

## 국내 풍화토의 강우 침투특성 분석을 위한 실험연구: 토양 체적함수비 분석 및 적용성 평가

김만일<sup>1</sup> · 채병곤<sup>1</sup> · 조용찬<sup>1</sup> · 서용석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

<sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과

## Study on Rainfall Infiltration Characteristics for Weathered Soils: Analysis of Soil Volumetric Water Content and Its Application

Man-Il Kim<sup>1</sup>, Byung-Gon Chae<sup>1</sup>, Yong-Chan Cho<sup>1</sup>, and Yong-Seok Seo<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

본 연구에서는 누적강우를 고려한 침투수 거동을 평가하기 위해 ADR 측정센서와 간극수압계를 사용하여 흙매질의 물성 변화를 측정하였다. ADR 측정센서의 측정 정밀도를 향상하기 위한 의존성 파악 및 강우조건에 따른 흙매질 특성 변화를 분석하였다. 또한, 강우/비강우조건 하에서 모형사면 내 침투수 거동 특성도 함께 검토하였다. ADR 측정센서를 활용한 체적함수비 의존성 검토 실험의 결과는 표준사와 화강풍화토에서 체적함수비 증가에 따라 측정전압도 함께 증가하였다. 온도 의존성 검토의 경우, 고함수비 조건인 체적함수비 0.15에서 0.45 범위에서는 측정 대상 매질의 온도를 고려해야만 한다. 모형사면 실험에서는 누적강우조건하에서 체적함수비와 간극수압의 변화 양상을 충분히 확인하였다. 특히, ADR4와 PWP3이 설치된 모형사면 하단부에서 측정치가 높게 나타나는데, 이것은 누적강우에 의해 발생된 침투수가 사면 하단부에서 유출면으로 작용하고 있으며, 모형사면 파괴의 시작지점으로 작용함을 알 수 있다.

**주요어** : 누적강우, 모형사면, 체적함수비, 간극수압, ADR 측정센서

In order to analyze infiltration characteristics of rainfall in soil, two laboratory experiments were conducted using an amplitude domain reflectometry (ADR) sensor and a pore water pressure meter (PWP) in this study. The first experiment is to understand the dependency of volumetric water content and temperature for standard sand and weathered granite soil. The second experiment is a laboratory flume test with changes of rainfall condition. As the results of the dependency experiment, the volumetric water content is increased with increase of the output voltage measured by the ADR sensor in both the standard sands and weathered granite soil. Furthermore, the results also indicate necessity of consideration of the temperature dependency under the condition of high volumetric water contents from 0.15 to 0.45. In the flume test, two measurement devices are detected to the variation of volumetric water content and pore water pressure at the installation point of the flume. In especial, the measured values of ADR4 and PWP3 installed on the lower part of slope are higher than those of the others. It means that the lower part of slope plays a role of a runoff face and a beginning point of slope failure.

**Key words** : volumetric water content, pore water pressure, dependency, flume test, amplitude domain reflectometry

### 서 론

국내 주요 자연재해 발생 요인인 집중호우는 연중 6

월에서 9월 사이에 전체 강우의 약 88.8%가 집중적으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 산사태 발생빈도를 행정구역으로 구분해 보면, 경기도와 강원도 지역에

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

서 전체 산사태의 약 50% 이상을 차지하고 있으며, 이러한 산사태는 일평균 강수량 210 mm 이상에서 발생하는 것으로 보고되어 있다(행정자치부국립방재연구소, 1999). 특히, 2006년 7월에 발생한 강원도 평창 및 인제지역의 산사태는 누적 일강수량이 700 mm 이상 집중강우에 의해 발생되었으며, 이로 인해 광범위한 재산과 인명피해를 초래하였다. 이러한 강우 형태는 산사면을 덮고 있는 토층이 불포화에서 포화상태로 바뀔에 따라 토층의 재하하중 증가와 결합력 이완으로 인해 산사태가 발생된다. 이는 누적강수량에 의해 사면 토층의 간극수압이 증가됨에 따라 토층의 전단강도가 저하되어 사면 파괴 형태를 보이는 것이다(이준용과 박형동, 2004). 또한, 누적강우 특성상 지속적으로 침투수가 발생되어 토층 내 침윤선 분포가 중력방향으로 확대됨에 따라 사면 파괴의 결정적인 요소로 작용한다(Kim et al., 2004; Elsen et al., 2003).

연구의 최종 목표는 강우에 의한 침투수 거동 특성을 분석하여 사면 파괴 메커니즘을 현장 실시간 계측자료를 토대로 산사태 예경보시스템을 구축하는 것이다. 이를 위해서는 침투수의 거동을 지배하는 지질매질의 공간적 분포인 공극률(porosity) 또는 유효공극률(effective porosity)을 파악하는 것이 필수적이다. 이들 물성으로부터 침윤선(wetting front)의 분포 특성을 현장 체적함수비 변화로 추정할 수 있다. 또한 국내 지질 및 지형조건을 고려하여 지질매질에 대한 풍화 특성별 현장토의 물성변화 계측이 가능하도록 계측 및 분석 방법을 제시할 것이다.

이에 본 연구에서는 누적강수량에 따른 매질 내에서의 체적함수비 변화를 실시간 측정이 가능한 amplitude domain reflectometry (ADR) 방식의 측정센서를 적용하여 국내 현장조건에 적합한 최적의 측정기법에 대해 검토하였다. 이를 위해 적용 측정센서의 토질 특성별 체적함수비 및 온도에 대한 의존성을 파악하였으며, 누적강우조건을 고려하여 모형사면에서의 침윤선 거동을 평가

하기 위해 간극수압과 체적함수비의 변화도 함께 평가하였다. 이들 결과로부터 국내 지질별 현장토에 대한 누적강수량과 체적함수비를 고려한 사면파괴 예측을 위한 현장 적용성을 극대화할 수 있는 최적의 측정 및 분석 기법을 제시하고자 한다.

## ADR 측정원리

흙입자, 공기, 물의 유전율은 20°C 온도 하에서 각각 3~5, 1, 80으로 알려져 있다(Hasted, 1973). 여기서, 물의 유전율이 다른 매질과 비교해 높은 값을 갖는 이유는 물분자 구조가 쌍극자 모멘트의 영향을 받기 때문이다(Santamarina et al., 2001). 이와 반대로 고상체인 흙입자의 경우, 유전율은 상대적으로 매우 작은 값을 가진다. 따라서, 토양 내 수분을 다량 함유하고 있을 경우에는 흙의 유전율이 점진적으로 증가하는 경향을 보인다(김만일과 Makoto Nishigaki, 2007). 다시 말해서 토양의 유전율과 체적함수비의 상관관계로부터 유전율의 측정만으로 대상 매질의 체적함수비 계산이 가능하다는 것이다.

ADR 측정법을 이용한 토양의 유전율 측정 원리는 발신기(pulse generator)에서 발생한 고주파의 전기 펄스가 토양 내 설치된 프로브를 통과하여 토양에서 반사된다. 이 반사파는 다시 프로브로 흡수되는데 이러한 일련의 누적 과정을 통해 동축전송선(coaxial line)의 인피던스(Z)로부터 매질의 유전율을 측정한다. 측정 매질의 유전율과 체적함수비 관계의 보정곡선과 보정방정식을 이용하여 대상 매질의 체적함수비를 구할 수 있다.

ADR 측정법을 활용한 토양수분센서인 Delta-T Device사의 ThetaProbe type ML1을 사용하였으며, 본 연구에서는 이를 ADR 측정센서로 명명하여 사용하였다. 본 측정센서의 개략도는 Fig. 1과 같다. ADR 측정센서는 본체부에서 100 MHz의 고주파 발생기, 동축전송선 및 측정 전자회로를 포함하고 있으며, 센서부는 4본의 평행한 스테인레스 재질의 로드(직경 3 mm, 길이

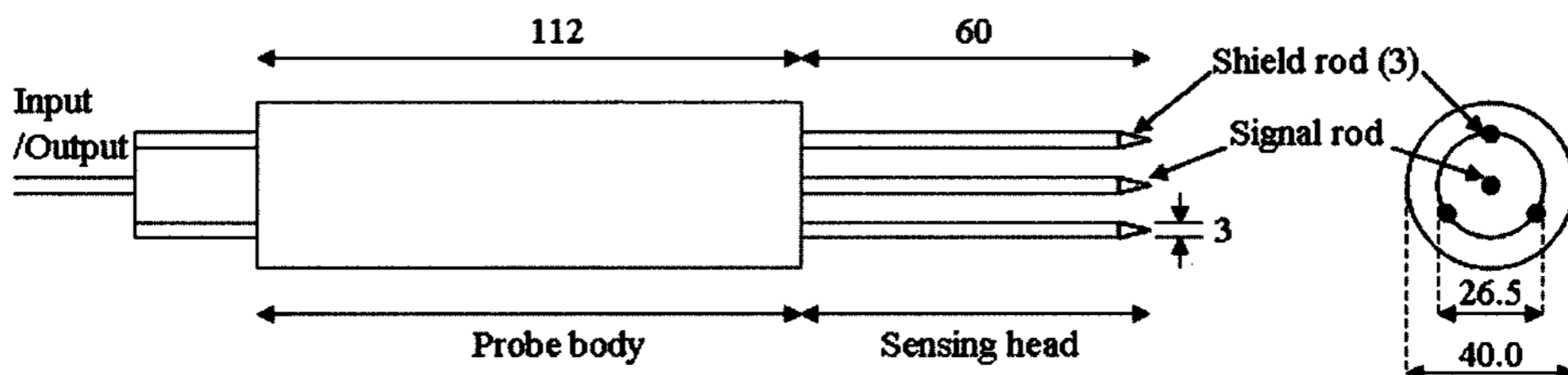


Fig. 1. Schematic diagram of ADR measurement sensor (unit: mm).

