

염수환경에서의 구리 농도 평가를 위한 Time Domain Reflectometry 프로브 개발

Development of Time Domain Reflectometry Probe for Evaluation of Copper Concentration in Saline Environment

이 동 수¹⁾ · 이 종 섭¹⁾ · 홍 원 태¹⁾ · 유 정 동[†]

Dongsoo Lee · Jong-Sub Lee · Won-Taek Hong · Jung-Doung Yu

Received: December 19th, 2017; Revised: December 29th, 2017; Accepted: February 7th, 2018

ABSTRACT : As electromagnetic waves are affected by electrical conductivity or permittivity, they are widely used to evaluate geotechnical characteristics. In this study, a probe for measuring electromagnetic waves using a time domain reflectometry is manufactured to evaluate heavy metal concentration in saline water. In the experiments, a copper is used as a heavy metal, and a probe is demonstrated with the concentration of copper. Solutions were set for 8 different copper concentration (0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10 mg/L) in saline water with 3% salinity. The probe is coated by electrical insulating materials such as epoxy, top-coat, varnish, acrylic paint, heat-shrinkage tube to measure electromagnetic waves in saline water. The measured signals are compared according to coating material. As results, for probes coated with acrylic paint and heat-shrinkage tube, signal variation is not detected. For epoxy, top-coat, and varnish coated probes, the voltage decreases with an increase of copper concentration. Probes coated by epoxy at once and top coat can estimate under 5 mg/L of copper concentration and the probe coated by epoxy twice can estimate over 5 mg/L of copper concentration. This study shows that the probe using the time domain reflectometry can be used to evaluate the concentration of heavy metal in saline water by coating the probe with insulating material.

Keywords : Apparent dielectric constant, Heavy metal, Leakage, Saline water, Time domain reflectometry

요 지 : 전자기파는 주변 매질의 전기전도도와 유전율에 민감한 영향을 받기 때문에 지반의 특성을 평가하는데 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 염수환경에서도 다양한 농도의 중금속을 검출하기 위하여 시간영역반사법을 이용한 전자기파 측정 프로브를 제작하였다. 중금속으로는 구리를 사용하였으며, 실내 실험을 통해 구리 농도에 따라 적용 가능한 프로브를 선정하였다. 실내 실험에서는 염도 3%의 염수에 용해된 구리의 농도가 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 그리고 10mg/L가 되도록 8단계로 용액을 조성하였다. 프로브는 염수에서도 전자기파를 측정할 수 있도록 5가지의 각기 다른 절연재로 코팅하여 비교하였다. 코팅재로는 에폭시, 탑코트, 바니쉬, 아크릴페인트, 히팅튜브를 사용하였으며 코팅재에 따른 전자기파의 신호 특성을 분석하였다. 실험 결과, 아크릴페인트와 히팅튜브로 코팅된 프로브는 구리 농도에 따른 신호 변화가 관측되지 않았으며, 에폭시, 탑코트, 바니쉬의 경우 구리 농도가 증가함에 따라 반사된 전자기파의 전압의 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 에폭시로 1회 코팅한 프로브와 탑코트로 코팅한 프로브는 구리의 농도가 5mg/L 이하일 때 민감한 반응을 보였으나 에폭시로 2회 코팅한 경우, 구리의 농도가 5mg/L보다 클 때 더 민감하게 반응하였다. 본 연구의 결과는 절연재로 코팅된 시간영역반사법을 이용한 전자기파 측정 프로브가 염수에 녹아있는 중금속의 농도를 평가하는데 활용될 수 있음을 보여준다.

주요어 : 겔보기 유전 상수, 중금속, 누수, 염수, 시간영역반사법

1. 서 론

우리나라는 협소한 국토와 높은 인구밀도로 인해 폐기물의 발생이 가속되고 있으며, 이에 따라 폐기물 처리에 대한 문제가 대두되어 왔다. 그러나 국토의 대부분이 산지로 이루어진 특성상 더 이상의 국토개발은 어려운 상황이며 개발 공간의 창출에 대한 요구는 증대되고 있다. 이는 삼면이 바다

로 둘러싸인 우리나라의 환경적인 요소와 맞물려 해양공간에 대한 개발로 관심이 이어지고 있으며, 유사한 상황에 있는 일본이나 싱가포르에서는 폐기물 발생문제를 해결하기 위해 해상 처분장을 조성하여 운영해 오고 있다. 일본의 경우 1960년대부터 조성하기 시작하여 약 40개소의 해상 폐기물 처분장을 운영 중에 있으며, 싱가포르의 경우 세마카우 처분장을 조성하여 매립을 진행하고 있다(Park et al., 2016).

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

† School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : noorung2@korea.ac.kr)

매립시설에서 침출수는 주변 환경에 가장 유해하게 작용하는 요소로, 유출 시 지반 및 지하수 오염과 같이 치명적이며 지속적인 문제로 작용한다. 일반적으로 매립장의 침출수에 대한 모니터링을 위해 침출수 집배수 시설이나 누출검지 시스템, 처리시설 등을 사용하고 있으며 추가적으로 이에 의한 오염을 방지하기 위해 차수막을 설치하도록 하고 있다. 설치된 차수막은 절연성을 가지기 때문에 차수막이 파손될 경우 생기는 핀홀을 통한 전류경로가 형성되며, Oh et al. (2001)은 차수막을 이용하여 간접적인 매립지의 건전도 평가를 수행하였다. 이와 같이 육상 매립장에서는 침출수에 대한 모니터링 연구가 수행되고 있지만 해상 처분장에서의 침출수 모니터링 연구는 미미한 실정이다. 또한 실제 해상 처분장에서도 침출수에 대한 모니터링은 수행하고 있지 않으며 처분장 내외의 수위나 보수수, 외부 수질 등에 대한 모니터링만 수행 중이다.

전자기파는 주변 매질의 특성에 민감하게 반응하는 전파 특성을 가지고 있다. 이와 같은 이유로 지반공학분야에서 전자기파를 이용한 연구가 활발히 수행되고 있다. Yu et al. (2018)은 전자기파가 매질의 임피던스 특성에 영향을 받는 것을 이용하여 쓰일네일의 건전도를 평가하였다. Hong et al. (2016)은 SWCC(Soil-Water Characteristic Curves)를 산정하기 위해 전자기파를 이용하였다. Byun et al. (2017)은 현장에서 체적 함수비를 산정하기 위해 관입형 전자기파 측정 센서를 개발하였다. Oh et al. (2001)은 실험을 통해 지반이 중금속과 같은 전도성 물질로 오염되어 있는 경우, 전기 저항값이 감소하는 것을 증명하였다. 이와 같은 특성을 이용하여 염수로 포화된 지반을 모사한 경우에서의 모니터링 연구가 수행된 바 있으나(Lee et al., 2017), 실제 일본에서 사용하는 폐기물에 대한 환경기준에 의하면 중금속 오염물의 농도가 0.1mg/L 이하 정도로 기준치가 상당히 미량의 값으로 적용되고 있다. 본 연구에서는 염수 조건에서 미량의 농도를 포함한 다양한 농도의 중금속을 검출할 수 있는 시간영역반사법(TDR: Time Domain Reflectometry)을 이용한 전자기파 측정 프로브(이하 TDR 프로브)를 개발하고자 한다.

