

## 불포화토 유효공극 내 추적자 침윤선 거동 특성 평가

김만일<sup>1\*</sup> · Makoto Nishigaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

<sup>2</sup>Okayama대학 토목공학과

### Infiltration Characteristics of Tracer Wetting Front through Effective Pores of Unsaturated Soil

Man-Il Kim<sup>1\*</sup> and Makoto Nishigaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological & Environmental Hazards Division, KIGAM

<sup>2</sup>Dept. of Civil Engineering, Okayama University, Okayama, Japan

강우에 의한 지질 매질 내에서의 침투수 거동 및 함수비 특성은 매질이 가지는 고유 유전을 반응 특성으로부터 파악할 수 있다. 침투수에 의한 침윤선은 매질의 유효공극을 통해 중력방향으로 불투수층 상단부까지 침투가 진행되면서 최종적으로 사면 변위를 발생시킨다. 본 연구는 침윤선 거동 특성을 파악하기 위해 물의 비중과 동일하게 제작된 에탄올 혼합 추적자를 이용하여 연직침투시험을 수행하였다. 이를 위해 유전율혼합모델과 추적자모델을 제안하였으며, 이들 모델을 적용하여 침윤선의 거동을 지배하는 매질의 유효공극률을 산정하였다. 유효공극률은 매질의 공극을 통해 추적자의 침투 특성을 나타내는 침윤선 및 체적함수비의 변화를 실시간 유전을 변화 양상으로부터 파악하였다. 유전을 측정법을 적용해 강우에 의해 발생하는 침투수 거동에 의한 침윤선 및 체적함수비 변화로부터 사면의 안정성 평가를 위한 실시간 모니터링 기법으로의 활용에 있어 유용할 것으로 판단된다.

**주요어** : 산사태, 강우, 침윤선, 에탄올혼합 추적자, 유효공극률

Geotechnical phenomena such as landslide, groundwater recharge and groundwater fluctuation due to rainfall can be explain to use a dielectric response and infiltration variation by the movement of a wetting front in the subsurface. The infiltration of a wetting front is infiltrating to the connected pores which are distributed in unsaturated soil. In this study we carried out to laboratory experiment of a vertical infiltration column test using ethanol mixing tracer which has same the specific gravity of water. All physical values are detected to use a variation of dielectric constant and calculated to use a dielectric mixing model and tracer test model. This dielectric method measured by each dielectric constant of geological soil porous materials should be offer the geotechnical information and useful a field monitoring technique for detecting the variations of the volumetric water content and the wetting front, which are insignificant the key parameter to understanding the landslide by rainfall.

**Key words** : landslide, rainfall, wetting front, ethanol mixing tracer, effective porosity

## 서론

강우에 의한 사면붕괴 및 지하수 함양, 지하수위 변동에 기인한 지반침하, 표토층을 통한 지반환경오염 등과 같이 다양한 지반조사 등에 있어 유전을 측정법의 적용성은 매우 광범위할 것이다(황영철 등, 2005;

Anderson and Sitar, 1995; Rahardjo *et al.*, 1998). 특히 유전율의 반응은 물의 유전율상수에 의해 좌우되기 때문에 지반을 대상으로 강우로 인한 침투수의 거동 및 지반의 체적함수비 분포 특성을 분석하는데 있어 지반 공학적으로 정량적인 물성치를 제공해 줄 것이다(김만일 등, 2005; Uchida *et al.*, 2003; Santamarina *et*

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

al., 2001). 또한 국내의 지형학적 여건상 하절기 집중호우 등에 의해 발생하는 산사태의 경우, 풍화된 표층부에서 침투수에 의한 체적함수비의 증가로 인한 사면의 전단저항력이 저하되어 중력방향으로 산사태가 주로 발생된다(Sun *et al.*, 1998). 이승래 등(2006)에 의하면 강우에 의한 침투수의 거동은 사면 내에서 함수비 및 간극수압의 변화를 쉽게 발생시켜 사면 안정성에 문제를 야기시키는 결과를 초래하게 됨으로써 이러한 물성치 측정의 중요성을 강조하였다.

