

## 불포화토 칼럼시험을 통한 불포화토 내 강우침투속도 분석 : 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 비교

박규보<sup>1</sup> · 채병곤<sup>1\*</sup> · 김경수<sup>1</sup> · 박혁진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부, <sup>2</sup>세종대학교 지구정보공학과

### Analysis of Rainfall Infiltration Velocity for Unsaturated Soils by an Unsaturated Soil Column Test : Comparison of Weathered Gneiss Soil and Weathered Granite Soil

Kyu-Bo Park<sup>1</sup>, Byung-Gon Chae<sup>1\*</sup>, Kyeong-Su Kim<sup>1</sup> and Hyuck-Jin Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Dept. of geoinformation Engineering, Sejong University

The unsaturated soil column tests were carried out for weathered gneiss soil and weathered granite soil in order to obtain the relationship between rainfall intensity and infiltration velocity of rainfall on the basis of different unit weight conditions of soil. In this study, volumetric water content and pore water pressure were measured using TDR sensors and tensiometers at constant time interval. For the column test, three different unit weights were used as in-situ condition, loose condition and dense condition, and rainfall intensities were selected as 20 mm/h and 50 mm/h. In 20 mm/h rainfall intensity condition, average rainfall infiltration velocities for both gneiss and weathered granite soils were obtained as  $2.854 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $1.297 \times 10^{-3}$  cm/s for different unit weight values and  $2.734 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $1.707 \times 10^{-3}$  cm/s, respectively. In 50 mm/h rainfall intensity condition, rainfall infiltration velocities were obtained as  $4.509 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $2.016 \times 10^{-3}$  cm/s and  $4.265 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $3.764 \times 10^{-3}$  cm/s respectively. The test results showed that the higher rainfall intensity and the lower unit weight of soil, the faster average infiltration velocity. In addition, the weathered granite soils had faster rainfall infiltration velocities than those of the weathered gneiss soils except for the looser unit weight conditions. This is due to the fact that the weathered granite soil had more homogeneous particle size, smaller unit weight condition and larger porosity.

**Key words** : rainfall infiltration velocity, unsaturated weathered soil, rainfall intensity, unit weight of soils, volumetric water contents

본 연구는 국내에서 산사태 발생빈도가 높은 선캠브리아기 편마암 풍화토와 백악기 화강암 풍화토를 대상으로 하여 불포화 풍화토별 강우강도 및 흙의 단위중량에 따른 강우침투속도 관계를 파악하기 위하여 불포화 풍화토 칼럼시험을 하였다. 본 연구에서는 일정시간 간격으로 체적함수비, 간극수압 등을 TDR센서와 간극수압계를 통해 측정하였다. 현장 건조단위중량을 기준으로 느슨한 조건, 현장조건, 조밀한 조건으로 선정하고, 강우강도를 20 mm/h와 50 mm/h로 선정하여 시험을 수행하였다. 강우강도 20 mm/h 조건에서 각 단위중량 조건별 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 평균 강우침투속도는 각각  $2.854 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $1.297 \times 10^{-3}$  cm/s와  $2.734 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $1.707 \times 10^{-3}$  cm/s였으며, 강우강도 50 mm/h 조건에서는 각 풍화토별로  $4.509 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $2.016 \times 10^{-3}$  cm/s와  $4.265 \times 10^{-3}$  cm/s ~  $3.764 \times 10^{-3}$  cm/s로 나타났다. 시험결과 강우강도가 높고 흙의 단위중량이 낮을수록 평균 강우침투속도는 증가하였으며, 느슨한 조건을 제외한 모든 조건에서 화강암 풍화토의 강우침투속도가 편마암 풍화토의 강우침투속도보다 빠르게 나타났다. 이는 화강암 풍화토가 편마암 풍화토에 비해서 입도가 비교적 균질하며, 단위중량이 낮고 공극율이 큰 것이 그 원인으로 판단된다.

**주요어** : 강우침투속도, 불포화 풍화토, 강우강도, 흙의 단위중량, 체적함수비

\*Corresponding author: bgchae@kigam.re.kr

1. 서 론

우리나라는 하절기에 집중호우가 발생하며, 이때 주로 발생하는 산사태의 경우 풍화된 흙의 표층부에서 침투수에 의한 체적함수비가 증가하면서 사면의 전단 저항력이 저하되어 중력방향으로 산사태가 주로 발생된다 (Sun *et al.*, 1998). Hong *et al.* (1990)이 지난 30년간 우리나라의 산사태 기록을 분석한 결과, 대규모 붕괴의 경우 최대 시간강우강도가 35 mm/h를 초과하고 2일간의 누적강우량이 140 mm를 초과할 경우 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 24시간 내에 200 mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루이상 지속되면서 시간당 평균 강우량이 10 mm/h이상일 경우에 산사태가 발생할 가능성이 큰 것으로 나타났다 (Kim, 2009). 기존의 강우 시 사면 안정성 분석은 지하수위를 기준으로 저면부는 포화상태로, 지하수위 상부는 완전 불포화로 가정된 후 주로 한계평형법을 이용하여 해석한다. 그러나 이러한 방법은 완전건조 또는 완전포화상태의 사면에 대한 안정성만을 해석하기 때문에 국내 토사사면 파괴의 주된 원인이 되는 강우량의 변화를 적절히 고려할 수 없을 뿐 아니라 침투로 인한 불포화 사면 거동의 변화를 보다 합리적으로 고려하기 어렵다 (Yu, 2003; Lee *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2007; Jeong *et al.*, 2009; KIGAM, 2010). 이러한 기존 사면 안정성 연구의 한계와 우리나라 기후 특성을 고려할 때, 강우 침투에 따른 사면의 안정성 변화를 규명하는 연구가 필요한 실정이다.

강우침투에 따른 사면 안정성은 강우강도, 강우의 토층 내 침투속도, 포화깊이와 관련이 있다 (KIGAM, 2010). 따라서 산사태 발생의 원인을 규명하고 이를 기

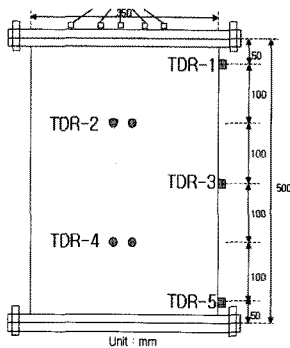
반으로 한 산사태 예측을 위해서는 지형과 지질특성에 따른 강우의 침투특성을 규명하는 것이 매우 중요할 것이다. 또한, 강우강도 및 강우 지속시간에 따른 토층 내 침투특성을 파악하여 이를 사면에 적용하는 것이 산사태 발생 예측에 효율적일 것이다. 본 연구에서는 이를 위해 우리나라에서 산사태가 다수 발생하는 불포화 풍화토를 대상으로 산사태 발생 가능성을 파악하기 위한 연구의 일환으로 지질종류와 토질조건, 강우강도에 따른 강우의 침투특성을 파악하였다.

