

## 고주파수 전자기파를 이용한 압밀 포화토 물성치 측정을 위한 연구

### A study on measurement of physical parameters using electromagnetic wave of the compacted saturated soil

김만일<sup>1)</sup>, Man-Il Kim, 김형수<sup>2)</sup>, Hyoung-Soo Kim, 석희준<sup>3)</sup>, Heejun Suk

<sup>1)</sup> 한국수자원공사, 수자원연구원 지하수지반연구소 박사후연구원, Post-Doctoral Researcher, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO.

<sup>2)</sup> 한국수자원공사, 수자원연구원 지하수지반연구소 소장, Director, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO.

<sup>3)</sup> 한국수자원공사, 수자원연구원 지하수지반연구소 선임연구원, Senior Researcher, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO.

**개요(SYNOPSIS) :** Physical parameters such as 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, a new permittivity method called Frequency Domain Reflectometry with Vector analyzer (FDR-V) is proposed 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 measurement system of FDR-V permittivity holds a great potential in porous media and contaminant transport studies.

**주제어(Key words) :** dielectric constant, volumetric water content, compacted saturation soil, porosity, effective porosity

## 1. 서론

지반을 대상으로 강우에 의한 지하수 함양 및 지표에서 누출된 오염물질의 유입 등을 평가하기 위해서는 지반의 물리적 특성인 공극률 및 유효공극률을 파악하는 것이 우선적으로 이루어져야만 한다. 또한, 최근에 대두되고 있는 수자원 보호 및 효율적 이용을 목적으로 미고결 자유면 대수층인 충적층을 대상으로 건설 중인 지하댐의 경우, 대상 지역의 지하수 저류능력을 추정하기 위해서는 지반의 공극률 (porosity,  $n$ ) 및 유효공극률(effective porosity,  $n_e$ )에 대한 측정이 선행되어야만 한다.

일반적으로 다공질매질의 체적함수비(volumetric water content,  $\theta$ )는 공극의 분포와 매우 밀접한 관계

를 가지고 있으므로, 완전 포화된 다공질매질의 체적함수비는 공극률을 의미한다(Santamarina et al., 2001). 이러한 매질의 체적함수비 측정법은 다양하지만, 그 중에서도 Time domain reflectometry(TDR) 측정법은 체적함수비를 비교적 간단한 절차에 의해 측정이 가능하다(Jackson, 2003; Huisman et al., 2001; Chan and Knight, 1999; Hokett et al., 1992; Topp et al., 1980).

본 연구에서는 Frequency domain reflectometry with vector network analyzer(FDR-V) 장치를 이용해압밀 포화된 흙시료에 대한 유전율상수의 반응관계로부터 이들의 체적함수비, 공극률 및 유효공극률의 측정이 가능한 유전율혼합모델(dielectric mixing model)을 제시하였다. 또한, 제작된 흙시료에 대해 에탄올주입시험(ethanol injection test)을 통하여 측정된 유전율상수 변화로부터 이러한 물성치의 측정 가능성을 검토하였다.

## 2. 흙시료 및 시험방법

### 2.1. 흙시료

본 연구에서는 입도가 균등한 표준사(Standard sand)와 입도가 불균질한 강모래(River sand) 등 두 종류의 흙을 사용하였으며, 이들의 물성치를 파악하기 위해 일반적으로 체분석(sieve test)을 통해 유도된 입도분포곡선을 이용하여 유효입경(D10), 균등계수(Uniformity coefficient, Cu) 및 곡률계수(Curvature coefficient, Cc)을 산정하였다. 이들은 흙의 투수특성, 전단특성, 압축특성 및 입도분포 상태를 파악할 수 있다(Head, 1980). 분석결과는 표 1과 그림 1에 도시하였다.

표 1. 흙의 물성치

Material	Distributions of particle size (%)				Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Curvature coefficient (Cc)	Uniformity coefficient (Cu)
	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	0.938	1.727
River sand	15.50	81.70	2.80	1.00	2.69	1.710	7.029

\*) Liquid plastic limit of standard sand and river sand is NP state.

