

강우를 고려한 불포화 지반변형의 영향인자 평가

김만일^{1*} · 정교철²

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

²안동대학교 지구환경과학과

Characterization of Physical Factor of Unsaturated Ground Deformation induced by Rainfall

Man-Il Kim^{1*} and Gyo-Cheol Jeong²

¹Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

지반의 수분량 분포 및 강우에 의한 침윤선 거동과 지하수 수위 분포조사와 같이 광역지역을 대상으로 한 물리탐사기법인 지하투과 레이더탐사(ground penetrating radar, GPR) 및 전기비저항탐사(electrical resistivity survey)등을 이용해 광역조사가 이루어지며, 이에 반해 지반의 유전 반응(dielectric responses)을 이용한 유전율 측정법(permittivity method)은 협소한 지점에 대한 보다 정확한 지반의 물성 파악을 위해 다양한 연구분야에서 적용되어 왔다. 본 연구에서는 불포화 지반에 인공강우를 내려 침윤선의 침투거동을 파악하기 위하여 토층의 수분량 변화를 frequency domain reflectometry 시험법을 적용하여 측정하고, 간극수압과 간극공기압의 변화는 간극수압계로 측정하였다. 이들 측정센서는 일정 깊이의 불포화 화강풍화토 공시체 몰드에 매설하고, 상단부에서부터 강우의 침투수 거동을 계측하여 물성치 변화로부터 수분분포 및 침윤선 분포특성을 평가하는 기법을 제안하였다. 지반 변형을 효율적으로 평가하기 위해 지반의 체적함수비, 간극수압 및 간극공기압의 측정 기술을 기존의 측정법과 비교해 신속하고 정량적으로 파악할 수 있는 측정방법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

주요어 : 불포화토, 체적함수비, 간극수압, 침윤선

Geophysical survey for establishing a wide site for the distribution of water content, wetting front infiltration due to the rainfall, and distribution of groundwater level has been performed by using ground penetration radar (GPR) method, electrical resistivity method, and so on. On the other hand, a narrow area survey was performed to use a permittivity method such as time domain reflectometry, frequency domain reflectometry, and amplitude domain reflectometry methods for estimating volumetric water content, soil density, and concentration of contaminant in surface and subsurface. The permittivity methods establish more corrective physical parameters than different ground survey technologies mentioned above. In this study for establishment of infiltration behaviors for wetting front in the unsaturated soil caused by an artificial rainfall, soil physical parameters for volumetric water content, pore water pressure, and pore air pressure were measured by FDR measurement device and pore water pressure meter which are installed in the unsaturated weathered granite soil with different depths. Consequently, the authors were proposed to a new establishment method for analyzing the variations of volumetric water content and wetting front infiltration from the responses of infiltrating pore water in the unsaturated soil.

Key words : unsaturated soil, volumetric water content, pore water pressure, wetting front

*Corresponding author: mikim@kis.kigam.re.kr

서 론

전지구적으로 인구증가와 경제성장과 더불어 산업발달로 인해 국토의 효율적 개발이 요구되면서 국토의 2/3 가량이 산악지형을 이루고 있는 우리나라에서는 산지를 절취 내지 성토하여 도로를 개설하고 주택산업단지를 개발함에 따라 많은 급경사지들이 형성되고 있다. 뿐만 아니라 인간생활권이 확대됨에 따라 산지 인접지역까지 주거지 및 산업시설이 형성되어짐에 따라, 자연사면에서의 산사태 발생 위험성이 증대로 인한 산사태 발생예상 피해영역이 급증하고 있는 실정이다. 사면의 안정성 여부는 사면 하부의 시설물이나 인명의 안전에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 이들 지역의 안정성 여부를 사전에 충분한 검토와 분석이 이루어져야만 한다.

사면의 안정성은 지형조건, 암석의 풍화상태와 암상 등과 같은 급경사지의 기하학적 요인과 불연속면의 발달상태, 지하수위 유동상태, 사면의 높이와 경사각 등과 같은 이들의 지질공학적 요인으로 나누어 볼 수 있다. 이러한 요인들을 토대로 각종 문헌조사 및 현장조사를 수행하여 안정성 여부를 검토한 후, 추후 급경사지에 대한 보강 대책을 수립해야 한다(한국지반공학회, 2008).

국내 사면의 경우, 투수층인 표토 심도가 1m 이내로 얇고 대부분 불투수층인 암반으로 구분된다. 국내 절개지 사면의 약 78% 이상이 암반사면이며, 이중 위험한 절개사면의 79%가 암반사면으로 형성되어 있다. 이상과 같이 급경사지를 불안정화시키는 요인은 외적요인과 내적요인으로 나누어 볼 수 있다. 외적요인으로는 지형의 기하학적 변화, 토층 하중의 제거 내지 증가, 지진과 같은 충격과 진동, 지표수의 수위저하, 강우 등이 있다. 내적요인은 진행성 파괴, 풍화작용, 강우 등과 같은 지표수 침투에 의한 침식 등이다(심태섭 등, 2004). 여기서, 자연사면의 안정성을 저해하는 요인으로는 강우 및 지표수 침투에 의한 지반 물성변화를 들 수 있다. 이들은 지표면 유수를 통한 토양침식, 토층 내부로의 침투에 의한 간극수압 및 체적함수비 상승, 토층부 포화로 인한 전단강도 저하 등이 발생되어 자연사면 파괴를 유도한다(Yoshida et al., 1991; Lim et al., 1996; Meilani et al., 2005). 특히, 불포화상태의 토층의 경우에 흡인력(suction)이 산사태와 같은 지반의 거동 특성에 매우 중요한 역할을 하는 물성으로 작용하기 때문에 토층 내 수분 이동 및 이들의 강도특성을 고려하기 위해서는 흡인력의 영향을 고려할 필요가 있다(사공명과 임경재, 2005; 임성윤, 2007). 자연사면에서의 산사태는 지질, 지

형, 식생 및 기후조건과 같은 다양한 외부 요인의 복합적 작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히, 기후 조건에서 강우조건 하나만을 고려하여도 자연사면을 구성하는 지질매질의 상태에 따라 침투특성은 매우 달라진다. 이러한 강우조건별 침투특성을 규명하기 위한 연구가 다양한 분야에서 수행되어 왔다.

일반적으로 산사태에 대한 안정해석에 있어서는 통계적 방법에 의존하거나 또는 한계평형법에 의해 사면의 파괴여부를 판단하고 있으며, 이러한 방법론들은 제한적인 조건하에서 수치해석의 방법이 적용되어져 왔다. 포토층을 이루고 있는 지질매질은 대부분 불포화 상태로 존재해 있으며, 강우에 의해 점차 포화 상태로 변화된다. 이와 같이 불포화 조건에서 침투수에 의한 침윤선(wetting front)의 거동에 관한 문제는 사면 안정성 및 산사태와 같은 대규모 지반변형에 있어 중요한 부분을 차지한다(Zhang et al., 2000). 흙-수분 특성(soil-water characteristic, SWC)은 불포화토의 거동을 분석하는데 매우 중요한 물성 중 하나이다. SWC 특성은 지하수 유동, 강우에 의한 사면의 안정성 해석에 반드시 고려되어야 할 중요한 물성 중의 하나이다(강종범 등, 2006). 특히, 최근에는 산사태 발생 메커니즘 분석, 매립지 또는 오염 토양을 통한 물의 흐름과 오염물질 이동 등의 해석을 위하여 다양한 연구분야에서 포화흐름과 연계하여 연구를 수행하고 있다.