60 mm)로 구성되어 있다. 센서부의 로드는 중앙의 1본이 신호 로드(signal rod)로 작동되며, 외측의 3본은 신호 로드의 주변에서 전기장을 형성하기 위한 실드 로드(shield rod) 역할을 하도록 구성되어 있다.

이러한 4선식 로드는 TDR (time domain reflectometry) 방식의 1선식, 2선식, 3선식 프로브와 비교해 전기장의 집중이 매우 강해, 매질의 국부적인 측정지점에서 보다 정밀한 측정이 가능하다(Gaskin and Miller, 1996). Fig. 1에서와 같이 센서부는 본체부의 동축전송선의 연장부분 끝단에 위치해 실드로드의 전체구간 길이 60 mm, 폭 26.5 mm 범위 내에서 절연매질인 토양의 유전율 영향에 의해 측정매질의 인피던스(Z)를 측정하게 된다. 매질의 인피던스는 측정 센서부의 로드 길이와 토양의 유전율에 의존해 다음 식으로 나타낸다.

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (1)$$

여기서  $r_1$ 은 신호 로드의 반경이고,  $r_2$ 는 3본의 실드 로드 둘레의 반경,  $\epsilon$ 은 유전율을 의미한다.

발생기의 신호는 ADR 측정센서와 동축전송선으로 함께 전달되며, 신호로드와 동축전송선의 접속부(j)로부터 반사되어 되돌아온다. 이렇게 반사되어 되돌아온 신호의 분할을 반사계수( $\rho$ )라 한다. 반사계수 성분은 입사 신호와 충돌하여 동축전송선 상에서 정전압과, 다시 말해서 동축전송선으로 흘러들어간 전압의 진폭 변화를 발생시킨다. 동축전송선의 인피던스가  $Z_L$ , 토양 매질 내에서 센서부의 인피던스를  $Z_M$ 이라 하면,

$$\rho = \left(\frac{Z_M - Z_L}{Z_M + Z_L}\right) \quad (2)$$

식 (2)로부터  $Z_L$ 과  $\rho$ 를 이용하여  $Z_M$ 을 구할 수 있다. 또한 동축전송선으로 전송된 신호의 전달속도를  $v_p$ , 동축전송선의 길이를  $\frac{v_p}{4f}$  이라면 동축전송선의 초기 피크 전압( $v_0$ ) 및 신호 로드와 동축전송선의 접속부(j)에서 피크 전압은

$$v_0 = a(1 - \rho) \quad (3)$$

$$v_j = a(1 + \rho) \quad (4)$$

로 나타난다. 여기서,  $a$ 는 발신기 출력에 따른 전압의 진폭이다. 그리고 진폭의 차는 다음 식으로 유도된다.

$$v_j - v_0 = a(1 + \rho) - a(1 - \rho) = 2a\left(\frac{Z_M - Z_L}{Z_M + Z_L}\right) \quad (5)$$

식 (5)를 적용하여 진폭의 차를 측정함으로써 토양 내 수분의 영향을 받는 센서부의 상대적 인피던스(Z)를 평가할 수 있으며, 식 (1)로부터 토양의 유전율을 구할 수 있다. 또한 토양의 유전율 값으로부터 대상 매질의 체적함수비를 구할 수 있다. ADR 측정센서의 경우 12 volt의 정전압을 사용하기 때문에 정전압의 진폭은 토양 수분량이 클수록 작게 되는 특성을 가지고 있다.

### 시료 및 실험방법

ADR 측정센서는 측정전압을 이용하여 매질의 체적함수비를 산정할 수 있다. 즉, 일정한 12 volt 정전압을 매질로 방출시켜 반사되어 되돌아오는 전압의 용량을 측정하는 것으로, 측정전압과 흙의 체적함수비에 대한 관계를 사전에 파악하여야 한다. 이러한 작업을 측정센서의 보정(calibration)이라 하며, 보정실험 결과로써 전압과 체적함수비의 보정곡선 및 보정방정식을 유도한다. ADR 측정센서를 이용하여 매질의 체적함수비를 파악하기 위해서는 각각의 흙에 대한 보정방정식이 필요하다. 이는 보다 정확한 현장토의 체적함수비를 파악하기 위해서이다.

본 실험 연구는 국내 풍화토의 체적함수비 특성을 지역 및 지질별 현장 특성을 반영한 토질 물성치를 파악하기 위한 사전 연구 단계로써, 실내에서 주문진 표준사와 상주지역 화강풍화토를 이용하여 ADR 측정센서의 보정실험을 수행하였다. 보정실험은 흙매질의 공극률에 따른 체적함수비 의존성과 온도 의존성에 대해 실험이 수행되었다. Table 1과 Fig. 2는 실험 매질에 대한 입도 분석 결과를 나타낸 것이다.

Table 1. Soil characteristics.

	Grain size distribution (%)			Curvature coefficient (Cg)	Uniformity coefficient (Cu)	Specific gravity
	Gravel (>4.75 mm)	Sand (4.75~0.075 mm)	Silt and clay (<0.075 mm)			
Standard sand	0.00	99.99	0.01	1.0	1.5	2.62
Weathered granite soil	0.00	99.99	0.01	1.15	2.47	2.63

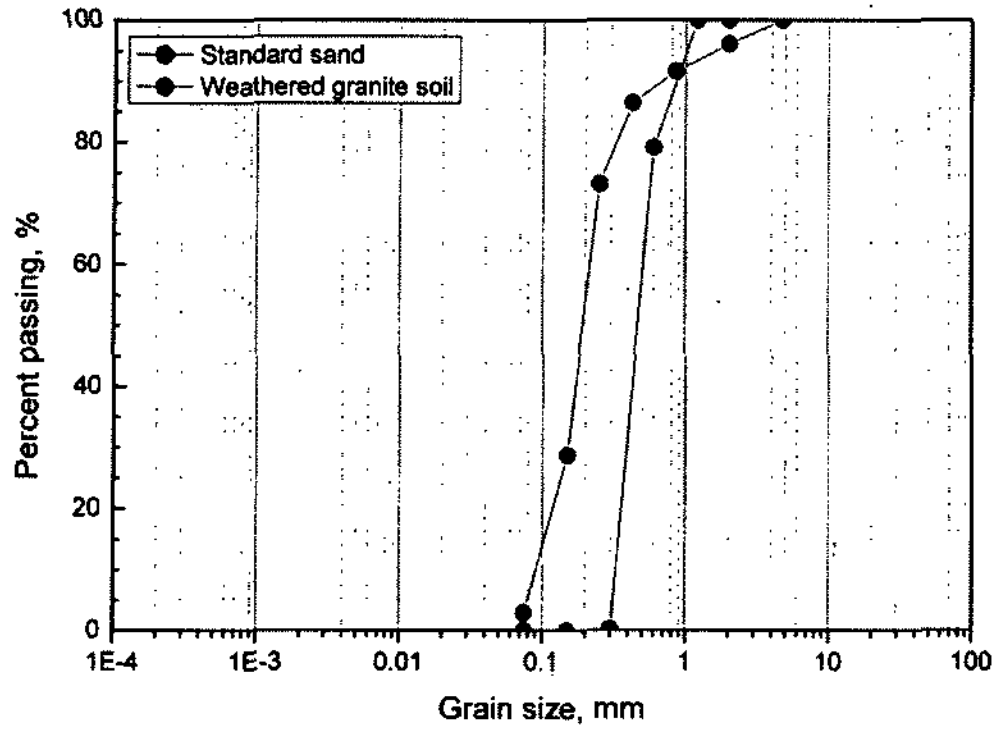


Fig. 2. Grain distribution curve for the soils.

흡시료의 의존성 보정실험을 위해, 흡시료 제작은 직경 10 cm, 높이 12 cm의 표준다짐물드를 사용하였다. 제작된 흡시료 몰드의 공극률은 흡의 비중(specific gravity), 다짐물드 체적(volume), 흡 무게(weight)의 상관관계를 이용하여 제작하였다. Fig. 3은 ADR 측정센서의 의존성 파악을 위한 실험장치 모식도를 보여준다. 실험방법은 설정 공극률 0.37, 0.40, 0.45에 대해 체적함수비 0.00에서 0.45 범위를 갖는 주문진 표준사와 화강풍화토 몰드를 대상으로 실험을 수행하였다.

