

지하수 검증을 위한 새로운 유전율 추적자 시험법의 개발

김만일^{*1)}, 김형수¹⁾, 정교철²⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원 · ²⁾안동대학교 지구환경과학과

A development of new dielectric tracer test method for groundwater logging: laboratory soil column test

Man-Il Kim^{*1)}, Hyoung-Soo Kim¹⁾, Gyo-Cheol Jeong²⁾

¹⁾Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

²⁾Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

다공질매질을 구성하고 있는 다양한 매질들의 전기적 특성 중의 하나인 유전율상수를 이용하여 지하수 유동 및 매질의 구조를 파악하기 위한 새로운 유전율추적자시험법(dielectric tracer test method)을 본 연구에서 제안하였다. 추적자물질로는 비중이 물과 동일한 에탄올혼합액체(ethanol mixing liquid, EML)를 제작하였으며, 각기 다른 공극률을 갖는 포화 표준사 및 강모래 층에 대해 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 FDR system 및 측정센서를 적용해 추적자시험을 실시하였다. 또한 이들의 결과와 비교하기 위하여 추적자물질인 염분농도 3%를 갖는 염분수용액의 농도 변화를 electro multi-meter로 측정하여 비교 검토하였다. 두 시험결과에서 EML 추적자시험의 경우, 각각의 포화 흙칼럼에서의 EML 농도변화를 명확히 확인할 수 있었으나, 염분수용액을 적용한 시험에서는 이들이 지속적으로 칼럼 내 하단부로 침전되어 염분농도 변화에 의한 물의 침투 이동은 확인할 수 없었다. 이는 염분수용액의 비중이 물보다 무겁기 때문에 포화토 내 물의 이동 속도에 비례하여 지속적으로 하단부로 침전이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 물의 비중과 동일한 EML 추적자물질과 이들의 유전율상수 변화를 측정할 수 있는 FDR system을 적용하여 유전율추적자시험의 적용 가능성을 실내추적자시험을 통하여 확인하였다.

주요어: 유전율법, Frequency Domain Reflectometry(FDR), 추적자시험, 에탄올혼합액체

This study is suggested a new dielectric tracer test method to understand geological structure of porous media and groundwater flow to use the dielectric constant which is one of electrical special quality of various geological materials. To measure their parameters, tracer material is made an ethanol mixing liquid(EML) having a same specific gravity of water. Also, soil materials are prepared a dielectric tracer test using the FDR system that could measure dielectric constant for saturated standard sand and river sand layers which have different initial porosity. To compare with their results, we discussed with the concentration variation of saline water having a saline concentration 3% which is general tracer material by using the electro multi-meter system in the laboratory or field test. In two tracer experiment results, EML tracer test could confirm definitely EML concentration variation from each saturated soil layer as standard and river sands. However, tracer test of saline water 3% concentration could not confirm permeating movement of water by degree of salinity change because these are settled at lower part column in a

* Corresponding author : mikim916@hotmail.com

whole column area continuously. These causes are that specific gravity of saline water is heavier than water. That is, it could know that deposition of saline water is composed of lower part of soil column continuously independently of the direction of water into saturated soil material.

Key words : Permittivity method, Frequency Domain Reflectometry(FDR), tracer test, ethanol mixing liquid(EML)

서 론

지반 내 지하수의 유동은 이를 구성하고 있는 다양한 매질들에 의해 크게 좌우된다. 지반을 불포화 및 포화 상태로 나누어 볼 때, 다공질매질의 풍화도에 따라 지하수 및 오염물질들의 이동은 매우 다르게 나타난다(Holzbecher, 1998; Elfeki, 1996; Adler, 1995). 일반적으로 지하수 유동을 평가하기 위한 시험 방법들은 그다지 지반환경에 영향을 주지 않는 다양한 추적자 물질들을 사용하여 이루어지고 있다(Nelson et al., 2003; 地盤工学会, 2002a, 2002b; 한정상, 1998). 특히, 일정한 농도를 갖는 염분수(saline water) 내지 온수(hot water) 등의 추적자 물질을 사용한 야외 추적자 시험에서는 이들의 농도 또는 온도 변화로부터 지반의 각 지점에 설치된 측정센서에서 지하수 유동 및 대상 지반의 구조를 확인할 수 있다. 그러나 염분수는 비중이 물보다 무겁기 때문에 장기간 시험을 할 경우에 하단부로 침전되어 지하수 유동에 따른 염분농도 변화를 정량적으로 확인하기에는 다소 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 유전율상수의 변화를 측정할

수 있는 유전율 측정법인 Frequency Domain Reflectometry(FDR) system과 측정센서를 적용해 추적자 물질인 에탄올혼합액체(ethanol mixing liquid, EML)의 유전율상수 변화로부터 포화토 내에서 물질이동을 파악할 수 있는 실내 추적자칼럼시험을 실시하였다.