이는 대상 사면의 수리지질학적 특성을 충분히 고려하여 사면의 안정성을 검토하여야 하지만 일반적으로 사면 파괴 예측에 있어 통계적 내지 수치적 접근 방법을 이용하고 있는 실정이다. 이를 보완하기 위하여 현장에서 측정한 실측 자료와 대상 지역의 누적 강우량과 강우강도 등과 같은 기상자료를 이용하여 직·간접적인 측면에서의 사면 파괴 관련 연구들이 이루어지고 있다(Rahardjo *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2004; Elsen *et al.*, 2003). 특히 Tada (1965)의 연구에 따르면 칸토 롬(kanto loam)을 이용하여 다양한 함수비 조건하에서 공극률과 투수계수의 상관관계를 평가한 결과에서 함수비와 공극률은 비례 관계를, 함수비와 투수계수는 반비례 관계를 갖는 것으로 나타났다. 결과적으로 함수비의 분포 특성은 공극의 크기 뿐만 아니라 공극률이 투수계수를 결정하는 중요한 물성치임을 의미하는 것이다.

이와 같이 강우에 의한 침윤선(wetting front) 거동 특성은 토층 내 지하학적 공극 분포에 크게 영향을 받으며, 공극의 분포 및 이들의 연결성을 공간적 변수인 공극률과 유효공극률 등과 같이 비교해야만 할 것이다. 토층 내에서 침윤선의 거동은 체적함수비 증감을 주도할 뿐만 아니라, 이들은 토층의 공극률과 유효공극률에 의해 분포 범위가 좌우된다. 따라서 토층의 체적함수비 분포에 대한 지속적인 측정과 효과적인 관리가 우선적으로 이루어지기 위해서는 유전율 반응을 이용한 지반 매질의 물성치 산정 기법이 요구되며, 계속 결과로부터 토층에 대한 지속적인 모니터링 기법을 이용한 측정 분석이 필요하다.

본 연구에서는 불포화 조립토의 유전율 반응을 측정할 수 있는 유전율 측정장치와 측정프로그램을 이용하여 연직침투시험을 실내에서 수행하였다. 연직침투시험에서는 불포화 조립토 내부에서의 유전율 반응을 측정하기 위하여 추적자를 이용해 조립토 칼럼 깊이에 따른 유전율 변화를 실시간으로 파악하고, 흙에서의 추적자 유속을 측정하여 대상 매질의 유효공극률을 산정하였다. 또

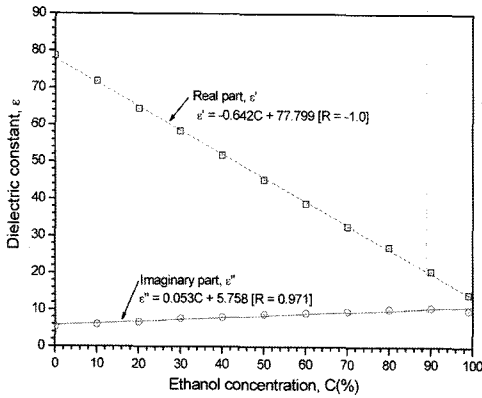
한 시험조건 상에서의 유전율 반응으로부터 추적자의 침윤선 거동을 파악하여 측정프로그램 설치지점에서 이들의 측정 범위도 함께 검토하였다.