결과 및 토의

체적함수비 의존성

Fig. 4와 Fig. 5는 설정된 공극률에 따른 표준사와 화강풍화토 몰드의 체적함수비 및 측정전압의 분포를 나타낸 것이다. 각 81개의 표준사 몰드와 화강풍화토 몰드에 대한 측정전압에 따른 체적함수비 및 공극률의 관계에서 정관계를 갖는 것으로 나타났다. 두 흡시료 몰드

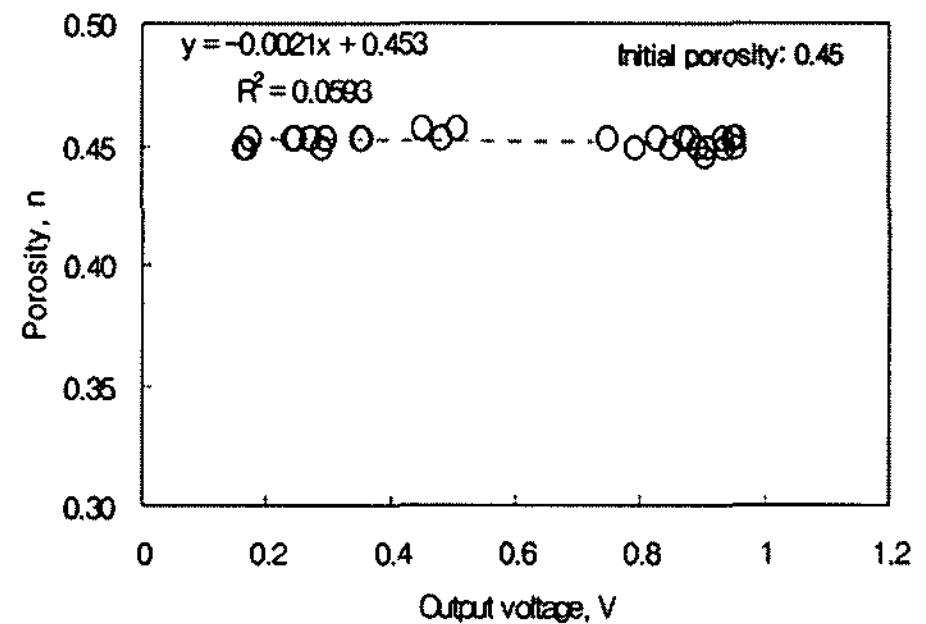
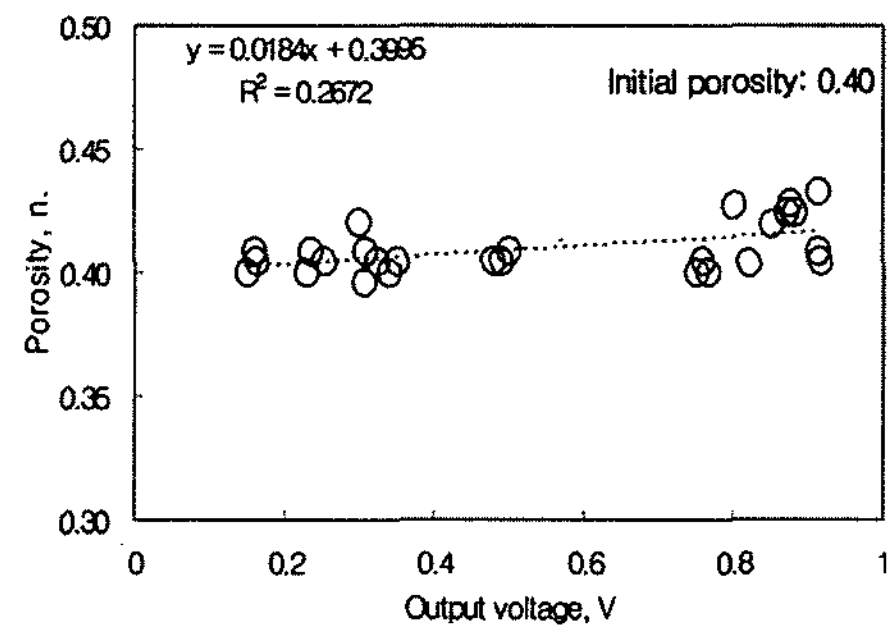
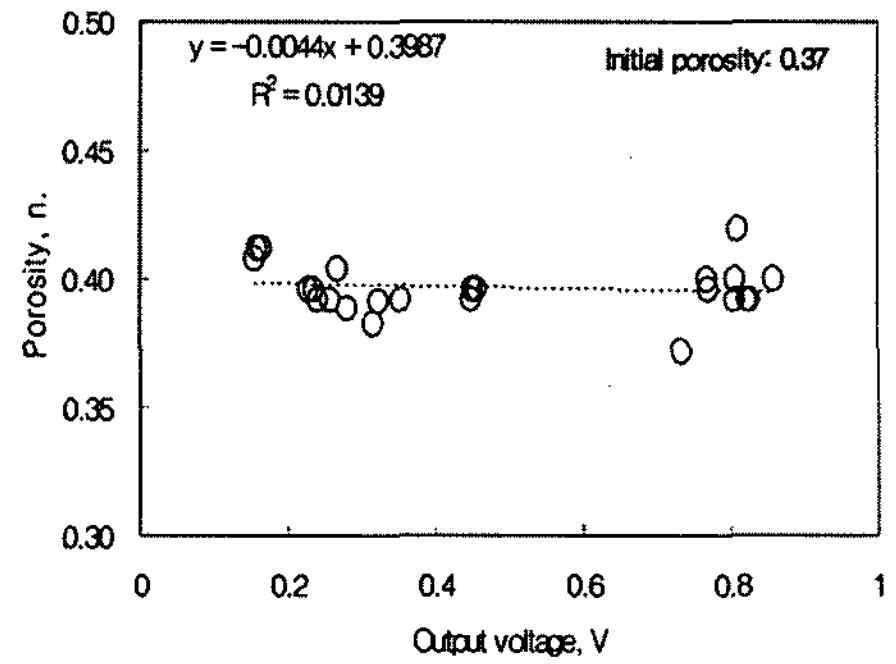
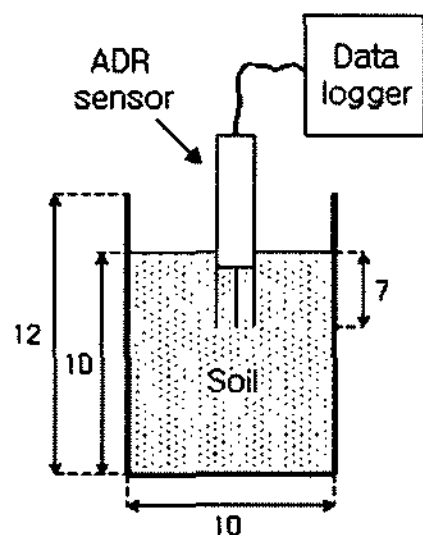
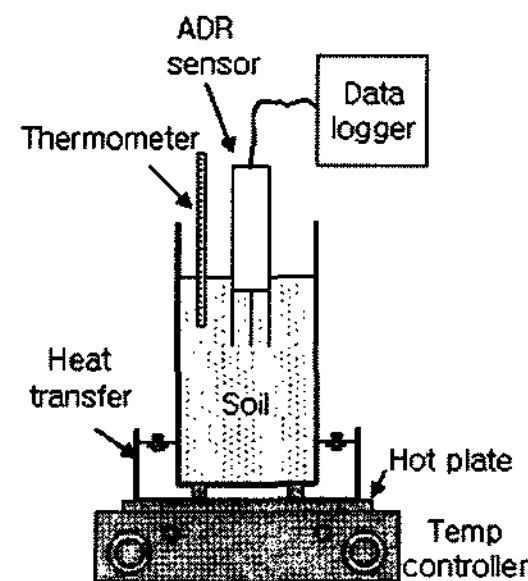


Fig. 4. Relationship between output voltage and porosity for the standard sands.



(a) Volumetric water content dependency



(b) Temperature dependency

Fig. 3. Schematic diagram of calibration experiments for the ADR sensor (unit: cm).