실험방법

본 연구에서 사용된 포화 상태의 흙시료는 화강풍화토(weathered granite soil, WGS), 표준사(standard sand, SS) 및 강모래(river sand, RS)이다(Table 1). Fig. 1은 각 흙시료에 대한 입도가적곡선의 분포를 보여주고 있다(김관진 등, 1999). 여기서 화강풍화토는 피압 상태의 흙칼럼 상태를 유지하기 위해서 상단 및 하단 부분에만 약 5cm 두께로 설치하였으며, 표준사와 강모래는 호층을 이룰 수 있도록 각각 설치한 후, 각 흙에 대한 공극률을 계산하였다(Table 2).

제작된 흙칼럼의 구성은 가로 92.0cm, 세로 10.0cm, 높이 74.0cm로 아크릴 칼럼의 양단에 균질한 자갈을 넣을 수 있는 자갈필터(gravel filter:

Table 1. Physical properties of the soil materials.

Physical parameters	Sand materials		
		Standard sand	River sand
Distribution of grain size (%)	Coarse	0.0	15.50
	Sand	99.9	81.70
	Silt	0.1	2.80
	Clay	0.0	1.00
Specific gravity		2.65	2.69
Uniformity coefficient, U_c		1.727	7.029
Curvature coefficient, U_g		0.938	1.710

Table 2. Established soil property for each soil tracer experiment by measurement systems.

Depth (cm)	Center depth (cm)	Sand	Porosity (n)	Applied apparatus	
				EML	Saline water
~ -4.0	-	W.granite soil*	-		
~ -17.0	-11.0	River	0.445		
~ -30.0	-26.0	Standard	0.422	FDR system	Electro multi-meter system
~ -43.0	-39.0	River	0.431		
~ -56.0	-51.0	Standard	0.398		
~ -69.0	-63.5	River	0.427		
~ -74.0	-	W.granite soil*	-		

* Weathered granite soil

11.5x10.0x74.0cm)를 설치하였다. 흙칼럼은 Jalbert et al. (2003)이 수행한 실험조건과 유사한 형태를 지니고 있다. 자갈필터는 주입되는 물이 칼럼 전체를 통하여 원활하게 이동할 수 있도록 하기 위해서이다. 또한, 추적자 물질과 측정센서를 설치할 수 있도록 흙칼럼의 중앙부에 직경 7.5cm, 높이 74.0cm의 다공질 세라믹파이프(ceramic pipe)를 삽입하였다. 이 다공질 세라믹파이프는 야외 지하수 추적자시험을 위해 설치한 관정(bore hole)과 동일한 기능을 수행하는 형태이다. 본 시험에서는 세라믹 파이프 내부에서 각각의 층을 이루는 흙의 중심부에 측정센서를 설치 및 추적자물질을 주입할 수 있도록 고안하였다. 또한, 주입시험 중 흙칼럼 내부의 조건이 피압상태(confined condition)를 유지할 수 있도록 칼럼 상하부에 불투수층(impermeable layer)을 형성할 수 있는 공극률이 낮은 화강풍화토를 5.0cm 두께로 설치하였으며, 칼럼 상부의 세라믹파이프 주변은 실리콘을 사용하여 완전히 밀폐하였다.