## 시험 방법

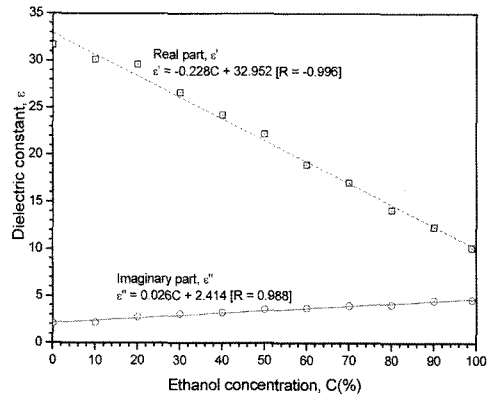
### 에탄올혼합 추적자

99%의 농도를 갖는 에탄올(ethanol) 용액을 이용하여 흙 내부에서의 유전율 반응을 측정하기 위해 추적자로서의 대응성을 검토하였다. 사용된 에탄올의 비중은  $0.789 \text{ g/cm}^3$ 로써 물의 비중 보다는 가볍기 때문에 에탄올이 물과 혼합되었을 경우 이들과 혼합되지 않은 상태로 일정 부분 분리된 상태로 존재할 것이다. 따라서 에탄올과 물이 동일한 비중을 갖고 있어야만 추적자로서의 활용도가 높아지기 때문에 사카로스(sucrose,  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ )를 에탄올에 첨가하여 에탄올의 비중을 물과 동일한 비중을 갖도록 조절하였다. 이를 위하여 사카로스와 물의 혼합 비율을 50:50으로 혼합하여 물의 비중과 동일한 조건이 되도록 에탄올의 농도를 40%로 제작하였다. Fig. 1은 99% 농도를 갖는 에탄올에 대해 물과 희석된 에탄올 농도 변화와 조립토에서의 농도 변화에 따른 복소유전율상수(complex dielectric constant) 중 실수부 유전율상수(dielectric constant of real part)와 허수부 유전율상수(dielectric constant of imaginary part)의 유전율 반응을 나타낸 것이다.

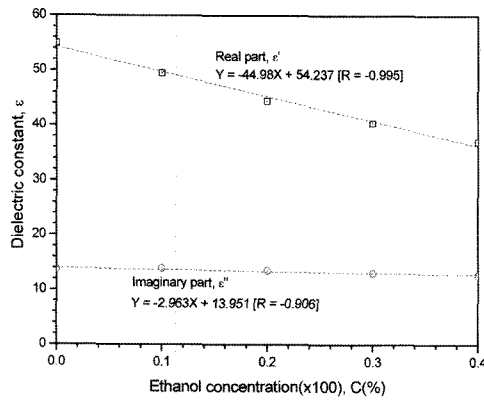
에탄올 농도의 조절은 10% 농도 간격으로 총 10개의 시료에 대해 에탄올 농도 영역으로 구분하였다. 에탄올 농도에 따라 제작된 에탄올혼합 추적자(ethanol mixing tracer)를 대상으로 하여 에탄올 + 물, 에탄올 + 물 + 조립토, 에탄올 + 물 + 사카로스에 대해 각각의 유전율상수를 측정하였다. Fig. 1의 측정 결과에서와 같이 물 + 에탄올 혼합용액이 가장 높은 유전율상수를 보였으며, 에탄올 + 물 + 조립토의 유전율이 가장 낮은 값을 보이고 있다. 이들에 대해 에탄올 농도 0%에서 40% 범위 내에서 제작된 에탄올혼합 추적자에 대한 유전율 반응을 비교해 볼 때, 에탄올의 농도가 증가할수록 유전율 측정치가 모두 감소함을 확인하였다. 이러한 결과는 매질의 고유 유전율상수가 가장 큰 값을 갖는 물의 함량이 많을수록 유전율이 증가하나, 이와 반대로 고유 유전율상수가 낮은 물질의 함량이 높을수록 유전율은 감소하는 경향을 보이기 때문이다. 본 연구에서 측정된 물과 에탄올의 유전율상수는  $20^\circ\text{C}$  온도하에서 80과 15로 측정되었다. 또한 조립토의 유전율상수는 3으로 측정되었다. 따라서 이



(a) Ethanol & water



(b) Ethanol & Water & Soil



(c) Ethanol & Water & Sucrose

Fig. 1. Responses of dielectric constant due to variation of ethanol concentrations.