2. 불포화토 칼럼시험장치 및 시험조건

2.1. 강우침투시험장치

불포화토 칼럼시험장치는 크게 인공강우 공급장치, 토조칼럼 및 센서부, 데이터 획득장치로 구성된다 (Fig. 1). 인공강우 공급장치는 정량펌프를 이용하여 일정하게 물 저장공간으로부터 인공강우 분배장치로 물을 공급한다. 이렇게 공급된 물이 인공강우 분배장치의 튜브를 통해서 칼럼 내 흙에 접촉하여 침투수를 발생시키고, 침투수는 토조칼럼 내로 침투되어 토조칼럼 하단의 배출구를 통하여 배출된다. 토조칼럼은 내경 33 cm, 외경 35 cm, 높이 50 cm로 제작되었고, 칼럼의 상단으로부터 5 cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm의 깊이에 함수비 측정용 TDR-1~TDR-5 센서를 삽입하였다. 주입된 인공강우의 측정값은 함수비 측정용 TDR 센서를 이용하여 일정시간 간격으로 컴퓨터에 자동 저장된다 (KIGAM, 2009).

함수비 측정용 TDR 센서는 흙과 물의 유전율 차이를 이용하여 매질의 체적함수비를 측정할 수 있다. 즉, 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파의 이동



- A : Soil column
- B : Data logger
- C : Peristaltic pump
- D : Rainfall distribution equipment
- E : Rainfall injection equipment
- F : Computer
- G : TDR sensors
- H : Tensiometers

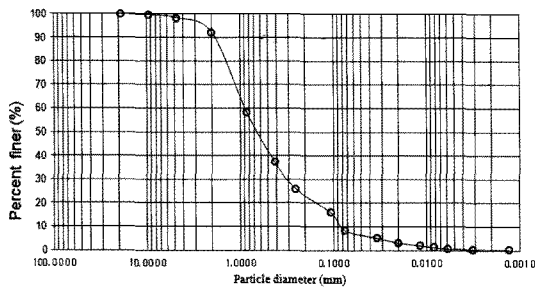
(a) Schematic diagram of the soil column

(b) Test equipment

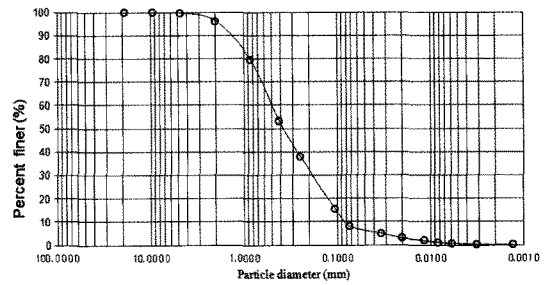
Fig. 1. Unsaturated soil column test equipment.

**Table 1.** Physical properties of the weathered soils

Soil property (unit)	Symbol	Weathered gneiss soil	Weathered granite soil
Specific gravity	$G_s$	2.63	2.57
Wet density ( $g/cm^3$ )	$w_t$	1.77	1.57
Max. dry density ( $g/cm^3$ )	$w_{dmax}$	1.63	1.38
Dry density ( $g/cm^3$ )	$w_d$	1.55	1.21
Min. dry density ( $g/cm^3$ )	$w_{dmin}$	1.32	1.04
Moisture content (%)	$w$	14.20	30.00
Effective particle size (mm)	$D_{10}$	0.08	0.10
$D_{30}$ particle size (mm)	$D_{30}$	0.32	0.25
$D_{60}$ particle size (mm)	$D_{60}$	0.90	0.60
Uniformity coefficient	$C_u$	10.70	6.00
Coefficient of curvature	$C_c$	1.40	1.00



(a) Weathered gneiss soil



(b) Weathered granite soil

**Fig. 2.** Grain size distribution of the weathered soils.

시간을 측정하여 이를 실측한 함수비와의 상관관계로부터 토층 내의 함수비를 간접적으로 측정할 수 있다 (KIGAM, 2009) 연구에 사용한 TDR 함수비 측정센서는 Campbell사의 CS616을 사용하였으며, 정량펌프는 Cole-Parmer사의 Masterflex L/S를 사용하였다 (KIGAM, 2010).

**2.2. 시료채취**

본 연구에서는 국내에서 산사태가 가장 빈번히 발생하는 대표적인 풍화토를 대상으로 각 풍화토별 강우침투특성을 분석하였다. 우선적으로 편마암 풍화토 (weathered gneiss soil)와 화강암 풍화토 (weathered granite soil)를 대상으로 하였는데 편마암 풍화토는 강원도 인제의 선크브리아기 편마암 풍화토, 화강암 풍화토는 경상북도 상주의 백악기 화강암 풍화토를 대상으로 하였다. 시료는 표토를 약 5 cm 건어내고 채취하였으며, 채취한 시료를 0.5 cm 체로 쳐서 암석은 걸러냈다. 현장풍화토의 물성값 및 입도분포는 다음과 같다 (Table 1, Fig. 2).

**2.3. 강우침투 시험방법**

본 연구에서는 불포화 풍화토 강우 침투특성을 분석하기 위하여 풍화토 종류, 시료의 단위중량 (unit weight of soil), 강우조건 (rainfall condition)으로 나누어 시험을 수행하였다. 강우 침투시험을 위한 시료는 건조기로 104°C에서 24시간 동안 완전 건조시켜 사용하였으며, 흙의 단위중량은 현장 단위중량 값과 다짐 시험의 결과를 통해 다음과 같이 결정하였다. 편마암 풍화토는 칼럼 내에서 시료성형이 가능한 최소 건조단위중량 (Min. dry density)인 1.35  $g/cm^3$ , 현장 건조단위중량 (dry density)인 1.55  $g/cm^3$ , 최대 건조단위중량 (Max. dry density)인 1.61  $g/cm^3$  조건으로 선정하였고, 화강암 풍화토는 최소 건조단위중량인 1.10  $g/cm^3$ , 현장 건조단위중량인 1.21  $g/cm^3$ , 최대 건조단위중량인 1.35  $g/cm^3$  조건으로 선정하였다. 칼럼 내 시료는 50 cm 높이를 10층으로 5 cm 높이마다 나누어 다짐을 실시하여 목표 단위중량에 맞게 성형하였다. 흙시료의 다짐은 고무망치로 칼럼을 타격하여 진동을 발생시키는 방법과 직경 15 cm, 무게 5 kg인 다짐추를 자유 낙하시

**Table 2.** Test conditions of weathered gneiss and granite soils

Gneiss	Rainfall intensity (mm/h)	Rainfall duration (hour)	Unit weight of soil (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
GnC1	20	10	1.35	48.8
GnC2	20	10	1.55	41.2
GnC3	20	10	1.61	39.0
GnC4	50	4	1.35	48.8
GnC5	50	4	1.55	41.2
GnC6	50	4	1.61	39.0
Granite	Rainfall intensity (mm/h)	Rainfall duration (hour)	Unit weight of soil (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
GrC1	20	10	1.10	57.3
GrC2	20	10	1.21	53.0
GrC3	20	10	1.35	47.6
GrC4	50	4	1.10	57.3
GrC5	50	4	1.21	53.0
GrC6	50	4	1.35	47.6

키는 방법으로 수행하였다.

