

불포화토 칼럼시험을 통한 연속강우와 반복강우의 강우침투속도 분석

박규보¹ · 채병곤^{1*} · 박혁진²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²세종대학교 지구정보공학과

Analysis of Rainfall Infiltration Velocity in Unsaturated Soils Under Both Continuous and Repeated Rainfall Conditions by an Unsaturated Soil Column Test

Kyu-Bo Park¹, Byung-Gon Chae^{1*}, and Hyuck-Jin Park²

¹Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University

본 연구는 불포화 풍화토별 강우지속시간 및 비강우시간에 따른 강우침투속도 관계를 파악하기 위하여 국내에서 산사태 발생빈도가 높은 선캠브리아기 편마암 풍화토와 백악기 화강암 풍화토를 대상으로 불포화 풍화토 칼럼시험을 하였다. 본 연구에서는 일정시간 간격으로 체적함수비를 측정하기 위하여 함수비 측정 TDR센서를 이용하였다. 강우강도 조건은 20 mm/h로 선정하여 연속강우와 반복강우를 재현하였으며, 반복강우의 경우 강우시간과 비강우시간을 조절하였다. 그리고 흙의 단위중량 조건은 편마암 풍화토의 경우 현장 건조단위중량보다 낮고 칼럼상부유출이 일어나지 않는 1.35 g/cm³, 화강암 풍화토의 경우 현장 건조단위중량인 1.21 g/cm³로 선정하였다. 편마암 풍화토와 화강암 풍화토 총 강우량 200 mm인 조건에서 2.090 × 10⁻³~2.854 × 10⁻³ cm/s와 1.692 × 10⁻³~2.012 × 10⁻³ cm/s로 총 강우량 100 mm에서의 1.309 × 10⁻³~1.871 × 10⁻³ cm/s와 1.175 × 10⁻³~1.581 × 10⁻³ cm/s보다 강우침투속도가 빠르게 나타났다. 이는 동일 시간당 토층 내 주입되는 물의 양이 200 mm조건에서 100 mm조건보다 많기 때문이다. 완전 건조 상태의 강우침투속도와 강우가 반복되어 물을 함유하고 있는 상태의 강우 재침투속도를 비교해 보면, 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 최초 강우침투속도인 1.309 × 10⁻³~2.854 × 10⁻³ cm/s와 1.175 × 10⁻³~2.012 × 10⁻³ cm/s보다 강우 재침투속도가 1.307 × 10⁻²~1.718 × 10⁻² cm/s와 1.789 × 10⁻²~2.070 × 10⁻² cm/s로 높게 나타났다. 이는 토층 내 공기의 함유량이 줄어들어서 불포화 투수계수에 영향을 미치는 흡입력(matric suction)이 감소한 것이 원인으로 생각된다.

주요어 : 강우침투속도, 불포화 풍화토, 강우지속시간, 비강우시간, 체적함수비

Unsaturated soil column tests were performed for weathered gneiss soil and weathered granite soil to assess the relationship between infiltration velocity and rainfall condition for different rainfall durations and for multiple rainfall events separated by dry periods of various lengths (herein, 'rainfall break duration'). The volumetric water content was measured using TDR (Time Domain Reflectometry) sensors at regular time intervals. For the column tests, rainfall intensity was 20 mm/h and we varied the rainfall duration and rainfall break duration. The unit weight of weathered gneiss soil was designed 1.21 g/cm³, which is lower than the in situ unit weight without overflow in the column. The in situ unit weight for weathered granite soil was designed 1.35 g/cm³. The initial infiltration velocity of precipitation for the two weathered soils under total amount of rainfall as much as 200 mm conditions was 2.090 × 10⁻³ to 2.854 × 10⁻³ cm/s and 1.692 × 10⁻³ to 2.012 × 10⁻³ cm/s, respectively. These rates are higher than the repeated-infiltration velocities of precipitation under total amount of rainfall as much as 100 mm conditions (1.309 × 10⁻³ to 1.871 × 10⁻³ cm/s and 1.175 × 10⁻³ to 1.581 × 10⁻³ cm/s, respectively), because the amount of precipitation under 200 mm conditions is more than that under 100 mm conditions. The repeated-infiltration velocities of weathered gneiss soil and weathered granite soil were 1.309 × 10⁻³ to 2.854 × 10⁻³ cm/s and 1.175 × 10⁻³ to 2.012 × 10⁻³ cm/s, respectively, being higher than the first-infiltration velocities (1.307 × 10⁻² to 1.718 × 10⁻² cm/s and 1.789 × 10⁻² to 2.070 × 10⁻² cm/s, respectively). The results reflect the effect of reduced matric suction due to a reduction in the amount of air in the soil.

Key words : Infiltration velocity, unsaturated soil, rainfall duration, rainfall break duration, volumetric water content

*Corresponding author: bgchae@kigam.re.kr

서론

국내 산사태의 대부분은 발생 깊이가 2 m 이내로서 얇은 평면 파괴형태로 발생되며, 이들은 대부분 불포화토 영역에서 발생한다. 불포화토는 건조토와 포화토의 중간 영역으로서 부분적으로 포화된 흙으로 표현하기도 하는데, 주로 토층에 강우가 침투하면서 간극수압의 증가로 인한 사면의 전단강도가 저하되어 붕괴가 일어난다. 이러한 불포화토는 고전적인 포화토 이론으로는 설명할 수 없는 다른 거동특성을 보인다(한국지질자원연구원, 2010). 주로 강우에 의한 사면파괴는 강우 침투에 따른 토층 내 함수비와 간극수압 증가로 인해 습윤전선을 의미하는 침윤선과 파괴면이 일치하는 경우가 많은데, Olivares and Picarelli (2003), Springman et al. (2003), Xue and Gavin (2008) 등에 의하면 침윤선의 상부는 완전 포화상태 보다는 부분적으로 포화된 경우가 많다는 것을 밝히고 있다. 그러나 기존의 사면 안정성 분석은 지하수위를 기준으로 하부는 포화상태로, 지하수위 상부는 완전 불포화로 가정하고, 강우 시에는 주로 한계평형법을 이용하여 사면이 완전포화 되었다고 가정한 후 해석한다. 이러한 기존의 사면 안정성 분석은 강우로 인하여 부분적으로 포화되는 침윤선과 파괴면의 일반적인 거동에 일치하지 않는 것으로 생각된다. 또한, 기존의 이론은 완전건조 또는 완전포화 상태의 사면에 대한 안정성만을 해석하기 때문에 국내 토사사면 파괴의 주된 원인이 되는 강우량의 변화를 적절히 고려할 수도 없다(유남동, 2003; 이성진 외, 2005; Lee et al., 2007; 정상삼 외, 2009; 한국지질자원연구원, 2010). 이러한 기존의 사면 안정성 연구의 한계와 우리나라 기후 특성을 고려할 때, 강우 침투에 따

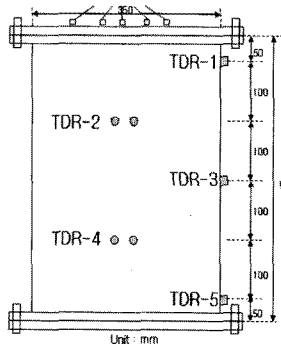
른 사면의 안정성 변화와 산사태 발생관계를 규명하는 연구가 필요한 실정이다. 강우침투에 따른 사면 안정성 분석을 위하여 강우에 따라 부분적으로 포화되는 침윤선의 거동을 예측하는 것이 선행되어야 하고, 이를 위하여 강우강도, 강우로 인한 토층 내 침윤선의 침투속도 산정이 필요하다.

