

Frequency Domain Reflectometry System을 이용한 포화 다공질매질의 유전을 측정 위한 연구

김만일*¹⁾ · 정교철¹⁾

¹⁾안동대학교 지구환경과학과

A Study on the Determination of Dielectric Constant of Saturated Porous Media Using Frequency Domain Reflectometry System

Man-II Kim*¹⁾ · Gyo-Cheol Jeong¹⁾

¹⁾Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

Frequency Domain Reflectometry(FDR) system과 길이 7cm의 측정센서를 사용하여 에탄올 믹싱리퀴드(EML)를 주입함으로써 포화된 흙의 유전율상수 변화를 파악하기 위한 실내실험을 실시하였다. 측정센서에 대한 유전을 측정 범위의 확인 및 물과 동일한 비중을 갖는 EML이 포화된 흙의 공극을 통하여 이동 경로를 파악하기 위함이다. EML 확산실험에서는 포화 흙 칼럼 상단부의 배출구가 EML 주입구로부터 이격될수록 포화 흙의 공극을 통한 EML의 확산범위가 확대됨을 확인하였다. 그리고 EML 유동실험의 결과에서는 포화된 흙 칼럼에 대한 주입과 동시에 일정한 간격으로 설치된 모든 측정센서에서 유전율의 변화를 파악하였다. 따라서 EML 주입에 따른 포화 흙의 공극 내에 존재하는 물의 치환이 충분히 가능하며 공극을 통한 이동성도 함께 확인하였다.

주요어 : 유전율상수, Frequency Domain Reflectometry(FDR) system, 포화토, 에탄올 믹싱리퀴드(EML)

This study conducted a laboratory work to determine the change of dielectric constant of saturated soil porous media, which is injecting EML to use Frequency Domain Reflectometry(FDR) system and length 7cm-length measurement sensor. It is purpose of study that estimate a movement path through pore of soil for an ethanol mixing liquid(EML) which have the same specific gravity of water at 20 °C, and determine to a dielectric measuring range for the measurement sensor. As an outflow point of saturated soil column upper part recedes from an EML inject point in EML diffusion test, the diffusion extent of EML through pore of saturated soil was expanded. And results of an EML flow experiment were measured the change of dielectric constant at all measurement sensors which are placed to constant interval at the same travel time for saturated soil column. Therefore, the displace process of water that exist in pore of saturated soil by EML injection is enough available and confirm together mobility through pores.

Key words: Dielectric constant, Frequency Domain Reflectometry(FDR) system, Saturated soil, Ethanol Mixing Liquid(EML)

* Corresponding author : mikim@andong.ac.kr

서 론

지반을 대상으로 하는 다양한 형태의 지하 구조물들은 이들이 가지고 있는 고유 물성치들을 지질학적 및 공학적 분야로 고려해야할 부분들이 있다. 이러한 부분들은 지반의 효율적인 관리 및 이용에 있어 매우 중요한 요소이다. 특히 지반을 통한 다양한 형태의 오염물질의 침투로 인한 지반오염 및 강우에 의한 지하수 함양 등을 평가하기 위해서는 지반을 이루고 있는 기본 물성치를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 이러한 분야의 접근을 위해 전기공학 분야에서 이미 알려진 변수인 유전율상수를 이용하여 지반을 구성하고 있는 매질의 특성을 파악하는 측정법인 Time Domain Reflectometry(TDR) 측정법이 Topp et al. (1980)에 의해 처음 소개되었다. 이 측정법은 지반을 구성하는 기본 매질의 유전율상수 변화로부터 지반내 포함되어 있는 함수비의 측정 가능성을 보여주었다. 이에 다수의 연구자들은 이 TDR 측정법을 적용해 다양한 분야에서 지반의 물성치를 이해하기 위한 실험들을 수행하였다(Jackson, 2003; Chenaf, D., and N. Amara, 2001; Darnault et al., 2001; Yu et al., 1999; Zegelin et al., 1989).