인공강우를 재현하기 위해서 정량펌프를 이용하여 RPM조절을 통한 분당 강우량을 산정한 후, 식 (1) 및 (2)와 같이 시간당 강우량에 해당하는 강우강도로 환산하여 총 강우량을 계산하였다 (KIGAM, 2010).

$$\text{강우강도 (mm/min)} = (\text{강우량 (ml=cc=cm}^3\text{/min)} \times 10(\text{mm변환})) / \text{칼럼단면적 (cm}^2\text{)} \quad (1)$$

$$\text{총 강우량 (mm)} = \text{강우강도 (mm/min)} \times 60(\text{min}) \times \text{강우지속시간 (h)} \quad (2)$$

강우강도 (rainfall intensity)와 흙의 단위중량에 따른 인공강우 침투특성을 분석하기 위하여 강우강도를 소방방재청 경보기준인 20 mm/h, 50 mm/h로 선정하였다. 총 강우량은 우리나라 집중호우 시 일 평균 강우량 210 mm 이상임을 참고하여 (NIDP, 1999; Kim *et al.*, 2008), 총 강우량을 200 mm로 동일하게 적용되도록 하였다 (Table 2). 사면에서 기저면에 따른 배수와 동일한 효과를 재현하기 위하여 칼럼 내에 인공강우를 주입하면서 칼럼 하단에서 인공강우 배출구를 통해 인공강우가 동시에 배수되도록 하였다 (Fig. 1(a)).

토질조건 및 강우강도 조건에 따른 강우침투속도의 산정은 다음의 식을 이용하였다 (KIGAM, 2010). 강우침투속도는 TDR-1은 5 cm, 나머지 센서는 센서간 간격인 10 cm를 각각 단위길이로 설정하여 단위길이당 강우침투속도를 산정하였다. 그리고 평균 강우침투속도는 심도별 함수비 측정 TDR센서에서 측정되는 침투 감지시간을 측정하여 식 (3)과 같이 강우침투속도를 구

하고, 이를 토대로 각 센서별 강우침투속도를 평균한 값이다.

$$v = \frac{L}{t} \quad (3)$$

여기서,  $v$ 는 인공강우침투속도 (cm/sec),  $t$ 는 침투수 감지 시간 (sec),  $L$ 은 칼럼 상부로부터 각 함수비 측정용 TDR센서까지의 심도 (cm)이다.

칼럼시험은 중력배수가 멈출 때까지 수행하거나, 중력배수가 일어나지 않을 경우 강우주입 중단 후 20시간이 지날 때까지 수행하였다. 시험 종료 후 잔류체적 함수비를 측정하였는데, 잔류체적함수비는 시험 종료 시에 측정된 체적함수비에서 시험 시작 시 측정된 체적함수비를 뺀 값으로 계산하였다.

인공강우강도 및 강우량은 정량펌프를 이용한 조절 및 계산이 가능하지만, 실제 토층 내로 주입한 총 강우량의 검증은 위하여 토층 내 잔류체적함수비 (residual VWC) 및 중력배수되는 물의 양 (amount of drained water), 칼럼 상부로 유출되는 물의 양 (amount of overflowed water)을 합산하여 토층 내 주입된 총 강우량 (total amount of water)을 계산하였다. 중력배수되는 물은 앞절에서 설명한 대로 토층기저부를 따라 사면아래로 흘러내리는 물에 해당한다. 한편, 토층 표면부는 강우의 일정한 침투한계를 갖고 있으며 집중강우가 내릴 경우에는 지표 부근이 급격히 포화되어 토층 내로 흡수되지 않고 지표면을 따라 흐르게 되는데, 이에 따라 강우강도가 클수록 지표를 따라 흐르는 강우의 유출량도 커지게 된다 (Ryu and Kim, 2003; Xue and Gavin, 2008). 이와 같은 양상은 본 연구에

**Table 3.** Amount of the injected water into the soil column

Test conditions	Amount of residual water(mm)	Amount of drained water(mm)	Amount of overflowed water(mm)	Total amount of water(mm)
GnC1	83.0	138.0	0.0	221.0
GnC2	102.0	71.0	29.0	202.0
GnC3	104.0	0.0	87.0	191.0
GnC4	89.2	58.0	50.0	197.2
GnC5	74.8	0.0	112.4	187.2
GnC6	74.8	0.0	117.6	192.4
GrC1	144.0	69.0	0.0	213.0
GrC2	164.0	63.0	0.0	227.0
GrC3	175.0	35.0	0.0	210.0
GrC4	153.2	66.4	0.0	219.6
GrC5	169.6	14.8	0.0	184.4
GrC6	178.8	22.4	0.0	201.2

서 칼럼 상부로 유출되는 물에 해당하는 것으로 생각할 수 있다. 중력배수되는 물의 양 및 칼럼 상부로 유출되는 물의 양은 무게를 잰 후 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 강우량으로 환산하였다. 주입된 강우량은 목표 강우량인 200 mm를 기준으로 Table 3과 같이 약간의 오차가 발생하였는데, 이는 정량펌프를 통한 강우주입 시 강우주입량이 정밀하게 고정되지 않은 시험장치의 미세한 오차에 의한 것으로 판단된다. 주입량의 오차를 시간당 강우량으로 환산하면 최대 2 mm/h로서 집중적인 강우에 해당하지 않는 것이며, 이에 따라 시험 결과에 미치는 영향은 제한적인 것으로 생각된다.

### 3. 불포화 풍화토별 강우침투특성

#### 3.1. 편마암 풍화토

본 연구에서는 불포화도 칼럼시험을 통해 지속적인 강우에 의한 강우침투특성 및 침투속도 변화를 분석하였다. 시험결과 GnC1 조건을 제외한 모든 조건에서 강우의 표면유출에 해당하는 칼럼 상부유출이 발생하였으며, GnC1 조건의 TDR-5의 체적함수비 30.2%를 제외한 4개의 함수비 측정 TDR센서의 최대체적함수비가 21.0~24.0%로 측정되었다. GnC1을 제외한 나머지 조건은 최대체적함수비가 23.0~34.0%로 더 크게 측정되었다. 이와 같은 GnC1과 나머지 시험조건의 최대체적함수비 차이는 TDR-1에서 더욱 명확히 나타났는데, GnC1 조건에서는 최대체적함수비 값이 24.0%였고, 나머지 조건의 TDR-1에서 최대체적함수비는 26.0~36.9%로 나타났다 (Table 4, Fig. 3). 이는 GnC1을 제외한 모든 조건에서 강우가 토층 내에 충분히 침투되어 더 이상 강우를 흡수할 수 없기 때문인 것으로

파악되며, 이러한 점은 GnC1조건을 제외한 다른 조건의 실험에서 칼럼 상부유출이 발생한 점을 통해 확인할 수 있다.