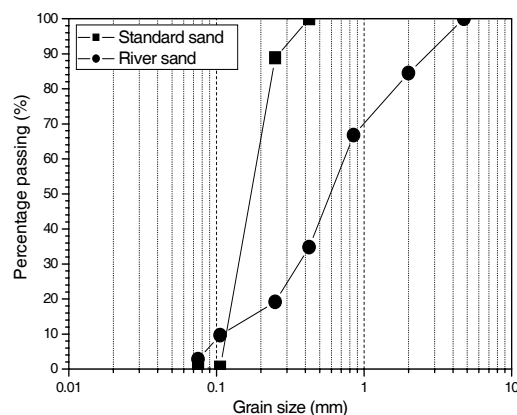


그림 1. 흙의 입도가적곡선

## 2.2 시험방법

본 연구에서는 1GHz에서 18GHz의 고주파수 범위 내의 전자기파를 이용하여 다공질매질의 유전율상수의 변화를 측정할 수 있는 FDR-V 시스템을 적용하였다. 본 시스템은 기본적으로 벡터네트워크분석기(Vector Network Analyzer, VNA), 접지단자박스(Switch Unit Box, SUB), 동축전송선(50Ω)으로 연결된 동축측정프로브(Coaxial Measurement Probe, CMP), 시스템 운영 및 분석자료를 저장할 수 있는 자료수집기(Data logger)로 구성되어 있다. 여기서, 매질의 유전율상수 측정은 CMP에서 이루어지며, 측정치는 자료수집기에서 자동 저장된다. CMP에서 유전율 측정범위는 CMP 끝부분의 직경 0.36cm 주변에서만 이루어지기 때문에 매질의 정확한 지점에서 측정이 가능하다.

두 종류의 흙에 대한 공극률과 유효공극률을 측정하기 위하여 직경 5cm, 높이 7cm의 원통형 아크릴로 제작된 칼럼 상단부에 CMP를 설치할 수 있도록 고안하였다. 완전 포화상태의 흙시료 제작은 이산화탄소가스(CO<sub>2</sub> gas)와 증류수(distilled water)를 사용하여 각각의 초기공극률 0.35, 0.40, 0.45로 압밀 제작하였다. 여기서, 제작된 흙칼럼의 포화도 측정은 역압력주입(back pressure) 시험법에 의거하여 각각 측정되었다(Shackelford and Redmond, 1995).

주입물질인 에탄올은 흙칼럼 하단부로부터 주입을 실시하여 상단부에 설치된 유출밸브를 통하여 서서히 유출되도록 장치하였다. 이렇게 주입된 에탄올은 포화된 흙 내부로 지속적으로 침투 이동하여 공극 내의 공극수와 치환되면서 유전율상수의 변화가 발생한다. 이 때, 흙칼럼 상단부로부터 3.5cm 깊이를 유지하며 수직으로 삽입 설치된 CMP 측정부에서 에탄올 주입에 따른 포화된 흙시료의 유전율상수 변화를 일정시간 간격으로 측정하였다(그림 2).