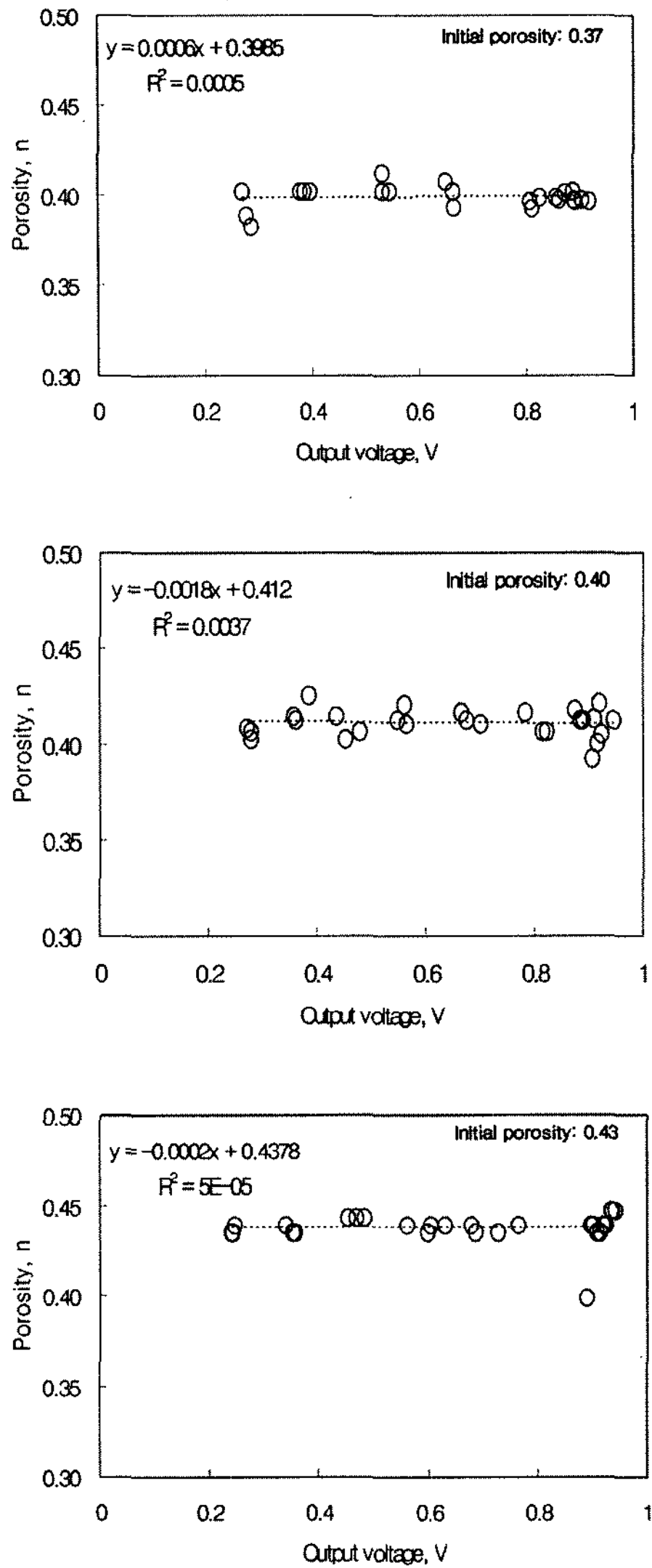
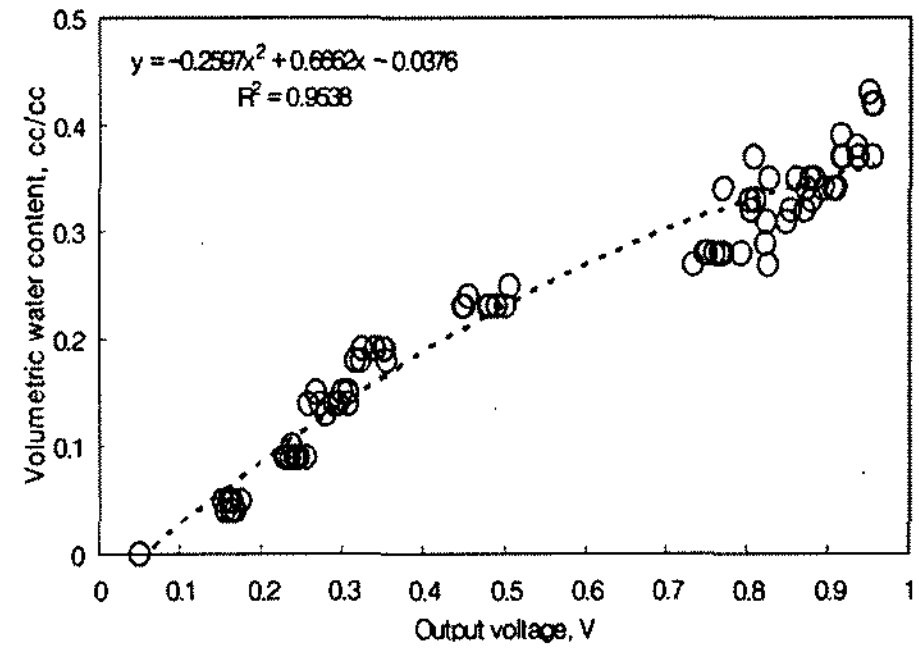


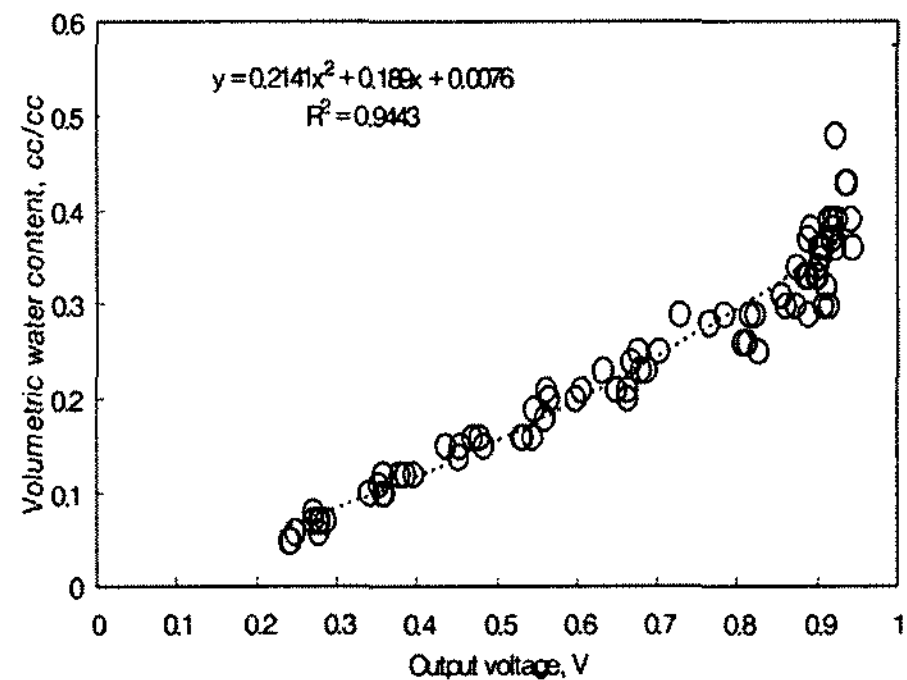
Fig. 5. Relationship between output voltage and porosity for the weathered granite soils.

의 측정결과에서와 같이 동일한 공극률을 갖는 두 흡시료에 대해 측정전압과 비교해 보면, 흡시료 몰드의 체적함수비가 증가할수록 측정전압도 함께 증가함을 알 수 있다. 이것은 매질의 수분함량이 높을수록 ADR 측정센서의 센서부에서 방출된 정전압이 흡입자에 대해 원활히 반사되어 센서부로 흡수되기 때문에 높게 측정된 것이다.

이들 결과를 공극률에 대한 체적함수비와 측정전압의 관계로 검토한 결과, Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 보정곡선과 보정방정식을 유도하였다. 유도된 보정방정식은 ADR 측정센서에서 측정된 전압을 이용하여 흡



(a) Standard sand



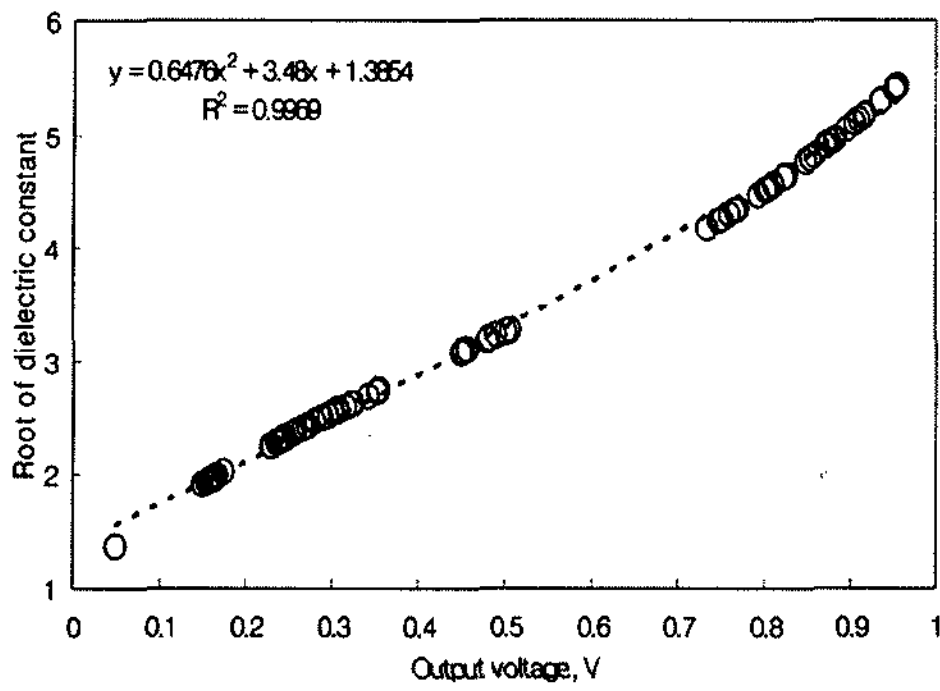
(b) Weathered granite soil

Fig. 6. Relationship between output voltage and volumetric water content.

