

제방 누수 모니터링을 위한 이동식 TDR 센서의 적용성 평가

A Study on the Applicability of Levee Leakage Monitoring System Using Movable TDR Sensor

조진우¹, 최봉혁¹, 조원범², 김진만^{3*}

Jinwoo Cho¹, Bong-hyuck Choi¹, Won-beom Cho², Jin-man Kim^{3*}

¹Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT, 283 Goyangdae-Ro Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

²Member, Post doc., Dept. of Geotechnical Engrg., KICT, 283 Goyangdae-Ro Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

³Member, Senior Research fellow, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT, 283 Goyangdae-Ro Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

Several types of methods such as resistivity survey, ground penetration radar, etc are used for detection of levee leakage and according to the river design guidelines detection of levee leakage is performed by measuring the hydraulic conductivity of levee soil. But, the former can not verify the leakage point and degree of saturation, the latter is an after treatment method. Movable sensor, which is a high-tech TDR system developed since 2000, can obtain directly the dielectric constant profile covering the whole depth of levee. In this study, laboratory and field model experiments were carried out using movable TDR sensor in order to evaluate the applicability as detection system of levee leakage, As the result, movable TDR system has proven to be 3 times more sensitive to water contents than dry unit weight, and the results conclude that the dielectric constant, water contents and density of the ground proved to have a correlation among them, and the dielectric constant is expected to be a basic data on detection of levee leakage.

요 지

하천제방 누수측정 방법은 전기비저항탐사 및 GPR탐사 등이 사용되고 있으며, 하천설계기준에 의하면 제방의 누수 시 시추를 통한 제체재료의 투수계수를 측정하는 방법을 사용하고 있지만 전자의 경우 정확한 누수위치와 제체의 포화정도를 알 수 없으며, 후자의 경우 누수가 발생한 뒤 시추를 통한 조사방법으로 사전에 예측할 수 없다는 단점이 있다. 한편, 이동식 TDR 센서는 2000년 이후 개발된 첨단화된 TDR기법으로서 관측공을 따라 측정센서를 연속적으로 유전상수를 측정함으로써, 기존 TDR기법과 달리 제방 깊이별 유전상수를 측정할 수 있는 효율적인 기법이다. 본 논문에서는 이동식 TDR(Time Domain Reflectometry)센서를 이용하여 제방누수 모니터링시스템의 성능을 평가하고자, 하상재료(모래) 및 제체재료(화강풍화토)의 다양한 비교실험을 수행하였다. 그 결과, 이동식 TDR시스템은 건조단위중량에 비해 함수비가 3배 이상 민감하게 반응하며, 이동식 TDR 센서를 사용하여 측정된 유전상수값은 지반의 함수비, 밀도와 일정한 상관관계를 나타내고 있음을 확인하였으며, 제방 누수탐사에 관한 기초자료로서 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Levee leakage, Time Domain Reflectometry (TDR), Movable sensor, Dielectric Constant, Water Contents

1. 서 론

하천제방 누수는 하천 외수위가 상승하여 제체 또는 기초지반을 통해 제내지층으로 침투수가 유출하는 현상을

Received 28 Jul. 2014, Revised 20 Aug. 2014, Accepted 22 Aug. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0221; Fax: +82-31-910-0235

E-mail address: jmkim@kict.re.kr (J. Kim)

말한다. 이때, 제체 누수는 침윤선이 제내지 비탈면에 도달하여 침투수가 유출하는 것으로 심각할 경우 제방붕괴를 야기 시킨다. 하천제방 제체 누수의 원인은 제방단면이 너무 작은 경우, 제방이 사질토 또는 조립토를 다량으로 포함한 토사로 만들어지고 제외지 또는 중심부에 물막이 벽이 없는 경우, 제체를 충분히 다지지 않은 경우, 두더지 등의 동물에 의해 구멍이 뚫린 경우, 제체 내에 매설되어 있는 구조물과의 접합부에 흐름이 생기는 경우 등이 있다. 한편, 기초지반 누수는 파이핑 현상으로도 불리우며, 치수상 문제가 되기 때문에 유선망, 침투압, 누수량 등을 검토하여 충분한 대책을 강구해야 한다.

TDR 기법은 전기신호를 발생하는 장치, 전기신호를 전달하는 장치, 반사신호를 측정하여 분석하는 장치로 구성되어 전기신호가 전달매체를 따라 전달되면서 전달매체 자체의 물리적, 전기적 변화나 전달매체 주변의 변화를 탐지하는 방법이다. TDR 기법은 전자기이론을 응용하여 지반의 유전상수를 측정 후 함수비를 예측할 수 있는 기법으로 널리 사용되고 있으며(Topp et al., 1980; Ledieu et al., 1986), 최근 들어 교량기초 하부 세굴(Xinbao, 2009; Dowding and Pierce, 1994), 포장 하부지반 평가(Xiaozhen et al., 2008; Kotdawala et al., 1994), 댐 및 하천제방 안전성 평가(Scheuermann and Bieberstein, 2006) 등에 적용되고 있다.

최근 국내에서는 TDR을 이용하여 제방(Kim et al., 2011) 및 사면(Park et al., 2010) 등의 안정성 해석과 관련하여 연구가 진행되고 있지만 사용되는 TDR 장비의 경우 고정 매립식으로 제방의 설치 후 시공이 어려우며, TDR 센서에서 발생되어 나오는 데이터의 필터링 조건이 까다로워 손쉽게 제방의 누수를 탐지하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 휴대가 간편하며, 데이터 필터링 없이 제방의 누수측정이 가능한 이동식 TDR 센서를 이용한 제방 누수 사전탐지 기술개발을 위하여 다양한 실내실험 및 현장실험을 통한 적용성 평가를 실시하였다.

TDR 기법의 활용과 관련된 하천제방의 영향요소는 현장함수비, 다짐정도에 따른 단위중량 변화, 축제재료 변화에 따른 흙 종류 등이다. 본 논문에서는 이동식 TDR 센서를 이용한 국내 하천제방 누수 모니터링 평가를 위하여 실내실험을 통하여 이동식 TDR 센서의 탐사능 범위, 함수비 및 단위중량 등의 변화에 따른 유전상수값 변화특성, 제방 누수 모니터링 시스템에 필요한 함수비(W_n)-유전상수(ϵ) 관계식 등을 제시하고자 하였다. 또한, 하천제방 누수탐지

기법으로서 이동식 TDR 센서의 적용성을 평가하기 위하여 실물 모형의 제방을 축조하여 시간 경과에 따른 제방의 함수비 및 포화도 변화를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 TDR 기법 개요

하천제방은 토류구조물로서 흙, 물, 공기로 구성되어 있는데, 일반적으로 공기의 경우 1, 건조된 흙의 경우 3~6, 물의 경우 80의 유전상수 값을 가지고 있다(Reynolds, 1997). 따라서, 제체 누수가 발생된다면 하천제방의 토체는 흙입자 사이의 간극에 물이 차지하는 비율이 커짐으로써 유전상수 값의 변화를 발생시킨다.