이 추적자시험은 주입 및 배출탱크의 높이를 3.0cm

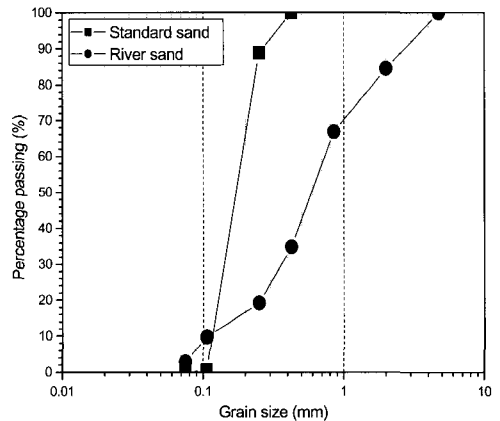
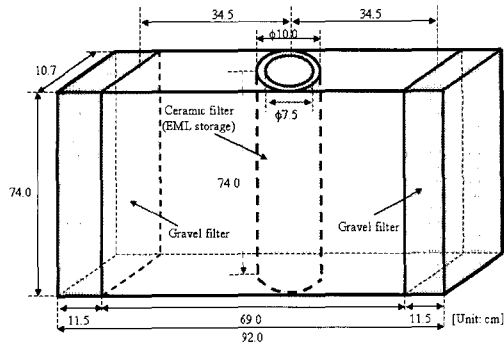
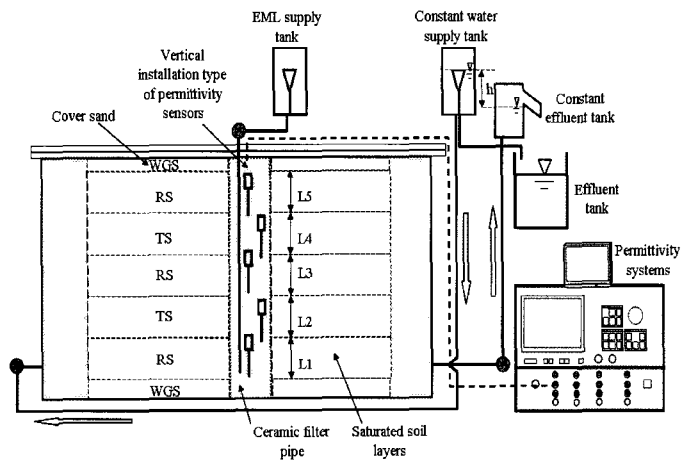


Fig. 1. Grain size distribution curve of the sands.

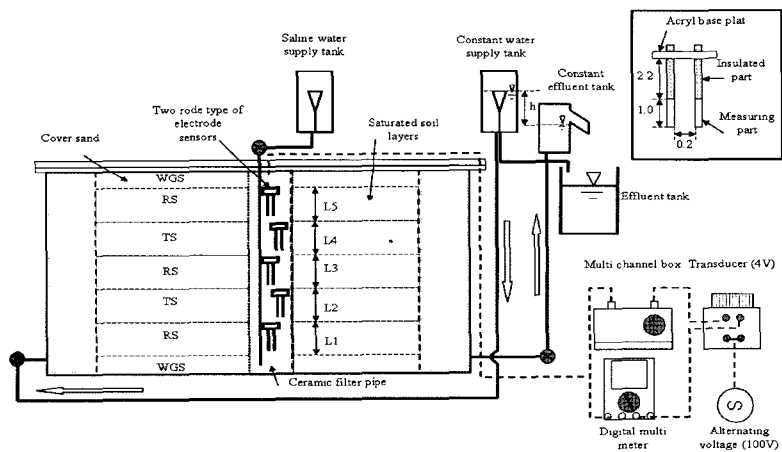
로 설정하여 흙칼럼의 동수구배를 조절하였으며, 이들 탱크는 흙칼럼 상단부로부터 5.0cm 높게 설치하여 포화된 흙의 피압상태를 유지할 수 있도록 고안하였다(Fig. 2). 여기서, 추적자 물질은 에탄올혼합액체(Ethanol Mixing Liquid, EML)와 3% 농도를 갖는 염분수용액을 사용하였다.



(a) Soil column



(b) Setup apparatus for laboratory tracer test by FDR system



(c) Setup apparatus for laboratory tracer test by electro meter apparatus

Fig. 2. Schematic diagrams of measurement apparatus for the soil column tracer tests [unit: cm].

실험결과

포화 흙칼럼 추적자시험(saturated soil column tracer test)은 각각의 호층을 이루고 있는 포화된 흙(표준사와 강모래)에 대해 추적자물질(tracer material)인 EML과 염분수용액(농도 3%)의 이동경로를 파악을 위해 FDR system 및 Electro multi-meter 장비를 적용하여 포화 흙 내에서의 물질 이동 경로를 파악하기 위함이다. 특히, 유전율상수의 반응을 FDR system을 통하여 측정하기 때문에 실험시의 주변 온도를 일정하게 유지된 조건하에서 실시하였다(김만일과 정교철, 2004a, 2004b). 각 추적자시험에 대한 실험결과는 아래에 설명하였다.