불포화토에서의 흐름은 Darcy의 법칙을 만족하지만 이 경우의 투수계수는 압력수두와 함수관계를 가진다(Reddi, 2003). 불포화토에 대한 습윤 함수비(moisture content)와 투수계수(hydraulic conductivity)를 산출하는 실내시험에 의하면 이들은 모두 부(negative)압력수두와 함수관계를 가지며 이력곡선(hysteresis curve)의 형태로 나타난다. 또한 불포화 토층에서의 수분분포와 흡인력은 침윤선 거동에 의한 침투수 이동특성을 평가하는 중요한 물성이다. 이를 활용함에 있어 불포화 지반의 수분이동 현상을 평가하는 연구가 실내 및 야외실험을 통해 시도되어왔다(Indrawan et al., 2006; Kim et al., 2006; Peace et al., 2006). 지반의 수분량 분포 및 강우에 의한 침윤선 거동과 지하수 수위 분포조사와 같이 광역지역에 대해서는 물리탐사기법을 적용한 지하투과 레이다탐사(ground penetrating radar, GPR) 및 전기비저항탐사(electrical resistivity survey)등을 이용해 광역조사가 이루어졌으며, 이에 반해 지반의 유전 반응(dielectric responses)을 이용한 유전율 측정법(permittivity method)은 협소한 지점에 대한 보다 정확한 지반의 물성 파악을

위해 다양한 연구분야에서 적용되었다(이우진 등, 2003; 김만일과 정교철, 2004; Walker *et al.*, 2004; Yu and Drnevich, 2004; Corwin *et al.*, 2006; Turesson, 2006).

본 연구에서는 불포화 지반에 인공강우를 내려 침윤선의 침투거동을 파악하기 위해서 토층의 수분량 변화를 다공질매질의 유전을 반응을 측정하는 frequency domain reflectometry (FDR) 시험법을 적용하여 측정하고, 간극수압과 간극공기압의 변화는 간극수압계로 함께 실시간(real time)으로 측정하였다. 이들 측정센서는 일정 깊이의 불포화 화강풍화토 공시체 몰드에 매설하고, 상단부에서부터 강우의 침투수 거동을 계측하여 물성치 변화로부터 수분분포 및 침윤선 분포특성을 평가하는 기법을 제안하였다.

시료 및 시험

시료

시험에 사용한 흙시료는 화강풍화토(weathered granite soil)이며, 입도분포곡선을 Fig. 1에 나타내었다. 화강풍화토의 물성시험 방법은 입도시험, 밀도시험, 함수비시험, 압밀시험을 통해 흙의 물성을 산정하였다. Table 1은 본 실험을 위해 흙시료의 다짐압밀 제작 조건을 나타낸

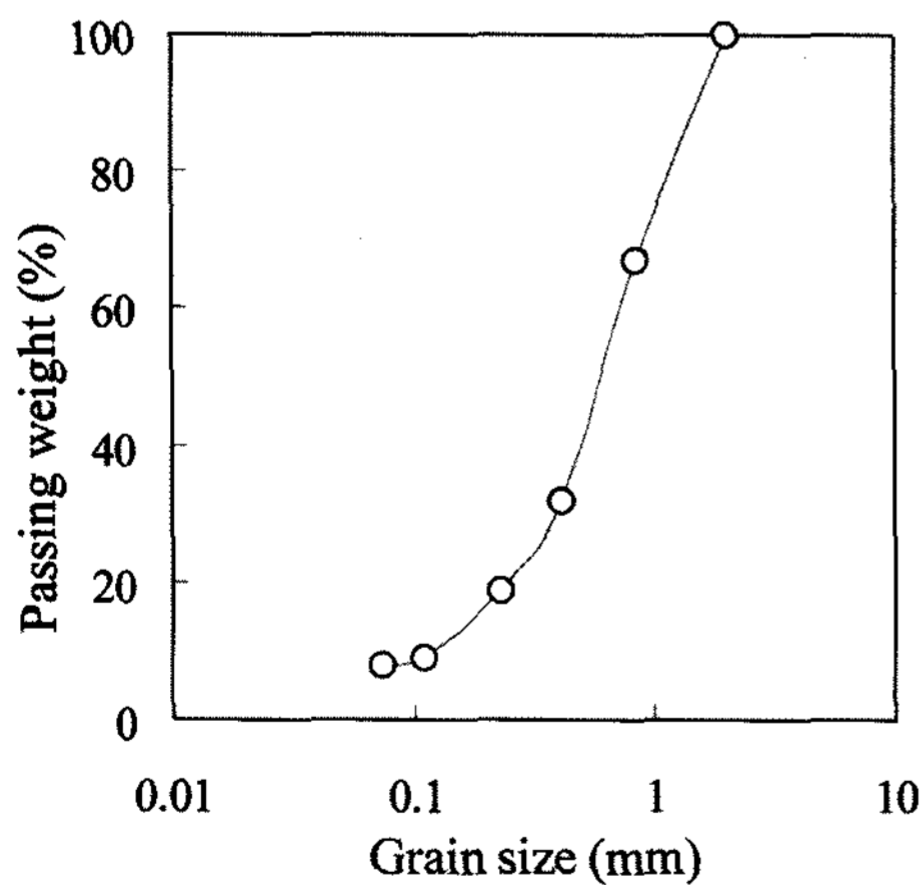


Fig. 1. Grain distribution curve for weathered granite soil.

Table 1. Soil physical property for weathered granite soil.

	Specific gravity g/cm ³	Dry density g/cm ³	Porosity <i>n</i>	Void ratio <i>e</i>	Moisture content ω (%)	Volumetric water content θ (cc/cc)
Weathered granite soil	2.62	1.73	0.34	0.61	5.0	0.08

것이다. 불포화 화강풍화토를 대상으로 강우에 의한 침투수 거동특성을 파악하기 위해, 공시체 몰드는 화강풍화토를 10 cm 두께로 몰드에 넣은 후 다짐하였으며, 이를 총 9단계에 걸쳐 다짐압밀하여 제작하였다. 단계별 다짐압밀시 화강풍화토의 공극률 설정은 공시체 몰드의 총부피(total volume, V_t), 흙시료의 비중(specific gravity, G_s), 설정 공극률(porosity, n)과 흙의 무게(soil weight, W_s) 등의 관계를 이용해 아래 식으로 구하였다.

$$W_s = (1-n)G_s \cdot V_t$$

이와 같이 공시체 내 화강풍화토를 반복 다짐압밀을 통해 공시체 몰드의 공극률이 0.34가 되도록 조절이 가능하다.

반복누적강우 침투시험

본 실험에 사용된 공시체 몰드는 직경 50 cm, 높이 90 cm의 원통형 공시체 몰드를 제작하여, 화강풍화토가 초기 공극률이 0.34가 되도록 높이 90 cm까지 압밀다짐 작업을 통하여 제작하였다. 인공강우장치는 공시체 몰드 상단부에서 50 cm 높이에 설치하였다. 본 강우장치는 직경 1 cm의 PVC 파이프를 10 cm 간격으로 4열로 배열하였으며, 각 열당 노즐의 간격은 7 cm의 등간격으로 설치하였다. 인공강우 살포 노즐은 직경 1 mm인 농약 살포용 노즐을 설치하고 정수위 탱크와 연결시켜 인공강우가 발생되도록 하였다. 인공강우량은 시간당 최소 10 mm에서 최대 100 mm까지의 강우가 발생될 수 있도록 조절 가능하다. Fig. 2는 인공강우 침투수에 의한 불포화토의 침투특성을 파악하기 위해 측정센서 및 인공강우장치의 설치 모식도이다.

불포화 화강풍화토를 대상으로 한 침투시험은 인공강우장치에서 발생된 인공강우가 불포화토 상단부에서 하단부로 침투하여 중력배수될 수 있도록 배수밸브를 Fig. 2(a)와 같이 공시체 몰드 하단부 중앙에 설치하였다. 인공강우 살포와 동시에 불포화 시료에서의 침투수 거동은 FDR, 간극수압 및 간극공기압 측정센서를 통해 실시간으로 측정이 이루어지며, 이들의 측정치는 데이터로거를 통해 자동 저장되도록 장치들을 구성하였다.