TDR 기법은 전기자파의 상호 간섭효과를 이용하여 공기, 물, 흙입자 등으로 구성된 토체의 함수비 및 변위 등을 감지하는 시스템이다. TDR 센서를 따라서 파형화된 전자기신호의 탐사 시간은 탐사파 속도 및 탐침 길이에 의존한다. 이때 탐사파 신호는 탐침 및 안내관 주변 재료의 유전상수(dielectric constant)에 영향을 받으며, 이 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta t = \frac{2L\sqrt{K_a}}{C} \quad (1)$$

여기서, K_a 는 겉보기 유전상수(apparent dielectric constant), C 는 자유공간속에서의 전자기파 속도, Δt 는 탐사시간, L 은 연결선의 길이를 의미하며, 식 (1)은 겉보기 탐침길이(apparent probe length, $L_a = c\Delta t/2$) : 실제 탐침길이의 비인 겉보기유전상수(apparent dielectric constant)를 이용하여 간단하게 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\sqrt{K_a} = \frac{L_a}{L} \quad (2)$$

한편, 유전상수와 함수비와의 관계는 다항식과 선형식 형태를 사용하는 경험기법 등이 제안되어 왔으며, Topp et al.(1980) 및 Ledieu et al.(1986) 등은 체적함수비(θ_v)와 겉보기 유전상수(K_a)에 대하여 식 (3) 및 식 (4)와 같은 관계식을 제안 하였다.

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^2 K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (3)$$

$$\theta_v = 0.1138 \sqrt{K_a} - 0.1758 \quad (4)$$

2.2 이동식 TDR 센서

TDR 센서를 사용하여 제방누수를 측정하는 방법은 고정식(Fixed), 분포식(Spatial), 이동식(Movable)으로 구분할 수 있다. 고정식 방법은 탐침형 프로브 형태의 센서를 지중에 관입 시킨 후 유전상수를 측정하는 방법으로 지반의 함수비 및 밀도 측정에 대한 연구들이 보고되고 있다(Cho et al., 2012; Kim and Kwon, 2012). 고정식 TDR 센서는 제방을 굴착하여 해당 특정 위치에 설치하게 되는데, 지중매설에 따른 케이블 길이에 관한 보정, 설치 케이블에 의한 누수 위험성, 기존 하천제방 설치의 불편성 등 제방에 적용하는데 있어 많은 한계를 자지고 있다(Fig. 1(a)).

분포식 방법은 와이어 등을 이용하여 제방의 깊이방향으로 센서를 매설하는 방법으로 Kim 등(2011)은 하천제방 누수 측정을 위하여 이동 평균법 및 푸리에 변환 등 필터링기법을 적용한 분포식 TDR 센서의 적용성 평가를 수행하였으며, 교정함수 예측식 및 제방 내 포화도 예측시스템을 제시하였다. Park 등(2012)은 기존에 사용되던 철선 TDR 계측선의 문제점을 해결하기 위하여 스테인리스 스틸과 열수축튜브를 이용하여 개량된 분포형 TDR 센서

를 개발하였으며, 대형 모형제방 실험을 통하여 적용성을 평가하였다. 분포식 TDR 센서는 경제성이나 설치의 간편성 있는 효율적인 방법으로서 제방 내 포화도대의 변화특성을 제시하지만 분포별 함수비특성을 제시하지 못하는 단점이 있다(Fig. 1(b)).

이동식 방법은 전술한 고정식 및 분포식 TDR 센서의 문제점을 해결하고자 지중경사계와 유사한 방법으로 지층깊이별 유전상수 및 함수비 측정이 가능한 TDR 시스템이다. Laurent 등(2001)은 이동식 TDR 센서를 이용하여 토양의 깊이별 함수비 분포를 측정하는 방법을 제시하였다. 이동식 방법은 TDR 센서를 이동이 용이한 형태로 개선하여 관측공을 따라 측정센서를 이동하면서 연속적으로 유전상수를 측정함으로써, 한 개의 관측공과 한 개의 센서만을 이용하여 제방 깊이별 유전상수를 측정할 수 있는 경제성이 뛰어난 기법이다(Fig. 1(c)). 국내의 경우 이동식 TDR 센서를 이용한 지반의 유전상수 특성에 관한 연구결과는 보고된 바 없다.

3. 실내실험

3.1 실험개요

본 논문에서는 이동식 TDR 센서를 이용하여 다양한 함수비 및 밀도조건에서 모래와 화강풍화토의 유전상수의 변화를 분석하였다. 본 실험에 사용된 흙 시료의 공학적 특성은 Table 1과 같다. 모래의 경우 국내 하천에 존재하

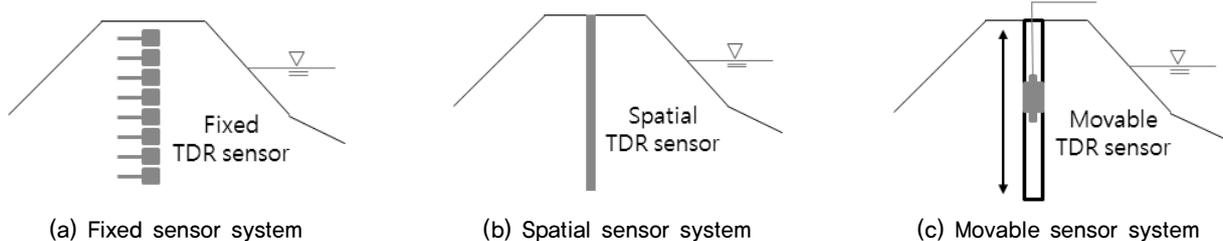


Fig. 1. A schematic diagrams of levee leakage detection system using TDR sensor

Table 1. Index properties of test materials

Index properties	Sand	Granite weathered soil
Specific gravity	2.63	2.67
Plastic Index	N,P	N,P
C_c / C_u	0.8 / 7.7	0.1 / 10.8
Passing % off No.200	4.8	26.0
U.S.C.S	SP	SM
Optimum water content (%)	8.0	15.6
Maximum dry density (t/m^3)	1.66	1.75

