유전상수를 통한 투수계수 환산 모델의 오차표준 평가

Assessment of Error Norm in Models to Obtain Hydraulic Conductivity Through Dielectric Constant

이승재* · 변지환** · 최정찬*** · 윤형구****

Lee, Seung Jae*, Byun, Ji Hwan**, Choi, Jung Chan***, and Yoon, Hyung Koo****

Abstract

Hydraulic conductivity can be obtained from the dielectric constant by using previously suggested models. However, many input parameters have to be applied to the models. The objective of this study is to investigate the error norm of each parameter, which is an essential value to obtain the hydraulic conductivity. The theoretical relationships between the dielectric constant and hydraulic conductivity are addressed, and the equations are arranged in terms of the hydraulic conductivity. To obtain the dielectric constant and other parameters, a laboratory test was performed, and glass beads, Jumunjin sand, and field sand were used to determine the sensitivities of each equation through particle size distributions. The constant water head test was conducted to assess the hydraulic conductivity as a reference value, and the dielectric constant was also measured by using attached electrodes in the constant water head test under the same experimental conditions. Through an analysis of the measured data, we found that the voltages between the first and the second reflections and the converged voltage had a strong influence on the theoretical equations. Moreover, care is necessary when obtaining the two voltages to determine the hydraulic conductivity reliably through the dielectric constant.

Key words : Dielectric Constant, Electrical Conductivity, Error Norm, Hydraulic Conductivity, Laboratory Test

요 지

투수계수는 매질의 유전상수로 도출이 가능하며, 선행적으로 제안된 이론적인 수식은 다양한 인자를 포함하고 있어 모든 상수를 정확하게 평가하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 각각의 이론적인 수식이 내포하고 있는 인자들의 영향성을 오차 규범 (Error norm)으로 분석하였다. 선행적으로 투수계수와 유전상수의 이론적인 상관성에 대해 논의하였으며, 이를 통해 투수계수의 향으로 유전상수와 각각의 입력인자들로 수식을 재구성하였다. 유전상수 및 각각의 입력인자들을 얻기 위하여 실내실험을 수행하였으며, 이때 활용한 시료는 글라스비즈, 주문진 사 그리고 현장에서 획득한 교란시료이다. 시료 입자 특성에 따라 입력인자의 영향성 범위도 함께 분석하기 위하여 다양한 크기를 가지고 있는 시료를 선택하였다. 투수계수의 참값을 얻기 위하여 일반적으로 활용하고 있는 정수위 투수시험을 진행하였으며, 이때 동일한 조건에서 유전상수와 입력변수를 획득하기 위하여 투수계수 셀에 전극을 설치하였다. 분석결과 첫번째와 두번째 반사된 파형에서 도출된 입력전압과 반사된 파형이 수렴할 때의 전압값이 가장 큰 영향인자로 나타났다. 따라서 유전상수를 통해 투수계수 환산시 분석된 두 개의 전압값을 더욱 정확하게 획득해야 함을 보여준다.

핵심용어 : 유전상수, 전기전도도, 오차규범, 투수계수, 실내실험

*정회원, 대전대학교 건설안전방재공학과 학부연구생(E-mail: seungje1215@naver.com)

Member, Undergraduate Student, Department of Construction and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

**정회원, 서정엔지니어링(주) 지반부 대리(byun9030@naver.com)

Meber, Assistant Manager, SUJUNG Engineering Co., LTD

***노르웨이 지반공학 연구원, 수석연구원

Senior Engineer, Norwegian Geotechnical Institute (NGI)

****교신저자, 정회원, 대전대학교 건설안전방재공학과 부교수(Tel: +82-42-280-2578, Fax: +82-42-280-2576, E-mail: hyungkoo@dju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Construction and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

1. 서 론

투수계수는 대상지반의 상태를 평가하기 위한 기본 물성치로 구조물의 설계인자 및 안전성 평가에 활용된다(Frohlich et al., 1996). 데이터의 신뢰성을 위하여 현장에서는 자유수와 피압수를 활용한 양정실험이 이용되나, 시추 비용과 경제적인 문제로 소수의 실험을 통해 전체 지반을 대표해야 하는 한계가 있다. 이를 극복하고자 현장의 교란시료를 채취 후 정수위 및 변수위 실험이 실내에서 진행되나 실내 실험도 시료를 채취하고 운반해야 되는 등 많은 작업시간 및 수단이 필요하다. 따라서 복잡한 과정 없이 신뢰성을 향상시킬 수 있는 새로운 방법이 요구된다.