따라서, 강우시 지표로부터 침윤선 거동예측 연구의 필요성으로 인해 본 연구에서는 우리나라에서 산사태가 다수 발생하는 불포화 포화토를 대상으로 불포화토 칼럼시험을 통해 지질종류와 강우조건에 따른 강우의 침투특성을 파악하고자 하였다. 선행연구인 박규보 외(2011)에서 다루었던 강우강도 조건과 토층의 단위중량 변화에 따른 강우침투특성 분석과는 달리 본 연구에서는 포화토별로 연속강우와 반복강우에 따른 강우침투속도의 변화, 반복강우 조건에서 강우 지속시간과 비강우 지속시간에 따른 강우침투속도의 변화를 분석하였다. 또한 연속강우와 반복강우의 차이점인 강우의 반복에 의한 최초 강우침투속도와 강우 재침투속도 값의 변화를 파악하였고, 반복강우에 의한 체적함수비의 증감폭 변화에 대하여 분석하였다.

불포화토 칼럼시험장치 및 시험조건

강우침투시험장치 및 시료채취

불포화토 칼럼시험장치는 크게 인공강우 공급장치, 토조칼럼 및 센서부, 데이터 획득장치로 구성된다(Fig. 1). 토조칼럼은 내경 33 cm, 외경 35 cm, 높이 50 cm로 구성되어있다. 이 칼럼의 상단으로부터 5 cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm의 깊이에 함수비 측정용 TDR-1~TDR-5



(a) Schematic diagram of the soil column



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

(b) Test equipment

Fig. 1. Unsaturated soil column test equipment.

센서를 삽입하였다. 주입된 인공강우의 측정값은 함수비 측정용 TDR 센서를 이용하여 일정시간 간격으로 컴퓨터에 자동 저장된다(한국지질자원연구원, 2010).

본 연구에서는 국내에서 산사태가 빈번히 발생하는 대표적인 풍화토를 대상으로 각 풍화도별 강우침투특성을 분석하였다. 우선 강원도 인제의 선크브리아기 편마암 풍화토와 경상북도 상주의 백악기 화강암 풍화토를 대상으로 시험을 실시하였다. 현장풍화도의 물성값 및 입도 분포는 다음과 같다(Table 1).

강우침투 시험방법

강우 침투시험을 위한 시료는 건조기로 104°C에서 24시간 동안 완전 건조시켜 사용하였으며, 흙의 단위중량(unit weight of soil)과 강우강도(rainfall intensity)를 각 풍화도별로 동일하게 적용하여 강우지속시간과 비강우시간 조절을 통한 강우조건 변화에 따른 침투특성을 알아보고자 하였다. 시험을 위한 풍화토의 단위중량은 편마암 풍화토의 경우 칼럼 내에서 칼럼상부유출이 일어나지 않는 단위중량인 1.35 g/cm³으로 선정하였고, 화강암 풍화토는 현장 건조단위중량에 해당하고 칼럼상부유출이 일어나지 않는 단위중량 1.21 g/cm³ 조건으로 선정하였다. 본 연구에서 칼럼상부유출이란 강우강도가 토층 표면으로 침투할 수 있는 침투능을 넘어서 토층 외부로 물이 넘치는 현상으로, 실제 사면에서 강우 표면유출에 해당하는 현상으로 정의된다(박규보 외, 2011). 칼럼 내 시료는 50 cm 높이를 10개 층으로 5 cm 높이마다 나누어 다짐을 실시하여 목표 단위중량에 맞게 성형하였다. 흙 시료는 고무망치로 칼럼을 타격하여 진동을 발생시키는 방법으로 다짐하였다.

Table 1. Physical properties of the weathered soils (after Park et al., 2011).

Soil property (unit)	Symbol	Weathered gneiss	Weathered soil granite
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	16.00	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

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

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

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

강우량과 강우 지속시간에 따른 인공강우 침투특성을 분석하기 위하여 강우강도를 소방방재청 경보기준이며 칼럼상부유출이 일어나지 않는 강우강도 20 mm/h로 선정하였다. 총 강우량은 우리나라 집중호우 시 일 평균 강우량 210 mm 이상임을 참고하여(국립방재연구소, 1999), 시험조건별총 강우량을 200 mm와 100 mm로 적용되도록 하였다(Table 2). 사면에서 기저면에 따른 배수와 동일한 효과를 재현하기 위하여 칼럼 내에 인공강우를 주입하면서 칼럼 하단에서 인공강우 배출구를 두어 침투된 인공강우가 동시에 배수되도록 하였다.

강우침투속도는 TDR-1은 5 cm, 나머지 센서는 센서간 간격인 10 cm를 각각 단위길이로 하여, 단위길이당 강우 침투속도를 산정하였다. 그리고 평균 강우침투속도는 심도별 함수비 측정 TDR센서에서 측정되는 침투감지시간을 측정하여 식 (3)과 같이 강우침투속도를 구하고, 이를 토대로 각 센서별 강우침투속도를 평균한 값이다.

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

여기서, v는 인공강우침투속도(cm/s), t는 침투 감지 시간(s), L은 칼럼 상부로부터 각 함수비 측정용 TDR센서까지의 심도(cm)이다.

인공강우강도 및 강우량은 정량펌프를 이용한 조절 및 계산이 가능하지만, 실제 토층 내 최종 잔류체적함수비(final residual volumetric water content) 및 중력배수되는 물의 양(amount of drained water)을 합산하여 토층 내 주입된 총 강우량(total amount of water)을 계산하였다. 중력배수되는 물의 양은 무게를 잰 후 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 강우량으로 환산하였다. 검증결과 목표 강우량(target precipitation)인 100 mm와 200 mm를 기준으로 Table 3과 같이 각각 오차가 발생하였는데, 이는 정량펌프를 통한 강우 주입 시 강우 주입량이 정밀하게 고정되지 않은 시

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

Gneiss	Rainfall intensity (mm/h)	Rainfall duration (hour)	Rainfall break duration (hour)	Unit weight of soil (g/cm ³)	Number of repetition
GnC1	20	10	0	1.35	1
GnR1	20	1	1	1.35	5
GnR2	20	1, 1.5, 2, 2.5, 3	1	1.35	1
GnR3	20	3, 2.5, 2, 1.5, 1	1	1.35	1
GnR4	20	1	1, 1.5, 2, 2.5	1.35	1
GnR5	20	1	2.5, 2, 1.5, 1	1.35	1

Granite	Rainfall intensity (mm/h)	Rainfall duration (hour)	Rainfall break duration (hour)	Unit weight of soil(g/cm ³)	Number of repetition
GrC1	20	10	0	1.21	1
GrR1	20	1	1	1.21	5
GrR2	20	1, 1.5, 2, 2.5, 3	1	1.21	1
GrR3	20	3, 2.5, 2, 1.5, 1	1	1.21	1
GrR4	20	1	1, 1.5, 2, 2.5	1.21	1
GrR5	20	1	2.5, 2, 1.5, 1	1.21	1

Table 3. Volume of water injected into the soil column.