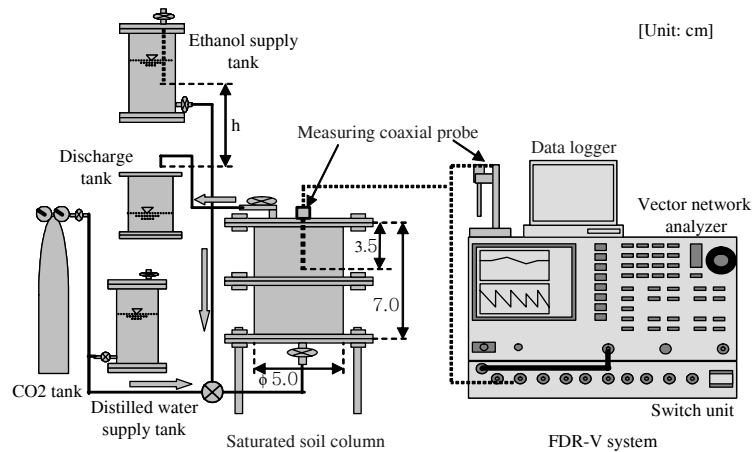


그림 2. FDR-V 측정장비의 구성 및 시험 모식도

포화 압밀 흙시료의 파악하기 위하여 흙칼럼에서 측정된 유전율상수의 변화로부터 다음과 같은 유전율혼합모델을 제안하였다. 여기서, 그림 3은 포화된 흙 구조에서 물질 이동의 과정을 설명하고 있다. 즉, 흙 입자들 사이의 공극이 물로 완전히 포화되어 있는 상태로 존재하며, 액상의 물질이 주입될 경우 공극이 연결된 부분에서만 물질 이동이 진행된다. 따라서 포화된 흙 내부에서 물, 흙입자, 흙의 밀도 등의 상호관계로부터 유전율상수의 변화가 발생한다. Noborio (2001)에 따르면 일반적으로 대표적인 유전율상수인 물( $\epsilon_w$ )은 섭씨 20°C의 일정한 온도 하에서 80~81, 흙( $\epsilon_s$ )은 2.5~3.5 정도의 상수를 갖는 것으로 알려져 있다.

이러한 포화 압밀된 흙매질의 구조를 유전율상수의 관계로 조합해 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

즉, 일정한 체적으로 제작된 흡시료에 있어 공극을 제외한 흡의 유전율상수는  $(1-n')\epsilon_s$ 이며, 공극 내에 존재하는 물의 유전율상수는  $n' \cdot \epsilon_w$ 으로 나타낼 수 있다. 이러한 유전율상수의 조합은 에탄올주입시험 전의 포화된 흡시료의 초기유전율상수이다. 그러므로 식(1)의 유전율혼합모델로부터 측정된 유전율상수의 측정치만으로 포화 압밀된 흡시료의 공극률을 계산할 수 있다. 뿐만 아니라, 포화된 흡 내부로 액상의 물질이 침투 이동할 경우, 식(1) 주입물질인 에탄올에 대한 유전율상수를 결합하면 유효공극률의 측정도 가능하다. 이는 물로 포화된 흡의 연결된 공극을 통하여 에탄올이 침투 이동하기 때문에 연결된 공극의 상태를 유효공극(effective pore)으로 고려할 수 있다.

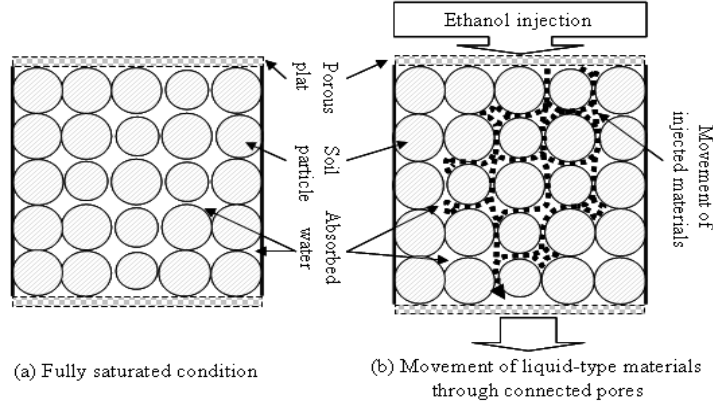


그림 3. 포화토내에서 에탄올 주입물질의 이동경로

즉, 식(2)에서와 같이, 흡에 대한 유전율상수는 변화가 없지만, 포화된 흡 내부로 에탄올의 주입에 의해 공극 내에 분포하고 있는 물의 유전율상수는  $(n' - n_e')\epsilon_w$ 로 변화되면서 흡의 유효공극 내부로 에탄올이 침투 이동에 의해 에탄올의 유전율상수는  $n_e' \cdot \epsilon_{eth}$ 으로 나타난다.

