

## 산사태 모형실험을 통한 강우강도 및 사면경사 변화와 간극수압과의 관계 연구 : 편마암 풍화토를 대상으로

채병곤<sup>1</sup> · 이성호<sup>2</sup> · 송영석<sup>1</sup> · 조용찬<sup>1</sup> · 서용석<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해연구팀

<sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

### Characterization on the Relationships among Rainfall Intensity, Slope Angle and Pore Water Pressure by a Flume Test : in Case of Gneissic Weathered Soil

Byung-Gon Chae<sup>1</sup>, Seong-Ho Lee<sup>2</sup>, Young-Suk Song<sup>1</sup>,  
Yong-Chan Cho<sup>1</sup>, and Yong-Seok Seo<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Dept. of Earth and Environmental Sci. & Inst. for Basic Science Res., Chungbuk National University

본 연구는 국내에서 산사태 발생빈도가 매우 높은 편마암 풍화토를 대상으로 산사태 모형실험장치를 이용하여 강우강도 및 사면경사에 따른 간극수압 변화의 관계를 파악하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서는 강우강도와 사면경사의 변화에 따른 다양한 실험조건하에서 일정 시간 간격으로 간극수압, 사면붕괴양상 및 변위 등을 각각 측정하였다. 실험결과에 따르면, 강우강도에 따른 간극수압의 관계는 강우강도가 클수록 간극수압 증가시간이 짧으며, 모형 토조의 위치별 간극수압 증가시간도 사면 상부에서 가장 빠른 것으로 측정되었다. 이를 표준사를 이용한 실험결과(채병곤 외, 2006)와 비교해 볼 때, 편마암 풍화토는 강우의 침투속도가 표준사에 비해 느린 것을 알 수 있으며, 이로 인해 사면하부로의 강우이동이 상대적으로 원활하지 않아 사면 상단부에서 간극수압의 증가가 빠른 것으로 해석된다. 한편, 간극수압의 증가는 사면의 경사가 작은 경우 먼저 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 현상 역시 편마암 풍화토의 느린 강우 침투속도에 기인하는 것으로 생각된다.

**주요어** : 편마암 풍화토, 산사태 모형실험, 강우강도, 사면경사, 간극수압

This study was conducted to characterize on the relationships among rainfall intensity, slope angle and pore water pressure in the gneissic weathered soil by landslide laboratory flume tests. Under the several test conditions dependent on rainfall intensity and slope angle, the authors measured pore water pressure, failure and displacement of slope on a regular time interval. According to the test results, the increasing times of pore water pressures have direct proportional trends to the rainfall intensity. The pore water pressure was increased earlier at the head part of slope than the toe part. Compared with the test results of Chae et al(2006), the results of this study explain that the seepage velocity in the gneissic weathered soil is slower than that in the standard sands. It results in faster and earlier increase of pore water pressure at the head part of slope due to slow flow of water in the gneissic weathered soil. In case of the relationship between slope angle and pore water pressure, gentle slope angle has faster increase of pore water pressure than steeper slope angle. It is also thought to be due to slow seepage velocity and flow velocity in the gneissic weathered soil.

**Key words** : gneissic weathered soil, landslide laboratory flume tests, rainfall intensity, slope angle, pore water pressure

\*Corresponding author: ysseo@cnu.ac.kr

## 서 론

일반적으로 자연사면에서 발생하는 산사태는 그 원인을 크게 내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있다. 내적요인은 사면의 지형, 지질 및 토질특성에 기인하며, 외적요인은 인위적 환경에 기인한다. 국내 산사태 유발의 가장 직접적인 원인중 하나는 집중강우로서 집중적인 강우로 인한 간극수압(pore water pressure)의 증가와 침투력(seepage force)에 의해 산사태가 발생하는 것으로 알려져 있다(Mathewson *et al.*, 1990; Sitar *et al.*, 1992; Anderson and Sitar, 1995; Montgomery *et al.*, 1997).

강우에 따른 사면변화를 인지하는 방법은 크게 선행강우량 해석과 강우강도 해석으로 대별할 수 있다. 홍콩의 경우 강우와 산사태 관계에 있어서 과거에는 Lumb(1975)에 의한 선행강우량 개념해석이 지배적이었고 현재는 Brand(1984)에 의한 강우강도 해석이 정립되고 있다. 일본은 학자마다 의견이 다르지만 일반적으로 산사태 발생 전 3일 또는 7일 선행강우량과 발생 당일의 강우강도와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고 있다. 이러한 차이는 홍콩과 일본의 강우조건, 지질 조건 등의 상이성에서 기인한다고 할 수 있다. 산사태는 평균 강우량보다 20% 이상의 집중강우가 발생할 경우(Olivier, 1994)나 누적강우량이 150 mm 이상이고, 시간당 강우량이 35 mm인 경우에도 발생하는 것으로 보고되고 있다(Ikeya, 1989).