편마암 풍화토의 강우침투 시험에서 GnC1의 경우 TDR-5가 최대체적함수비 30.2%로 측정되었으며, 다른 심도의 최대체적함수비 21.0~24.0%에 비해 크게 나타났다. 이는 GnC1의 경우 칼럼 상부유출이 일어나지 않고 많은 양의 강우가 토층 내로 주입되었고, 주입된 강우가 칼럼하부로 갈수록 침투속도가 느려지고 칼럼 하부로의 배수가 원활히 이루어지지 않아서 다량의 강우가 집중되었기 때문으로 생각된다 (Fig. 3, Fig. 5). GnC2, GnC3, GnC4의 TDR-5는 다른 심도와 비슷한 최대체적함수비를 나타냈으며, 강우 주입을 중단한 후에도 체적함수비가 감소하지 않았다 (Fig. 3). 그리고 GnC5, GnC6의 TDR-5는 강우 주입을 중단한 후에도 체적함수비는 지속적으로 증가하는 양상을 나타내었다 (Fig. 3). 이들 TDR-5는 최대체적함수비가 모두 30% 미만인데, 이는 칼럼 상부유출로 인해 토층 내로 강우가 모두 주입되지 않았고, 시험 종료 시까지 강우의 침투가 칼럼하부까지 충분히 미치지 못하였기 때문으로 생각된다. 또한 칼럼 하부로의 배수는 원활하지 않지만 칼럼상부의 있던 강우가 칼럼하부로 침투하면서 지속적인 영향을 준 것으로 판단된다 (Table 3, Fig. 3).

강우강도 20 mm/h 조건에서는 흙의 단위중량이 커질수록 잔류체적함수비가 16.5~20.8%로 높아졌지만, 강우강도 50 mm/h 조건에서는 이와 반대로 흙의 단위중량이 커질수록 잔류체적함수비가 17.9~14.8%로 낮아지는 결과를 보였다 (Fig. 4). 중력에 의한 배수 또는 칼럼 상부 유출로 인해 칼럼 외부로 유출되는 물의 양이 많아질수록 칼럼 내 잔류하는 물의 양이 적으므

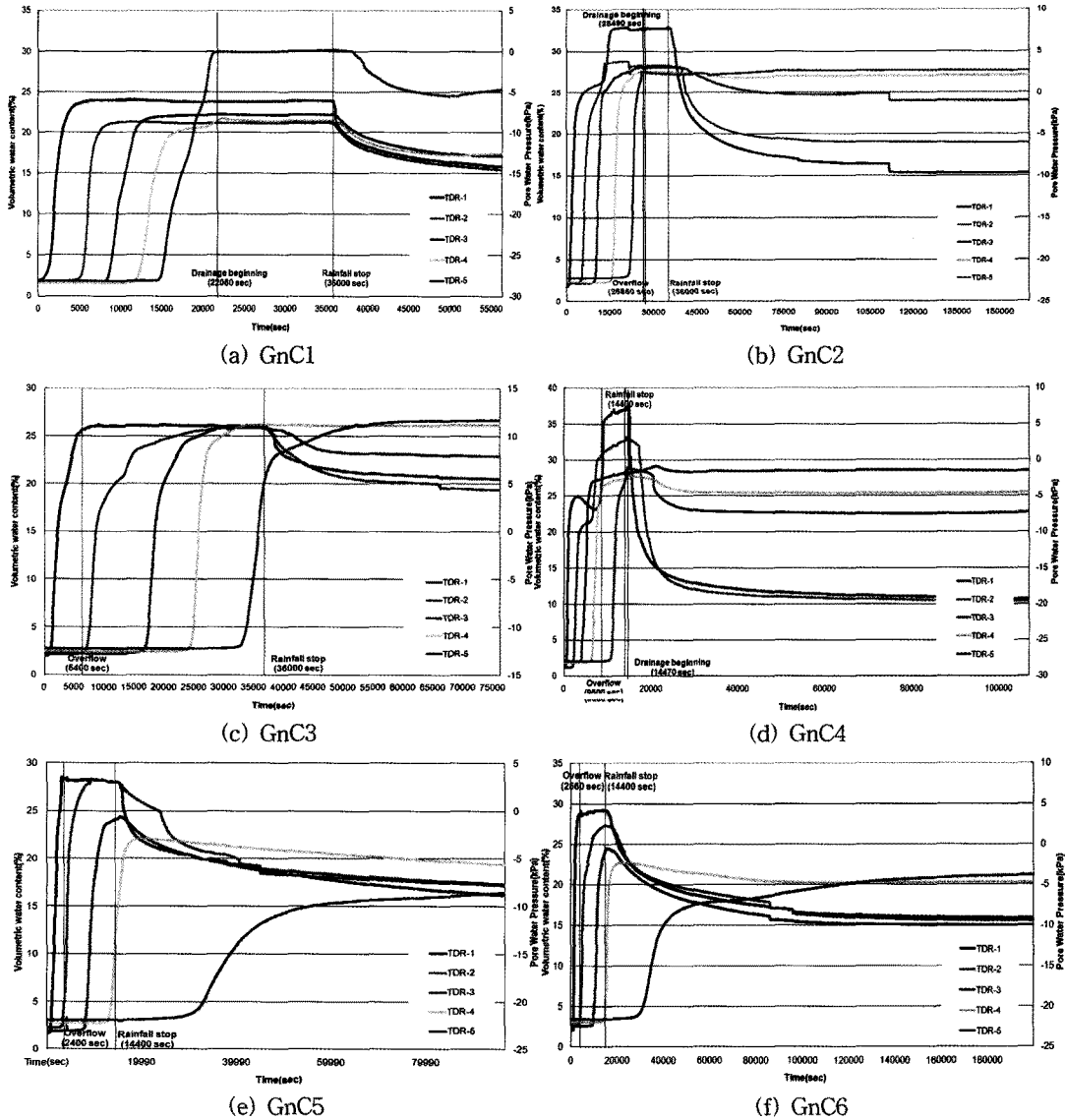


Fig. 3. Volumetric water content of weathered gneiss soil.

Table 4. Maximum volumetric water content (VWC) of the weathered soils (TDR-1)

Weathered gneiss soil	GnC1	GnC2	GnC3	GnC4	GnC5	GnC6
Maximum VWC(%)	24.0	32.9	26.2	36.9	28.0	29.0
Weathered granite soil	GrC1	GrC2	GrC3	GrC4	GrC5	GrC6
Maximum VWC(%)	30.0	39.1	41.4	34.8	43.3	44.0

로 잔류체적함수비는 감소하게 된다 (Table 3). 강우강도 50 mm/h 조건에서 단위증량이 증가할수록 잔류체적함수비가 감소한 이유는 칼럼상부로 유출되는 물의 양이 흙의 단위증량이 커질수록 증가하여 토층 내로

침투되는 강우량이 현저히 줄어든 것에 기인한 것으로 판단된다 (Table 3).

