

불포화 다공질매질의 물성치 측정을 위한 실험적 연구

김만일*

안동대학교 지구환경과학과

A Study on the Estimation of Physical Parameters of Unsaturated Porous Media in the Laboratory

Man-Il Kim*

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

포화 및 불포화 상태로 이루어진 지반 내에서 지하수의 함양 및 오염물질의 침투 이동은 지반을 구성하고 있는 다공질 매질의 공극률과 유효공극률에 매우 큰 영향을 받는다. 본 연구는 불포화 매질에 대한 유효공극률을 측정하기 위해서 Frequency domain reflectometry(FDR) system 및 측정센서를 개발하여 실내실험을 수행하였다. 또한 측정된 유전율상수의 관계로부터 유효공극률을 산정할 수 있는 유전율 믹싱모델(dielectric mixing model)을 제안하였다. 실험결과에서 불포화 흙 시료인 표준사(standard sand)와 강모래(river sand)의 유효공극률의 범위는 공극률과 비교해 약 65~85% 내외에서 측정되었다. 특히, 측정된 유효공극률과 공극률의 관계에서 공극률이 증가할수록 유효공극률은 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 측정되었다. 이는 흙 입자사이의 공극 내에 존재하는 미량의 공기에 의한 것으로써 불포화 상태의 흙 칼럼이 충분히 포화 상태에 도달하지 못하였기 때문이다.

주요어 : 유효공극률, 공극률, Frequency domain reflectometry(FDR) system, 유전율 믹싱모델, 유전율상수

The permeation movements of groundwater recharge and contaminate materials receive a great effect due to porosity and effective porosity of porous media which is composing underground consisted of saturation and unsaturated states. This study developed Frequency Domain Reflectometry(FDR) system and measurement sensor, and then carried out the laboratory experiments to measure effective porosity for unsaturated porous media. Also, I suggested dielectric mixing models(DMMs) which can calculate the effective porosity from relation of measured dielectric constants. In the experimental results the extent range of effective porosity of standard sand and river sand which are unsaturated soil sample were measured in about 65~85 % for porosity. In relation of effective porosity and porosity, especially, effective porosity confirmed that displays decreasing a little tendency as porosity increases. This is because unsaturated soil did not reach in saturation enough by air of very small amount that exist in pore between soil particles.

Key words : Effective porosity, porosity, Frequency domain reflectometry(FDR) system, dielectric mixing models(DDMs), dielectric constant

* Corresponding author : mikim@andong.ac.kr

서 론

지반을 대상으로 액체 상태로 존재하는 물질의 이동은 지반을 구성하고 있는 흙 입자 사이의 연결된 공극을 통하여 침투한다. 또한, 암반에서는 풍화, 단층활동, 불연속면, 절리 등에 의해 형성된 크랙 및 미소크랙에 의존하여 이동하는 것으로 알려져 있다(Chae et al., 2002). 따라서, 이러한 이동의 메커니즘이 되는 연결된 모든 공간을 유효공극률의 공간적 의미로 나타낼 수 있다. 이 유효공극률은 오염물질의 침투경로, 지하수의 함양량 등을 추정할 수 있는 매우 중요한 파라미터들 중의 하나이다(Nishigaki et al., 2004; 김만일과 니시가키, 2003).

지반은 대체로 지표로부터 불포화된 지역과 포화된 지역으로 구분된다. 즉, 이러한 분류는 지하수 수위의 위치에 따라 분류되는 것으로써, 불포화된 지역은 포화된 지역에 비해 지반의 체적 함수비가 비교적 작은 것을 알 수 있다. 이것은 동일한 조건의 공극률을 갖는 흙 시료와 비교하면 흙의 기본적인 구성 성분의 차이를 쉽게 확인할 수 있다(Nishigaki et al., 2003). 포화된 흙은 공극들 사이에 물로 포화되어 있어 흙 입자들 사이에는 거의 공기가 존재하지 않지만 불포화된 흙의 구조는 흙 입자사이의 공극 내에 공기 및 물로 구성되어 있다.