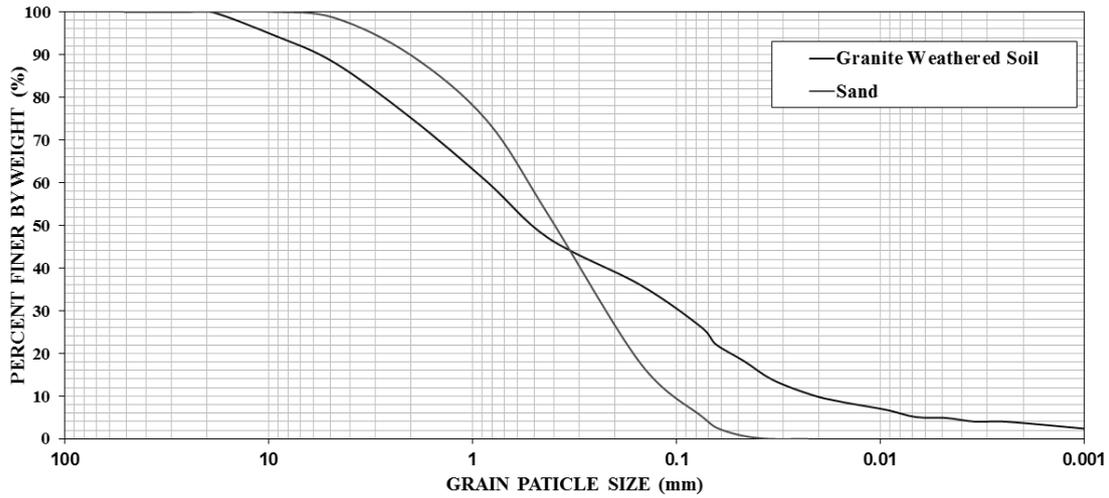


Fig. 2. Grain size distribution curves of samples

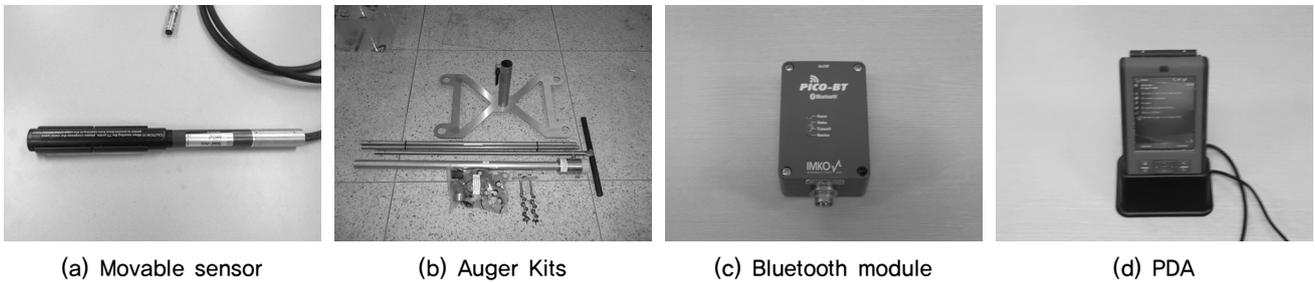


Fig. 3. Scene photos of movable TDR system

는 대표적인 흙으로서 하천 지반조건을 대표하는 흙으로 선정하였으며, 화강풍화토는 국내에 가장 많이 분포하는 흙으로서 국내 지반조건을 대표하는 흙으로 선정하였다. 이때 화강풍화토는 시료의 균질성을 높이는 차원에서 10번체(2mm) 통과분만을 사용하였다. 모래 및 화강풍화토는 경기도 파주지역에서 채취하였으며, 통일분류법상 빈입도 모래(SP)와 실트질 모래(SM)로 분류되었다. Fig. 2는 모래와 화강풍화토의 입도분포곡선을 보여주고 있다.

본 실험에 사용된 TDR 센서는 독일 IMKO 사의 이동식 센서를 사용하였다. 구성 시스템은 TDR 센서 외에 무선 블루투스 모듈 데이터 수신기, 데이터 입출력을 위한 PDA, 관측튜브, 지반굴착장비로 구성된다. 본 장비는 크기가 작아 휴대가 간편하며, 무선 블루투스 모듈과 PDA를 이용하여 현장조사에 용이하다(Fig. 3).

이동식 TDR 센서의 특징으로는 9cm의 관형 센서가 측면으로 2개씩 총 4개가 배열되어 있으며, 스프링으로 고정되어 관측용 연결튜브에 관입이 쉬우며, 연결튜브에 밀착되어 정확한 유전상수값을 측정할 수 있다. 또한 케이블에 디스플레이 및 블루투스 모듈을 연결하여 측정된 유전상수를 현장에서 바로 확인이 가능하며 PDA와 연동을 통한

데이터 저장이 가능하다. 기존의 TDR 센서의 경우 건전지 등을 이용한 자체 전원을 사용하는 반면 이동식 TDR 센서의 경우 연결된 블루투스의 전원을 이용하여 전자기파를 발생시켜 개별적인 전원이 필요없다는 장점이 있다. 또한 심도에 따른 체적함수비를 0~100%까지 측정할 수 있으며, 지반 온도측정센서로 지반의 온도를 -15~50℃까지 측정가능하다.

3.2 실험방법

본 실내실험은 하천제방의 심도별 누수탐지 모니터링 시스템 개발의 기초연구로 이동식 TDR 센서 시스템의 효용성을 평가하고자 흙종류(모래, 화강풍화토), 함수비, 단위중량 등을 변화시켜가며 모형토체의 유전상수를 측정하는 방식으로 수행되었다. 실험조건은 Table 2에서 보듯이 크게 1) 실험 토체 크기 선정을 위한 흙 종류별 TDR 탐사능 평가실험, 2) 흙 종류, 함수비, 밀도 등 영향인자 변화에 따른 이동식 TDR 센서의 효용성 평가실험 등으로 구분하여 수행되었다.