이상과 같이 유전율 측정만으로 지반의 다양한 정보를 획득할 수 있기에 본 연구에서는 새로운 유전율 측정법인 Frequency Domain Reflectometry(FDR) system 및 측정센서를 적용하여 포화 상태의 다공질 매질에 대한 유전율상수의 변화를 실내실험을 통하여 확인하였다. 본 연구의 목적은 포화 상태로 존재하는 매질 내에서 유전율상수의 변화를 FDR system을 통하여 확인할 수 있다면 이들의 측정된 유전율상수로부터 매질의 물성치를 파악할 수 있을 것으로 판단한

다. 또한 측정센서가 설치된 주변에서 유전율상수의 변화로부터 추적자물질의 이동에 따른 측정센서의 측정범위를 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

실험시료 및 방법

본 연구에 사용한 흙 시료는 입자 분포가 균등한 표준사(standard sand)와 주변에서 쉽게 구할 수 있는 강모래(river sand)로써 각 시료에 대한 기본 물성치는 Table 1에 도시하였다. FDR system을 적용해 수행된 실험방법은 확산실험(diffusion test)과 유동실험(flow test)으로써, 주입물질은 에탄올 믹싱리퀴드(Ethanol mixing liquid, EML)이다. 이 EML은 온도 20 °C에서 물과 동일한 비중을 갖고 있어 포화된 흙에서 공극을 통해 물과 동일하게 침투 이동이 이루어진다.

포화 흙 칼럼은 가로 66cm, 세로 10cm, 높이 20cm로 칼럼의 앞면에 FDR 측정센서를 설치할 수 있도록 고안되었다. 본 연구에 사용된 측정센서의 길이는 7cm이다. 확산실험의 경우, 측정센서의 설치는 가로, 세로 5cm 간격으로 총 12개를 칼럼의 앞면에 설치하였다(Fig. 1.(a)). 또한, EML의 주입구는 칼럼의 중앙부에 설치하여 EML을 저장한 상부탱크로부터 주입이 이루어지는 주입구에 대해 20cm와 30cm 이격된 부분에 배출구를 설치하였다. 유동실험을 위한 FDR system의 설치는 총 12개의 측정센서를 높이 5cm 간격으로 3열, 10cm 및 15cm 간격으로 설치하였다. 칼럼에서의 주입구와 배출구는 양단에 15cm 간격을 두고 설치하였다(Fig. 1. (b)). 따라서 EML 저장탱크에서 에어컴프레샤(air compressor)를 사용하여 0.10 kg/cm² (수두 1 m)의 압력으로 포화된 칼럼의 주입구를 통하여 일정

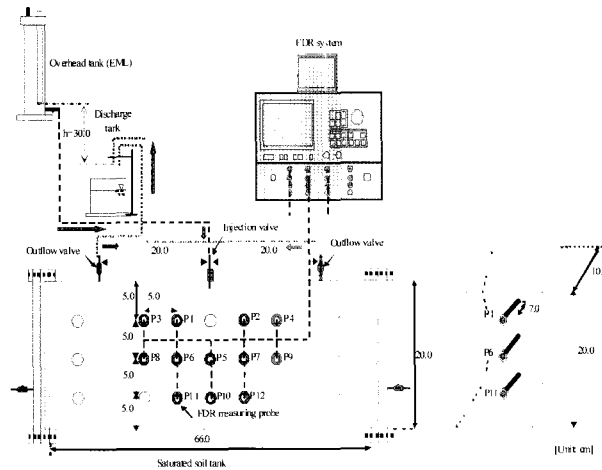
Table 1. Physical characteristics of the soils.