측정된 체적함수비 변화를 토대로 시험 조건별 강우 침투속도를 계산하였다. 평균 강우침투속도는 흙의 단

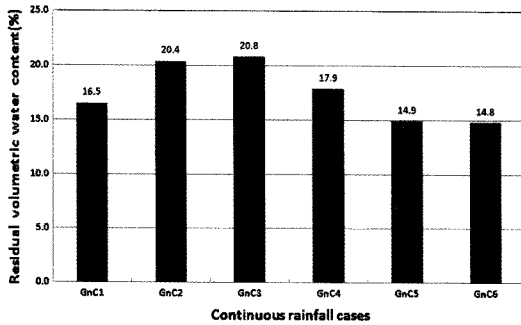


Fig. 4. Residual volumetric water content of weathered gneiss soil.

위중량이 동일하고 강우강도를 20 mm/h, 50 mm/h로 조절하여 시험하였을 때, 동일한 흙의 단위중량 조건에서는 강우강도가 증가할수록 빠르게 나타났다 (Fig. 5(a)). Ryu and Kim (2003)에 따르면 강우강도가 증가할수록 침윤전선의 진행속도가 빠르다고 주장하였는데, 본 시험에서도 같은 결과가 도출되었다. 같은 강우강도 조건에서 흙의 단위중량을 각각 1.35 g/cm<sup>3</sup>, 1.55 g/cm<sup>3</sup>, 1.61 g/cm<sup>3</sup>로 조절하여 시험하였을 때, 강우침투속도는 흙의 단위중량이 커질수록 강우침투속도는 느려졌다 (Fig. 5(a)). 그리고 토층 심도에 따른 강우침투 속도의 변화를 살펴보면, 토층 내 심도가 깊어질수록 강우침투속도는 느려지는 경향이 나타났다 (Fig. 5(b)). 이는 칼럼 내 상부 다짐시 하부까지 다짐의 영향이 미쳐 시간이 경과함에 따라 토층 내 심도가 깊을수록 흙이 더 조밀하게 성형된 결과로 판단된다. 이는 흙이 조밀할수록 공극이 줄어들고, 투수계수가 감소하여 강우침투속도가 느려지기 때문으로 판단된다 (Song, 2004).

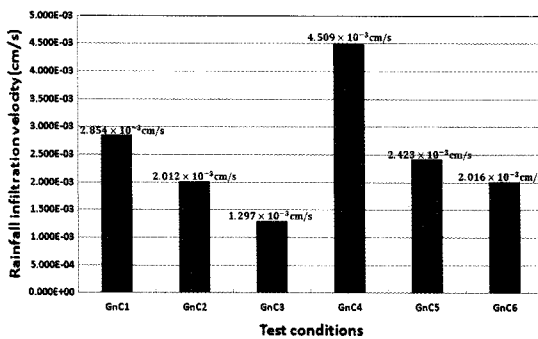
Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 TDR-1은 강우침투 속도

가  $5.139 \times 10^{-3} \sim 1.282 \times 10^{-2}$  cm/s로 나머지 센서의 강우침투 속도인  $0.873 \times 10^{-3} \sim 5.988 \times 10^{-3}$  cm/s에 비해 빠른 속도를 보였다. 이는 전체적인 시험결과에서 보이는 속도값과 다소 거리가 있는 결과이다. 따라서 시험결과와 신뢰성이 떨어진다고 판단되어 평균 강우침투속도 산정 시에는 제외하였다. TDR-1 구간에서 강우침투속도 경향의 불일치는 칼럼 시료 성형과정에 기인하는 것으로 판단되는데, 최상부층 다짐 시 다짐주를 이용하면 시료가 칼럼 외부로 쏟아지기 때문에 진동만으로 다짐을 수행하여 목표 단위중량에 해당하는 조건을 정확히 조절하는데 오차가 발생한 것으로 생각된다.

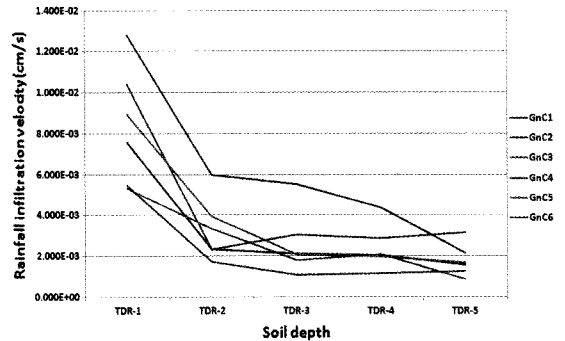
### 3.2. 화강암 풍화토

본 시험의 결과 화강암 풍화토 시험과 편마암 풍화토 시험을 비교하였을 때, 가장 큰 차이점은 최대체적함수비의 분포범위이다. 화강암 풍화토의 최대체적함수비는 시험조건별로 30.5~43.9%의 범위에 분포한 반면 (Fig. 6), 편마암 풍화토의 경우 GnC2의 TDR-1을 제외하면 최대체적함수비가 20.0~30.2%로 나타났다 (Fig. 3). 이는 공극율 (porosity) 차이에 의한 것으로 판단되는데, 화강암 풍화토의 공극률이 편마암 풍화토에 비해 크기 때문에 토층 내 침투된 물을 함유할 수 있는 공간이 큰 이유인 것으로 판단된다. 각 풍화토별 공극율은 Table 2와 같다.

화강암 풍화토 시험에서는 흙의 단위중량이 각각 1.10 g/cm<sup>3</sup>, 1.21 g/cm<sup>3</sup>, 1.55 g/cm<sup>3</sup>로 커질수록 잔류 체적함수비가 20 mm/h 조건에서는 28.8~35.2%, 50 mm/h 조건에서는 30.6~35.7%로 높아지는 양상을 보였다. 이는 강우침투속도가 빠르고 공극율이 커서, 칼럼 상부유출현상이 일어나지 않았기 때문에 토층 내로



(a) Rainfall infiltration velocity in each unit weight and rainfall intensity



(b) Rainfall infiltration velocity in each depth

Fig. 5. Rainfall infiltration velocity of weathered gneiss soil in various conditions.

