

토석류 흐름 상태 특성 파악을 위한 모형실험 연구

A Study on Model Tests for Debris Flow Characteristics

김기환¹⁾ · 이동혁²⁾ · 김대회³⁾ · 이승호[†]

Kim, Kihwan · Lee, Donghyuk · Kim, Daehoe · Lee, Seungho

ABSTRACT : This study is to figure out the speed of soil diffusion and shapes as well when landslide occurred. It was measured the speed and shapes of soil diffusion using installed indoor-simulation of a land slide. Standard sand was used to measure it and this measurement is following the moisture content of standard sand. The result of this experiment follows the moisture content; as the moisture content goes up, the area and speed of soil diffusion goes faster as well. As the average of records by the moisture content was analyzed, the area and speed of land slide are increased proportionally. The shape of diffusion is formed as fanwise. It depends on the moisture content as above; the speed was fast when the moisture content is high, and it was getting narrower and longer as the speed of diffusion was faster.

Keywords : Debris Flow, Shape of Diffusion, Speed of Soil Diffusion

요 지 : 본 연구에서는 산사태 발생시 토석류 확산(퍼짐) 형태 및 흐름 속도를 알아내기 위하여 실내 모형 산사태 흐름장치를 구성하고 주문진 표준사를 이용하여 함수비에 따라 산사태를 발생시켜 산사태의 확산(퍼짐) 범위와 흐름 속도를 측정하였다. 산사태 흐름시험 결과에서 함수비가 높을수록 확산 범위가 넓게 퍼졌고 확산 속도 또한 빠르게 기록되었다. 함수비별로 기록된 값의 평균을 구하여 분석한 결과 함수비에 비례하여 산사태의 확산 범위와 속도가 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 일반적으로 확산(범위) 형태는 부채꼴 모양으로 나타났으며, 함수비가 높아짐에 따라 확산 속도가 빠르게 나타났고, 확산 속도가 빠를수록 확산 폭이 좁으면서 길게 퍼지는 형태로 나타났다.

주요어 : 토석류, 확산형태, 흐름속도

1. 서 론

우리나라 국토의 대부분은 산악지형으로 이루어져 있어 산업 및 도시의 발달에 따른 새로운 택지조성, 도로개설 및 산업기지 건설, 대규모 주택단지 개발 등으로 자연 사면을 변형시키는 규모나 빈도가 증가하고 있다. 최근에는 기상이변에 의한 집중호우가 빈번히 발생하여 산사태 및 사면붕괴에 대한 관심과 경각심이 더욱 고조되고 있다. 매년 여름철이면 태풍을 동반한 장마와 호우로 인하여 절취 사면 붕괴 및 자연사면에서의 산사태로 이어져 인명피해 및 막대한 재산피해를 초래하고 있다. 우리나라에서 발생하는 산사태의 발생원인은 대부분 강우에 의한 경우가 대부분이다. 우리나라의 연평균 강우량은 1,274mm에 해당하고, 기후적으로 온대몬순지역에 위치하고 있어 6~8월 3개월 사이에 전체의 2/3에 해당하는 양이 장마와 태풍에 의해 집중되고 있다. 따라서 해마다 여름철에는 집중호우에 따른 홍수재해에, 나머지 계절에는 수자원 량이 부족한

갈수재해에 노출되어 있는 지역이라고 할 수 있다. 대부분의 산사태는 우기에 집중적으로 발생되므로 강우가 산사태의 가장 큰 요인임을 예측 할 수 있다(이승호, 2007).

많은 비가 오게 되면 산지가 붕괴되어 계곡을 따라 돌과 흙, 그리고 물이 혼합되어 흐르면서 인근에 위치한 도로나 교량, 민가 등을 파괴하고 많은 인명피해를 유발시키는 것이다.

이는 사전에 산사태 발생여부를 미리 알지 못하여 특히 인명 피해가 많이 발생한다. 산사태로 인하여 피해가 발생하는 범위를 미리 예측한다는 것은 쉽지 않다. 그러나 본 연구에서는 산사태로 인하여 피해가 발생하는 확산 범위와 토석류의 속도의 특성을 알아내는 것이 연구목적이다(이동혁, 2008).

2. 토석류 관련 문헌 고찰

2.1 토석류 정의와 분류

오랫동안 풍화작용을 받아 흙과 암석이 많이 생긴 산이

1) 정회원, 삼지대학교 공과대학 토목공학과 외래교수

2) 비회원, 청담고등학교 3학년

3) 비회원, 삼지대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

† 정회원, 국토해양부 낙석 및 산사태 방재연구단장(E-mail : shlee@sangji.ac.kr)

폭우나 장마로 인해 물로 포화되어 그 무게가 마찰력을 지탱하지 못하여 흘러내리는 현상이다. 장년기 지형 산에서 때때로 일어나는 산사태의 일종이고 한번 토석류가 발생한 곳에는 바닥의 암반이 나타나서 새로운 토양이 되어 식물이 무성해질 때까지 오랜 시간이 걸린다. 주로 지역적인 지질학적 구성과 식생의 상태에 따라 좌우되며, 발생지역의 지형, 지질학적 특성, 경사도 등에 따라 다양한 물질로 구성되며 크기는 세립질로부터 암괴 크기까지 다양한 크기를 보인다.

