

# TDR센서를 이용한 제방의 포화도 및 지하수위 해석

## Analysis of Saturation and Ground Water Level at Embankment by TDR Sensor

김 기 영<sup>1</sup> Kim, Ki-Young

한 희 수<sup>2</sup> Han, Heui-Soo

이 재 호<sup>3</sup> Lee, Jae-Ho

박 민 철<sup>4</sup> Park, Min-Cheol

### Abstract

The measured ground water behavior by TDR (time domain reflectometer) sensors were analyzed by the data filtering technique such as moving average method and Fourier transform, and the ground water level and unsaturated zone were tried to be determined numerically. At first, the variation of TDR data according to the saturation degree was measured by lab test, which is translated as a function of saturation degree. Then, changes of ground water level and lateral seepage in field conditions were simulated using acrylic pipe, and the measured data were analyzed to make calibration curve. Furthermore, TDR sensors were installed into the in-situ embankment to insure the field application. The saturation degree, unsaturated and dried zones were determined from the measured data.

### 요 지

본 논문은 TDR센서를 이용하여, 지반 내 지하수의 거동을 계측하고 이를 이동 평균법과 푸리에 변환을 통한 필터링 기법으로 포화 및 불포화 영역의 구분 및 변화를 수치적으로 결정하고자 하였다. 먼저 실내실험을 통하여 포화도 변화에 따른 TDR데이터의 변화를 계측하고 이를 포화도에 대한 함수로 만들었다. 다음으로 아크릴 실내모형실험을 통하여 현장의 지하수위 변화 및 측방 침투조건을 재현하고 이에 대한 TDR데이터 변화를 계측한 후 해석하여, TDR센서의 현장 적용을 위한 계측자료 교정함수를 만들었다. 이 후 현장 제방에 TDR센서를 설치하고 지하수위를 변화시켜 가며 지반의 지점별 포화도를 파악함으로써 지하수위 및 건조, 불포화영역을 결정하였다.

**Keywords :** Degree of saturation, Embankment, Ground water level, TDR sensors, Unsaturated zone

### 1. 서 론

제방의 포화도 및 지하수위를 측정하는 방법에는 여러 가지 방법들이 있으나 연속적으로 실시간 측정하기 어렵고 비용과 시간이 많이 드는 단점이 있다. 제방의 경우 강우로 인한 지하수위 상승 및 지표면의 포화대

하강이 안정해석에 가장 중요한 요소임에도 이를 측정하기가 어려워 제방의 최적 설계를 불가능하게 한다.

이러한 단점들을 해결하고자 본 논문에서는 첫째, TDR센서를 이용하여 실내 포화도 변화실험을 통한 TDR데이터의 포화도 함수를 만들고 푸리에 변환을 통한 필터링 기법과 보정기법을 찾고자 하였다. 둘째, 실내아크릴모

1 정회원, 수자원공사 K-water연구원 댐안전연구소 책임연구원 (Member, Principal Researcher, K-water Research Corporation)

2 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, hanhs@kumoh.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, (주)메카지오텍 연구사업부 이사 (Member, Director, Researcher Div., Mecageotech Co., Ltd)

4 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

형실험을 통해 제방의 지하수위 조건 및 측방 침투조건을 재현하고 이를 해석함으로써 TDR센서의 현장 적용성을 증명하고자 하였다. 마지막으로, 실제 제방에 TDR센서를 설치하고 수위변화에 따른 계측을 실시하여 제방의 포화도 해석 및 이를 통한 지하수위, 불포화영역을 결정하였다.

## 2. TDR센서의 구성

### 2.1 계측기의 제원

본 연구에서 사용된 TDR은 Hyperlab, inc.에서 생산하는 HL8200NET을 선정하였다. 그 이유는 이 제품의 가격이 비싸지가 않고, 크기도 작아서 휴대용으로 노트북 컴퓨터에 연결하여 쓸 수 있어 토목 구조물의 현장시험에 용이 하기 때문이다. 또한 제공하는 Interface가 TCP/IP로 차후 원격무선계측의 응용에 용이하고, 무엇보다도 Labview프로그램으로 쉽게 구동소프트웨어를 제작할 수 있기 때문이다.

이 TDR계측 시스템은 250mV의 전기펄스를 SMA (SubMiniature version A)출력단자에 보낸 후 동일 단자에서 돌아온 반사파를 측정하는 장치로서, TDR센서는 전기펄스를 발생시키고 반사파를 감지하는 역할을 한다. 발생된 전기펄스는 동축케이블을 통해 사용자가 원하는 계측재료(Sensing Material)를 따라 이동하며 함수비, 온도차, 변위 등에 의해 그 값이 변하게 되고 반사되어온 전기펄스를 TDR센서가 감지하게 된다. 감지된 데이터를 TCP/IP통신을 이용하여 노트북에 Spread Sheet 형태로 전송하게 되고 TDR구동 소프트웨어로 이를 저장하여 최종적으로 TDR데이터를 획득하게 된다.