이와 같이 지반을 구성하고 있는 매질들의 고유 유전율상수의 반응을 이용하여 불포화된 흙의 유효공극률의 측정 가능성을 검토하기 위해 유전을 측정 장비 중의 하나인 Frequency domain reflectometry(FDR) 시스템과 매질의 유전율상수를 측정하기 위한 측정센서를 개발하여 실험을 수행하였다. 이 방법은 흙 내부의 유전율상수의 변화를 측정하기 위해 주입물질인

물과 에탄올을 주입하여 불포화 상태의 흙 내부에 연결된 공극을 통하여 침투 이동하는 과정에서 흙의 유전율상수 변화를 측정할 수 있도록 고안되었다(김만일과 정교철, 2004). 이 때, 주입 물질의 침투로 인해 발생하는 유전율상수의 변화로부터 본 연구에서 제안된 유전율 믹싱모델 (dielectric mixing models; DDMs)에 적용하여 불포화 흙에 대한 유효공극률을 계산하였다.

실험시료 및 방법

실험시료

본 연구는 흙 입자의 분포가 거의 균등한 표준사(standard sand)와 일반적인 강모래(river sand)를 사용하여 실험을 실시하였다. 흙의 물리적 특성은 Table 1 및 Fig. 1에 도시하였다. 이들은 동일한 초기 공극률($n_0 = 0.35, 0.40, 0.45$)에 따라 체적 함수비($\theta = 0.10, 0.20, 0.30$)를 조절하면서 불포화 상태의 흙 칼럼 시료를 제작하였다. 불포화된 흙 시료의 체적함수비 측정에는 건조로를 사용한 건조실험을 통해 실험 전과 후의 변화를 측정하였다.

실험방법

불포화 다공질매질의 유효공극률을 측정하기 위해, FDR 유전율 측정법을 적용하여 이들을 구성하고 있는 매질의 고유한 유전율상수 변화로부터 유효공극률의 측정 가능성을 검토하였다.

Table 1. Physical properties of the sands.

Sand	Distributions of particlesize (%)				Specific gravity (g/cm ³)	Uniformity coefficient (U)
	Gravel (60~2mm)	Sand (2~0.06mm)	Silt (0.06~0.002mm)	Clay (>0.002mm)		
Standard sand	0.00	99.90	0.10	0.00	2.65	1.607
River sand	15.50	81.70	2.80	1.00	2.69	6.928

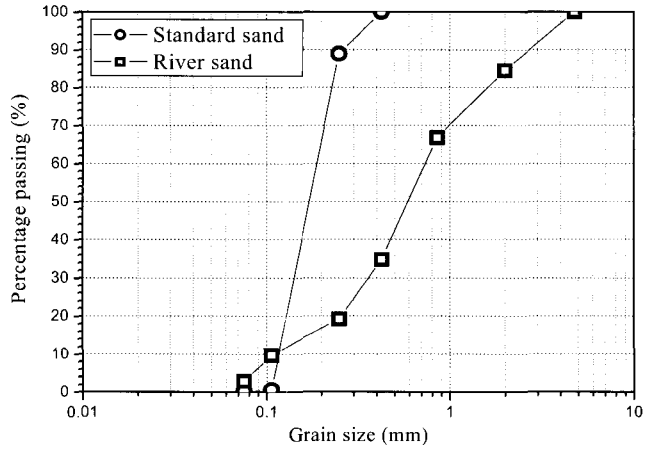


Fig. 1. Grain size distribution curve of the sands.

