

유전율법을 이용한 다공질 매질의 공극률 및 유효공극률의 측정에 관한 연구

김만일¹⁾ · 니시가끼 마코토²⁾

¹⁾오카야마대학 대학원 자연과학연구과, ²⁾오카야마대학 환경이공학부 환경디자인공학과

Determination of porosity and effective porosity of saturated porous media using a permittivity method in the laboratory

Man-Il Kim¹⁾ · Makoto Nishigaki²⁾

¹⁾Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Japan

²⁾Dept. of Environmental and Civil Design, Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University, Japan

요 약

지반을 대상으로 지하수의 이동 및 오염물질 침투에 대한 평가를 위해, 지반을 구성하고 있는 매질의 공극률과 유효공극률을 파악하는 것은 매우 중요하다. 이들은 물질 이동을 결정하는 중요한 물리적 파라미터이다. 본 연구에서는 새로운 유전율 시스템인 FDR-V (Frequency domain reflectometry with vector network analyzer)를 적용하여 표준사 (Standard sand)와 강모래 (River sand)에 대한 공극률 및 유효공극률을 측정하기 위한 실험적 연구를 실시하였다. 또한, 이들을 측정하기 위해, 다공질 매질에 대한 유전율상수의 특성을 고려한 유전율 믹싱모델 (dielectric mixing model)을 제안하였다. 포화된 두 종류의 흙에 대한 유효공극률을 측정하기 위한 실내 실험은 FDR-V 시스템을 적용한 주입실험 (Injection test)과 주입물질의 농도를 측정하는 치환실험 (Replacement test)을 수행하였다. 두 종류의 실험 결과치를 비교한 결과, 측정된 유효공극률을 공극률과 비교해 보면, 약 85 - 92 %의 범위 내에 존재하는 것으로 측정되었다. 일반적인 흙의 유효공극률은 공극률에 대해 약 90 % 범위 내에 분포하고 있는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 다소 낮은 결과치를 보이고 있다. 이러한 현상은 시스템의 측정 프로브의 측정 범위가 직경 0.36 cm의 동축측정프로브 끝부분에서 이루어져 비교적 작기 때문에 제작된 흙 시료 전 체적에 대한 유효공극률의 결과치이기 보다는 프로브가 위치한 지점에 대한 측정치로 판단된다. 이러한 측정 프로브의 특성을 고려해 볼 때, FDR-V 시스템은 연구자가 의도한 연구에 따라 특정 지점에 대한 지반의 정밀한 물리적 특성을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 공극률, 유효공극률, 유전율법, 유전율상수, 다공질 매질

ABSTRACT: In order to evaluate groundwater movement and the infiltration of contaminants, such as

*Corresponding author : mikim@gw.civil.okayama-u.ac.jp

petroleum products, the determination of porosity and effective porosity is very important. Porosity and effective porosity are important physical parameters that determine the transfer and movement of water and solutes in porous media. Various methods of determining these parameters have been developed, with varying degrees of accuracy and applicability. Most of the existing methods produce static results. They do not produce instantaneous and real time of porosity and effective porosity in a porous media. In this study, we used a new permittivity method called Frequency Domain Reflectometry with Vector analyzer (FDR-V) to determine the porosity and effective porosity of some sand samples in the laboratory. The advantage of the FDR-V method is that it instantaneously determines the temporal variation of dielectric constants of porous media. Then, the porosity and the effective porosity of porous media are computed using well established empirical equations. Results obtained from the FDR-V method compared favorably with results from other permittivity methods such as gravimetric, injection and replacement tests. The ratio of effective porosity to porosity was 85 - 92 %, when FDR-V was used. This value compared favourably with 90 %, which has been usually quoted in previous studies. Considering the convenience and its applicability, the FDR-V permittivity holds a great potential in porous media and contaminant transport studies.

Key words : porosity, effective porosity, permittivity method, dielectric constant, porous media

서 론

지반을 대상으로 강우에 의한 지하수 함양 및 지표에서 누출된 오염물질의 유입 등을 평가하기 위해서는 지반의 물리적 특성인 공극률 및 유효공극률을 파악하는 것이 우선적으로 필요하다. 또한, 최근에 대두되고 있는 수자원의 보호 및 효율적인 이용을 목적으로 미고결 자유면 대수층인 충적층을 대상으로 건설 중인 지하댐의 경우, 대상 지역의 지하수 저류 능력을 추정하기 위해서는 지반의 공극률 및 유효공극률에 대한 측정이 선행되어야만 한다 (한정상, 1999).