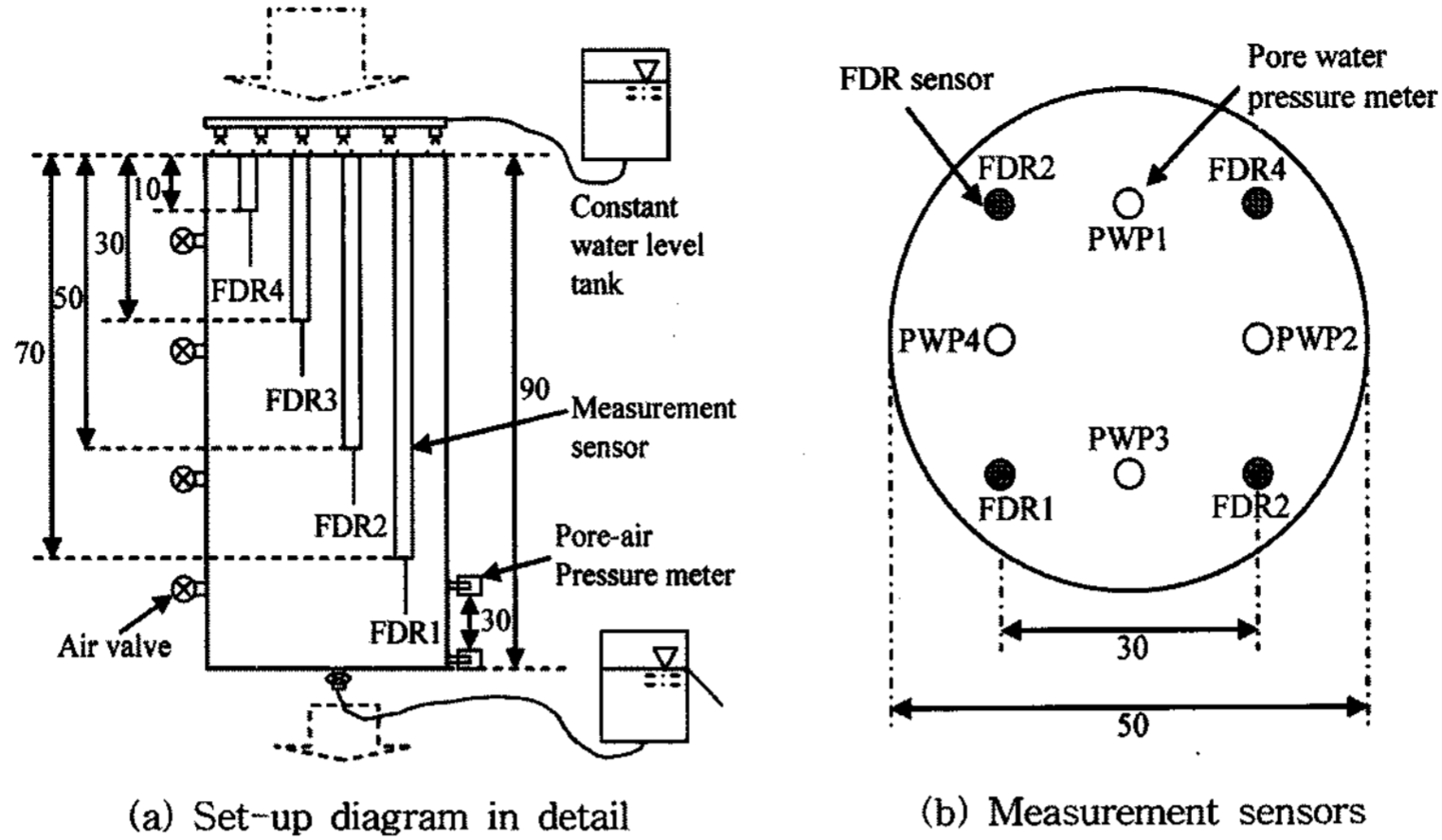
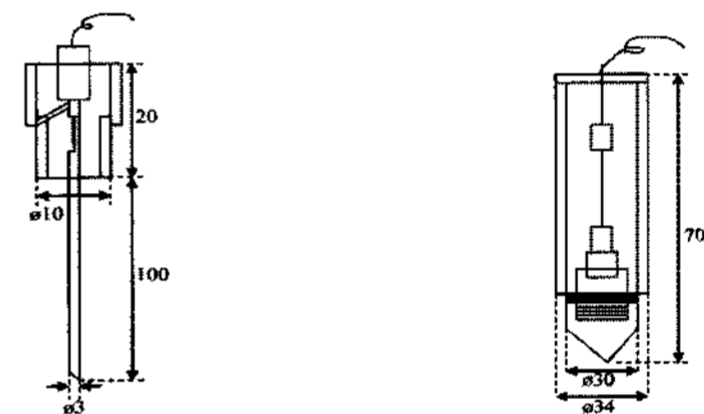


Fig. 2. Schematic diagram of artificial infiltration test for this study (unit: cm).

측정센서의 설치는 공시체 몰드 상단부의 표면부를 기점으로 하여 일정 깊이에 수직으로 매설하는 방식으로 이루어졌다. 불포화 화강풍화토 상단부에 직경 3 cm의 핸드 오거를 이용하여 구멍을 뚫은 후 직경 2.5 cm의 PVC 파이프 선단에 연결된 간극수압계와 FDR 측정센서를 -10 cm, -30 cm, -50 cm, -70 cm의 깊이에 정확히 매설할 수 있도록 하였다.

Fig. 3은 본 연구에 사용된 각 측정센서의 형태를 보여 준다. Fig. 3(a)는 불포화토의 체적함수비를 측정할 수 있는 FDR 측정센서로써, 본 연구에서는 10 cm 길이를 사용하여 몰드 표면부에서 -10 cm, -30 cm, -50 cm, -70 cm 지점에 총 4개의 측정센서를 “口”자 형태로 설치하였다. 또한, FDR 측정센서의 설치방법과 동일하게 간극수압계(Fig. 3(b))도 함께 공시체 몰드 표면부의 수직방향으로 “+”자 형태로 FDR 측정센서 사이의 중간지점에 각기 매설하였다. 또한, 간극수압계 선단부에 부착된 세라믹캡을 유리필터로 교환하여 간극공기압을 측정할 수 있도록 고안된 간극공기압계를 공시체 몰드 외측부의 -60 cm와 -90 cm 지점에 설치하였다.

간극공기압계의 역할은 인공강우에 따른 공시체 몰드 내부의 침투수 거동에 따른 불포화 화강풍화토 내의 간극공기압 변화를 실시간으로 측정하기 위함이다. 간극수압계는 부압(negative pressure)을 측정하기 위해 세라믹캡(ceramic cap)을 붙여 사용하였지만, 간극공기압계는 세라믹캡(ceramic cap) 대응으로 유리필터(glass filter)를 선택하여 사용하였다. 세라믹캡의 경우, 간극수압을 측정하기 위해서는 일반적으로 세라믹캡을 포화시킨 후 사용하기 때문에 간극수(pore-water)와 같은 물은 원활히



(a) FDR measurement sensor (b) Pore water pressure meter

Fig. 3. Schematic diagram of measurement sensor for this study (unit: mm).

통과하지만 간극공기(pore-air)의 경우는 전혀 세라믹캡을 통과하지 못하기 때문에 간극공기압을 측정할 수 없다. 이에 세라믹캡을 대신 유리필터를 사용함으로써 침투수 거동에 따른 간극공기압을 측정할 수 있도록 제작하였다.

이 모든 측정센서를 매설한 후, 매설지점 상단부에서 측정센서 측정지점에 직접적인 인공강우의 유입을 완벽하게 차폐하기 위해 석고로 불포화토와 측정센서사이에 이격된 공간을 되메움 하였다. 제작된 공시체 몰드를 대상으로 인공강우시험을 하였을 때, 측정 물성치는 체적함수비, 간극수압, 간극공기압, 배수유량이며, 각 측정센서를 데이터로거에 직접 연결하여 자동 계측되도록 설계하였다.

결 과

불포화 화강풍화토 내부에서 인공강우에 의한 침투수 거동을 파악하기 위해서 몰드 상단부에 설치된 인공강우 재현장치를 통해 총 3단계에 걸쳐 인공강우를 살포하였다. 인공강우 살포는 1단계와 2단계에서 4시간, 3단

Table 2. Artificial rainfall conditions based on the rainfall intensity.

