

## 유전율을 이용한 토양오염 모니터링 기법의 제안

김만일, 김형수, 정교철\*

한국수자원공사 수자원연구원, \*안동대학교 지구환경과학과 (mikim916@hotmail.com)

### <요약문>

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 오염도의 측정 및 오염도와 체적함수비의 관계를 측정하여 유전율 반응으로부터 매질의 물성치를 파악할 수 있는 것을 확인하였다.

**key words** : 유전율, FDR, 유전율 모니터링, 유류오염, 체적함수비

### 1. 서론

최근 토양 지하수오염이 매우 큰 문제로 대두되고 있는 실정에서 효율적인 조사 및 오염 지반에 대한 복원기술이 절실히 요구되고 있다. 지금까지 지반의 오염도 측정법으로는 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.

유전율 측정법은 Topp et al.(1980)<sup>1)</sup>는 Time Domain Reflectometry(TDR) 측정법을 이용하여 토양의 유전율로부터 체적함수비를 파악하는 교정곡선을 제시하였으며, 그 후 Gaskin et al.(1996)<sup>2)</sup>에 의해 삼각형 배열로 이루어진 측정센서들의 내부에서 유전율을 측정할 수 있는 Amplitude Domain Reflectometry(ADR) 측정법이 소개되었다. TDR 및 ADR 측정법과 동일하게 전자기파를 이용하여 토양의 유전율을 측정하는 방법으로는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정법이 있다. 이 측정법은 1분식 형태의 측정센서를 직접 매질 내에 삽입하여 주파수 영역에 의한 인피던스 반응특성으로부터 유전율상수를 측정하는 유전율 측정법 중의 하나이다. 따라서 오염된 지반의 유전율 분포를 측정하는 것으로써, 시간에 따른 오염도의 변화측정이 가능하며 구체적으로 물과 오염물질의 유전율 차이를 이용하여 포화 및 불포화 영역에서 토양 오염도를 조사하는 측정방법을 확립하기 위함이다.

·이에 본 연구에서는 FDR 장비를 적용해 토양의 오염도를 원위치에서 측정하기 위한 기초적 실험연구로써 주파수의 인피던스 범위에 대한 유전율 측정 가능성을 검토하였다.

## 2. 실험방법 및 결과

### 2.1. Frequency Domain Reflectometry system에 의한 유전율 측정

FDR 장비는 전자기파의 인피던스 반응에 따라 매질의 유전율을 측정하는 것으로서, tracking generator & spectrum analyzer, directional coupler, sensor probe 및 data logger로 구성되어 있다(Fig. 1). 매질의 유전율 측정은 sensor probe를 측정매질에 삽입한 후, tracking generator(A 지점)에서 0.1~1.7GHz의 고주파의 전자기파를 측정매질로 방출한다. 전자기파의 진행속도는 매질 주변의 유전특성에 의해 변하기 때문에 매질에 설치된 sensor probe(B지점)에서의 반사파와 선단(C지점)까지의 반사파를 발생시킨다. 이 두 반사파들은 합성간섭파를 발생시켜 directional coupler를 경유해 spectrum analyzer(D지점)에서 관찰된다. 여기서 sensor probe선단부터의 반사파 신호는 sensor probe를 왕복하기 때문에 위상이 늦어져 측정된 두 반사파의 합성간섭파는 일정한 주파수 간격에서 sin곡선과 비슷한 굴곡형태의 주파수 파장을 보이게 된다. 이 sensor probe 선단부터 반사파의 위상 지연은 측정매질의 유전특성에 의존하기 때문에 합성간섭파의 주파수 간격으로부터 식 (1)에 적용해 대상측정매질의 유전율을 측정하는 것이 가능하다.

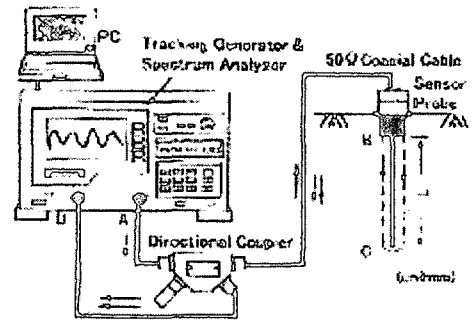


Fig. 1. FDR system to measure the dielectric constant for porous

$$\epsilon = k \left( \frac{C}{2L\Delta f_m} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $\Delta f_m$ ,  $L$ ,  $C$  및  $k$ 는 각각 spectrum peak 주파수차(Hz), sensor probe의 길이(m), 진공중의 광속( $3 \times 10^8$  m/sec) 및 보정계수이다.

