

## 강우강도에 따른 산사태 확산범위 예측을 위한 모형실험

### Model Test to Predict the Runout Distance of Landslide according to Hourly Rainfall

송영석<sup>1)</sup>, Young-Suk Song (yssong@kigam.re.kr), 채병곤<sup>1)</sup>, Byung-Gon Chae  
김원영<sup>2)</sup>, Won-Young Kim, 서용석<sup>3)</sup>, Yong-Seok Seo

- 1) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geological & Environ. Hazards Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM).
- 2) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 책임연구원, Principal Researcher, Geological & Environ. Hazards Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM).
- 3) 충북대학교 지구환경과학과 교수, Professor, Dept. of Earth & Environ. Science, Chungbuk National University.

**SYNOPSIS** : Landslide model experiments considering hourly rainfall were performed to investigate and predict the run out distance induced by landslides. The model flume and the rainfall simulator were designed and produced. The model flume was designed in consideration of the landslide characteristics of Korea. The landslides in Korea were mainly occurred in the interface between soil layer and rock layer. The rainfall simulator was produced for controlling hourly rainfall ranged from 100mm/hr to 1,000mm/hr. Jumnunjin standard sand as slope soils was placed on the model flume. The model experiments were performed with changing the hourly rainfall ranged from 150mm/hr to 250mm/hr. In this experiments, the inclination of slope was 25° and the relative density of slope soils was 35%. As a result of experiments, the pore water pressure is rapidly increased at landslide occurring time, and the scale of landslide is increased with increasing in hourly rainfall. The spreading range of run out distance is occurred with pan type, and the spreading width and length are rapidly increased in its early stage and slowly increased after early stage. Also, The increasing velocity of runout distance of debris is influenced by hourly rainfall.

**Key words** : Landslide, Model test, Hourly rainfall, Runout distance, Spreading range

## 1. 서 론

우리나라에서 발생하는 자연재해는 그 발생원인의 대부분이 강우에 의한 경우가 대부분이고 이로 인한 재해 중 산사태에 대한 피해는 날로 심각한 실정이다. 특히 우리나라에서 발생하는 산사태는 그 발생원인이 대부분 장마철 집중강우에 의한 경우가 대부분이다. 즉, 연평균 강우량의 대부분이 6월에서 9월 사이에 편중되어 있어 집중호우로 인한 사면붕괴나 산사태의 발생이 빈번하다. 1990년대의 10년간 자연재해로 인한 인명피해만 140여명이고 그중 산사태에 의한 피해가 전체의 16%인 22.7명으로 보고된 바 있다(박덕근, 1999).

대부분의 산사태는 우기에 집중적으로 발생되므로 우리나라 산사태의 발생요인 중 가장 큰 요인은 강

우임을 예측할 수 있다. 이와 같이 강우가 산사태의 가장 중요한 요인이 되고 있는 것은 사실이지만 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량이 산사태에 어떻게 관련되어 있는가는 아직 확실히 규명되어 있지 못하다. 홍콩의 경우 강우와 산사태의 관계에 있어 과거에는 Lumb(1975)에 의한 선행강우량 개념의 해석이 지배적이었으나, Brand(1985) 등의 지속적인 연구로 인하여 현재에는 강우강도에 의한 해석이 제안되었다. 홍원표 등(1990)은 우리나라의 강우기록과 산사태 발생기록을 연관지어 우리나라의 지역특성에 맞는 산사태 발생기구를 조사 및 연구한 바 있다. 이 결과에 의하면 우리나라의 산사태는 누적강우량과 강우강도에 모두 영향을 받는 것으로 나타났다.

따라서, 본 논문에서는 강우강도에 따른 산사태 발생시 사태물질의 확산범위를 합리적으로 예측하기 위하여 일련의 산사태 모형실험을 실시하였다. 이를 위하여 먼저 산사태 모형실험장치 및 강우재현장치를 개발하였으며, 사면내 간극수압 및 사면지반의 변위를 측정하기 위하여 각종 계측장비를 설치하였다. 산사태 모형실험장치는 토사층과 암반층사이의 경계면에서 주로 발생하는 우리나라의 산사태 발생특성을 고려하여 제작하였으며, 강우재현장치는 강우강도의 조절이 가능하도록 제작하였다. 강우강도에 다른 일련의 산사태 모형실험을 통하여 강우강도에 따른 산사태 발생 특성을 살펴보고, 사태물질의 확산범위를 예측하기 위한 기본 자료로 이용하고자 한다.