Rainfall	Rainfall spraying time (hour)	Rainfall intensity (mm/hour)	Accumulated rainfall (mm)
1 Step	4~8	45	180
2 Step	50~54	15	60
3 Step	75~77	15	30

계에서 2시간 동안 각기 강우를 내렸다. 이에 반해 강우강도는 1단계에서 시간당 45 mm, 2단계와 3단계는 시간당 15 mm로 설정하였다. 인공강우 실험조건은 현장에서 자연 강우가 내렸을 경우를 고려해 강우시간과 강우강도가 일정하지 않고 반복강우와 누적강우 모두를 고려할 필요가 있다. 따라서, 이상과 같은 실험 조건을 만족하기 위해서 인공강우의 살포시간, 강우강도 및 누적강우량의 관계를 상호 고려하여 Table 2에 기술한 바와 같이 실내실험을 수행하였다. 본 실험은 총 98시간동안 연속적으로 실험이 수행되었으며, 총 3단계에 걸쳐 강우에 의한 침투수 거동 및 이로 인해 발생된 유출수 측정이 이루어졌다.

강우조건에 따라 불포화 화강풍화토 내에서의 침투수 거동특성을 본 실험 연구결과를 통해 분석하였다. Fig. 4는 인공강우 실험 시작부터 24시간까지 FDR 측정센서에서 계측된 1단계 인공강우에 의한 체적함수비 변화를 보여주고 있다. Fig. 5는 간극수압계에서 측정된 1단계 인공강우에 따른 간극수압 변화를 나타낸다. 공시체 몰드 제작 전 화강풍화토의 체적함수비는 0.154 cc/cc였으나, 공시체 제작 후 FDR 측정센서로 측정된 체적함수비 초기치는 0.145~0.169 cc/cc로 약 6~9%의 차이를 보인다. 이러한 차이는 몰드 제작 시 설정 초기 공극률을 만족시키기 위해 총 9번의 다짐압밀이 이루어져 공시체 몰드의 상단부와 하단부에서의 밀도 차이에 의한 것으로 판단된다. 이러한 유전을 반응은 매질의 다짐정도, 입도 분포 및 체적함수비 함량에 영향을 받기 때문에 이를 이용하여 지반 변형 및 지반 물성 파악에 적용할 수 있다(Drnevich et al., 2005; Kliner and Grozic, 2006).

Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 45 mm/h의 강우 강도를 갖는 1단계 인공강우 조건하에서 공시체 몰드의 체적함수비와 간극수압의 변화를 측정센서가 깊이별로 설치된 지점에서 침투수 이동 분포로부터 명확히 파악할 수 있었다. 또한, FDR 측정센서와 간극수압계의 측정 민감도 측면에서 비교적 비슷한 측정시점을 갖는 것으로 나타났다. 침투수에 의한 침윤선 형성범위를 보다 정확하고 신속하게 파악하기 위해서는 직접적인 침투수에 의한 수분분포를 파악하는 것이 중요하다. 이러한 이

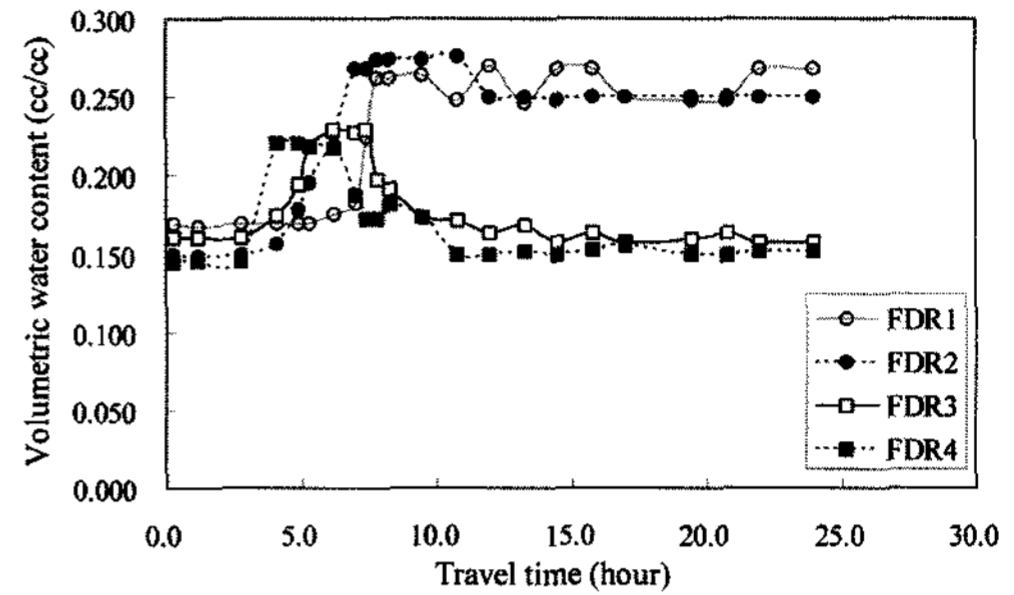


Fig. 4. Variations of volumetric water content under the first step during artificial rainfall.

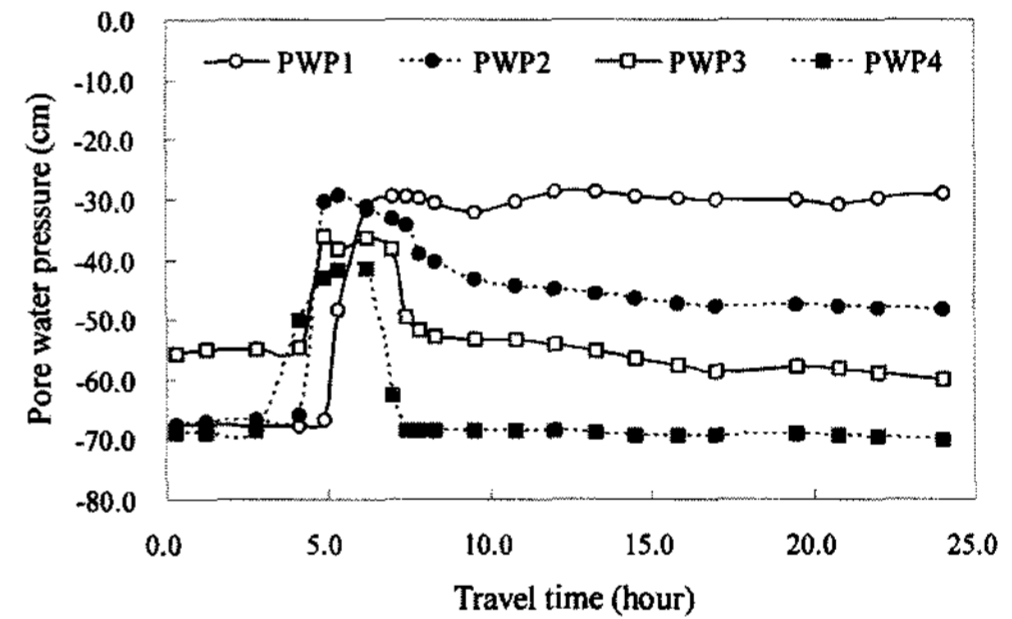


Fig. 5. Variations of pore water pressure during artificial rainfall at the first step.

유는 불포화토 내에서 수분량의 증가는 흡입자의 결합력을 약화시키고 간극수압을 증대시킴으로써 전단저항력을 감소시키는 원인으로 작용하여 결과적으로 사면붕괴를 초래하기 때문에 급경사지 모니터링에 있어 매우 중요한 요소이다.

깊이별로 설치된 측정센서의 물성치 반응으로부터 침투수에 의한 침윤선 거동을 충분히 계측할 수 있음을 파악하였다. Fig. 4로부터 알 수 있듯이 FDR 측정센서 -70 cm 및 -50 cm 설치 지점에서는 침윤선(wetting front)이 도달한 후에도 흙의 공극 내에 수분을 보유하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 계측 결과는 공시체 몰드의 중간부인 40~60cm 구간에 수분 보유력이 다른 것을 알 수 있다.