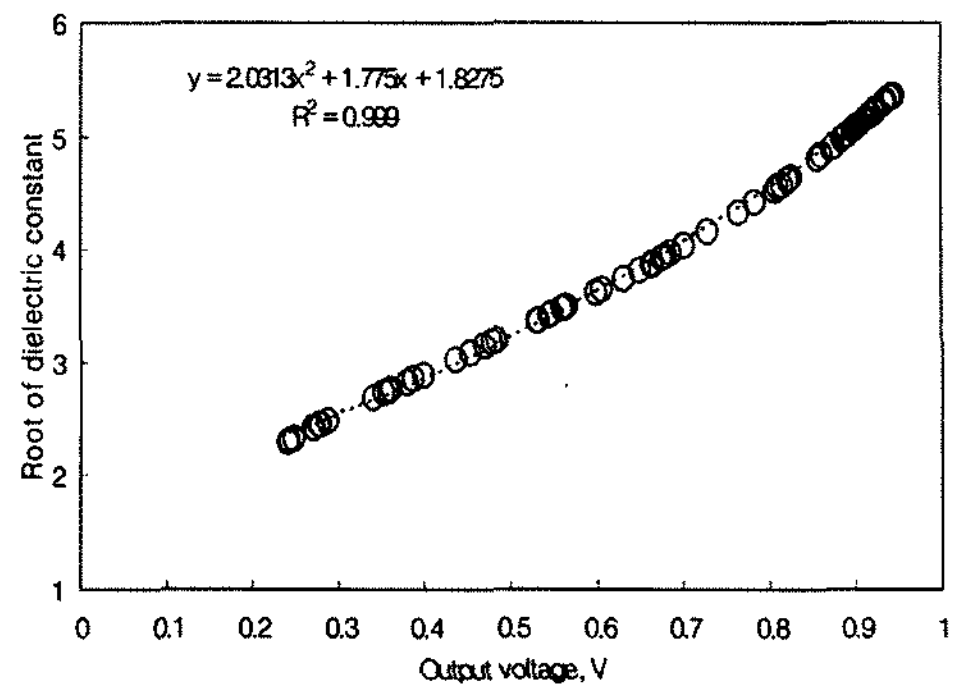
시료의 체적함수비를 효율적으로 신속하게 산정할 수 있으며, 추후 수행될 누적강우량을 고려한 모형사면 실험에서 침투수에 의한 모형사면의 체적함수비 변화를 산정하는데 적용할 수 있다.

### 온도 의존성

흙매질 내에서 체적함수비의 분포 및 수분이동 특성은 매질의 주변 온도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(김만일과 정교철, 2005). 또한 다공질매질의 유전율은 온도에 민감하게 반응하기 때문에 측정시의 주변 온도를 확인할 필요가 있다. 이에 ADR 측정센서의 경우, 매질의 유전율 특성을 응용하여 물성치를 측정하기 때문에 온도 변화에 따른 체적함수비 및 측정전압의 변화 특성을 파악하였다. 실험 온도 범위는 8°C에서 35°C 내에서 실시하였으며, ADR 측정센서는 표준사 몰드의 중앙부 7 cm 깊이에 설치하였다(Fig. 3b). 온도 의존성 실험에서는 설정 공극률을 0.40과 0.43에 대해 체적함수비 0.00에서 0.30 범위 내에서 총 13개의 표준사 몰드에

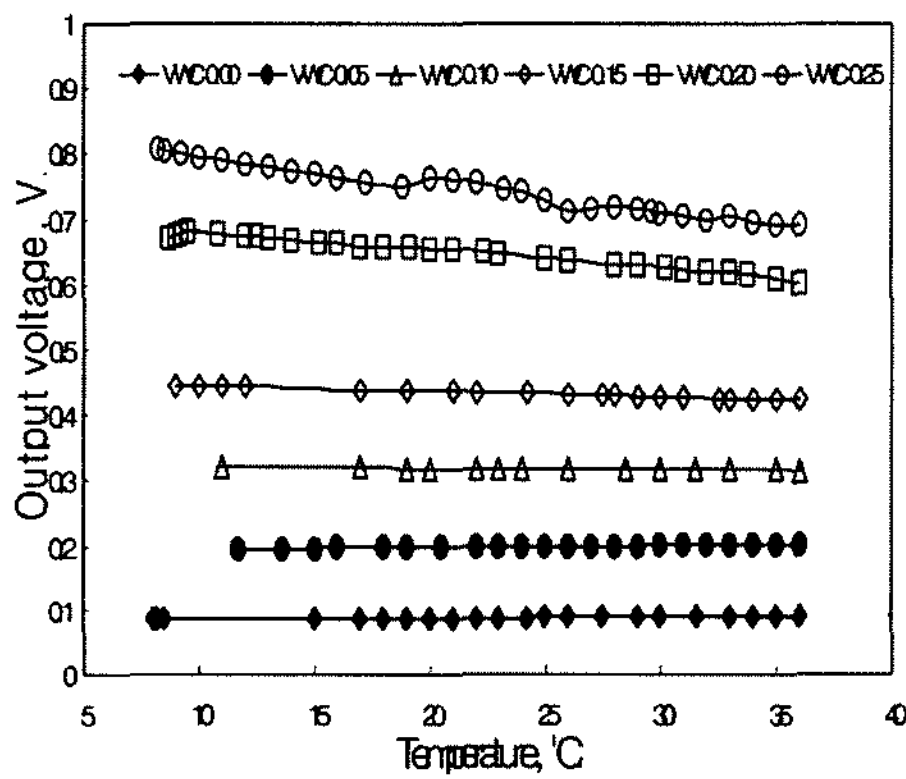


(a) Standard sand

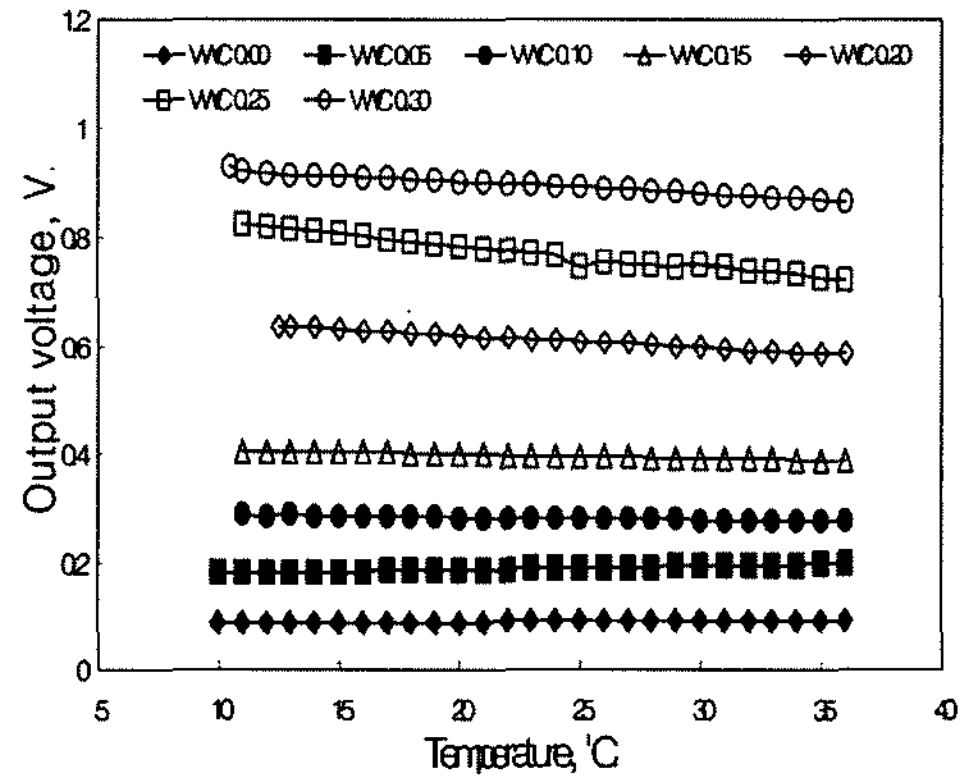


(b) Weathered granite soil

Fig. 7. Relationship between output voltage and  $\sqrt{\epsilon}$ .