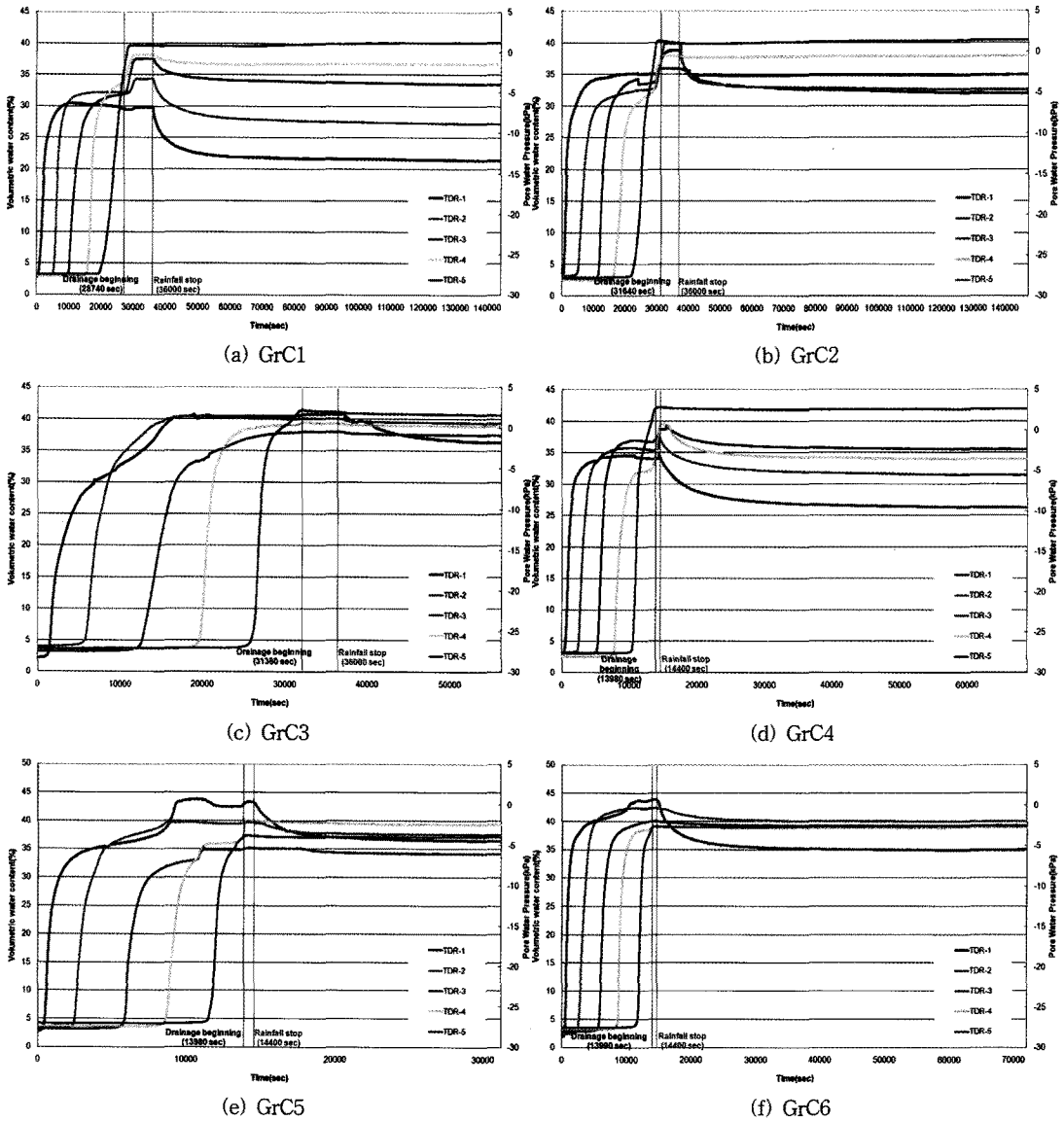


Fig. 6. Volumetric water content of weathered granite soil.

주입한 강우량이 모두 침투된 결과라고 판단된다 (Fig. 7, Table 3). 동일한 강우강도 조건에서 흙의 단위중량이 작아질수록 잔류체적함수비가 감소하는 이유는 단위중량이 작을수록 흙의 공극율이 커지며, 이에 따라 유효공극율 (effective porosity)이 증가하여 공극 내 물의 흐름이 원활해지므로 칼럼 외부로 물이 쉽게 배수되었기 때문으로 판단된다 (Kim *et al.*, 1996).

Fig. 8(a)와 같이 동일한 흙의 단위중량 조건에서 강우강도가 각각 20 mm/h, 50 mm/h로 증가할 때, 흙의 단위중량 1.10 g/cm<sup>3</sup> 조건에서는 강우침투속도가 각각

2.734×10<sup>-3</sup> cm/s, 4.256×10<sup>-3</sup> cm/s였고, 흙의 단위중량 1.21 g/cm<sup>3</sup> 조건에서는 2.012×10<sup>-3</sup> cm/s, 3.899×10<sup>-3</sup> cm/s, 흙의 단위중량 1.35 g/cm<sup>3</sup> 조건에서는 1.707×10<sup>-3</sup> cm/s, 3.764×10<sup>-3</sup> cm/s로 강우강도가 증가할수록 토층 내 단위시간당 유입되는 강우량의 증가로 인해 강우침투속도는 빠르게 나타났다. 또한, 동일한 강우강도 조건에서 흙의 단위중량이 커질수록 강우침투속도가 느려지는 양상을 보였는데 (Fig. 8(a)), 이는 흙의 단위중량이 증가할수록 불포화 투수계수가 감소하였기 때문이다 (Song, 2004). 그리고 토층 심도에 따른 강우침



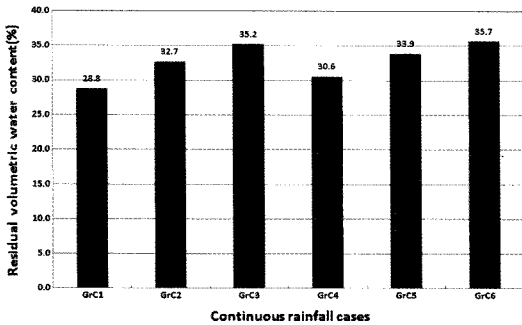


Fig. 7. Residual volumetric water content of weathered granite soil.

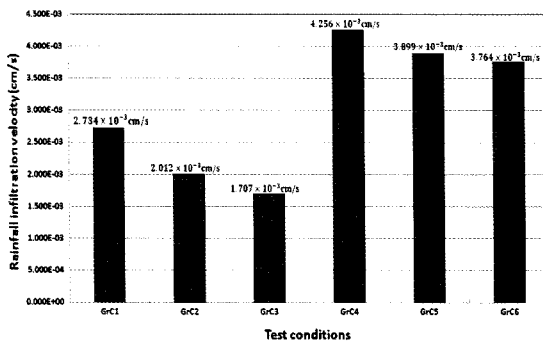
투 속도의 변화를 살펴보면, 편마암 풍화토의 강우침투속도와 같이 토층 내 심도가 깊어질수록 강우침투속도는 느려지는 경향이 나타났다 (Fig. 8(b)).

#### 4. 토 의

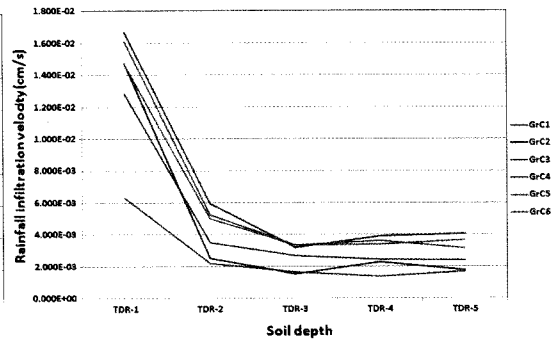
본 시험에서 사용된 편마암 풍화토와 화강암 풍화토는 현장 건조단위중량과 최대 및 최소 건조단위중량이 다르므로 흙의 단위중량의 변화에 따른 침투특성을 직접 비교 할 수는 없다. 따라서 각 풍화토별 단위중량 조건에 따라 느슨한 조건, 현장조건, 조밀한 조건으로 구분하여 각각 비교하였다. 각 단위중량 조건별 시험 결과에서 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 강우침투속도를 비교하면 (Fig. 9), 시료별 현장 단위중량 조건에서는 강우강도 20 mm/h 조건일 때 각각  $2.012 \times 10^{-3}$  cm/s,  $2.012 \times 10^{-3}$  cm/s로 같게 나타났고, 강우강도 50 mm/h 조건일 때 각각  $2.423 \times 10^{-3}$  cm/s,  $3.899 \times 10^{-3}$  cm/s로 화강암 풍화토 강우침투속도가 편마암 풍화토 강우