산사태 발생과 관련하여 강우 요인 외에도 사면을 구성하는 물질의 특성과 지형특성도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 자연사면에서 산사태 발생은 암종별로 편마암을 중심으로 한 변성암 분포지역이 다른 암석종류에 비해 월등히 높은 것으로 관찰되었다(김원영 외, 2000; 김원영 외, 2003). 이는 운모류를 많이 포함하는 편마암의 점착력이 상대적으로 높고, 투수계수가 낮아서 투수성이 좋은 화강암 풍화토에 비해 산사태에 취약한 것으로 분석된다. 사면경사는 경기도 및 강원도 지역의 경우 26°-30°일 때 산사태가 가장 빈번하게 발생하는 것으로 조사되었으며 사면의 지형경사가 20° 미만인 경우 산사태가 거의 발생하지 않고, 지형경사가 30° 이상일 경우는 경사가 높아질수록 산사태의 발생빈도가 감소하는 경향을 보였다(김원영 외, 2000; 김원영 외, 2006).

이와 같이 강우강도 및 지형특성, 지질종류에 따른 산사태 발생특성을 조건별로 정량적으로 규명하기 위해서는 먼저 다양한 산사태 현장 정밀조사를 실시하여 자연상태의 산사태 특성을 분석해야 하며, 이를 토대로 산사

태 유발 인자들을 통제하면서 여러 경우의 실험을 수행할 필요가 있다. 이 중 현장에서 측정된 사태물질 확산 범위 특성은 여러 가지 인자가 혼재되어 있기 때문에 특성해석에 어려움이 있음이 사실이다. 이를 극복하기 위해 일부 연구자들은 산사태 발생 및 사태물질 확산특성에 영향을 미치는 인자들을 인위적으로 조절할 수 있는 실내모형실험을 수행하고 있다. 이는 복수의 인자들을 대상으로 각 인자들을 하나씩 변화시키면서 이에 따른 산사태 발생 및 사태물질 확산특성을 파악할 수 있음이 큰 장점이다. 그러나, 실내모형실험은 인공적으로 구성된 사면규모에 제약이 있으므로 치수효과(scale effect) 등의 문제를 내포하고 있어, 자연사면과 동일한 조건을 형성하는데 한계가 있다(Moriwaki *et al.*, 2004).

강우장치를 이용한 실험은 일본에서는 1950년대부터 실시되었고, 최근 국·내외의 실내 모형실험을 통한 사면 붕괴실험에서 많이 실시되고 있는 추세이다. 국내에서 산사태와 관련한 대표적 실험연구를 살펴보면 사공명 외(2006)는 강우에 기인한 사면활동 분석을 통하여 사면붕괴 활동타입을 구분하였으며, 채병곤 외(2006)는 모형실험장치를 이용한 산사태 발생 및 사태물질 거동특성 실험을 실시하였다. 이들은 표준사를 이용하여 강우강도와 강우 지속시간, 사면경사에 따른 간극수압, 사면붕괴 양상, 토사의 확산범위에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 채병곤 외(2006)가 실시한 모형실험의 다음 단계로서 동일한 모형실험장치를 이용하여 전북 장수일대의 산사태 발생 현장에서 직접 채취한 편마암 풍화토를 대상으로 강우강도와 사면경사에 따른 간극수압 변화와 산사태 발생에 대하여 분석하였다. 이를 위하여 강우강도와 사면경사를 각각 변화시킨 후, 강우강도에 따른 토층 내의 간극수압, 토층거동 및 변위를 측정하였으며 사태물질 확산범위 등을 시간별로 기록하였다. 또한, 실험의 전 과정을 비디오 카메라 및 디지털 카메라를 이용하여 촬영한 후 영상분석을 실시하였다.