Test conditions	Amount of residual water(mm)	Amount of drained water(mm)	Total amount of water (mm)	Target precipitation (mm)
GnC1	83	138	221	200
GnR1	74	19	93	100
GnR2	72	136	208	200
GnR3	90	140	230	200
GnR4	80	15	95	100
GnR5	81	12	93	100
GrC1	144	69	213	200
GrR1	101	0	101	100
GrR2	163	70	233	200
GrR3	156	63	219	200
GrR4	108	0	108	100
GrR5	98	0	98	100

협장치의 미세한 오차에 의한 것으로 판단된다. 주입량의 오차를 시간당 강우량으로 환산하면 최대 약 2.3 mm/h로써 집중적인 강우에 해당하지 않는 것이며, 이에 따라 시험결과에 미치는 영향은 제한적인 것으로 생각된다(박규보 외, 2011).

불포화 풍화토별 강우침투특성

편마암 풍화토

본 연구에서는 강우시간 및 비강우시간을 조절하여

반복적인 강우에 의한 침투속도 및 강우침투특성을 연속 강우와 비교 및 분석하였다. 강우 증지는 파란선, 강우 주입은 빨간선으로 표시하였다(Fig. 2). 총 강우량은 GnR1, GnR4, GnR5는 100mm, 연속강우인 GnC1과 반복강우 GnR2와 GnR3는 200mm로 시험을 수행하였다.

시험결과 연속강우인 GnC1과 달리 반복강우인 GnR1~GnR5에서는 반복적인 강우 주입과 증지에 따라 체적함수비 및 간극수압의 증감이 반복되는 것을 확인할 수 있었다. 연속강우에서는 강우가 유입되면서 모든 센서가 일정시간 동안 최대체적함수비 유지 후 강우가 증지

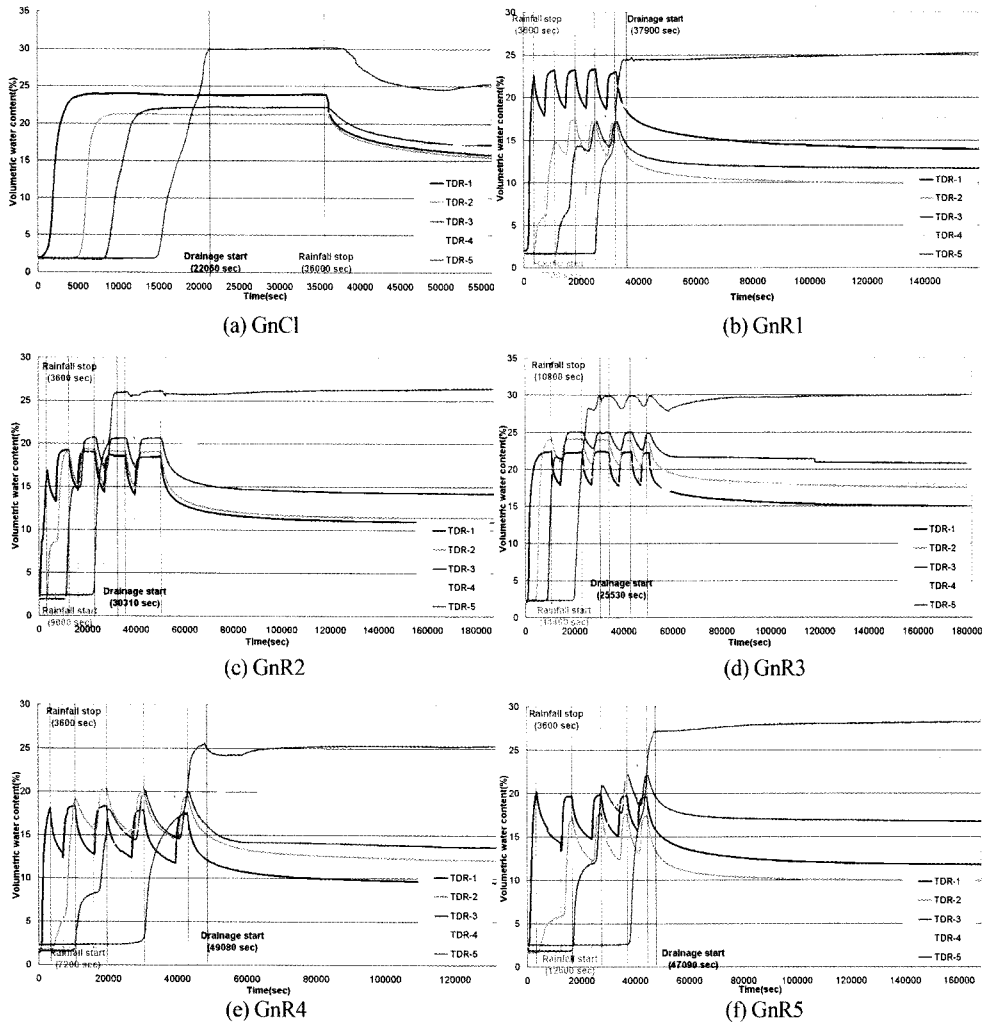


Fig. 2. Volumetric water content (VWC) of weathered gneiss soil.

되면서 체적함수비가 감소하였으나, 반복강우의 경우는 강우조건별로 강우지속시간에 따라 최대체적함수비 유지시간이 차이를 보였다(Fig. 2). 반복강우 조건에서 TDR-1~TDR-5의 경우 강우지속시간이 긴 GnR2와 GnR3의 경우에는 강우지속시간에 따라 대부분의 센서위치에서 최대체적함수비에 도달하여 일정시간 동안 체적함수비를 유지하다가 강우가 중지되면서 감소하는 양상을 보였다. 그에 반해 강우지속시간이 상대적으로 짧은 GnR1, GnR4, GnR5에서는 최대체적함수비에 상대적으로 천천히 도달하여 체적함수비를 유지하지 못하고 강우가 중지되면서 감소하는 양상이 나타났다(Fig. 2). 이는 GnR2와 GnR3에서 강우지속시간이 길고 상대적으로 비강우시간은 짧아

서 체적함수비가 증가할 수 있는 시간은 긴 반면, 체적함수비가 감소하는 시간은 짧기 때문에 최대체적함수비에 도달하여 일정값을 유지하다가 강우가 중지되면서 감소하는 양상을 나타낸 것으로 생각된다.

연속강우의 경우에는 강우의 주입과 증기가 한 번에 일어났기 때문에 체적함수비의 증가가 일어나지 않았지만, 반복강우의 경우는 강우조건에 따라서 각각 다른 양상으로 체적함수비의 증가가 일어났다. 강우조건별로 강우의 증지와 시작에 따른 최대 체적함수비와 최소 체적함수비의 증감폭을 비교한 결과, GnR2, GnR3, GnR4의 경우에서만 TDR-5의 체적함수비가 미세한 증가가 일어났다(Fig. 2). GnR2와 GnR3의 경우는 강우가 시험 종료 시

까지 충분히 침투되어서 반복강우의 영향이 깊은 심도까지 미친 것으로 판단되고, GnR4의 경우는 최종 강우의 주입 전에 비강우시간이 비교적 길어서 체적함수비가 감소하는 시간적 간격이 생긴 것으로 판단된다. GnR1과 GnR5에서는 TDR-5의 체적함수비가 시험 종료 시까지 미세한 증가를 보였는데(Fig. 2), 이는 칼럼하부로의 배수는 원활하게 일어나지 않았으나 상부로부터 강우의 유입이 천천히 지속되었기 때문에 판단된다.