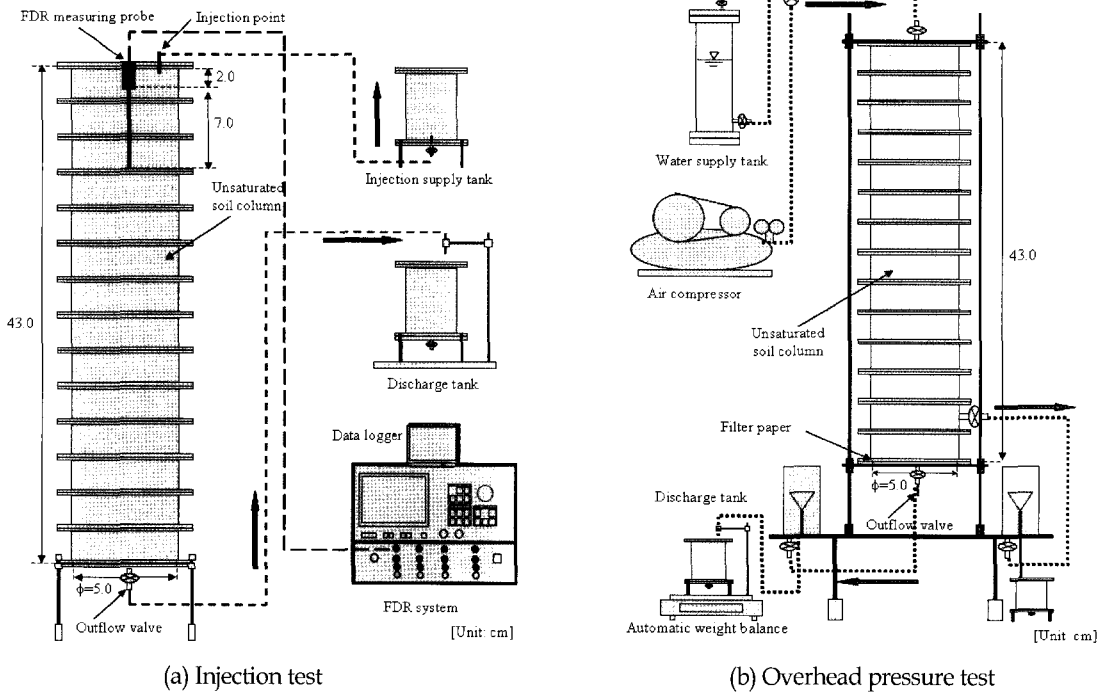


Fig. 2. Experimental setup for measuring effective porosity of unsaturated soil column.

이를 위해, 유전을 실험은 불포화된 흙의 유전율상수의 변화를 측정하기 위한 동일한 실험 조건 상태에서 하에서 물 및 에탄올 주입실험을 수행하였다.

Fig. 2는 본 실험에 적용된 FDR 및 불포화 아크릴 흙 칼럼의 설치에 대해 보여주고 있다. 불포화된 흙 칼럼을 만들기 위해, 아크릴 칼럼은 5cm 직경, 43cm 높이로 제작되어졌다. 칼럼 상단부분은 FDR 측정센서 및 주입 파이프를 설치할 수 있도록 5cm 직경, 2.5cm 두께의 아크릴 덮개를 제작하였다. 또한, 이것의 하단부분은 유출밸브를 설치하여 주입 파이프로부터 주입된 물 또는 에탄올이 원활하게 이동할 수 있도록 장치하였다. 설치된 장치를 이용하여 각각의 주입실험(Injection Test, IT)과 압력실험(Overhead Pressure Test, OPT)을 실시하였다.

불포화된 흙 내부의 유효공극률을 측정하기 위해서 주입되는 물질들은 동일한 공극률과 체적 함수비를 갖는 두 흙 칼럼에 대해 각각 물 및 에탄올을 주입하였다. 두 종류의 주입 물질의 수두높이는 25cm 높이에서 일정하게 주입하였다. 이 때, 불포화된 흙 내부의 유전율상수의 측정은 측정 주파수인 0.1~1.7 GHz의 범위 내에서 주입 물질에 따른 유전율상수의 변화를 측정할 수 있는 FDR system를 적용하였다.

주입 물질을 주입한 후, 각각의 흙 칼럼은 주입에 따

른 흙 내부의 체적함수비의 변화를 측정하기 위하여 일정한 길이에 대해 건조실험(dry oven test)을 실시하였다. 흙 시료의 체적함수비의 측정은 3 단계에 걸쳐 수행되었다. 1 단계에서는 초기 체적함수비를 측정을 위해서 불포화 흙을 아크릴 칼럼에 넣은 후 6cm 길이 단위로 6개, 그리고 7cm 높이 1개의 아크릴 칼럼을 분해해 칼럼 높이에 따른 체적함수비를 측정하였다. 2와 3단계는 각각 물 및 에탄올에 의한 주입 실험 후 아크릴 칼럼 내 흙의 체적함수비의 변화를 측정하였다. 체적함수비의 측정은 건조기에서 105 °C의 온도 상태로 24시간 동안 건조한 후 측정하였다.