## 모형실험장치 구성

본 연구에서 제작한 모형실험장치는 크게 모형 토조, 인공강우장치, 그리고 계측장치 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 모형 토조는 내부에 흙을 채우는 부분으로 총 길이 2.3 m, 높이 0.5 m, 폭 0.3 m로 제작하였으며, 토조의 경사를 0~40°까지 자유로이 조절할 수 있도록 설계되었다. 특히, 모형토조 끝부분에는 사태물질의 확산 거리 및 범위를 측정하기 위해 2m×2m 면적의 확산범

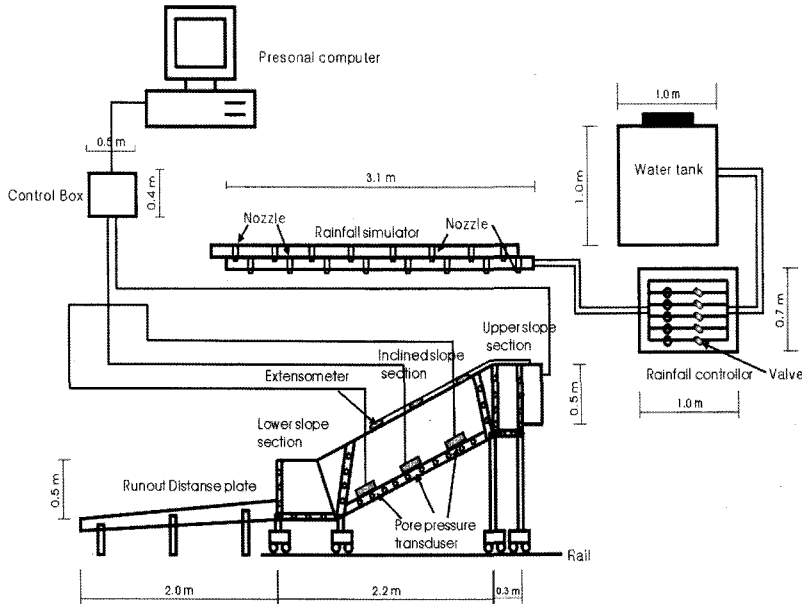


Fig. 1. Schematic description of the flume test equipment (after Chae et al., 2006).

위 측정판이 부착되었음이 특징이다.

인공강우장치는 살수장치부, 강우량 조절장치부, 그리고 물탱크부로 구성되어 있다. 3.1 m×0.9 m 크기로 구성된 살수장치부는 직경이 각각 2.0 mm와 1.5 mm인 노즐이 2개 층으로 구성되어 다양한 강우를 분사할 수 있도록 구성되어 있으며, 강우강도는 100~1,000 mm/hr의 범위에서 조절할 수 있도록 제작하여 집중강우의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 하였다(채병곤 외, 2006).

계측장치는 강우시 모형토조 내 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계, 측정된 간극수압을 컴퓨터에 기록하기 위한 데이터 로거, 그리고 사면거동 및 사태물질 확산범위 측정을 위한 사면변위 측정표식으로 구성되어 있다. 토층내의 수평적인 간극수압의 변화를 확인하기 위하여 모형토조 기저부를 따라 각각 10 cm(P1), 70 cm(P2), 130 cm(P3) 거리의 토조 바닥에 직경 2.5 cm, 높이 9 cm의 간극수압계를 3개소에 설치하여 10cm 간격으로 자료를 측정하였다. 사면변위 측정표식은 표층부의 변위를 확인하기 위해 모형토조에 채워진 흙의 표면에 20 cm 간격으로 토조 중앙에 설치하였다. 토층의 수직 및 수평의 연속적인 거동 및 변위를 관찰하기 위하여 강사 시토층과 토조의 유리판 사이에 각각 10 cm 간격으로 색사를 관입하였다.

이와 같은 실험 구성장치 외에 비디오 카메라 3대와 디지털 스틸카메라 2대를 서로 다른 위치에 설치하여

실험 전 과정에 걸쳐 산사태 발생 및 거동, 확산범위를 촬영하였다(채병곤 외, 2006).

### 모형사면 구성물질

모형실험을 위한 현장토는 2005년 여름 산사태가 집중적으로 발생한 전북 장수지역에서 채취한 편마암 풍화토를 사용하였으며, 실험에 사용된 현장토는 자연상태를 재현하기 위해 건조시키지 않고 현장상태의 시료를 그대로 사용하였다.

현장토의 토질특성을 조사하기 위하여 산사태가 발생한 지역의 인근에 분포하는 토층시료를 채취하여 먼저 체분석에 의한 입도시험과 비중시험을 실시하였으며, 함수량에 따른 흙의 상태 변화를 알기 위해서 액성 한계(Liquid Limit)시험과 소성 한계(Plastic Limit)시험을 실시하였다. 본 실험에 사용한 편마암 풍화토의 시험결과를 정리하면 Table 1과 같으며, 이러한 결과들을 종합하여 통일 분류법에 의해 흙을 분류해 보면 채취한 편마암 풍화토는 모두 SP에 해당한다. Fig. 2는 편마암 풍화토의 체분석시험을 통하여 구한 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

한편, 모형사면 지반의 강도특성 파악을 위해 직접전단시험을 실시하였다. 시험 시 흙의 밀도는 1.37 g/cm<sup>3</sup>이었으며 이때 점착력 및 내부마찰각은 Table 2에 나타난 바와 같다.