Experiments	Parameters	Soil materials			
		Standard sand		River sand	
		SS-1	SS-2	RS-1	RS-2
EML diffusion	Specific gravity	2.65	2.65	2.69	2.69
	Porosity	0.40	0.40	0.40	0.40
	Saturation (%)	99.20	99.20	99.48	98.92
EML flow	Porosity		0.365		0.341
	Inj. pressure (kg/cm ²)		0.10		0.10
	Saturation (%)		99.01		99.27

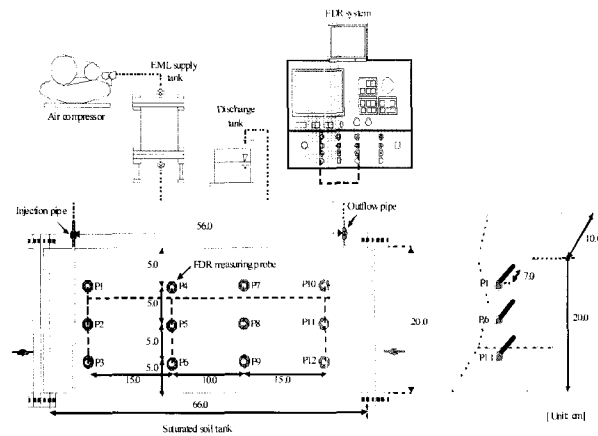
하게 주입하였다.

각 포화 상태의 칼럼 제작은 칼럼 내에 흙 시료를 넣은 후 칼럼 하단부로부터 이산화탄소를 주입하여 흙의 공극 내에 들어있는 공기와 치환시켰다. 일정 시간 이산화탄소를 주입한 후 증류수를 24시간 서서히 주

입시켰다. 이렇게 제작된 포화 흙 칼럼의 포화도 (degree of saturation)는 Back pressure method를 통하여 각 칼럼의 포화도를 측정하였다(Tada, 1994; Campbell, 1973).



(a) EML diffusion test



(b) EML flow test

Fig. 1. Schematic diagrams for estimating EML diffusion and EML flow in the saturated soil column by FDR system.

실험결과 및 고찰

EML 확산에 따른 유전율 변화

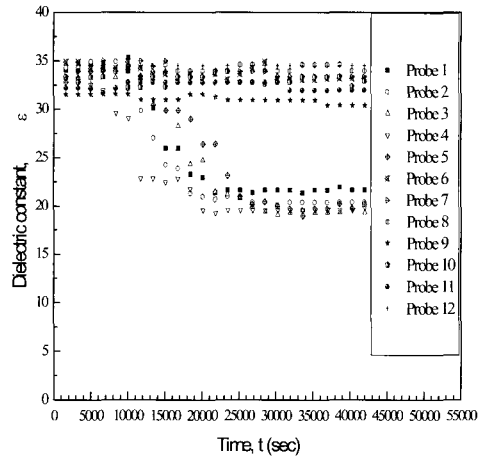
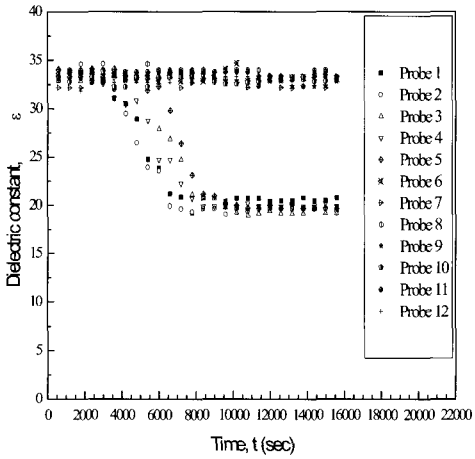
주입수두 30cm로 EML을 지속적으로 공급률이 0.40인 각 포화 표준사와 강모래 칼럼에 주입하는 EML 확산실험을 수행하였다. 주입 전의 포화 흙의 유전율상수는 33~34 정도의 범위 내에서 비슷한 측정

치를 보였으나, EML 주입에 따라 점진적으로 유전율상수가 감소하는 변화를 확인할 수 있었다(Table 2).