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

위의 두 식을 아래와 같이 정리할 수 있다.

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

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

여기서,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_w$ ,  $\epsilon_{eth}$ 은 각각 흡, 물, 에탄올에 대한 유전율상수를 나타내며,  $\epsilon_{ini}$  과  $\epsilon_{fin}$ 은 포화된 흡의 측정된 초기 및 최종유전율상수를 의미한다. 그리고  $n'$ 와  $n_e'$ 는 유전율혼합모델을 적용해 계산된 공극률과 유효공극률이다.

### 3. 시험결과 및 토의

#### 3.1 유전율상수-체적함수비

지반에 대한 체적함수비의 측정은 강우에 의한 침투수의 지하수 함양 및 오염물질의 침투 이동에 대한 해석을 위해선 매우 중요한 물성치이다. 특히, 절개사면에 있어 강우에 의한 사면파괴의 요인으로 작

용하는 현장체적함수비(in-situ volumetric water content)는 흙의 역학적 특성을 이해하는데 반드시 필요한 요소 중의 하나이다.

유전율상수 변화에 따른 흙의 체적함수비를 판단하기 위해서 본 시험에서는 초기공극률 0.40, 0.45로 제작된 두 종류의 흙에 대해 체적함수비를 단계적으로 변화시켜 Topp (1980) 등이 제시한 결과와 상관 관계를 검토하였다(그림 4).

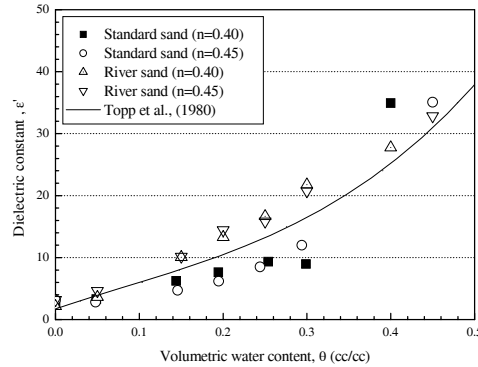


그림 4. 유전율상수와 체적함수비의 관계

시험 결과, 표준사는 체적함수비가 0.30 이하에서 Topp의 교정곡선(calibration curve)보다 다소 낮게 측정되었지만, 0.30 이상의 범위에서는 높은 측정치로 나타났다. 또한, 강모래는 측정된 체적함수비 범위 내에서 전반적으로 이것보다 다소 높은 유전율상수의 분포를 보이고 있다. 이 두 흙에 대한 유전율상수의 측정치 변화가 제시된 Topp의 결과치에 비해 다소 차이를 보이는 것은 시험에 적용된 흙의 밀도와 입도 분포의 영향으로 판단된다. 특히, 체적함수비 0.10에서 0.30 범위 내에서 표준사와 강모래의 유전율상수의 분포는 Table 1에서와 같이 세립질 흙의 함량 비율에 의한 영향으로 판단된다. 이는 Jacobsen과 Schjønning (1993)에 의하면 동일한 체적함수비를 갖는 조건에서 유전율상수는 세립질 보다는 조립질로 구성된 흙에서 더 크게 측정되는 것을 언급하였다. 즉, Topp (1980) 등의 시험에 사용된 시료는 점토 및 실트 등 같은 세립질 흙을 대상으로 시험이 이루어졌지만, 본 시험에서는 조립질의 흙을 사용함에 따라 흙의 유전율상수 변화에 미미한 차이가 나타난 것으로 판단된다.

### 3.2 유전율상수-포화 흡수로 물성치

포화된 흡칼럼의 공극률과 유효공극률을 측정하기 위해 에탄올주입시험과 치환시험을 각 초기공극률 0.35, 0.40, 0.45를 갖는 포화된 흙에 대해 FDR-V 시스템을 적용하여 시험을 실시하였다. 그림 5는 에탄올 주입에 따른 유전율상수 변화를 도시한 모식도이다.