본 논문에서는 해양 환경에서도 다양한 농도의 중금속 오염을 즉각적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하기 위하여 다양한 종류의 전기 절연재로 코팅한 TDR 프로브를 제작하였다. 프로브는 다섯 가지 종류의 절연재로 코팅하여 제작되었으며, 코팅재의 종류별로 중금속이 녹아있는 염수에서의 오염물 검출실험을 수행하였다. 중금속으로는 구리를 사용하였다. 연구결과를 바탕으로 TDR 프로브가 염수 조건에서 프로브의 코팅재에 따라 다양한 중금속 농도를 검출하는 기법으로 활용될 수 있음을 보이고자 하였다. 본 논문은 전송선

(transmission line)과 시간영역반사법(time domain reflectometry)에 관한 이론적 배경, 실험의 구성, 실험 결과, 결과 분석, 그리고 요약 및 결론으로 구성된다.

2. 시간영역반사법과 전송선 이론

전송선에 전자기파가 전파할 때 전송선에 전기적인 임피던스 변화가 발생하면 신호가 반사된다. 이렇게 반사된 신호를 측정하는 기술을 시간영역반사법이라고 한다. 전송선은 전원과 전기적 부하를 이어주는 연결선으로 유전체를 사이에 둔 두 개의 전선 구조를 의미하며, 대표적으로 동축 케이블(coaxial cable)이 있다. 전송선 이론은 전송선 사이에서의 교류전류의 흐름을 해석하기 위한 이론으로, 회로이론과 전자기장 해석을 이어주기 위한 역할을 한다. 전송선의 회로도와 동축 케이블과 연결된 프로브를 전송선 회로로 모사하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 유전체를 사이에 둔 전송선을 회로도로 모사한 Heaviside의 *RLGC* 모델이다. 여기서 *R*은 저항(resistance), *L*은 인덕터(inductor), *C*는 축전기(capacitor), *G*는 컨덕터(conductor)이다. Fig. 1(b)는 동축 케이블에 연결된 3개의 전극봉을 나타낸 것으로 시간영역반사법의 신호를 획득할 때 주로 이용되는 프로브의 형상이다(Fellner-Feldegg, 1969; Topp et al., 1980; Zegelin et al., 1989). 시간영역반사법이란 전송선을 따라 전파하는 전자기파의 반사 신호를 시간 영역에서 측정하는 기술이다. 프로브와 연결되는 동축 케이블의 내부도체는 프로브의 가운데 전극봉과 연결되어 주로 신호경로(signal path)로 이용되며 나머지 두 개의 전극봉은 동축 케이블의 외부도체와 연결되어 귀환경로(return path)로 이용된다(Noborio, 2001).

Fig. 1(a)와 같이 전위차가 존재하는 두 개의 선로(신호경로와 귀환경로)는 서로 다른 선로와의 전위차로 인해 전기장이 형성되며 두 선의 사이는 무수한 축전기가 연결된 것과 같은 특성을 가지게 된다(Bogatin, 2009). 두 선로 사이의 전기적 특성이 변화함에 따라 각 지점별 정전용량의 차이가 생기며 전송선 내에 흐르는 전류변화가 발생한다. 이를 바탕으로 두 선로 사이의 특성 임피던스(characteristic impedance)를 계측할 수 있다. 특성 임피던스를 계산하기 위하여 Fig. 1(a)에서 하나의 회로도가 단위 길이 Δx 마다 존재한다고 가정할 수 있다. 이 회로도에 키르히호프의 전압(*V*)과 전류(*I*) 법칙(Kirchhoff's voltage and current laws)을 적용하면 Eq. (1)과 (2)와 같이 나타난다.

$$\frac{dV}{dx} = -(R + j\omega L)I \quad (1)$$

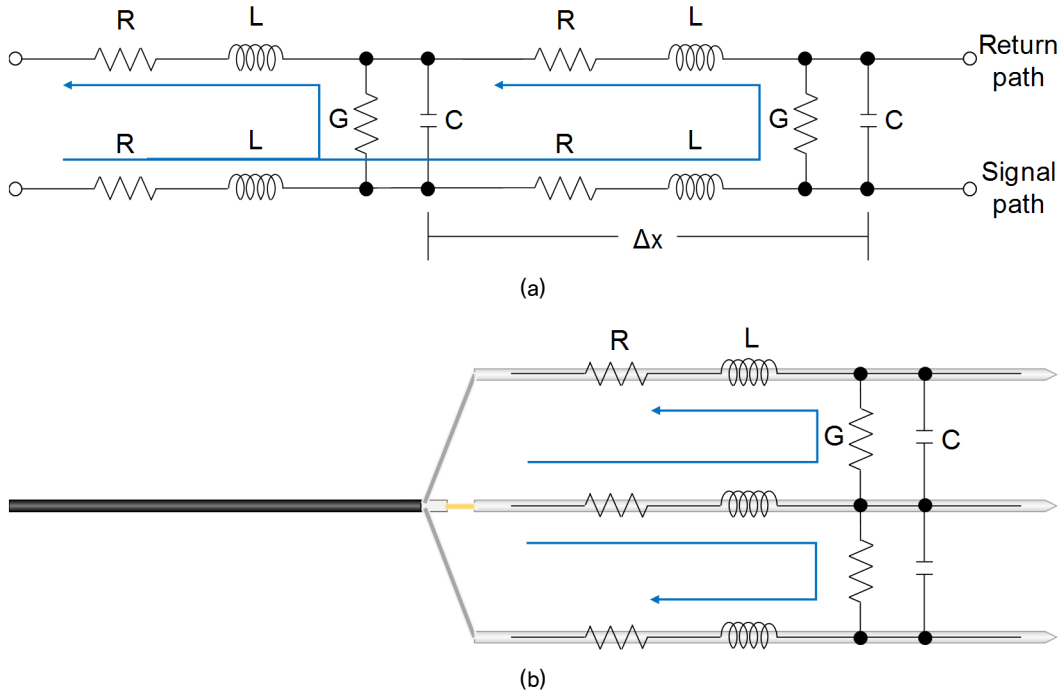


Fig. 1. RLGC circuit model of transmission line: (a) Heaviside's model; (b) Application to TDR probe connecting with coaxial cable

$$\frac{dI}{dx} = -(G + j\omega C)V \quad (2)$$

여기서 j 는 복소수, ω 는 각주파수를 나타낸다. 전류가 선로에 흐를 때 열손실이 발생해 전압이 줄어드는 것은 저항(R)으로, 자기장 성분은 인덕터(L)로, 두 선로 사이에 발생하는 전기적인 누설과 축적된 전하는 각각 컨덕터(G)와 컨덕터(C)로 표현된다. Eq. (1)과 (2)에 임피던스(impedance)와 어드미턴스(admittance) 개념을 적용하면 Eq. (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다(Spergel, 1972).