## 2. 산사태 모형실험

### 2.1 모형실험장치

본 연구에서는 산사태 발생시 사태물질의 확산범위를 측정하기 위한 모형실험장치를 개발하였다. 그림 1은 산사태 모형실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 크게 산사태 모형토조, 강우재현장치 및 계측장치로 구분할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태 모형토조는 사태물질 확산범위 측정판이 부착되어 있어 산사태 발생시 확산범위 과정 및 영역을 조사할 수 있도록 하였다. 그리고, 강우재현장치는 살수장치, 강우조절장치 및 물탱크로 구성되어 있으며, 컴퓨터를 이용하여 강우량을 조절할 수 있도록 고안하였다. 또한, 계측장치는 간극수압계, 데이터로거 및 컴퓨터로 구성되어 있으며, 간극수압계가 모형토조 바닥면에 설치되어 산사태 발생시 사면내 간극수압변화를 조사할 수 있도록 하였다.

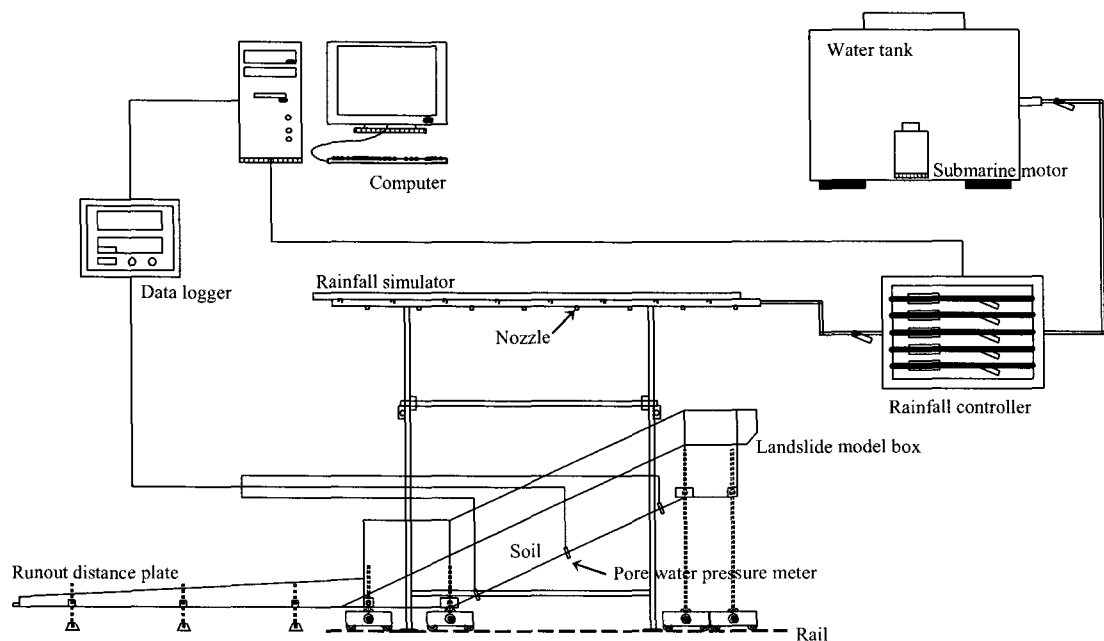


그림 1. 산사태 모형실험장치 개략도

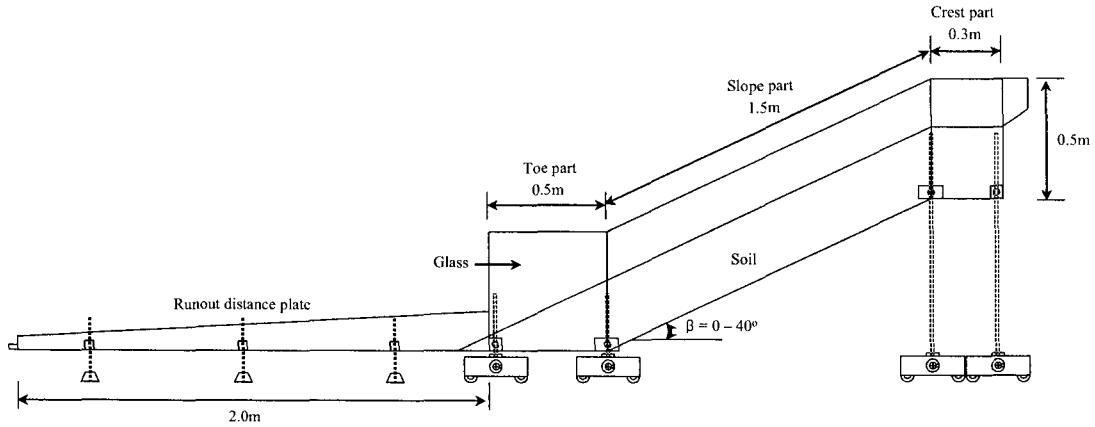


그림 2. 산사태 모형토조

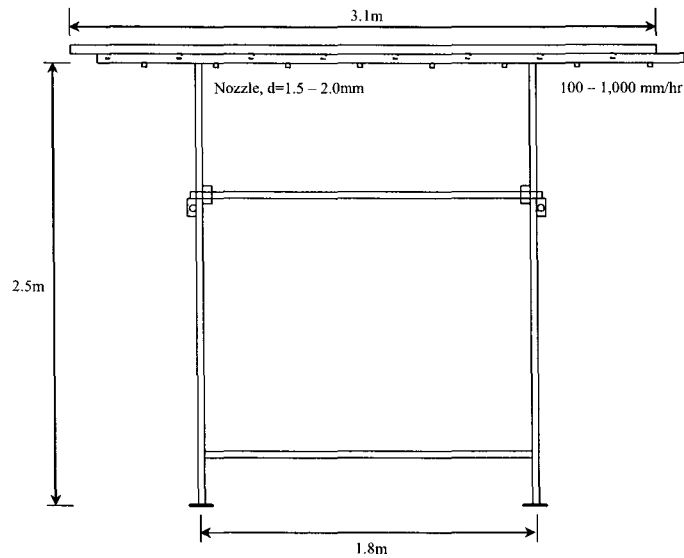


그림 3. 강우재현장치

그림 2는 산사태 모형토조의 개략도를 나타낸 것으로 사태물질 확산범위 측정판이 부착되어 있는 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태 모형토조의 경사는 0~40°까지 조절이 가능하도록 고안되었다. 산사태 모형토조는 선단부(toe part), 사면부(slope part) 및 정상부(crest part)로 구성되어 있으며, 각각의 길이는 0.3m, 1.5m, 0.5m이고, 모형토조의 높이는 0.5m로 제작되었다. 