시료의 크기는 먼저 이동식 TDR 센서의 영향반경을 분

Table 2. Test conditions

Assessment items	Variables	Test conditions
Influence of Acryl column diameter	Acryl column diameter	10, 15, 20, 25, 30cm
	Soil type	Sand, Granite weathered soil
	Water content	12%, 25%
	Dry density	1.35g/cm ³
Influence of water content & density	Acryl column diameter	20cm
	Soil type	Sand, Granite weathered soil
	Water content	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24%
	Dry density	1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45g/cm ³

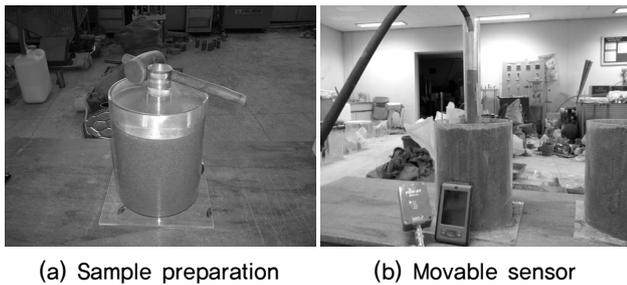


Fig. 4. Scene photos of the TDR test

석하기 위하여 직경 10~30cm, 높이 20cm인 아크릴 원통을 사용하였으며, 이후 이동식 TDR 센서의 영향반경을 고려하여 직경 20cm 아크릴 원통을 사용하여 실험을 수행하였다. 본 논문은 제방 누수 모니터링을 위한 이동식 TDR 센서의 적용성 평가를 위한 기초 연구로서 최고의 균질성을 확보할 수 있는 함수비 및 밀도 조건을 고려하여 함수비를 3~18%, 건조밀도를 1.25~1.45t/m³로 조정하였다. Fig. 4(a)는 시료의 다짐장면을 나타내고 있다. 시료의 다짐 및 확인방법은 먼저 특정 함수비로 흙을 제조한 후 시료 부피 및 특정 밀도를 고려하여 필요로 하는 시료무게를 계산하였으며 다짐판 및 고무망치를 이용하여 진동 다짐하였다. Fig. 4(b)는 이동식 TDR 센서를 이용한 유전상수 측정장면을 나타내고 있다.

3.3 이동식 TDR 센서의 영향반경 분석

본 실험은 실내실험을 수행할 소형 실험토체의 최적 크기를 선정하고자 수행되었다. 실험 관련 변화인자는 함수비(12%, 25%), 흙의 종류(모래, 화강풍화토), 건조밀도(1.35t/m³), 아크릴 원통 직경(10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm) 등을 채택 하였다.

Fig. 5는 함수비 및 흙 종류별 소형 실험토체 직경 변화에 따른 유전상수값을 보여준다. 소형 실험토체 직경 변화

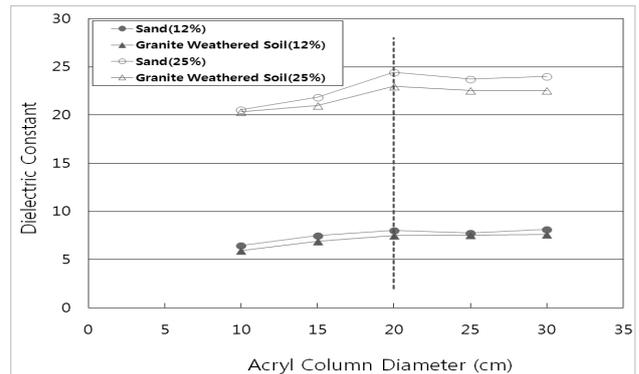


Fig. 5. The variation in dielectric constant as a function of acrylic column diameter

에 따른 유전상수값은 함수비, 흙 종류 상관없이 10cm~20cm에서 소형 실험토체 직경이 증가할수록 유전상수가 증가하는 경향을 보이다가, 20cm 이후의 경우 유전상수값의 변화가 보이지 않는 임계직경을 나타내는 경향을 보인다. 따라서 본 실험에 사용된 TDR 센서의 경우 아크릴과 흙의 재료차이로 인한 전기적 특성 값의 변화를 제거하기 위해서 직경 20cm 이상의 아크릴 원통을 사용하였다.

Topp과 Davis(1985)는 고정식 TDR 센서의 경우 가장 효율적인 센서 형식은 중심축 간격이 약 5cm인 2축형 센서이며, TDR 센서에 의한 흙의 영향범위는 탐침봉 사이의 중앙점으로 부터 탐침봉 간격의 1.4배인 원기둥 범위라고 제시하였다. 본 실험에서 사용한 이동식 TDR 센서의 경우 센서의 중앙점으로 부터 센서 직경의 3배 정도를 영향범위를 나타내고 있다.

3.4 이동식 TDR 센서를 이용한 함수비 특성 분석

본 실험은 이동식 TDR 센서의 효율성을 평가하고자 흙 종류(모래, 화강풍화토), 건조밀도(1.35t/m³), 함수비(1.35~28.72%) 등을 변화시켜가며 유전상수값을 측정하는 방

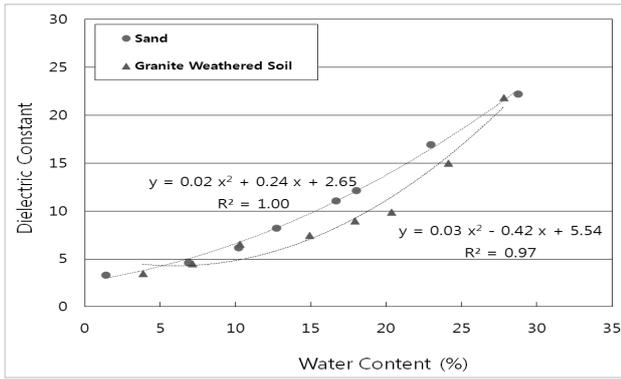


Fig. 6. The variation in dielectric constant as a function of water content

식으로 수행되었다.

Fig. 6은 흙 종류별 소형 실험토체의 함수비 변화에 따른 유전상수값을 보여준다. 함수비 변화에 따른 유전상수값은 함수비가 증가할수록 유전상수값이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 함수비 변화에 따른 유전상수값 변화특성은 모래의 경우 함수비가 1.35%에서 28.72%로 변화함에 따라 유전상수 값이 3.36에서 22.23으로 증가하여 유전상수 변화율($\epsilon_{\omega_{28.72\%}} / \epsilon_{\omega_{1.35\%}}$)이 662%이며, 화강풍화토의 경우 함수비가 3.81%에서 27.79%로 변화함에 따라 유전상수 값이 3.50에서 21.88으로 증가하여 유전상수 변화율($\epsilon_{\omega_{27.79\%}} / \epsilon_{\omega_{3.81\%}}$)이 625%으로 분석되었다. 흙 종류에 따른 유전상수 값($\epsilon_{gn} / \epsilon_{sand}$) 변화특성은 저함수비($\epsilon_{gn7.11\%} / \epsilon_{sand6.81\%}$)의 경우 97.0%로, 고함수비($\epsilon_{gn27.79\%} / \epsilon_{sand28.72\%}$)의 경우 98.4%로 나타나, 모래 보다 화강풍화토가 2~3% 정도 작게 나타내는 경향을 보인다. 결론적으로 유전상수는 흙의 종류보다 함수비에 더 민감하게 변화함을 확인하였다.