에탄올혼합액체(EML)의 농도변화

FDR system을 적용해 포화 흙칼럼에 대한 추적자 시험에서는 에탄올혼합액체(Ethanol Mixing Liquid, EML)를 사용하여 각각의 호층에서의 EML 농도변화를 설치된 FDR 측정센서들에서 측정하였다.

Fig. 3은 EML 추적자물질에 따른 각 포화 흙 내에서 EML의 유전율상수 변화를 주입시간의 관계로 도시하였다. 포화된 강모래의 각 층에 대한 유전율상수 변화는 거의 비슷한 주입시간 범위 내에서 급격히 증가하였으나, 포화 표준사 층에서는 강모래 층에 비해 완만한 경사를 이루며 서서히 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과들로부터 표준사 층보다는 강모래 층에서 더욱 더 빨리 물질 이동이 이루어지는 것으로써 이에 따라 다공질 세라믹파이프 내에 분포하는 EML의 농도가 작아지는 것으로 판단된다.

FDR system을 적용한 추적자시험에서는 추적자물질 EML의 유전율상수로부터 이 농도변화를 각 측정센서가 설치된 심도에 대해 Fig. 4에 나타내었다. 이들로부터 EML 추적자물질의 농도가 초기에는 높게 나타나지만, 포화 흙의 연결된 공극을 통하여 물의 침투 이동으로 인해 농도가 낮아지는 것으로 확인될 뿐만 아니라, 전체적으로 흙칼럼 내에 분포하는 각 호에 대한 EML의 농도 변화를 유전율상수의 변화로부터 쉽게 확인할 수 있었다. 여기서, 최종 EML 농도가 0.2 정도의 범위 내에서 분포하는 것은 다공질 세라믹파이프 주변부에서 EML이 다소 확산이 이루어졌기 때문

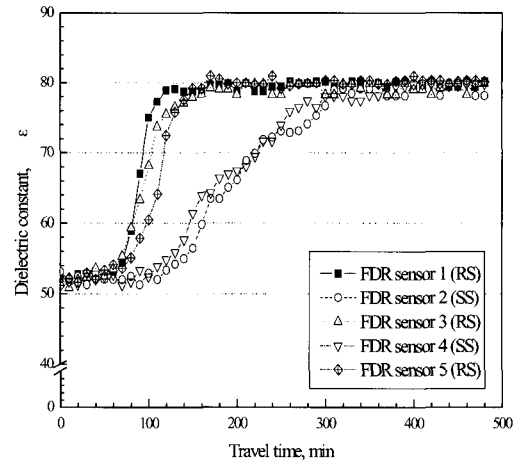


Fig. 3. Variations of dielectric constant of EML for each saturated soil by FDR system: SS-Standard sand, and RS-River sand (Temperature: 15 °C).

인 것으로 판단된다. 하지만, 이러한 EML의 잔류농도는 이들의 이동 경로를 파악하는데 영향을 미치지 않기 위해 이들 농도는 무시할 수 있다.

염분수용액의 농도변화

EML 추적자시험의 결과와 비교하기 위해 동일한 시험조건 하에서 추적자물질은 3% 농도를 갖는 염분수용액을 사용하여 실시하였다. 추적자물질인 염분수용액의 변화를 측정하기 위해 교류전류(alternating current, AC)를 사용하여 두 전극 사이에서 전압을 측정할 수 있는 Electric multi-meter를 사용하였다.

Fig. 5는 각 심도별로 설치된 5개의 전극센서(electrode sensor)들에 대한 염분수용액 농도 0.0 ~ 4.0% 범위에서 측정된 교류전류의 변화를 이용한 교정곡선(calibration curve)을 나타내었다. 측정결과에서는 각 전극센서들의 측정범위가 비교적 비슷한 범위 내에 분포하는 것을 확인하였다. 여기서, 전극센서 No. 5의 경우는 절연물질로 피복된 두 전극의 간격이 나머지 전극센서보다 약 0.2cm 가량 폭이 넓기 때문에 염분농도에 따른 측정치가 더 민감하게 나타나는 것이다.