**Table 1.** Physical properties of the gneissic weathered soil in Jangsu area.

| Physical properties |                               | Results |
|---------------------|-------------------------------|---------|
| Grain Size          | Pebble, % (>4.75mm)           | 0.00    |
|                     | Sand, % (4.75~0.075mm)        | 99.99   |
|                     | Silt and Clay, % (<0.075mm)   | 0.01    |
|                     | Uniformity coefficient (Cu)   | 3.2     |
|                     | Coefficient of gradation (Cg) | 1.13    |
| Specific gravity    |                               | 2.62    |
| Liquid limit (%)    |                               | 27.9    |
| Plastic limit (%)   |                               | 19.51   |

**Table 2.** Results of direct shear test.

| Properties | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> ) | Friction angle (°) |
|------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Results    | 1.37                         | 0.60                           | 29.0               |

**실험 방법 및 조건**

본 모형실험은 채병근 외(2006)에서 실시한 실험과 동일한 방법과 절차에 따라 수행되었다. 본 실험에서는 강우강도와 사면경사에 따른 간극수압의 변화와 산사태 발생의 관계를 파악하고자 Table 3과 같은 조건을 설정하였다.

강우강도에 대한 영향을 조사하기 위하여 사면지반을 비다짐으로 조성하고 경사를 25°로 고정하고, 강우강도를 250 mm/hr, 200 mm/hr 및 150 mm/hr로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한, 사면지반의 경사에 대한 영향을 조사하기 위하여 현장토를 모형토조에 비다짐으로 조성하고 강우강도를 200 mm/hr로 동일하게 하며, 사면지반의 경사를 25°, 30° 및 35°로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

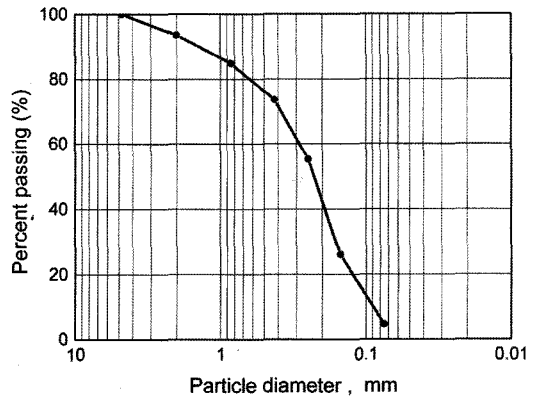
**실험결과 분석 및 토의**

**사면조건별 실험결과(SL-7의 예)**

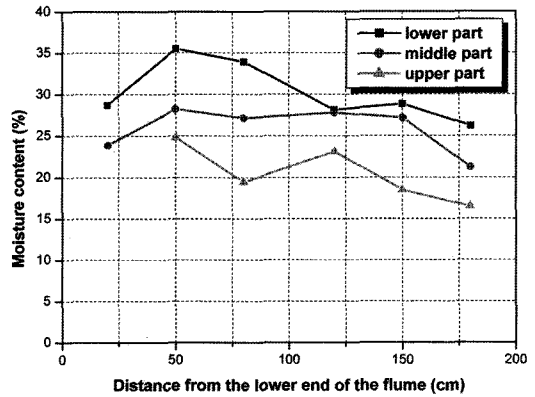
모형실험의 결과 중 SL-7의 경우를 예를 들어 설명하

**Table 3.** Cases of the flume test using the gneissic weathered soil.

| Test No. | Test conditions            |                      |                              | Remarks   |
|----------|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------|
|          | Rainfall intensity (mm/hr) | Slope angle (degree) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |           |
| SL-7     | 250                        | 25                   | 1.37                         | open gate |
| SL-8     | 200                        | 25                   | 1.37                         | open gate |
| SL-9     | 150                        | 25                   | 1.37                         | open gate |
| SL-10    | 200                        | 30                   | 1.37                         | open gate |
| SL-11    | 200                        | 35                   | 1.37                         | open gate |



**Fig. 2.** Grain size distribution curve of the gneissic weathered soil.



**Fig. 3.** Distribution of moisture contents on each position along the cross section and the flume.

면 다음과 같다. Fig. 3은 모형실험이 종료된 이후의 각 위치에서 측정된 함수비 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 토층 바닥부에서 함수비가 높은 것으로 나타났으며, 하부토조에서의 함수비가 상부토조에서의 함수비보다 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 실험과정동안 시간에 따른 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 모형 토조의 최상부(P3)에 위치한 간