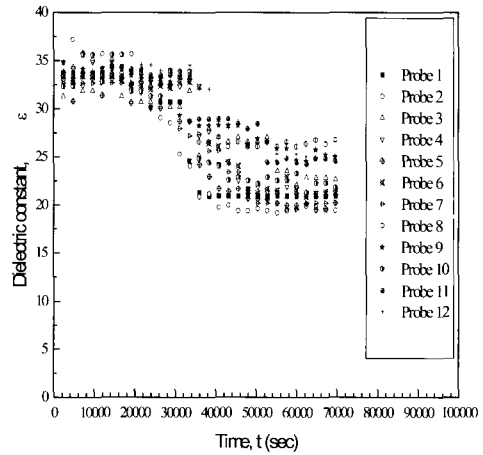
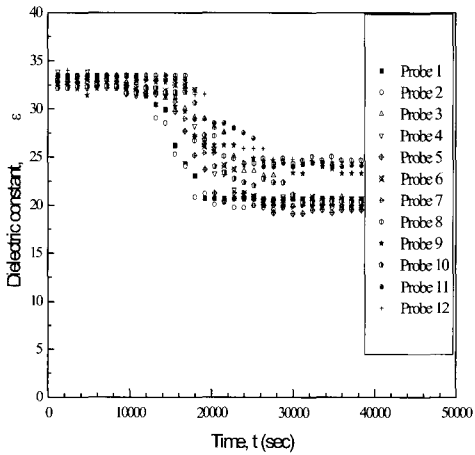
주입구로부터 배출구의 간격을 달리하여 포화 흙의 유전율상수 변화를 파악하기 위해 배출구의 간격을 20cm에서 30cm로 넓힌 후 실험을 한 결과, EML의 확산 범위가 매우 넓어짐을 알 수 있었다. Fig. 2는 두 포화된 흙에 대한 배출구의 위치를 달리하여 측정된 유전율상수의 변화 양상을 보여주고 있다. 배출구가

Table 2. Variations of dielectric constants of saturated soil column during EML diffusion test (Temperature 20 °C).

Sands	Installed probe No.	Installed distances of outflow valves from injecting point			
		20 cm (SS-1, RS-1)		30 cm (SS-2, RS-2)	
		Initial ϵ	Final ϵ	Initial ϵ	Final ϵ
Standard, SS	P1	33.164	20.754	33.469	20.684
	P2	33.981	19.378	33.047	19.738
	P3	32.898	19.139	32.267	20.079
	P4	33.214	19.864	33.899	20.365
	P5	34.054	19.684	32.797	19.515
	P6	33.665	33.067	33.127	20.588
	P7	32.168	33.325	32.454	19.984
	P8	33.353	33.067	33.496	24.633
	P9	33.186	32.815	32.729	23.283
	P10	33.302	33.302	32.140	20.304
	P11	33.228	33.228	32.925	24.132
	P12	32.984	33.318	33.395	24.484
River, RS	P1	34.054	21.637	33.714	20.929
	P2	34.302	20.382	33.047	19.411
	P3	33.272	19.282	31.267	22.629
	P4	33.214	19.832	34.851	32.317
	P5	32.791	20.195	33.771	20.217
	P6	34.879	33.170	33.451	21.381
	P7	33.384	33.325	32.685	20.215
	P8	33.353	33.974	33.353	26.750
	P9	31.562	30.394	34.811	24.998
	P10	33.355	32.885	32.304	21.797
	P11	32.217	31.977	33.337	24.544
	P12	33.323	34.535	33.927	25.016