Spread Sheet로 획득된 TDR데이터를 해석하여 TDR 데이터에 대한 포화도 함수를 만들고 필터링기법과 Calibration기법 등을 결정한 후 최종적으로 현장의 포화도 및 지하수위를 파악하였다.

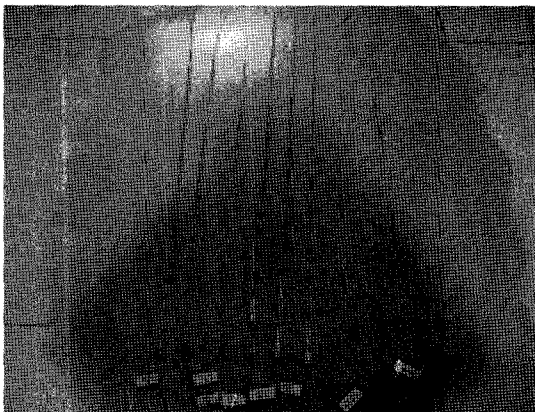
### 2.2 계측선의 재료 및 특징

TDR 계측기는 분포형 센서로 지반의 포화도를 측정하기 위해 계측선을 사용하므로, 현장지반에 관입되게 되는 계측선의 재질을 결정하는 것이 중요하다. 동축케이블과 연결할 계측선은 노이즈 발생량이 적고 포화도의 변화에 민감해야하므로 이를 결정하기 위하여 철선( $\phi 1.2, 1.5, 2.0$ )과 니크롬( $\phi 0.5, 1.2$ ), 구리( $\phi 0.19$ ), 동축케이블(4C-FB), 일반전선 등의 여덟 종류의 선으로 실험하였다. 건조된 표준사를 바닥에 10cm의 두께로 깔고 그 위에 실험용 케이블들을 올리고 다시 10cm의 표준사로 덮었다. 건조된 상태에서 TDR센서로 계측한 후, 30cm 지점과 100cm 지점을 포화시켜 계측하여 그 결과를 비교하였다(그림 1 참조).

실험결과 철선이 노이즈가 가장 적고 포화도 변화에 민감한 것으로 나타났으며, 철선의 굵기에는 큰 영향이 없어 센서 제작 시 작업의 편의성을 고려하여 철선  $\phi 1.2$ 를 TDR센서의 계측선으로 결정하였다.

### 2.3 계측선의 설치방법 및 계측 지반 선정

그림 2와 같이 TDR센서에서 SMA커넥터에 동축케이블(RG316)을 연결하고 이 동축케이블을 다시 철선( $\phi 1.2$ )에 연결하였다. 철선 두 가닥의 접지를 막기 위하여 두 철선 사이에 플라스틱판( $t = 3mm$ )을 끼우고 케이블 타

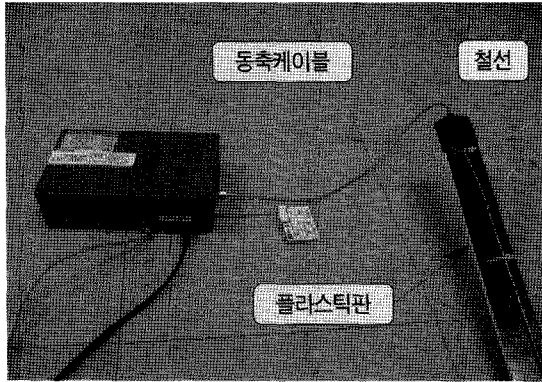


(a) 실험에 사용된 TDR계측선들

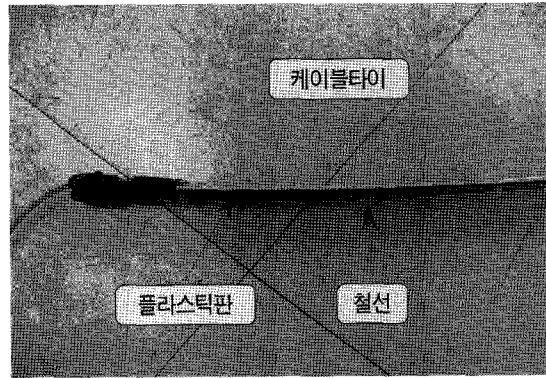


(b) TDR계측선들의 실험

그림 1. TDR계측선의 재료 결정 실험



(a) TDR센서의 연결-1



(b) TDR센서의 연결-1

그림 2. TDR계측선 설치방법

이로 묶어 철선의 이탈을 막았다.