$$Z = R + j\omega L \quad (3)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (4)$$

여기서 Z 는 임피던스, Y 는 어드미턴스가 되며, Eq. (3)과 (4)의 비로부터 특성 임피던스 Z_0 를, 곱으로부터 전파 상수 γ 를 구할 수 있다(O'Connor & Dowding, 1999).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (6)$$

만약 R 과 G 가 각각 ωL 과 ωC 에 비해 매우 작으면 특성 임피던스 Z_0 는 Eq. (7), 전파 상수 γ 의 역수인 전파속도 V_p 는

Eq. (8)과 같이 표현된다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (8)$$

여기서 ϵ_0 와 μ_0 는 각각 진공에서의 유전율(permittivity)과 투자율(magnetic permeability)이며 ϵ_r 와 μ_r 는 각각 비유전율 또는 유전 상수(relative permittivity or dielectric constant)와 비투자율(relative magnetic permeability)이다. 유전 상수(ϵ_r)와 비투자율(μ_r)은 매질의 유전율(ϵ)과 투자율(μ)을 각각 진공에서의 유전율(ϵ_0)과 투자율(μ_0)로 나눈 값이다. c_0 는 빛의 속도(3×10^8 m/s)이며, L 과 C 는 투자율과 유전율에 영향을 받는다(Bogatin, 2009). 자계(magnetic field)의 영향으로 자화(magnetization)가 되지 않는 비자성체(non-magnetic material)의 비투자율은 1이므로 전송선 이론에 있어 특성 임피던스와(Z_0) 파동의 전파속도(V_p)는 전송선 사이 매질의 유전 특성에 지배적임을 알 수 있다.

전기공학적인 관점에서 유전 상수는 Eq. (9)와 같이 복소 유전 상수(ϵ_r^* , complex dielectric constant or complex relative permittivity)로 표현된다.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' + j \left(\epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right) \quad (9)$$

여기서 σ_{dc} 는 직류의 전기 전도도(electrical conductivity), ω 는 각주파수이다. ϵ_r' 은 복소 유전 상수의 실수부를 나타내며 전기적인 에너지의 저장과 관련된다. ϵ_r'' 는 허수부 유전 상수를 나타낸다. 복소 유전 상수의 허수부는 유전 손실(dielectric loss)과 전도 손실(conduction loss)에 의한 전기적인 에너지의 손실과 관련된다. 전송선로에 전파하는 전자기파의 도달 시간(Δt)은 복소 유전 상수와 관련하여 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다(Von Hippel, 1954).

$$\Delta t = \frac{2l}{c} \left[\epsilon_r' \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon_r'} \right)^2} \right\} \right] / 2 \quad (10)$$

그러나 전기공학적인 관점에서 정의된 유전 상수와 TDR로 측정된 신호로부터 산정된 유전 상수에는 다소 차이가 있다. TDR 프로브로 측정된 전자기파의 속도는 Eq. (11)과 같이 프로브의 왕복 거리(l)와 전자기파의 도달 시간(Δt)의 비로 나타낼 수 있으며, Eq. (11)로부터 Eq. (12)와 같이 유전 상수를 산정할 수 있다.

$$V_p = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{c_0 \Delta t}{2l} \right)^2 \quad (12)$$

여기서 TDR 프로브로 측정하여 산정되는 유전 상수는 복소 유전 상수의 실수부와 허수부로 분리하여 산정되지 않는다. 그러나 TDR 프로브로 측정된 신호는 복소 유전 상수의 실수부와 허수부 모두와 관련된 값이다. 이와 같은 이유로 TDR 프로브로 산정된 유전 상수(ϵ_a)는 겉보기 유전 상수 또는 겉보기 비유전율(ϵ_a : apparent dielectric constant or apparent relative permittivity)이라고 한다(Topp et al., 1980). 겉보기 유전 상수는 Eq. (10), Eq. (11), 그리고 Eq. (12)로부터 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_r'}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon_r'} \right)^2} \right) \quad (13)$$

Eq. (13)을 근거하여, TDR 프로브로 측정된 신호는 유전 손실과 전도 손실을 모두 포함한 결과를 보여준다.

3. 실험구성

3.1 측정시스템

TDR 프로브를 이용하여 염수에 녹아 있는 오염물의 농도를 평가하기 위한 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되었다. 전자기파 신호를 발생시키고 획득하기 위해 14 μ s의 펄스폭(pulse width)과 200ps의 상승 시간(rising time)을 지닌 스텝 펄스(step pulse)를 발생시키는 time-domain reflectometer (HL1101, Hyperlabs)를 사용하였다. 신호의 획득 데이터 수는 데이터 중첩을 통한 노이즈 제거를 목표로 하기 때문에 128회의 충분한 횟수로 설정하였다. 실험 용액은 염도 3%인 1L의 염수를 사용하였으며, 용액 온도는 섭씨 19도로 설정하였다. 측정 오염물은 국내 폐기물 소각장 바닥재의 시료분석에서 최다 검출된 구리를 이용하였으며, 이온화된 상태를 모델링하기 위해 구리 표준 용액의 농도를 0mg/L에서 10mg/L까지 8단계(0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10mg/L)로 변화시키며 실험을 수행하였다

3.2 프로브 제작

시간영역반사법을 이용하여 염수에 녹아 있는 구리의 농도에 따른 전자기파의 전파 특성을 평가하기 위해 Fig. 3과 같이 TDR 프로브를 제작하였다. 본 연구에서는 time domain reflectometer로부터 발생된 신호와 프로브에 전송되는 신호를 50 Ω 의 특성 임피던스를 가지는 동축 케이블(RG58C/U)을 이용하여 전송한다. 따라서, 동축 케이블과 프로브 사이에 발생하는 전기장의 적절한 전환을 위하여 프로브는 3개