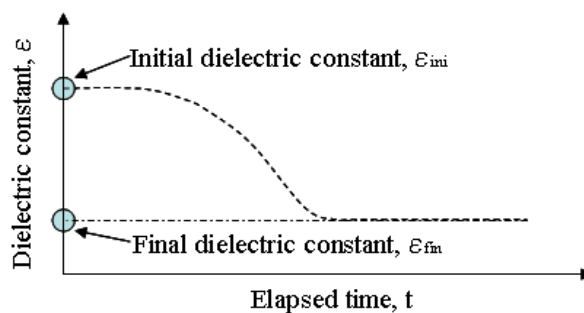
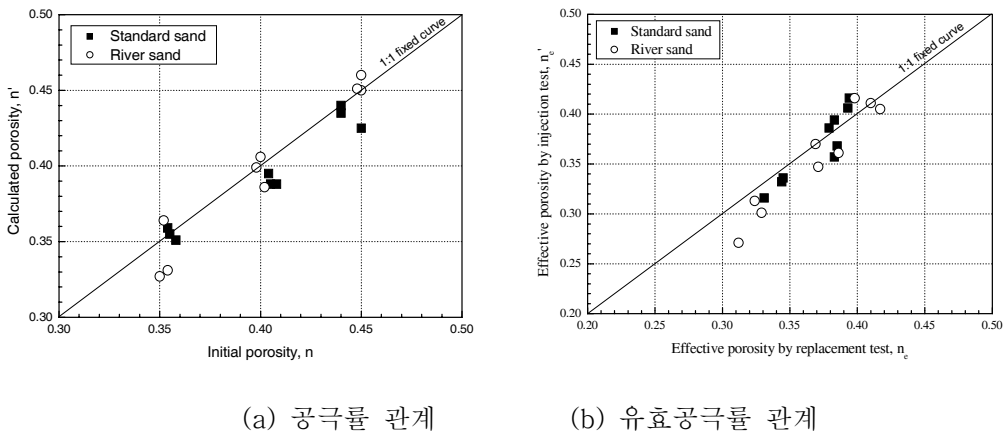


그림 5. 에탄올 주입에 따른 유전율상수의 변화 모식도

초기 및 최종유전율상수의 결과는 에탄올 주입전 과정에서 초기유전율상수가 결정되며, 최종적으로 유전율상수의 변화가 거의 없을 때를 그 시료의 최종유전율상수로 결정된다.

시험결과에서 초기공극률에 따른 유전율의 변화는 공극률이 증가할수록 측정되는 유전율상수도 함께 상승하는 것으로 측정되었다. 이는 흡입자 사이의 공극이 증가함에 따라 상대적으로 체적함수비의 함량이 높아지기 때문이다. 또한, 물의 유전율상수가 약 80 정도로 다른 매질에 비해 매우 높기 때문에 함유된 체적함수비의 비율에 따라 높은 유전율 측정치가 나타났다. 그러나 포화된 흡시료에 대해 에탄올 ( $\epsilon_{eth}=15$ )을 주입함에 따라 유전율상수의 변화는 급격히 감소하는 것으로 측정되었다. 이러한 원인은 포화된 흡입자 사이의 상호 연결된 공극 내로 에탄올이 침투하여 이동하기 때문에 유전율상수의 변화가 발생하였으며, 이것은 에탄올과 같은 액상의 물질이 이동할 수 있는 흡의 유효공극으로 판단할 수 있다. 본 시험에서 측정된 포화된 흡에 대한 초기공극률과 측정된 유전율상수를 유전율혼합모델에 적용하여 계산된 공극률과의 관계를 검토하였다. 표준사의 계산된 공극률은 0.351~0.355, 0.388~0.395, 0.425~0.440 범위 내에서 측정되었다. 이를 평균 초기공극률과 비교해 보면, 측정된 공극률은 최대 2% 내외의 오차범위를 확인할 수 있었다. 특히, 평균 초기공극률이 0.406에 대해서는 유전율혼합모델에 의해 계산된 공극률은 0.390으로 약 3.9% 이내의 측정오차가 있는 것으로 나타났다.