유전을 믹싱모델

본 연구에서 제안된 유전을 믹싱모델(dielectric mixing model)은 불포화 다공질매질에 대해 측정된 유전율상수의 반응으로부터 이들의 유효공극률을 측정하기 제시되었다. 유전율상수의 측정은 다공질매질 내에 삽입 설치된 측정센서의 주변부에서 각기 주입되는 액체 상태의 물과 에탄올에 의해 이루어진다. 이들은 불포화 다공질매질의 연결된 공극을 통하여 이동하기 때문에 간단하게 유전율상수의 변화를 측정할

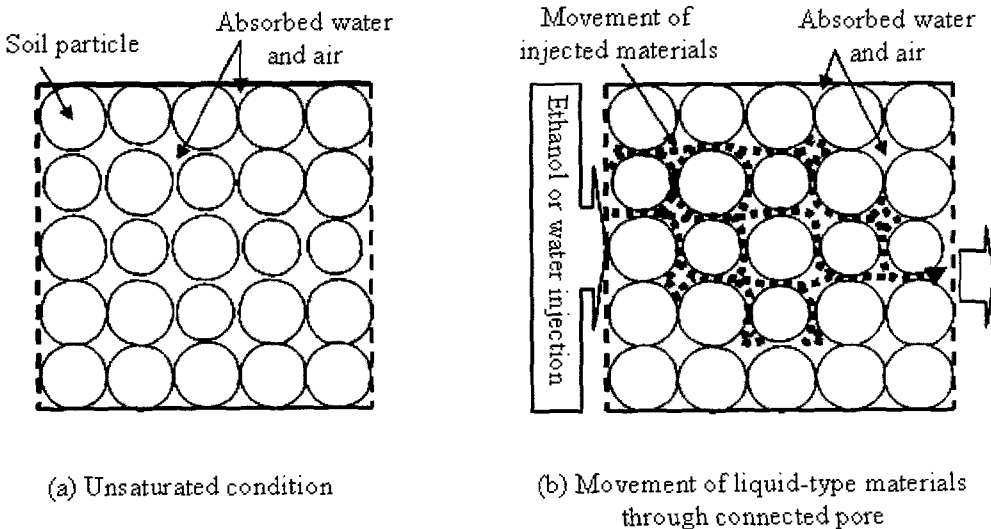


Fig. 3. Displace procedures by injecting ethanol or water into unsaturated soil porous media.

수 있다. Fig. 3은 불포화 다공질매질의 구조 및 물질 이동의 경로를 나타내고 있다. 여기서, 액체 상태로 존재하는 물질의 이동은 공극이 연결된 부분을 통하여 이루어지며, 이러한 공극의 연결성을 유효공극률로 나타낼 수 있다.

유전을 믹싱모델은 다공질매질을 구성하고 있는 기본 매질에 대한 각각의 유전율상수로 다음과 같이 식 (1)로 유도되어진다.

$$\epsilon_{initial} = n_w \epsilon_w + n_a \epsilon_a + (1 - n) \epsilon_s \quad (1)$$

여기서, n_w 및 n_a 는 각각 공극률, 물이 분포하고 있는 공극률, 그리고 공기가 분포하고 있는 공극률이다. 또한, $\epsilon_{initial}$, ϵ_w , ϵ_a 및 ϵ_s 는 초기에 측정된 유전율상수, 물, 공기 및 흙 입자의 유전율상수들을 의미한다. 일반적으로 물, 공기 및 흙 입자의 유전율상수는 20 °C의 온도 하에서 약 80, 1 그리고 2.5~3.5 범위에 존재하는 것으로 알려져 있다(Noborio, 2001).

불포화 다공질매질의 유효공극률을 측정하기 위해서 물 및 에탄올을 주입하여 유전율상수의 변화는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 우선, 물의 주입에 따른 다공질매질 내에서의 유전율상수의 변화는 공극률 및 유효공극률의 관계로부터 유도되어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{ee} = & (n_w - n'_e) \epsilon_w + (n_a - n''_e) \epsilon_a \\ & + (1 - n) \epsilon_s + (n'_e + n''_e) \epsilon_{eth} \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 에탄올 주입에 따른 유전율상수의 변화는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{ew} = & (n_w - n'_e) \epsilon_w + (n_a - n''_e) \epsilon_a \\ & + (1 - n) \epsilon_s + (n'_e + n''_e) \epsilon_w \end{aligned} \quad (3)$$