들 매질의 유전율상수 차이로부터 두 매질의 혼합 비율에 의존하여 혼합 매질의 유전율상수의 측정 범위가 결정된다.

**연직침투시험장치**

본 시험장치는 가로 20cm, 세로 10cm, 높이 60cm 가 되도록 아크릴로 제작된 정사각형 형태의 칼럼으로 제작하였으며, 칼럼 상단부, 하단부, 측면에 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer (FDR-V)에 연결된 5cm 길이의 측정프로브를 설치 고정할 수 있도록 하였다(Fig. 2). 또한 아크릴 칼럼의 상단부와 하단부에 주입/배수 밸브를 설치하여 불포화 조립토 내부에서 난류(turbulent flow)가 발생되지 않고 층류(laminar flow) 상태로 추적자의 원활한 침투과정이 이루어지도록 고안하였으며, 칼럼 좌측부에 10 cm 간격으

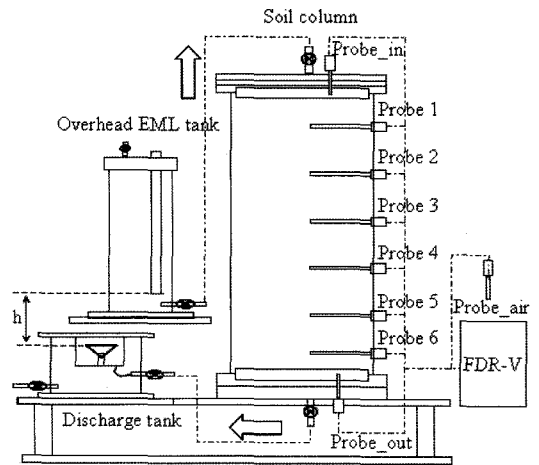


Fig. 2. Setup of vertical infiltration test with FDR-V system.

로 조립토 내에서의 추적자 침투 거동을 측정하기 위하여 7 cm 길이의 측정프로브 설치기 가능하도록 측면에 수평방향으로 6개(Probe 1~Probe 6)의 측정프로브 설치부를 제작하였다. 또한 추적자시험시 추적자의 농도 변화를 측정하기 위하여 칼럼 상단부와 하단부에 측정프로브를 2개(Probe\_in, Probe\_out) 추가로 설치하여 시험을 수행하였다.

불포화 조립토의 유전율상수 변화를 실시간으로 파악하기 위하여 측정프로브의 측정간격은 10초로 설정하였으며, 측정순서는 칼럼 상단부의 Probe\_in 측정프로브에서 시작하여 Probe\_air 측정프로브 순서로 이루어지도록 설정하였다. 즉, 칼럼 상단부에서 에탄올혼합 추적자가 주입되는 방향과 동일한 방향으로 매질의 유전율상수가 측정되도록 한 것이다. 본 시험장치에서 공기의 유전율상수를 측정하도록 한 Probe\_air 측정프로브의 측정치는 시험 결과 분석에서는 제외시켰다. 이는 FDR-V 측정장치의 특성상 측정프로브에서 지속적으로 고주파수의 전자파(1~18GHz)가 방출되기 때문에 측정프로브 선단 측정부에서의 추적자의 흡착을 방지하기 위함이다.

시험방법은 아크릴 칼럼 내 공극률 0.38로 제작된 불포화토에 10 cm 간격으로 측정프로브를 설치한 후, 칼럼 상단부로부터 에탄올 혼합 추적자를 동수경사 0.7의 구배로 주입시켜 불포화토 내부에서의 추적자에 의한 유전율 물성치 변화를 실시간으로 계속하였다.