1단계 강우조건에서는 공시체 몰드 하단부에서 침투

수에 의한 배수는 관찰되지 않았다. 이러한 현상은 불포화 조건을 갖는 화강풍화토의 공극에 침투수가 흡착되어졌기 때문이다. 다시 말해 다공질인 흙매질에서 유체의 이동은 불포화상태에서 포화상태로 바뀌면서 유효공극이 상호 연결된 통로를 통해 서서히 이동이 진행된다(Domenico and Schwartz, 1990). 1단계 실험결과에서 보는바와 같이, 공시체 몰드에 각각의 깊이별로 설치된 간극수압계의 반응보다는 FDR 측정센서에서 측정된 체적함수비의 반응이 보다 정확한 침투수의 범위를 파악할 수 있다.

15 mm/h 인공강우 조건인 2단계는 1단계가 끝난 40시간 후에 시작되었다. 설치된 측정센서와 데이터로거는 공시체 몰드의 체적함수비, 간극수압 및 간극공기압을 지속적으로 측정하고 있다. Fig. 6은 실험 중 측정된 침투수의 배수량 변화를 나타낸 것이다. 1단계와 2단계 초반까지는 침투수의 배수가 발생하지 않았으나, 2단계 중반부터 3단계 종료 시점까지 침투수의 배수가 단계별로 증가함을 확인하였다. 이는 공시체 몰드의 화강풍화토가 불포화에서 포화상태로 바뀌었음을 보여주는 것으로써, 측정센서에서 측정된 체적함수비, 간극수압 및 간극공기압의 상승을 간접적으로 나타내고 있다.

2단계(누적강우량 60 mm)와 3단계(누적강우량 30 mm)의 인공강우에 의한 화강풍화토에서의 침투수 거동을 Figs. 7, 9, 10에 나타내었다. 공시체 몰드에 설치된 모든 측정센서에서 침투수 거동에 따른 체적함수비, 간극수압 및 간극공기압의 변화를 시간에 따라 증감상태를 파악하였다. Fig. 7은 각 측정센서에서 측정된 체적함수비 변화를 나타낸 것으로서 공시체 몰드 상단부에 설치된 FDR3과 FDR4는 측정센서 부근에서 침투수 거동의 영향으로 체적함수비의 증감을 보였다. 이와 대조적으로 공시체 몰드 하단부에 설치된 FDR1과 FDR2의 경우, 1단계 인공강우 실패 이후부터 지속적으로 포화상태를 보이고 있다. 특히, 최하단부에 설치된 FDR1이 FDR2보다 비교적 높은 체적함수비를 가진 것으로 나타났다.

본 실험에 사용된 실험장치는 중력배수조건을 만족시키는 형태로 제작되었기 때문에 공시체 몰드 상단부보다는 하단부로 갈수록 체적함수비가 높게 나타난다. 이는 Fig. 8의 토양수분특성곡선(soil water characteristic curve, SWCC)에서도 잘 보여준다. 토양수분특성곡선에서와 같이 화강풍화토의 경우, 침투조건에서는 비선형적 형태를 보이지만 배수조건에서는 비선형조건을 보이다가 간극수압이 작아질수록 선형을 나타내는 것으로 측정되었다. 이는 중력배수시 흡입자와 흡입자 사이의

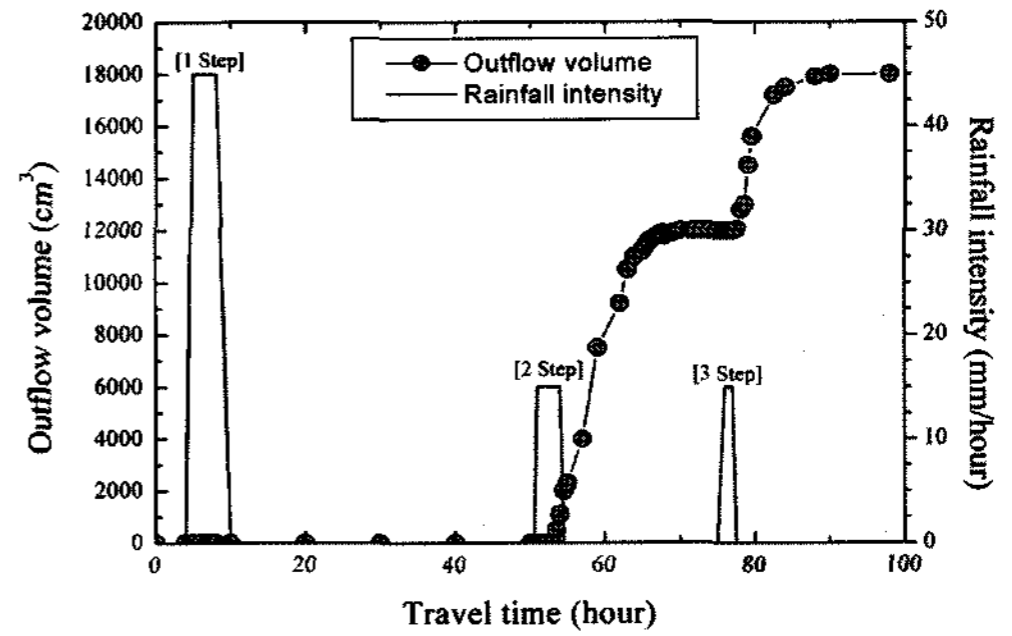


Fig. 6. Variations of outflow volume for infiltrated artificial rainfall through the weathered granite soil mold.

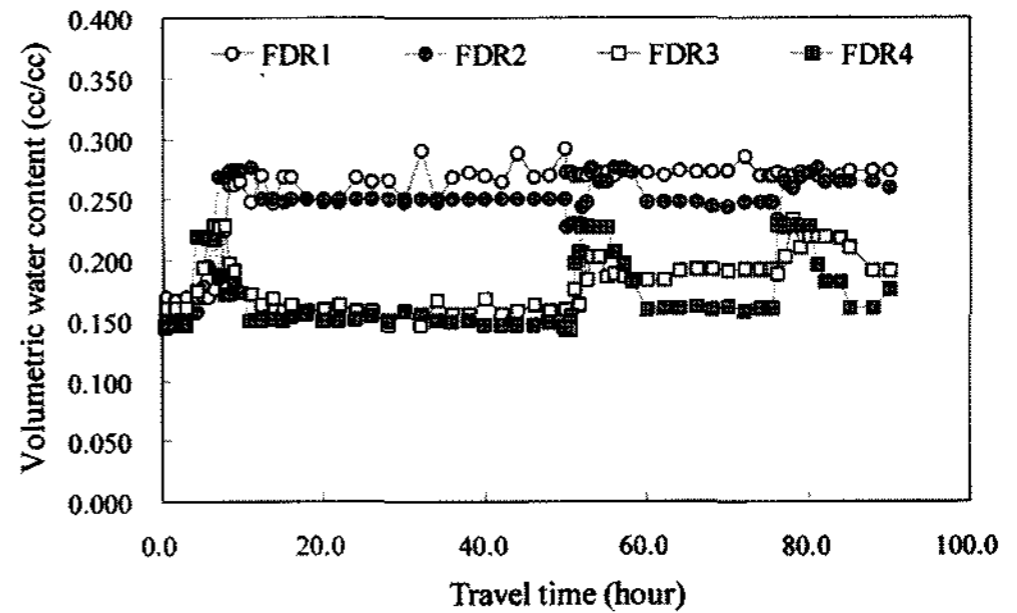


Fig. 7. Variations of volumetric water content during artificial rainfall with the whole of experiment steps.