실내에서 동일한 크기로 제작한 TDR센서를 포화도 변화 실험과 실내 모형아크릴 실험에 사용하고, 현장에서 보링홀에 삽입한 후 주문진 표준사로 충전하여 계측을 수행하였다. 표준사로 충전한 이유는 계측 데이터의 필터링 및 보정과정에서 실내실험과 현장의 조건을 동일하게 하고 현장의 조건을 단일화하기 위함이다. 또한 표준사는 입도가 균질하고 공극이 크며, 일반적으로 실트질인 현장 지반의 투수계수보다 커서, 현장 보링 구멍내로 침투하는 지하수 흐름이 충전된 표준사에 영향을 받지 않는다.

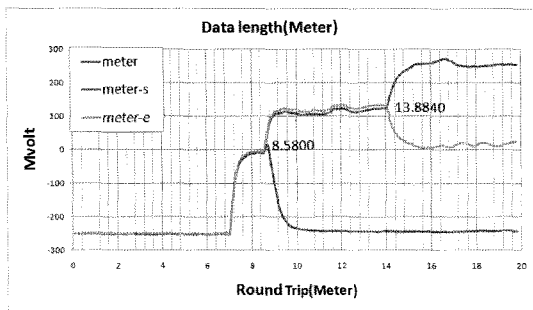
### 3. 실내실험

#### 3.1 TDR센서 길이측정

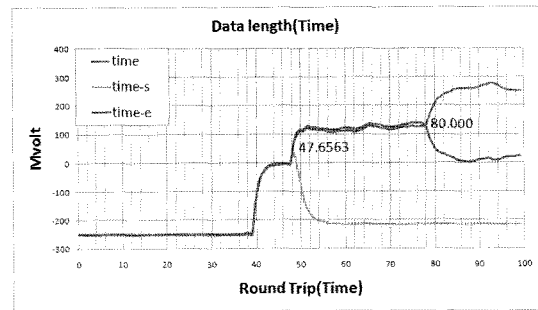
TDR데이터는 Round Trip의 가로축 값이 Meter단위

와 Time단위로 그래프로 출력되므로 이를 해석하여 지하수의 위치를 정확히 파악하려면 그래프에서 TDR센서의 위치를 정확히 알 수 있어야 한다. TDR센서의 시점부와 종점부에 도체인 철을 접촉시켜 TDR데이터의 변화를 파악하고 이를 해석하여 TDR센서의 위치를 그래프에서 파악할 수 있도록 하였다.

그림 3은 TDR데이터의 시점부와 종점부 파악을 위한 TDR데이터 계측값이다. 이를 살펴보면 가로축을 Time값으로 얻었을 때 노이즈가 적게 발생하고 그래프의 변화가 적음을 확인할 수 있다. 이 후 실내 및 현장의 TDR데이터는 모두 가로축을 Time값으로 계측하였다. 초기값이 0이 아닌 이유는 TDR계측기기 내부의 케이블과 센서까지의 동축케이블 때문이다. TDR센서의 시점부와 종점부는 표 1와 같다.



(a) TDR센서의 데이터 변화(Meter)



(b) TDR센서의 데이터 변화(Time)

그림 3. TDR데이터의 시점부와 종점부 파악을 위한 TDR데이터 계측

표 1. TDR센서의 시점부와 종점부

Boring No.	센서길이(m)	Round Trip(Time)		Round Trip(Meter)	
		시 점	종 점	시 점	종 점
제방	BH-6,7	3.90	47.6563	80.000	13.8840

### 3.2 포화도에 따른 TDR데이터

포화도에 따른 TDR데이터의 변화를 파악하기 위해 포화도 30%, 60%, 100%일 때의 단위체적당 토립자의 무게와 물의 무게를 계산하였다.

$$G_s \cdot w = S \cdot e \quad (1)$$

각각의 포화도에 대한 함수비를 구하기 위하여 식 (1)