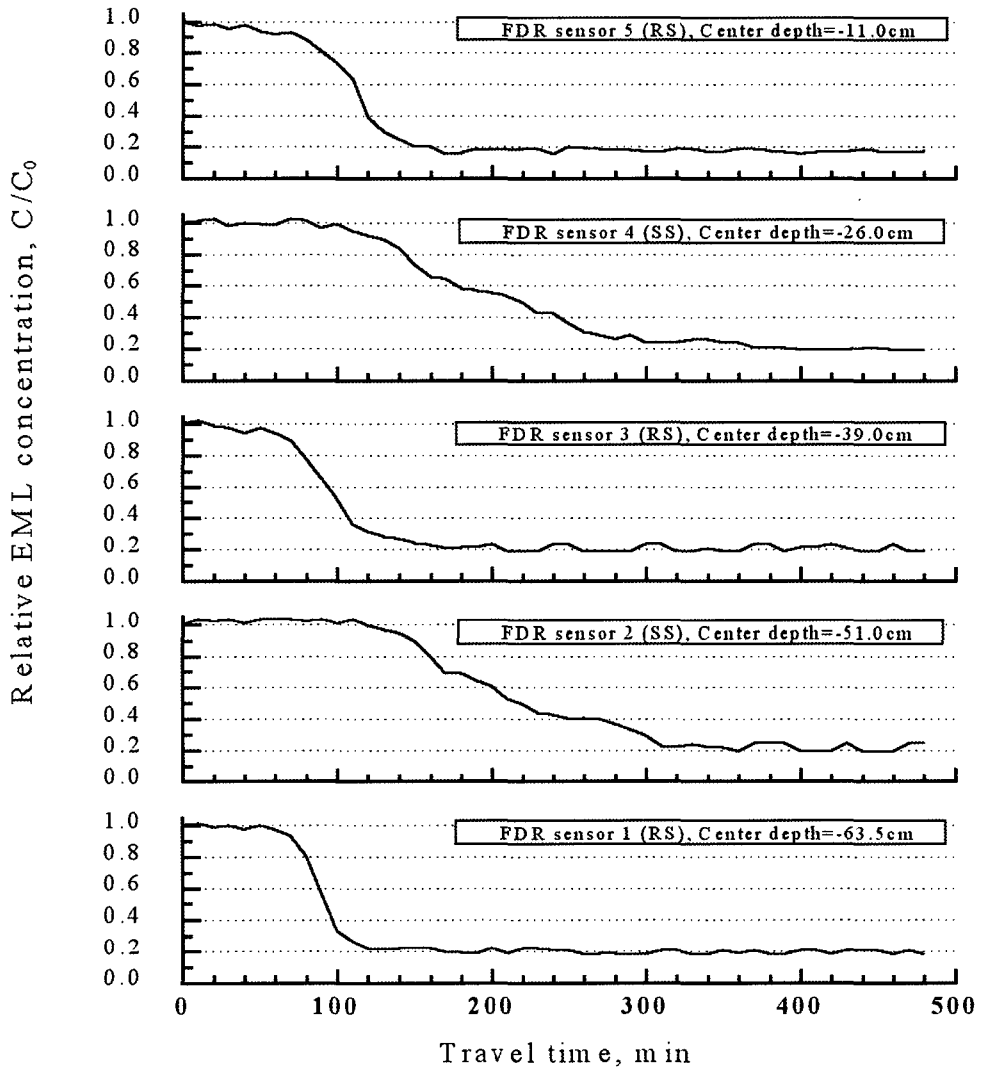


Fig. 4. Variations of EML concentration with travel time: SS-Standard sand, and RS-River sand (Temperature: 15 °C).

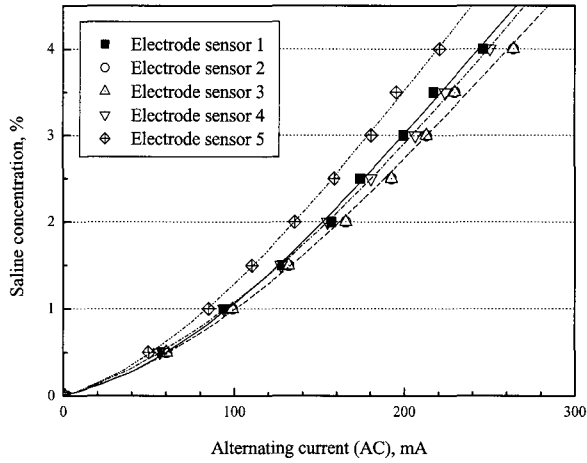


Fig. 5. Relationships between concentration of saline water and alternating current for electrode sensors (Temperature: 15 °C)