반복강우 조건에서의 체적함수비 증감폭은 Fig. 3과 같이 토층 심도가 깊어질수록 좁게 나타났으며, 반복강우 조건에서 TDR-1~TDR-4의 경우는 반복강우가 진행되면서 강우조건에 따라 체적함수비의 증감이 일어난 후 강우 중지 때 체적함수비가 감소하는 양상을 보였다. 반면에 TDR-5의 경우는 시험종료 시까지 체적함수비가 미세하게 증가하였다. 이는 상대적으로 사면이 깊고 밀도가 높은 위치일수록 강우침투속도가 느려지고(Figs. 4 & 7), 선형강우의 영향이 커서 최종 체적함수비가 더 오래 지

속되었기 때문에 판단된다(신길호와 박성완, 2006). 총 강우량이 100 mm인 GnR1, GnR4, GnR5를 비교할 경우 시험초기 비강우시간이 긴 조건에서 체적함수비의 증감폭은 넓게 나타났다. 그리고 총 강우량이 200 mm로서 같고 강우시간을 조절한 GnR2, GnR3를 비교할 경우, 비강우시간이 같을 때 시험초기 강우량이 적을수록 체적함수비 증감폭은 더욱 넓게 나타났다(Fig. 3). 이는 시험초기 비강우시간이 길수록 체적함수비가 지속적으로 감소하여 강우 재주입시 증가된 체적함수비와의 차이가 커지기 때문에 생각된다. GnR4의 TDR-3의 경우 토층 내 심도가 깊어질수록 체적함수비가 감소하는 경향과는 반대로 0.2% 증가한 것을 확인할 수 있는데, 이는 센서의 무작위성 오차가 포함되었을 가능성과 시료성형 시 이방성에 의한 것일 수 있다. 그러나 본 시험은 전체 시험에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로서 전체 시험에 미치는 영향은 제한적일 것으로 생각되며, 추가적인 시험을 통하여 이를 보정하여야 할 것이다.

반복강우의 경우 평균 강우침투속도가 각 조건별로 $1.309 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 2.247 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 로서 강우중지와 재시작이 반복되어 연속강우에 비해 동일 시간당 토층에 주입되는 강우량이 적기 때문에 연속강우인 GnC1의 $2.854 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 에 비해서 느리게 나타났다. 동일 시간당 토층에 주입되는 강우량이 100 mm보다 많은 총 강우량이 200 mm인 GnC1, GnR2, GnR3이 총 강우량이 100 mm인 GnR1과 GnR4, GnR5보다 강우침투속도가 빨랐다. 그리고 총 강우량이 200 mm인 GnR2와 GnR3을 비교하면 시험 초기 강우량이 더 많은 GnR3의 경우에서 강우침투속도가 빠르게 나타났다. 이는 토층 내 침투강우량이 적어서 포화도가 낮아지고 흡입력이 증가하면, 물의 흐름을 방해하는 공기의 양이 상대적으로 증가하여 물의

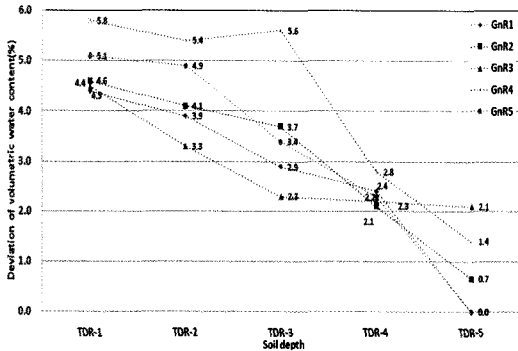
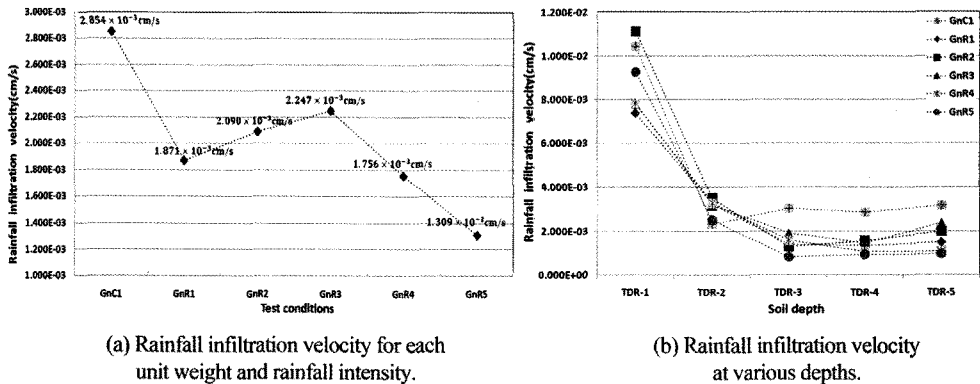


Fig. 3. Deviation of volumetric water content in weathered gneiss soil.



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

(b) Rainfall infiltration velocity at various depths.

Fig. 4. Rainfall infiltration velocity of weathered gneiss soil under various conditions.

흐름을 차단하기 때문에 투수계수가 감소된 것이 원인으로 생각된다(류지협과 김만식, 2003). 총 강우량이 100 mm인 GnR1, GnR4, GnR5를 비교하면, 각각 1.871×10^{-3} cm/s, 1.756×10^{-3} cm/s, 1.309×10^{-3} cm/s로 시험초기 비강우 시간이 짧을수록 강우침투속도가 빨랐다(Fig. 4(a), Table 4). 비강우시간이 짧다는 것은 시험 초기 동일 시간동안 강우량이 더 많다는 것을 뜻하는 것으로서, 총 강우량 100 mm와 200 mm 조건 모두에서 시험초기 강우량이 많을수록 강우침투속도는 빠르게 나타났다. 시험 초기 강우 침투가 많이 일어날수록 토층 내 공기의 감소가 빨라지고 불포화 투수계수에 영향을 미치는 흡입력이 감소하므로 강우침투속도는 빨라지는 경향을 보인 것으로 판단된다.

반복강우로 인한 토층 내 심도별 강우 침투속도는 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4(b)). 이러한 결과는 칼럼 내 상부 다짐 시 칼럼의 하부까지 다짐의 영향이 미쳐서 시간이 경과함에 따라 토층 내 심도가 깊을수록 흙이 더 조밀하게 성형된 것에 기인하며, 흙이 조밀할수록 공극이 줄어들고 투수계수가 감소하여 강우 침투속도가 느려지기 때문이다(송창섭, 2004). 한편 Fig. 4(b)의 TDR-1의 강우침투속도와 토층 내 다른 심도의 강우침투속도를 비교할 경우, TDR-1에서 강우침투속도가 다른 심도의 강우침투속도에 비하여 매우 크게 나타났다. 이는 강우를 주입할 시 TDR-1이 토층 내 심도가 얕아서 강우 주입 튜브로부터 토층 표면에 전달되는 힘이 많은 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 시험 조건별로 강우침투속도 산정 시 평균 강우침투속도 개념을 이용하였는데, TDR-1의 경우는 토층 내 다른 심

도와의 강우침투속도 차이가 커서 평균 강우침투속도를 좌우하고, 일부는 전체 강우침투속도 양상과 거리가 먼 결과가 나왔기 때문에 시험결과의 신뢰성을 저하시킬 수 있다고 판단되어 평균 강우침투속도 산정 시에는 제외하였다(Fig. 4).