을 변환하면

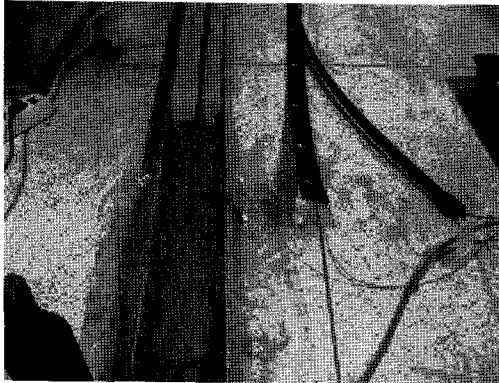
$$w = \frac{S \cdot e}{G_s} \quad (2)$$

여기서,  $G_s$  : 비중(모래 = 2.65),

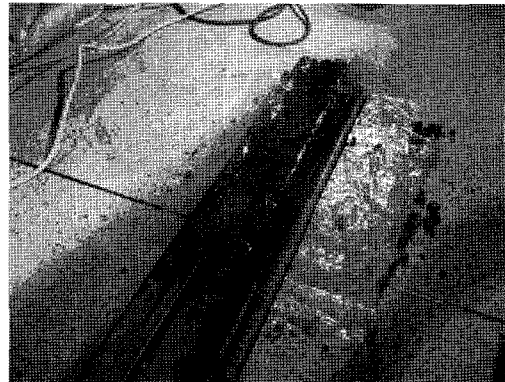
$e$  : 간극비(균질하고 느슨한 모래 = 0.8)

$S$  : 포화도

식 (2)를 이용하여 각각의 포화도 30, 60, 100%에 대

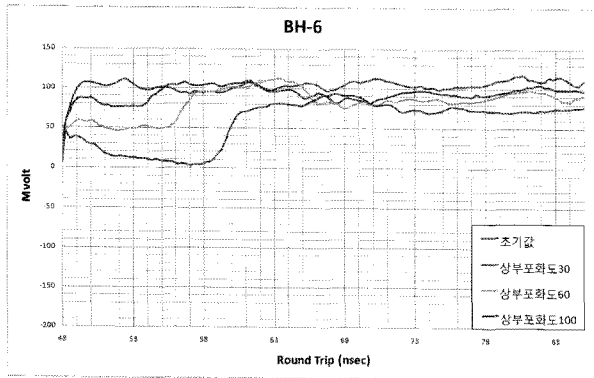


(a) 상부 50cm구간의 포화도 변화

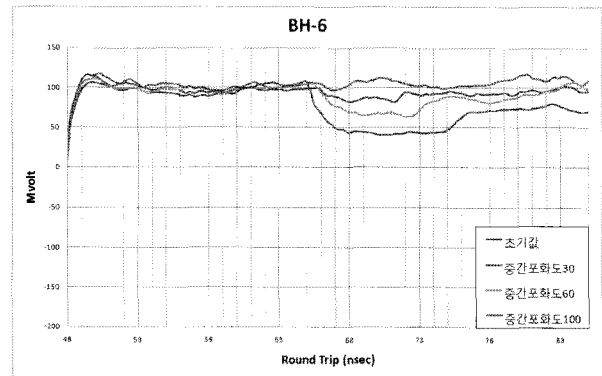


(b) 하부 50cm구간의 포화도 변화

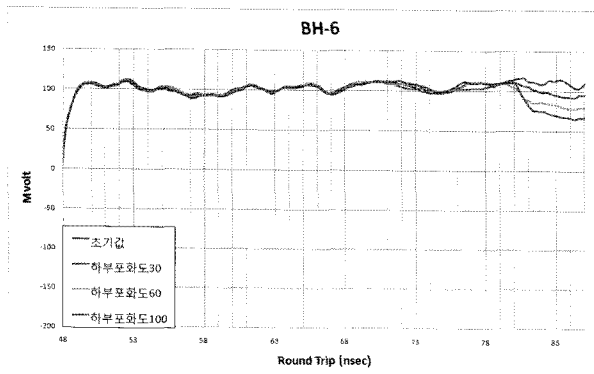
그림 4. 포화도 변화에 따른 TDR데이터 계측



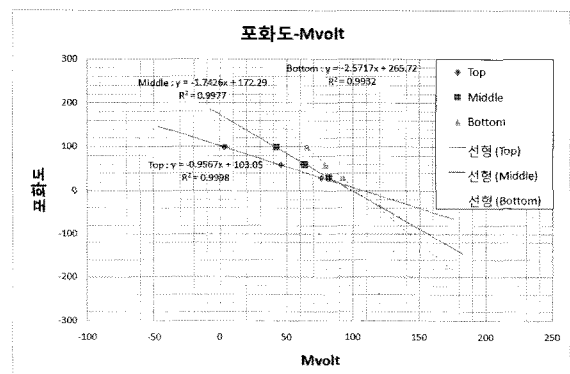
(a) 상부 50cm지점의 포화도 변화에 따른 TDR데이터



(b) 중간 50cm지점의 포화도 변화에 따른 TDR데이터



(c) 하부 50cm지점의 포화도 변화에 따른 TDR데이터



(d) 각 지점의 포화도 변화에 따른 수식

그림 5. 포화도 변화에 따른 TDR데이터 분석

한 함수비를 구하면 9, 18, 30%가 된다. 포화도가 30인 함수비 9%의 시료를 만들기 위하여 표준사 1000g당 물 90g, 포화도가 60인 함수비 18%의 시료를 만들기 위하여 표준사 1000g당 물 180g, 포화도가 100인 함수비 30%의 시료를 만들기 위하여 표준사 1000g당 물 300g 배합하였다. 배합한 시료를 그림 4와 같이 센서의 상부, 중간부, 하부에 폭 50cm로 덮고 계측을 실시하였다.