사면부의 경사는 선단부와 정상부의 높이를 변화시킴으로써 0~40°까지 조절할 수 있도록 제작하였다. 한편, 산사태 모형토조의 한쪽 면은 사면의 거동을 직접 관찰할 수 있도록 투명한 고강도 유리판을 사용하였다. 그리고, 모형토조의 바닥은 토사와 바닥면사이에서의 활동을 방지하기 위하여 요철을 두었으며, 모형토조 선단부는 개폐가 가능하도록 제작하여 다양한 목적의 산사태 모형실험이 가능하도록 하였다. 모형토조의 선단부에는 확산범위 측정판을 설치하여 산사태 발생시 사태물질이 확산되는 과정을 관찰할 수 있도록 하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 확산범위 측정판의 길이는 2m이며, 측정판의 바닥면에는 줄자를 부착하였다.

그림 3은 강우재현장치의 개략도를 나타낸 것으로, 상부 살수장치와 하부 받침대로 구성되어 있다. 상부 살수장치는 PVC관으로 제작되었으며, PVC관에는 일정한 간격으로 노즐이 부착되어 있다. 상부 살수장치는 길이가 3.1m이고, 폭은 0.9m이며, 2단으로 구성되어 있다. 각 단에는 8열의 노즐을 설치하였

으며, 상단과 하단의 노즐 직경을 각각 1.5mm 및 2.0mm로 서로 다르게 하여 강우강도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 강우재현장치의 강우강도는 100~1,000mm/hr범위에서 조절이 가능하도록 제작되었다. 한편, 하부 받침대는 강봉으로 제작되었으며, 높이 2.5m, 길이 1.8m이다. 하부 받침대는 이동이 가능하도록 제작되었으며, 높이의 조절도 가능하도록 하였다.