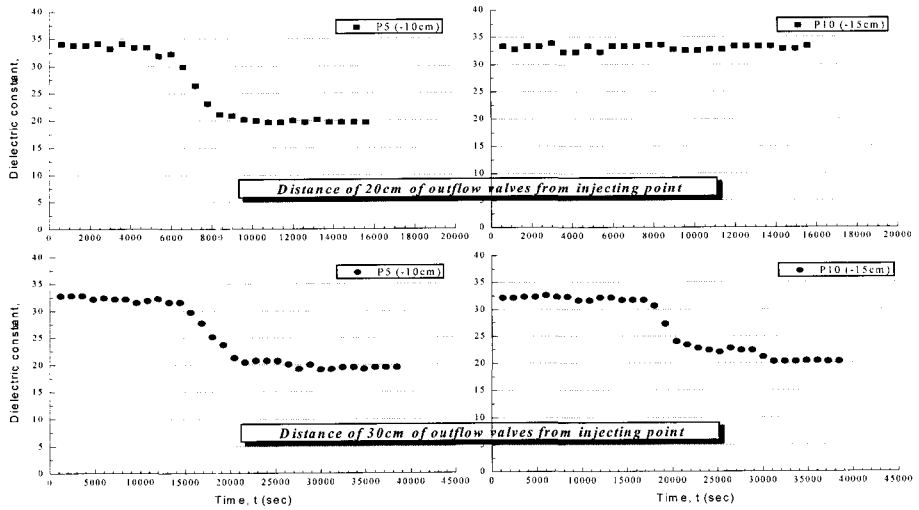


(a) 20cm intervals from injecting point of standard sand, SS-1 (c) 20cm intervals from injecting point of river sand, RS-1

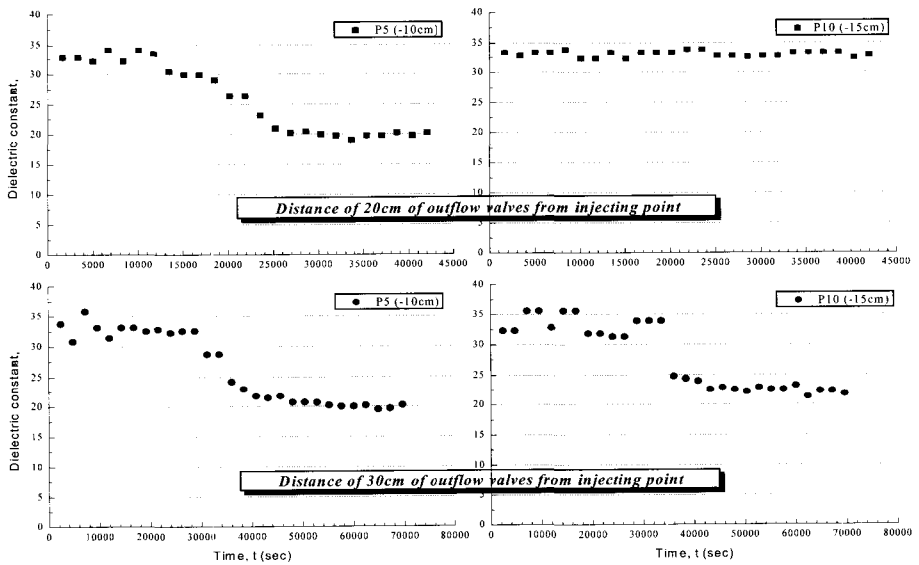


(b) 30cm intervals from injecting point of standard sand, SS-2 (d) 30cm intervals from injecting point of river sand, RS-2

Fig. 2. Response of measured dielectric constants for each measurement sensor (Temperature 20 °C).



(a) Saturated standard sand



(b) Saturated river sand

Fig. 3. Vertical spread extents of EML on the measurement sensor No. 5 and 10 (Temperature 20 °C).

EML의 주입구로부터 멀리 이격될수록 EML의 확산 범위가 확대되어 모든 측정센서에서 유전율상수의 감소를 확인할 수 있었다. 측정센서의 깊이를 감안하여 EML의 침투 깊이를 확인하기 위해 측정센서 No. 5(-10cm)와 10(-15cm)에 대한 유전율상수의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 배출구가 20cm 이격된 실험에서는 두 흙 모두 측정센서 No. 10에서는 유전율의 변화를 나타내지 않지만, 30cm 이격된 실험 결과는 대조적으로 큰 폭의 변화를 확인하였다.