## 추적자 침투특성

### 유전율혼합모델

지반 매질을 이루고 있는 토층의 기본 구조는 흡입자, 공극 내 분포하는 수분과 공기를 가지고 있다. 이를 일정한 체적을 갖는 형태로 보았을 때 흡입자의 체적은 변하지 않고 공극의 체적만이 변할 경우, 이를 흙의 압밀과 연관지어 볼 수 있다. 즉, 공극의 체적이 감소함을 의미하는 것으로 이는 흙의 공극률과 유효공극률의 감소와 밀접한 연관성을 가진다. 또한 침투수 침투 경로 내지 체적함수비의 함양이 감소함을 의미한다. 다시 말해 공극의 역할은 수분을 함유하여 공극 내 체적함수비 상태로 존재하거나 강우에 의해 발생한 침투수가 매질의 공극을 따라 침투할 수 있는 통로의 역할을 수행한다. 또한 지반 내지 지하수 오염을 발생시키는 오염 물질의 침투 경로가 되기도 한다. 실질적으로 지반을 이루고 있는 매질 내에서 침투수 등과 같은 물질 이동 및 이들을 함유할 수 있는 능력을 가진 물성치는 매질의

공극률 내지 유효공극률의 개념으로 정리된다. 특히 유효공극률은 매질에 분포해 있는 공극들이 상호 연결되어 있으므로 물질을 통과시키는 수로 역할을 담당하고 있다.

지반 매질이 가지는 고유의 유전율 특성을 이용해 이들을 유전율 구조로 수식화하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_s(1-n) + \varepsilon_w \cdot n \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ep} = \varepsilon_s(1-n) + \varepsilon_w(n-n_e) + \varepsilon_{EML} \cdot n_e \quad (2)$$

여기서,  $n$ : 공극률,  $n_e$ : 유효공극률,  $\varepsilon_p$ : 초기 유전율상수,  $\varepsilon_{ep}$ : 최종 유전율상수,  $\varepsilon_s$ : 흙의 유전율상수,  $\varepsilon_w$ : 물의 유전율상수,  $\varepsilon_{EML}$ : 에탄올혼합 추적자의 유전율상수를 나타낸다.

### 추적자모델

연직침투 추적자시험 모델은 정수위 투수시험법과 동일한 측정법을 응용하여 에탄올혼합 추적자가 들어있는 주입탱크로부터 유출된 추적자가 아크릴칼럼 상단부로 유입되어 조립토를 통과한 후 유출탱크로 서서히 흘러들도록 설치하였다. 이때 아크릴 칼럼 상단부와 하단부에 설치된 측정프로브로부터 에탄올혼합 추적자의 유입과 유출시의 추적자의 농도를 유전율상수 변화로 확인될 수 있도록 칼럼 상단부와 하단부에 측정프로브를 별도로 설치하였다. 유입/유출되는 추적자의 유전율상수 변화로부터 이들의 농도이력곡선(breakthrough curve)을 측정시간과 추적자의 농도비( $C/C_0$ )의 관계로부터 속도를 계산하였다. 조립토 내에서의 추적자 실유속(real velocity,  $v_R$ )과 Darcy 유속(Darcy velocity,  $v_D$ )으로 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$v_R = \frac{L}{t_0} \quad (3)$$

$$v_D = \frac{Q}{A \cdot t} \quad (4)$$

여기서,  $v_R$ : 실유속,  $v_D$ : Darcy 유속,  $L$ : 칼럼의 길이,  $t_0$ : 추적자 농도비 ( $C/C_0$ )의 50%에 해당하는 경과 시간,  $A$ : 칼럼의 단면적,  $t$ : 측정시간,  $Q$ : 실유출량을 나타낸다. 실제로 조립토 매질의 유효공극을 통하여 에탄올혼합 추적자가 침투 이동하기 때문에 Darcy 유속보다는 실유속이 더 빠르게 나타난다. 위 식을 이용하여 유효공극률 산정식으로 변환시키면 다음과 같다.

$$v_R \cdot n_e = v_D \Rightarrow n_e = \frac{v_D}{v_R} \quad (5)$$

즉, 조립토 내에서의 유효공극률은 추적자의 침투 속도와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이를 실유속과 Darcy 유속의 관계로부터 유도할 수 있다.