## 2.2 계측장치

강우로 인한 산사태 발생시 사면내 간극수압, 사면 표층부의 거동 및 사태물질의 확산범위를 계측 및 조사하기 위하여 일련의 계측시스템을 설치하였다. 사면내 간극수압을 측정하기 위하여 간극수압계를 모형사면토조 바닥면에 설치하였다. 그림 4는 본 모형실험에 사용된 간극수압계를 나타낸 것으로, 미국 Sensors사의 PL1M Model을 사용하였으며, 직경은 2.5cm, 높이는 9cm이다. 이와 같은 간극수압계는 산사태 모형토조의 경사부에 3개를 설치하였으며, 10초 간격으로 측정하도록 하였다. 측정된 간극수압은 데이터로거를 통해 컴퓨터에 자동 기록되도록 하였다. 그림 5는 본 모형실험에 사용된 데이터로거를 나타낸 것으로 호주 Data Electronics사의 Geologger 515를 사용하였으며, 10개 채널로 구성되어 있다. 그리고, 사면 표층부 지반의 거동을 조사하기 위하여 표식을 설치하였다. 그림 6은 본 모형실험에 사용된 표식을 나타낸 것으로, 모형토조의 경사부에 20cm 간격으로 중앙에 설치하였으며, 사진 및 카메라를 이용한 촬영을 통하여 거동을 측정하였다.

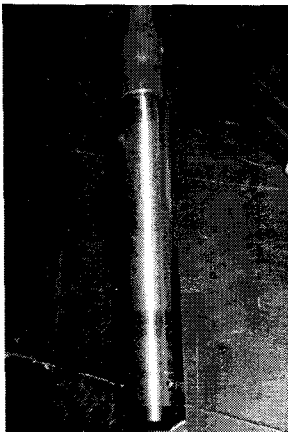


그림 4. 간극수압계

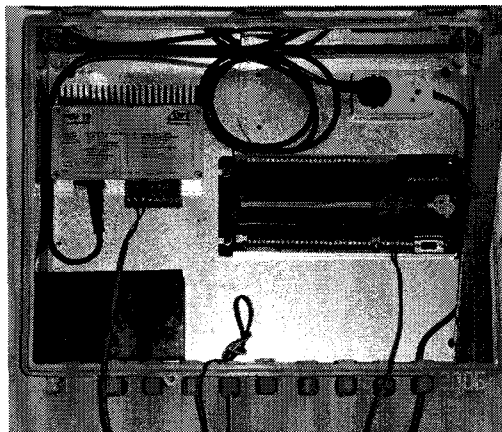


그림 5. 데이터로거

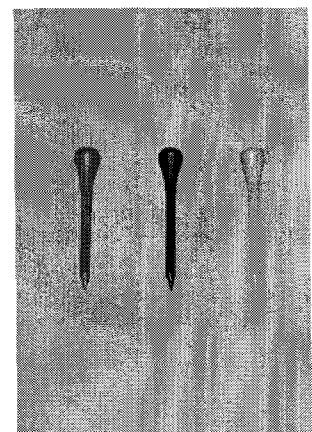


그림 6. 변위측정 표식

## 2.3 모형사면지반

본 모형실험에서는 모형사면지반의 재료로 주문진 표준사를 사용하였다. 균질한 사면지반을 조성하기 위하여 직경 1cm의 특수칼뿔기를 이용하여 75cm 높이에서 자유낙하를 시켰다. 이때 사면지반의 상대 밀도는 35%이며, 직접전단시험결과 내부마찰각은 36.5°인 것으로 조사되었다.

## 3. 실험방법

산사태 모형실험은 다음과 같은 순서로 수행하였다.

- ① 산사태 모형토조의 경사 조절
- ② 강우재현장치의 강우강도 조절
- ③ 산사태 모형토조 바닥면에 간극수압계 설치
- ④ 주문진 표준사를 이용한 모형사면지반 조성 및 표식설치

- ⑤ 강우 살수로 인한 산사태 유발
- ⑥ 모형 사면지반의 거동, 사면내 간극수압 및 사태물질 확산범위 측정

본 모형실험에서는 강우강도에 따른 사태물질의 확산범위를 조사하고자 한다. 표 1은 강우강도에 따른 산사태 모형실험계획을 나타낸 것으로 총 3가지 경우에 대하여 모형실험을 실시하였다. 표에서 보는 바와 같이 강우강도에 대한 영향을 조사하기 위하여 사면지반의 상대밀도를 35%, 사면지반의 경사를 25°로 동일하게 조성하고, 강우강도를 250mm/hr, 200mm/hr 및 150mm/hr로 변화시키면서 모형실험을 수행한다.