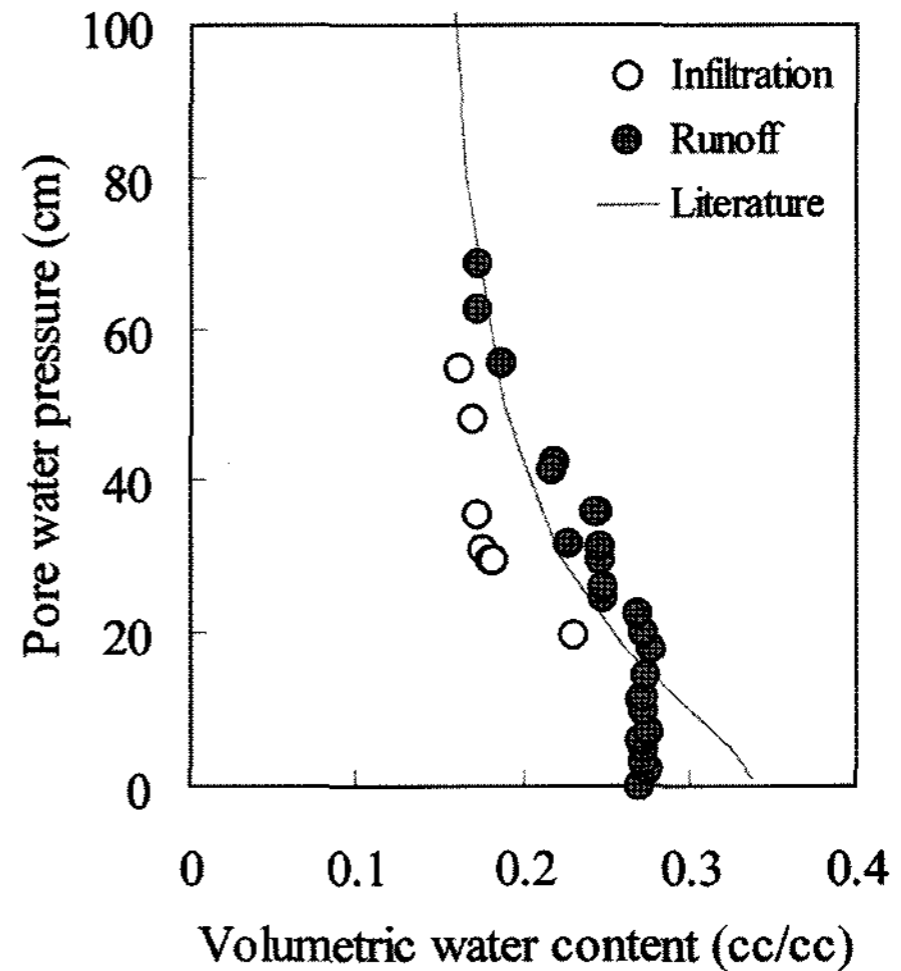


Fig. 8. Soil water characteristic curve (SWCC) through inflow and outflow processes.

공극 내에서 이동수(mobile water)보다 비이동수(immobile water or absorbed water)의 흡착력이 더 크기 때문에

더 이상의 배수가 발생하지 않기 때문이다.

Fig. 7에서 -70cm(공시체 몰드 하부로부터 20 cm 높이) 지점에 설치된 FDR1의 측정결과는 거의 화강풍화토가 포화 상태에 도달한 것으로 추정되는데, 이는 수분상태 변화가 거의 없기 때문이다. 일반적으로 불포화 지반은 닫혀진 공극(closed pore or dead pore)내 공기가 존재 하며, 이로 인해 불포화 지반이 침투수 등에 의해 포화 상태로 변함에 따라 이들의 체적함수비는 공극률의 80~90% 정도가 되는 것으로 알려져 있다(Stephens, 1995). 따라서, 공극률 $n=0.34$ 인 공시체 몰드는 체적함수비 = $0.272\sim 0.306$ cc/cc 정도로 포화상태로 추정할 수 있다. 그러므로 공시체 몰드 하부로부터 20 cm 지점에 위치한 FDR1 측정센서의 측정치는 인공강우에 의해 이미 포화상태에 도달한 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 침투수 거동에 따른 간극수압과 간극공기압의 변화를 도시한 것이다. 간극수압의 경우, FDR 측정센서의 설치지점과 동일한 지점에 설치되어 있어, 침투수 거동에 따른 물성 변화를 체적함수비와 함께 비교해 볼 수 있다. 간극수압이 증가하는 시점과 체적함수비의 증가 시점이 거의 동일하며, 이들의 변화는 인공 강우 단계별 살포 시점과 함께 반응함을 알 수 있다. 앞서 설명한바와 같이, 체적함수비는 인공강우 살포 단계별 침투수 거동과 함께 증감의 반응을 보이고 있지만, 간극수압의 경우에는 간극수압계의 설치 지점별로 증감의 차이를 뚜렷이 보이고 있다. 특히, 인공강우 단계별 시점을 고려해 침투수 발생 여부를 공시체 몰드 최하단 부에 설치된 간극수압계인 PWP1에서도 충분히 확인할 수 있다.

Fig. 11은 단계별 강우조건에 따라 간극공기압이 상승 하는 결과를 보여준다. 간극공기압의 변화에서도 강우 살포에 따른 침투수 거동 양상을 공시체 몰드 하단부의 PAP1과 PAP2에서 파악할 수 있다. 간극수압계 PWP1과 PWP2를 간극공기압 PAP2와 비교한 것으로서, 이 결과는 침투수 분포를 분석하는데 활용할 수 있다. 공시체 몰드가 불포화 초기조건일 때는 간극수압과 간극공기압이 일정한 값을 갖고 있었으나, 침투수가 발생되어 수분함량이 증가할수록 점진적으로 증가하는 경향을 보여준다.

2단계 인공강우 시작지점부터는 간극수압과 간극공기압이 거의 일정한 값을 보였으나, 공시체 몰드가 포화상태를 지속적으로 유지함에 따라 이들은 비교적 평형한 상태를 보이고 있다. 이와 같은 간극수압과 간극공기압과의 관계는 흙매질이 불포화 조건에서 침투수에 의한 수분량 증가와 함께 점진적으로 증가하는 경향성을 갖

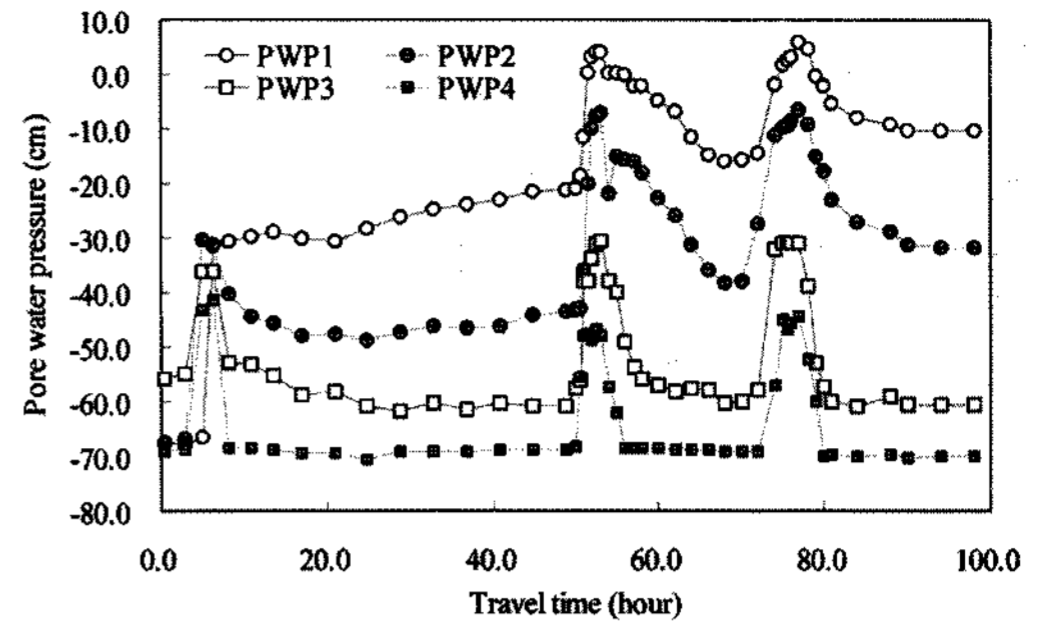


Fig. 9. Variations of pore water pressure during artificial rainfall with the whole of experiment steps.