이상과 같이 두 종류의 주입물질인 물과 에탄올을 주입함으로써 불포화된 흙 칼럼 내에서 FDR 측정센서가 설치된 부분에서의 초기 및 최종 유전율상수의 변화는 식 (2)와 (3)에서 충분히 확인할 수 있다. 여기서, ϵ_w 와 ϵ_{aw} 는 각각의 주입물질인 물과 에탄올을 주입하였을 때 측정된 최종 유전율상수이며, n'_e 과 n''_e 는 물 또는 에탄올 주입에 따른 불포화 흙 내부에서의 유효공극률의 변화이다. 그리고 $n'_e + n''_e$ 는 흙 입자 사이에 존재하는 공극 내에서 실질적으로 주입물질이 이동하는 유효공극을 의미함으로써 이를 유효공극률로 나타낼 수 있다.

유효공극률의 변화이다. 그리고 $n'_e + n''_e$ 는 흙 입자 사이에 존재하는 공극 내에서 실질적으로 주입물질이 이동하는 유효공극을 의미함으로써 이를 유효공극률로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{initial} - \epsilon_{ee} = n'_e \epsilon_w + n''_e \epsilon_a - (n'_e + n''_e) \epsilon_{eth} \quad (4)$$

$$\epsilon_{initial} - \epsilon_{ew} = n'_e \epsilon_w + n''_e \epsilon_a - (n'_e + n''_e) \epsilon_w \quad (5)$$

유도된 식 (1), (2), (3)을 식 (4)와 (5)의 관계로 정리하면 최종적으로 불포화 흙에 대한 유효공극률의 관계를 얻을 수 있다.

$$n_e = \frac{(\epsilon_{initial} - \epsilon_{ee}) - (\epsilon_{initial} - \epsilon_{ew})}{(\epsilon_w - \epsilon_{eth})} \quad (6)$$

$$n_e = \frac{\epsilon_{ew} - \epsilon_{ee}}{\epsilon_w - \epsilon_{eth}} \quad (7)$$

불포화된 흙 매질에 대한 유전율상수의 관계로부터 유도된 유효공극률의 관계식은 결과적으로 순수한 물과 에탄올의 유전율상수와 이들을 주입한 후 측정된 최종 유전율상수의 관계로부터 유효공극률의 계산이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

실험결과 및 고찰

주입실험에 따른 불포화 흙의 유전율상수 변화

불포화 흙 칼럼의 제작은 체적함수비 약 0.10, 0.20 그리고 0.30 범위 내에서 함수비를 조절하면서 초기공극률 0.35, 0.40 및 0.45 내외로 각각 제작하였다. 주입 시험이 종료된 후 흙 칼럼 시료는 105 °C 온도를 유지할 수 있는 건조로에서 24시간 건조하여 각 흙 칼럼에 대한 체적함수비와 공극률을 계산하였다. 건조시험 후 측정된 각 실험별 흙 칼럼에 대한 물성치는 Table 2에 나타내었다.

주입물질인 물과 에탄올 주입에 따른 흙 내부의 유전율상수 변화는 초기 유전율상수의 측정치와 대조적으로 나타났다. 특히, 각 초기공극률에 대한 초기 유전율상수의 측정치는 공극률이 증가할수록 유전율상수도 함께 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 흙 입자사

이에서 공극의 부피가 증가함에 따라 물의 함유량이 증가에 의한 것으로서 물의 유전율상수(약 80)가 공기(약 1)나 흙 입자(약 2.5~3.5)보다 매우 크기 때문에 측정되는 유전율상수가 공극 내에 분포하고 있는 물의 영향을 받기 때문이다(김만일과 니시가키 2003;

Table 2. Summary of physical properties of unsaturated sands by injection test (Temperature 20 °C).

