 물의 용적농도비(volumetric concentration, $C_v = V_s/V$) 또는 질량비(mass ratio, $N_{mass} = \rho_s V_s / \rho_f V_f$)로 정의할 수 있는데, 토석류의 경우 용적농도비는 약 0.4~0.8을 갖는 것으로 알려져 있다(Iverson, 1997). 용적농도비가 0.4미만인 경우는 물의 함량이 많은 상태로서 고농도흐름 형태로 변화하게 되고, 용적농도가 0.8이상이 되면 거의 고체상태에 가까운 활동(slide) 형태의 흐름운동을 나타내게 된다.

4. 토석류 특징과 관련 용어

토석류는 일반적으로 외부요인에 의해 시작된 토석이 중력에 의해 하부로 이동하게 되고 지형이 완만해지면 퇴적되면서 세립분을 포함한 유량이 유출되는 과정을 거치게 된다. 여기에서는 이러한 일련의 과정에서 토석류 특징과 관련 용어들에 대해서 설명하고자 한다.

그림 4에 나타난 것처럼 토석류(debris flow)는 시작부(발생부, initiation zone), 이송부(transportation zone), 퇴적부(deposition zone)의 세부분으로 나누어진다.

토석류의 시작은 집중강우에 의한 자연산지의 파괴, 계곡이나 소하천의 침식, 응설, 화산폭발에 기인하며 국내에서는 여름철 집중강우 시 지형경사 20°~45° 범위의 사면에서 발생한 파괴에 기인하여 주로 발생하고 있다. 토석류

토석류의 정의와 분류

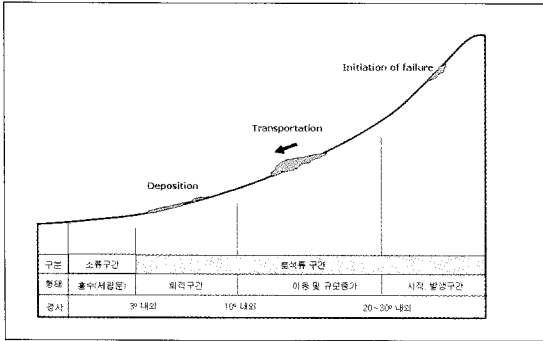


그림 4. 토석류의 시작과 이동 및 퇴적

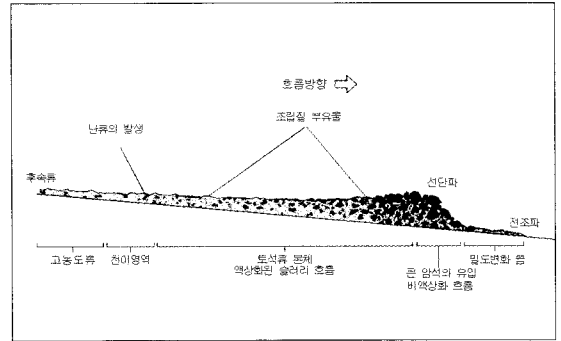


그림 5. 토석류의 형태

정의와 분류에서도 언급했듯이 토석류는 다량의 토사가 계곡 수로를 통해 흘러내리는 수로형 토석류(channelized debris flow 또는 confined debris flow)와 사면을 따라 흘러내리는 사면형 토석류(hillslope debris flow 또는 open slope debris flow)의 형태로 구분된다. 때로는 사면형 토석류 또는 토석사태(debris avalanche, debris slide, earth slide)가 계곡을 흐르는 물과 합쳐지면서 수로형 토석류로 발전하기도 한다.

시작부 파괴규모는 유출지점에서 토석부피(debris volume)로 정의되는 토석류 규모(magnitude of debris flow)에 큰 영향을 주는데, 이송부에서의 계곡부 토석의 침식과 이동 중의 토석 퇴적 여부에 따라 수십 m³ 규모의 시작부 토석활동이 계곡 유출부에서는 매우 큰 규모의 토석류로 발전하기도 한다. 시작부 파괴규모는 강우특성에 의해서도 달라질 수 있는데, 유발강우기준(triggering rainfall threshold)을 초과하는 강우시 하나의 사면파괴에 의해 토석류가 시작되기도 하지만 여러 지점에서 동시 다발적으로 시작부가 형성되어 토석류로 발전하기도 한다.