실험결과로부터 추정된 유전상수값-함수비에 대한 회귀분석 결과 상관계수(R^2) 값이 모래의 경우 1.00, 화강풍화토의 경우 0.97로서 매우 높은 상관성을 나타내고 있음을 확인 할 수 있었다. 이는 건조된 흙이 3~6 정도의 유전상수를 갖는 반면, 물은 이보다 훨씬 높은 80의 유전상수를 갖고 있어 함수비 증가에 따라 흡입자나 간극에 존재하는 물의 부피가 증가하게 되어 유전상수가 증가하기 때문으로 판단된다. 흙의 유전상수는 함수비에 크게 영향 받는 것으로 평가되었으며, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다(W_n : 함수비, ϵ : 유전상수).

$$\text{모래: } W_n = 0.02\epsilon^2 + 0.24\epsilon + 2.65 (R^2 = 1.00) \quad (5)$$

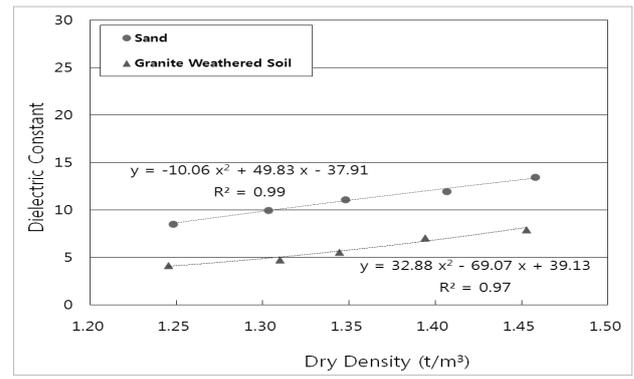


Fig. 7. The variation in dielectric constant as a function of dry density

$$\text{화강풍화토: } W_n = 0.03\epsilon^2 - 0.42\epsilon + 5.54 (R^2 = 0.97) \quad (6)$$

3.5 이동식 TDR 센서를 이용한 밀도 특성 분석

앞서 언급되었듯이 TDR 측정 관련된 하천제방의 영향 요소는 현장함수비, 축제재료변화에 따른 흙 종류, 다짐 정도에 따른 단위중량변화 등이다. 본 실험에서는 함수비를 15%로 고정시킨 후 하천제방 현장에서 발생할 수 있는 건조단위중량 변화에 따른 유전상수값의 영향 정도를 평가하고자 하였다. 즉, 본 실험은 건조단위중량의 증가를 유발시키기 위해 토체 내 흡입자 및 물의 양을 동일한 비율로 증가를 시키고, 단위부피당 공기량을 감소시킨 후 유전상수값을 측정하는 방식으로 수행하였다.

Fig. 7은 흙 종류별 소형 실험토체의 건조단위중량(공기량) 변화에 따른 유전상수값을 보여준다. 건조단위중량 변화에 따른 유전상수값은 건조단위중량이 증가할수록 유전상수값이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 건조단위중량 변화에 따른 유전상수값 변화특성은 모래의 경우 건조단위중량이 1.25t/m³에서 1.46t/m³로 변화함에 따라 유전상수 값이 8.55에서 13.48로 증가하여 유전상수 변화율($\epsilon_{sand \gamma_{1.46}} / \epsilon_{sand \gamma_{1.25}}$)이 158%이며, 화강풍화토의 경우 건조단위중량이 1.25t/m³에서 1.45t/m³로 변화함에 따라 유전상수 값이 4.22에서 8.00으로 증가하여 유전상수 변화율($\epsilon_{gn \gamma_{1.45}} / \epsilon_{gn \gamma_{1.25}}$)이 190%으로 조사되었다.

흙 종류에 따른 유전상수 값($\epsilon_{gn} / \epsilon_{sand}$) 변화특성은 49.4%~59.5%로 나타나, 모래 보다 화강풍화토가 작게 나타내는 경향을 보였다.