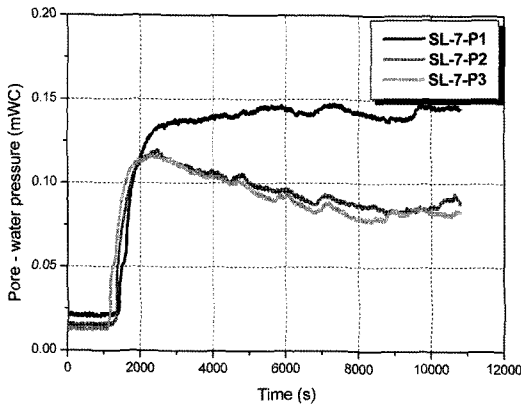


Fig. 4. Distribution of pore water pressures on each position along the flume.

극수압계에서 약 1,100초부터 반응하여 간극수압이 상승하기 시작하며, 이어서 중간부(P2)와 최하부(P1)에서 각각 1,200초와 1,500초에 간극수압이 각각 상승하기 시작한다. 이를 통해 본 실험에서의 사면붕괴 형태는 사면 하부에서 점진적으로 붕괴되어 사면상부로 전이되는 퇴행성 붕괴(retrogressive sliding)가 아니라 사면상부에서 붕괴가 시작되어 전체적으로 변형을 유발시키는 유동성 붕괴(flow sliding)임을 알 수 있다. 가장 먼저 반응한 P3 및 P2위치에서 약 2,100초 정도에 급격하게 상승을 멈추고 점차 감소하는 경향을 보인다. P1에서는 2,200초까지 급격하게 상승한 후 모형시험이 끝날 때까지 서서히 증감을 반복하여 0.14 mWC이른다. 그러나, 간극수압의 크기는 P1에서 가장 크게 나타나고, P3에서 가장 작게 측정되었다. 이는 사면에 내린 강우가 사면경사에 의해 사면 하단으로 유동하기 때문에 P1의 간극수압 값이 가장 크게 나타나는 것이다.

Fig. 5는 시간에 따른 균열의 발생과 누적변위를 나타낸 것이다. 그림에서 균열의 발생위치는 사면 선단부(toe)로 부터의 거리로 나타내었다. 전체적으로 균열의 발생위치는 크게 변화되지 않으며, 균열은 처음 사면 선단부로부터 5 cm 위치에서 발생하는 것으로 나타났다. 최종누적변위는 250 cm로서 매우 작으며, 이는 지속적인 표층유실이 발생된 것을 의미한다.

### 강우강도와 간극수압과의 관계

Moriwaki et al. (2004)에 의하면 포화지반에서 산사태 발생시 간극수압의 증가는 산사태 발생 전 느슨한 상태의 지반(simple cubic packing array)에서 산사태 발생으로 인하여 중간 혹은 조밀한 상태의 지반(simple

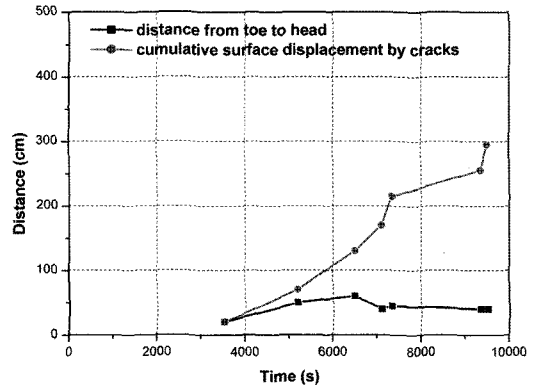


Fig. 5. Positions of crack initiation (box) and cumulative surface displacement (circle).

stagger array or pyramidal packing array)으로 전이되는 과정에서 유출되는 물의 영향에 의한 것이라고 하였다. Fig. 6은 편마암 풍화토에 대한 강우강도와 간극수압의 관계를 나타낸 것으로 간극수압의 측정위치는 경사토조의 하부로부터 10 cm(P1), 70 cm(P2), 130 cm (P3)의 거리에 위치하고 있다. 이때 사면지반의 경사는 25°, 지반의 단위중량은 1.37 g/cm<sup>3</sup>이다. 간극수압계 위치별 강우강도에 따른 간극수압의 관계는 강우강도가 클수록 간극수압 증가시간이 짧으며, 시험 초기에서 중반까지의 간극수압 크기도 큰 것으로 나타났다. 즉, 250 mm/h의 경우 실험시작 후 1,410초, 200 mm/h의 경우 1,570초, 그리고 150 mm/h의 경우는 1,760초에 각각 간극수압의 급격한 증가가 발생하였다. 이는 강우강도는 지반 내 간극수압의 급격한 증가에 결정적인 역할을 하며, 산사태의 발생과 직접적으로 관련 있음을 잘 설명하고 있다.