(a) 공극률 관계 (b) 유효공극률 관계

그림 6. 유전율혼합모델을 이용한 포화토의 물성치

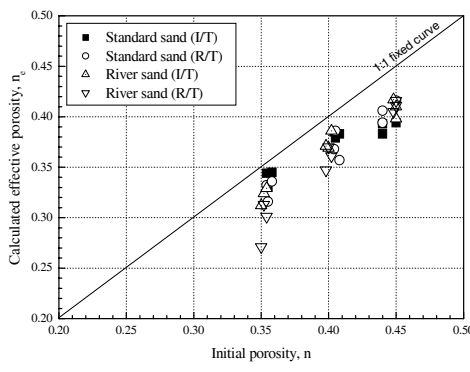


그림 7. 포화토의 공극률과 유효공극률의 상관관계 (I/T: 주입시험, R/T: 치환시험)

또한, 강모래에서는 초기공극률에 대해 전반적으로 유전율상수에 의해 계산된 공극률은 다소 낮게 측정되었으나, 각 평균치와 비교해 비슷한 측정치의 범위를 보이고 있다. 그러나 초기공극률인 0.35 범위 내에서는 측정된 공극률의 오차는 약 3% 이내로 나타났다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이, 결과적으로

초기공극률과 제시된 유전율혼합모델을 적용해 계산된 공극률에 대한 관계에서 전자보다 후자가 다소 낮게 측정되었으나, 초기공극률과 비교해 표준사 및 강모래 모두 약 4% 이내에 분포하는 것으로 측정되었다.

포화된 흙시료의 유효공극률은 에탄올주입시험과 치환시험을 함께 실시하여 측정된 유효공극률의 상관관계를 검토하였다. 여기서, 주입시험은 유전율상수의 측정치에 대해 유전율 믹싱모델을 적용하여 유효공극률을 계산하였으며, 치환시험은 포화된 흙 내부에 존재하는 에탄올의 농도에 따라 포화된 에탄올의 체적량을 측정하여 유효공극률을 계산하였다. 측정된 주입시험 결과에서 포화된 흙시료들의 유효공극률은 유전율혼합모델을 적용하여 계산된 측정치가 치환시험의 결과보다 비교적 낮은 측정치를 보이는 것으로 나타났다(그림 6(b)). 이러한 원인은 FDR-V에 의해 측정된 유전율 측정치가 CMP가 설치된 특정 지점에서의 에탄올 주입에 따른 변화만을 나타내기 때문이다. 그러나 에탄올 치환시험에서 측정된 유효공극률은 포화된 흙에 포함되어있는 에탄올 농도의 변화를 나타내는 것으로써 흙의 전 공극에 존재하는 에탄올의 부피를 의미한다. 위 시험들에서 얻어진 유효공극률을 초기공극률에 대한 관계를 그림 7에 도시하였다. 일반적으로 사질토의 경우, 유효공극률은 공극률에 대해 약 90% 내외에 존재하는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서 측정된 두 포화된 흙의 유효공극률 분포범위는 초기공극률에 비해 약 85~92% 범위 내에서 존재하는 것을 보여준다.

#### 4. 결론

지반을 대상으로 다양한 형태를 지니고 있는 물질의 침투 내지 이동은 다공질매질의 물리적 특성인 공극률 및 유효공극률과 같은 미세한 공간을 통하여 이동이 이루어진다. 그러므로 이러한 파라미터들은 지반 내에서 물질 이동을 제공하는 공간적 개념을 이해하는데 매우 중요한 요소이다. 또한, 일정 지역의 지하수 함양량 산출 및 지하댐 건설시 추정 지하수 저류량을 산정하기 위한 반드시 필요한 요소 중의 하나이다. 그렇지만, 현재까지 지반의 공극률과 유효공극률을 산정하기 위해 현장 조사공을 이용한 추적자시험이 일반적으로 이루어지고 있지만, 경제적 내지 시간적으로 다소 제약을 받고 있는 실정이다.