화강암 풍화토

화강암 풍화토 연속강우의 모든 심도와 반복강우의 TDR-1~TDR-4의 경우 편마암 풍화토에 비하여 최대체적함수비가 Table 5와 같이 더욱 높게 측정되었다. 이는 화강암 풍화토의 공극율(porosity)인 53.0%와 편마암 풍화토의 공극율인 48.8%와의 차이와 강우침투속도에서 비롯된 것으로 생각된다. 동일한 토층의 체적 내에 공극율이 높은 화강암 풍화토가 많은 물을 함유할 수 있고, Table 4와 같이 강우침투속도는 느리기 때문에 토층 내에 강우가 오랫동안 머물러서 공극을 채울 수 있기 때문이다. TDR-5의 경우 총 강우량 200 mm조건에서는 화강암 풍화토의 최대체적함수비가 편마암 풍화토보다 높지만, 총 강우량 100 mm에서는 화강암 풍화토의 체적함수비가 편마암 풍화토보다 낮게 나타났다. 이는 화강암 풍화토의 강우침투속도가 느려서 강우량 100 mm조건에서는 시험 종료 시까지 강우가 충분히 침투되지 못하여서 TDR-5의 체적함수비에 영향을 많이 미치지 못하였기 때문으로 판단된다(Table 4). 또한 화강암 풍화토의 TDR-4와 TDR-5는 체적함수비의 증감이 나타나지 않았는데, 이 역시 화강암 풍화토의 강우침투속도가 느려서 TDR-4와 TDR-5에 반복강우의 영향을 줄 만큼 강우가 충분히 침투되지 않았기 때문으로 생각된다.

편마암 풍화토 반복강우에서는 강우시작으로부터 강우 중지까지 각 센서들은 최대체적함수비에 도달하여 일정한 값을 가지다가 강우가 중지되면서 체적함수비 값이 하강하기 시작했으나, 화강암 풍화토 반복강우 시험에서는 각 조건별로 TDR-5를 제외하고 대부분 센서의 최대 체적함수비가 강우단계가 진행됨에 따라 증가하는 값을 나타냈다(Fig. 5, Table 5). 이는 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 공극율과 입도분포차이에 의한 것으로 판단된다. 편마암 풍화토의 경우 공극률이 48.8%인데 비해서 화강암 풍화토의 경우는 공극율이 53.0%로서 편마암 풍화토보다 공극율이 크기 때문에 완전포화에 이르기까지 비교적 오랜 시간이 걸리는데, 반복강우의 경우 상대적으로 강우강도가 낮고 강우지속시간이 짧기 때문에 이러한 결과가 도출된 것으로 생각된다.

화강암 풍화토의 경우도 편마암 풍화토 시험과 같이

Table 4. Comparison of infiltration velocities for each repeated rainfall event.

	Test conditions	First infiltration velocity (cm/s)	Repeated infiltration velocity (cm/s)
Gneiss	GnC1	2.854×10^{-3}	-
	GnR1	1.871×10^{-3}	1.320×10^{-2}
	GnR2	2.090×10^{-3}	1.486×10^{-2}
	GnR3	2.247×10^{-3}	1.366×10^{-2}
	GnR4	1.756×10^{-3}	1.307×10^{-2}
	GnR5	1.309×10^{-3}	1.718×10^{-2}
Granite	GnC1	2.012×10^{-3}	-
	GrR1	1.581×10^{-3}	1.940×10^{-2}
	GrR2	1.692×10^{-3}	1.789×10^{-2}
	GrR3	1.790×10^{-3}	2.070×10^{-2}
	GrR4	1.177×10^{-3}	1.904×10^{-2}
	GrR5	1.175×10^{-3}	1.905×10^{-2}

Table 5. Maximum volumetric water content of the weathered soils.

(unit : %)

	Test conditions	TDR-1	TDR-2	TDR-3	TDR-4	TDR-5
Gneiss	GnC1	24.0	21.2	22.3	21.5	30.1
	GnR1	22.5~23.1	17.2~17.4	17.2~17.2	19.4	25.2
	GnR2	18.4~19.2	19.1~19.2	20.2~20.6	22.1~22.4	26.1
	GnR3	22.3~22.4	23.6~24.2	25.1~25.1	20.3~20.4	29.7~29.8
	GnR4	18.1~18.2	19.1~20.2	20.0~20.2	22.2~22.4	25.2
	GnR5	19.6~19.7	17.2~17.4	20.9~22.1	24.0~25.1	28.3
Granite	GrC1	35.0	39.9	37.5	37.8	40.4
	GrR1	27.2~32.8	34.2~35.5	30.3~32.5	26.1	22.5
	GrR2	25.0~35.0	27.0~38.9	30.9~39.7	39.6	39.9
	GrR3	33.7~40.0	33.8~40.0	27.9~33.7	39.6	36.5
	GrR4	29.6~33.6	30.1~34.7	30.4~31.7	29.1	25.0
	GrR5	26.6~31.0	25.7~31.6	30.5~32.4	26.2	24.0