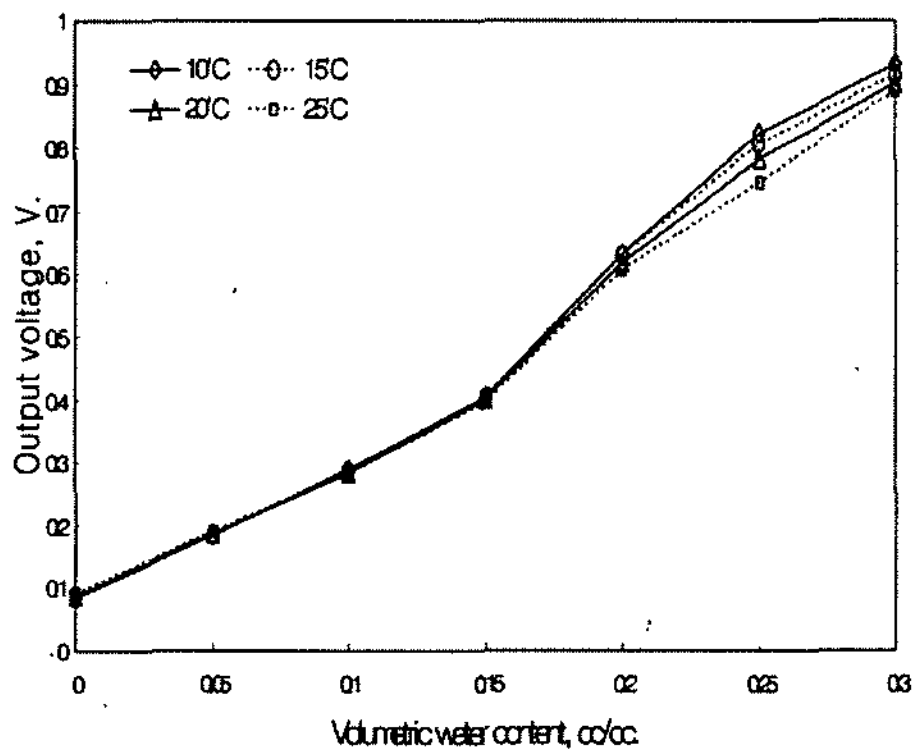


(a) Porosity 0.40

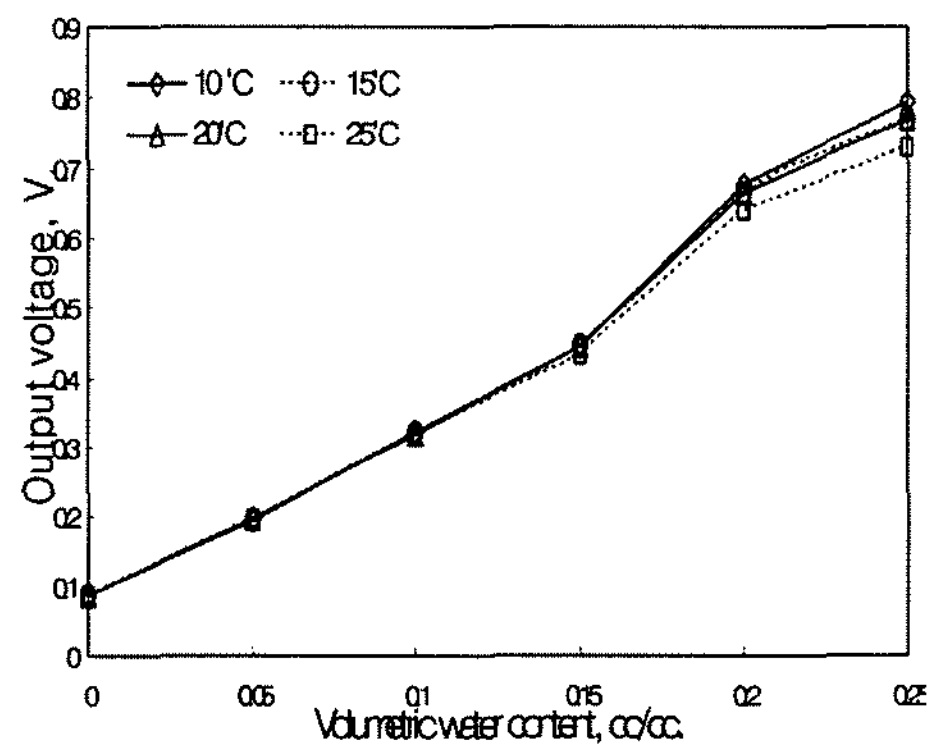


(b) Porosity 0.43

Fig. 8. Variation of temperature dependency due to volumetric water content.



(a) Porosity 0.40



(b) Porosity 0.43

Fig. 9. Relationship between volumetric water content and output voltage due to temperature.

대해 수행하였다.

Fig. 8은 각 체적함수비에 대한 온도 변화로부터 ADR 측정센서에서의 측정전압 변화를 도시한 것이다. 설정 공극률 0.40을 갖는 6개 몰드의 경우, 체적함수비가 0.15 이하에서 온도 상승에 따라 미약하게 증가하는 경향을 보였으며, 체적함수비 0.15 이상의 몰드에 대해서는 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 설정 공극률 0.43의 7개 몰드에서도 비슷한 양상을 보여주고 있다. 따라서, 이들 결과를 물의 유전율과 연결시켜 볼 때, Hasted (1973)의 연구에 의하면 온도 상승에 따라 물의 유전율은 감소하고, 반대로 물을 함유하지 않은 흙 매질의 유전율은 점진적으로 증가하는 결과와 비슷한 결과를 보였다.

표준사 시료몰드의 온도 변화에 따른 체적함수비와 측정전압과의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 체적함수비 0.15 이하에서는 온도 변화에 따라 측정전압의 분포가 선형으로 일정하게 나타났지만, 체적함수비 0.15 이상의 경우는 온도가 상승할수록 측정전압이 급격히 증가함을 보이고 있다. 이에 반해, 고수분 함양조건에서는 측정전압이 점진적으로 상승하는 결과를 보이고 있으나, 온도 변화폭은 온도가 높을수록 낮은 측정전압 값을 가지는 것으로 나타났다.

일반적으로 계절적 요인에 의해 지표면에서의 불규칙한 온도 변화를 제외하고는 풍화토와 풍화암 경계부근에서는 거의 일정한 온도를 보인다. 하지만, 국내의 풍화토 심도가 1 m 내외에 분포 특성을 고려해보면, 대기의 영향을 직간접적으로 받을 것으로 사료된다. 결과적으로 흙 매질 내 체적함수비가 점진적으로 증가할 경우, 보다 정확한 대상 매질의 체적함수비 파악을 위해서는 지반 온도에 따른 측정치의 보정이 필요할 것이다.

### 누적강우 모형사면 실험

#### 모형사면장치 및 실험방법

실내 모형사면 실험장치는 사면토조, 인공강우장치, 영향범위판으로 구성되어 있다(Fig. 10). 본 시험장치는 채병곤 등(2006)에 의해 제작된 실험장치를 보완하여 사용하였다. 사면토조의 크기는 토조 경사를 25°로 설정하였을 때, 길이 2 m, 폭 0.3 m, 높이 1.4 m이며, 상부토조, 경사토조, 하부토조의 길이는 각각 0.3 m, 1.5 m, 0.5 m이다. 그리고 토조의 깊이는 0.5 m로 실험조건에 따라 흙의 높이를 유동적으로 조절할 수 있다. 또한, 강우 특성에 따른 흙사면의 물성변화를 실시간으로 측정하기 위하여 토조 바닥부에 간극수압계(Pore water pressure, PWP)와 ADR 센서를 설치할 수 있도록 고안하였다. Fig. 10(b)와 같이 간극수압계 설치하는 하부토조 바닥부에서부터 10 cm(PWP3), 70 cm(PWP2), 130 cm(PWP1) 지점에 3개 설치하였으며, ADR 센서는 25 cm(ADR4), 70 cm(ADR3), 115 cm(ADR2) 지점의 바닥부, 그리고 상부토조 상단부의 토층면의 수직방향(ADR1)으로 설치하였다. 이들 측정센서들은 적재된 흙사면 표층에서 40 cm 깊이에 각기 설치하였다. 측정시간은 10초 간격으로 누적 강우량에 따른 흙사면내 침윤선 거동 변화를 실시간으로 계측하였다.

인공강우장치는 PVC 재질로 현장강우조건에 만족하기 위해 2단으로 길이 3.1 m, 폭 0.9 m로 설치하였다. 실험시 동일한 강우강도를 확보하기 위해 각 단을 사면 토조의 길이에 대해 수직으로 8줄로 구성하여 총 24개의 노즐을 설치하였다. 이를 통해 100 mm/hr에서 최대 700 mm/hr까지 인공강우량 조절이 가능하며, 본 시험에서는 강우/비강우조건을 통한 누적강우조건을 고