Sand	Injection material	Variation of θ		Porosity n_0	Measured dielectric constant			Calculated n_e	Ratio of n_e/n_0
		Initial*	Final#		$\epsilon_{initial}$	ϵ_{ew}	ϵ_{ee}		
SS1-1	Water	0.093	0.362	0.369	8.348	30.826			
SS1-2	Ethanol	0.086	0.264	0.368	6.626		12.847	0.269	0.73
SS2-1	Water	0.191	0.370	0.373	7.938	32.503			
SS2-2	Ethanol	0.189	0.262	0.375	7.983		12.766	0.295	0.79
SS3-1	Water	0.292	0.360	0.377	13.092	31.336			
SS3-2	Ethanol	0.290	0.215	0.378	13.698		11.606	0.295	0.78
SS4-1	Water	0.082	0.350	0.415	6.229	30.184			
SS4-2	Ethanol	0.084	0.269	0.411	7.284		12.745	0.261	0.63
SS5-1	Water	0.193	0.296	0.410	8.043	31.816			
SS5-2	Ethanol	0.187	0.276	0.410	9.930		12.587	0.287	0.70
SS6-1	Water	0.286	0.331	0.408	14.926	30.184			
SS6-2	Ethanol	0.284	0.227	0.405	16.349		12.745	0.261	0.64
SS7-1	Water	0.096	0.314	0.449	5.807	31.648			
SS7-2	Ethanol	0.096	0.267	0.446	6.169		11.639	0.299	0.67
SS8-1	Water	0.185	0.370	0.450	7.413	32.944			
SS8-2	Ethanol	0.182	0.282	0.447	10.237		12.847	0.300	0.67
SS9-1	Water	0.289	0.335	0.451	13.011	32.392			
SS9-2	Ethanol	0.285	0.271	0.445	16.272		12.847	0.292	0.66
RS1-1	Water	0.101	0.318	0.367	8.162	33.393			
RS1-2	Ethanol	0.099	0.267	0.371	6.626		12.686	0.309	0.83
RS2-1	Water	0.190	0.322	0.373	10.842	34.027			
RS2-2	Ethanol	0.196	0.259	0.372	10.716		11.780	0.332	0.89
RS3-1	Water	0.290	0.284	0.361	17.087	32.957			
RS3-2	Ethanol	0.292	0.258	0.373	17.746		11.639	0.319	0.85
RS4-1	Water	0.095	0.328	0.401	7.860	33.393			
RS4-2	Ethanol	0.095	0.258	0.398	7.860		12.686	0.309	0.78
RS5-1	Water	0.197	0.313	0.404	13.349	32.071			
RS5-2	Ethanol	0.196	0.295	0.400	11.363		12.686	0.290	0.72
RS6-1	Water	0.294	0.326	0.396	15.046	32.071			
RS6-2	Ethanol	0.296	0.272	0.403	15.149		12.528	0.292	0.72
RS7-1	Water	0.098	0.352	0.443	8.385	34.086			
RS7-2	Ethanol	0.098	0.289	0.439	8.610		11.639	0.335	0.76
RS8-1	Water	0.185	0.305	0.447	10.009	34.262			
RS8-2	Ethanol	0.187	0.217	0.442	10.354		12.847	0.320	0.72
RS9-1	Water	0.291	0.330	0.441	14.349	34.440			
RS9-2	Ethanol	0.290	0.303	0.444	14.254		12.847	0.323	0.73

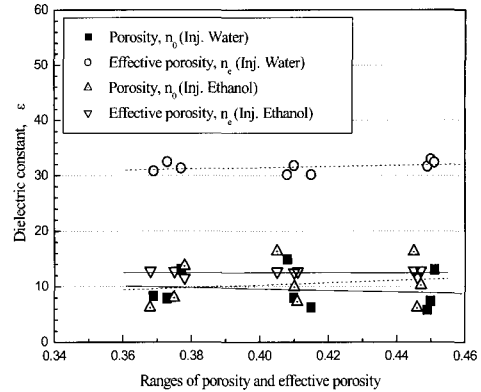
Remarks: * - initial volumetric water content (θ) and # - final volumetric water content (θ) by the dry oven test; n_0 - initial porosity; n_e - effective porosity by calculated as the proposed dielectric mixing models (DMMs); SS - Standard sand; RS - River sand.

Noborio, 2001). 또한 불포화 흙 칼럼이 주입물질인 물에 의해 점차적으로 포화상태로 진행되면서 유전율상수의 측정값이 매우 높게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 에탄올의 주입에 따른 최종 유전율상수의 측정값은 초기 유전율상수의 측정치 범위보다 다소 높은 범위 내에서 측정되었다. 이는 순수한 에탄올의 유전율상수가 약 13 정도로 물에 비해 매우 낮을 뿐만 아니라 포화된 흙과 에탄올이 혼합되어 있을 경우에는 약 11~12 정도의 범위 내에서 유전율상수를 나타낸다.