이러한 결과로부터 EML 확산범위는 동일한 주입 수두를 고려할 때 배출구의 간격이 주입구와 멀리 이격될수록 포화 흙의 공극을 통하여 넓게 확산되는 것을 확인 하였다. 또한 FDR 측정센서의 측정범위를 고려하여 10cm 이상의 이격 범위 내에서는 충분한 유전율의 변화를 파악할 수 있을 것으로 판단한다.

유전을 변화로부터 EML 유동성 파악

포화 흙 칼럼 내에서 EML 유동성 파악을 위한 실험에서 EML 주입에 따른 유전율상수의 변화를 주입시간에 따라 비교적 일정한 시간 간격을 두고 초기치보다는 점진적으로 감소하는 결과를 나타내었다. Table 3은 EML 유동실험의 결과로써 각 측정센서가 설치된 위치에 따라 측정된 초기 및 최종 유전율상수의 측정치를 도시하였다. 또한 Fig. 4에서와 같이 수직으로

5cm 간격으로 설치된 각각의 3개의 측정센서에서 유전율의 변화가 거의 동일하게 감소하는 것으로 볼 때, 주입되는 EML이 포화된 흙의 공극 내에 분포하고 있는 물을 밀어내며 일정하게 이동하는 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) system과 측정센서를 적용하여 에탄올 믹싱리퀴드(EML)을 주입함으로써 포화된 흙의 유전율상수 변화를 파악하기 위한 실내실험을 실시하였다. 이는 설치된 길이 7cm의 FDR 측정센서에 대한 유전율 측정 범위의 확인 및 물과 동일한 비중을 갖는 EML이 포화된 흙의 공극을 통한 이동경로를 파악하기 위함이다. 따라서 FDR system을 사용해 포화된 다공질매질에 대한 유전율상수의 측정만으로 매질의 다양한 물성치를 측정할 수 있기 때문이다.

두 EML 실험 결과에서는 포화 흙 칼럼에 각기 설치된 측정센서에서 양호한 유전율상수의 변화를 충분히 확인하였다. 특히, EML 확산실험에서는 배출구가 EML 주입구로부터 멀리 이격될수록 포화 흙 내부로 EML의 확산범위가 확대됨을 파악하였다. 따라서 측정센서의 길이가 7cm를 감안한다면 주입구로부터 10cm 이상 이격되었을 때는 측정센서가 설치된 깊이

Table 3. Variations of dielectric constants of saturated soil column during EML flow test (Temperature 20 °C).

Installed probe No.	Installed probe No. (cm)	Installed distances of outflow valves from injecting point			
		Standard sand		River sand	
		Initial ϵ	Final ϵ	Initial ϵ	Final ϵ
P1	-5.0	31.047	18.501	32.392	19.839
P2	-10.0	31.944	18.043	31.397	17.496
P3	-15.0	33.470	18.197	31.800	19.360
P4	-5.0	30.144	17.910	31.591	19.154
P5	-10.0	33.092	18.063	32.741	17.712
P6	-15.0	30.499	17.311	31.591	19.403
P7	-5.0	32.366	18.830	30.551	19.254
P8	-10.0	31.961	19.361	30.008	18.155
P9	-15.0	31.020	17.403	30.138	19.317
P10	-5.0	32.622	18.265	30.530	19.590
P11	-10.0	33.525	17.471	28.399	19.128
P12	-15.0	32.161	18.023	29.704	18.348