침투속도보다 더 빠른 것을 알 수 있었다. 시료별로 가장 조밀한 조건에서도 강우강도 20 mm/h 조건일 때 각각  $1.297 \times 10^{-3}$  cm/s,  $1.707 \times 10^{-3}$  cm/s와 강우강도 50 mm/h 조건일 때 각각  $2.016 \times 10^{-3}$  cm/s,  $3.764 \times 10^{-3}$  cm/s로 화강암 풍화토의 강우침투속도가 편마암 풍화토의 강우침투속도보다 더 빠르게 나타났다. 이는 화강암 풍화토가 편마암 풍화토에 비해 단위중량이 작고, 이에 따라 공극률이 크기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 편마암 풍화토의 경우 칼럼 상부유출이 일어났기 때문에 편마암 풍화토에 주입된 강우량 더 적고, 광물 구성 차이에 의해서도 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

그러나 시료별로 가장 느슨한 조건에서는 강우강도 20 mm/h일 때 각각  $2.854 \times 10^{-3}$  cm/s,  $2.734 \times 10^{-3}$  cm/s, 강우강도 50 mm/h일 때  $4.509 \times 10^{-3}$  cm/s,  $4.256 \times 10^{-3}$  cm/s로 편마암 풍화토의 침투속도가 화강암 풍화토보다 더 빨랐다. 이는 칼럼 상부유출이 비교적 적게 일어나서 비슷한 강우량이 각 풍화토의 토층내로 주입되었고, 이로 인하여 식 (4)로 표현되는 습윤대 (wetting zone)와 관련이 있는 것으로 생각된다 (Lumb, 1975; Shim *et al.*, 2004). Shim *et al.* (2004)에 의하면 강우가 시작되면 지표면에서부터 젖기 시작하며, 지표부근은 완전 포화되어 포화도가 1.0에 접근하나 중력의 영향으로 깊이가 깊어질수록 포화도가 점차 감소하다가 일정 깊이에서는 일정한 포화도를 나타내며 이를 습윤대 (wetting zone)라 한다고 한다. 이러한 습윤대의 두께는 식 (4)에 의하여 결정되며 시간의 흐름과 토층의 투수계수에 비례하고, 공극률 및 최종포화도와 초기포화도의 차이에 반비례한다. 이는 본 연구의 강우침투 깊이를 의미하며, 습윤대의 두께가 두꺼울수록



(a) Rainfall infiltration velocity in each unit weight and rainfall intensity



(b) Rainfall infiltration velocity in each depth

Fig. 8. Rainfall infiltration velocity of weathered granite soil in various conditions.

강우침투가 많이 일어났음을 뜻한다. 습윤대는 공극율의 크기와 반비례하므로 동일조건에서 공극율이 작을수록 습윤대의 두께는 두껍다. 느슨한 조건에서 투수계수는 입도분포가 유사하여 비슷한 값을 보일 것으로 생각되며, 강우침투속도 역시 비슷한 값을 보인다 (Fig. 9). 그러나 화강암 풍화토가 편마암 풍화토보다 공극율이 크고 (Table 4), 포화도 역시 화강암 풍화토가 51.7%로 편마암 풍화도 49.4% 보다 크기 때문에 습윤대의 두께는 편마암 풍화토가 화강암 풍화토보다 두꺼울 것으로 생각된다. 이로 인해 본 시험의 흡이 느슨한 조건에서는 편마암 풍화토의 침투속도가 화강암보다 약간 빠른 것으로 판단된다.

$$h = \frac{k \cdot t}{n \cdot (S_f - S_0)} \tag{4}$$

여기서,  $h$ 는 습윤대의 두께,  $k$ 는 토층의 투수계수,  $t$ 는 강우지속시간,  $n$ 은 공극율,  $S_f$ 는 최종포화도,  $S_0$ 는 초기포화도를 나타낸다.

각 풍화도별 단위중량 조건 및 강우강도 조건에서 잔류체적함수비를 비교해 보았다. 편마암 풍화토의 잔류체적함수비는 20 mm/h 조건에서 흡이 느슨한 조건, 현장조건, 조밀한 조건의 잔류체적함수비가 각각 16.5%, 20.4%, 20.8%였고, 50 mm/h 조건에서는 잔류체적함수비가 각각 17.9%, 14.9%, 14.8%로 나타났

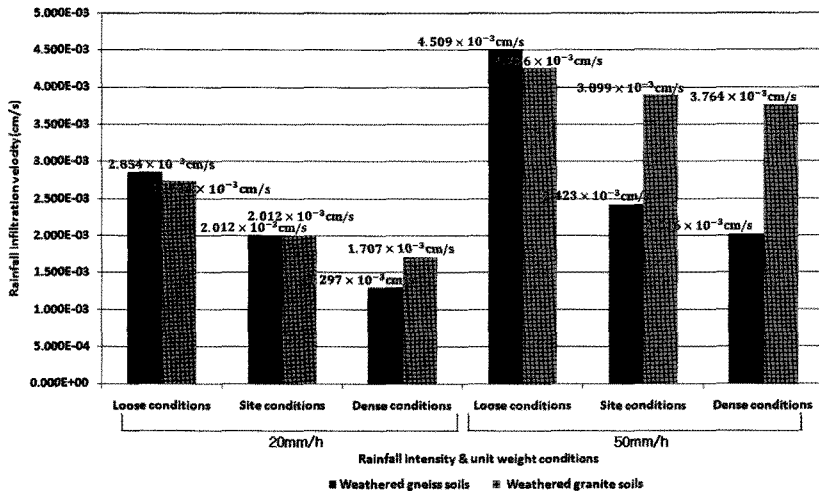


Fig. 9. Comparison of rainfall infiltration velocity in both gneiss and weathered granite soils.

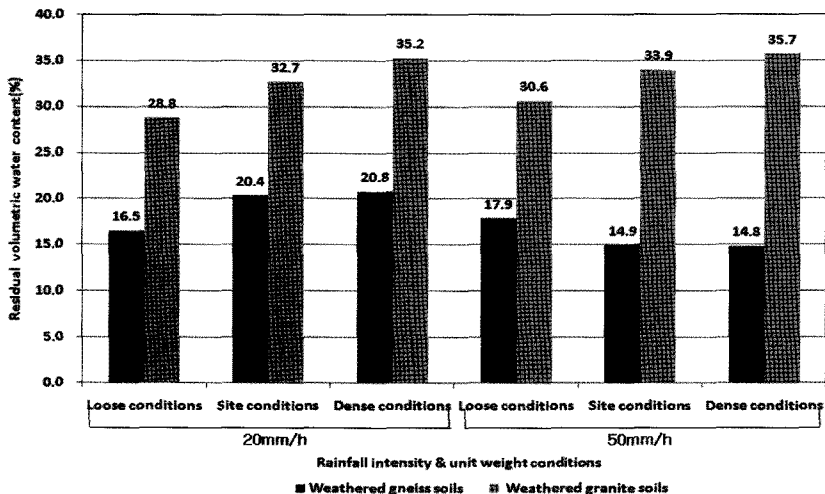


Fig. 10. Comparison of residual volumetric water content in both weathered gneiss and granite soil.