실험결과로부터 추정된 유전상수값-건조단위중량에 대한 회귀분석 결과 상관계수(R^2) 값이 모래의 경우 0.99, 화

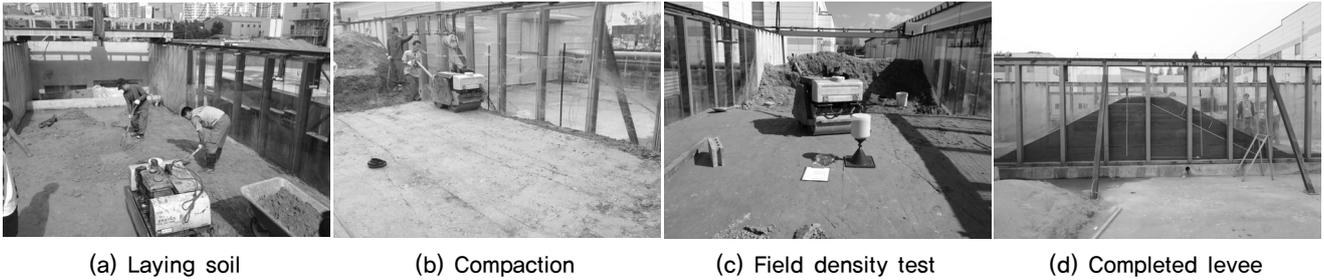


Fig. 8. The scene of full-scale levee construction

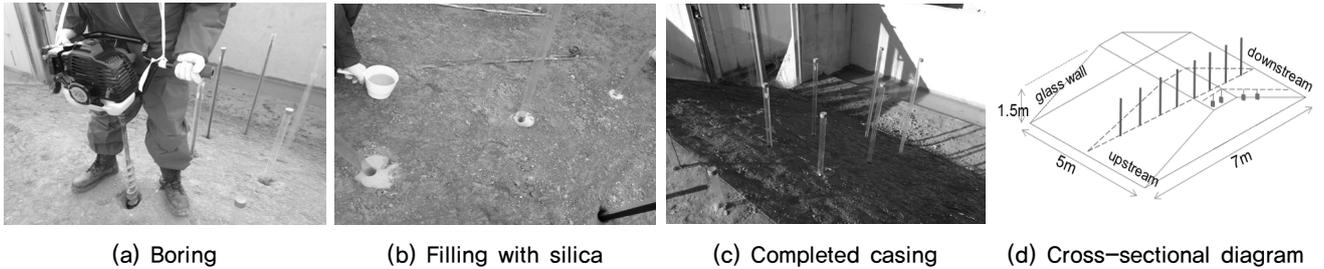


Fig. 9. The scene of sensor installation

강풍화토의 경우 0.97로서 매우 높은 상관성을 나타내고 있음을 확인 할 수 있었다. 이러한 특성은 다짐에 의해서 전체 토체 부피에서 유전상수값이 가장 작은 공기($\epsilon_{air} = 1$)가 감소함으로써 토체의 전체적 유전상수값의 증가 특성에 기인한다. 흙의 유전상수는 건조단위중량에 영향 받는 것으로 평가되었으며, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다(W_n : 함수비, ϵ : 유전상수).

$$\text{모래: } W_n = -10.06\epsilon^2 + 49.83\epsilon - 37.91 (R^2 = 0.99) \quad (7)$$

$$\text{화강풍화토: } W_n = 32.88\epsilon^2 - 69.07\epsilon + 39.13 (R^2 = 0.97) \quad (8)$$

4. 실대형 모형실험

4.1 실험개요

실대형 모형실험은 실내실험에서 사용되었던 화강풍화토를 이용하여 축조하였으며, 일반적으로 국토해양부 하천설계기준은 축제재료의 경우 1) 최대치수 100mm 이내, 2) 투수계수 10^{-3}cm/sec 이내, 다짐기준의 경우 일반구간 상대다짐 90% (A다짐시험) 관리 등을 권장하고 있다. 본 실험에 사용된 모형제방은 재료선정 및 다짐규정을 국가 규정인 하천설계기준을 고려한 단계별 시공방법으로 축조되었다. 대형모형제방의 크기는 길이 7m, 폭 5m, 높이 1.5m이다.

Fig. 8은 모형제방 시공장면을 보여주며, 제방축조의 경우 대형수조 내 유입된 토사를 20cm 높이로 성토 및 다짐 시공 한 후 Fig. 8(c)와 같이 현장들밀도시험을 실시하여 다짐도를 확인하였다. 모형제방에 대한 들밀도 시험 결과는 $1.62 \sim 1.64 \text{ t/m}^3$ 으로 상대다짐도 92.6%~93.7% 정도인 것으로 나타났다.

이동식 TDR센서는 Fig. 9 (a)와 같이 전동오거를 이용하여 수직 굴착을 실시한 뒤 케이싱을 80cm간격으로 독마루 2공, 제내지 3공, 제외지 3공 등 8공을 매설한 후 보어링 및 케이싱 사이의 간격을 모래로 충전시켰다. 센서 종류별 특성을 분석하기 위하여 고정식 TDR 센서는 전동오거를 이용하여 천공한 후 가이드핀을 이용한 센서공간 확보 및 모래를 충전하는 방식으로 50cm 심도로 독마루 2공, 제내지 2공을 매설하였다. Fig. 9 (d)는 매설단면도를 나타내고 있다.

4.2 FEM을 이용한 수치해석

수치해석은 모형제방의 침투해석을 위하여 스위스 ZACE사에서 개발된 지반전용 해석프로그램인 Z-SOIL 프로그램을 이용하여 실시하였으며, 침투해석을 위한 유한 요소망은 Fig. 10과 같이 해석의 정밀도를 위하여 약 1,410여개의 치밀한 4절점 및 3절점 평면요소로 구성하였다. 이때 제체 및 기초지반의 요소망 크기는 제방 높이의 1/10 이하를 적용하여, 가로 10cm, 세로 5~10cm를 기준으로

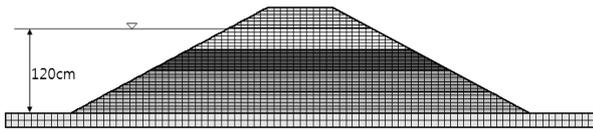
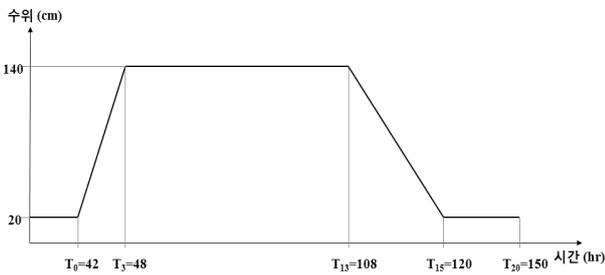


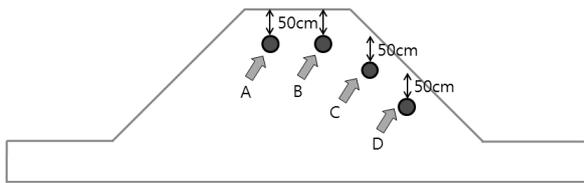
Fig. 10. Geometry and mesh

Table 3. Soil properties used FEM analysis

Soil properties	Levee model(SM)
Density (γ_t , t/m ³)	1.89
Void ratio	0.41
permeability coefficient (cm/sec)	2.83×10^{-4}
cohesiveness (c, t/m ²)	1.32
Friction angle (Φ , °)	30.16



(a) Water level conditions



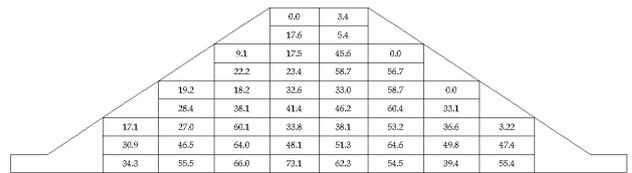
(b) Point of comparison

Fig. 11. Water level conditions and point of comparison

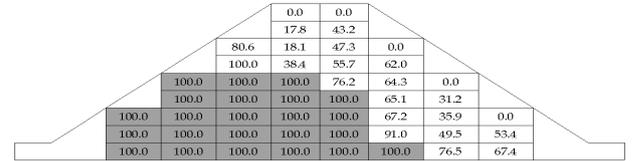
설정하였다. 또한 경계조건은 실험과 동일하게 제외지 측의 수위조건을 설정하였다. Table 3은 해석에 사용된 지반 물성치를 나타내고 있다.