표 1. 강우강도에 따른 산사태 모형실험 계획

구분	강우강도(mm/hr)	사면경사(°)	상대밀도(%)
SL-1	250	25	35
SL-2	200	25	35
SL-3	150	25	35

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 모형실험 결과

산사태 발생시 강우강도에 따른 사태물질의 확산범위를 조사하기 위하여 사면지반을 동일하게 조성한 후 강우강도를 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험을 수행하는 동안 간극수압, 사면지반의 변위 및 사태물질의 확산정도를 측정하였다. 그림 7~11은 강우강도가 200m/hr인 SL-2경우의 모형실험결과를 나타낸 것이다. 그림 7은 강우시 사면지반내 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, p1은 경사부 하단에서의 간극수압, p2는 경사부 중앙에서의 간극수압, 그리고 p3는 경사부 상단에서의 간극수압을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 간극수압은 경사부 하단에서 가장 크게 발생되고, 경사부 상단에서 가장 작게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 강우 초기에는 간극수압 변화 없이 일정하게 유지되다가 급격하게 증가한 후 다시 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 사면파괴시 사면내 간극수압이 급격하게 증가하게 되므로(Moriwaki, 1993) 간극수압이 급격하게 증가하는 시점에서 산사태가 발생되었음을 알 수 있다.

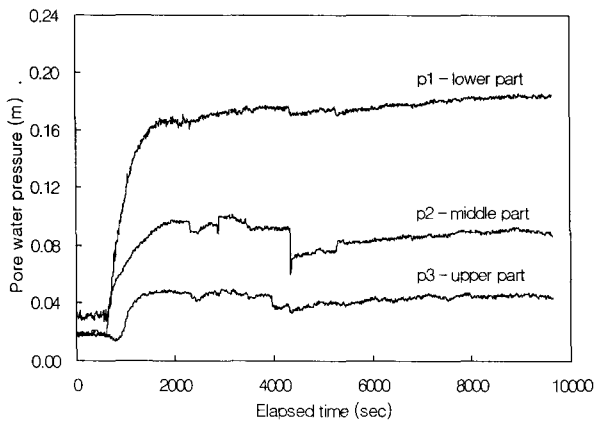


그림 7. 강우시 사면내 간극수압 변화

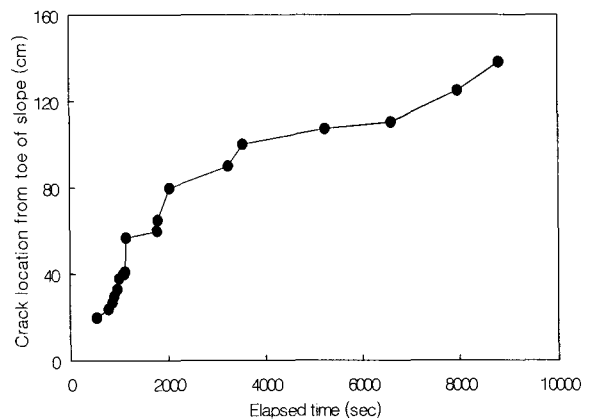


그림 8. 강우시 사면표층부 균열 발생위치

그림 8은 강우시 사면지반 표층부에서의 균열 발생위치를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 균열은 사면의 선단부에서 먼저 발생되어 정상부 방향으로 전이되는 것으로 나타났다. 즉, 모형실험에서 산사태는 사면선단부에서 발생되기 시작하여 점차적으로 산사태 규모가 확장됨을 알 수 있다. 그리고, 사면지반 표층부에서 발생된 균열은 간극수압이 급격하게 증가되기 직전에서 발생함을 알 수 있다.

그림 9는 산사태 발생으로 인한 사태물질의 확산모습을 촬영한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사태물질의 확산영역은 중앙부가 볼록한 팬(pan) 형태로 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 10 및 11은 산사태 발생시 사태물질의 확산범위를 정량적으로 나타낸 것이다. 그림 10은 사태물질의 확산 폭과 길이를 나타낸 것으로 확산 폭이 확산길이보다 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 사태물질의 확산 폭 및 길이는 초기에는 급격하게 증가하다가 이후에는 비교적 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. 그림 11은 사태물질의 확산면적으로 나타낸 것으로 확산 폭 및 길이의 증가양상과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