### 결과 및 토의

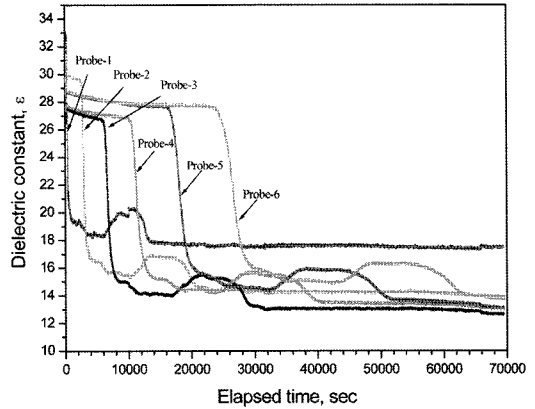
아크릴 칼럼 내 불포화 조립토의 유효공극률을 측정하기 위해 각 매질에 대한 유전을 특성을 이용한 유전율혼합모델과 추적자모델을 이용하여 각각의 유도된 산정식을 적용해 물성치를 계산하였다. 먼저 유전율법을 적용한 시험 결과에서는 아크릴 칼럼 측면에 설치된 각각의 측정프로브로부터 양호한 측정 결과를 획득하였다. 유전을 측정에 있어 시험 온도가 매우 중요한 변수로 작용하기 때문에 20°C로 일정한 조건하에서 시험을 수행하였으며, 보다 정확한 시험결과를 도출하기 위해 측정된 값에 대해서 온도 보정을 수행하였다. 각 측정프로브에서의 에탄올혼합 추적자 유전을 측정치, 조립토의 공극률과 유효공극률 등의 결과값을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4는 연직침투시험 과정 중 측정된 조립토의 각 지점에서 유전을 변화를 보여준다. 또한 Fig. 5는 에탄올혼합 추적자가 조립토 칼럼을 통과 전과 후의 추적자 농도 변화를 도시한 것이다. 여기서 칼럼 상단부에 근접해 설치된 측정프로브에서 측정되어진 유전율상수 변화는 칼럼 하단부로 내려갈수록 유전율상수의 변화폭이 점진적으로 느려지는 것을 확인하였다. 이러한 추적자의 지연 현상은 조립토를 압밀 제작할 때 칼럼 상단부보다는 하단부에서 조립토의 압밀이 더 진행되었기 때문에 조립토의 공극이 상단부보다는 하단부가 더 작아졌기 때문이다. 이와 같이 공극의 밀도가 작아질수록 추적자의 침투 속도가 느려지기 때문에 본 시험결과

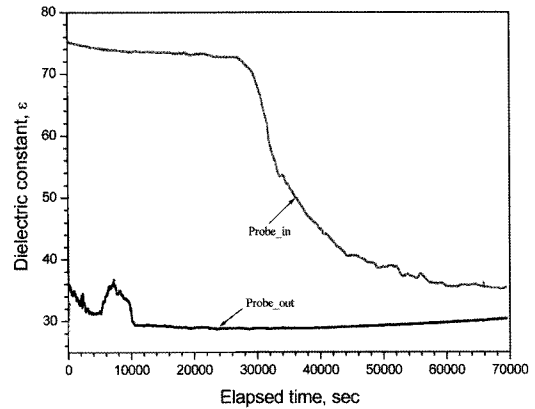
**Table 1.** Property of dielectric constant measured on vertical infiltration test.