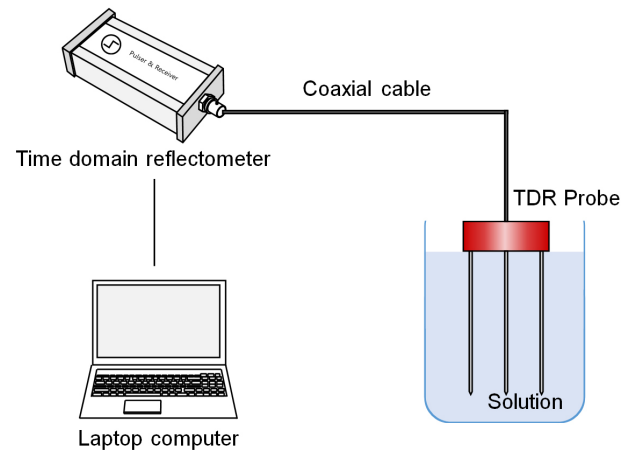


Fig. 2. Measurement system

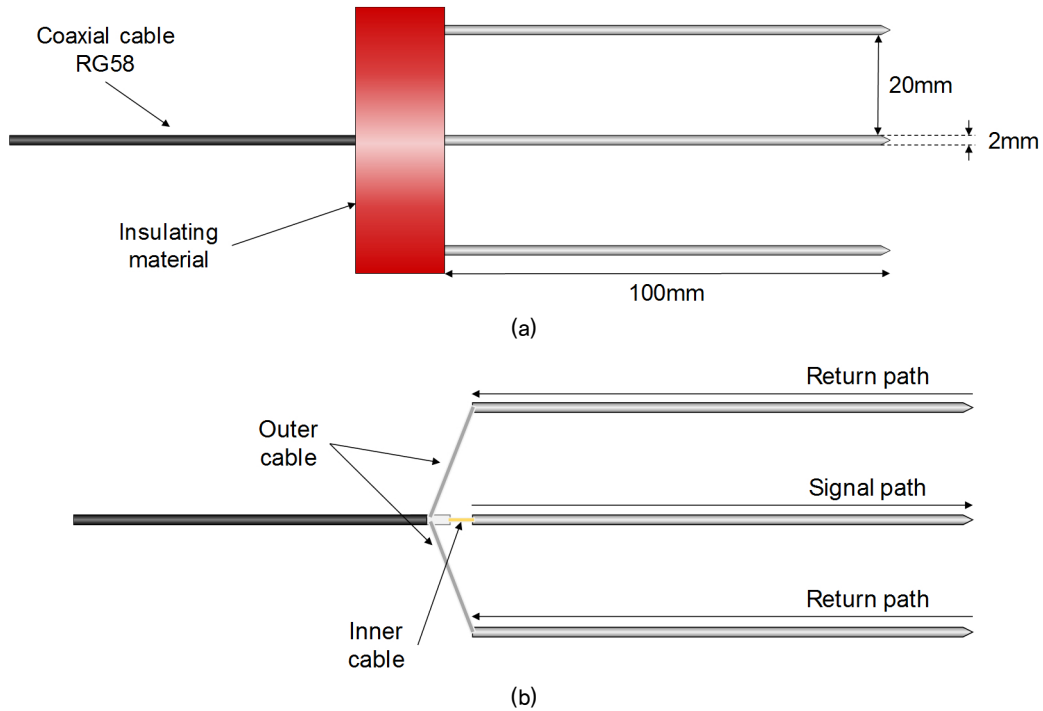


Fig. 3. Schematic drawing of TDR probe: (a) Specification of probe; (b) Cable connection and path of electromagnetic wave

의 전극(또는 전극봉)으로 구성된 전송선로로 제작되었다 (Spaans & Baker, 1993). 전극은 총 3개로 길이 100mm, 직경 2mm인 스테인리스 강봉을 사용하였다. 각 전극은 케이블의 내·외부케이블과 연결되며, 내부케이블과 연결되는 가운데 전극은 신호경로(signal path)로 사용하고 외부케이블은 두 가닥으로 나누어 남은 두 전극에 연결하여 귀환경로(return path)로 사용하였다. 연결된 전극봉들의 간격은 직경과 비교하였을 때 10배 이상의 간격을 가져야 하므로(Knight, 1992; Noborio, 2001), 직경(2mm)의 10배인 20mm로 결정하였다.

고전도성 매질인 염수에서 제작한 프로브를 이용해 시간 영역반사법 신호를 측정할 경우 전류 누설이 일어나기 때문에 절연성이 있는 물질로 코팅이 되어야 한다(Fujiyasu et

al., 2004). 본 연구에서는 코팅재료 5가지 재료(에폭시, 탐코트, 바니쉬, 아크릴페인트, 히팅튜브)를 선정하였으며 히팅튜브를 제외한 4가지 재료들은 Fig. 4와 같이 원통형 튜브를 이용해 코팅을 진행하였다. 원통형 튜브에 전극을 하나씩 담갔다 뺀 뒤 자연건조하는 방법을 이용하였으며, 건조시 코팅 두께는 0.15mm로 측정되었다. 에폭시는 추가로 2회 코팅도 진행하였으며 2회 코팅 시 두께는 0.25mm로 측정되었다. 히팅튜브는 각 전극을 피복한 뒤 열을 가하고 고무패킹으로 끝을 마감하여 코팅하였다.

4. 실험결과

4.1 에폭시

에폭시로 1회 코팅한 프로브로 측정된 신호는 Fig. 5(a)와 같다. 측정된 신호를 보면 구리의 농도가 증가함에 따라 반사된 신호의 전압값이 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 구리 농도가 5mg/L일 때까지는 농도가 감소하여도 반사된 신호가 나타났으나 구리의 농도가 10mg/L일 때에는 신호가 완전히 감쇠된 것을 볼 수 있다. 에폭시로 1회 코팅한 두께가 구리 농도 10mg/L에서는 전류의 누설을 충분히 제어하지 못했기 때문으로 사료된다. 150ns에서 측정된 구리 농도에 따른 신호의 전압값을 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(b)와 같이 염수의 농도가 증가함에 따라 반사된 전압의 크기

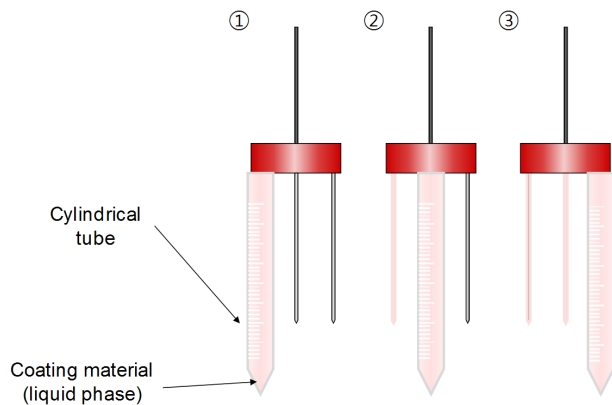
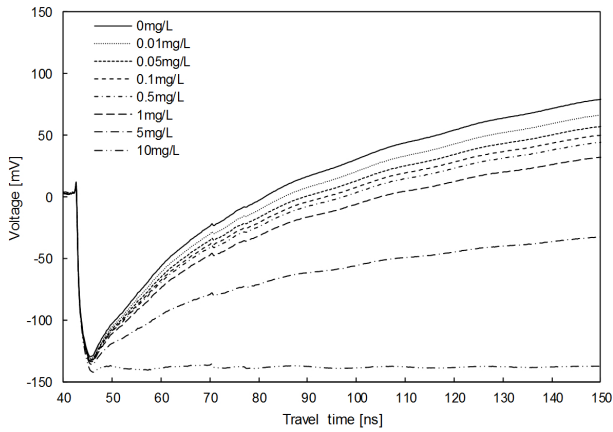
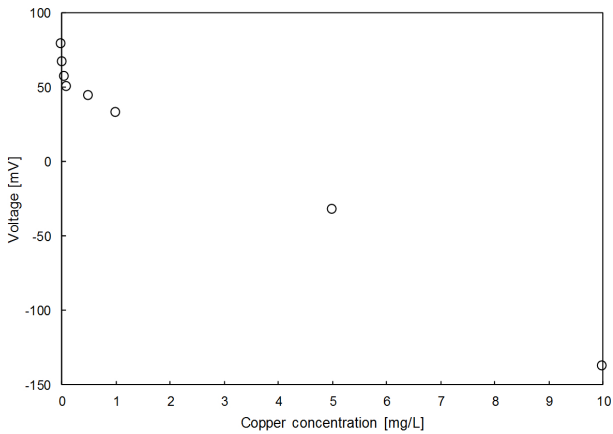