토석류의 분류는 포함되는 재료에 따라 토석류(debris flow), 토사류(sand flow), 이토류(mud flow)로 구분된다. 흙의 분류기준인 통일분류법(USCS)에 따르면 약 5mm 이상의 입자가 50% 이상 포함되면 토석류로 분류할 수 있고 0.0075mm 미만의 입자가 50% 이상이면 이토류로 분류할 수 있으며 이 중간상태를 토사류로 분류한다.

토석류는 유체와 흙의 혼합비율에 따라 흐름 특성이 달라지는데 용적농도비(volumetric concentration, $C_d = V_s/V$) 또는 질량비(mass ratio, $N_{mass} = \rho_s V_s / \rho_f V_f$)로 이 혼합비율을 정의할 수 있으며 토석류의 용적농도비는 0.4~0.8 범위를 가지는 것으로 알려져 있다. 용적농도 0.4미만인 경우 흙입자가 흐름의 바닥에서 이동하는 소류(bedload transport) 상태가 되고 용적농도 0.8 이상이 되면 거의 고체 상태에서 산사태와 같이 흐름특성보다는 전단파괴상태가 지배적이게 된다.

토석류는 발생형태에 따라서 계곡을 따라 이동하는 계곡형토석류(channelized debris flow)와 사면에서 발생하여 하부로 이동하는 사면형 토석류(open slope debris flow)로 구분하기도 한다. 계곡형 토석류는 계곡을 따라 먼 거리를 이용하면서 규모가 증가하며 이동경로와 하부에 매우 큰 피해를 야기한다. 사면형 토석류는 계곡부가 아닌 사면부에서 발생하여 사면하부로 이동하는 형태로서 비교적 이동거리가 짧다. 사면형 토석류는 계곡형 토석류의 초기파괴형태로 간주되기도 한다. 토석류 규모나 흐름속도에 따라 분류하기도 한다(Jakob, 2005; Varnes, 1978).

2.2 토석류 메커니즘

2.2.1 토석류의 시작(initiation)

토석류의 시작은 지형경사가 급한 산악 구간에 집중 강우 발생시 (가) 자연사면 파괴, (나) 계곡바닥과 측면의 세굴 및 침식, (다) 자연 토사댐의 붕괴에 기인하여 시작되는 것으로 알려져 있다(Takahashi, 2007). 시작 형태에 따라 토석류의 규모와 흐름특성도 달라지지만 각각의 시작 메커니즘을 정확히 규명하는 것은 여전히 연구단계에 있으

며 신뢰성 있는 예측과 해석을 실용적으로 적용하기는 아직 어려운 상태이다.

사면의 전단파괴에 기인한 토괴가 비교적 완만한 경사에서도 토석류로 발전하는 현상은 토질역학적 관점에서 설명되고 있다. 파괴토괴가 지속적으로 이동하는 것은 전단변형에 의한 흙의 체적변화와 이에 따른 과잉간극수압의 발생과 관련이 있다. 체적감소가 발생하는 흙내에서는 파괴 순간 비배수상태에서 과잉간극수압이 발생하며 이로 인한 전단강도의 감소는 토괴의 진행성 파괴를 가속화시키게 된다(Anderson and Sitar, 1995). 하부로 이동하기 시작하는 토괴는 파괴구간 하부의 표층층에 비배수 하중(undrained loading)을 가하게 되며 토괴의 이동경로에 있는 표층부도 같이 파괴되고 이동하는 토괴의 규모는 점차 증가하게 된다. Sassa(1985)는 점토에서의 압밀모델과 유사한 압밀-전단 모델(consolidation-shear model)로서 이를 설명하고 있다.

2.2.2 토석류의 이동(transport)

토석류의 이동은 계곡의 지형경사와 계곡형태, 지반특성, 혼합물의 특성, 기존 계곡을 흐르는 유량, 장애물의 여부 등에 따라 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 토석류의 이동과 관련된 주된 연구는 침투 토석 유량과 토석류 유속, 토석류 수심을 예측하는데 중점을 두고 있다. 토석류 흐름 특성 규명을 위해서는 토석류 흐름내의 전단거동특성을 알아내는 것이 매우 중요하다. 수리학적 관점에서 토석류 흐름을 점성유체(Non-Newtonian fluid model) 또는 초기전단저항력을 가진 점성유체로 가정하는 Bingham fluid model 이 가장 많이 연구된 바 있다. 하지만 점성유체모델은 토석류의 흐름이 유체에서부터 고체 상태에 이르기까지 다양한 상태로 변화할 수 있는 특성을 설명하지 못하는 단점이 있다.