### 2.2. 매질의 유전율 반응

일반적으로 오염된 지반은 공기, 물, 흙입자 및 오염물질로 이루어져 있다. 이러한 매질들의 유전율 특성을 파악하기 위해서 직경 60mm, 높이 200mm의 아크릴 용기에 혼합된 시료를 넣은 후 압밀하여 공시체를 만들고, 150mm 길이의 sensor probe를 흡칼럼 상단부 중앙에서 삽입하여 FDR 장비를 사용해 유전율을 측정하였다.

Fig. 2는 공기, 물, 표준사(공극률 0.40) 및 등유를 대상으로 측정된 spectrum곡선(종축은 전자기파의 전압 진폭, 횡축은 측정주파수 범위)을 도시하였다. 각 spectrum곡선의 peak로부터 주파수차를 계산하여 식(1)에 대입하여 각 매질의 유전율이 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. 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 특징을 보임으로써 지반매질의 유전율은 주로 물의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

### 2.3. 유류오염 매질의 유전율 변화

동일한 흡칼럼을 이용해 물과 등유의 체적함수비를 각기 조절하여 불포화 및 포화시료를 제작하여 FDR 장비에 의한 유전율반응을 검토하였다. 이 때 각 흡칼럼의 초기공극률은 0.40으로 압밀하여 제작한 후 sensor probe를 흡칼럼 상단부 중심이 되는 부분에 삽입하여 설치하였다. 유전율의 측정은 삽입과 동시에 측정되기 때문에 신속한 실험이 진행될 수 있었다.

#### 2.3.1. 불포화 흡시료 (표준사-물-공기):

공극률을 0.40으로 일정한 조건하에서 제작된 시료에 대해 단계적으로 체적함수비

만을 조절하여 흡시료의 유전율 변화를 측정하였다. Fig. 3(a)는 유전율( $\sqrt{\epsilon}$ )과 체적함수비( $\theta_w$ )에 대한 측정치와 Topp et al.<sup>1)</sup>의 교정곡선과 비교하였다. 체적함수비의 저-고영역부에서 최대 1%정도의 측정 차이를 보이고 있는 것은 TDR과 비교해 sensor probe의 형태 및 측정 주파수의 범위 및 측정된 대상 매질이 다르기 때문이다. 이러한 현상을 고려하여 FDR system만의 고유 교정곡선을 유도할 필요가 있다.

#### 2.3.2. 불포화 오염 흡시료 (표준사-등유-공기):

물 대신 등유를 사용하여 등유의 체적함수비만을 조절하여 불포화 오염 흡시료를 제작한 후, 동일한 조건하에서 유전율( $\sqrt{\epsilon}$ )과 체적함수비( $\theta_w = V_{oil}/V$ )의 관계를 Fig. 3(b)에 나타내었다. Fig. 3(a)의 결과와 비교해 보면, 등유의 함량이 증가하면서 공기와 등유의 치환에 의해 유전율은 상승하는 경향을 확인하였다. 이러한 원인은 물( $\epsilon=80.4$ )과 등유( $\epsilon=2.0$ )의 고유 유전율치가 큰 차이를 보이기 때문이다.

2.3.3. 포화 오염 흡시료 (표준사-물-등유): 포화지반에 대한 오염도측정의 기초가 되는 교정곡선을 Fig. 3(c)에 유전율-체적함수비-체적함수비의 관계로 나타내었다. 여기서, 물과 등유의 각 포화상태의 유전율은 측정이 용이하나, 물과 등유가 혼합된 상태에서 균일한 시료를 제작하는 것은 어렵기 때문에 Fig. 3(a)의 불포화 흡시료의 측정치와 공기, 등유의 유전율치를 이용하여 식(2)를 적용해 측정매질의 유전율을 계산하였다.