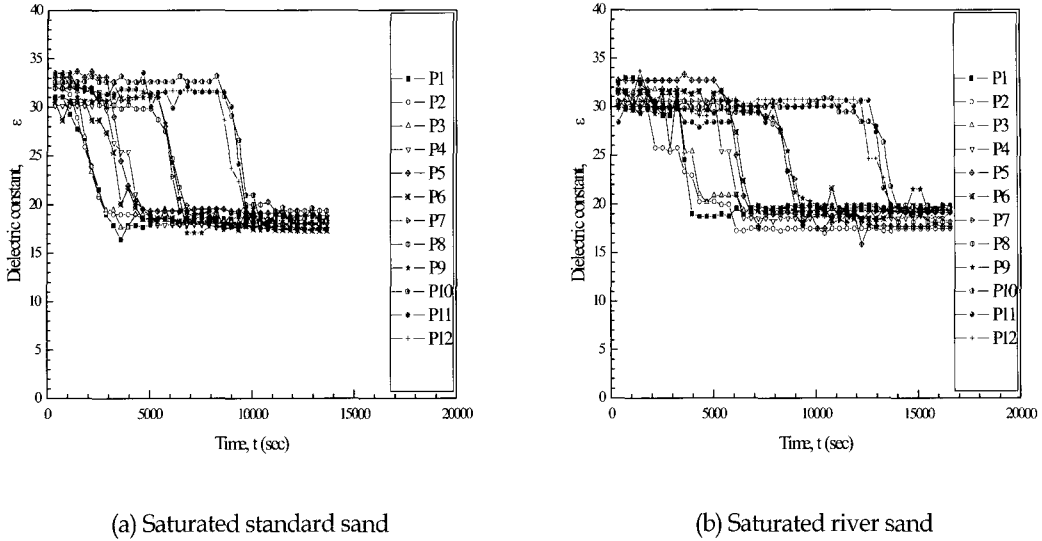


Fig. 4. Variations of measured dielectric constants of saturated sands from EML flow test (Temperature 20 °C).

이상에서 유전율의 변화를 충분히 측정할 수 있을 것이다. 또한, EML 유동실험의 결과는 포화된 흙 칼럼에서 주입과 동시에 일정한 간격으로 설치된 모든 측정 센서에서 유전율의 변화를 파악하였다. 그러므로 EML 주입에 따른 포화 흙의 공극 내에 존재하는 물의 치환이 충분히 가능하며 공극을 통한 이동성도 함께 확인하였다.

결론적으로 FDR system과 측정센서의 적용성은 포화된 다공질매질에 대한 유전율상수의 변화를 파악하기 위해서는 EML을 적용하여 충분히 정량적인 측정치를 획득할 수 있을 것으로 판단하며, 야외실험의 적용성을 극대화시키기 위한 본 시스템의 개선이 필요할 것이다.

참고문헌

김만일, 니시가키 마코토, 2003, 유전율법을 이용한 다공질 매질의 공극률 및 유효공극률의 측정에 관한 연구, 지질공학, 13(4), p. 405-417.

Campbell, J.D., 1973, Pore pressures and volume changes in unsaturated soils, Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA.

Chenaf, D. and N. Amara, 2001, Time domain re-

flectometry for the characterization of diesel contaminated soils, Proceeding of the symposium TDR 2001: Innovative Applications of TDR Technology, Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois.

Darnault, C.J.G., D.A. DiCarlo, T.W.J. Bauters, A.R. Jacobson, J.A. Throop, C. D. Montemagno, J.-Y. Parlange and T.S. Steenhuis, 2001, Measurement of fluid contents by light transmission in transient three-phase oil-water-air systems in sand, Water Resources Research, 37(7), p. 1859-1868.

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

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

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.

Yu, C., A.W. Warrick and M.H. Conklin, 1999, Derived functions of time domain reflectometry for

soil moisture measurement, *Water Resources Research*, 35(6), p. 1789-1796.

Zegelin, S.J., I. White and D.R. Jenkins, 1989, Improved field probes for soil-water content and electrical conductivity measurement using time-domain reflectometry, *Water Resources Research*, 25, p. 2367-2376.

투 고 일 2004년 5월 10일

심 사 일 2004년 5월 11일

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

정교철
안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-823-1627
E-mail: Jeong@andong.ac.kr