토석류 흐름특성을 설명하는 보다 일반화된 이론은 Iverson (1997)이 체계화시킨바 있다. 그는 연속체혼합물이론(continuum mixture theory, Atkin and Craine, 1976)을 수정하여 비압축성 간극유체와 고체의 질량보존법칙, 모멘텀 보존법칙으로부터 지배방정식을 유도하고 흐름이 정지해 있을 때와 관성력이 지배적인 운동상태에서 유체와 고체 혼합물의 흐름을 설명하였다. 그는 토석류 흐름내에 포함된 고체 입자간 충돌에 의한 모멘텀 전달이 간극유체에 과잉 간극수압을 발생시키며 발생된 간극수압에 의해 토석류 내의 마찰저항이 감소하면서 토석류가 매우 긴 거리를 빠른 속도로 이동하는 것이라고 설명하고 있으며 유속이 감소하면 입자간 충돌에 의해 간극유체에 발생하는 과잉간극수압이 감소하게 되고 마찰저항력이 증가되어 토석류의 퇴적이

발생하는 것으로 설명한 바 있다.

이 이론은 토석류의 흐름과정 중에 추가 또는 퇴적되는 고체질량의 변화량, 토석류 흐름거동, 퇴적거동을 직관적으로 설명하기는 유용하지만 고체입자와 유체사이의 모멘텀 전달과 이로 인해 토석류 내에 발생하는 과잉간극수압을 정량적으로 산정하기가 매우 어렵다는 점에서 실질적으로 이용되지는 못하는 실정이다. 이론적인 토석류 흐름에 대한 연구는 토석류가 유체와 고체사이의 상태에서 변화한다는 점과 토석류가 반고체 상태에서도 긴 거리의 완만한 경사면을 빠른 속도로 이동하는 이유를 잘 설명하고 있다. 하지만 이론적인 연구는 아직도 지속적인 연구단계에 있으며 실용적인 적용은 더 많은 자료의 축적과 실무적용을 위한 특성값의 조사와 시험방법에 대한 규정이 필요할 것으로 보인다.

2.2.3 토석류의 퇴적(deposition)

토석류의 퇴적은 지형경사가 완만한 구간이나 계곡 폭이 넓어져 수심이 감소하는 지점에서 발생하기 시작한다. 즉, 토석류를 이동시키는 관성력이 감소하거나 토석류 내에 포함된 입자를 이동시키는 유체의 소류력이 감소하면 입자의 이동이 멈추게 되어 퇴적이 발생한다. 계곡에 갇혀 흐르는 토석류 흐름의 횡방향 속도분포는 계곡의 좌우측이 작고 가운데가 가장 큰 형태를 나타내는데 이러한 속도분포는 흐름의 가운데에 있는 입자들을 흐름의 가장자리로 이동시키게 되고 이동된 큰 암석들은 작은 유속으로 인하여 계곡의 양쪽에 퇴적되기도 한다. 토석류에 포함된 입자 퇴적에 대한 이론적인 설명은 아직까지 명확하지 않다. 지형경사가 완만해지면 중력에 의한 관성력이 작아지므로 유속이 감소하게 되고 토석류 흐름자체의 점성(Bingham model의 경우) 또는 토석류 내에 포함된 입자간 마찰저항(Iverson Model인 경우)이 저항이 증가하며 입자들의 흐름은 멈추고 세립분을 포함한 물만 흐르는 것으로 이해할 수 있다. 토석류의 퇴적은 침강에 의한 자중압밀과 유사한 현상으로 이해하기도 한다(Davis, 2000).

3. 실내 모형 산사태 흐름 시험

3.1 실내 모형 산사태 흐름 시험 장치

함수비에 따른 산사태의 확산 범위 및 속도와의 관계를 파악하기 위해서 많은 실험을 쉽게 할 수 있도록 작은 크기로 제작을 하였고, 고속카메라로 산사태의 흐름 속도를 측정해 보았으나, 좀 더 정확한 속도 측정을 위해 레이저 동작 감지 센서(①)를 산사태 채널장치의 상부와

하부에 각각 설치하여 산사태가 일어날 때 상부의 동작 감지 센서를 지나면서 타이머가 작동하도록 하고 산사태가 하부의 동작 감지 센서를 지나면서 타이머를 멈추게 하여 산사태의 흐름 속도를 효과적으로 측정할 수 있도록 하였다.

또한 넓은 확산 범위 측정을 하기 위하여 120cm×90cm 크기의 아크릴판(두께 : 10mm)을 이용하였고, 정확한 측정을 위해 흐름 관측판의 각 모서리에 수평계(②)를 설치하여 흐름 관측판의 수평을 확인 할 수 있도록 하였다.

실내 모형 산사태 흐름장치는 크게 시료 방류부, 산사태 채널 장치, 흐름 관측판으로 구성되어 있다. 산사태 채널 장치(③)는 산사태가 발생하는 부분으로 총 길이 65cm로 제작하였으며, 흐름 관측판(④)은 10cm 간격으로 눈금을 표시 하여 쉽게 눈으로 확산 범위를 측정할 수 있도록 하였다(그림 1).

3.2 실내 모형 산사태 흐름 시험 방법

함수비에 따른 흐름 특성을 연구하기 위해 모형 산사태 흐름장치의 각도는 30°로 고정하고, 시료 방류부에 주문진 표준사 2000g을 넣고 물을 각각 600g, 700g, 800g, 900g, 1000g, 1100g, 1200g, 1300g 등으로 섞어 10회씩 산사태 모형 흐름 시험을 하였다.

이는 흙의 중량에 대한 물의 중량의 백분율인 함수비가 각각 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%이다.

시료방류부에 주문진 표준사와 물을 실험 비율로 섞은 후 시료방류 도어를 열어 산사태를 발생시켜 산사태의 확산 범위와 흐름 속도를 측정한다(그림 2).

3.3 시험 결과 분석

함수비 30%(표준사 약 2000g, 물 약 600g)일 경우는 1차

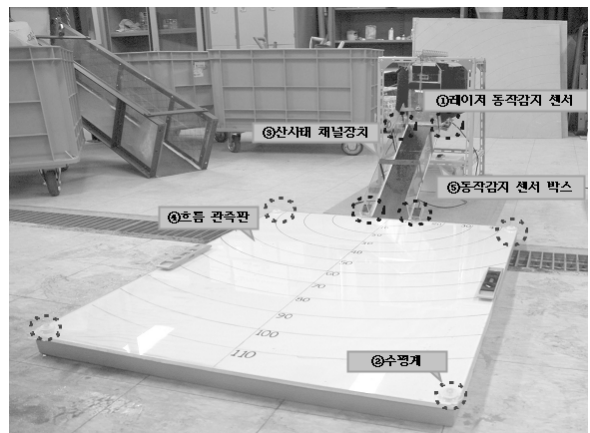


그림 1. 실내 모형 산사태 흐름장치



① 표준사와 물을 실험 비율로 무게를 측정한다.



② 표준사와 물을 실험 비율로 잘 섞는다.



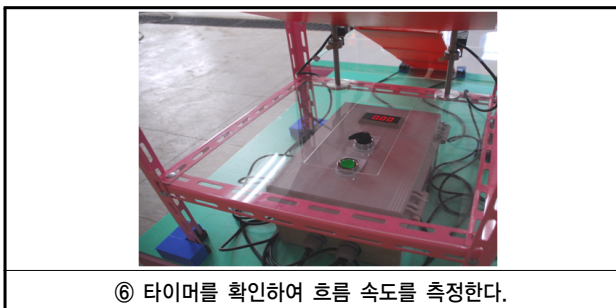
③ 시료방류 도어를 열어 산사태를 발생시킨다.



④ 시료 방류부에서 흘러나가는 표준사와 물



⑤ 산사태의 확산 범위를 측정한다.



⑥ 타이머를 확인하여 흐름 속도를 측정한다.

그림 2. 실내 모형 산사태 흐름 실험 순서

산사태 흐름 장치의 시험때와 마찬가지로 흐름의 영향을 줄 수 있을 정도의 시료 상태가 나타나지 않아서 산사태의 흐름을 확인할 수가 없었다(그림 3).

함수비가 35%(표준사 약 2000g, 물 약 700g)인 경우는 산사태 흐름 속도가 비교적 느리게 측정이 되었고, 확산범위가 평균 12.4cm의 부채꼴 모양으로 확산되었음을 알 수 있었다(그림 4).

함수비가 40%(표준사 약 2000g, 물 약 800g)인 경우는 산사태 흐름 속도가 평균 34.6cm/s로 함수비가 35%인 경우보다 비교적 빠르게 측정이 되었으며, 확산범위는 평균 26.4cm의 부채꼴 모양으로 확산되었다(그림 5).

함수비가 45%(표준사 약 2000g, 물 약 900g)인 경우는 산사태 흐름 속도가 평균 43.8cm/s로 측정이 되었으며, 확산범위는 평균 44.6cm로 물갈퀴 모양으로 확산되었다(그림 6).

함수비가 50%(표준사 약 2000g, 물 약 1000g)인 경우는

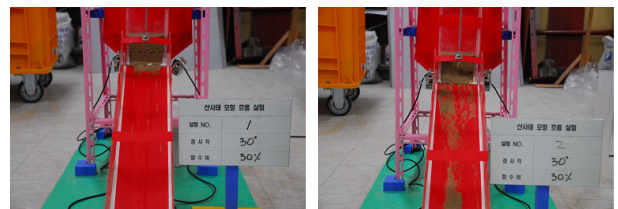


그림 3. 표준사 2000g과 물 600g을 섞은 상태(함수비 30%)

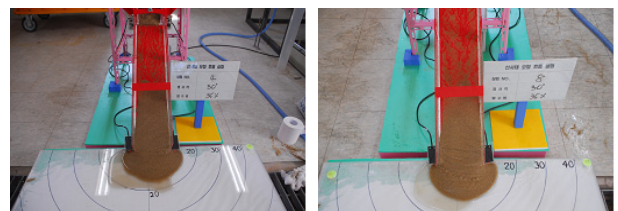


그림 4. 표준사 2000g과 물 700g을 섞은 상태(함수비 35%)

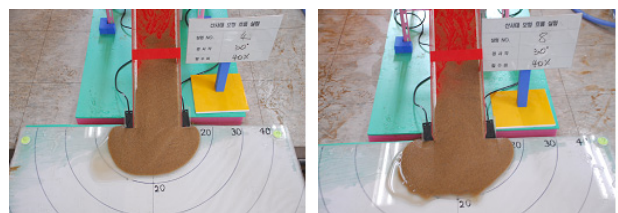


그림 5. 표준사 2000g과 물 800g을 섞은 상태(함수비 40%)

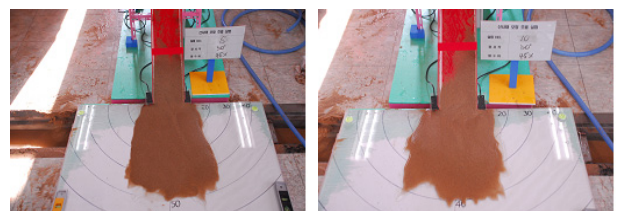


그림 6. 표준사 2000g과 물 900g을 섞은 상태(함수비 45%)

산사태 흐름 속도가 평균 54.7cm/s로 측정이 되었으며, 확산범위는 평균 70cm로 가운데가 블록하고, 좁고 긴 모양의 확산 범위를 보였다(그림 7).

함수비가 55%(표준사 약 2000g, 물 약 1100g)인 경우는 산사태 흐름 속도가 평균 67.6cm/s로 측정이 되었으며, 확산범위는 평균 80cm로 확산범위가 길게 퍼진 모양으로 나타났다(그림 8).

함수비가 60%(표준사 약 2000g, 물 약 1200g)인 경우는 산사태 흐름 속도가 평균 72cm/s로 측정이 되었으며, 확산범위는 평균 81cm로 확산범위가 뾰족하고, 길게 퍼진 모양으로 나타났다(그림 9).

마지막으로 함수비가 65%(표준사 약 2000g, 물 약 1300g)인 경우는 산사태 흐름 속도가 평균 84.4cm/s로 측정이 되었으며, 확산범위는 평균 107cm로 확산범위가 일자로 길게 퍼진 모양으로 나타났다(그림 10).

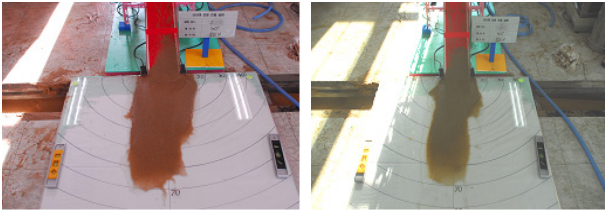


그림 7. 표준사 2000g과 물 1000g을 섞은 상태(함수비 50%)

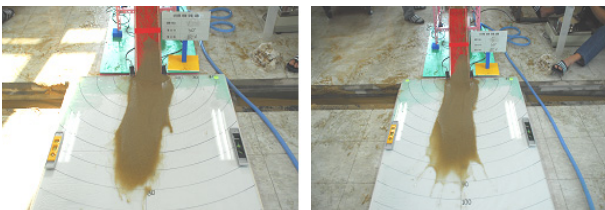


그림 8. 표준사 2000g과 물 1100g을 섞은 상태(함수비 55%)

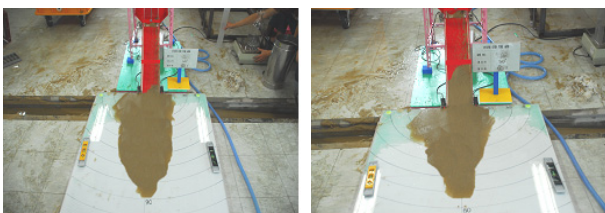


그림 9. 표준사 2000g과 물 1200g을 섞은 상태(함수비 60%)

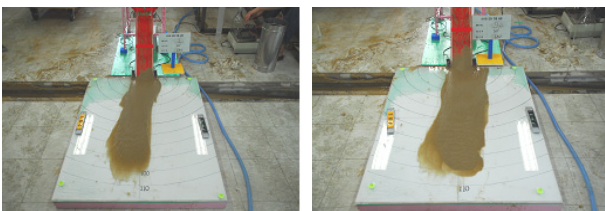


그림 10. 표준사 2000g과 물 1300g을 섞은 상태(함수비 65%)

4. 표준사와 물과의 비율에 따른 흐름 특성

4.1 함수비별 도달거리

각 함수비별 1회~10회 도달거리의 평균을 계산하고 이를 함수비별 도달거리의 그래프로 나타내어 추세선을 그려 함수비에 따른 확산 거리의 식을 구하였다(그림 11, 12).

함수비가 증가함에 따라 산사태의 도달거리가 비례적으로 증가함을 알 수 있었고, 이를 식으로 나타내면 다음과

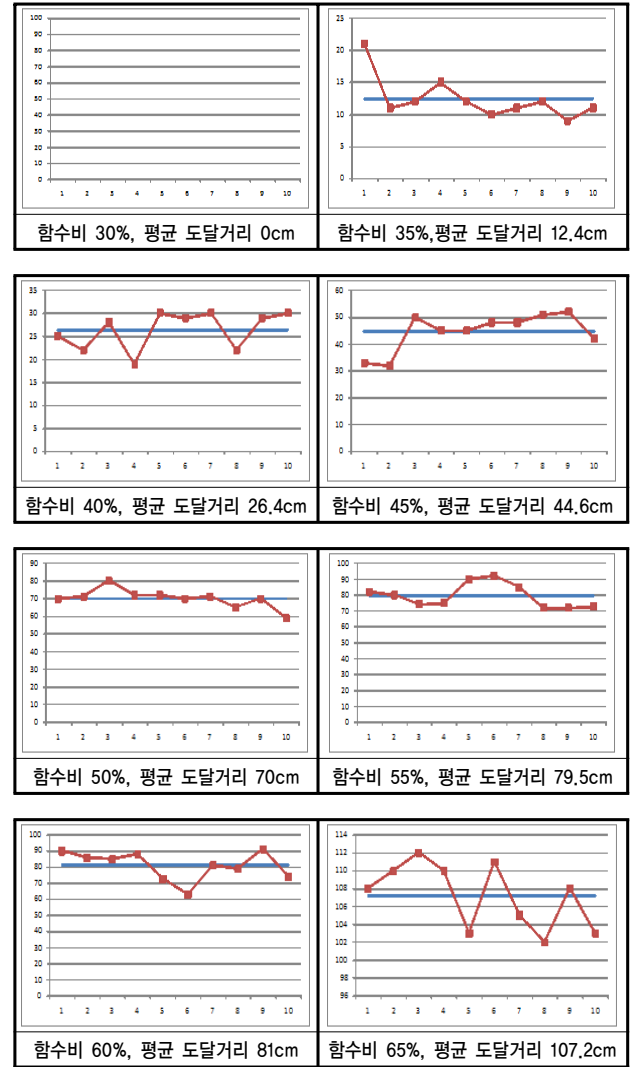


그림 11. 함수비별 10회씩 측정된 도달 거리 평균값

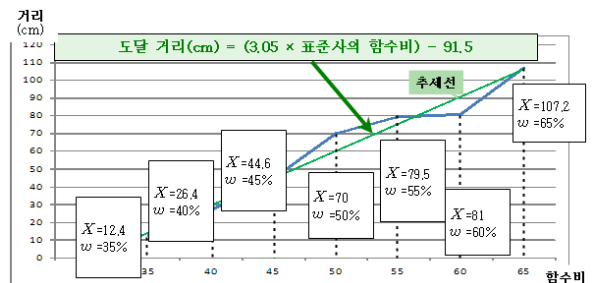


그림 12. 함수비별 평균 도달길이

같다(식 (1)).

$$\text{도달 거리(cm)} = (3.05 \times \text{표준사의 함수비(\%)} - 91.5) \quad (1)$$

4.2 함수비별 도달시간

함수비별 1회~10회의 도달시간의 평균을 계산하고 이를 함수비별 도달거리의 그래프로 나타내어 각각의 함수비에 따른 산사태 흐름 속도를 구할수 있게 되었다(그림 13, 14).

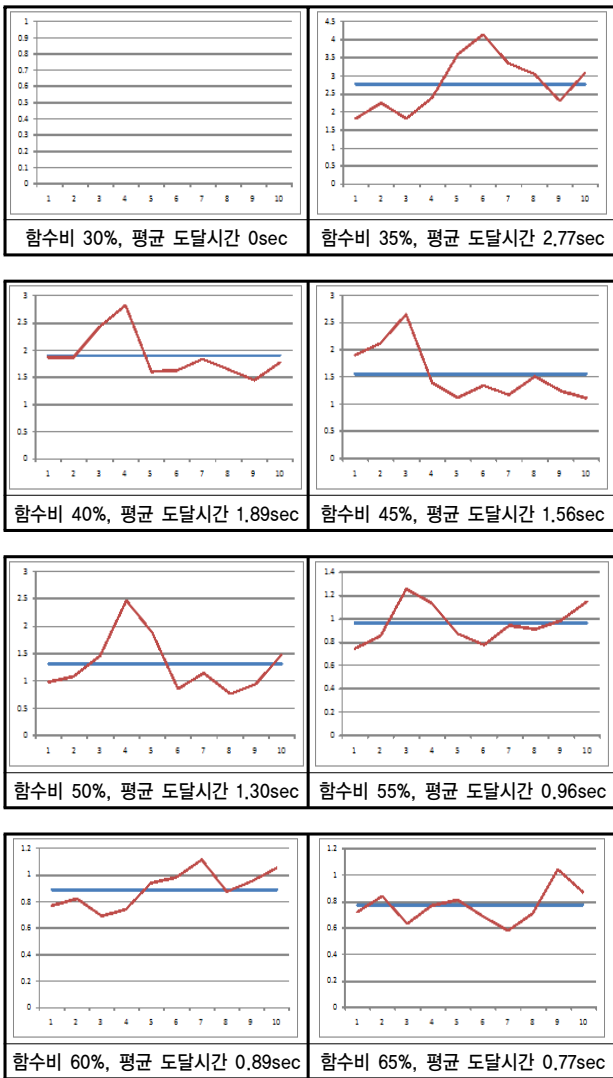


그림 13. 함수비별 10회씩 측정한 도달 시간 평균값

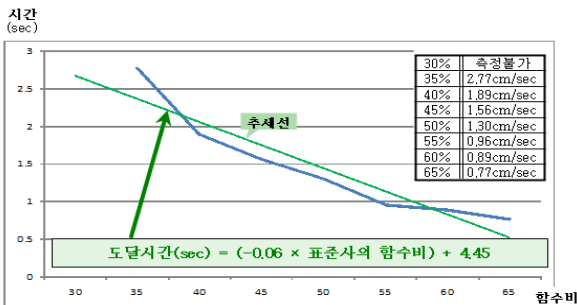


그림 14. 함수비별 평균 도달시간

함수비가 증가함에 따라 산사태의 도달시간이 비례적으로 빨라짐을 알 수 있었고, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다(식 (2)).

$$\text{도달 시간(sec)} = (-0.06 \times \text{표준사의 함수비(\%)} + 4.45) \quad (2)$$

4.3 함수비별 확산(퍼짐) 형태

그림 15는 함수비별 1회~10회의 확산 형태를 측정하여

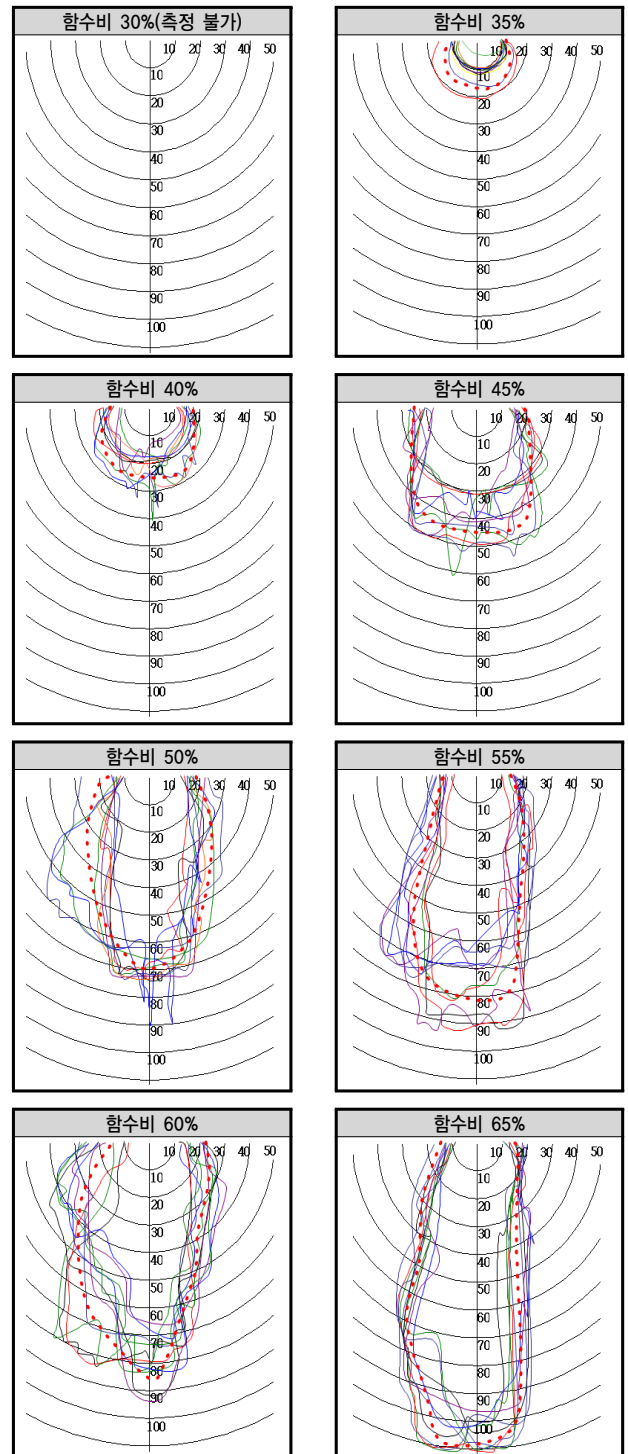


그림 15. 함수비별 평균적인 확산형태

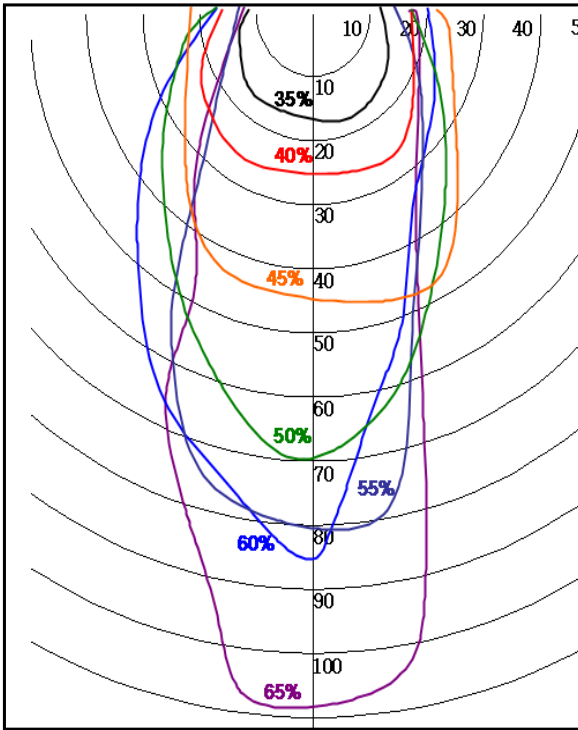


그림 16. 함수비별 평균 확산(퍼짐) 형태

확산형태를 나타낸 것이다. 빨간 점선이 평균적인 확산 형태이다.

함수비별 평균 확산 형태를 보면 함수비가 높을수록 폭이 좁고 긴 모양의 확산 범위를 나타내고 있다. 이는 강우량이 많고 적음에 따라 산사태의 확산 범위가 얼마나 다른 형태로 일어날 수 있는지 잘 나타내어 주고 있다(그림 16).

5. 결 론

모형실험을 통한 산사태의 피해확산범위 및 흐름속도 특성에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구는 산사태로 인하여 피해가 발생하는 범위 및 확산 속도를 측정하여 산사태로 인한 막대한 재산 피해와 인명 피해를 줄이는 것을 목적으로 한다.
- (2) 실험 결과, 함수비(흙속에 함유된 물의 양의 백분율)가 높을수록 확산 범위가 넓게 퍼졌고 확산 속도 또한 빠르게 기록되었다. 함수비별로 기록된 값의 평균을 구하여 분석한 결과 함수비에 비례하여 산사태의 확산 거리와 속도가 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

- (3) 일반적으로 확산범위 형태는 부채꼴 모양으로 나타났으며, 표준사와 물의 비율이 높아짐에 따라 확산 속도가 빠르게 나타났고, 확산 속도가 빠를수록 확산 폭이 좁으면서 길게 퍼지는 모양으로 나타났다.
- (4) 확산거리는 함수비와 비례적으로 변화 형상을 나타내었고 관계식은 $\text{도달 거리(cm)} = (3.05 \times \text{표준사의 함수비}) - 91.5$ 와 같이 도출할 수 있었다. 흐름속도 역시 함수비와 비례관계를 보여주었고 관계식은 $\text{도달 시간(sec)} = (-0.06 \times \text{표준사의 함수비}) + 4.45$ 와 같이 도출되었다.
- (5) 함수비의 크기에 따른 산사태의 확산 범위와 확산 속도를 측정한 본 실험 결과 이용하면, 강우량에 따른 산사태 피해 범위 크기에 따라 붕괴발생을 예측할 수 있고 방재 대책을 수립할 수 있다. 또한, 기상 이변으로 인한 여름철 집중 호우와 태풍 등에 의한 실제 산사태의 확산 범위와 속도를 예측할 수 있으므로 산사태로 인한 막대한 재산 피해와 인명 피해를 다소나마 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 이동혁(2008), 모형실험을 통한 산사태의 피해확산범위 및 흐름속도 특성에 관한 연구, 제49회 서울특별시 과학전람회.
2. 이승호(2007), 인공강우장치를 이용한 실내모형토조 실험에 대한 기초연구, 제33회 대한토목학회 정기학술대회, Vol. C, pp. 38.
3. Anderson, S.A., Sitar, N.(1995). *Analysis of Rainfall-induced Debris flows J. of Geotech. Eng.* Vol. 121, No. 7, pp. 544~552.
4. Atkin, R.J., Craine, R.E.(1976). *Continuum Theories of Mixtures : Basic Theory and Historical Development*, Quarterly J. of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 29, No. 2, pp. 209~244.
5. Iverson, R.M.(1997)., *The Physics of Debris Flows, Review of Geophysics*, V. 35, No. 3, pp. 245~296.
6. Davis, J.J.(2000), Gravity-Driven Consolidation of Granular Slurries - Implications for Debris-flow Deposition and Deposit Characteristics, *J. of Sedimentary Research*, Vol. 70, No. 1 pp. 64~83.
7. Jakob, M(2005), A Size classification for debris flow, *Engineering Geology*, Vol. 79, pp. 151~161.
8. Sassa, K.(1985), The Mechanism of Debris Flow, *Proceedings of the 11th Intl. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 1173~1176, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands.
9. Takahashi, T.(2007), *Debris Flow : Mechanics, Prediction and Countermeasures*, 448p, Taylor&Francis, London, UK.
10. Varnes, D.J.(1978), *Landslides : Analysis and Control*, TRB sp. 176.

(접수일: 2008. 6. 27 심사일: 2008. 6. 30 심사완료일: 2008. 7. 16)