시작부의 토석활동(debris slide, earth slide) 물질은 하부로 이동하면서 점차적으로 가속되며 지표수와 섞이면서 유사흐름운동(flow-like motion)을 나타내고 이동 경로상의 포화된 표토와 지표수를 연속적으로 끌어들이면서 체적이 증가하고 함수비도 역시 증가하게 된다. 이동과정 중에 계곡을 흐르던 물과 합쳐지면 바닥면과의 마찰저항이 감소하여 토석류의 운동성(mobility)이 증가하게 되며 계곡을 따라 긴 거리를 이동하게 된다.

이송부에서 토석류의 최전면부에는 상대적으로 함수비

가 적고 굵은 입자가 모인 파도형태의 선단파(front surge, bouldery front)가 형성되는데 이는 쓸과 콩을 섞은 통에 진동을 주면 입자크기가 큰 콩이 표면으로 모이는 현상과 유사한 현상이며 토석류 흐름 내부에서 입자간 충돌(particle collision)과 흐름과 계곡 경계부 마찰저항에 의한 흐름내 유속차이에 기인하여 발생한다. 토석류 선단파에는 이동경로 상에서 포함되는 수목과 목초가 포함되기도 한다.

선단파가 흘러내려오기에 앞서서는 전조파(precursory surge)가 흐르게 되며 선단파의 뒤에는 점차적으로 입자가 작은 액상화된 토석(liquefied debris)으로 이루어진 토석류의 본체에 이어서 후속류(afterflow)가 흐르게 된다(그림 5 참고). 후속류는 토석홍수(debris flood) 혹은 고농도류(hyperconcentrated flow)와 같이 세립분이 충만한(heavily sediment-charged) 흐름과 유사하다. 미세입자로 이루어진 토석류(또는 이류)나 토석홍수의 경우에는 큰 암석이 섞인 선단파가 없으며 토석류 본체는 층류(laminar)의 형태를 보이고 선단파는 난류선단부(turbulent front)를 형성한다(Davies, 1986; Takahashi, 1991).

계곡이 여러 갈래로 발달한 유역에서는 한번 이상의 토석류가 발생하기도 하며 수차례의 연속적인 선단파가 파도와 같은 형태로 발생할 수도 있다. 이렇게 계곡내에서 토석류가 이동하면서 수로주변에 남는 진흙선(mud line) 또는 수목파괴흔적(trim line)은 토석부피(debris volume)와 첨두토석유출량(peak debris discharge) 그리고 토석류심도(debris flow depth)와 토석류속도(debris flow velocity)를 산정하는데 간접적으로 고려해야 하는 사항이다. 계곡 이동 과정 중에 침식되는 토석량은 수로의 단위길이당 흐

름에 유입되는 토석수득율(debris yield rate, m^3/m)로 정의되고, 토석수득율을 수로 윗변의 상부쪽으로 나누면 평균 침식두께의 의미를 갖는 침식깊이(erosion depth)를 계산할 수 있다.

토석류 이동경로의 지형경사가 약 $4\sim 10^\circ$ 미만으로 완만해지거나 수로폭이 급격히 확대 또는 하천이나 저수지와 만나면 흐름에 포함되어 있던 큰 입자의 퇴적이 발생하게 된다. 이는 토석류의 흐름을 유지시키던 에너지가 급격히 감소하여 유속이 감소하면서 큰 입자와 흐름경계의 마찰 저항이 증가하거나 선단파의 형태가 급격히 붕괴되기 때문이다. 퇴적형태는 매우 불규칙하기도 하지만 선단파를 이루던 큰 입자들이 말발굽 형태로 가장자리에 이랑 혹은 제방(levee)형태로 먼저 퇴적되고 뒤이어 흐르는 후속류에 포함되어 있던 작은 입자가 제방안쪽에 퇴적되는 토석류 선상지(debris fan)를 형성하는 것이 일반적이다.