전자기파는 빛의 파동적인 성질을 의미하며, 주파수에 따라 다양한 종류로 구성된다. 지반공학 분야에서는 전자기파를 비파괴 탐사의 일환으로 활용하고 있으며 지반의 구조적인 특성, 지하수 분포 및 설계정수 산정 등 다양한 분야에 이용되고 있다. 그 중 본 연구에서는 반사된 전자기파 파형의 감쇠를 이용하여 유전상수를 도출할 수 있는 Time Domain Reflectometry (TDR) 기법을 활용하였다. TDR은 발생된 전압 대비 지반매질의 고유한 전기적인 저항으로 감쇠된 전압 특성을 통해 지반상태를 유추할 수 있다. 전기적인 저항 감소는 대부분 수분의 존재 유무에 따라 결정되므로 TDR 기법은 지반의 포화도를 결정하는데 주로 이용되었다(Topp and Davis, 1985). 또한 제방의 포화도를 이용하여 지하수위해석까지도 연구되었다(Kim et al., 2011) 하지만 최근에는 포화도 뿐만 아니라 지반의 구조적인 특성에서 지반변형측정(Lee et al., 2003)과 도로하부 함수비를 계측하여 온도민감도 분석(Cho et al., 2013) 및 투수계수 산정(Lee et al., 2017) 등 기존 연구를 확장하여 다양하게 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유전상수를 통해 투수계수를 획득할 수 있는 이론적인 수식을 활용하여 각각의 수식이 내포하고 있는 인자들의 영향성을 분석하고자 하였다.

본 논문은 유전상수를 통해 투수계수를 도출할 수 있는 이론적인 방법에 대해 설명한 후 실내실험의 방법론적인 부분을 소개하였다. 투수계수를 측정할 수 있는 정수위 실험 셀과 TDR 계측이 가능하도록 설계된 측정장비에 대해서도 모사하였으며, 유전상수로 도출한 투수계수와 측정된 투수계수 값을 상호간에 비교 및 고찰하였다. 최종적으로는 오차 규범 분석을 통해 이론적으로 수식이 포함하고 있는 각각 인자들의 영향정도를 나타내어 이론 수식 활용 시 중요하게 고려해야 할 인자에 대해 정리하였다.

2. 배경이론

TDR은 일정한 주파수의 전자기파를 발신한 후 대상매질의 저항에 의해 감소된 전압 값을 통해 매질의 상태를 평가하는 방법이다. 저항은 지수적으로 감소한다는 가정을 활용하

여 입력전압(V_{input})과 출력전압(V_{output})은 다음과 같이 지수 함수의 관계로 정의된다.

$$V_{output} = V_{input}e^{-\alpha L} \quad (1)$$

여기서, α 는 감소계수를 의미하며, L 은 전자기파가 이동하는 전극의 길이를 의미한다.

전자기파의 감소는 지반의 저항에 기인하며, 이는 전류흐름 특성에 영향을 주어 전기전도도(σ)로 표현할 수 있다. 따라서 Dalton et al. (1984)과 Nadler et al. (1991)는 각각 Eqs. (2)와 (3)과 같이 전기전도도를 유전상수의 함수로 제안하였다.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon}}{120\pi L} \ln\left(\frac{V_T}{V_R}\right) \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{K_C}{Z_S} f_t \quad (3)$$

Dalton et al. (1984)이 제안한 Eq. (2)에서, σ 와 ϵ 는 전기전도도와 유전상수를 의미하며, L 은 TDR 전극길이를 보여준다. V_T 와 V_R 은 Fig. 1과 같이 반사가 시작되는 위치에서의 전압 값과 마지막으로 반사된 전압 값의 차이를 의미한다. Nadler et al. (1991)의 수식에서 σ 는 Eq. (2)와 동일하게 전기전도도를 의미하며, f_t 는 온도보정계수로 일반적으로 25°C에서 1의 값을 보인다. K_C 는 TDR 전극의 상수이며, Z_S 는 동축케이블의 저항과 반사계수로 계산되는 측정 체계의 전체 저항 차이로 계산된다. 이때, 반사계수는 Fig. 1에서 도시하였듯이 초기 전압 값(V_0)과 마지막으로 반사된 위치의 전압 값(V_F)의 비율로 표현된다.