Probe No.	$\epsilon_p$	$\epsilon_{ep}$	$n^{\S}$	$n_e^{\S}$
Probe 1	32.88	17.69	0.410	0.320
Probe 2	29.96	14.31	0.371	0.330
Probe 3	27.52	13.08	0.338	0.305
Probe 4	27.70	13.44	0.341	0.301
Probe 5	28.74	13.58	0.354	0.320
Probe 6	28.81	13.95	0.355	0.313
Average	29.27	14.34	0.362	0.315

Remark:  $\epsilon_p$ (initial dielectric constant),  $\epsilon_{ep}$ (final dielectric constant),  $n$ (porosity),  $n_e$ (effective porosity),  $\S$ (calculated values using dielectric mixing models)



**Fig. 3.** Variations of dielectric constant of real part at each measurement probe.



**Fig. 4.** Variations of dielectric constant of real part at probe\_in and probe\_out due to ethanol mixing tracer.

에서와 같이 칼럼 하단부로 갈수록 추적자의 계속 시간이 지연된 것으로 판단된다. 또한 추적자 농도의 관계에서 물성치 측정은 Fig. 5에서와 같이 농도이력곡선을 이용하여 유효공극률을 산정하였다. 그 결과 추적자시험에서 얻어진 유효공극률은 0.309로써 공극률과 비교해 약 0.81 가량으로 나타났다. 여기서 추적자시험을 통해 계산된 유효공극률은 칼럼 전 체적에 대한 평균값을 대표함으로써 유전율혼합모델을 적용해 유전율상수 반응 특성으로부터 계산된 각 측정프로브에서의 물성치 산정값은 측정 지점별 유효공극률 값을 의미하므로 칼럼의 전 체적에 대한 물성치로 평가하기에는 다소 무리가 있다. 하지만 이들을 칼럼 전 체적에 대한 평균값으로 고려해 보면, 추적자시험의 결과와 비교해 약 2% 범위 내에 분포함을 알 수 있다.

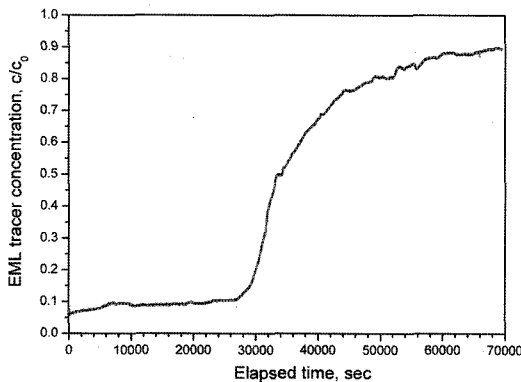


Fig. 5. Breakthrough curve of ethanol mixing tracer from dielectric response.

## 결 론

연직침투시험에서는 물과 비중이 동일하게 제작한 에탄올혼합 추적자를 이용하여 이들의 농도이력곡선을 유도함으로써 조립토의 유효공극률을 유전율혼합모델과 비교하여 산정하였다. 시험 결과에서와 같이 본 연구에서 제안한 유전율혼합모델에 적용하여 계산된 불포화 조립토의 평균 공극률과 평균 유효공극률은 0.362와 0.315로 계산되었다. 초기 불포화 조립토 칼럼을 제작할 때 고려된 초기 공극률 0.38과 비교해 약 4.7% 가량 작게 산정되었다. 이는 유전율상수 변화로부터 측정된 공극률의 경우, 불포화토 칼럼 전체의 공극률을 대표하는 것이 아니라 측정프로브가 위치해 있는 지점에서의 공극률을 나타내는 것이기 때문이다. 즉, 불포화토 칼럼 제작 시 설정된 공극률로 제작하기 위하여 수차례에 걸쳐 압밀 제작하는 과정을 수행하기 때문에 칼럼 상단보다는 하단의 공극이 감소하여 압밀되는 경향을 보인 것으로 판단된다. 불포화 조립토의 유효공극률의 경우, 에탄올혼합 추적자의 농도변화로부터 계산된 값은 0.309로써 이는 유전율 반응에 의해 계산된 것과 비교해 약 1.9% 범위 내 분포한다. 이상과 같이 조립토 내에서 추적자의 침투 과정 중에 측정되는 유전율상수의 반응으로부터 산정된 매질의 공극률과 유효공극률의 측정 가능성이 매우 우수한 것으로 판단된다. 또한 추적자의 침윤선 거동을 측정프로브에서 실시간으로 측정이 가능함을 확인하였다.