포화도 변화에 따른 TDR데이터를 그래프로 나타내면 그림 5의 (a)~(c)가 된다. 이들 그래프를 살펴보면 포화도가 커질수록 Mvolt값이 크게 줄어들음을 알 수 있다. 이를 수식화하기 위하여 각 포화도에 따른 Mvolt값을 그래프로 그리면 그림 5(d)가 된다. 이 그래프를 살펴보면 포화도에 따라 Mvolt값이 선형으로 변화함을 알 수 있고 이를 공식화하였다. 추세선들의 기울기가 하부로 갈수록 커지는 것은 하부로 갈수록 철선 자체의 전기저항값과 노이즈가 TDR데이터에 포함되기 때문이다. 이는 필터링 과정 외에 계측선의 전기저항과 함수비의 차이에 대한 보정과정이 필요하며, 계산과정에서 이를 보정해주어야 함을 알 수 있다(그림 5(d) 참조).

이들 공식들을 이용하여 TDR데이터의 포화도를 파악하고 건조영역과 불포화영역, 그리고 포화영역을 구분하고 지하수위를 파악하였다.

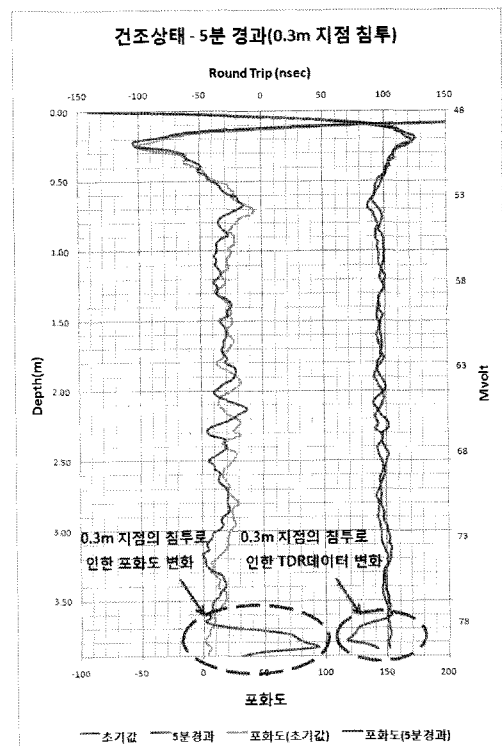
### 3.3 지하수위와 측방침투 파악

지하수위의 변화 및 측방 침투로 인한 함수비 변화를 TDR계측 데이터의 변화로 정확하게 파악하기 위해, 아크릴(Φ80, t=3mm) 파이프로 3m 길이의 현장 보링홀과 동일한 모형을 제작하였다. 측방 침투에 의한 지하수의 변화를 파악하기 위하여 아크릴 모형의 하부 0.3m 지점 및 1.3m 지점에 0.5cm 지름의 수로관을 설치하였다(그림 6(a)). 침투유량을 적게하여 시간에 따른 중력방향의 침투와 모관상승의 영향을 정확히 파악할 수 있도록 하였다. 그림 6 (b)는 0.3m지점에서 침투시켜 아크릴관이 완전포화됐을 때의 TDR데이터를 나타낸 것이다.

그림 7은 아크릴 모형에서 1.3m지점에서 측방 침투시켜 하부가 완전 포화된 후의 아크릴 모형과 TDR데이터를 나타낸 것이다. 그림 7(b)를 살펴보면 좌측편의 TDR데이터가 불포화영역과 포화영역을 거치면서 급격히 값이 변화됨을 확인할 수 있고 이것을 포화도 함수를 적용시켜 포화도로 계산하면 같은 그림의 우측편 그래프와 같이 나타났고 이를 통해 불포화영역과 지하수위를 파악할 수 있었다. 실제 아크릴 모형의 모관상승에 의한 불포화영역을 재어보니 20cm로 측정되었으며 TDR 데이터를 통해 결정한 불포화영역도 20cm로 나타났다.