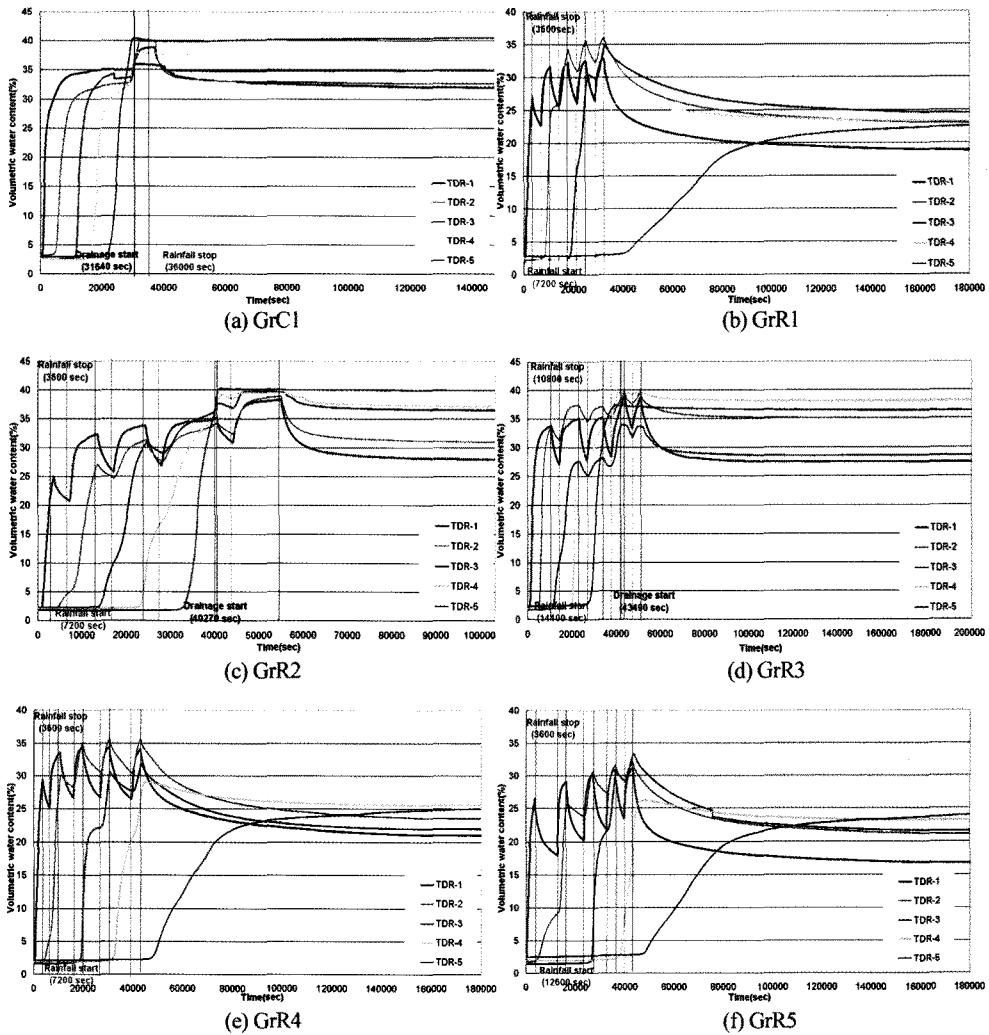


Fig. 5. Volumetric water content of weathered granite soil.

강우의 반복적인 증지와 시작에 따른 체적함수비의 최대값과 최소값에 대한 증감폭은 토층 내 심도가 깊을수록 좁게 나타났으며(Fig. 6), 이를 통해 토층 내 심도가 깊어질수록 반복적인 강우의 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있었다. 이는 편마암 풍화토 시험에서도 기술하였듯이 토층 내 심도가 깊고 밀도가 높은 곳일수록 강우침투속도가 느리고, 선행강우로 인한 잔류체적함수비가 오래 지속되기 때문인 것으로 판단된다. 비강우시간 조절 시험인 GrR4와 GrR5 시험에서 강우시간 조절 시험인 GrR2와 GrR3보다 체적함수비 증감폭이 더욱 크게 나타났다(Fig. 6). 이는 비강우시간이 길수록 체적함수비가 지속적으로 감소하므로 강우의 재주입으로 인한 최대체적함수비와의 차이가 커졌기 때문인 것으로 판단된다.

화강암 풍화토 반복강우 시험에서도 편마암 풍화토 반복강우 시험과 같이 GrR1부터 GrR5까지 강우침투속도가 최소 $1.581 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 부터 최대 $1.790 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 로 측정되어 시험초기 강우량이 많은 경우에서 강우침투속도는 빠르게 나타났다(Fig. 7(a), Table 4). 이는 시험초기

강우 침투가 많이 일어날수록 토층 내 공기의 감소가 빨라졌고, 이로 인하여 불포화 투수계수에 영향을 미치는 흡입력이 감소해서 강우침투속도는 빨라지는 경향을 보인 것으로 판단된다(Fig. 9, 류지협과 김만식, 2003; Kim et al., 2009). 그러나 GrR4와 GrR5의 경우 편마암 풍화토 반복강우 시험과는 달리 강우 침투속도가 각각 $1.177 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 와 $1.175 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 로서, 그 차이가 매우 적었다(Fig. 7(a), Table 4). 이는 화강암 풍화토의 공극율이 상대적으로 큰 조건에서 토층 내 강우 침투속도에 영향을 줄 만큼 강우량이 많지 않았기 때문으로 판단된다.

심도별 강우침투속도는 편마암 풍화토의 경우와 같이 토층 내 심도가 깊어질수록 느려지는 경향을 보였다(Fig. 7(b)). 이러한 결과는 편마암 풍화토의 경우에서도 기술하였듯이 칼럼 내 상부 다짐 시 칼럼의 하부까지 다짐의 영향이 미쳐서 시간이 경과함에 따라 토층 내 심도가 깊을수록 흩이 더 조밀하게 성형되었기 때문으로, 흩이 조밀할수록 공극이 줄어들고 투수계수가 감소하여 강우침투속도가 느려지기 때문이다(송창섭, 2004).

토 의

최초 강우침투속도와 강우 재침투속도 비교분석

연속강우는 지속적인 강우로 인하여 한 번의 강우침투가 연속적으로 이루어지는 반면, 반복강우는 강우 주입의 증지와 재시작에 따른 반복적인 강우의 침투가 일어났다. 이러한 연속강우와 반복강우의 강우조건 차이에 따른 최초 강우침투속도(first infiltration velocity)와 강우 재침투속도(repeated infiltration velocity)가 차이가 있을 것으로 판단하였다. 그래서 Table 4와 같이 토층이 완전 건조된 상태의 강우침투속도와 강우중지 후 다시 강우를

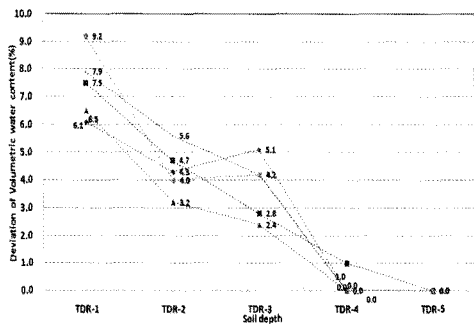


Fig. 6. Deviation of volumetric water content in the weathered granite soil.

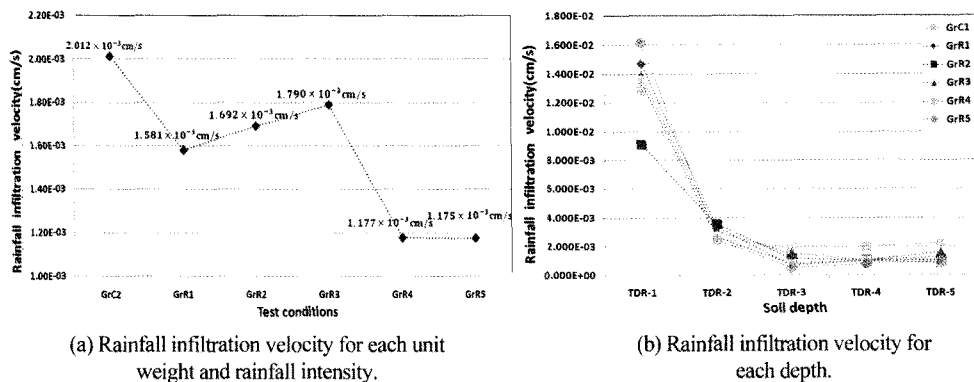


Fig. 7. Rainfall infiltration velocity of weathered granite soil under various conditions.

주입했을 때 강우 재침투속도를 비교해보았다. 강우 재침투속도는 강우중지 후 체적함수비가 감소하다가 다시 강우를 주입한 시간으로부터 체적함수비가 증가할 때까지의 시간 간격을 측정하여 속도로 환산한 값이다(식 (3)). Table 4로부터 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 모든 조건에서 완전 건조된 토층으로의 최초 강우침투속도에 비하여 강우 재침투속도가 매우 빠르다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 강우 재침투 전 토층 내에 물이 잔류하고 있어서 강우의 재침투로 인한 습윤대(wetting zone)를 형성하기 위해 물이 차지해야 하는 공극의 부피가 줄어들었고, 토층 내 공기의 함입량이 줄어들어서 불포화 투수계수에 영향을 미치는 흡입력(matric suction)이 감소한 것이 원인으로 생각된다(Dye et al., 2011).