Fig. 1. Examples of TDR Waveform. The V_0 is the Initial Voltage and V_T Shows Voltage at First Reflection. The V_R and V_F Denote Voltages at Second Reflection and Converged Point

Archie (1942) 연구결과에 따르면 전기비저항은 투수계수와 일정한 관계가 있으며, 전기전도도가 전기비저항과 역수 관계임을 활용하면 Eqs. (2)와 (3)을 투수계수의 함수로 재정

리할 수 있다. 따라서 Dalton et al. (1984)과 Nadler et al. (1991)가 제안한 전기전도도를 활용하여 투수계수를 도출할 수 있는 수식은 Eq. (4)와 같으며, Eq. (4)는 두가지의 방법을 통합할 수 있는 공통적인 수식으로 투수계수 항(Hydraulic Conductivity Term, HCT)과 유전상수 항(Dielectric Constant Term, DCT)으로 구성된다.

$$K = \frac{HCT * DCT^3}{DCT^2 - 2 * DCT + 1} \quad (4)$$

여기서, HCT는 Eq. (5)으로 정의되며, C_{kc} 는 Kozeny (1927)와 Carman (1938)이 제시한 상수값이다. 또한 S_0 는 비표면적을 보이며, r/μ 는 유체의 단위중량과 점성의 비율을 나타낸다.

$$HCT = \frac{1}{C_{K-C}} * \frac{\gamma}{\mu} * \frac{1}{S_0} \quad (5)$$

비록 HCT 항은 두 가지 방법 모두 동일한 값을 가지고 있으나, DCT는 Eqs. (6)과 (7) 처럼 Dalton et al. (1984)과 Nadler et al. (1991)에 따라서 다른 값을 보인다. 이와 같은 이유는 두 가지의 선행연구가 서로 다른 입력 변수로 전기전도도를 유추하는 것에 기인된다.

$$DCT = e^{\frac{\ln(L * \frac{V_T}{V_R}) + \ln[\frac{\sqrt{\epsilon}}{120\pi L} * \ln(\frac{V_T}{V_R}) * \alpha] - 0.5 * \ln(\epsilon) + 5.9}{\beta}} \quad (6)$$

$$DCT = e^{\frac{\ln(Z_C - PP * Z_0) + \ln(R_W * \alpha) - \ln(K_C)}{\beta}} \quad (7)$$

Eqs. (6)과 (7)에서 공통적으로 보이는 α 와 β 는 Archie (1942)가 제안한 경험적인 상수를 의미하며 α 는 주로 1, β 는 0.9~2.3의 범위를 보인다. 나머지 인자는 Eqs. (2)와 (3)에서 소개한 내용과 동일하며, Eqs. (6)과 (7)은 TDR로 계측된 신호를 통해 투수계수를 도출할 수 있음을 보여준다.

3. 시 료

투수계수는 시료의 물리적 및 화학적 특성과 같은 다양한 인자에 영향을 받지만 본 연구에서는 입자크기에 따라 변화하는 특성을 관찰하기 위하여 글라스비즈, 주문진사 그리고 현장에서 채취한 괴화산 시료를 이용하였다. 기본 물성치 실험 결과를 Table 1에 정리하였으며, 최소간극비와 최대간극비 범위는 글라스비즈, 주문진사 그리고 괴화산 시료 순서대로 0.63~0.68, 0.81~0.89 그리고 0.59~0.82로 나타났다. 또한 비중은 글라스비즈, 주문진사 그리고 괴화산시료에서

유사하게 각각 2.62, 2.61 그리고 2.67로 나타났다. 체분석 결과는 Fig. 2에 도시하였으며 평균입경(D_{50})은 글라스비즈, 주문진사 그리고 괴화산 시료에서 각각 0.51mm, 0.76mm 그리고 0.95mm로 계산되었다. 곡률계수는 글라스비즈, 주문진사 그리고 괴화산 시료에서 각각 1.09, 1.01 그리고 1.16이며 균등계수는 각각 1.5, 1.49 그리고 6.5로 계산되었다. 곡률계수의 일반적인 범위는 1이상 3이하이며, 균등계수는 4이상은 자갈, 6이상은 모래, 10이상은 흙으로 구분된다. 본 연구에서 도출된 곡률계수는 합리적인 범위를 만족하며, 균등계수는 글라스비즈와 주문진사가 일정한 입자를 가지고 있어 제안된 범위보다 작게 나타났다. 하지만 괴화산 시료의 경우 흙과 모래가 혼재되어 있는 상태임을 알 수 있다.

Table 1. Properties of Glass Beads, Jumunjin Sand, Goehwasan Sand

	Glass beads	Jumunjin sand	Goehwasan sand
e_{max}	0.68	0.89	0.82
e_{min}	0.63	0.81	0.59
Specific gravity	2.65	2.61	2.67

Fig. 2. Particle Size Distribution Curves of Glass Beads, Jumunjin Sand and Goehwa Sand

4. 실내실험

본 연구에서는 정수위 시험을 수행하면서 동시에 시료의 전기적인 특성도 함께 측정할 수 있도록 Fig. 3과 같이 정수위 투수시험에 TDR 계측 센서가 부착된 셀을 이용하였다. 셀의 높이와 내경은 일반적으로 활용되고 있는 정수위 투수시험과 동일하게 각각 155 mm와 75 mm이며, 시료의 하부에서부터 유량이 침투할 수 있도록 직경 3 mm의 튜브를 연결하였다. TDR 계측센서는 시료의 특성을 반영하기위해 수직방향으로 부착되도록 설정하였으며, 주변잡음에 대한 영향이 최소화

되도록 3개의 전극 (두께×길이=3 mm×100 mm)을 장착하였다. TDR 전극의 재질은 전기적인 전도가 높은 스테인리스 스틸이며, 유량에 대한 전기적인 흡선을 방지하고자 전극을 에폭시로 얇게 코팅하였다. 또한 사용된 정수위 실험 장비는 TDR 실험 시 전기적인 교란을 방지하기 위하여 모두 비전도체 소재인 나일론으로 제작하였다.

일정한 속도로 유체가 하부로 유입될 수 있도록 Fig. 3과 같이 약 1000 ml의 액체로 위치수두를 조절하였으며, 시료의 전기적인 특성이 명확하게 반영될 수 있도록 유체는 0.5 mol의 농도를 가지고 있는 소금물을 활용하였다. 지반재료의 일반적인 투수계수 값과 시료의 높이를 고려하여 최소 10분이상 유체를 순환시킨 후 수두차이를 측정하고 이를 통해 대상시료의 투수계수 값을 계산하였다. 시료의 전기적인 특성은 TDR 센서로 계측하였으며, HYPERLABS의 HL-1001 제품을 이용하여 수두차이를 측정할 시점에 TDR 파형을 획득하였다. 정수위 투수 셀에 설치된 전극은 동축케이블과 연결이 되며, 계측장비인 HL-1001도 입력 단자가 동축케이블 형태이므로 별도의 연결부분없이 전극과 계측장비를 연결하였다. 또한 매질에서 반응하는 신호만을 해상도 높게 측정하기 위하여 roundtrip 거리를 10~16 m로 조절하였다.

Fig. 3. Schematic Drawing of Laboratory Test: (a) Constant head test with three-electrodes TDR probe; (b) Circulation of liquid

5. 결 과

5.1 TDR

유체를 충분히 순환시킨 이후 측정된 TDR 파형을 Fig. 4에 도시하였으며, 입자크기 뿐만 아니라 상대밀도에 따른 효과도 관찰하고자 상대밀도가 각각 40%와 80%일 때 도출된 파형을 함께 나타내었다. Fig. 1에서 설명한 V_0 , V_T , V_R 그리고 V_F 를 화살표로 표시하였으며, 이때 기준이 되는 출력 전압은 -170mV로 설정하였다. 상대밀도가 40%의 경우 초기 입력된 전압 값은 3가지 시료 모두 동일하게 나타났지만, V_T 와 V_F 는 괴화산 시료가 타시료보다 다소 작은 값을 보였다. 또한 상대밀도가 80%에서 측정된 파형은 글라스비즈와 주문진사에서 각각의 전압 값이 유사하게 보이나, 괴화산 시료에서 측정된 값은 초기 입력된 전압을 포함해서 모두 상이하게 나타났다. 각각의 시료조건에서 도출된 전압 값의 상대적인 차이를 분석하고자 결정된 V_0 , V_T , V_R 그리고 V_F 의 분포도를 Fig. 5에 도시하였다.

각각의 위치에서 측정된 전압 값은 글라스비즈와 주문진사의 시료에서 유사한 거동을 보이나, 괴화산 시료에서 측정

Fig. 4. Results of TDR Waveforms: (a) Relative density of 40%; (b) Relative density of 80%

Fig. 5. Distribution of Measured V_0 , V_T , V_R and V_F

된 전압 값은 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있다. 과화산 시료 중 상대밀도가 80%에서 측정된 파형은 갑작스럽게 작은 V_F 값을 보이며 이후에는 글라스비즈와 주문진사에서 측정된 값과 유사하게 도출됐다. 과화산 시료에서만 차이가 발생하는 이유는 입자크기로 판단되며, 다양한 입자가 혼합되어 전자기적인 감쇠가 타 시료보다 크게 나타난 것으로 사료된다. 따라서 입자의 크기가 균등하면 상대밀도에 대한 영향이 작으나, 입자크기가 다양할수록 상대밀도에 대한 효과도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 전기적인 감쇠가 최대한 발생한 후 수렴되는 전압인 V_F 는 V_T 와 V_R 을 합한 값과 거의 유사하게 도출되어 본 실험에서 설정된 roundtrip 거리도 타당함을 알 수 있다.

5.2 투수계수

Dalton et al. (1984)와 Nadler et al. (1991)의 수식으로 정리된 Eq. (4)를 통해 투수계수를 산정하여 Fig. 6에 나타내었다. 입력 값은 앞서 설명하였듯이 기존 문헌에서 제시하고 있는 값을 활용하였으며, V_0 , V_T , V_F 와 V_R 을 측정된 파형에서 획득하였다. 정수위 투수 실험 결과를 통해 도출한 투수계수 값을 참값으로 설정 후 비교하였으며, 비교 결과 두가지 방정식을 통해 계산된 투수계수가 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6. Comparison of Hydraulic Conductivity based on Studies of Dalton et al. (1984) and Nadler et al. (1991)

도출된 투수계수의 정량적 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 각각의 방법으로 산정된 투수계수는 시료 특성에 따라 다소 차이를 보였지만, 평균적인 오차율을 살펴보면, Nadler et al. (1991)방법은 약 2%의 오차율을 보이며, Dalton et al. (1991)은 상대적으로 큰 약 9.5%의 오차율을 보인다. 이와 같은 결과는 두 가지 방법에서 내포하고 있는 상이한 입력변수에 기인되며, 입력변수의 영향성을 평가한다면 합리적인 입력 값의 설정으로 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 투수계수를 시료채취 없이 현장의 TDR 실험으로 유추할 수 있음을 보여주며, 신뢰성도 상당히 높음을 알 수 있다.

Fig. 7. Comparison of Error Ratio in Hydraulic Conductivity

6. 토 론

오차는 측정 값의 고유한 특성을 의미하며, 측정 값과 참 값의 차이를 나타낸다. 오차규범은 Eq. (8)과 같이 참값과 예측된 값의 상관관계를 보여준다(Carlos Santanmarina and Fratta, 2005).

$$EN_i = \frac{V_i^{<measured>} - V_i^{<predicted>}}{V_i^{<predicted>}} \quad (8)$$

여기서 EN_i 는 오차규범을 나타내며, $V_i^{<predicted>}$ 는 참값, $V_i^{<measured>}$ 는 측정 값을 나타낸다.

Dalton et al. (1984)과 Nadler et al. (1991) 수식으로 정리된 투수계수 산정식의 각 인자들이 미치는 영향을 파악하고자 오차규범을 수행하였다. 각각의 수식이 포함하고 있는 인자들의 참 값은 Table 2에 정리하였으며, 참값을 기준으로 100% 감소시키고 증대시키면서 개별적인 인자 값 변화에 따른 출력 값을 분석하였다. 오차규범 결과는 Fig. 8에 나타내었으며, Dalton et al. (1984)의 영향인자는 12개, Nadler et al. (1991)의 입력 값은 13개로 각각의 특성변화를 관찰할 수 있다. 상대적으로 큰 값이 나타난 오차규범으로 비교를

Table 2. Input Values for Error Norm

	Dalton et al. (1984)	Nadler et al. (1991)
Unit weight	9.798 (kN/m ³)	9.798 (kN/m ³)
viscosity	1.002 (mPa·s)	1.002 (mPa·s)
C _{kc}	5	5
D _{eff}	0.098208495 (mm)	0.098208495 (mm)
SF	7.7	7.7
Z _c	-	50 (Ω)
Z ₀	-	50 (Ω)
R _w	-	0.027 (Ω·m)
K _c	-	45
a	-	1
V ₀	-	55 (mV)
V _F	-	21 (mV)
L	0.1 (cm)	-
σ	0.023556 (μS/cm)	-
α	1	-
β	1.7	1.7
ε	23.72352	-
V _T	12 (mV)	-
V _R	10 (mV)	-