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

여기서,  $\sqrt{\epsilon''}$ 와  $\sqrt{\epsilon}$ 은 포화오염 흡시료의 유전율 및 불포화 흡시료의 유전율이다. 또한,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_{oil}$ ,  $n$  및  $\theta_w$ 는 각각 공기, 등유의 유전율, 공극률 및 체적함수비를 의미한다. 즉, 토양의 유전율을 나타내는 모델은 대상매질의 성질과 구조에 착안하여 믹싱모델을 제안하였다. 따라서 모델 조합성의 문제와

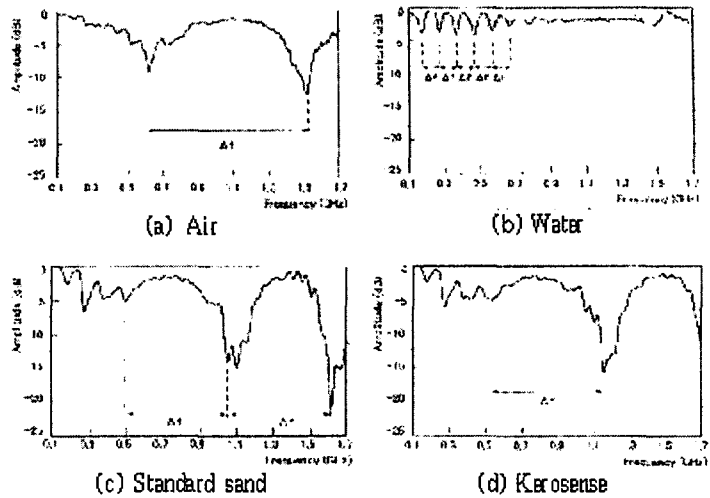


Fig. 2. Measured spectrum for each material measured by FDR system (T=20°C).

등유의 유전율 손실 등에 다소 영향이 있지만, 결과적으로는 포화 지반 매질의 공극률이 알려져 있다면 토양의 유전율을 측정하는 것만으로 매질의 오염도를 충분히 파악할 수 있을 것이다.

### 3. 결론

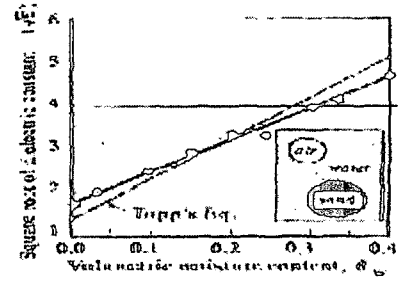
본 연구에서는 지반을 구성하고 있는 다양한 매질들이 가지고 있는 고유 유전율변화로부터 원위치에서 지반오염을 평가할 수 있는 새로운 시험법인 FDR 측정법의 적용성을 검토하기 위해 실내에서 기초시험을 실시하였다. 여기서는 적용된 FDR 장비의 소개 및 유전율이 측정되는 방식, 그리고 포화 및 불포화 매질에 대한 등유의 체적함유비에 따른 유전율 반응에 대해 TDR 교정곡선과 비교하여 검토하였다. 특히, 매질 내에 등유를 포함하고 있는 조건에서 이들의 유전율 측정을 파악하기 위해서는 매질을 구성하고 있는 순수한 공기, 물, 흙입자의 구조를 유전율과 관련시켜 파악한 후, 유류의 오염정도를 파악할 필요가 있다는 것을 확인하였다.

### 4. 감사의 글

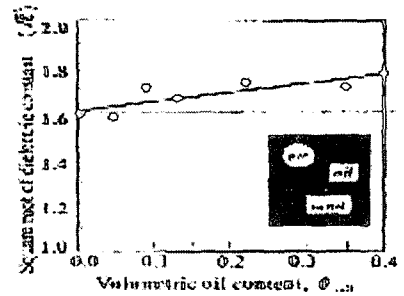
본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발, 과제번호 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

### 5. 참고문헌

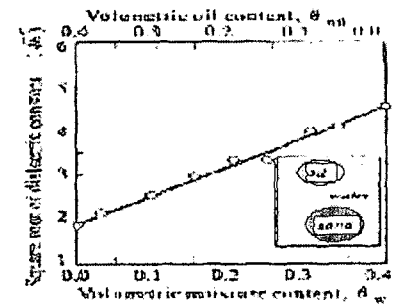
- 1) Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16(3), pp 574-582, 1980.
- 2) Gaskin, G.J. and J.D. Miller, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring, *J. Agric. Eng. Res.*, 63, pp 153-160, 1996.



(a) Unsaturated soil



(b) Contaminated dry soil



(c) Contaminated saturated soil

Fig. 3. Dielectric constant for contaminated soil under each condition.