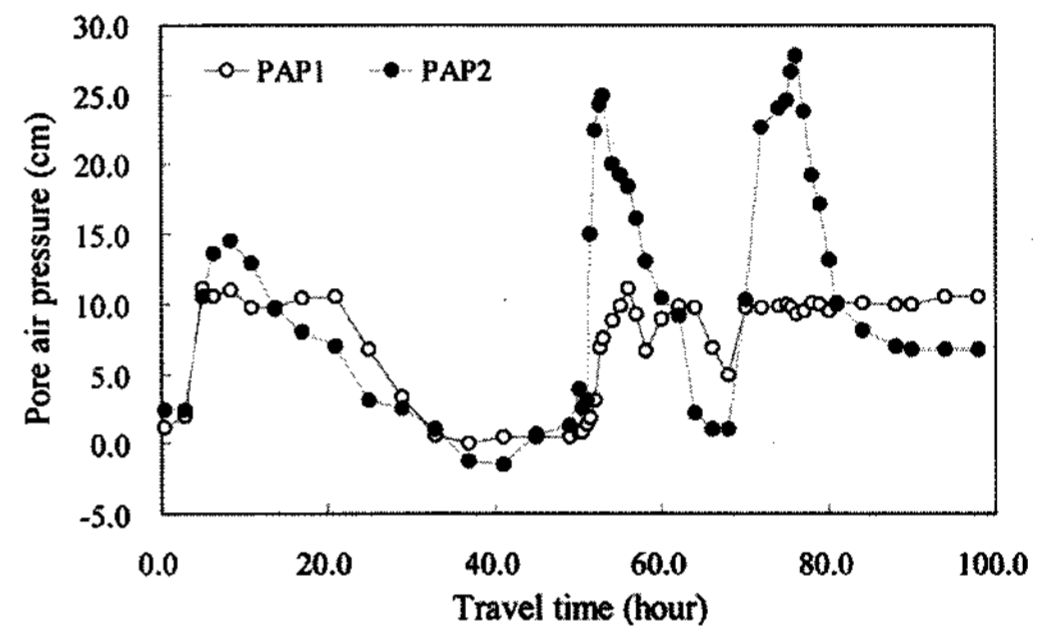


Fig. 10. Variations of pore air pressure on PAP1 and PAP2 during artificial rainfall.

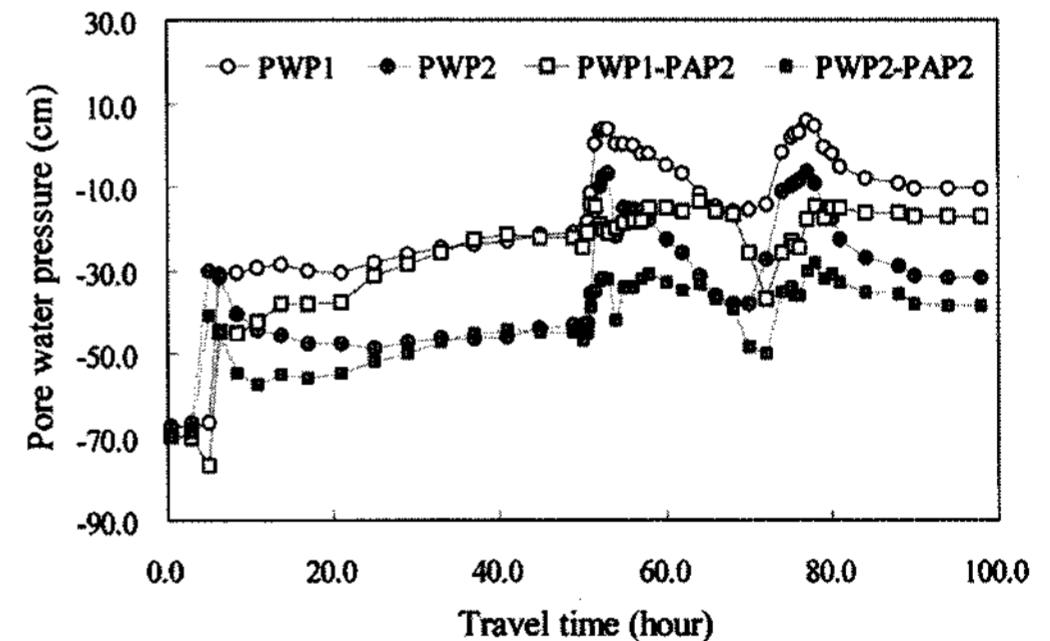


Fig. 11. Differences of pore water pressure meter and pore air pressure meter.

지만, 흙매질이 포화상태로 존재할 경우에는 평형한 상태를 갖는다. 이러한 관계로부터 흙매질의 침투수 거동에 따른 이들의 불포화 및 포화상태 여부를 추정할 수 있다.

토 의

인공강우시 강우강도를 고려한 불포화 화강풍화토 내

침투수 거동을 깊이별로 설치된 측정센서를 통해 계측하였다. 강우강도를 고려한 반복강우와 불포화 매질에 대한 누적강우조건을 함께 고려하여 시간적 변화폭이 큰 수분량을 연속적으로 계측할 수 있도록 실험장치 및 실험조건을 연구목적에 부합되도록 설정하여 실험을 수행하였다.

본 연구를 통해 침투수의 거동을 체적함수비와 간극수압 변화 양상으로 파악할 수 있음을 확인하였다. 각 측정센서의 물성변화를 측정하는 방식이 서로 다르기 때문에 연구자의 의도에 따라 선택적으로 측정센서의 적용범위를 결정할 수도 있다. 특히, 산사태와 같은 토층 지반의 파괴로 인한 피해를 사전에 인지하기 위해서는 강우조건에 따른 토층의 물성변화를 신속히 파악해야만 한다. 토층 지반의 파괴는 일반적으로 불포화 및 포화매질의 경계지점에서 전단저항력의 감소 및 복합적인 지반 메카니즘에 의해 발생된다. 이러한 현상은 침투수에 의한 체적함수비 증가로 토층 지반의 포화상태 지속시간이 매우 중요한 요소로 작용할 수 있다. 따라서, 강우의 반복 조건 및 누적조건을 함께 고려해 지반의 포화상태를 파악하기 위해서는 지속적이고 장기적인 지반의 함수비와 간극수압의 측정이 필수적이다.

간극수압 측정치와 비교해 FDR 측정법에 의한 수분량 계측은 강우에 따른 지반 내 수분량 변화를 비교적 정밀하게 측정할 수 있음을 파악하였다. 본 실험에서와 같이 단기간 내에 불포화토의 흡인력(suction)을 계측하는 것도 충분히 가능하지만, 장기간에 걸쳐 물성 변화를 계측함에 있어 FDR 측정법이 적합한 것으로 나타났다. 또한 FDR 측정법의 측정센서를 설치하는 방법으로는 Fig. 7의 FDR1로부터 알 수 있듯이 모관상승 범위로 생각되는 지점에 설치한다면, 강우에 의한 침투수 거동을 파악함에 있어 정량적인 계측 결과를 취득하기 어렵다. 결과적으로 이들 측정센서 설치지점은 모관상승의 범위를 벗어나는 지점 및 토층 부근 등의 수분량이 큰 변화를 보이는 지점에 측정센서를 설치하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

토층 부근의 불포화 침투를 고려할 경우, 불포화 침투특성을 계측하는 것은 실제 지반에서 완전한 포화상태로 존재하지 않기 때문에 침윤과정을 통해 계측하는 것이 보다 정확한 결과치를 계측할 수 있다. 불포화 투수계수의 경우, 침윤과정과 배수과정에서의 불포화 투수계수는 서로 다른 값을 갖지만, 수분특성곡선에서의 포화 부근에서 매우 큰 차이를 보이는 것이 일반적이다 (Meilani *et al.*, 2005).

본 연구결과를 토대로 볼 때, FDR 측정법에 의한 지

반의 수분량을 계측하는 것은 일반적으로 지표면 부근에 일정 깊이 간격으로 투수층인 풍화토층과 불투수층인 암반경계 지점까지 수직 방향으로 측정센서를 설치하는 것이 효과적인 방법이다. 사면붕괴의 위험예측에 있어 토층 내 체적함수비를 연속적으로 계측하고, 설정된 위험등급에 도달한 경우에 대피경고를 발령하는 것이 바람직할 것이다.