이 결과를 채병곤 외(2006)의 표준사를 이용한 실험 결과와 비교해 보면 간극수압의 반응속도에서 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 우선, 표준사를 이용한 실험결과에서는 본 연구에서와 동일한 강우강도 조건에서 간극수압의 증가시간이 690초~830초에 이르렀으나, 본 연구에서는 전술한 바와 같이 1,410초~1,760초로 약 2배 이상의 시간차이를 보인다. 이때, 지반의 밀도는 표준사의 경우 1.425 g/cm<sup>3</sup>였으나, 본 연구에서는 1.37 g/cm<sup>3</sup>로서 편마암 풍화토가 더욱 느슨한 지반조건을 가지고 있다. 이를 통해 편마암 풍화토는 표준사에 비해 밀도가 낮은 조건이었음에도 불구하고 강우의 침투속도가 상당히 느린 것을 알 수 있으며, 이는 편마암 풍화토를 구성하고 있는 입도, 조직, 그리고 점토 등의 광물성분과 같은 다양한 요인에 기인하는 것으로 생각된다.

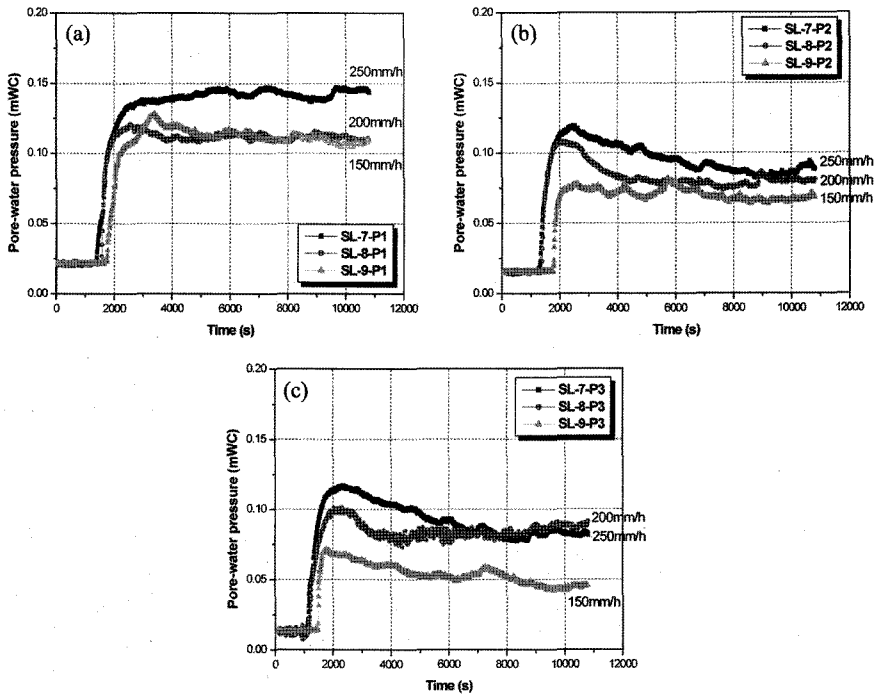


Fig. 6. Distribution of pore water pressures dependent on rainfall intensity. (a)P1, (b)P2, (c)P3.

이처럼 표준사와 편마암 풍화토의 침투속도가 다른 것은 모형토조 내 위치별 간극수압의 증가시간이 서로 다름을 통해서도 설명된다. 표준사의 경우는 모형토조 최하부에 위치한 P1 간극수압계에서 가장 먼저 간극수압이 증가하나, 편마암 풍화토는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 P3에서 간극수압의 증가가 가장 먼저 발생한다. 즉, 표준사는 원활한 침투와 지반 내 공극을 따른 유동 및 배수로 인해 사면경사를 따라 사면하부에 강우가 집중되지만, 편마암 풍화토의 경우는 침투 및 유동속도가 느리기 때문에 사면하부의 강우 이동이 상대적으로 원활하지 않아 사면 상단부인 P3에서 간극수압의 증가가 빠른 것으로 해석된다.

또한, 표준사를 이용한 실험에서는 강우강도와 간극수압 증가시간이 서로 반비례하지만(Table 2 in Chae *et al.*, 2006), 본 연구에서는 강우강도가 클수록 간극수압의 증가시간도 빠른 것으로 나타났다. 표준사의 경우는 앞에서 설명한 것처럼 지반내 강우의 침투속도가 상대적으로 빠르기 때문에, 강우강도가 클 경우 사면 전체가 빨리 포화되거나 표층부에 일시적 포화가 쉽게 이루어져 강우의 표층유출(surface runoff)이 편마암에 비해 크게 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 편마암

풍화토의 경우는 강우의 침투속도가 느리기 때문에 사면의 포화가 천천히 일어나 표층유출이 표준사에 비해 크지 않은 것으로 해석된다. 이로 인해 강우강도가 클수록 간극수압이 빨리 증가하는 것으로 판단된다.