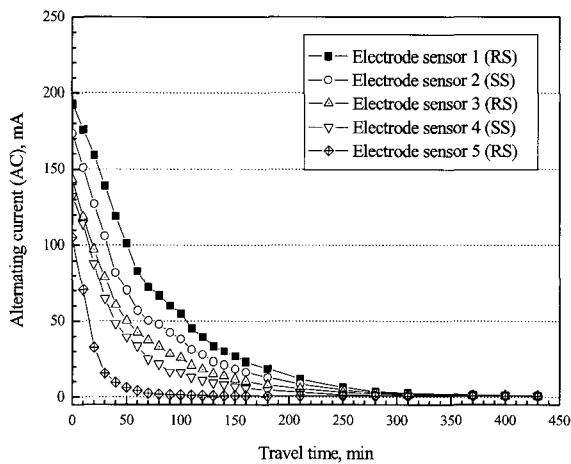


Fig. 6. Relationships between alternating current (AC) and concentration of saline water: SS-Standard sand, and RS-River sand (Temperature: 15 °C).

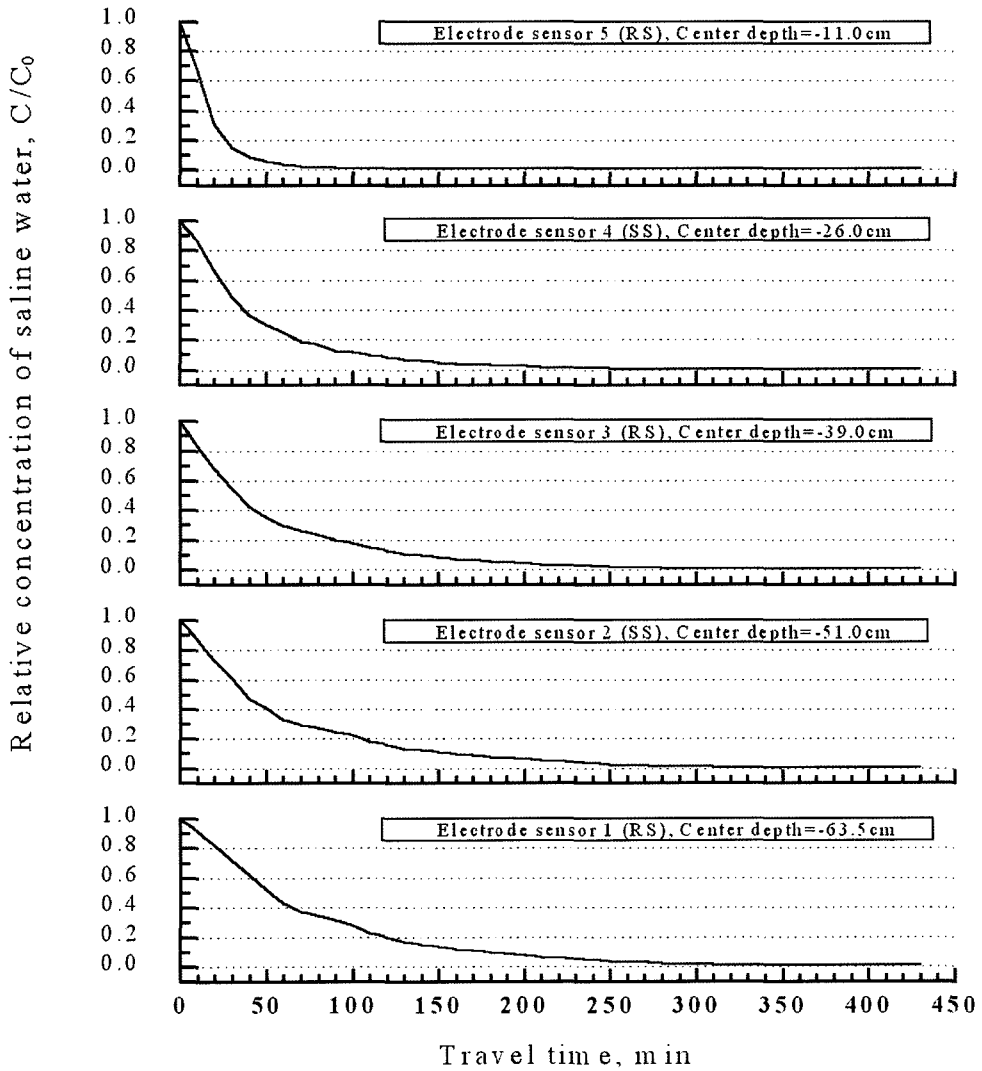
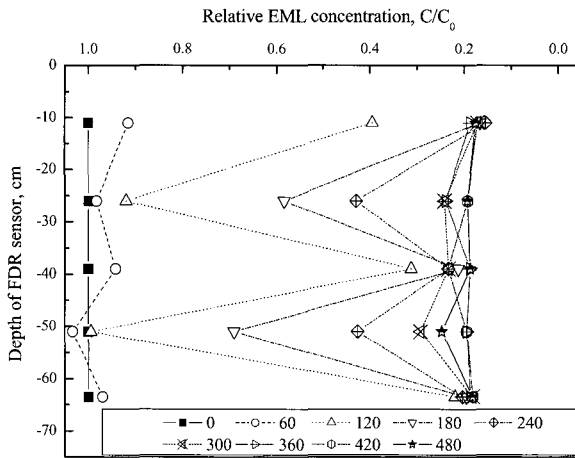
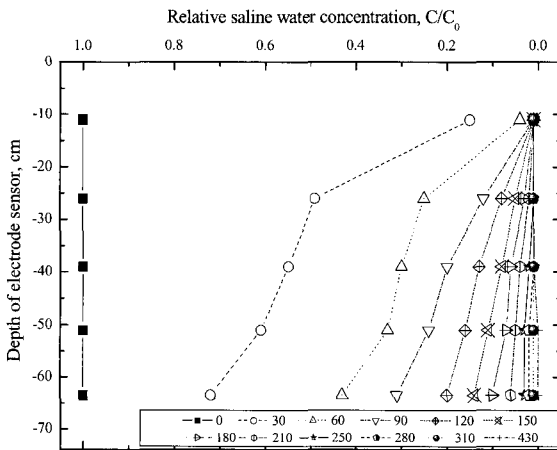


Fig. 7. Variations of concentration of saline water 3 % for each saturated soil by multi electro apparatus: SS-Standard sand, and RS-River sand (Temperature 15 °C).



(a) EML tracer test using FDR system



(b) Saline water 3 % tracer test using multi electro apparatus

Fig. 8. Relationship between concentrations of tracer materials with depths of saturated soil layers (Temperature 15 °C).

각 전극센서의 교정곡선을 이용하여 포화 흡칼럼 내에서 염분수용액의 변화를 각 표준사와 강모래에 대해 측정하였다(Fig. 6). 측정결과에서 흡칼럼 상단부에서 하단부로 갈수록 교류전류의 측정치가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 염분수용액의 농도가 물보다 비교적 무겁기 때문에 추적자시험이 이루어지는 동안 염분수용액이 다공질 세라믹파이프 하단부로 지속적으로 침전되었기 때문이다. 각 포화 흡층에 대한 염분수용액의 농도 변화를 파악하기 위하여 염분수용액 농도(C/C_0)의 관계로 도시한 결과 염분수용액의 침전을 명확히 확인할 수 있다(Fig. 7).

토 의

추적자 물질의 이동경로

동일한 추적자시험 조건하에서 추적자물질인 EML과 염분농도 3%인 염분수용액을 사용하여 각각의 포화된 흡층들에 대한 물질이동 경로를 파악하기 위해 실시하였다. 두 시험결과로부터 EML 및 염분수용액의 농도변화 및 각 흡층에 대한 추적자물질의 이동경로를 파악한 결과에서 EML 추적자물질을 사용한 시험이 염분수용액의 결과보다는 정확한 흡칼럼의 다공질매질 구조를 파악할 수 있었다(Fig. 8). 즉, 칼럼 내에 각기 분포하고 있는 흙의 공극을 통하여 물질이동이 원활히 이루어지고 있지만, 물과 비교해 추적자물질의 비중이 크게 의존하는 것으로 확인되었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 동일한 온도 하에서 염분수용액의 비중이 물보다 다소 무겁게 나타나지만, EML의 경우 물과 동일한 비중을 갖기 때문에 추적자시험에서 물의 이동 방향을 따라 원활히 함께 이동한 것으로 판단된다. 따라서 새로운 추적자물질인 EML의 유전율상수 반응을 이용한 유전율추적자시험(dielectric tracer test)이 염분수용액을 사용하는 시험보다는 정확한 물질 이동경로 및 다공질매질의 구조를 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 연구는 새로이 제작된 에탄올혼합액(ethanol mixing liquid, EML) 추적자물질을 이용하여 물과 EML 사이에서 유전율상수의 반응을 이용한 새로운

유전율추적자시험법(dielectric tracer test method)을 개발하였다. 이는 물과 EML의 유전율상수가 15°C 온도 하에서 약 82 및 52 정도의 범위 내에 분포하기 때문에 물과 EML이 혼합되면서 유전율상수의 변화를 쉽게 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 물질이동이 이루어지는 다공질구조 내에서 정량적으로 물질의 이동경로를 파악할 수 있다.

여기서는 유전율추적자시험 결과를 비교 검토하기 위하여 3% 농도를 갖는 염분수용액을 사용하여 동일한 실험조건 하에서 실내추적자시험을 실시하였다. 두 추적자물질을 적용해 시험한 결과, 추적자물질인 EML의 경우, 각기 설치된 FDR 측정센서에서 EML의 유전율 변화를 각각 설치된 표준사 및 강모래 층에서 명확히 파악할 수 있었지만, 염분수용액을 사용한 추적자시험에서는 흡칼럼 상부보다는 하부에서 염분농도가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 추적자물질의 비중과 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로서, 물과 비교해 염분수용액의 비중이 물보다는 다소 무겁기 때문에 실험이 진행되는 동안 흡칼럼의 하단부에 지속적으로 침전이 이루어졌다. 그러므로 흡칼럼 내에 각각의 호층을 이루고 있는 표준사와 강모래의 다공질구조에 대한 물질이동의 경로를 파악하기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서 제시된 EML 추적자물질과 유전율추적자시험법을 적용하여 지하수 유동 및 다공질매질 내에서 물질이동 경로의 파악이 원활할 것으로 기대되며, 추후 현장시험 적용을 통한 검증이 필요하다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-4-2)에 의해 부분적 연구비지원을 받아 본 연구결과에 평가분석이 수행되었다. 이에 연구비를 지원해주신 사업단측에 감사드린다.

참고문헌

- 김관진, 김정실, 김준영, 서인석, 1999, 토질역학, 형설출판사, p 462.
- 김만일, 정교철, 2004a, 유전율측정의 적용성 검토를 위한 기초적 연구, 대한지질공학회 춘계학술발표회, pp 145-151.
- 김만일, 정교철, 2004b, Frequency Domain

- Reflectometry system을 이용한 포화 다공질매질의 유전을 측정을 위한 연구, 지질공학, 14(2), pp 179-187.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, p 1071.
- 地盤工學會, 2002a, 地盤工學▪實務シリーズ15 - 土壤▪地下水汚染の調査▪豫測▪對策, 社團法人 地盤工學會, p 271.
- 地盤工學會, 2002b, 根切り工事と地下水 - 調査▪設計から施工まで - 現場技術者のための土と基礎シリーズ, 社團法人 地盤工學會, p 417.
- Adler, P.M., 1995, Multiphase flow in porous media, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p 196.
- Elfeki, A.M.M., 1996, Stochastic characterization of geological heterogeneity and its impact on groundwater contaminant transport, A. A. Balkema, p 301.
- Holzbecher, E.O., 1998, Modeling density-driven flow in porous media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, p 286.
- Jalbert, M., J.H. Dane and L. Bahaminyakamwe, 2003, Influence of porous medium and NAPL distribution heterogeneities on partitioning inter-well tracer testsL a Laboratory investigation, Journal of Hydrology, 272, p 79-94.
- Nelson, N.T., Q. Hu and M.L. Brusseau, 2003, Characterizing the contribution of diffusive mass transfer to solute transport in sedimentary aquifer systems at laboratory and field scales, Journal of Hydrology, 276, p 275-286.

투 고 일 2004년 8월 12일
 심 사 일 2004년 8월 13일
 심사완료일 2004년 9월 7일

김만일

한국수자원공사 수자원연구원
 대전광역시 유성구 전민동 462-1
 Tel: 042-860-0427
 Fax: 042-860-0592
 E-mail: mikim916@hotmail.com

김형수

한국수자원공사 수자원연구원
 대전광역시 유성구 전민동 462-1
 Tel: 042-860-0330
 Fax: 042-860-0592
 E-mail: hskim@kowaco.or.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
 경북 안동시 송천동 388번지
 TEL: 054-820-5753
 Fax: 054-823-1627
 E-mail: jeong@andong.ac.kr