(a) 아크릴파이프 모형제작

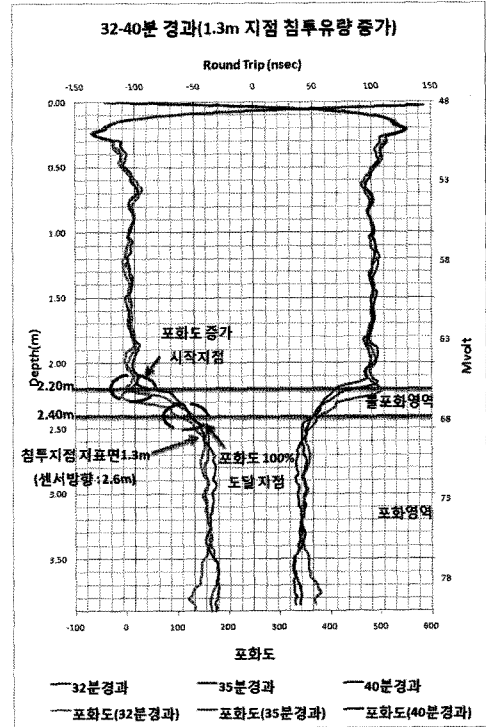


(b) 표준사 충전 및 수로관 설치

그림 6. 지하수위와 측방침투 파악을 위한 실내모형실험



(a) 1.3m지점 이하 완전 포화



(b) 1.3m지점 이하 완전 포화시 TDR데이터

그림 7. 지하수위와 측방침투 파악을 위한 실내모형실험

논문에서 나타낸 것은 1.3m지점에서의 측방침투만 나타내었지만 아크릴 모형실험을 하며 다양한 조건에서 TDR 데이터를 해석해본 결과 그 값이 정확했으며 이를 근거로 TDR센서의 현장 적용 가능성을 증명할 수 있었다.

#### 4. 현장실험

##### 4.1 현장개요

현장 적용성을 검증하기 위하여 군위댐 상류 하천 제방에 시추한 후 공벽 유지를 위해 PVC파이프(Φ40mm)를 삽입하고 측면부에 구멍을 뚫은 후 TDR센서를 관입시켰다. 그 후 PVC파이프 공내를 표준사로 충전하고 상부에 우수방지 PVC캡을 설치하였다. 제방에 설치한 TDR센서의 길이 및 제원은 표 2와 같다.

설치한 TDR센서를 현장 하천수위조건을 달리하여 계측하였다. 먼저 하천을 가로질러 설치된 보의 수문을 개방하여 저수위 조건에서 TDR값을 계측한 후 수문을

닫아 고수위 조건을 만들고 10일 경과 후 계측하였다. 이후 다시 고수위 조건에서 계측한 후 수문을 열어 저수위 조건을 만들고 1일 경과 후 계측하였다.

##### 4.2 TDR데이터

그림 8은 현장에 설치된 TDR센서의 저수위와 고수위 조건에서 계측한 데이터이다. 이를 필터링과정을 통하여 노이즈를 제거하고 보정과정을 통해 데이터에 포함된 철선의 전기 저항값을 보정한 후 실내실험에서 구한 TDR데이터에 대한 포화도 함수로 포화도를 결정하였다.

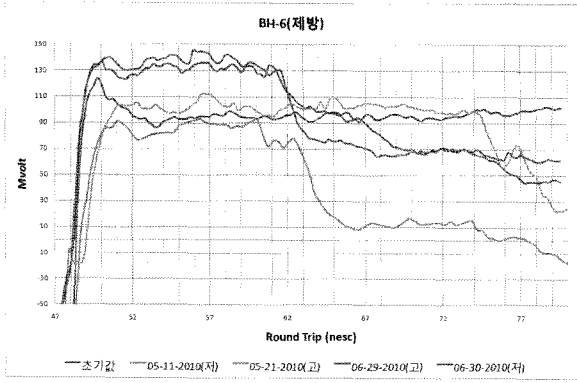
##### 4.3 데이터 필터링 및 보정(Calibration)

###### 4.3.1 데이터 필터링

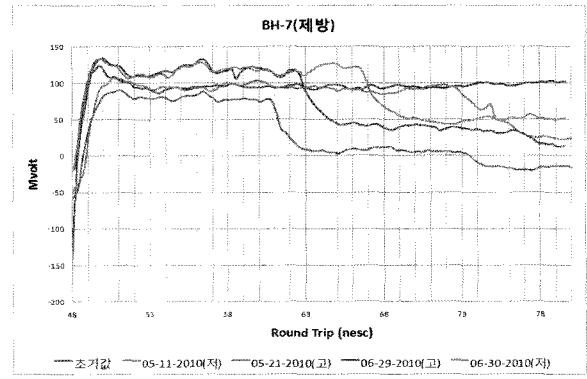
계측자료는 항상 시간에 따른 불규칙 신호인 노이즈를 포함하고 있기 때문에, 정확한 시험결과를 얻기 위하