풍화토별 최초 강우침투속도 및 강우 재침투속도 비교분석

편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 최초 강우침투속도를 비교할 경우, 편마암 풍화토의 최초 강우침투속도가 화강암 풍화토의 최초 강우침투속도보다 빠르게 나타났다. 풍화토별로 비슷한 강우량이 각 풍화토의 토층내로 주입되었고, 공극율은 화강암 풍화토가 53.0%이고 편마암 풍화토의 공극율이 48.8%로서 공극율이 클수록 강우침투속도가 빠르게 나타나는 일반적인 침투특성과 차이를 보였다. 이러한 강우침투속도의 차이는 각 풍화토의 입도분포 차이에 의해서 발생할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 Table 1과 같이 유효입경과 전체적인 입자 크기가 풍화토별로 크게 다르지 않다. 또한 균등계수가 6이상이고, 곡률계수가 1~2범위에 있으므로 두 풍화토 모두 분급이 잘되어있는 상태이다. 따라서 본 시험과 같은 결과가 도출된 이유는 입도분포 차이보다는 식 (4)로 표현되

는 습윤대와 관련이 있는 것으로 생각된다(Lumb, 1975; 심태섭 외, 2004). 습윤대의 두께는 식 (4)에 의하여 결정되며 시간의 흐름과 토층의 투수계수에 비례하고, 공극율 및 칼럼 전체의 평균 최종 체적함수비와 잔류체적함수비의 차이에 반비례한다. 습윤대의 두께는 본 연구에서 시간에 따른 강우침투 깊이를 의미하며, 습윤대의 두께가 두꺼울수록 강우침투가 많이 일어났음을 뜻한다. 본 연구의 화강암 풍화토와 편마암 풍화토의 경우 Table 1과 같이 입도분포가 유사하여 투수계수는 비슷할 것으로 생각되며, 화강암 풍화토가 53.0%로 편마암 풍화토 48.8%보다 공극율이 크고, 평균 최종 체적함수비와 잔류체적함수비의 차이 역시 화강암 풍화토가 Fig. 8과 같이 동일 강우조건 내에서 편마암 풍화토보다 크기 때문에 식 (4)로부터 습윤대의 두께는 편마암 풍화토가 화강암 풍화토보다 두꺼울 것으로 생각된다. 이러한 습윤대 두께의 차이로 인해 동일 강우조건 내에서 편마암 풍화토의 최초 강우침투속도가 화강암 풍화토보다 빠르게 나타난 것으로 판단된다(박규보 외, 2011).

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

여기서, h 는 습윤대의 두께, k 는 토층의 투수계수, t 는 강우지속시간, n 은 공극율, θ_f 는 최종 체적함수비, θ_r 은 잔류체적함수비이다.

강우 재침투속도의 경우 최초 강우침투속도와는 상반된 결과로서 화강암 풍화토가 편마암 풍화토보다 빠르게 나타났는데(Table 4), 이 원인을 분석하기 위하여 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 최종 체적함수비와 잔류체적함수비의 차이를 비교해 보았다(Fig. 8). 그 결과 같은 강우강도 조건을 비교할 때, 모든 경우에서 화강암 풍화토

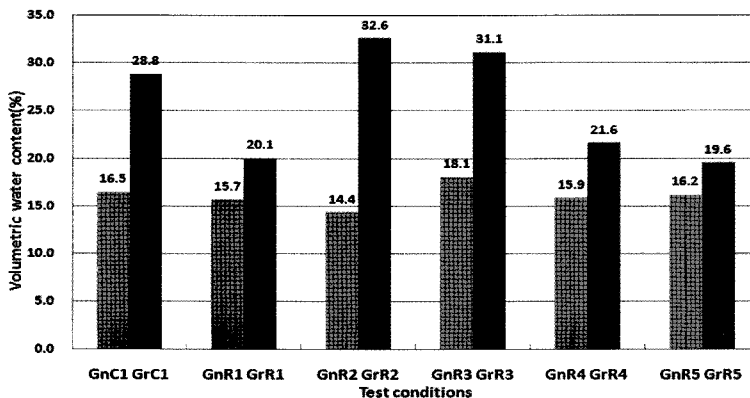


Fig. 8. Deviation of the final and residual volumetric water contents of each weathered soil.

시험에서 편마암 풍화토보다 최종 체적함수비와 잔류체적함수비 차이가 크게 나타났다(Fig. 8). 최종 체적함수비가 높다는 것은 공극 내 강우의 침투를 방해하는 요소인 공기의 함유량이 적고 잔류 흡입력이 낮다는 것으로, 일반적으로 Fig. 9(a)와 같이 체적함수비가 높을수록 흡입력(matric suction)이 낮아지고, Fig. 9(b)와 같이 흡입력이 낮아질수록 불포화 투수계수는 높아지다가 일정 값을 유지하는 양상이 나타난다(신길호와 박성완, 2006; Kim et al., 2009). 따라서, 강우의 재침투로 인한 화강암 풍화토의 불포화 투수계수가 편마암 풍화토의 불포화 투수계수보다 클 것으로 판단된다. 그 결과 Table 4와 같이 화강암 풍화토의 재침투속도가 편마암 풍화토의 재침투속도보다 빠르게 나타난 것으로 생각된다.

Table 4에서 풍화토별로 강우 재침투속도를 비교해보면, 강우조건이 달라도 강우 재침투속도가 유사한 값을 나타냈다. 이는 강우 재침투속도가 최소강우침투속도에 비하여 매우 빨라서 재침투에 의한 강우가 짧은 시간 내에 습윤대 위치까지 도달하기 때문에 강우조건에 따른 강우 재침투속도가 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

풍화토별 잔류체적함수비 비교분석

각 불포화 풍화토별로 평균 최종 체적함수비와 잔류체적함수비의 차이를 비교해본 결과 편마암 풍화토에서는 강우조건에 따른 변화가 뚜렷이 관찰되지 않았다(Fig. 8). 여기서 최종 체적함수비와 잔류체적함수비 차이는 칼럼의 심도별로 삽입된 함수비 측정용 TDR센서 5개의 체적함수비를 평균한 값이다. 풍화토별로 단위중량 조건이 같으므로 유효공극을 또한 비슷하여 풍화토별 최종 체적함수비와 잔류체적함수비의 차이는 비슷한 값을 보일 것으로 판단되나(김상규 외, 1996), 화강암 풍화토의 경우 총 강우

량 200 mm인 GrC1과 GrR2, GrR3이 총 강우량 100 mm인 GrR1과 GrR4, GrR5보다 값이 매우 크게 나타났다(Fig. 8). 화강암 풍화토의 경우 공극율이 53.0%로서 편마암 풍화토 48.8%보다 크기 때문에 토층 내에 함유할 수 있는 물의 양이 많고, 강우의 침투는 상대적으로 미약하게 일어났기 때문에 총 강우량별 최종 체적함수비와 잔류체적함수비의 차이가 다르게 나타난 것으로 판단된다. 한편 편마암 풍화토 경우의 모든 강우조건에서 최종 강우 주입 시까지 토층 내 주입된 강우가 칼럼 하단까지 충분히 침투되어서 배수가 일어났으나, 화강암 풍화토의 경우는 편마암 풍화토보다 최초 강우침투속도가 느려서 강우량 100 mm조건인 GrR1, GrR4, GrR5에서는 최종 강우 주입 시까지 칼럼 내 토층에 강우가 충분히 침투되지 않아서 배수가 발생하지 않았다(Tables 3 & 4). 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 최종 체적함수비와 잔류체적함수비 차이를 비교해 보면 화강암 풍화토가 편마암 풍화토보다 높게 나타났는데(Fig. 8), 이 또한 화강암 풍화토의 공극율이 높고 최초 강우침투속도는 Table 4와 같이 낮아서 토층 내에 머무는 물의 양이 많기 때문인 것으로 생각된다.