4.3 이동식 TDR 센서를 이용한 제방 포화도 분석

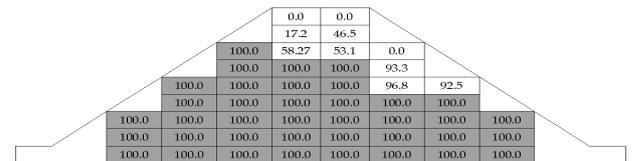
제외지의 적용수위조건은 강촌수위관측소의 수위조건을 고려하여 수위상승과 하강시간의 비율을 1:2로 조정하였다. 저수위(0.2m)에서 6시간동안 수위가 상승하여 최고수위(1.2m)에 도달하고, 이후 제체 내 포화영역이 최대한 발현되도록 60시간 동안 최고수위를 지속시킨 후 12시간 동안 수위가 하강하여 저수위에 도달하는 비정상수위조건을 적용하였다(Fig. 11(a)). 또한, 수치해석 결과 및 고정식 TDR센서와의 비교를 위하여 Fig. 11(b)와 같이 제방 표면으로부터 50cm 하부 지점(독마루 2개소, 비탈면 2개소)의



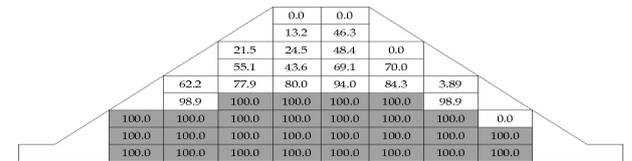
(a) Variation of saturation at T0



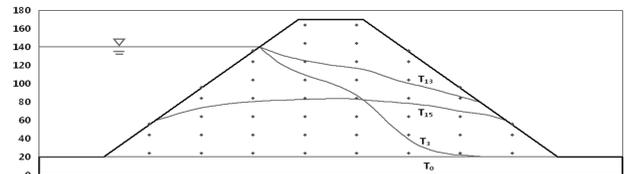
(b) Variation of saturation at T3



(c) Variation of saturation at T13



(d) Variation of saturation at T15

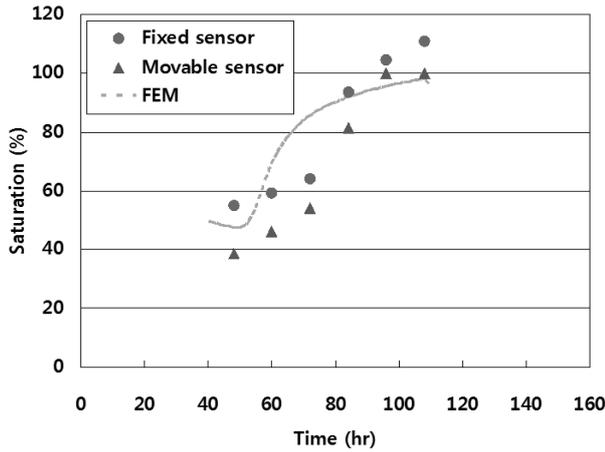


(e) Variation of saturated zone

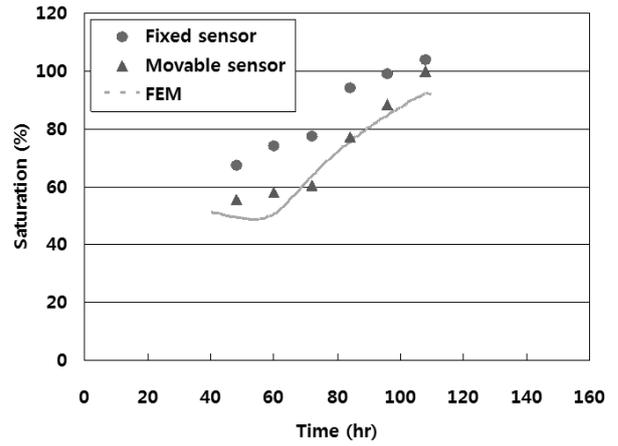
Fig. 12. The variation in saturated zone as a function of water level

포화도 값을 비교하였다.

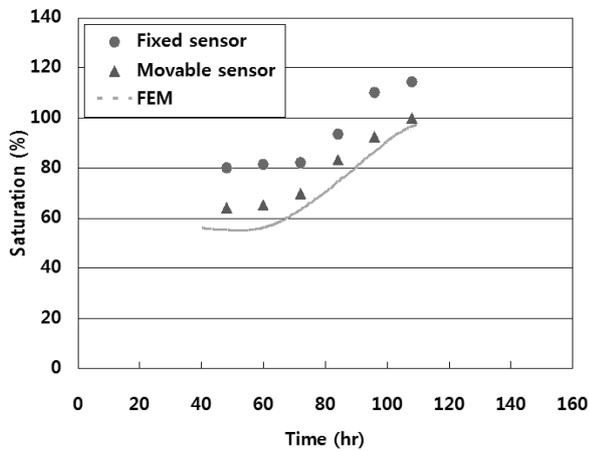
Fig. 12는 이동식 TDR 센서를 이용하여 수위상승 시점(T₀), 최대수위 시(T₃), 수위하강 시(T₁₃), 최저수위 시(T₁₅) 등으로 총 120시간동안의 수위변화에 따른 제방포화도 곡선을 나타내고 있다. 수위상승 시 제방의 침윤곡선은 T₃까지 시간경과에 따라 침윤영역이 침투압에 의해 물과 접한 부분부터 확대되고, T₁₃인 고수위 지속시의 경우 제체 내 침윤영역이 확대되며, 수위하강 T₁₅의 경우 잔류수위로 제체에 침윤선이 존재하는 특성을 나타내고 있다. 따라서 이동식 TDR은 제체 내 침윤특성을 필요로 하는 정밀 안전진단이나 안정성 해석에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