지속되는 토석류는 기존의 토석류 본체가 멈춰선 제방을 붕괴시키거나 넘어가 다시 말발굽형태의 표적열 퇴적지(漂礫列堆積地, boulder train deposit)를 형성하는데 이러한 과정이 선상지에서 수차례 반복되면서 토석류선상지 정점(debris fan apex)에 인접한 부근에서는 굵은 입경의 물질로 두꺼운 퇴적지를 형성하고 먼 부근에서는 입경이 작은 물질들의 얇은 퇴적지를 형성하게 된다. 세립분이 많은 후속류(afterflow)는 토석류선상지의 끝까지 이동하고 그 이후 하류의 하천으로 유입되어 토석홍수(debris flood)로 발전되어 흘러가기도 한다. 많은 토석류 퇴적지 및 수로는 이와 같이 후속류의 흐름으로 인해 재침식되거나 변형되는데 토석류선상지나 퇴적현장에 대한 현장 조사 시에는 이러한 퇴적 및 침식, 변형 과정을 이해하고 있어야 한다.

위에서 살펴보았듯이 토석류 현상과 관련된 용어들은 지질학, 수리학 등 관련분야에서 사용하던 용어와 이를 약간 변형시킨 용어들이 사용되고 있고 의미를 충분히 나타낼 수 있도록 서술형으로 나타내는 경우도 있다. 여기서는 토석류의 주요 특징을 나타내는 일부 용어들만 정리한 것이며 보다 세부적인 내용은 기사말미의 참고문헌을 참고하기 바란다.

토석류 현상의 정의, 토석류의 분류 및 토석류 현상과 관련된 용어들을 국내외의 여러 문헌자료를 참고하여 정리해 보았다. 토석류는 흐름운동의 형태를 갖는 산사태의 일종으로 분류되고 있는데 연구자별로 지역적인 토석류 관찰을 통해 다양한 용어를 사용하고 각 용어에 대한 정의도 약간씩 차이가 있다. 최근에는 전 세계적으로 기후변화와 더불어 발생하는 토석류 관련 연구들이 활발히 이루어지고 있는데 이론적, 실험적 연구 성과들이 정리되고 관련 용어나 정의도 점차적으로 정립되어 가는 단계에 있는 듯하다.

국내에서도 이러한 국외의 기존 분류법이나 연구결과들을 토대로 더욱 심도 있는 연구를 수행하고 국내 토석류 재해 자료를 확보하여 우리나라의 토석류 피해 유형이나 특성들을 체계적으로 정의, 분류하는 작업이 필요할 것이며 빈번하게 반복되는 토석류 재해를 최대한 예방하고 저감시켜 인명 및 재산 피해를 줄이도록 노력해야 할 것이다.

본 기술기사는 국토해양부 지역기술혁신 사업의 연구비 지원('08지역기술혁신 B01-01)을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박덕근, 심재현, 김운태 (2000), 산불로 인한 동해안의 사면붕괴 위험성 및 2007년 7월 호우로 인한 산사태 현장조사, 대한토목학회 학술발표회, pp. 159-162.
2. Aulitzky, H. (1980) preliminary two-fold classification of debris torrents. In: Proceedings of "Interpraevent" Conference, Bad Ischl, Austria (Vol. 4, pp. 285-309, translated from German by G. Eisbacher). Internationale Forschungsgesellschaft, Interpraevent, Klagenfurt.
3. Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1984) Dictionary of Geological Terms (3rd edn), Doubleday, New York.
4. Beverage, J. P. and Culbertson (1964) Hyperconcentrations of suspended sediment, ASCE Journal of the Hydraulics Division, Vol. 90, pp. 117-126.
5. Blackwelder, E. (1928) Mudflow as a geologic agent in semi-arid mountains, Bulletin of the Geological