결 론

본 연구는 풍화토별 연속강우와 강우지속시간 및 비강우시간 조절에 따른 반복강우의 침투특성을 비교하기 위해, 국내에서 산사태가 다수 발생한 강원도 인제의 선캠브리아기 편마암 풍화토와 경상북도 상주의 백악기 화강암 풍화토를 대상으로 강우침투 칼럼시험을 하였다. 연속강우와 반복강우의 최초 강우침투속도를 비교해 보면, 토층 내로 단위 시간당 더 많은 강우량이 주입된 연속강우의 경우 강우침투속도가 더 빠르게 나타났다. 또한,

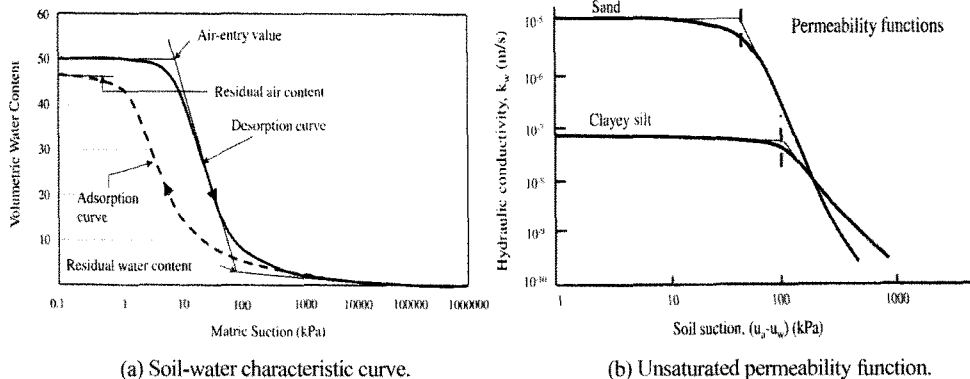


Fig. 9. Suction stress characteristic curve (after Kim et al., 2009).

연속강우와 반복강우의 강우조건 차이인 최초 강우침투 속도와 강우 재침투속도를 비교해 보면, 편마암 풍화토와 화강암 풍화토의 모든 조건에서 완전 건조 상태의 최초 강우침투속도보다는 토층 내 물을 함유하고 있는 상태인 강우 재침투속도가 빠르게 나타났다. 이는 강우 재침투 전 토층이 물을 함유하고 있는 상태에서 최초 강우침투 시보다 공극 내 물의 흐름을 방해하는 공기의 양이 적어졌기 때문에 물의 흐름이 더욱 원활하여 발생한 현상으로 생각된다. 불포화토의 반복강우침투 칼럼시험결과에 의하면 강우침투속도는 강우지속시간, 비강우시간, 시료의 종류에 따라 달리 나타났다. 같은 종류의 풍화토에서는 총 강우량이 많을수록 강우침투속도가 빠르게 나타났으며, 총 강우량이 같은 조건에서는 시험 초기 강우량이 많은 시험조건에서 강우침투속도가 더 빠른 결과가 나왔다. 이는 상대적으로 강우 재주입 전 토층의 체적함수비가 높아서 공극 내 물의 흐름을 방해하는 공기의 양이 적은 것이 이유라고 판단된다. 또한, 같은 강우조건에서 화강암 풍화토가 편마암 풍화토에 비해 침투속도가 느리게 나타났다. 이는 흙의 공극률 및 포화도의 차이에 기인한다고 생각된다.

사 사

본 연구는 2011년도 한국지질자원연구원 주요사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립방재연구소, 1999, 사면 위험지대 평가 방법 연구 - 경북지역 현장사례를 중심으로, 국립방재연구소, NDP-99-08, 359p.
- 김상규, 류지협, 송진규, 1996, 불포화토의 함수특성 측정, 한국지반공학회논문집, 12(6), 139-152.
- 류지협, 김만식, 2003, 강우시 자연사면의 사면재해 발생기구, 환경관리학회지, 9(1), 85-94.
- 박규보, 채병곤, 김경수, 박혁진, 2011, 불포화토 칼럼시험을 통한 불포화토 내 강우침투속도 분석: 편마암 풍화토와 화강암 풍화토 비교, 자원환경지질, 44(1), 71-82.
- 송창섭, 2004, 흙-수분 특성곡선을 이용한 불포화토의 투수성 및 전단강도의 예측, 한국과학재단, R05-2002-000-00484-0, 26p.
- 신길호, 박성환, 2006, 풍화계열 사면의 불포화 함수특성곡선 이력역이 강우 침투에 미치는 영향, 한국지반공학회논문집, 22(7), 55-64.
- 심태섭, 김선화, 기원서, 주승완, 2004, 강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구, 지질공학, 14(4), 349-360.

- 유남동, 2003, 점토함유량에 따른 화강풍화토의 불포화 특성, 연세대학교 석사학위논문, 99p.
- 이성진, 이해지, 이승래, 2005, 화강암 풍화토에 대한 함수 특성곡선 - 추정방법에 대한 연구, 한국지반공학회논문집, 21(1), 15-27.
- 정상섭, 최재영, 이재환, 2009, 지속강우특성에 따른 불포화 풍화토 사면의 안정성분석, 대한토목학회논문집, 29(1), 1-9.
- 한국지질자원연구원, 2010, 급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발, 지식경제부, GP2009-020-2009(2), 455p.
- Dye, H.B., Houston, S.L. and Welfert, B.D., 2011, Influence of unsaturated soil properties uncertainty on moisture flow modeling, Geotechnical and Geological Engineering, 29(2), 161-169.
- Kim, Y.K., Choi, J.C., Lee, S.R. and Seong, J.H., 2009, Reliable assessment of rainfall-induced slope instability, Journal of the Korean Geotechnical Society, 25(5), 53-64.
- 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, 101-109.
- Lumb, L., 1975, Slope failures in Hong Kong, Quarterly Journal of Engineering Geology, 8(1), 31-65.
- Olivares, L. and Picarelli, L., 2003, Shallow flowslides triggered by intense rainfalls in natural slopes covered by loose unsaturated pyroclastic soils, Geotechnique, 53(2), 283-287.
- Springman, S.M., Jommi, C. and Teyssere, P., 2003, Instability on moraine slopes induced by loss of suction: a case history, Geotechnique, 53(1), 3-10.
- Xue, J. and Gavin, K., 2008, Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes, Geotech Geology Engineering, 26(1), 199-209.

2011년 5월 13일 원고접수, 2011년 6월 17일 게재승인

박규보

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
350-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-868-3414
E-mail: parkase85@naver.com

채병곤

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
350-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-868-3414
E-mail: bgchac@kigam.re.kr

박혁진

세종대학교 지구정보공학과

143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교

Tel: 02-3408-3965

Fax: 042-828-6966

E-mail: hjpark@sejong.ac.kr