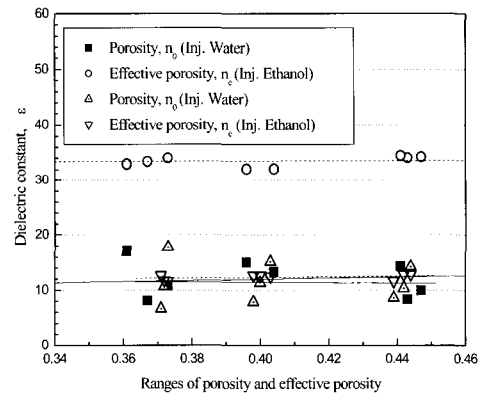
Fig. 4는 측정된 표준사와 강모래에 대한 초기 및 최종 유전율상수와 공극률 및 유효공극률의 관계를 도시하였다. 앞서 설명한 바와 같이 초기 유전율상수의 측정 범위는 비슷한 범위 내에 분포하고 있지만, 주입 물질의 종류에 따라 최종 유전율상수의 측정 범위는 다소 큰 차이를 보이고 있다. 여기서는 불포화 흙 시료의 공극률 또는 유효공극률이 증가할수록 유전율상수가 미미하게 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 물 또는 에탄올의 주입에 따라 실험 전의 불포화 상태가 실험이 진행되는 동안 포화 상태로 점진적으로 변화하지만 흙 입자사이의 공극 내에 다소 공기가 남아 있기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 흙 칼럼이 완전한 포화 상태에 도달하지 않았기 때문에 유전율상수의 측정치가 공극 내에 남아 있는 미량의 공기 영향으로 다소 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 측정된 유효공극률과 공극률의 관계에 대해 도시하였다. 실험에 적용된 두 종류의 흙들은 초기 불포화 상태에서 주입물질에 의해 포화 상태로 전환되면서 흙 내부의 연결된 공극을 통하여 침투 이동함에 따라 공극률에 비해 유효공극률이 약 65~85% 범위에 분포하고 있는 것을 확인하였다. 여기서 불포화 흙 시료의 공극률이 증가하면서 유효공극률은 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

특히, 표준사와 강모래에서 두 실험의 결과치가 다소 차이를 보이는 것은 흙을 구성하고 있는 물질들의 입자분포에 의한 것으로서, 유전율상수는 조립질 보다는 세립질의 흙 입자에 대해 비교적 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Jacobsen and Schjønning, 1993; Topp et al., 1980). 따라서 강모래에 함유된 세립질 입자가 표준사보다 약 4% 정도 더 함유되어 있기 때문에 이들의 영향으로 유전율상수 측정치가 다소 높게 측정되었다.



(a) Standard sand

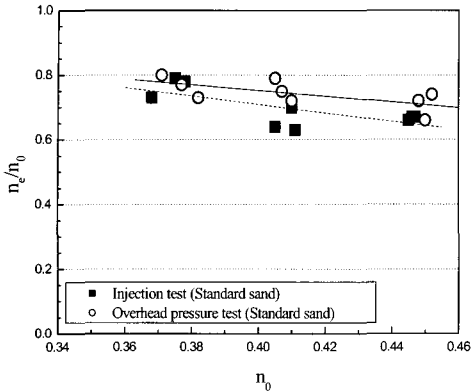


(b) River sand

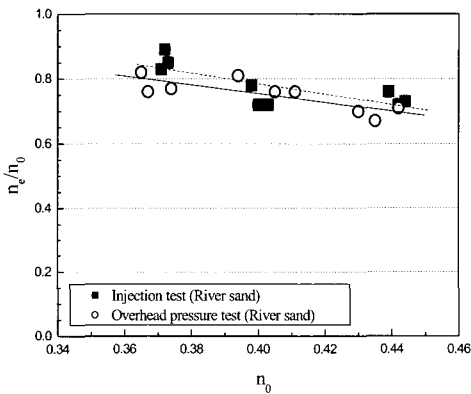
Fig. 4. Relationships between dielectric constant and physical parameters.