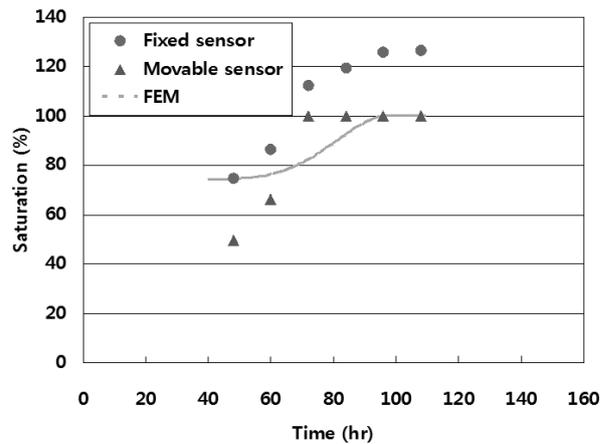
(a) Point A



(b) Point B



(c) Point C



(d) Point D

Fig. 13. The variation in saturation as a function of time

Fig. 13은 각 비교지점(Fig. 11(b))에서의 시간경과별 포화도 변화를 나타내고 있다. 제방의 포화도 특성은 수위상승 6시간, 최고수위 지속 60시간, 수위하강 12시간의 수위 변화에 따라 S자 형태의 증가특성을 나타내고 있다. 전반적으로 고정식 TDR센서는 이동식 TDR센서 결과와 비교하여 포화도를 크게 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 시공 시 계측기 매설방법 및 주변지반의 다짐도 차이에 따른 유전상수-함수비 관계식의 부정확성에 기인하는 것으로 판단된다. 모형제방실험 및 수치해석 결과 이동식 TDR 센서는 고정식 TDR 센서 및 수치해석 결과와 유사한 포화도 진전특성을 확인함으로써 제방투수탐사에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 논문은 이동식 TDR 센서를 이용한 제방누수탐지를

위한 기초연구로서, 실내실험을 통하여 지반조건에 따른 흙의 함수비 및 건조단위중량과 유전상수의 상관관계를 평가하였으며, 현장적용성을 평가하기 위하여 실대형 모형실험 및 수치해석을 통하여 수위변화에 따른 제방의 침윤특성을 관찰하였다. 일련의 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 이동식 TDR 센서에 대한 실내실험 결과 지반의 유전상수는 함수비와 밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며 회귀분석을 통하여 일정한 관계식으로 정의할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 지반의 유전상수는 함수비 변화에 따른 증가율이 밀도 변화에 따른 증가율보다 크게 나타나 함수비가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다.
- (3) 이동식 TDR 센서를 이용한 실대형 제방 모형실험 결과 수위상승 시 제방의 침윤곡선은 시간경과에 따라

침윤영역이 침투압에 의해 물과 접한 부분부터 확대되고, 고수위 지속시의 경우 제체 내 침윤영역이 확대되며, 수위하강시의 경우 잔류수위로 제체에 침윤선이 존재하는 특성을 잘나타내고 있다.

- (4) 수치해석 결과 제방의 포화도 곡선은 수위상승, 최고수위 지속, 수위하강 등의 수위변화에 따라 S자 형태의 증가특성을 나타내고 있으며, 이동식 TDR 센서는 고정식 TDR 센서 및 수치해석 결과와 유사한 포화도 진전특성을 확인함으로써 제방 누수 모니터링에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 이동식 TDR 센서를 이용하여 흙의 함수비 및 건조단위중량과 유전상수의 상관관계를 평가하였으며, 수위변화에 따른 제방의 침윤특성을 평가하였다. 본 연구에서는 투수계수가 상대적으로 큰 조립질의 모래 및 화강풍화토에 대한 특성을 평가하였으므로 추후 모관흡수고가 높은 실트 및 점토에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from a Strategic Research Project(Development of Integrated System of Damage Management for River Facility Using Ubiquitous Technology), funded by the Korea Institute of Construction Technology.

References

1. Cho J. W., Cho W. B., Kim J. M. and Choi B. H. (2012), "A Study on Dielectrical Constant under Ground Conditions", *J. of Korea Geo-Environmental Society*. Vol.13, No.12, pp. 17-25.
2. Dowding, C. H. and Pierce, C.E. (1994), "Use of Time Domain Reflectometry to Detect Bridge Scour and Monitor Pier Movement", *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, Sept. 7~9, pp.579-587.
3. Kim K. S. and Kwon, H. S. (2012), "Application of TDR probe in Embankment Compaction Control", *Korea Geotechnical Society Magazine*, Vol.28, No.1, pp.39-44.
4. 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", *J. of Korea Geotechnical Society*, Vol.27, No.2, pp.63-72.
5. Kotdawala, S. J., Hossain, M., and Gisi, A. J. (1994), "Monitoring of Moisture Changes in Pavement Subgrades Using Time Domain Reflectometry (TDR)", *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, Sept. 7~9, pp.364-373.
6. Laurent, J. P., P. Ruelle, L. Delage, N. Bre'da, A. Chanzy, and C. Chevallier (2001), "On the use of the TDR TRIME-tube system for profiling water-content in soils" *Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications*, Evanston, IL. Sept., 2001, pp.82-94.
7. Ledieu, J., De Ridder, P., and Dautrebande, A. (1986), "A Method for Measuring Soil Moisture by Time Domain Reflectometry", *J. of Hydrology*, Vol.88, pp.319-328.
8. Park, M. C., Lee, J. H., and Han, H. S. (2010), "Prediction of Slope Failure Surface Using TDR Sensor", *Proceedings of Korea Society of Civil Engineers*, pp. 405-408.
9. Park, M. C., Lee, J. W., Kim, Y. S., Han, H. S. (2012), "Seepage Analysis of Large-Scale Embankment Model by Revised TDR Sensor", *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol.28, No.11, pp.53-67.
10. Reynolds, J., M. (1997), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley&Sons, pp.115-140.
11. Scheuermann, A. and A. Bieberstein (2006), "Monitoring of dams and dikes-water content determination using Time Domain Reflectometry (TDR)", *In: 13. Donau-Europe ische Konferenz fur Geotechnik, Ljubljana, Slowenien*, Mar. 29~31, pp.493-498.
12. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Line", *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp.574-582.
13. Topp, G.C. and Davis, J.L. (1985), "Time Domain Reflectometry (TDR) and its Application to Irrigation Scheduling", *Advances in Irrigation*, Vol.3, Academic Press, pp.107-127.
14. Xiaozhen Jiang, Mingtang Lei, Yongli Gao, Yan Meng, and Xiaohong Sang (2008), "Monitoring soil void formation along highway subgrade using Time Domain Reflectometry (TDR), a pilot study at Guilin-Yangshuo highway, Guangxi, China", *Proceedings of the Eleventh Multidisciplinary Conference, Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (GSP 183)*, pp.213-222.
15. Xinbao Yu (2009), *Experimental Study of an Innovative Bridge Scour Sensor*, Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve Univ., pp.15-35.