표 2. TDR센서 제원

Boring No.		센서길이(m)	보링길이(m)	하부 그라우팅	근입깊이(m)
제방	BH-6,7	3.90	3.80	-	3.34



(a) BH-6 TDR데이터(저/고수위)



(b) BH-7 TDR데이터(저/고수위)

그림 8. TDR데이터(저/고수위)

여 노이즈를 제거하여야 한다. 노이즈를 제거하기 위한 방법으로 2단계의 필터링기법을 사용하였다. 먼저 이동평균법을 사용한 후 푸리에 변환을 실시하였다. 이동평균법은 계측자료에 포함된 낮은 Frequency의 노이즈를 제거하기 위한 기법으로 식 (3)을 이용하였다.

$$g_n = \frac{f_{n-1} + f_n + f_{n+1}}{3} \quad (3)$$

푸리에 변환은 1차 필터링을 거친 계측 자료의 함수 변환을 위하여 사용되는 필터링 기법으로, 초기 계측자료의 함수의 형태에 따라 우함수 혹은 기함수의 형태를 선정하여 사용할 수 있다. 우함수의 경우 “Fourier cosine series”, 기함수의 경우 “Fourier sine series”을 사용한다. 먼저 우함수의 경우를 해석하기 위한 식은 식 (4)~(5)에 보인바와 같다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2n\pi}{T} t \quad (\text{우함수}) \quad (4)$$

계수는 아래와 같다.

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt, \quad a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos \frac{2n\pi}{T} t dt, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

기함수의 경우를 해석하기 위한 식은 식 (6)~(7)에 보인바와 같다.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2n\pi}{T} t \quad (\text{기함수}) \quad (6)$$

계수는 다음과 같다.

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin \frac{2n\pi}{T} t dt \quad (7)$$

### 4.3.2 보정(Calibration)

TDR계측자료의 변화는 지반의 함수비 변화 값과 계측센서로 사용된 철선 자체의 저항값 변화의 2가지로 구성된다. 그러므로, 실제 현장의 계측자료를 이용하여 지반의 포화도 변화를 측정하기 위하여 이 두 가지 값 변화에 대한 보정을 모두 실시해야한다. 다시 말하면,

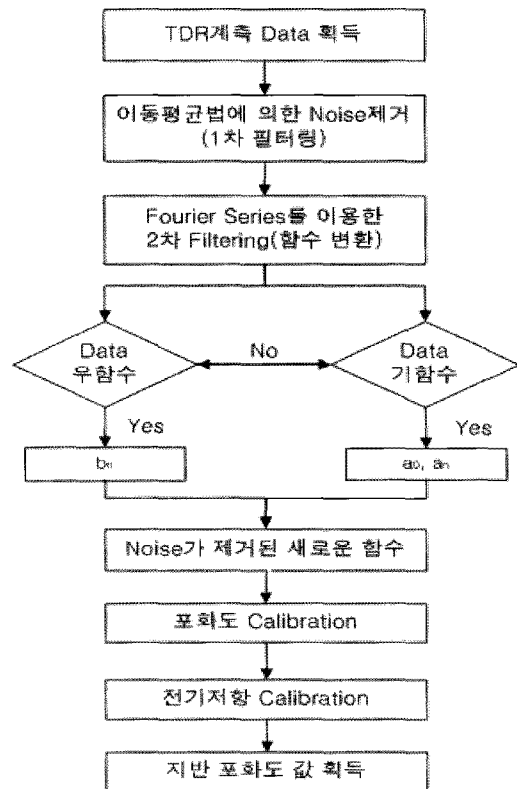


그림 9. 포화도 해석과정의 순서도

계측자료는 실제 구하고자 하는 지반의 포화도 변화에 관한 값 뿐 만 아니라, 철선 길이가 증가함에 따른 전기 저항값 증가에 관한 값도 같이 포함하고 있다. 그러므로, 같은 포화도이더라도 저심도의 계측값과 고심도의 값이 다르므로 이에 대한 보정이 필요하다. 그림 9는 TDR 센서를 이용한 포화도 해석과정의 순서도를 보여준다.

그림 10은 깊이에 따른 각 지점의 포화도 변화에 따른 보정 수식에 관한 내용을 정리한 것이며, 그림 11은 제방의 저수위시 포화도 변화를 구하기 위해, 필터링 및 보정

과정을 거친 계산과정을 예시한 것이다. 표 3은 Spread Sheet를 이용한 계산과정을 보여준다. 이는 계측된 최종 결과가 그래프가 아닌 정량화된 값으로 나타남을 의미하며, 계측자가 원하는 지점의 포화도를 수치적으로 알 수 있다.