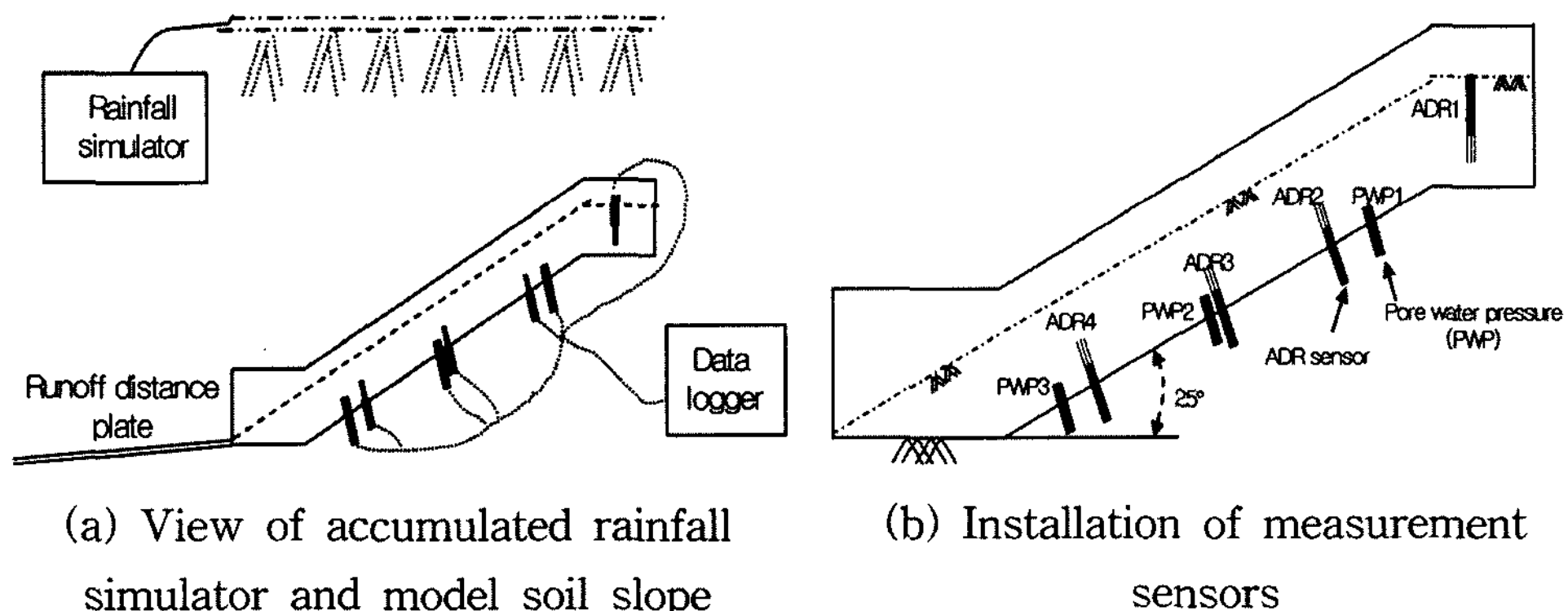


Fig. 10. Schematic diagram of soil slope model considering to rainfall/non-rainfall conditions with the accumulated rainfall.

려하여 강우량을 조절하였다. 강우시간 15분, 비강우시간 5분으로 200 mm/hr를 1단계로 설정하여 총 12단계에 걸쳐 누적강우시험을 수행하였다.

모형사면의 제작은 최대한 균질한 흙의 물성조건을 갖는 상태를 유지하기 위해 흙시료의 낙하높이에 따른 상대밀도를 실내시험으로 산정하였다(채병곤 등, 2006). 본 연구에서는 기수행된 연구 결과를 토대로 누적강우량 모형실험에서는 표준사의 낙하높이를 75 cm에서 상대밀도 35%, 건조단위중량 1.425 g/cm<sup>3</sup>의 조건을 만족하도록 표준사 모형사면을 제작하였다.

**누적강우에 의한 침투수 거동 특성**

강우/비강우조건을 만족하기 위해 총 12단계에 걸쳐 누적강우량을 고려한 실험이 수행되었으며, 12단계가 종료되는 3.97시간 이후부터는 중력배수 조건을 유지하면서 26.14시간까지 모형사면 내에서의 물성변화를 간극수압계와 ADR 센서를 통해 계측을 수행하였다. 모형사면 바닥부에 설치된 모든 측정장치에서 누적 강우조건 하에서 침투수 유입으로 인해 간극수압과 체적함수비의 변화를 명확히 파악하였다(Fig. 11과 Fig. 12). 특히 모형사면 내에서의 침윤선(wetting front) 거동은 대략 0.7 시간 범위 내에서 누적강우에 의해 점진적으로 체적함수비와 간극수압이 증가하였지만, 그 이후의 시간부터는 최대 증가 상태만을 일정하게 유지하였다. 누적 강우조건 종료후 자유중력배수 시작시점부터 이들 물성치가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 누적 강우에 의한 침투수의 거동특성을 흙매질 내에서 실시간으로 파악할 수 있으며, 이를 통해 사면의 안정성 평가에도 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

ADR 측정센서에서 10초 단위로 계측된 결과는 측정 전압값으로 측정되기 때문에 Fig. 6에서 제시된 측정전압과 체적함수비의 상관관계로부터 유도된 보정방정식을 이용하여 모형사면의 체적함수비로 변환하였다. Fig. 11에서와 같이 강우/비강우조건을 총 12 단계까지 체적함수비의 증가폭을 비교해 볼 때, 모형사면 상부에서 하부로 갈수록 체적함수비가 증가함을 알 수 있다. 이는 모형사면 하부에서 직접적으로 모형사면 내부를 통과한 침투수의 유출이 발생함으로써 ADR4 지점에서의 체적함수비가 가장 높게 나타났다. 동일한 0.36시간 내에서 ADR4가 가장 높은 체적함수비를 나타내는 것은 누적강우에 따른 유출이 발생되었기 때문이다. 이러한 유출면은 누적강우량이 증가할수록 모형사면 내에서 사면붕괴 시작지점으로 작용하는 것으로 나타났다.

Fig. 12에서와 같이 모형사면 바닥부에 설치된 3개의 간극수압계의 경우도 ADR 측정센서에서 계측된 결과와 비슷한 변화 양상을 보이고 있으며, 특히 모형사면 하부의 PWP3 계측치가 상대적으로 높은 값으로 나타났다. 이는 ADR4에서 측정된 체적함수비와 연관시켜 볼 때, 누적강우량에 의한 공극수의 과잉 공급 영향이 간극수압의 상승을 주도하는 것을 알 수 있다. 또한, PWP1과 ADR2, PWP2와 ADR3 에서 측정된 간극수압과 체적함수비의 변화 양상도 유사한 결과를 가진 것으로 나타났다.

강우/비강우 실험 시작 전의 초기 계측치, 12단계에서의 강우시 최대 계측치, 시험 종료 후 최종 계측치에 대한 변화를 Fig. 13에 도시하였다. 체적함수비의 변화가 모형사면 제작 직후 건조 상태에서 0.00을 보였으나, 누적 강우조건하에서 체적함수비가 최대 0.39(ADR4)까지 상승한 후 중력배수에 의해 0.093(ADR4)으로 감소한 것으로 나타났다. 이와 같이 누적강우조건에 의한 최대 체적함수비와 최소 체적함수비의 관계에서, 이들의 차이는 흙매질 내에서의 침투수 이동 분포를 나타내는 것으

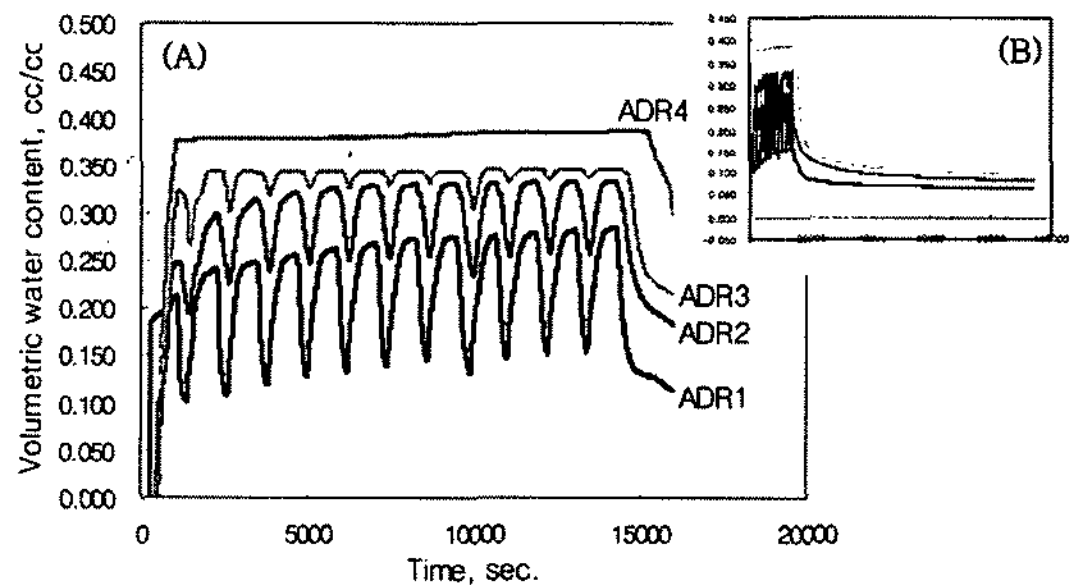


Fig. 11. Variations of volumetric water content due to the accumulated rainfall conditions; (A) period of rainfall/non-rainfall conditions and (B) the whole of experiment time.