Fig. 8. Results of Error Norms: (a) Dalton et al. (1984); (b) Nadler et al. (1991)

수월하게 하기 위하여 오차규범을 조절하여 부차적인 그림 (sub-plot)을 나타내었다. Dalton et al. (1984)의 수식은 참 값보다 큰 값을 입력 값으로 설정 할 경우 큰 오차규범이

나타났으며, Nadler et al. (1991)는 반대로 참 값보다 작을 때 큰 오차를 보였다. 따라서 가정이 필요한 입력 값의 경우 Dalton et al. (1984) 수식은 참 값보다 작은 값을 Nadler et al. (1991) 수식은 참 값보다 큰 값을 고려하는 것이 바람직 하다. Dalton et al. (1984)과 Nadler et al. (1991) 수식에서 V_R과 V_F가 가장 큰 영향을 미치는 인자로 파악 되었으며, 나머지 인자들에 대한 영향은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는 결국 TDR로 측정한 데이터의 신뢰성에 따라 투수계수의 오차가 결정됨을 암시하며, 전압 값에 관련된 계측을 정확하게 수행해야 됨을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 전자기파의 감쇄된 파형을 통해 투수계수를 예측할 수 있는 방법에 대해 소개하였으며, 그 방법에 포함된 각각의 인자들이 최종 값에 미치는 영향도 함께 평가하였다. 연구내용에 따른 소결은 다음과 같다.

- (1) Dalton et al. (1984)과 Nadler et al. (1991)가 제안한 전기전도도와 유전상수간의 관계를 활용하여 전자기 파의 감소된 값과 투수계수 간의 관계를 정립하였다.
- (2) 정수위 투수 시험에 전극을 연결하여 투수계수와 전자기파를 동시에 획득하였으며, 투수계수 환산 결과 Nadler et al. (1991) 방법이 상대적으로 우수한 결과를 보였다.
- (3) 오차규범 결과 첫번째와 두번째에서 반사된 파형의 전압 값과 최종적으로 파형이 수렴할 때의 전압 값이 가장 큰 영향 인자로 나타났으며, 신뢰성 향상을 위해 정확한 계측이 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진 연구사업 글로벌기술협력 분야의 연구비지원 (18CTAP-C145146-01)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, Vol. 146, No. 1, pp. 54-62.
- Carlos Santamarina, J., and Fratta, D. (2005). *Discrete signals and inverse problems*. John Wiley & Sons.
- Carman, P.C. (1938). Determination of the specific surface of powders I. *Transactions. J. Soc. Chemical Industries*, Vol. 57, pp. 225-234.

- Cho, M.H., Lee, Y.H., Kim, N.S., and Jee, K.W. (2013). Temperature sensitivity analysis of TDR moisture content sensor for road pavement. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 329-336.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S., and Rhoades, J.D. (1984). Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, Vol. 224, No. 4652, pp. 989-990.
- Frohlich, R.K., Fisher, J.J., and Summerly, E. (1996). Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rhode Island, USA. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 35, No. 4, pp. 249-259.
- Kim, K.Y., Han, H.S., Lee, J.H., and Park, M.C. (2011). Analysis of saturation and ground water level at embankment by TDR sensor. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 2, pp. 63-72.
- Kozeny, J. (1927). Uber kapillare leitung des wassers im boden. Royal Academy of Science, Vienna, *Proc. Class I*, Vol. 136, pp. 271-306.
- Lee, S.J., and Yoon, H.K. (2017). Study of method for estimating various geotechnical properties to prevent debris-flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 1, pp. 199-207.
- Lee, W.J., Kim, Y.J., Lee, W.J., and Lee, W.J. (2003). Application of time domain reflectometry to the monitoring of ground deformation. *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol. 4, No. 2, pp. 15-25.
- Nadler, A., Dasberg, S., and Lapid, I. (1991). Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 55, No. 4, pp. 938-943.
- Topp, G.C., and Davis, J.L. (1985). Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 49, No. 1, pp. 19-24.

Received	July 25, 2018
Revised	July 26, 2018
Accepted	August 3, 2018