일반적으로 다공질 매질의 체적함수비는 공극의 분포와 관계를 가지고 있으므로, 완전 포화된 다공질 매질의 체적함수비는 공극률의 개념으로 나타낼 수 있다 (Santamarina et al., 2001). 이러한 매질의 체적함수비 측정법은 다양하지만, 그 중에서도 TDR (Time domain reflectometry) 측정법은 정밀하고 간단하게 대상 매질에 대한 체적함수비를 측정이 가능하다 (Jackson, 2003; Huisman et al., 2001; Chan and Knight, 1999; Hokett et al., 1992; Topp et al., 1980).

본 연구에서는 다공질 매질에 대한 유전율상수

의 관계로부터 포화된 다공질 매질의 체적함수비, 공극률 및 유효공극률의 측정을 위한 유전을 믹싱모델 (dielectric mixing model)을 제시하였다. 또한, 제작된 흙 시료에 대해 에탄올 주입실험을 통하여 측정된 유전율상수의 변화로부터 이러한 파라미터들의 측정 가능성을 검토하였다. 흙 시료에 대한 유전율상수의 변화를 측정하기 위해, FDR-V (Frequency domain reflectometry with vector network analyzer) 시스템을 적용하였다.

실험시료 및 방법

실험시료

FDR-V 유전율법을 적용하여 흙의 물리적 파라미터를 측정을 위해서 입도가 균등한 표준사 (Standard sand)와 입도가 불균질한 강모래 (River sand) 등 두 종류의 흙을 사용하였다. 일반적으로 체분석을 통해 유도된 입도분포곡선은 유효입경 (D10), 균등계수 (Uniformity coefficient, Cu) 및 곡률계수 (Curvature coefficient, Cc) 등은 흙의 투수특성, 전단특성, 압축특성 및 입도분포의 상태를 파악할 수 있다 (정교철과 손호웅,

Table 1. Physical properties of the soils.

		Standard sand	River sand
Specific gravity		2.65	2.69
Distribution of grain size (%)	Coarse Sand	0.0	15.50
	Sand	99.9	81.70
	Silt	0.1	2.80
	Clay	0.0	1.00
Liquid plastic limit (%)	Liquid limit, W_L	NP	NP
	Plastic limit, W_P	NP	NP
	Plastic index, I_P	NP	NP
Uniformity coefficient, C_c		1.727	7.029
Curvature coefficient, C_u		0.938	1.710

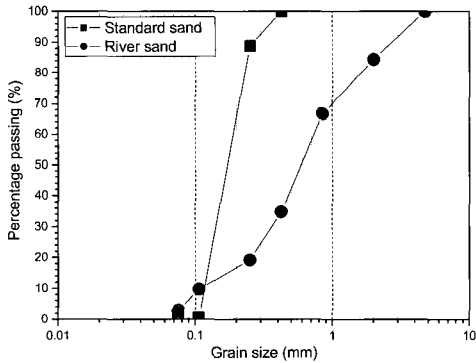


Fig. 1. Grain size distribution curve of the sands.

2000). 이들의 기본적인 물성치를 파악하기 위해, 체분석을 실시하여 Table 1과 Figure 1에 나타내었다. 이러한 결과로부터 강모래는 입도가 전반적으로 양호한 상태이지만 표준사는 입도 분포가 다소 불량한 것으로 판단된다.

실험방법

본 연구에 적용된 유전율법은 고주파의 전자기파를 이용하여 다공질 매질의 유전율상수의 변화를 측정할 수 있는 FDR-V 시스템을 적용하였다. 본 시스템은 기본적으로 벡터 네트워크 어날라이저 (Vector Network Analyzer, VNA), 스위치 유

니트 (Switch Unit, SU) 그리고 50 ohm의 동축 전송선으로 연결된 동축측정프로브 (Coaxial Measurement Probe, CMP)로 구성되어 있다. 여기서, 매질의 유전율상수의 측정은 CMP에서 이루어지며, 측정치는 Data logger로 자동으로 저장된다. CMP에서 유전율 측정범위는 CMP 끝부분의 직경 0.36cm 부근에서만 이루어지기 때문에 매질의 매우 정확한 지점에 대한 측정이 가능하다.

두 종류의 흙에 대한 공극률과 유효공극률을 측정하기 위해 직경 5 cm, 높이 7 cm의 원통형 아크릴로 제작된 칼럼 상단부에 CMP를 설치할 수 있도록 장치하였다. 흙 시료를 완전 포화상태로 제작하기 위해서 이산화탄소가스 (CO₂ gas)와 증류수 (distilled water)를 사용하여 각각의 초기 공극률 0.35, 0.40 그리고 0.45에 대한 흙 칼럼을 제작하였다. 여기서, 제작된 흙 칼럼의 포화도 측정은 백프레서 (back pressure) 측정법에 의해 각각 측정되었다 (Shackelford and Redmond, 1995; Tada, 1994).