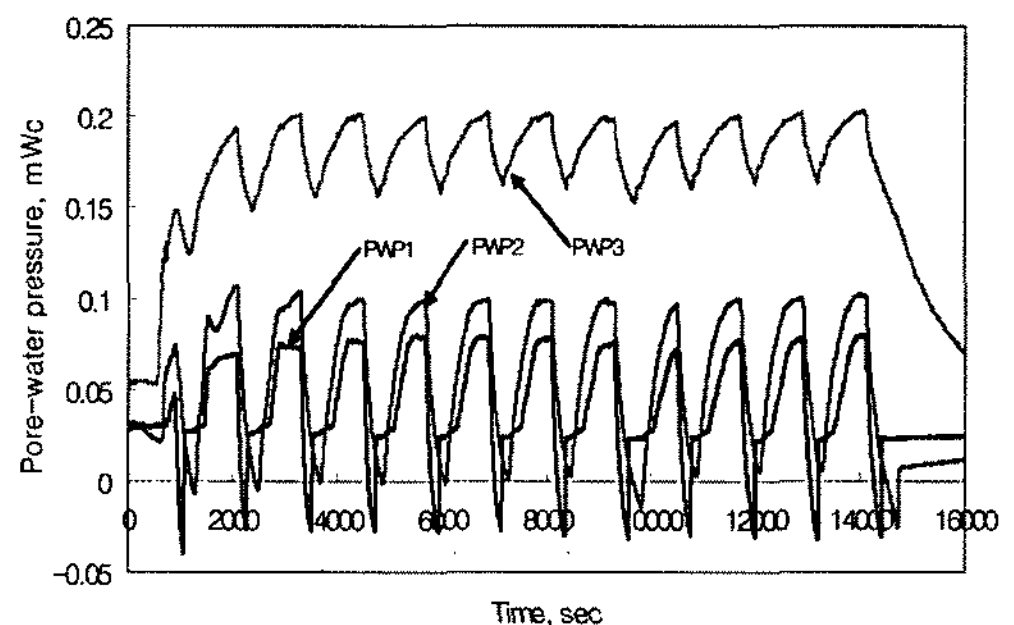


Fig. 12. Variations of pore-water pressure due to the accumulated rainfall conditions.



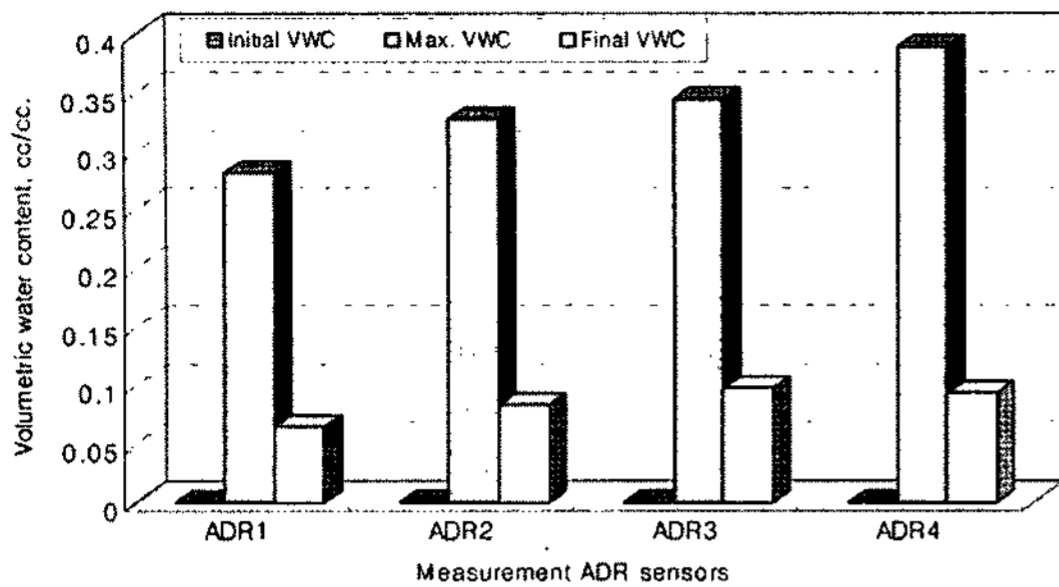


Fig. 13. Relative variations of volumetric water content for the ADR sensors.

로써 흙의 공극이 상호 연결된(open pore) 유효공극(effective pore)의 개념으로 볼 수 있다.

### 결론

본 실험연구는 산사태와 같은 토층사면파괴에 영향을 미치는 누적강우에 의한 흙매질 내 침투수 거동을 파악하기 위한 실내시험을 수행하였다. ADR 측정센서의 현장 적용성 검토를 위해 흙매질의 밀도, 체적함수비, 온도에 대한 의존성도 함께 평가하였다. 침투수 거동은 흙매질 내 체적함수비 및 간극수압 계측으로 충분히 파악할 수 있었다. 본 실험연구에서 얻은 연구결과는 다음과 같다.

ADR 측정센서의 온도 의존성 분석에서는 체적함수비 0.15 이하의 경우 온도 상승에 따라 측정전압이 증가하는 경향을 가지지만, 체적함수비 0.15 이상의 고수분 함량조건에서는 점진적으로 증가함을 파악하였다. 지반의 온도 변화를 고려해보면, 체적함수비 0.15를 기준으로 10°C에서 25°C 범위 내 측정전압의 변화가 거의 없지만, 체적함수비 0.15 이상부터 온도 상승에 따라 측정전압이 점이적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서, 측정 시점에서의 대상 매질이 갖는 온도 변화도 함께 고려할 필요가 있다. 이러한 보정 결과를 분석하여 ADR 측정센서의 측정 정확도 향상 및 향후 국내 풍화토에 적용하기 위해 측정전압과 체적함수비의 보정곡선과 보정방정식을 유도하였다.

강우/비강우 누적 조건에 따른 누적강우량의 침투 특성으로부터 표준사 모형사면 내에서 체적함수비와 간극수압의 변동 양상이 실험조건과 일치함을 알 수 있었다. 이는 강우시 발생한 침투수가 모형사면 내에서 침윤선을 형성하여 상부에서 하부로 지속적인 침투 이동을 지시한다. ADR 측정센서와 간극수압계의 설치지점에서 물성치 변화는 모형사면 하부에서 거의 동일한 시점에

서 급격히 상승됨을 파악하였다 이는 모형사면 하부가 침투수 유출면을 형성함에 따라 상대적으로 사면 상단 부보다 포화도가 높게 나타남을 의미한다. 결과적으로 유출면을 경계로 모형사면의 붕괴 시작지점으로 작용하고 있다. 또한, 간극수압과 체적함수비의 측정 결과에서 강우/비강우조건에 따른 누적강우 특성을 ADR 측정센서가 간극수압계보다 월등히 정밀한 측정치를 보여준다. 따라서, 강우시의 최대 체적함수비와 중력배수 후 최소 체적함수비의 결과를 이용하면, 매질의 유효공극 범위를 파악할 수 있다.

이상과 같은 연구결과에서 누적강우에 따른 모형사면 내에서의 물성변화는 체적함수비와 간극수압 측정으로 분석이 가능하다. 침투수의 침투 특성을 파악하기 위한 체적함수비의 측정은 실질적인 흙매질의 유효공극 및 누적강우 특성을 파악하는데 매우 효율적인 방법으로 판단된다. 또한 표준사와 화강풍화토를 이용한 ADR 측정센서의 보정 결과를 활용해 대상 매질의 보정방정식을 유도함으로써 보다 정확한 토층 매질의 물성 측정이 가능할 것이다.

### 사 사

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

### 참고 문헌

김만일, 정교철, 2005, 복소유전율상수 반응에 의한 벤토 나이트 수분분포 특성 연구, 지질공학, 15(3), 281-288.  
 김만일, Makoto Nishigaki, 2007, 불포화토 유효공극 내 추적자 침윤선 거동 특성 평가, 지질공학, 17(1), 41-47.  
 이준용, 박형동, 2004, 산사태발생의 강우에 대한 의존도, 한국지구시스템공학회지, 41(1), 77-82.  
 채병근, 송영석, 서용석, 조용찬, 김원영, 2006, 모형실험 장치를 이용한 산사태 발생 및 사태물질 거동특성 실험, 지질공학, 16(3), 275-282.  
 행정자치부국립방재연구소, 1999, 사면 위험지대 평가 방법 연구 - 경북지역 현장사례를 중심으로, NIDP-99-08, 368p.  
 Elsen, E. V. D., Xie, Y., Liu, B., Stolte, J., Wu, Y., Trouwborst, K. and Ritsema, C. J., 2003, Intensive water content and discharge measurement system in a hill slope gully in China, Catena, 54, 93-115.  
 Gaskin, G. J. and Miller, J. D., 1996, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, Journal of Agricultural Engineering Research, 63(2), 153-159.

- Hasted, J. B., 1973, Aqueous dielectrics, Chapman and Hall, 302p.
- Kim, J. H., Jeong, S. S., Park, S. W. and Sharma, J., 2004, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils, Engineering Geology, 55, 251-262.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A., 2001, Soils and waves, Wiley, New York, 488p.

---

2008년 2월 14일 원고접수, 2008년 3월 15일 게재승인

#### 김만일

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3117  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

#### 채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3052  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: bgchae@kigam.re.kr

#### 조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3059  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: choych@kigam.re.kr

#### 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr