

유전율에 의한 지반 매질내 유류침투거동 분석

김만일^{*1)} · 정교철²⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원 · ²⁾안동대학교 지구환경과학과

Evaluation of Oil Infiltration Behavior in Porous Media Using Dielectric Response

Man-II Kim^{*1)} · Gyo-Cheol Jeong²⁾

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

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

지반오염을 조사하기 위해서는 시추작업을 통하여 시료를 채취하는 방법이 일반적이지만, 실시간으로 원위치에서 다양한 오염물질들의 오염도 변화를 체계적으로 모니터링하는 것은 대단히 어렵다. 본 연구에서는 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 장비를 고안하여 지반의 유류오염을 파악하기 위한 유전율 측정법의 실험적 접근을 시도하였다. 구체적으로 포화 및 불포화 매질에 대한 유류 오염도 측정 및 체적함수비(Θ_w)와 체적유류비(Θ_{oil})의 관계에서 유전율 상수 반응에 따른 매질의 유류 오염도 등의 측정 가능성을 실내 시험을 통해 검토하였다. 뿐만 아니라 실내 칼럼시험을 수행하여 포화 매질 내에서 유류 거동 특성을 각기 설치된 FDR 측정센서를 이용해 모니터링하여 포화 매질의 유효공극률과 유류 잔류비를 측정하였다. 그 결과 초기 공극률 0.40으로 제작된 포화 매질의 유효공극률은 약 0.35로 공극률 대비 약 87.5% 범위 내에 존재함을 알 수 있었으며, 유류 잔류비는 약 62.5% 정도로 매우 높게 나타났다.

주요어: 유류 오염 모니터링, 체적함수비, 체적함유비, 유전율상수

For detecting a ground contamination survey, soil sampling method have been used a drilling or coring technique in general. However these methods are very difficult to systematically real-time monitoring of variation of contamination degree in field. In this research Frequency Domain Reflectometry (FDR) system was suggested and carried out to experimental approaches for determination of oil contamination on surface and underground. Experimental method using FDR method was discussed with feasibility of measurement in the laboratory column test. It is determined to degree of oil contamination due to response of dielectric constant related with volumetric water content(Θ_w) and volumetric oil content(Θ_{oil}) of saturated and unsaturated soil media. And physical properties such as effective porosity and oil residual ratio of saturated soil media were also measured through real-time monitoring works using installed FDR measurement sensors, which are detected characteristics of oil movement in the saturated soil media under the soil column tests. In the results of these experiments, a range of effective porosity was estimated to about 0.35 compared with initial porosity 0.40 of manufactured saturated soil media, which is also calculated to about 87.5% to the ratio of initial porosity to

* Corresponding author: mikim916@hotmail.com

effective porosity. Finally oil residual ratio which is compared with volumetric water content and volumetric oil content was calculated about 62.5%.

Key words: oil contamination monitoring, volumetric water content, volumetric oil content, dielectric constant

서 언

다양한 오염원에 의해 토양 및 지하수오염이 매우 큰 문제로 대두되고 있는 실정에서 효율적인 조사 및 오염 지반에 대한 복원 기술이 절실히 요구되고 있다. 지금까지 지반의 오염도 측정법은 광역적인 조사에서는 자료 조사, 정호조사, 표층토양가스조사 및 수문지질구조 및 오염조사 등의 물리탐사법 등이 널리 사용된다(地盤工学会, 2002). 이 중에서 시료를 채취하는 방법이 일반적이지만, 원위치에서 오염도의 경시적인 변화를 파악하는 것은 매우 어렵다. 뿐만 아니라 오염의 현황, 확산 정도, 그리고 복원 상태를 파악하기 위해서는 원위치에서 비교적 용이하게 이러한 물성치를 측정할 수 있는 기법의 확립이 필요하다.

유전율의 반응을 이용하여 지반 매질의 유전율상수를 측정하는 유전율 측정법은 크게 두 종류의 방법이 이미 소개되어져 있으며, 본 연구에서 연구 개발한 유전율 측정법을 포함해 모두 세 종류의 유전율 측정법으로 나눌 수 있다. 1980년대 Topp(1980) 등에 의해 소개된 Time Domain Reflectometry (TDR) 측정법을 이용하여 토양의 유전율로부터 체적함수비를 파악하는 교정 곡선을 제시하였으며, 그 후 Gaskin과 Miller(1996)에 의해 삼각형 배열로 이루어진 측정센서들의 내부에서 유전율을 측정할 수 있는 Amplitude Domain Reflectometry (ADR) 측정법이 소개되었다. 이들 측정법의 근본적인 목적은 토양의 함수율을 측정하기 위해 제안된 방법이다(Jackson, 2003; Drenvich et al., 2001; Chan and Knight, 1999; Jacobsen and Schjønning, 1993; Ansoult et al., 1985). 특히, TDR의 경우 지반 내 분포하는 염분 농도를 파악하기 위한 연구가 다양한 분야에서 수행되었다(Muñoz-Carpena et al., 2005; Mohamed and Said, 2005). 본 연구에서 적용된 유전율 측정장치는 0.1~1.7GHz 범위 내에서의 고주파수를 사용하여 입사파와 반사파에 의해 생성된 합성간섭파 반응을 이용하여 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 측정법을 사용하였다(김만일 등, 2004b). 이 측정법에서 사용된 측

정센서는 1선식 형태로써 매질 내에 직접 삽입 설치하여 측정센서 주변의 매질의 유전율 특성을 측정하는 것으로써, FDR 측정장치에 연결된 멀티 스위치 박스(multi switch box)와 자료 수집기(data logger)에서 장기 자동 모니터링이 가능하며, 최대 20개의 측정센서를 동시에 운영할 수 있도록 고안되었다.

본 연구에서는 FDR 측정장치를 적용해 매질 내 유류 오염 정도를 파악할 수 있는 유전율 측정법의 적용성을 실내시험을 통하여 검토하였다. 일반적으로 지반 매질이 가지고 있는 유전율 특성은 이미 알려져 있기 때문에 이들 각각의 유전율상수를 조합하여 유류 오염도를 파악할 수 있는 유류 유전율 혼합모델(oil dielectric mixing model)을 제안함은 물론 매질 내에 존재하는 체적함수비와 체적함유비의 관계를 유전율상수 반응을 이용해 규명함과 동시에 매질의 고유 특성인 유효공극률(effective porosity)과 유류 잔류비(oil residual ratio)에 대한 정량적인 결과를 실내 칼럼 시험을 수행하여 매질의 다양한 물성치를 검토하였다. 따라서 이 시험은 오염된 지반의 유전율 분포를 측정함으로써, 장기간에 걸친 지반의 오염도에 대한 변화 양상의 모니터링이 가능하게 되며, 구체적으로 지반 매질 내의 함수비와 오염물질의 유전율 차이를 이용하여 포화 및 불포화 영역에서 지반 오염도를 조사하는 측정방법을 확립하기 위함이다.

실험 및 결과

Frequency Domain Reflectometry 측정 원리 및 장비 구성

FDR 측정장비는 전자기파의 인피던스 반응에 따라 매질의 유전율을 측정하는 것으로써, 전자파 발생기(tracking generator), 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer), 방향성 결합기(directional coupler), FDR 측정센서 및 자료 수집기(data logger)로 구성되어 있다(김만일 등, 2004b). 실제 설치된 FDR 장비 내에는 방향성 결합기가 포함되어져 있어 현장시험 등을 위해 휴대이동성이 우수하다. 특히, 한 대의 FDR 장비에 연결할 수 있는 측정센서는 총 20개 채널을 이용하여 동시에 서로

다른 위치에 설치되어 있는 측정센서로부터 각각의 유전율상수를 측정할 수 있는 장점도 함께 가지고 있다. 제작된 FDR 장비의 크기는 가로 57cm, 세로 45cm, 폭 40 cm 정도이며, FDR 장비의 조작 및 측정자료 저장을 위한 데이터로거가 함께 부착되어 있다. 이러한 FDR 장비의 운영은 데이터로거에서 측정방법의 설정이 가능할 뿐만 아니라 측정된 자료를 실시간으로 확인할 수 있어 효율적인 관리도 함께 수행될 수 있다.

매질의 유전율 측정은 FDR 측정센서를 측정매질에 삽입한 후, 전자파 발생기에서 0.1~1.7GHz의 고주파의 전자기파를 측정매질로 방출한다. 전자파의 진행속도는 매질 주변의 유전특성에 의해 변하기 때문에 매질에 설치된 FDR 측정센서에서의 입사파와 선단까지의 반사파를 발생시킨다. 이 두 파들은 합성간섭파를 발생시켜 방향성 결합기를 경유해 스펙트럼 분석기에서 관찰된다. 여기서 FDR 측정센서 선단부터의 반사파 신호는 FDR 측정센서를 왕복하기 때문에 위상이 늦어져 측정된 두 파의 합성간섭파는 일정한 주파수 간격에서 sin 곡선과 비슷한 굴곡형태의 주파수 파장을 보이게 된다.

다공질매질 내에서 전자파의 전달속도는 그 매질의 유전율상수(Dielectric constant, ϵ)와 식 (1)과 밀접한 관계를 가지고 있다.

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 다공질 매질의 유전율상수, C 는 유전율상수 ϵ 의 매질 내에서 전자파의 전달속도, C_0 는 광속도 ($3 \times 10^8 m/s$)이다.

흙 시료 내부로 전달되는 입사파의 속도는 측정센서가 설치된 주위의 유전율에 의해 결정되기 때문에 측정센서의 전체 로드부분에서 전달된 전자파인 입사파와 반사파의 위상의 차이, 즉 동축케이블과 연결된 방향성 결합기와 측정센서에서 반사파의 전달속도가 서로 다른 시간 범위 내에서 전달되기 때문에 동축케이블 내에서 합성간섭파가 발생된다. 이 때 측정센서 입력단에서의 반사파와 흙 시료 내에 삽입 설치되어진 측정센서 로드(길이 L) 끝부분에서의 반사파와의 지연시간 t 는 흙 시료 내에서 전자파의 전달속도(C)를 이용해서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{2L}{C} \quad (2)$$

여기서, 신호의 각 주파수를 ω 로 하여 동축케이블과 측정센서 로드의 결합부분의 반사파를 $A \cdot \exp(j\omega\tau)$ 로 한다면, 측정센서 로드 끝부분까지의 반사파이다. 하지만 동축케이블을 통과하는 신호성분은 신호가 측정센서 로드부분만을 왕복하는데 필요로 하는 시간 t 만큼만 위상이 변화하기 때문에 $B \cdot \exp(j\omega(\tau - t))$ 가 된다. 그러므로 두 개의 반사파 관계는 다음 식과 같이 합성과 Φ 로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = A \cdot \exp(j\omega\tau) + B \cdot \exp(j\omega(\tau - t)) \quad (3)$$

측정된 전압은 합성과 Φ 의 절대값으로 비교한다면, Φ 를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} |\Phi| &= A \cdot \left[1 + \left(\frac{B}{A} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{B}{A} \right) \cdot R_e \{ \exp(-j\omega t) \} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= A \cdot \left[1 + \left(\frac{B}{A} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{B}{A} \right) \cdot \cos(-j\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 신호의 각 주파수를 주파수 f 로 표현한다면 아래와 같다.

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

동축케이블 내에서 반사파의 전압 진폭은 Φ 을 의미하기 때문에 식 (4)로부터 인지할 수 있다. 또한 두 개의 반사파에 대한 간섭의 결과에서 반사파의 스펙트럼 $\Phi(\omega)$ 는 일정한 주파수 간격을 요철(凹凸)로 표현된다. 분석된 주파수 형태상의凹과凹, 그리고凸과凸부분에서의 주파수차를 Δf 로 하여 다음의 관계가 성립된다.

$$2\pi \Delta f t = 2\pi \quad (6)$$

이며, 이를 다시 정리하면

$$t = \frac{1}{\Delta f} \quad (7)$$

가 된다. 식 (2)를 대입하여 계산하면

$$\Delta f = \frac{C}{2L} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 식 (1)을 대입하여 식 (9)로부터 유전율상수 ϵ 을 구할 수 있다.

$$\epsilon = \left(\frac{C_0}{2L \cdot \Delta f} \right)^2 \quad (9)$$

여기서, Δf , L 및 C_0 는 각각 스펙트럼 피크 (spectrum peak) 주파수차(Hz), FDR 측정센서의 길이 (m), 진공중의 광속(3×10^8 m/sec)이다. 식 (9)를 이용하여 합성 간섭파의 주파수 간격으로부터 매질의 유전율상수를 계산할 수 있다.

매질의 유전율 반응

자연 함수상태 하에서 흙 입자를 구성하고 있는 광물 입자에 대한 유전율상수는 약 5~9 정도이지만, 건조된 흙의 경우는 고상율을 고려한다면 약 2.5~4 정도의 유전율상수를 가진다. 일반적으로 수온이 20°C일 때, 물의 유전율상수는 물분자의 결합구조에 의해 쌍극자 모멘트를 나타내기 때문에 다른 매질의 유전율상수와 비교해 매우 큰 약 80~81 정도를 나타낸다(Nishigaki et al., 2003; Noborio, 2001). 김만일과 Nishigaki(2003)에 의하면, 다공질매질의 유전율상수는 매질의 온도 내지 밀도 등의 물리적 특성에 의해 매우 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러므로 흙 입자와 물의 유전율상수의 범위를 고려해보면 흙의 유전율상수는 이들이 물을 함유하고 있는 체적함수비에 의해 크게 좌우된다고 볼 수 있다. 이것은 Topp et al(1980) 및 Ansoult et al(1985)에 의하면 측정된 흙의 유전율상수는 이들을 구성하고 있는 흙 입자들의 상호 유전율 반응에 의한 것이 아니라 흙 입자 사이에 존재하는 공극 내에 함유된 물, 즉 체적함수비 (volumetric water content, Θ_w)에 의해 결정된다고 하였다. 따라서 유전율상수와 체적함수비의 교정곡선을 작성한다면, 유전율상수를 측정해 간단하게 대상 매질의 체적함수비를 얻을 수 있다.

오염된 지반 매질의 경우, 그 구성은 공기, 물, 흙 입자 및 오염물질 등으로 이루어져 있어 이러한 매질들의 유전율 특성을 파악하기 위해서 직경 6cm, 높이 20cm의 아크릴 용기를 제작해 이들로 혼합된 시료를 넣은 후 일정한 공극률로 압밀하여 공시체를 만들고, 15cm 길이의

FDR 측정센서를 흙칼럼 상단부 중앙에서 삽입하여 FDR 측정장비로 유전율상수를 측정하였다.

Fig. 1은 공기, 물, 표준사(공극률 0.40) 및 등유를 대상으로 측정된 스펙트럼 곡선(종축은 전자기파의 전압 진폭, 횡축은 측정주파수 범위)을 도시하였다. 각 스펙트럼 곡선의 피크(peak)로부터 주파수차를 계산하여 식 (9)에 대입함으로써 각 매질의 유전율상수가 계산된다. 이들로부터 측정된 유전율은 공기($\epsilon=1.0$), 물($\epsilon=80.4$), 표준사($\epsilon=2.5$), 등유($\epsilon=2.0$)로 각기 측정되었다. 유전율은 주변 온도변화에 대해서 민감하게 반응하기 때문에 시험시의 온도는 20°C로 유지하여 수행하였다(김만일과 Nishigaki, 2003). 이상과 같이, 물의 유전율 측정치와 비교해보면 나머지 매질의 유전율은 매우 낮게 측정되었다. 이러한 현상은 물을 구성하고 있는 쌍극자 모멘트의 영향으로 전자기파의 반사 정도가 다른 매질에 비해 매우 높기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 물이 가지는 이러한 특성에 의해 유전율의 반응에 특성을 보임으로써 지반매질의 유전율은 대부분 공극 내에 존재하는 물에 의해 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

유류오염 매질의 유전율 특성 변화

동일한 흙 칼럼을 이용해 물과 등유의 체적함수비를 각기 조절하여 포화 및 불포화시료를 제작하여 FDR 측정장비를 적용하여 유전율상수 반응을 검토하였다. 이때 각 흙 칼럼의 초기 공극률은 0.40으로 일정하게 압밀하여 제작한 후 FDR 측정센서를 흙 칼럼 상단부 중심이 되는 부분에 삽입하여 설치하였다. 매질의 유전율상수는 측정센서의 삽입과 동시에 측정할 수 있기에 신속한 실험이 진행 될 수 있다. 유류 오염 매질의 유전율상수 변화를 파악하기 위해 세 종류의 실내 칼럼시험을 수행하였다. 이 시험들은 불포화 오염 및 포화 오염 흙 시료를 각기 제작하여 체적함수비(volumetric water content, Θ_w)와 체적함수비(volumetric oil content, Θ_{oi})만을 조절하여 흙 시료의 유전율상수 변화를 측정하였다.

불포화 흙 시료의 상태는 표준사, 물 그리고 공기로서 이루어져 있으며, 공극률을 0.40으로 일정한 조건하에서 제작된 시료에 대해 단계적으로 체적함수비만을 조절하여 흙 시료의 유전율상수를 측정하였다. Fig. 2(a)는 유전율($\sqrt{\epsilon}$)과 체적함수비(Θ_w)에 대한 측정치와 Topp의 교정곡선(Topp et al., 1980)과 비교하였다. 체

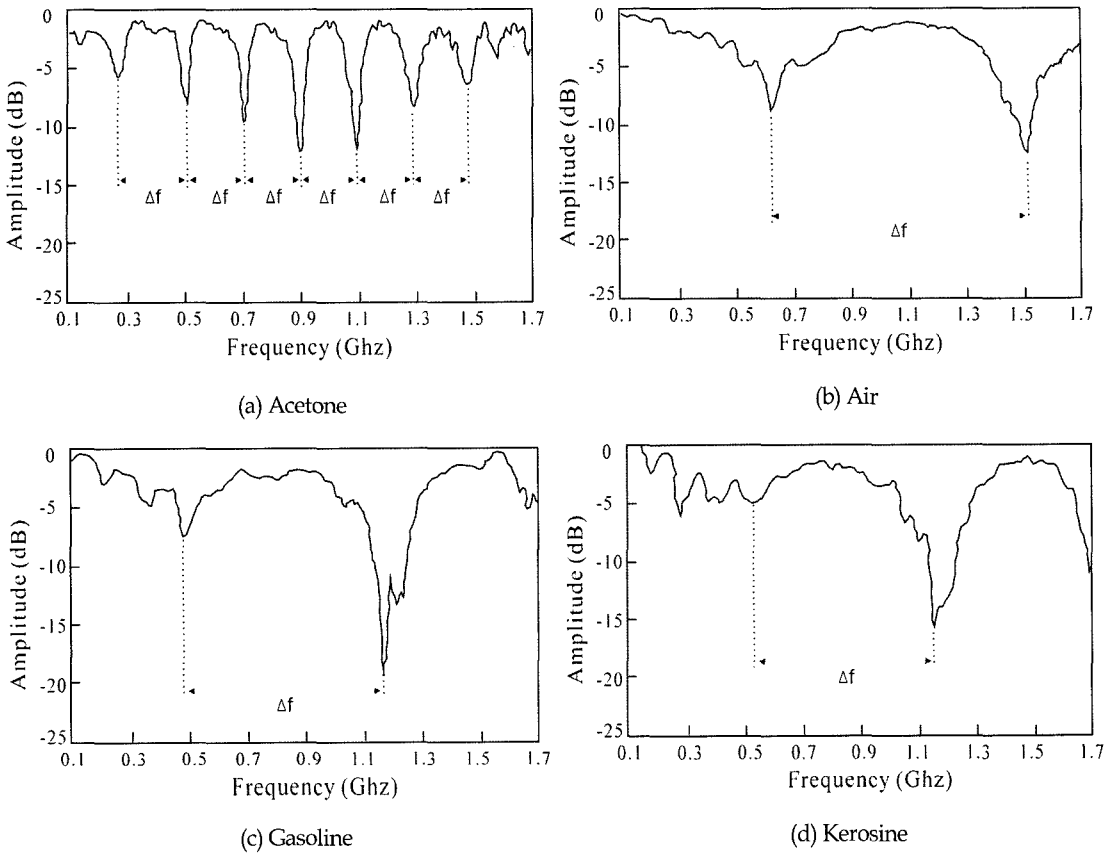


Fig. 1. Measured spectrum amplitudes for each material measured by FDR system (20°C).

적함수비의 저-고영역부에서 최대 1% 정도의 측정 차이를 보이고 있는 것은 TDR과 비교해 FDR 측정센서의 형태, 측정 주파수의 범위 및 측정 대상 매질이 서로 다르기 때문이다. 따라서 이러한 현상을 고려하여 FDR 측정 장비만의 고유 교정곡선을 유도할 필요가 있다.

불포화 오염 흡 시료에 대한 시험에서는 물 대신 등유를 사용하여 등유의 체적함유비만을 조절하여 표준사, 등유 및 공기로 이루어진 불포화 오염 흡 시료를 제작한 후, 동일한 조건하에서 유전율($\sqrt{\epsilon}$)과 체적함유

비($\theta_{oil} = \frac{V_{oil}}{V}$)의 관계를 Fig. 2(b)에 나타내었다. Fig. 2(a)의 결과와 비교해 보면, 등유의 함량이 증가하

면서 공기와 등유의 치환에 의해 유전율은 다소 상승하는 경향을 확인하였으나, 그 상승폭은 초기 체적함유비가 0.0일 때의 초기 유전율상수 측정치보다 약 9.6% 가량 증가하였다. 이것은 초기 제작된 흡 칼럼의 매질 구조가 흡 시료와 공극 내 공기들로 채워진 2상(two-phase) 형태로 존재해 있다가 등유의 혼합으로 인해 3상(three-phase) 형태로 전환되었기 때문이다. 따라서 흡 시료, 공기의 유전율상수보다 큰 등유가 혼합됨에 따라 측정된 유전율상수치가 다소 높게 나타난 것이다. 따라서 물($\epsilon=80.4$)과 등유($\epsilon=2.0$)로 각기 혼합된 흡 시료에서의 유전율상수 측정치가 큰 차이를 보이는 것은 매질의 고유 유전율상수에 영향을 받기 때문이다.

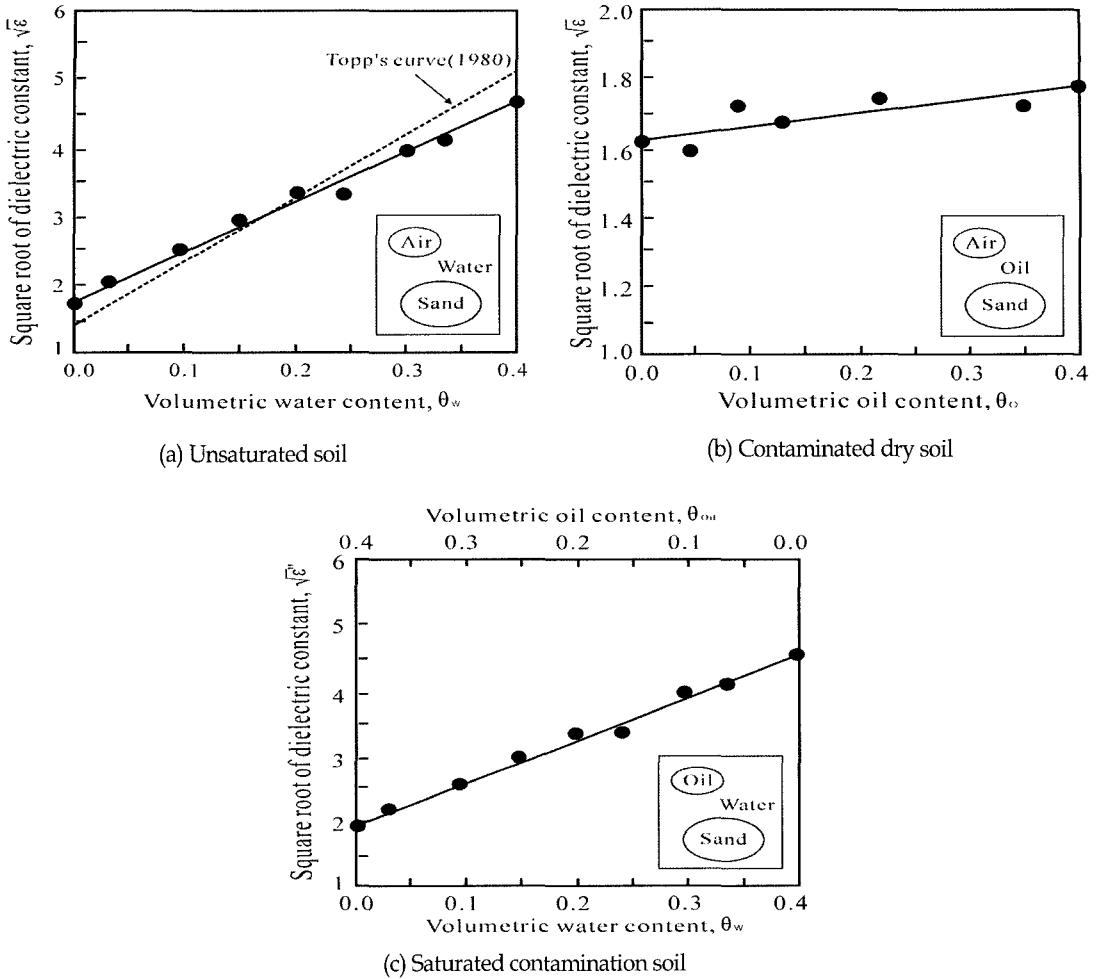


Fig. 2. Dielectric constant for contaminated soil under each soil condition (20°C).

포화 오염 흙 시료는 물과 등유로 혼합된 상태로 제작하였다. 포화 지반에 대한 오염도 측정의 기초가 되는 교정곡선을 Fig. 2(c)에 유전율상수-체적함수비-체적함유비의 관계로 도시하였다. 여기서, 각각의 물과 등유에 대한 포화 상태에서의 유전율상수는 측정이 용이하나, 물과 등유가 혼합된 상태에서 균일한 시료를 제작하는 것은 어렵기 때문에 Fig. 2(a)의 불포화 흙 시료의 측정치와 공기, 등유의 유전율상수를 이용하여 유류 유전율 믹싱모델을 식(10)과 같이 제안하였다. 이 식을 적용해 측정 매질의 유전율상수를 계산하였다.

$$\sqrt{\epsilon''} = \sqrt{(\sqrt{\epsilon})^2 - (\epsilon_a - \epsilon_{oil}) \cdot (n - \theta_w)} \quad (10)$$

여기서, $\sqrt{\epsilon''}$ 와 $\sqrt{\epsilon}$ 은 포화 오염 흙 시료 및 불포화 흙 시료의 유전율상수이다. 또한, ϵ_a , ϵ_{oil} , n 및 θ_w 는 각각 공기, 등유의 유전율, 공극률 및 체적함수비를 의미한다. 즉, 이 믹싱모델은 대상 매질의 성질과 구조에 착안하여 믹싱모델을 제안하였다. 따라서 모델 조합성의 문제와 등유의 유전율 손실 등에 다소 영향이 있지만, 결과적으로는 포화 지반 매질의 공극률이 파악된

다면 토양의 유전율상수를 측정하는 것만으로 대상 매질의 오염 정도를 충분히 파악할 수 있다.

1차원 유류 침투 거동 시험

포화상태로 제작된 다공질매질 내에서 유류 침투 양상을 파악하기 위한 1차원 유류 침투 모형을 제작하여 매질 내에서 유류의 침투 특성을 신속하게 측정하기 위하여 FDR 측정센서를 설치하였다(Fig. 3). 본 연구를 위해 제작된 아크릴 칼럼은 폭 20cm, 높이 60cm로써 칼럼의 상단부와 하단부에 밸브를 각기 주입물질의 주입과 배출을 원활하게 할 수 있도록 설치하였으며, 매질의 유전율상수를 측정하기 위하여 칼럼 우측면에 측정부의 길이가 15cm인 FDR 측정센서를 5cm 간격으로 총 11개를 일정하게 설치하였다(Fig. 3(a)). 또한 포화된 칼럼 내로 일정한 유속으로 주입물질을 주입하기 위해 정수위를 유지할 수 있는 정수위 탱크(mariotte bullet)를 포화된 매질의 높이를 기준으로 1cm 만큼 이격을 시켰으며,

유출 탱크(overflow tank)는 칼럼의 하단부와 유출수의 수위를 고정시켰다.

포화 칼럼 제작은 공극률을 0.40으로 고정시켜 10cm 씩 시료를 넣어 총 6번에 걸쳐 압밀 제작하였다. 그리고 칼럼 하단부에서 이산화질소를 칼럼 내 흡 입자의 교란이 일어나지 않을 정도의 압력으로 서서히 주입하였다. 이러한 작업은 흡의 공극 내에 존재해 있는 공기를 이산화질소로 치환시킨 후 증류수(distilled water)를 동일한 방법으로 주입하였다(Tada, 1994; Campbell, 1973). 제작된 흡 칼럼의 포화도(degree of saturation) 측정은 백프레서 방법(back pressure method)을 적용해 측정하였으며, 그 결과 약 99.5% 범위 내에 있다.