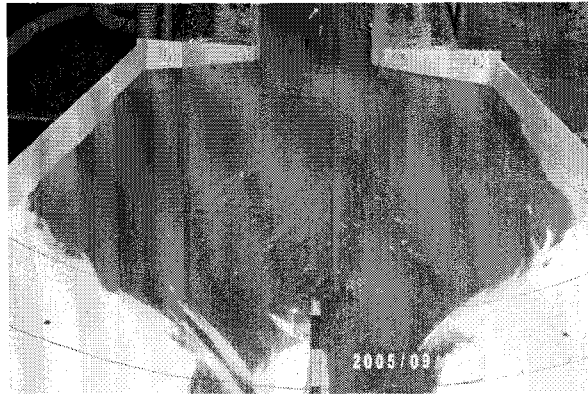


그림 9. 산사태로 인한 사태물질의 확산 모습

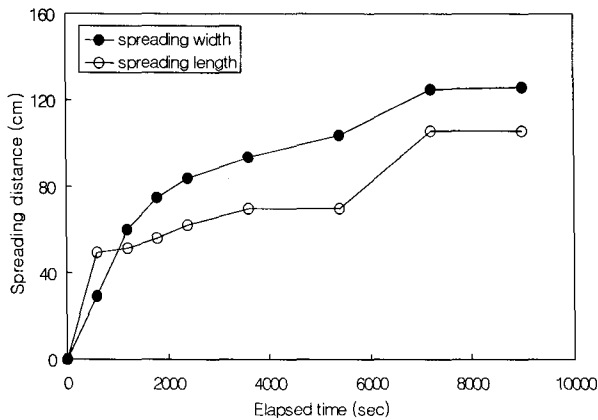


그림 10. 사태물질의 확산폭 및 길이

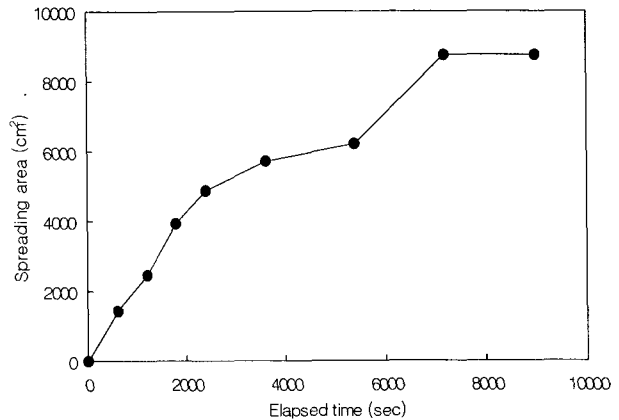


그림 11. 사태물질의 확산면적

## 4.2 강우강도에 따른 비교분석

그림 12는 강우강도에 따른 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 간극수압은 경사부 중앙에서의 측정된  $p_2$ 의 값을 이용하였다. 그림을 살펴보면 사면내 간극수압은 강우강도가 클수록 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 산사태 발생시점에서 간극수압은 급격하게 증가하는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 그리고, 간극수압이 급격하게 증가하는 산사태 발생시점은 약 700~900초 사이에서 발생하므로 강우강도에 따른 뚜렷한 차이는 없는 것으로 나타났다.

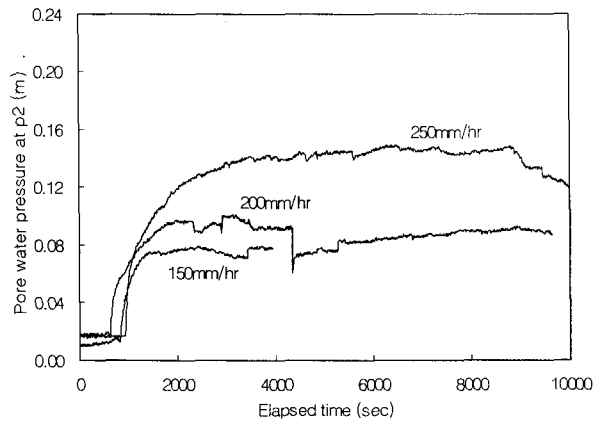


그림 12. 강우강도에 따른 간극수압 (p2위치)