본 연구에서는 지반을 구성하고 있는 다양한 매질에 대한 유전율상수의 특성을 파악함으로써 다공질매질의 물성치를 신속하고 정량적으로 측정할 수 있는 새로운 유전율 측정법인 FDR-V 측정법과 측정된 유전율상수를 적용하여 매질의 공극률과 유효공극률을 유도할 수 있는 유전율혼합모델을 제안하였다. 초기공극률 0.35, 0.40, 0.45의 범위 내에서 포화된 표준사와 강모래를 대상으로 에탄올 주입시험과 치환시험을 실시하여 정량적인 이들의 물성치를 측정하였다.

초기공극률 0.35, 0.40, 0.45에 대해 각각의 체적함수비로 제작된 표준사와 강모래에 대한 유전율상수의 관계를 검토한 결과, 0.20 이하의 체적함수비 조건에서는 Topp (1980) 등의 결과와 비슷한 결과를 보이고 있으나 체적함수비가 증가할수록 각 흙시료의 유전율상수 측정치는 다소 높게 측정되었다. 이러한 현상은 흙의 밀도, 입도분포 및 입경에 의한 것으로 판단된다. 따라서 공극률에 대한 체적함수비가 50% 범위까지는 측정된 유전율상수를 적용하여 다공질매질에 대한 체적함수비의 측정이 가능하다.

포화된 흙의 초기공극률과 제시된 유전율혼합모델(식 (1)과 (3))에 대해 측정된 초기유전율상수( $\epsilon_{mi}$ )를 적용하여 계산된 공극률과 비교한 결과, 두 흙시료의 공극률은 약 2~4% 이내의 범위 내에서 서로 비슷한 결과치를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 유효공극률은 에탄올주입시험에서 측정된 최종유전율상수( $\epsilon_{fm}$ )를 대입하여 유전율혼합모델(식(2)와 (4))로 계산된 측정치가 치환시험의 결과치보다 약 2~3% 정도의 범위에서 차이를 보이고 있다. 이것은 유전율을 측정하는 동축측정프로브(CMP)의 측정부에서 측정범위가 이것이 설치된 흙칼럼의 특정지점(3.5cm 깊이주변)에서만 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 포화된 흙시료의 전 체적에 대한 에탄올의 농도로부터 계산된 치환시험의 결과와 비교해 볼 때, 측정된 유효공극률들은 상호 비슷한 측정범위 내에서 분포하는 것으로 판단된다. 따라서 포화된 다공질매질에 대한 유효공극률의 측정은 주입물질인 에탄올의 주입에 따른 유전율상수의 변화만으로 매우 정량적인 결과치를 유도할 수 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 포화된 두 흙에서 측정된 유효공극률은 초기공극률과 비교해 볼 때, 약 85~92% 내외에

존재하는 것으로 측정되었으며, 특히, 유효공극률의 분포는 공극률이 증가할수록 상대적으로 함께 증가하는 경향을 갖는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발, 과제번호 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

## 참고문헌

1. Chan, C. Y. and Knight, R. J.(1999), "Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials", *Water Resources Research*, Vol. 35(1), pp.85~93.
2. 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*, Vol. 138, pp.89~96.
3. 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*, Vol. 245, pp.48~58.
4. Jackson, S. H.(2003), "Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites", *Agricultural water management*, Vol. 58, pp.209~222.
5. 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*, Vol. 151, pp.147~157.
6. Noborio, K.(2001), "Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 31, pp.213~237.
7. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A.(2001), "*Soils and waves*", John Wiley & Sons Ltd, England, pp.488.
8. 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), pp.17~32.
9. 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*, Vol. 16(3), pp.574~582.