다. 화강암 풍화토의 경우 20 mm/h에서 느슨한 조건, 현장조건, 조밀한 조건의 잔류체적함수비는 각각 28.8%, 32.7%, 20.8%였고, 50 mm/h 조건에서 잔류체적함수비가 각각 30.6%, 33.9%, 35.7%로서, 화강암 풍화토가 편마암 풍화토에 비해 잔류체적함수비가 약 2배정도 높게 나타났다 (Fig. 10). 이는 유효입경은 유사한 반면, 물을 함유할 수 있는 공간인 공극율이 더욱 크기 때문이라고 판단된다. 화강암 풍화토의 경우 동일한 강우강도 조건에서 흙의 단위중량이 커질수록 잔류체적함수비가 뚜렷이 증가하는 경향을 보였지만, 편마암 풍화토의 경우 강우강도 50 mm/h 조건에서 흙의 단위중량이 커질수록 잔류체적함수비가 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 앞에서 설명했듯이 강우침투가 충분히 이루어지지 않고, 표면유출에 해당하는 칼럼 상부에서 유출되는 물의 양이 급격히 증가했기 때문이라고 판단된다. 또한, 풍화토 종류에 따른 잔류체적함수비 차이는 흙 속에 포함된 광물 구성에 대하여도 달라질 수 있다. 많은 양의 강우가 빠른 속도로 침투하면서 풍화토에 포함되어있는 점토광물이 빠르게 팽창할 수 있는데, 이로 인하여 토층에 점토분이 많이 함유될수록 투수계수는 작아진다 (Yu, 2003). 이러한 점토광물의 특성과 함량으로 풍화토 종류에 따른 잔류체적함수비의 차이가 발생할 수 있을 것으로 생각되며 (Chang and Gil, 1998), 향후 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구는 풍화토별 강우강도 및 흙의 단위중량에 따른 강우 침투특성을 파악하기 위하여, 국내에서 산사태가 다수 발생한 강원도 인제의 선캠브리아기 편마암 풍화토와 경상북도 상주의 백악기 화강암 풍화토를 대상으로 강우침투시험을 하였다. 불포화토의 강우침투 칼럼시험결과에 의하면 강우침투특성은 강우강도, 흙 시료의 종류, 시료의 단위중량에 따라 달리 나타났다. 같은 종류의 풍화토에서는 동일한 강우강도 조건에서 흙의 단위중량이 커질수록 잔류체적함수비가 대체로 증가하는 양상이 나타났다. 이는 상대적으로 단위중량이 커질수록 간극에서 물이 빠져나갈 때의 흡인력에 해당하는 값이 증가하였기 때문으로 판단된다. 같은 종류의 풍화토일 경우 강우침투속도는 동일한 흙의 단위중량 조건에서 강우강도가 증가할수록 침투속도가 빠르게 나타났으며, 동일한 강우강도 조건에서는 흙의 단위중량이 커질수록 강우침투속도는 느려졌다. 이는 흙

이 조밀할수록 공극이 줄어들고, 투수계수가 감소하여 강우침투속도가 느려지기 때문이라고 판단된다. 또한, 편마암 풍화토가 화강암 풍화토에 비해 침투속도가 느리게 나타났는데, 이는 흙의 단위중량 차이에 근본적으로 기인하고, 두 종류의 풍화토를 구성하는 세립의 물질, 특히 점토성분의 차이에 따른 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- Chang, P.W. and Gil, S.C. (1998) A study on the volume change in unsaturated clayey soil, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, v.40, p.37-42.
- Hong, W.P., Kim, S.K. and Han, J.G. (1990) Prediction of rainfall - triggered landslide in Korea, *Journal of the Korean geotechnical society*, v.6, p.55-63.
- Jeong, S.S., Choi, J.Y. and Lee, J.H. (2009) Stability analysis of unsaturated weathered soil slopes considering rainfall duration, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, v.29, p.1-9.
- KIGAM (2009) Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2009-020-2009(1), 315p.
- KIGAM (2010) Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2009-020-2009(2), 455p.
- Kim, M.I., Chae, B.G., Cho, Y.C. and Seo, Y.S. (2008) Study on rainfall infiltration characteristics for weathered soils: analysis of soil volumetric water content and its application, *The Journal of Engineering Geology*, v.18, p.83-89.
- Kim, S.H. (2009) Shallow failure characteristics of weathered granite soil slope in accordance with the rainfall infiltration, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, v.10, p.2810-2818.
- Kim, S.K., Ryu, J.H. and Song, J.K. (1996) Measurements of soil - water characteristics for different unsaturated soils, *The Journal of the Korean geotechnical society*, v.12, p.139-152.
- Lee, K.H., Jeong, S.S. and Kim, T.H. (2007) Effect of fines on the stability of unsaturated soil slopes, *Journal of the Korean geotechnical society*, v.23, p.101-109.
- Lee, S.J., Lee, H.J. and Lee, S.R. (2005) Soil water characteristics curve for weathered granite soils - a prediction method, *Journal of the Korean geotechnical society*, v.21, p.15-27.
- Lumb, L. (1975) Slope failures in Hong Kong, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v.8, p.31-65.
- NIDP (1999) Evaluation of landslide prone area - case studies in Kyungpook province, National Institute for Disaster Prevention, NIDP-99-08, 359p.
- Ryu, J.H. and Kim, M.S. (2003) Mechanism of slope disaster during rainfall in a natural slope, *Journal of Korean Society of Environmental Administration*, v.9, p.85-94.

- Shim, T.S., Kim, S.H., Ki, W.S. and Joo, S.W. (2004) Study on the characteristics of shear strength on the weathered granite soil slope in accordance with the rainfall, *The Journal of Engineering Geology*, v.14, p.349-360.
- Song, C.S. (2004) Prediction of the permeability and the shear strength for unsaturated soils using soil-water characteristic curve, National Research Foundation of Korea, R05-2002-000-00484-0, 26p.
- Sun, H.W., Wong, H.N. and Ho, K.S. (1998) Analysis of infiltration in unsaturated ground, Proceedings of annual seminar on slope engineering in Hong Kong, pp.36-40.
- Xue, J. and Gavin K. (2008) Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes, *Geotech Geology Engineering*, v.26, p.199-209
- Yu, N.D. (2003) Characteristics of unsaturated weathered soils with varying clay contents, Ph. M, thesis, Yonsei Univ, 99p.

---

2011년 1월 25일 원고접수, 2011년 2월 22일 게재승인