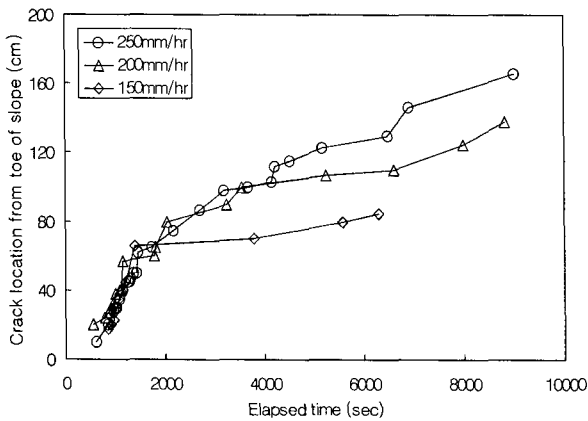


그림 13. 강우강도에 따른 균열발생 위치

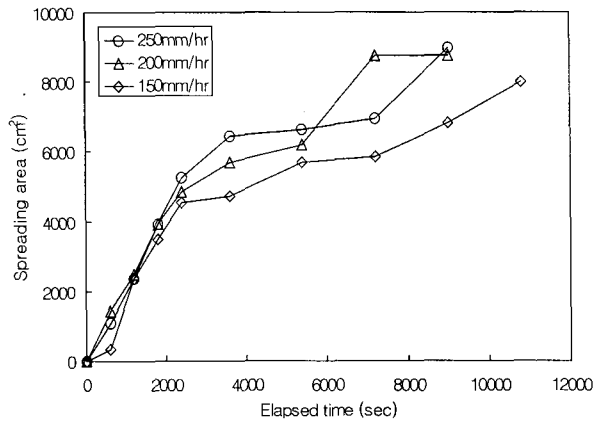


그림 14. 강우강도에 따른 사태물질 확산면적

그림 13은 강우강도에 따른 사면지반 표층부에서 균열발생 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우강도가 증가함에 따라 균열의 발생위치는 사면의 정상부 방향으로 더 크게 전이되는 것으로 나타났다. 이는 강우강도가 증가함에 따라 산사태 규모가 점차적으로 증가함을 의미한다.

그림 14는 산사태 발생시 강우강도에 따른 사태물질의 확산면적을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사태물질로 인한 확산면적은 강우강도가 증가함에 따라 더 크게 발생되며, 실험 완료후 최종 확산면적은 강우강도가 증가함에 따라 크게 발생하지만 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러므로, 산사태 발생으로 인한 사태물질의 확산 증가속도는 강우강도에 영향을 받지만 최종적인 사태물질의 확산면적은 강우강도에 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 강우강도에 따른 산사태 발생시 사태물질의 확산범위를 합리적으로 예측하기 위하여 일련의 산사태 모형실험을 실시하였다. 이를 위하여 먼저 산사태 모형실험장치 및 강우재현장치를 개발하였으며, 사면내 간극수압 및 사면지반의 변위를 측정하기 위하여 각종 계측장비를 설치하였다. 강우강도에 따른 일련의 산사태 모형실험을 통하여 산사태 발생 특성 및 사태물질의 확산범위 특성을 조사하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 산사태 발생시 사면내 간극수압은 급격하게 증가하며, 간극수압이 급격하게 증가되기 직전에 사면지반 표층부에서 관열이 발생되기 시작한다.
- (2) 사태물질의 확산범위는 불룩한 팬(pan) 형태로 발생되며, 사태물질의 확산 폭 및 길이는 초기에는 급격하게 증가하다가 이후에는 비교적 완만하게 증가함을 알 수 있다.
- (3) 강우강도가 클수록 산사태 발생시 사면내 급격한 간극수압 증가는 더 크게 발생되며, 산사태 규모도 더 크게 발생함을 알 수 있다.
- (4) 산사태 발생으로 인한 사태물질의 확산 증가속도는 강우강도에 영향을 받으나, 사태물질의 확산면적은 강우강도에 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원에서 지원하는 기본연구사업 가운데 “산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발”에 의하여 실시된 연구결과임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 전하는 바입니다.

## 참 고 문 헌

1. 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한중근 (1990), "강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측", *대한토질공학회지*, 제 6권, 제 2호, pp.55~63.
2. Brand, E. W. (1985), "Predicting the performance of residual soil slopes", *Proc of 11th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng*, San Francisco, pp.2541~2573.
3. Lumb, P. (1975), "Slope failure in Hong Kong", *Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, pp.31~65.
4. Moriwaki, H. (1993) "Behaviour of pore-water pressure at slope failure", *Proc. of 7th Inter. Conf. and Field Workshop on Landslides*, Czech and Slovak Republics, pp.263~268