본 칼럼시험 방법은 칼럼 상단부에서 등유(kerosene)를, 하단부에서는 물(water)을 각기 주입하여 포화된 매질 내에서 등유의 침투 양상을 유전율상수의 반응으로 파악하기 위해 총 11개의 FDR 측정센서를 설치하여 일정 시간 간격으로 자동 측정하였다. 시험의 종료는 마지막 측정센서에서 측정되어진 유전율상수의 측정치가 거의 변화가 없을 때에 시험을 종료하였다.

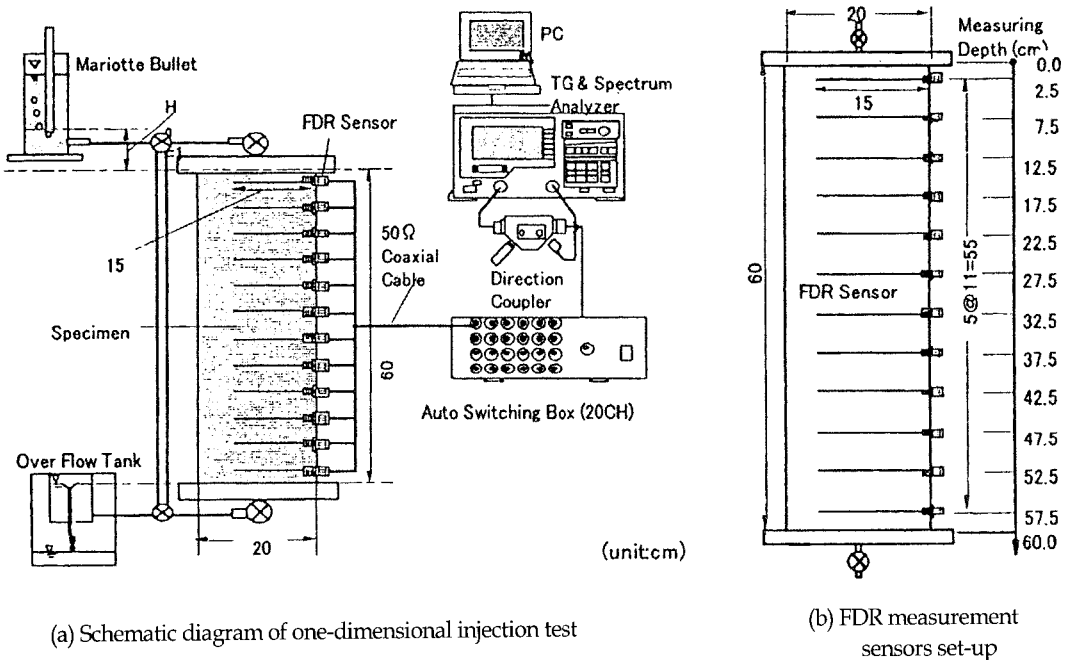


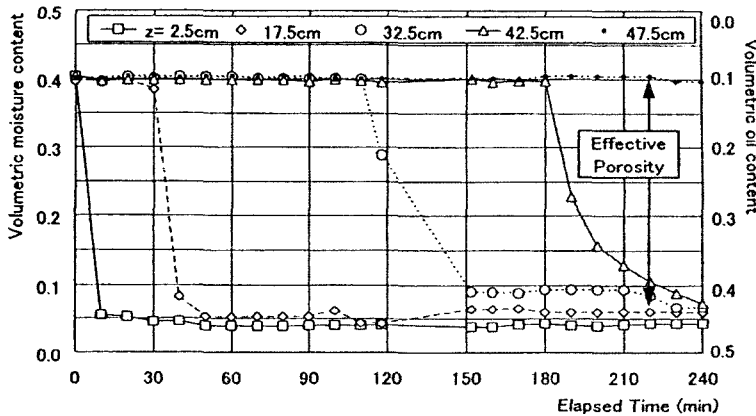
Fig. 3. Experiment apparatus for evaluating the oil infiltration movement.

유류 침투 양상에 따른 유전율 반응

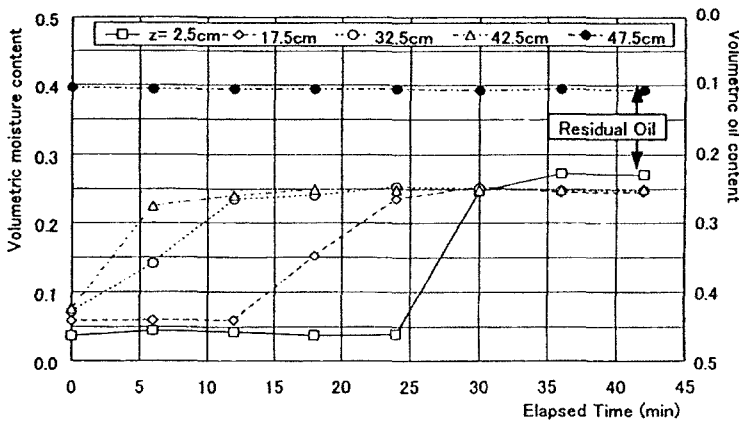
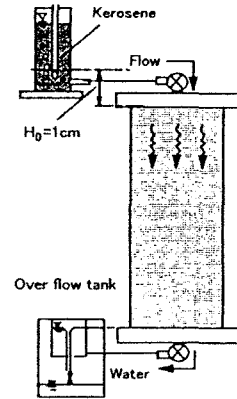
등유 주입전의 유전율상수는 포화 매질의 초기 유전율상수로써, 제작된 매질의 초기 공극률인 0.40과 비교해 약 32~34 범위 내에서 측정되었다(김만일과 정교철, 2004a). 그 후 등유를 주입함에 따라 칼럼 내 설치된 FDR 측정센서에서 순차적으로 유전율상수의 감소 현상을 파악할 수 있었다. Fig. 4에서는 총 11개의 FDR 측정센서에서 측정된 유전율상수 변화를 설치 깊이 2.5cm, 17.5cm, 32.5cm, 42.5cm, 47.5cm에서 측정된 측정치만을 사용하였다. 또한 시험 경과시간에 따른 체적함수비와 체적유류비를 함께 도시하여 비교 하였다. 다음으로 칼

럼 상단부 주입시험이 끝난 후 물로 채워진 정수위 탱크(marotte tank)로 교체한 후 동일한 조건 하에서 칼럼 하단부 주입시험을 수행하였다.