Fig. 4. Coating procedure of TDR probe



(a)

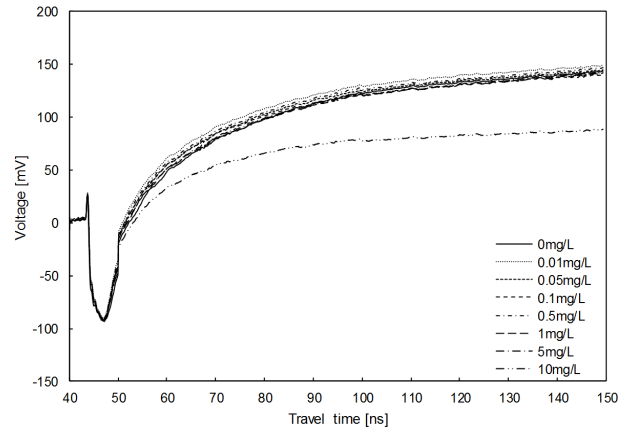


(b)

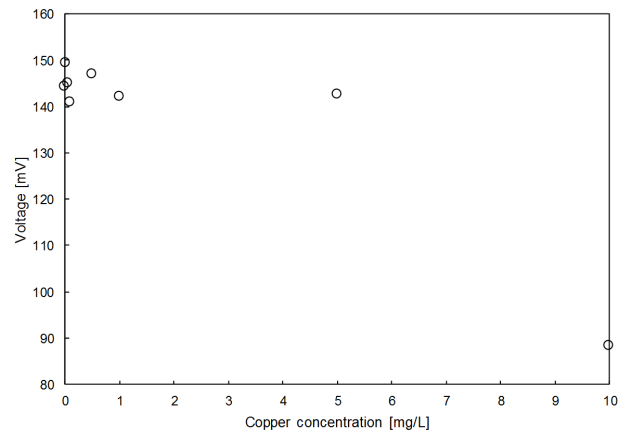
Fig. 5. Experimental result using single epoxy coated probe: (a) TDR signal of saline water according to copper concentration; (b) Voltage value vs. copper concentration at 150 ns

가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 염수에 농도 0.01mg/L의 구리가 녹아 있을 경우 구리 농도 0mg/L일 때보다 전압이 큰 폭으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이후 구리의 농도가 증가함에 따라 전압값은 감소하지만 감소폭은 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다. 구리 농도 10mg/L에서는 전류의 누설로 인해 전압값이 매우 낮은 것을 볼 수 있다.

프로브를 에폭시로 2회 코팅한 후 측정된 전자기파 신호를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 측정 결과, 1mg/L 이하의 구리 농도에서는 구리 농도가 증가함에 따른 전압값의 감소 경향이 일정하지 않게 나타났다. 또한 전압의 변화가 구리 농도 5mg/L까지는 큰 변화를 보이지 않는다. 그러나 구리 농도 10mg/L에서는 반사된 전압이 구리 농도 5mg/L일 때의 전압과 매우 뚜렷한 차이를 보이며 감소된 것을 볼 수 있다. 구리 농도에 따른 150ns에서 측정된 전압값의 변화를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 구리 농도 1mg/L까지는 전압의 감소 경향이 일정하지 않은 것을 볼 수 있으며, 구리 농도 5mg/L에서의 전압과의 차이도 크지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나



(a)



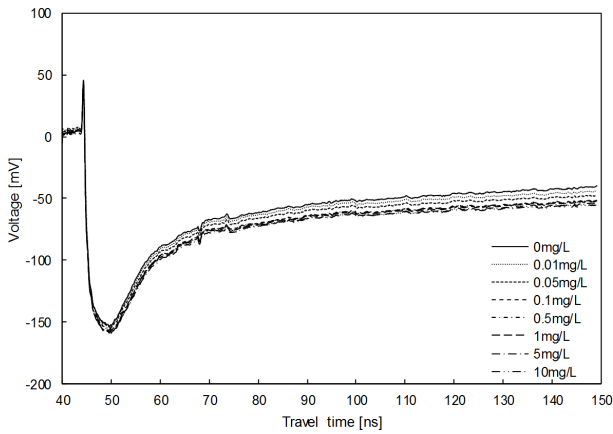
(b)

Fig. 6. Experimental result using double epoxy coated probe: (a) TDR signal of saline water according to copper concentration; (b) Voltage value vs. copper concentration at 150 ns

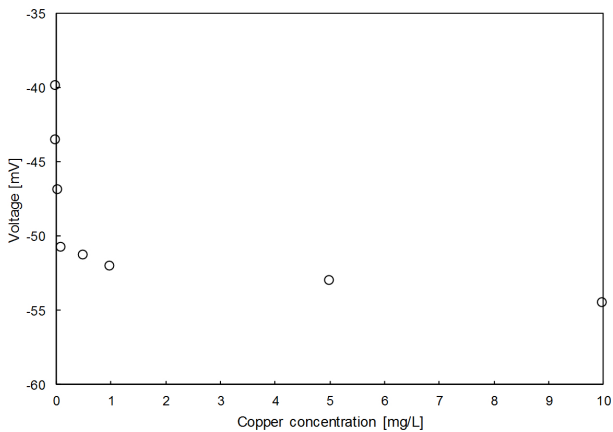
10mg/L에서는 전압의 크기가 구리 농도 5mg/L일 때와 매우 큰 차이를 보이는 것을 볼 수 있다.

4.2 탐코트

탐코트를 이용해 코팅한 프로브로 측정된 신호를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 측정 결과, 구리 농도가 증가함에 따라 반사된 신호의 전압값이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 구리 농도 0.1mg/L까지는 전압값의 뚜렷한 감소가 보이나 0.1mg/L에서 10mg/L까지는 신호의 전압값이 감소 경향이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 150ns에서 측정된 전압값과 구리 농도와의 관계를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 구리 농도가 증가함에 따라 전압값이 감소하는 경향을 보여준다. 구리 농도가 0.1mg/L일 때까지 전압값의 변화가 큰 폭으로 나타나는 것을 볼 수 있으며, 구리 농도 0.1mg/L에서 1mg/L까지도 전압값이 감소하는 경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 1mg/L 이후로는 전압값의 감소폭이 크게 줄어드는 것으로 나타났다.

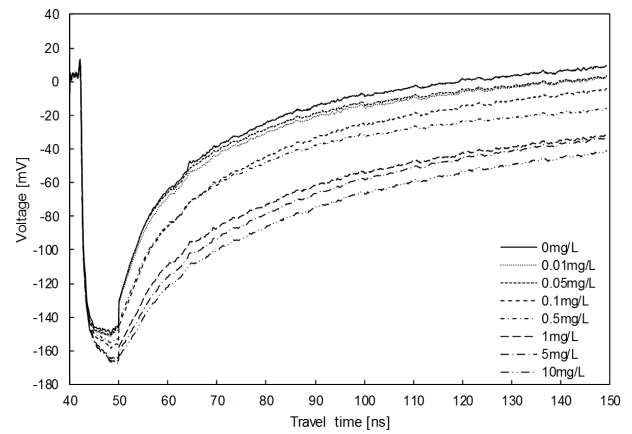


(a)

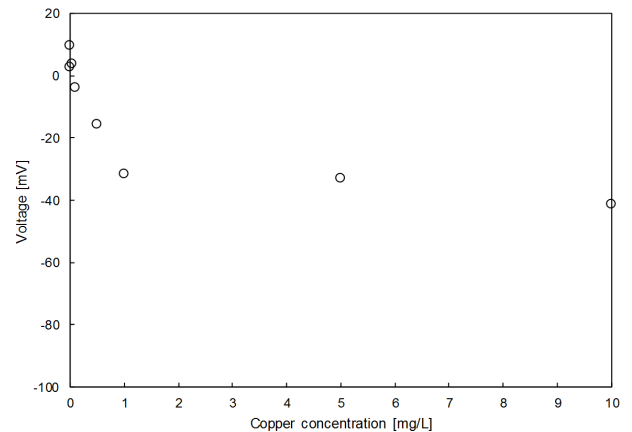


(b)

Fig. 7. Experimental result using top-coat coated probe: (a) TDR signal of saline water according to copper concentration; (b) Voltage value vs. copper concentration at 150 ns



(a)



(b)

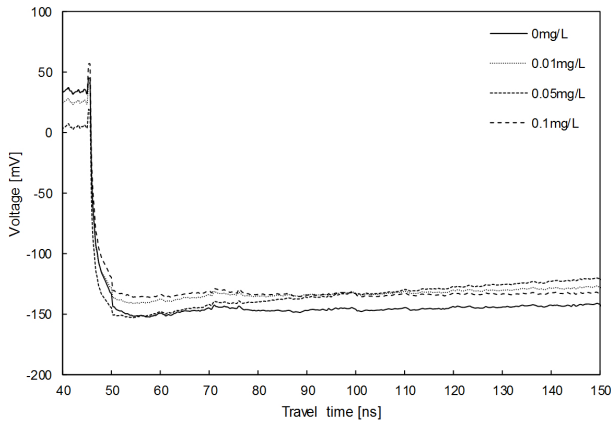
Fig. 8. Experimental result using varnish coated probe: (a) TDR signal of saline water according to copper concentration; (b) Voltage value vs. copper concentration at 150 ns

4.3 바니쉬

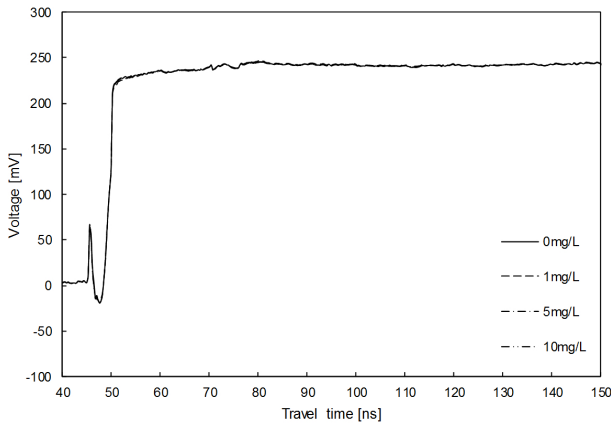
바니쉬로 코팅된 프로브로부터 측정된 신호를 Fig. 8(a)에 나타내었다. 측정된 신호를 보면 바니쉬로 코팅한 경우 역시 반사된 신호의 전압값이 구리 농도가 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 1mg/L까지는 농도에 따른 전압값의 변화가 민감하게 나타나지만, 그 이상에서는 구리 농도가 증가하여도 전압값이 감소폭이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 특히 구리 농도 0.05mg/L의 경우 0.01mg/L보다 전압값이 미세하게 증가하여 특정 구간에서의 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다. 150ns에서 측정된 구리 농도에 따른 반사된 신호의 전압값을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 0.01~1mg/L의 저농도 구간에서는 구리 농도에 따른 전압값의 감소가 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 구리 농도 0.01mg/L 와 0.05mg/L 구간에서의 정확도가 떨어지며, 1mg/L 이후에는 전압값의 감소폭이 줄어드는 경향성을 나타내고 있어 구리농도에 따른 전압값의 변화를 정확히 평가하기 어려운 것으로 나타났다.

4.4 아크릴페인트 및 히팅튜브

아크릴페인트와 히팅튜브로 각각 코팅한 TDR 프로브로 신호를 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 아크릴페인트로 코팅한 경우(Fig. 9(a)), 아크릴페인트가 물에 녹아나 신호가 전기적인 쇼트(short circuit) 상태로 나타났다. 이와 같은 이유로 아크릴페인트로 코팅한 프로브의 경우 농도별 신호차이를 관찰할 수 없었다. 히팅튜브의 경우(Fig. 9(b))는 아크릴페인트와는 반대로 반사된 신호의 전압값이 모두 입력 전압값인 +250mV로 나타났다. 본 연구에서 사용한 히팅튜브는 폴리올레핀(polyolefin) 재질로 체적 저항(volume resistance)이 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상으로 매우 높다. 그러므로 이유로 염수와 구리로 인한 전류 손실이 거의 발생하지 않아 전압의 감소가 나타나지 않은 것으로 사료된다. 이와 같은 이유로 히팅튜브로 프로브를 피폭할 경우 구리 농도에 따른 신호의 민감도가 매우 떨어지는 것으로 나타났다.



(a)

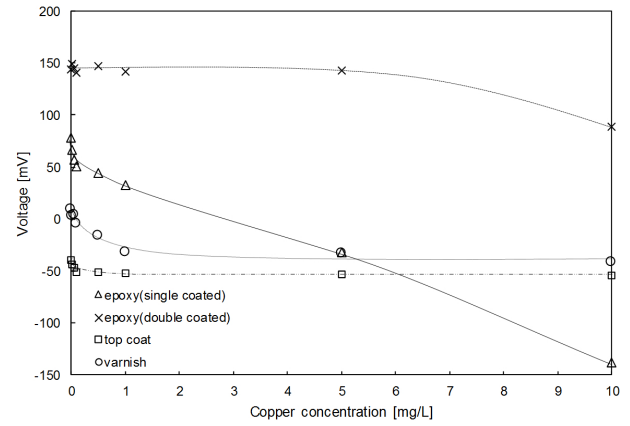


(b)

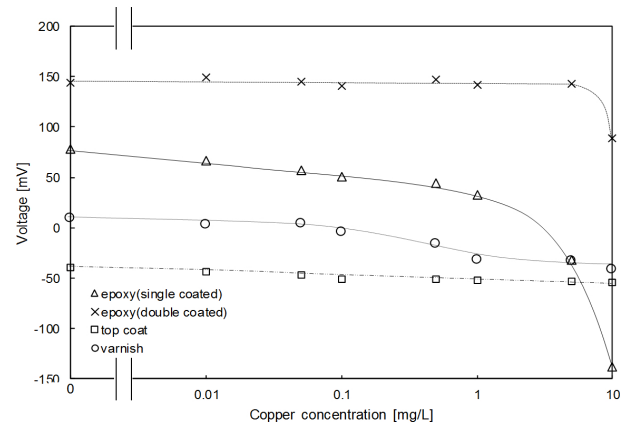
Fig. 9. Experimental result for probes coated with: (a): Acrylic paint; (b) Heat-shrinkage tube

5. 결과 분석

Fig. 10(a)와 같이 TDR 프로브로 에폭시, 탑코트, 바니쉬로 코팅한 경우 구리 농도가 증가함에 따라 반사된 신호의 전압값이 감소하는 것으로 나타났다. 구리 농도 1mg/L 이하의 영역을 정확히 판별하기 위해 에폭시, 탑코트, 바니쉬로 코팅한 경우에 대하여 구리 농도에 따른 전압값을 Fig. 10(b)와 같이 로그 스케일로 나타내었다. 구리 농도 0mg/L의 경우 로그 스케일에 표시가 불가능하므로, 스케일 상으로 0.01 mg/L의 좌측에 0mg/L에 해당하는 값을 추가로 위치시켰다. 에폭시로 1회 코팅한 경우, 구리 농도가 0mg/L에서 10mg/L 까지 증가함에 따라 전압이 점점 감소하는 경향을 보인다. 에폭시로 1회 코팅한 경우, 구리 농도가 10mg/L 이하일 경우 전압 변화가 민감하게 나타나므로 염수에 녹아있는 구리의 농도를 평가하기에 적합할 것으로 사료된다. 그러나, Fig. 5(a)와 같이 구리 농도 10mg/L에서 신호가 전기적인 쇼트 상태일 때와 비슷하게 나타나므로 10mg/L 이상의 농도는 평가할 수 없을 것으로 사료된다. 탑코트로 코팅한 경우는 0.1mg/L 이하의 저농도에서는 전압값이 감소하는 경향을 보이지만,



(a)



(b)

Fig. 10. Voltage variation according to copper concentration acquired from various probes

0.1mg/L에서 10mg/L 구간에서는 전압값의 변화가 뚜렷하지 않아 구리 농도 0.5mg/L 이하일 때 적용하기에 적합할 것으로 사료된다. 바니쉬로 코팅한 프로브는 구리 농도가 증가함에 따른 전체적인 전압값의 감소 경향은 나타나나 특정 농도 변화 구간에서는 감소 경향이 일정하지 않아서 정확한 농도 평가에 이용되기에는 적합하지 않은 것으로 사료된다.

전기공학적인 관점에서 유전 상수는 복소 유전 상수로 표현되며, 실수부와 허수부는 각각 전기적 에너지의 저장과 손실에 관련된다(Robinson et al., 2003). 이러한 관점에서 전해질이 물에 녹아 있을 경우 실수부 유전 상수는 감소하는 경향을 보인다(Lee et al., 2003; Li et al., 2014; Santamarina et al., 2001). 물에 NaCl을 첨가하면 Na^+ 이온은 O^{2-} 와 서로 인력이 작용하며, H^+ 와는 척력이 작용한다. 또한 Cl^- 이온은 H^+ 와 인력이 작용하며, O^{2-} 와 척력이 작용한다(Santamarina et al., 2001). 즉, 원자 내부의 전자 분극(electronic polarization)과 NaCl과 H_2O 쌍극자(dipole) 간의 결합 그리고 배향분극(orientation polarization) 현상이 발생한다. 이와 같은 이유로, 물 분자는 이온들 사이에서 일정한 방향으로 배열되며,

자체적인 전기장을 형성하고 외부 전기장에 의한 영향력(즉, 외부 자기장으로 분극되는 현상)은 감소하게 된다(Kaya & Fang, 1997; Kirby, 2010; Lee et al., 2003). 따라서 전해질의 농도가 증가하면 실수부 유전 상수는 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 다르게 복소 유전 상수의 허수부는 전해질 용액의 농도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 전해질 용액의 농도가 증가할수록 전기적인 손실(electrical energy loss), 즉, 내부에서 발생하는 잦은 분극으로 인한 유전 손실(dielectric loss)이 발생하고 또한 전기적인 전도 손실(conduction loss)이 발생하기 때문이다(Lee et al., 2003).

TDR 프로브로 측정된 결과, 구리의 농도가 증가할수록 신호의 크기가 감소하였고 이는 유전 특성이 증가하는 경향으로 해석할 수 있다. TDR 프로브로 측정된 신호가 전해질의 농도가 증가할수록 감소하는 현상은 여러 문헌들에서도 관찰되었다(Chen et al., 2007; Dalton & Van Genuchten, 1986; Mojid et al., 2003; Robinson et al., 2003; Topp et al., 1980). TDR 프로브는 유전 상수의 실수부와 허수부를 나누어 측정하지 않지만, 측정치는 유전 상수의 실수부와 허수부에 모두 관련이 있는 겉보기 유전 상수이다. 전해질의 농도가 증가할수록 TDR 프로브로 측정된 신호의 유전 특성이 감소하는 것은 전기적 에너지 손실에 관여하는 허수부 유전 특성이 측정 결과에 더 큰 영향을 주었기 때문으로 사료된다. Chen et al.(2007)과 Dalton & Van Genuchten(1986)은 전해질 농도가 증가하면 유전 손실과 전도 손실로 인해 TDR로 측정된 신호가 감소하는 경향을 보인다고 하였다.