지반을 이루고 있는 불포화 토층을 대상으로 하는 지반조사 등에 유전율 측정법의 응용을 통해 다양한 지반 물성치를 정량적으로 측정할 수 있을 것으로 생각된다.

특히 유전율의 반응은 물의 유전율상수에 의해 좌우되기 때문에 강우 등에 의해 발생하는 침투수의 거동 및 지반의 체적함수비 분포 특성을 분석하는데 있어 중요한 지반 정보를 제공해 줄 것으로 판단된다. 또한 국내의 지형학적 여건상 하절기 집중호우 등에 의해 발생하는 산사태의 경우, 대부분이 풍화된 표층부에서 침투수에 의한 체적함수비의 증가로 사면의 전단저항력이 저하되어 중력방향으로 산사태가 발생하는 것으로 보고되어 있다. 이와 같이 토층 내 체적함수비 분포에 대한 지속적인 예측과 효과적인 관리가 우선적으로 이루어지기 위해서는 이러한 유전율 측정방법을 적용함으로써 효율적으로 수리지질학적 물성치의 정보 수집 및 모니터링에 있어 다양한 현장조건에 따라 유연하게 적용이 가능할 것으로 판단한다.

## 사 사

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

## 참 고 문 헌

- 김만일, 채병근, 정교철, 2005, 흙사면 절개지 불포화토의 침투거동 특성에 관한 연구, 지질공학, 제 15권, 제 4호, pp.487-494.
- 이승래, 김윤기, 최정찬, 오진규, 2006, 강우침투에 따른 도로성토사면의 불포화 특성 변화 예측, 2006년도 대한토목학회 정기학술대회 발표논문, pp.1160-1163.
- 황영철, 이승호, 노홍제, 김중우, 2005, 집중호우시 토사사면 붕괴예측을 위한 강우정보 활용방안 제안, 2005년도 한국지반공학회 사면안정 학술발표회, pp.199-205.
- Anderson, S. A. and Sitar, N., 1995, Analysis of rainfall-induced debris flows, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 21, No 7, pp.544-552.
- 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, pp.93-115.
- 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, 75, pp.251-262.
- Rahardjo, H., Leong, E. C., Gasmol, G. M. and Tang, S. K., 1998, Assessment of rainfall effect on stability of residual soil slopes, Proceedings of the 2nd international symposium on Unsaturated Soils, International Academic Publisher, Vol. 1, pp.280-285.
- Rahardjo, H., Lee, T. T., Leong, E. C., and Rezaeur, R. B., 2005, Response of a residual soil slope to rainfall,

- Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, pp.340-351.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A., 2001, Soils and waves, John Wiley & Sons, 488p.
- Sun, H. W., Wong, H. N. and Ho, K. K. S., 1998, Analysis of infiltration in unsaturated ground, Proceedings of the annual seminar on slope engineering in Hong Kong, pp.101-109.
- Tada, A., 1965, On the compaction curve of the Kanto-Loam and its permeability, Trans. Agric. Eng. Soc. Jpn., Vol. 14, pp.36-40.
- Uchida, J., Yatabe, R., Yokota, K., and Yagi, N., 2003, Failure of cut slopes in the Izumi group and associated action of groundwater, Groundwater Engineering-Recent Advances, Proceedings of the international symposium on groundwater problems related to geo-environment, pp.173-187.

---

2007년 2월 15일 원고접수, 2007년 3월 11일 게재승인

**김만일**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지  
Tel: 042-868-3117  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

**Makoto Nishigaki**

Dept. of Environmental & Civil Design, Okayama University  
3-1-1 Tsushimanaka, Okayama, Japan 700-8530  
Tel :+81-86-251-8164  
Fax : +81-86-251-8164  
E-mail: n\_makoto@cc.okayama-u.ac.jp