동일한 조건 하에서 두 종류의 시험 결과, 등유 주입 시험전의 초기 및 최종 체적함수비의 변화가 매우 크게 발생한 것을 알 수 있었으며, 이는 포화 매질의 공극 내에서 공극수와 등유의 치환현상이 발생된 것으로 판단된다. 따라서 서로 연결된 공극 내로 등유의 침투 이동 현상이 일어난 것으로 포화 매질의 유효공극률의 개념으로 생각할 수 있다. 체적함수비와 체적유류비의 관계를 고려해 약 0.40으로 제작된 포화 매질의 유효공극률은 약 0.35 정도로 공극률 대비 약 87.5%의 범위 내에 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 칼럼에 대해서 칼



(a) Upper part injection test



(b) Lower part injection test

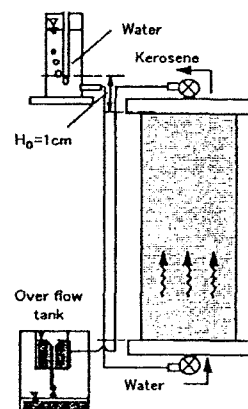


Fig. 4. Relationship between volumetric water content and volumetric oil content at injection tests from the upper part and lower part of soil column (20°C).

럼 하단부에서 물을 주입하였을 경우에 체적함수비와 체적유류비를 측정함 결과, 초기 체적함수비와 비교해 약 62%까지 회복되었다. 칼럼 하단부와 거의 근접해 있는 측정센서(깊이 47.5cm)에서는 초기 체적함수비와 거의 동일한 값을 보이고 있으나, 그 외의 측정센서들에서는 체적함수비 및 체적유류비가 약 0.25 범위 내에 분포하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 매질을 이루고 있는 입자들 주위에서 침투이동한 등유의 점도(viscosity)에 의한 것으로서 매질의 입자 주위에 흡착 현상이 원인으로 판단된다. 즉, 매질의 초기 공극률과 비교해 유류 잔류비는 약 62.5% 정도로 매우 높게 나타나는데 이는 주입된 등유가 흡입자 표면에 흡착되어 있어 흡입자와 입자사이의 공극을 메워주고 있는 상태로 존재하는 것이다. 그러므로 측정센서를 둘러싸고 있는 매질의 입자 주위에 유전율상수가 극히 낮은 등유 물질이 흡착되어 있어 측정된 결과치가 낮게 나타났다.

토 의

유전율 반응에 따른 물성치 파악

포화 및 불포화 조건하에서 체적함수비(θ_w) 내지 체적함유비(θ_{oi}) 만을 변화시켜 각각의 비율에 따른 유전율상수 변화를 검토한 결과, 동일한 조건 내에서 체적함수비의 변화만으로 유전율상수의 측정치가 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 원인으로서는 공기와 흡입자들이 갖는 유전율상수보다는 물의 유전율상수가 가장 크게 나타나기 때문이다(Noborio, 2001). 특히 물의 경우, 전자파의 영향은 물의 쌍극자 모멘트 구조에 좌우된다.

또한, 등유의 체적함유비에 따라 측정된 유전율상수는 극히 미미하게 증가되는데 이는 흡입자와 혼합되더라도 등유의 유전율상수가 작기 때문에 낮은 유전율상수 값을 보인다. 하지만, 대부분의 지반은 다소 낮은 체적함수비를 갖고 있으며, 이를 대상으로 유류의 침투 거동이 발생되기 때문에 대상 매질의 체적함수비와 체적함유비의 관계를 반드시 고려할 필요가 있다. 그리고 동일한 매질의 구조 하에서 이들의 비율은 매질의 공극 내에서만 변하기 때문에 물과 유류의 혼합 비율만 파악 가능하더라도 지반 매질의 유류 오염도를 비교적 신속하게 산정할 수 있다. 따라서 본 연구논문에서 제시한 식(10)을 이용하여 유전율상수 측정만으로 대상 매질의 유류 오염도를 충분히 파악할 수 있다.

유전율 반응을 이용한 유류거동 파악

일반적으로 매질 내에서의 물질 이동은 크게 그 매질이 가진 고유 물성치인 공극률 내지 유효공극률에 의해 좌우된다. 물론 매질 내에서 발생하는 생화학적 반응들이 있으나 본 연구에서는 유전율상수 반응으로부터 주입된 등유의 흡입자 주위에서의 흡착 상태와 포화 흡입자의 공극률 내지 유효공극률 등에 대해서만 실험적으로 규명하였다.

동일한 실험 조건하에서 상단부로 등유를 주입 후, 하단부로 물을 각기 연속적으로 주입함으로써, 5cm 간격으로 설치된 FDR 측정센서에서 매질 내의 유전율상수 변화를 자동 측정함 결과, 등유 주입 후 체적함수비 및 체적함유비의 변화가 명확히 나타났다. 먼저 등유 주입에 따라 체적함수비와 체적함유비의 변화는 체적함수비가 약 0.40에서 0.05 범위까지 크게 감소하였다가 다시 하단부에서 물을 주입과 동시에 약 0.05에서 0.25 범위까지 체적함수비가 상승하였다. 이는 등유 주입에 따른 체적함수비의 감소는 연결된 공극을 통해 등유의 침투 거동에 의해 유전율상수가 감소한 것으로서 매질의 유효공극률 개념으로 이해할 수 있다. 또한 물의 주입에 따라 체적함수비의 변화는 약 0.05에서 0.25 범위까지 다소 상승하였으나, 초기 체적함수비와는 매우 큰 차이를 보인다. 이는 초기 주입된 등유가 매질의 흡입자 사이에서 흡착 현상에 의해 잔류되었기 때문에 잔류 등유의 영향에 의해 유전율상수 측정치가 낮게 나타난 것이다. 따라서 최종 유전율상수의 측정치 결과로부터 매질 내에 잔류하고 있는 등유의 오염 정도를 파악할 수 있다.

결 언

본 연구에서는 유전율상수의 반응으로부터 지반을 구성하는 매질의 물성치 및 유류 오염에 따른 매질의 특성을 파악하기 위한 실내 칼럼시험을 수행하였다. 측정장비는 0.1~1.7GHz의 고주파수 범위 내에서 발생하는 전자파를 매질 내로 방출시켜 입사파와 반사파의 간섭 현상으로 발생하는 합성간섭파를 이용하여 유전율상수를 측정할 수 있는 방법이다.

우선 포화 및 불포화 조건의 매질에 대한 체적함수비와 체적함유비를 각기 조절하여 유류의 오염 정도에 따른 기본적인 유전율 반응을 검토하고, 포화 매질에 대한 유류 오염 정도를 파악할 수 있는 유류 유전율 미싱모델을 제시하였다. 이 미싱모델은 대상 매질의 유전율상수

의 측정만으로 매질의 오염 정도 즉, 유류 잔류비를 신속하게 파악할 수 있으며, 오염물질의 침투에 따른 거동 특성을 유전율상수 변화로부터 모니터링이 가능하다.

또한, 1차원 주입시험을 포화 칼럼 매질에 대해 등유(상단부 주입), 물(하단부 주입)을 주입시켜 칼럼 내에 설치된 FDR 측정센서에서 매질의 유전율상수 변화를 자동 모니터링 하도록 설치하였다. 본 시험을 통해 포화 매질의 유효공극률과 유류 잔류비에 대한 정량적인 측정이 가능한 것을 파악하였다. 따라서 포화 매질의 초기 공극률 0.40과 비교해 등유 주입에 따른 유효공극률의 변화는 약 0.35 정도로 낮게 나타났으며, 공극률 대비 약 87.5% 범위 내에 분포하는 것으로 알 수 있다. 그리고 등유로 거의 포화된 매질에 대해 하단부에서 물을 주입하여 매질 내 유류 잔류비를 측정된 결과, 약 62.5% 정도로 매우 높게 나타났다. 이 계산치는 초기 공극률과 비교한 것으로써 등유가 포화 매질의 흡 입자들 주위에 흡착되어 있는 상태로 존재해 있으며, FDR 측정센서 주위에 잔류된 등유가 다량 함유되어 있어 유전율상수에도 큰 영향을 받은 것이다. 따라서 매질의 공극 내 물 내지 등유로 가득 채워져 있을 때는 이들의 고유 유전율상수에 의해 변화가 매우 큰 것을 확인하였다.

결과적으로, FDR 측정센서를 이용하여 매질의 유류 오염 정도 내지 침투 경로를 신속하게 파악할 수 있으며, 이는 매질의 흡 입자와 공극 내에 존재하는 공기, 물 그리고 유류의 함유 정도에 따라 유전율상수의 변화를 파악하기 때문에 매우 정량적으로 매질의 물성치를 측정할 수 있을 것이다. 따라서 실내 칼럼시험을 수행하여 측정된 유전율과 이에 대한 매질의 특성을 고려하여 본 측정 장비를 이용해 현장에서의 원위치 시험을 통해 지반 매질의 물성치를 측정할 필요가 있다. 또한 지반 내 오염원이 다수 존재해 있는 지점에서의 장기 모니터링을 통해 이들의 거동 특성을 파악할 수 있는 체계적인 모니터링 기법에도 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 김만일, Nishigaki, M., 2003, 유전율법에 따른 다공질 매질의 특성 파악을 위한 실험적 연구, 지질공학, 13(4), 405-418.
- 김만일, 정교철, 2004, Frequency Domain Reflectometry System을 이용한 포화 다공질매질의 유전율 측정을 위한 연구, 지질공학, 14(2), 179-187.
- 김만일, 정교철, 박창근, 2004, 지하댐 지반 물성치 측정을 위한 유전율 측정 시스템 개발, 지질공학, 14(4), 361-369.
- 地盤工学会, 2002, 地盤工学·実務シリーズ 15; 土壤地下水汚染の調査・予測・対策, 社団法人 地盤工学会, 271(日本語版).
- Ansoult, M., L.W. De Backer and M. Declercq, 1985, Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. Soil. Sci. Soc., 49, 47-50.
- Campbell, J.D., 1973, Pore pressures and volume changes in saturated soils, Ph.D. thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois, USA.
- Chan, C.Y. and R.J. Knight, 1999, Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials, Water Resources Research, 35(1), 85-93.
- Drenvich, V.P., S.I. Siddiqui, J. Lovell and Q. Yi, 2001, Water content and density of soil in situ by the Purdue TDR method, Proceeding of the symposium TDR2001: Innovative Applications of TDR Technology, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Gaskin, G.J. and J.D. Miller, 1996, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring, J. Agric. Eng. Res., 63, 153-160.
- Jackson, S.H., 2003, Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites, Agricultural water management, 58, 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, 147-157.
- Mohamed, A.M.O. and Said, R.A., 2005, Detection of organic pollutants in sandy soils via TDR and eige decomposition, Journal of contaminant hydrology, 76, 235-249.
- Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Ritter, A., Alvarez-Benedi, J. and Socorro, A.R., 2005, TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil, Geoderma, 124, 399-413.
- Nishigaki, M., Komastu, M. and Kim, M.I., 2003, An experimental approach for estimating the porosity and effective porosity of porous media by permittivity methods, Proceeding of the international

symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration, November 18-19, Seoul, Korea, 703-710.

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

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), 574-582.

김만일

한국수자원공사 수자원연구원
305-811 대전광역시 유성구 전민동 462-1

TEL: 042-860-0427

FAX: 042-890-0592

E-mail: mikim916@hotmail.com

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388

TEL: 054-820-5753

FAX: 054-823-1627

E-mail: jeong@andong.ac.kr

투 고 일 2005년 2월 10일

심 사 일 2005년 2월 11일

심사완료일 2005년 3월 9일