결론

불포화 다공질매질의 정량적인 유효공극률을 측정하기 위해 지반을 구성하고 있는 매질의 기본 물리적 특성 중의 하나인 유전율상수의 변화로부터 이를 측정하기 위한 실험적 연구를 시도하였다. 본 연구를 위해서 다양한 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 Frequency domain reflectometry(FDR) system과 측정센서를 고안하였으며, 다공질매질의 기본 단위인 흙 입자, 물 그리고 공기를 포함하고 있는 불포화 조건에 대한 유전을 믹싱모델(dielectric mixing model)을 제안하였다.



(a) Standard sand



(b) River sand

Fig. 5. Relationship of the measured physical parameters of unsaturated sands.

두 종류의 불포화 흙인 표준사와 강모래에 대한 유효공극률 측정은 주입물질인 물과 에탄올을 주입하는 주입실험(injection test)과 압력실험(overhead pressure test)을 실시하였다. 각각의 흙 칼럼은 일정한 초기공극률 범위 내에서 체적함수비를 조절하여 수행되었다. 각 흙 칼럼에 대한 체적함수비와 공극률은 건조 실험을 실시하여 산정하였다.

각 흙 칼럼에 대한 유전율상수와 공극률 및 유효공극률의 관계에서 공극률이 증가할수록 유전율상수는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 불포화 상태의 흙 칼럼 내에 주입물질을 주입하더라도 완전히

포화 상태를 보이지 않기 때문이며, 이러한 영향에 의해 흙 입자사이의 공극 내에 공기가 다소 분포하고 있어 유전율상수 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 두 실험에 의해 측정된 유효공극률의 범위는 공극률과 비교해 약 65~85% 범위 내에 분포하고 있으며, 불포화 상태에서는 공극률의 증가에 따라 유효공극률은 다소 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 불포화 상태의 흙 입자 들레에 흡착수가 다량 분포하고 있어 연결된 공극만을 통하여 신속하게 주입물질이 침투 이동이 이루어진 것이다. 따라서 공극 내에 공기가 소량 함유되어 있기 때문에 이에 의해 유전율상수가 다소 감소된 것으로 판단된다.

본 연구의 결과에서 불포화 흙 칼럼에 대한 유효공극률의 측정 가능성에 있어 유전율 시스템인 FDR과 측정센서 만으로도 유전율상수의 반응에 따라 이들의 측정이 가능하다는 것을 확인하였다. 앞으로의 연구는 야외에 적용할 수 있는 유전율 장비의 적용성과 그 시험방법에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

김만일, 니시가키 마코토, 2003, 유전율법을 이용한 다공질 매질의 공극률 및 유효공극률의 측정에 관한 연구, 지질공학, 13(4), p. 405-417.
 김만일, 정교철, 2004, 유전율 측정법의 적용성 검토를 위한 기초적 연구, 2004년도 대한지질공학회 학술발표회, 대한지질공학회, p. 145-151
 B.G. Chae, M.I. Kim, H. Park, Y.S. Seo and G.C. Jeong, 2002, Permeability characteristics of damaged granite, Proceedings of 2002 ISRM Regional Symposium on Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, Seoul, Korea, p. 311-318.
 Jacobsen, O.H. and Schjønning, P., 1993, A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture, Journal of Hydrology, 151, p.147-157.
 Nishigaki, M., M. Komatsu and M.I. Kim, 2003, An experimental approach for estimating the porosity and effective porosity of porous media by permittivity methods, Proceedings of the international symposium on the fusion

technology of geosystem engineering, rock engineering and geophysical exploration, Seoul, Korea, p. 703-710.

Nishigaki, M., M. Komatsu and M.I. Kim, 2004, A basic study on monitoring method of contamination of soil and groundwater by using Frequency Domain Reflectometry method, *Journal of Groundwater Hydrology*, 46(2), p. 145-157 (in Japanese).

Noborio, K., 2001, Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, *Computers and electronics in agriculture*, 31, p. 213-237.

Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission

lines, *Water Resources Research*, 16(3), p. 574-582.

투 고 일	2004년 5월 6일
심 사 일	2004년 5월 7일
심사완료일	2004년 6월 10일

김만일
 안동대학교 지구환경과학과
 760-749 경북 안동시 송천동 388
 Tel: 054-820-5185
 Fax: 054-823-1627
 E-mail: mikim@andong.ac.kr