6. 요약 및 결론

본 논문에서는 염수환경에서 다양한 농도의 중금속을 검출하기 위해 3개의 전극봉으로 구성된 TDR 프로브를 제작하였다. 전극봉은 길이 100mm, 직경 2mm의 스테인레스 강봉으로 제작되었다. 전극봉의 간격은 전극봉 직경의 10배인 20mm가 되도록 배치하였다. 염수와 중금속은 전도성이 큰 물질이기 때문에 5가지의 절연재(에폭시, 탑코트, 바니쉬, 아크릴페인트, 히팅튜브)를 선정하여 프로브의 전극봉을 코팅하였다. 실내 실험은 염도 3%인 1L의 염수에 구리 농도를 8단계(0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10mg/L)로 조성한 뒤 time domain reflectometer로 전자기파 신호를 측정함으로써 수행되었다.

실험결과, 아크릴페인트로 코팅한 프로브는 코팅재가 물에 녹아나며 전류 누설이 발생하여 중금속 검출에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 히팅튜브는 전기적 차폐능력이 높아 구리 농도에 따른 신호의 변화가 거의 관찰되지 않았다. 에

폭시, 탑코트, 바니쉬의 경우 모두 구리 농도가 증가함에 따라 반사전압값이 점차 감소하는 경향을 보였다. 에폭시로 1회 코팅한 경우는 10mg/L 이하에서, 2회 코팅한 경우는 5mg/L 이상에서 구리 농도의 추정이 가능할 것으로 평가되었으며, 탑코트로 코팅한 경우는 0.1mg/L 이하의 저농도에서도 농도평가가 가능하였다. 바니쉬로 코팅한 경우, 전체 구간에서 전압값을 통한 대략적인 농도추정은 가능하지만 정밀한 농도평가에는 이용되기 어려운 것으로 사료되었다. 구리 농도가 증가함에 따라 TDR 프로브로 측정된 신호가 감소하는 경향은 유전 손실과 전도 손실로 인한 영향으로 사료된다.

물질의 유전특성에 영향을 주는 중금속의 성질과, 코팅재에 따른 프로브의 특성을 고려하여 시간영역반사법을 이용한다면 염수환경에서도 다양한 범위의 중금속 농도평가가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2017R1A2B3008466)이며, 이에 감사드립니다.

References

1. Bogatin, E. (2009), Signal and power integrity-simplified 2nd edition, Prentice Hall Signal Integrity Library, Prentice Hall, Englewood Cliffs, p.792.
2. Byun, Y. H., Hong, W. T., Park, K., Hong, S. S., Lee, J. S. and Lee, S. H. (2017), Evaluation of water content in active layer using penetration-type time domain reflectometry, CATENA (in press) (In Korean).
3. Chen, R., Drnevich, V., Yu, X., Nowack, R. L. and Chen, Y. (2007), Time domain reflectometry surface reflections for dielectric constant in highly conductive soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 12, pp. 1597~1608.
4. Dalton, F. N. and Van Genuchten, M. T. (1986), Time domain reflectometry for measuring soil water content and salinity, Geoderma, Vol. 38, pp. 237~250.
5. Fellner-Feldegg, H. (1969), The measurement of dielectrics in the time domain, The Journal of Physical Chemistry, Vol. 3, No. 3, pp. 616~623.
6. Fujiyasu, Y., Pierce, C. E., Fan, L. and Wong, C. P. (2004), High dielectric insulation coating for time domain reflectometry soil moisture sensor, Water resources research, Vol. 40, No. 4, pp. 1~7.
7. Hong, W. T., Jung, Y. S., Kang, S. and Lee, J. S. (2016), Estimation of soil-water characteristic curves in multiple-cycles using membrane and TDR system, Materials, Vol. 9, No. 1019, pp. 1~15 (In Korean).

8. Kaya, A. and Fang, H. Y. (1997), Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 123, pp. 169~177.
9. Kirby, B. J. (2010), *Micro- and nanoscale fluid mechanics, transport in microfluidic device*, Cornell University, New York, p. 536.
10. Knight, J. H. (1992), Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 2345~2352.
11. Lee, J. H., Oh, M. H., Park, J., Lee, S. H. and Ahn, K. H. (2003), Dielectric dispersion characteristics of sand contaminated by heavy metal, *Landfill Leachate and BTEX (02-104B)*, *Journal of hazardous materials*, Vol. 105, No. 1, pp. 83~102 (In Korean).
12. Lee, D., Hong, Y. H., Hong, W. T., Chae, K. S. and Lee, J. S. (2017), Effects of heavy metal and salinity on electrical conductivity in fully saturated sand, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 10, pp. 23~34 (In Korean).
13. Li, Y., Zhao, K., Ren, J., Ding, Y. and Wu, L. (2014), Analysis of the dielectric constant of saline-alkali soils and the effect on radar backscattering coefficient: A case study of soda alkaline saline soils in Western Jilin Province using radarsat-2 data, *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, pp. 1~14.
14. Mojid, M. A., Wyseure, G. C. L. and Rose, D. A. (2003), Electrical conductivity problems associated with time-domain reflectometry (TDR) measurement in geotechnical engineering, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 21, pp. 243~258.
15. Noborio, K. (2001), Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 31, No. 3, pp. 213~237.
16. O'Connor, K. M. and Dowding, C. H. (1999), *Geomeasurements by pulsing tdr cables and probes, geochemistry*, CRC Press, NewYork, p. 424.
17. Oh, M., Lee, J. H., Park, J. B., Kim, H. S. and Kang, W. S. (2001), Development of contaminant leakage detection system using electrical resistance measurement: II. Evaluation of applicability for landfill site by field model tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, No. 6, pp. 225~233 (In Korean).
18. Park, H., Oh, M. and Kwon, O. (2016), Analysis on contaminant transport according to the embedded depth of vertical barrier of offshore landfill, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 8, pp. 29~37 (In Korean).
19. Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D. and Friedman, S. P. (2003), A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry, *Vadose Zone Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 444~475.
20. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), *Soils and waves particulate materials behavior, characterization and process monitoring*, John Wiley and Sons. New York, p. 508.
21. Spaans, E.J. A. and Baker, J. M. (1993), Simple baluns in parallel probes for time domain reflectometry, *Soil Science Society of America*, Vol. 57, pp. 668~673.
22. Spergel, J. (1972), *Coaxial cable and connector systems, Handbook of wiring, cabling, and interconnecting for electronics*, C. A. Harper, Ed., McGraw-Hill, New York, Chapter 4, p. 1152.
23. 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, No. 3, pp. 547~582.
24. Von Hippel, A. R. (1954), *Dielectric materials and applications*, MIT Press, Cambridge, Mass, p. 456.
25. Yu, J. D., Kim, K. H. and Lee, J. S. (2018), Non-destructive health monitoring of soil nails using electromagnetic waves, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 55, No. 1, pp. 79~89 (In Korean).
26. Zegelin, S. J., White, I. and Jenkins, D. R. (1989), Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry, *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 11, pp. 2367~2376.