#### 사면경사와 간극수압과의 관계

Fig. 7은 편마암 풍화토에 대한 사면경사와 간극수압의 관계를 나타낸 것이다. 이때 강우강도는 200 mm/hr, 지반의 단위중량은 1.37 g/cm<sup>3</sup>이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간에 따른 간극수압의 증가는 사면의 경사가 작은 경우 먼저 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 사면경사 25도에서는 1,570초에 간극수압이 급격히 증가하였으나, 30도와 35도에서는 각각 1,920초와 2,180초에 간극수압이 증가하였다. 이는 P1, P2 및 P3의 위치에서 모두 동일한 양상을 보인다. 이러한 원인은 사면경사가 급한 경우 지반의 표면을 따른 강우의 흐름이 발생하게 되나, 사면의 경사가 낮은 경우 오히려 간극수압의 침투가 용이해져 사면 표층부에 침윤전선의 형성을 쉽게 하였기 때문으로 판단된다.

사면경사에 따른 간극수압의 변화양상을 표준사를 이용한 실험결과와 비교해 보면 서로 다른 양상이 나타나

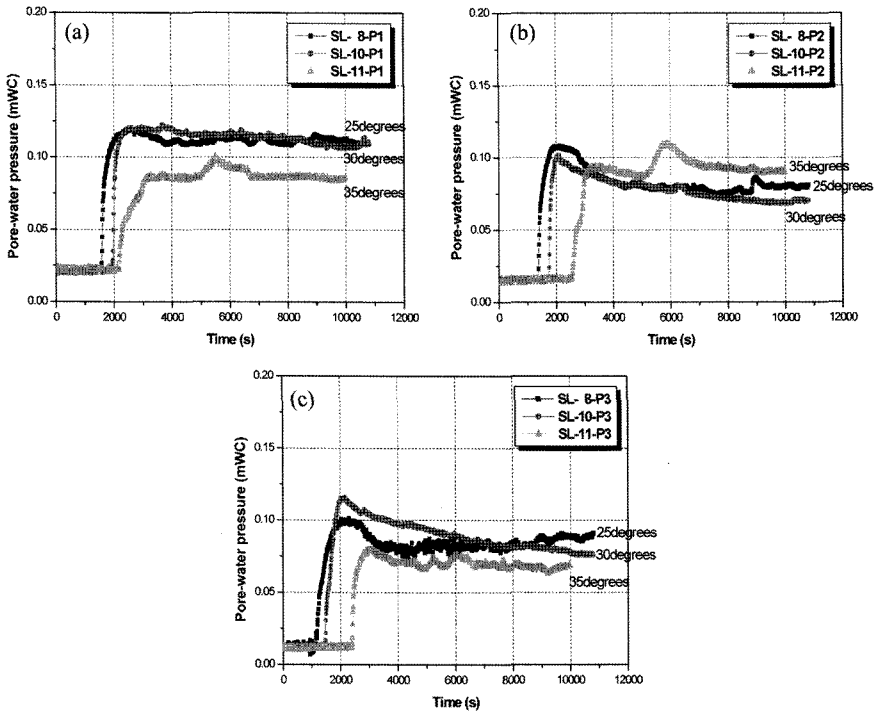


Fig. 7. Distribution of pore water pressure dependent on slope angles. (a)P1, (b)P2, (c)P3.

다. 표준사를 이용한 실험에서는 사면경사가 급할수록 간극수압이 빨리 증가하지만, 본 연구에서는 사면경사와 간극수압의 증가속도는 반비례한다. 이러한 결과는 역시 두 매질에 대한 상대적인 침투속도와 관련 있는 것으로 판단되는데, 편마암 풍화토의 경우 지반 내 강우의 침투속도가 느리기 때문에 동일한 강우강도에서는 사면경사가 급할수록 표층유출이 많이 발생하는 것으로 생각된다. 따라서, 지반내로 침투하는 강우량이 상대적으로 적어 사면경사가 급할수록 간극수압의 증가시간이 느리고, 간극수압의 절대 크기도 작게 나타난다.