또한, 계측된 체적함수비를 이용해 사면의 침투특성을 평가하고, 강우에 의한 지반 내 침투류 해석에 의한 위험등급을 설정하는 것이 반드시 요구된다. 이 경우 중요한 물성치는 흙의 공극률 및 흙의 불포화 침투특성이다. 앞서 설명한 바와 같이 완전 포화상태에서 침투특성은 자연상태의 지반에서의 침투특성과는 차이를 갖는다. 그러므로 사면붕괴에 있어 중요 고려사항은 중력배수과 정도 침윤과정과 마찬가지로 불포화 침투특성을 평가하는데 있어 함께 계측이 이루어져야만 한다는 것이다.

결 론

본 연구는 불포화 화강풍화토를 대상으로 반복강우와 누적강우에 의해 발생하는 침투수의 중력방향 침윤선 형성범위를 파악하기 위해 유전율 반응을 이용한 FDR 측정센서, 간극수압계 및 간극공기압계를 불포화 칼럼 내 각기 설치하여 총 3단계 걸쳐 98시간 동안의 침투수 및 침윤선 거동을 실시간 모니터링하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 연구결과를 도출하였다.

1. 현장의 강우상황이 강우시간과 강우강도가 일정하지 않다는 점에 착안하고 이를 반복강우와 누적강우 조건을 함께 고려하여 1단계와 2단계를 4시간, 3단계를 2시간으로 인공강우를 살포하고, 강우강도는 1단계 45 mm/h, 2단계와 3단계 15 mm/h로 설정하여 매질의 물성변화를 계측하였다. 이를 통해 불포화토 내 침투수에 의한 침윤선 형성과정을 파악할 수 있었다.

2. FDR 측정센서로 측정된 불포화 화강풍화토의 체적함수비는 건조시험법에 의해 0.154 cc/cc와 비교해 0.145~0.169 cc/cc 범위에서 측정되었다. 이는 불포화토의 체적함수비 측정정도가 기존 건조시험법과 비교해 유전율법이 비교적 높음을 알 수 있다. 또한, 매질의 체적함수비 측정이 침투수에 의한 유전율 반응을 이용하기 때문에 실시간 모니터링이 충분히 가능하다.

3. 단계별 강우강도 하에서 FDR 측정센서와 간극수압계에서 침윤선의 거동을 깊이별로 파악할 수 있었으며, 특히, 간극수압계보다 FDR 측정센서의 측정치로부터 침

윤선 형성범위를 정확하고 신속하게 측정할 수 있었다.

4. 화강풍화토의 토양수분특성곡선(SWCC)의 변화는 침투조건에서 간극수압이 커질수록 비선형 형태를 보이다가 배수조건에서 간극수압이 작아지면서 선형을 형성한다. 이는 흡입자와 흡입자 사이의 공극 내에서 공극수의 흡착정도에 영향을 받기 때문이다.

강우에 의한 침투수 거동을 파악하기 위해서는 원지반의 투수층과 불투수층의 경계를 명확히 파악해야만 한다. 이는 불투수층 경계에서 모관상승은 침투수가 발생하더라도 체적함수비 변화는 거의 없다. 따라서, 원지반을 표토층, 풍화토층, 불투수층으로 명확히 구분하여 침투수의 침투능이 원활한 지점에 측정센서를 설치하여 측정이 이루어져야 한다. 또한, 침투수 거동에 따른 침윤선 분포와 지하수위 변화도 함께 파악해야 한다.

초기강우에 의한 지반의 체적함수비가 점진적으로 상승하기 때문에 침윤선의 침투속도도 빠르고, 이에 따른 체적함수비의 고함수비 영역도 확대되어 최종적으로 사면붕괴가 발생할 수 있는 요인으로 작용한다. 따라서, 지반의 체적함수비를 계측하는 경우에는 사면붕괴 위험등급을 고려해 포화도를 사전에 파악하여야 하며, 그 포화도의 침윤선 강도를 깊이별로 설치한 측정센서로 지속적으로 계측하는 것이 필요하다.

사 사

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

참 고 문 헌

강종범, 배우석, 이봉직, 2006, 삼축압축실험에 의한 불포화 준설토의 전단강도 특성, 한국지반환경학회 논문집, 7(5), 31-39.
 김만일, 정교철, 2004, 유전을 측정법의 적용성 검토를 위한 기초적 연구, 대한지질공학회 학술발표회, 145-151.
 사공명, 임경재, 2005, 강우를 고려한 사면내 요부(凹部)에서의 안정성 해석, 한국지반공학회논문집, 21(9), 77-86.
 심태섭, 김선학, 기완서, 주승완, 2004, 강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구, 지질공학, 14(4), 349-360.
 이우진, 김용진, 이원제, 이웅주, 2003, 지반변형측정을 위한 TDR기술의 적용, 한국지반환경공학회 논문집, 4(2), 15-25.
 임성운, 2007, 불포화 사질토의 전단특성, 한국지반공학

회논문집, 23(10), 57-64.
 한국지반공학회, 2008, 제20회 한국지반공학회 계속교육사면안정, 구미서관, 336p.
 Corwin, D. L., Lesch, S. M., Oster, J. D. and Kaffka, S. R., 2006, Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity, Geoderma, 131, 369-387.
 Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., 1990, Physical and chemical hydrogeology, Wiley, New York, 824p.
 Drnevich, V. P., Ashmawy, A. K., Yu, X. and Sallam, A. M., 2005, Time domain reflectometry for water content and density of soils: study of soil-dependent calibration constants, Canadian Geotechnical Journal, 42(4), 1053-1065.
 Indrawan, I. G. B., Rahardjo, H. and Leong, E. C., 2006, Study of infiltration characteristics in the field, Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, Unsaturated soils 2006 - Vol. 1, 179-190.
 Kim, J., Park, S. and Jeong, S., 2006, Effect of wetting front suction loss on stability of unsaturated soil slopes, Proceedings of sessions of geoshanghai, Advanced in unsaturated soil, seepage, and environmental geotechnics, 70-77.
 Kliner, J. R. and Grozic, J. L. H., 2006, Determination of synthetic hydrate content in sand specimens using dielectrics, Canadian Geotechnical Journal, 43(6), 551-562.
 Lim, T. T., Rahardjo, H., Chang, M. F. and Fredlund, D. G., 1996, Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope, Canadian Geotechnical Journal, 33(4), 618-628.
 Meilani, I., Rahardjo, H. and Leong, E. -C., 2005, Pore-water pressure and water volume change of an unsaturated soil under infiltration conditions, Canadian Geotechnical Journal, 42(6), 1509-1531.
 Peace, J. L., Bandini, P. and Samani, Z. A., 2006, Field determination of saturated and unsaturated hydraulic conductivities using the IP method, Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, Unsaturated soils 2006 - Vol. 1, 147-156.
 Reddi, L. N., 2003, Seepage in soils: principles and applications, Wiley, 402p.
 Stephens, D. B., 1995, Vadose zone hydrology, CRC press, Florida. 347p.
 Turesson, A., 2006, Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity, Journal of Applied Geophysics, 58, 99-111.
 Walker, J. P., Willgoose, G. R. and Kalma, J. D., 2004, In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques, Journal of Hydrology, 293, 85-99.
 Yoshida, Y., Kuwano, J. and Kuwano, R., 1991, Rain-induced slope failures caused by reduction in soil strength, Soils and Foundations, 31(4), 187-193.
 Yu, X. and Drnevich, V. P., 2004, Soil water content and dry density by time domain reflectometry, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(9), 922-934.

Zhang, J., Jiao, J. J. and Yang, J., 2000, In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China, *Engineering Geology*, 57, 31-38.

2008년 4월 20일 원고접수, 2008년 6월 13일 게재승인

김만일

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350 대전광역시 유성구 과학로 92

Tel: 042-868-3117

Fax: 042-868-3415

E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과

760-749 경북 안동시 송천동 388번지

Tel: 054-820-5753

Fax: 054-822-5467

E-mail: jeong@andong.ac.kr