주입물질인 에탄올은 흙 칼럼 하단부로 부터 주입을 실시하여 상단부에 설치된 유출밸브를 통하여 유출되도록 하였다. 이렇게 주입된 에탄올은 포화된 흙 내부로 지속적으로 침투 이동하여 공극 내의 공극수와 치환되면서 유전율상수의 변화가 발생한다. 이 때, 흙 칼럼 상단부로 부터 3.5

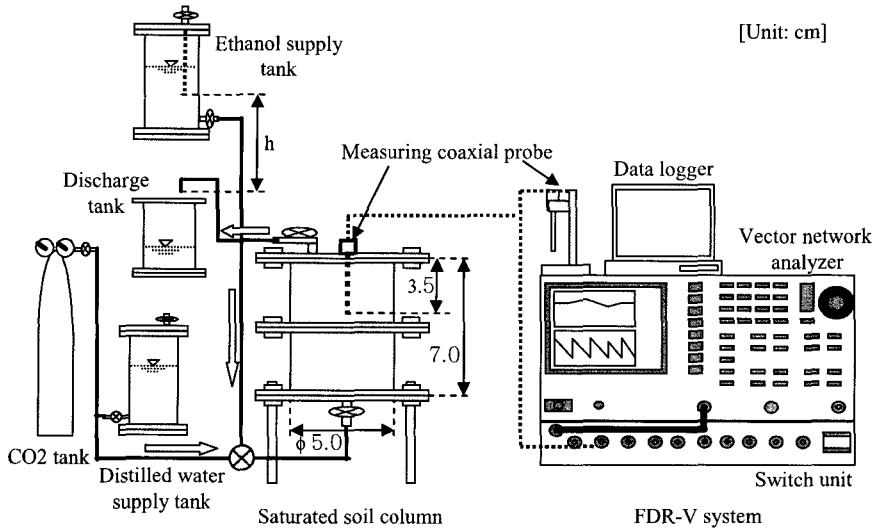


Fig. 2. Schematic diagram for measuring physical parameters by FDR-V system.

cm 깊이를 유지하며 수직으로 삽입 설치된 CMP의 측정부에서 에탄올 주입에 따른 포화된 흙의 유전율상수 변화를 일정시간 간격으로 측정하였다 (Figure 2).

본 논문에서는 포화된 흙의 공극률과 유효공극률을 측정하기 위해 흙 칼럼에서 측정된 유전율상수의 변화로부터 다음과 같은 유전율 믹싱모델 (dielectric mixing model)을 제안하였다. 여기서, Figure 3은 포화된 흙 구조에서 물질 이동의 과정을 설명하고 있다. 즉, 흙 입자들 사이의 공극 내 물로 완전히 포화되어 있는 상태로 존재하며, 액상의 물질이 주입될 경우 공극이 연결된 부분에서만 물질 이동이 진행된다. 따라서, 포화된 흙 내부에서 물, 흙 입자 그리고 흙 밀도의 관계로부터 유전율상수의 변화가 발생한다. 따라서, 일정한 공극률을 갖는 포화된 흙에서 체적함수비는 공극률과 동일한 의미를 갖는다. 이러한 포화된 다공질 매질의 구조를 유전율상수를 조합해 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 공극을 제외한 흙의 유전율상수는 $\epsilon_s(1-n')$ 이며, 공극 내에 존재하는 물의 유전율상수는 $\epsilon_w \cdot n'$ 으로 나타낼 수 있다. 이러한 유전율상수의 조합은 에탄올 주입 실험 전의 포화된 흙 칼럼의 초기 유전율상수이다.

그러므로, 식 (1)의 유전율 믹싱모델로부터 측정된 유전율상수의 측정치만으로 포화된 흙의 공극률을 계산할 수 있다. 뿐만 아니라, 포화된 흙 내부로 액상의 물질이 침투 이동할 경우, 위의 세 가지 요소에 주입 물질인 에탄올에 대한 유전율상수를 포함시키면 유효공극률의 측정도 가능할 것으로 판단된다. 다시 말해서, 물로 포화된 흙의 연결된 공극을 통하여 에탄올이 침투 이동하기 때문에 연결된 공극의 상태를 유효공극으로 고려할 수 있다. 즉, 식 (2)에서와 같이, 흙에 대한 유전율상수는 변화가 없지만, 포화된 흙 내부로 에탄올의 주입에 의해서 공극 내에 분포하고 있는 물의 유전율상수는 $\epsilon_w(n' - n_e')$ 로 변화되면서 흙의 유효공극으로 에탄올이 침투 이동에 의해 에탄올의 유전율상수는 $\epsilon_{eth} \cdot n_e'$ 으로 나타난다.

$$\epsilon_{initial} = \epsilon_s(1-n') + \epsilon_w \cdot n' \quad (1)$$

$$\epsilon_{final} = \epsilon_s(1-n') + \epsilon_w(n' - n_e') + \epsilon_{eth} \cdot n_e' \quad (2)$$

위의 두 식을 아래와 같이 정리할 수 있다.

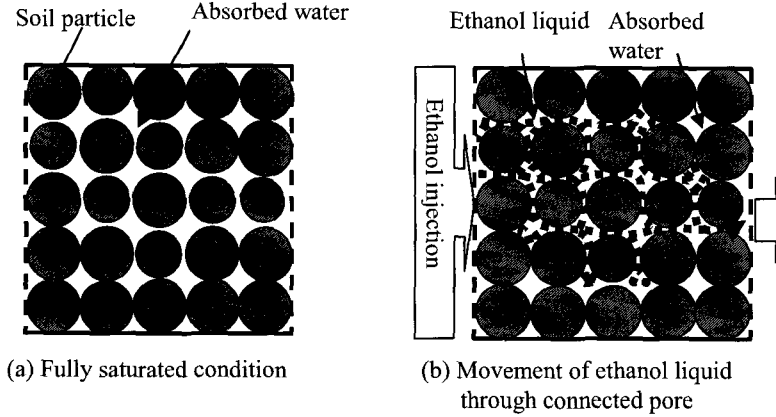


Fig. 3. Displacement by injecting ethanol liquid into saturated soil material.

$$n' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{initial}}{\epsilon_s - \epsilon_w} \quad (3)$$

$$n_e' = \frac{\epsilon_{initial} - \epsilon_{final}}{\epsilon_w - \epsilon_{eth}} \quad (4)$$

여기서, ϵ_s , ϵ_w 와 ϵ_{eth} 은 각각 흙, 물 그리고 에탄올에 대한 유전율상수를 나타내며, $\epsilon_{initial}$ 과 ϵ_{final} 은 포화된 흙의 측정된 초기 및 최종 유전율상수를 의미한다. 그리고, n' 와 n_e' 는 유전율 믹싱모델을 적용해 계산된 공극률과 유효공극률이다. 일반적으로 대표적인 유전율상수인 물 (ϵ_w)은 섭씨 20°C에서 80 - 81, 흙 (ϵ_s)은 2.5 - 3.5 정도의 상수를 갖는 것으로 알려져 있다 (Noborio, 2001).

실험결과 및 토의

유전율상수에 의한 체적함수비의 관계

지반에 대한 체적함수비의 측정은 강우에 의한 지하수 함양 및 오염물질의 침투에 대한 해석을 위해선 매우 중요한 파라미터이다. 특히, 절개사면에 있어 강우에 의한 사면파괴의 요인으로 작용하는 현장 체적함수비는 흙의 역학적 특성을 이

해하는데 반드시 필요한 요소 중의 하나이다 (Adrin, 2002). 이러한 특성들을 파악하기 위해, 다양한 측정법 중에서 TDR 법 (Topp et al., 1980)은 측정된 유전율상수 반응에 따라 흙의 체적함수비를 신속하게 측정하고 정량적으로 판단할 수 있어 광범위하게 적용되고 있다. 이들은 체적함수비와 유전율상수의 관계를 이용해 아래의 다항식을 유도하였다.

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} k^3 - 5.5 \times 10^{-4} k^2 + 2.92 \times 10^{-2} k - 5.3 \times 10^{-2} \quad (5)$$

여기서, θ 와 k 는 각각 흙의 체적함수비와 측정된 유전율상수를 나타낸다.

유전율상수의 변화에 따른 흙의 체적함수비를 판단하기 위해, 본 실험에서는 초기 공극률 0.40 및 0.45로 제작된 두 종류의 흙에 대해 체적함수비를 단계적으로 변화시켜 Topp가 제시한 다항식의 결과와의 상관관계를 검토하였다 (Figure 4).

실험 결과, 표준사는 체적함수비가 0.3 cc/cc 이하에서 Topp's curve보다 다소 낮게 측정되었지만, 0.3 cc/cc 이상의 범위에서는 높은 측정치로 나타났다. 또한, 강모래는 측정된 체적함수비 범위 내에서 전반적으로 Topp's curve 보다 다소 높은 유전율상수의 분포를 보이고 있다. 두 종류의 흙에 대한 유전율상수의 측정치 변화가 제시된

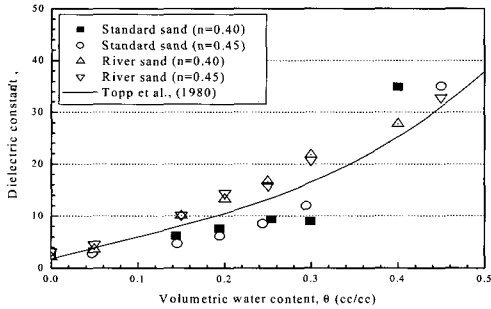
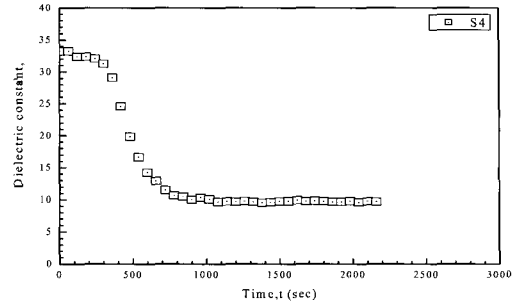


Fig. 4. Relationship between dielectric constant and volumetric water content by FDR-V system.

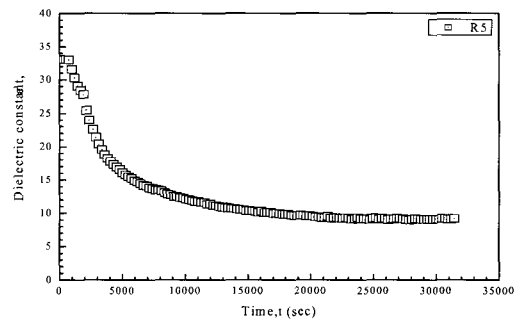
Topp's curve의 결과치에 비해 다소 차이를 보이는 것은 실험에 적용된 흙의 밀도와 입도 분포의 영향으로 판단된다. 특히, 체적함수비 0.1 - 0.3cc/cc 범위 내에서의 표준사와 강모래의 유전율상수의 분포는 Table 1에서와 같이 세립질 흙의 함유비율에 의한 영향으로 판단된다. Jacobsen and Schjønning (1993)에 따르면 동일한 체적함수비를 갖는 조건에서 유전율상수의 변화는 세립질 보다는 조립질로 구성된 흙에서 더 크게 측정되는 것으로 알려져 있다. 즉, Topp의 실험에 사용된 시료는 점토 및 실트 등의 세립질 흙을 대상으로 실험이 이루어졌지만, 본 실험에서는 조립질의 흙을 사용함에 따라 흙의 유전율상수 변화에 미미한 차이가 나타난 것으로 판단된다.

유전율상수에 의한 공극률과 유효공극률의 관계

각 초기 공극률 0.35, 0.40 그리고 0.45를 갖는 포화된 두 종류의 흙에 대한 유전율상수의 변화를 측정하기 위해서 FDR-V 시스템을 적용하여 실험을 실시하였다. 포화된 흙 칼럼의 공극률과 유효공극률을 측정하기 위해 에탄올 주입실험과 치환실험을 실시한 결과를 Figure 5와 Table 2에 나타내었다. Figure 5는 S4 (standard sand)와 R5 (River sand)의 에탄올 주입에 따른 포화된 흙에 대한 유전율상수의 변화를 명확하게 보여주고 있다. 또한, Table 2는 FDR-V 시스템에 의해 측정된 초기 및 최종 유전율상수의 변화와 각 실험에서 측정된 공극률과 유효공극률의 결과치를 나타낸다.



(a) Standard sand (initial porosity 0.405).



(b) River sand (initial porosity 0.402).

Fig. 5. Variations of the measured initial and final dielectric constants of saturated sands by FDR-V system.

실험결과, 초기 공극률에 따른 유전율의 변화는 공극률이 증가할수록 측정되는 유전율상수도 함께 상승하는 것으로 측정되었다. 이는 흙 입자 사이의 공극이 증가함에 따라 상대적으로 함수비의 함량이 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 물의 유전율상수가 약 80 정도로 다른 매질에 비해 매우 높기 때문에 함유된 함수비의 비율에 따라 높은 유전율 측정치가 나타났기 때문이다. 그러나, 포화된 흙 칼럼에 에탄올 ($\epsilon_{eth} = 15$)을 주입함에 따라 유전율상수의 변화는 급격히 감소하는 것으로 측정되었다. 이러한 현상은 포화된 흙 입자 사이의 공극 내부로 에탄올이 침투하여 이동하기 때문에 유전율상수의 변화가 발생하였으며, 이것은 에탄올과 같은 액상의 물질이 이동할

Table 2. Variation of dielectric constant of saturated sands measured with FDR-V system.

Sand	No	Dielectric const.		Initial n	Inj. test		Rep. test n _e	Sat. Sr (%)
		ε _{initial}	ε _{final}		n'	n _e '		
Standard	S1	31.13	8.23	0.354	0.359	0.344	0.332	99.38
	S2	30.53	8.49	0.358	0.351	0.345	0.336	99.41
	S3	29.98	8.75	0.355	0.355	0.331	0.316	99.26
	S4	33.24	9.74	0.405	0.388	0.379	0.386	99.31
	S5	33.75	9.29	0.404	0.395	0.385	0.368	99.24
	S6	33.23	9.70	0.408	0.388	0.383	0.357	99.46
	S7	36.75	12.08	0.440	0.435	0.383	0.394	99.02
	S8	36.02	12.12	0.450	0.425	0.394	0.416	98.94
	S9	37.12	11.44	0.440	0.440	0.393	0.406	99.28
River	R1	31.64	9.51	0.352	0.364	0.324	0.313	99.60
	R2	28.83	10.16	0.350	0.327	0.312	0.271	99.39
	R3	29.12	9.35	0.354	0.331	0.329	0.301	99.53
	R4	34.65	10.02	0.400	0.406	0.369	0.370	99.48
	R5	33.12	9.09	0.402	0.386	0.386	0.361	99.61
	R6	34.15	9.76	0.398	0.399	0.371	0.347	99.31
	R7	37.99	11.94	0.450	0.450	0.398	0.416	99.57
	R8	38.12	10.57	0.448	0.451	0.417	0.405	99.35
	R9	38.78	11.13	0.450	0.460	0.410	0.411	99.51

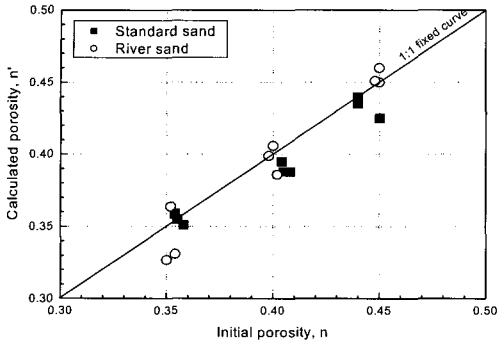
Dielectric constant (Dielectric const.), Injection test (Inj. test), Replacement test (Rep. test), and Saturation (Sat. Sr(%)). n' and n_e' are calculated porosity and effective porosity by using dielectric mixing models.

수 있는 흙의 유효공극으로 판단할 수 있다.

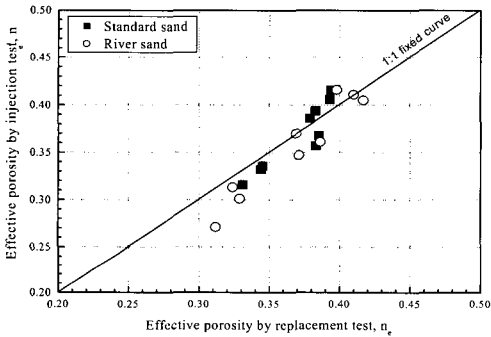
본 실험에서 측정된 포화된 흙에 대한 초기 공극률과 측정된 유전율상수를 유전율 믹싱모델에 적용하여 계산된 공극률에 대해서 검토하였다. 표준사의 경우, 유전율 믹싱모델에 의해 계산된 공극률은 0.351 - 0.355, 0.388 - 0.395 및 0.425 - 0.440 범위 내에서 측정되었다. 이를 평균 초기 공극률과 비교해 보면, 측정된 공극률은 최대 2 % 내외의 오차범위를 확인할 수 있었다. 특히, 평균 초기 공극률이 0.406에 대해서는 모델에 의해 계산된 공극률은 0.390으로 약 3.9 % 이내의 오차가 있는 것으로 나타났다. 또한, 강모래에서는 초기 공극률에 대해 전반적으로 유전율상수에 의해 계산된 공극률은 다소 낮게 측정되었으나, 각 평균치와 비교해 비슷한 측정치의 범위를 보이고 있

다. 그러나 초기 공극률인 0.35 범위 내에서는 측정된 공극률의 오차는 약 3 % 이내로 나타났다. Figure 6(a)에서 보는 바와 같이, 결과적으로 초기 공극률과 제시된 유전율 믹싱모델을 적용해 계산된 공극률에 대한 관계는 유전율 믹싱모델에 의해 계산된 공극률이 비교적 다소 낮게 측정되었으나 초기 공극률과 비교해 표준사 및 강모래 모두 약 4 % 이내에 분포하는 것으로 측정되었다.

포화된 흙 칼럼의 유효공극률은 에탄올 주입 실험과 치환실험을 함께 실시하여 측정된 유효공극률의 상관관계를 검토하였다. 여기서, 주입실험은 유전율상수의 측정치에 대해 유전율 믹싱모델을 적용하여 유효공극률을 계산하였으며, 치환실험은 포화된 흙 내부에 존재하는 에탄올의 농도에 따



(a) Relationship between initial and calculated porosities.



(b) Relationship between measured effective porosities by injection and replacement tests.

Fig. 6. Results of porosity and effective porosity of saturated sands by FDR-V system.

라 포화된 에탄올의 체적량을 측정하여 유효공극률을 계산하였다. 따라서, 두 실험을 통해 측정된 유효공극률의 상관관계로부터 FDR-V 시스템의 적용성을 파악하였다. 측정된 주입시험 결과에서 포화된 흙 칼럼들의 유효공극률은 유전을 믹싱모델을 적용하여 계산된 측정치가 치환시험의 결과보다 다소 높은 측정치를 보이는 것으로 측정되었다 (Table 2와 Figure 6(b)). 이러한 원인은 FDR-V 시스템에 의해 측정된 유전율의 측정치가 CMP가 설치된 특정 지점에서의 에탄올 주입에 따른 변화만을 나타내기 때문이다. 그러나, 에탄올 치환시험에서 측정된 유효공극률은 포화된 흙에 포함되어 있는 에탄올 농도의 변화를 나타내는

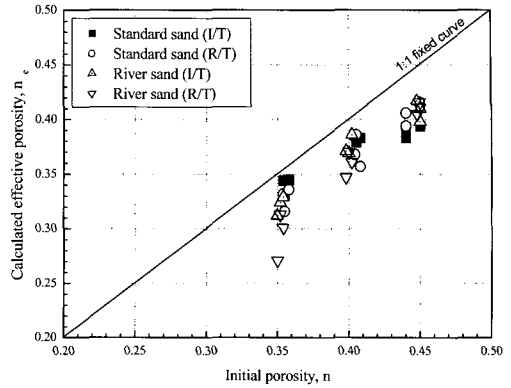


Fig. 7. Ratios of porosity and effective porosity of saturated sands (I/T; injection test & R/T; replacement test).

것으로써 흙의 전 공극에 존재하는 에탄올의 부피를 의미한다. 위 실험들에서 얻어진 유효공극률을 초기 공극률에 대한 관계를 Figure 7에 도시하였다. 일반적으로 사질토의 경우, 유효공극률은 공극률에 대해 약 90 % 내외에 존재하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 측정된 유효공극률의 분포범위는 초기 공극률에 비해 약 85 - 92 % 범위 내에서 분포하고 있는 것으로 알 수 있다.

결론

지반을 대상으로 다양한 형태를 지니고 있는 물질의 침투 내지 이동은 다공질 매질의 물리적 특성인 공극률 및 유효공극률과 같은 미세한 공간을 통하여 이동이 이루어진다. 그러므로, 이러한 파라미터들은 지반 내에서 물질 이동을 제공하는 공간적 의미를 이해하는데 매우 중요한 개념이며, 또한 일정 지역의 지하수 함양량 산출 및 지하법 건설시 추정 지하수 저류량을 산정하기 위한 반드시 필요한 요소 중의 하나이다. 그렇지만, 현재까지 지반의 공극률과 유효공극률을 산정하기 위해 현장 보링 홀 (boring hole)을 이용한 추적자 시험이 일반적으로 이루어지고 있다. 이러한 추적자 시험은 경제적 및 시간적으로 많은 제약을 받

고 있는 실정이다.

본 연구에서는 지반을 구성하고 있는 다양한 매질에 대한 유전율상수의 특성을 파악하여 다공질 매질의 물리적 특성을 신속하고 정량적으로 측정할 수 있는 새로운 유전율 측정법인 FDR-V 시스템 측정법과 측정된 유전율상수를 적용하여 매질의 공극률과 유효공극률을 유도할 수 있는 유전율 믹싱모델을 제안하였다. 초기 공극률 0.35, 0.40 그리고 0.45의 범위 내에서 포화된 표준사와 강모래를 대상으로 에탄올 주입실험과 치환실험을 실시하여 정량적인 공극률 및 유효공극률을 측정하였다. FDR-V 시스템을 적용하여 포화된 흙에 대한 실험결과는 아래와 같이 서술하였다.

1) 초기 공극률 0.40 및 0.45에 대해 각각의 체적함수비로 제작된 표준사와 강모래에 대한 유전율상수의 관계를 검토한 결과, 0.2 cc/cc 이하의 체적함수비 조건에서는 Topp의 결과와 비슷한 결과를 보이고 있으나 체적함수비가 증가할수록 각 흙 시료의 유전율상수의 측정치는 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 흙의 밀도 및 구성입자의 분포에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 공극률에 대한 체적함수비가 50 % 범위까지는 측정된 유전율상수를 적용하여 다공질 매질에 대한 체적함수비의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

2) 포화된 흙의 초기 공극률과 제시된 유전율 믹싱모델 (식 (1)과 (3))에 대해 측정된 초기 유전율상수 ($\epsilon_{initial}$)를 적용하여 계산된 공극률과 비교한 결과, 두 종류의 공극률은 약 2 - 4 % 이내의 범위 내에서 서로 비슷한 결과치를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 측정된 유전율상수의 반응에 따라 유전율 믹싱모델을 적용하여 포화된 흙의 공극률을 충분히 추정 가능할 것으로 판단된다.

3) FDR-V 시스템을 적용해 에탄올 주입실험과 치환실험 결과, 측정된 각 실험의 유효공극률은 에탄올 주입실험에서 측정된 최종 유전율상수 (ϵ_{final})를 대입하여 유전율 믹싱모델 (식 (2)와 (4))로 계산된 측정치가 치환실험의 결과치 보다 약 2 - 3 % 정도의 범위에서 차이를 보이고 있다. 이것은 유전율을 측정하는 동축측정프로브(CMP)의 측정부에서 측정범위가 CMP가 설치된 흙 칼럼의 특징지점 (3.5 cm 부근)에서만 이루어

졌기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 포화된 흙 시료의 전 체적에 대한 에탄올의 농도로부터 계산된 치환실험의 결과와 비교해 볼 때, 측정된 유효공극률들은 상호 비슷한 측정범위 내에서 분포하는 것으로 판단된다. 따라서, 포화된 다공질 매질에 대한 유효공극률의 측정은 주입물질인 에탄올의 주입에 따른 유전율상수의 변화만으로 매우 정량적인 결과치를 유도할 수 있을 것으로 사료된다.

4) 포화된 두 흙에서 측정된 유효공극률은 초기 공극률과 비교해 볼 때, 약 85 - 92 % 내외에 존재하는 것으로 나타났다. 특히, 유효공극률의 분포는 공극률이 증가할수록 상대적으로 함께 증가하는 경향을 갖는 것으로 나타났다.

이러한 결과들은 다공질 매질에 대한 공극률 및 유효공극률의 측정 가능성을 충분히 보여주고 있다. 뿐만 아니라, 포화된 지반에 대한 이러한 파라미터들의 측정만으로도 지하수 등의 수자원 관리 및 이용에 매우 효과적인 자료를 제공해 줄 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

- 정교철, 손호웅 편역, 2000, 지반조사 및 토질시험 결과해석과 적용, 엔지니어즈, p. 448.
- 한정상, 1999, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.
- Adrin, T., 2002, Shear strength behavior and hydrologic response of residual soil slope to rainfall, Ph.D. thesis, Okayama University, Japan.
- Chan, C.Y., and Knight, R.J., 1999, Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials, Water Resources Research, 35(1), p. 85-93.
- Hokett, S.L., Chapman, J.B., and Russell, C.E., 1992, Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock, Journal of hydrology, 138, p. 89-96.

Huisman, J.A., Sperl, C., Bouten, W., and Verstraten, J.M., 2001, Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar, *Journal of Hydrology*, 245, p. 48-58.

Jackson, S.H., 2003, Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites, *Agricultural water management*, 58, p. 209-222.

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.

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.

Santamarina, J.C., Klein, K.A., and Fam, M.A., 2001, *Soils and waves*, John Wiley & Sons Ltd, England, p. 488.

Shackelford, C.D., and Redmond, P.L., 1995, Solute breakthrough curves for processed kaolin at low flow rates, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121(1), p. 17-32.

Tada, H., 1994, Study on the infiltration characteristics of the clay soils, Master thesis, Okayama University, Japan. (In Japanese)

Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16(3), p. 574-582.

투 고 일	2003년 9월 19일
심 사 일	2003년 9월 20일
심사완료일	2003년 10월 22일

김만일 (Man-Il Kim)
 Graduate School of Natural Science and Technology,
 Okayama University, 3-1-1, Tsushimanaka,
 Okayama 700-8530, JAPAN
 TEL : +81-90-8249-3549
 FAX : +81-86-251-8160
 E-mail : mikim@gw.civil.okayama-u.ac.jp

니시가끼 마코토 (Makoto Nishigaki)
 Department of Environmental and Civil Design,
 Faculty of Environmental Science and echnology,
 Okayama University, 3-1-1, Tsushimanaka,
 Okayama 700-8530, JAPAN
 TEL : +81-86-251-8164
 FAX : +81-86-251-8866
 E-mail : n_makoto@cc.okayama-u.ac.jp