5. 결론

토석류의 정의와 분류

- Society of America, Vol. 39, 465-484.
6. Broscoe, A.J. and Thomson, S. (1969), Observations on an alpine mudflow, Steele Creek, Yukon, Canadian Journal of Earth Science, Vol. 6, pp. 219-229.
 7. Bull, W. B. (1964) Alluvial Fans and Near-surface Subsidence in Western Fresno County, California (USGS Professional Paper 437-A), USGS.
 8. Costa, J. E. (1984) Physical geomorphology of debris flows, Developments and Applications in Geomorphology, Springer Verlag, New York.
 9. Crandell, D.R. (1957) Some features of mudflow deposits, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 18, pp. 18-21.
 10. Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996) Landslide types and processes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster(eds), Landslides Investigation and Mitigation (Special Report 247, pp. 36-75). Transportation Research Board, US National Research Council, Washington, DC.
 11. Davies, T.R.H. (1986) Large debris flows: A macroviscous phenomena, Acta Mechanica, Vol. 63, pp. 161-178.
 12. Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., and Hutchinson, J.N.(2001) Review of the classification of landslide of the flow type. Environment and Engineering Geoscience, VII, 221~238.
 13. Hutchinson, J.N. (1968) Mass movement. In: R.W. Fairbridge(ed.), Encyclopedia of Geomorphology (pp. 688~695). Reinhold, New York.
 14. Hutchinson, J.N. (1988) General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Vol. 1, pp. 3-36.
 15. Iverson, R.M. (1997) The physics of debris flow, Reviews of Geophysics, Vol. 35, No. 3, pp 245-296.
 16. Jordan R.P. (1994) Debris flows in the southern Coast Mountains, British Columbia: Dynamic behaviour and physical properties, Ph.D. thesis, Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver.
 17. Lister, D. R., Morgan, G. C., VanDine, D. F., and Kerr, J. W. G. (1984) "debris torrents in Howe Sound, British Columbia", Proceedings, 4th International Symposium on Landslide, Toronto, Vol. 1, pp.649~654.
 18. Okuda, S., Suwa, H., Okinishu, K., Yokoyama, K. and Nakano, M. (1980) "Observations on the motions of Debris flow and its geomorphical effects," Gedmorph, N. F., Supp. 1, Vol. 35, pp. 142~163.
 19. Pierson, T.C. (1986), Flow behaviour of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. Hillslope Processes, Allen & Unwin, Boston.
 20. Scott, K.M., Pringle, P. T., and Villance, J.W. (1992) Sedimentology, Behavior and Hazards of Debris Flows at Mt. Rainier, Washington, Open-File Report 90-385, USGS.
 21. Sharpe, C.F.S. (1938) Landslide and Related Phenomena, Columbia University Press, New York.
 22. Slaymaker, O. (1988) The distinctive attributes of debris torrents. Hydrological Sciences Journal, 33, 567~573.
 23. Stiny, J. (1910) Die muren. Verlag der Wagner'schen Universitäts-buchhandlung, Innsbruck. [Debris Flows (English translation by M. Jakob and N. Skermer, 1977, 106 pp.), EBA Engineering Consultants, Vancouver, Canada.]
 24. Swanston, D.N. (1974) Slope Stability Problems Associated with Timber Harvesting in Mountainous Regions of the Southwestern United States (Forest Service General Technical Report PNW-201). US Department of Agriculture, Washington, DC.
 25. Takahashi, T. (1991) Debris Flow, p. 165, A.A. Balkema, Rotterdam.
 26. Varnes, D. J. (1954) Landslide Types and processes, Landslide and Engineering Practice, HRB Special Report 29, pp. 20~47.
 27. Varnes, D. J. (1978) Slope movement types and processes, Landslides, Analysis and Control, Special Report 176, pp. 11-33, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, DC.