### 결론

본 연구는 국내에서 산사태 발생빈도가 높은 편마암 풍화토를 대상으로 강우강도 및 사면경사 조건에 따른 간극수압의 변화양상과 산사태 발생특성을 파악하기 위해 전북 장수지역의 현장토를 이용하여 실내모형실험을 실시한 것이다. 실험결과 분석에 의하면, 모형 토조의 최상부(P3)에 위치한 간극수압계에서 간극수압이 가장 먼저 상승하기 시작하며, 이어서 중간부(P2)와 최하부(P1)에서 간극수압이 상승하기 시작한다. 이를 통해 사면상

부에서 붕괴가 시작되어 전체적으로 변형을 유발시키는 유동성 붕괴가 발생하는 조건임을 알 수 있다. 강우강도에 따른 간극수압의 관계는 강우강도가 클수록 간극수압 증가시간이 짧으며, 시험 초기에서 중반까지의 간극수압 크기도 큰 것으로 나타났다. 그리고 모형토조의 위치별 간극수압 증가시간도 사면 상부에서 간극수압의 증가가 가장 먼저 발생하였다. 이를 채병곤 외(2006)의 표준사를 이용한 실험결과와 비교해 볼 때, 편마암 풍화토는 표준사에 비해 밀도가 낮은 조건이었음에도 불구하고 강우의 침투속도가 상당히 느린 것을 알 수 있다. 또한, 편마암 풍화토의 경우는 침투 및 유동속도가 느리기 때문에 사면하부부의 강우 이동이 상대적으로 원활하지 않아 사면상단부인 P3에 간극수압의 증가가 빠른 것으로 해석된다.

한편, 간극수압의 증가는 사면의 경사가 작은 경우 먼저 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 편마암 풍화토의 경우 지반 내 강우의 침투속도가 느리기 때문에 동일한 강우강도에서는 사면경사가 급할수록 표층유출이 많이 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 지반내로 침투하는 강우량이 상대적으로 적어 사면경사가 급할수록 간극수압의 증가시간이 느리고, 간극수압의 절대 크기도 작게 나타난다.

## 사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태재해 예측 및 저감기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 과학기술부, KR-00-(T)-09, 642p.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 조용찬, 최영섭, 이춘오, 이철우, 김구영, 김정환, 김준모, 2003, 산사태 예측 및 방지기술연구, 과학기술부, KR-03-(T)-03, 339p.
- 김원영, 채병곤, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석, 최영섭, 서용석, 2006, 산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발, 과학기술부, OAA2004032-2006(3), 360p.
- 사공명, 김민석, 김수삼, 이인용, 2006, 강우로 인한 철도연변사면의 활동분석 : 실내모형실험, 한국지반공학회 논문집, 22(5), pp.83-91.
- 채병곤, 송영석, 서용석, 조용찬, 김원영, 2006, 모형실험장치를 이용한 산사태 발생 및 사태물질 거동특성 실험, 지질공학회지, 16(3), pp.275-282.
- Anderson, S. A., Sitar, N., 1995, Analysis of rainfall-induced debris flow, Journal of Geotechnical Engineering, ASEC, 121(7) pp.544-552.
- Brand, E. W., 1984, Predicting the Performance of Residual Soil Slopes, Proc. of the 11th Int. Conf. on SMFE., San Francisco, Dec., 38.
- Ikeya, Hiroshi, 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, Bull. of the IAEG, 40, pp.15-33.
- Lumb, P., 1975, Slope Failures in Hong Kong, Qtrly Jour. Geol., 8, pp.31-65.
- Mathewson, C. C., Keaton, J. R., Santi, P. M., 1990, Role of bedrock ground water in the initiation of debris flow and sustained post flow stream discharge, Bulletin of Association of Engineering geologists, 27(1), pp.73-83.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T., Loague, K., 1997, Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall, Water Resources Research, 33(1), pp.91-109.
- Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanj, T., Sassa, K., Ochiai, H., Wang, G., 2004, Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator, Landslides, 1, pp.277-288.
- Olivier, M., Bell, F.G., and Jemy, C.A. 1994, The effects of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, Proceedings of 7th Int'l. Cong. IAEG, 3, pp.1629-1636..
- Sitar, N., Anderson, S. A., Johnson, k. A., 1992, Con-

ditions leading to the initiation of rainfall-induced debris flows, Geotech Engrg, Div. Specialty Conference: Stability and performance of Slopes and Embankments-, ASEC, pp.834-839.

2007년 2월 19일 원고접수, 2007년 3월 11일 게재승인

## 채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3052  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: bgchae@kigam.re.kr

## 이성호

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: jesessung@hanmail.net

## 송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3035  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: yssong@kigam.re.kr

## 조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3059  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: choych@kigam.re.kr

## 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: ysseo@cub.ac.kr