#### 4.4 데이터 필터링 및 보정 결과

데이터 필터링과 계산과정을 거쳐 계측 결과는 표 3

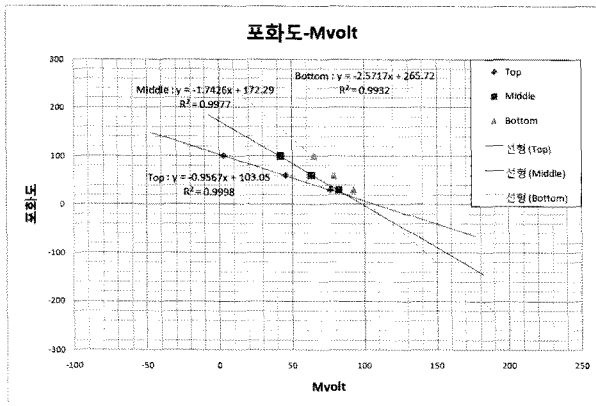


그림 10. 각 지점의 포화도 변화에 따른 수식

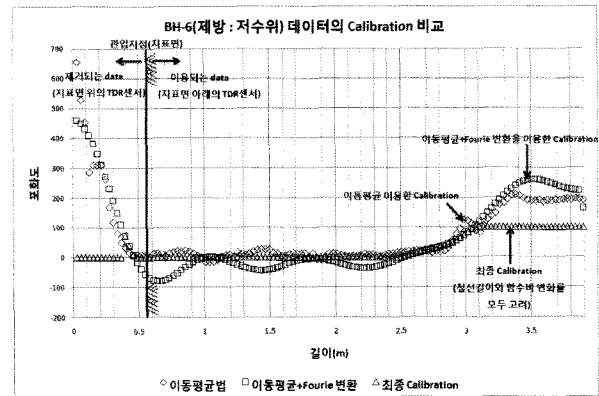
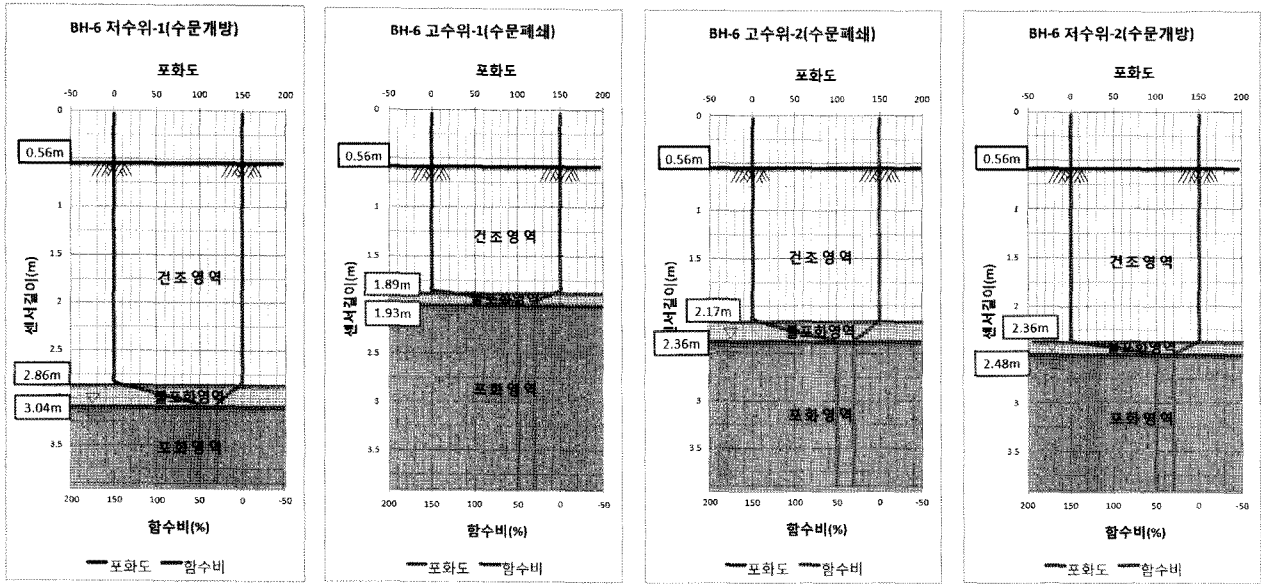


그림 11. Calibration 및 filtering을 거친 계산 예시

표 3. Spread sheet를 이용한 보정과정

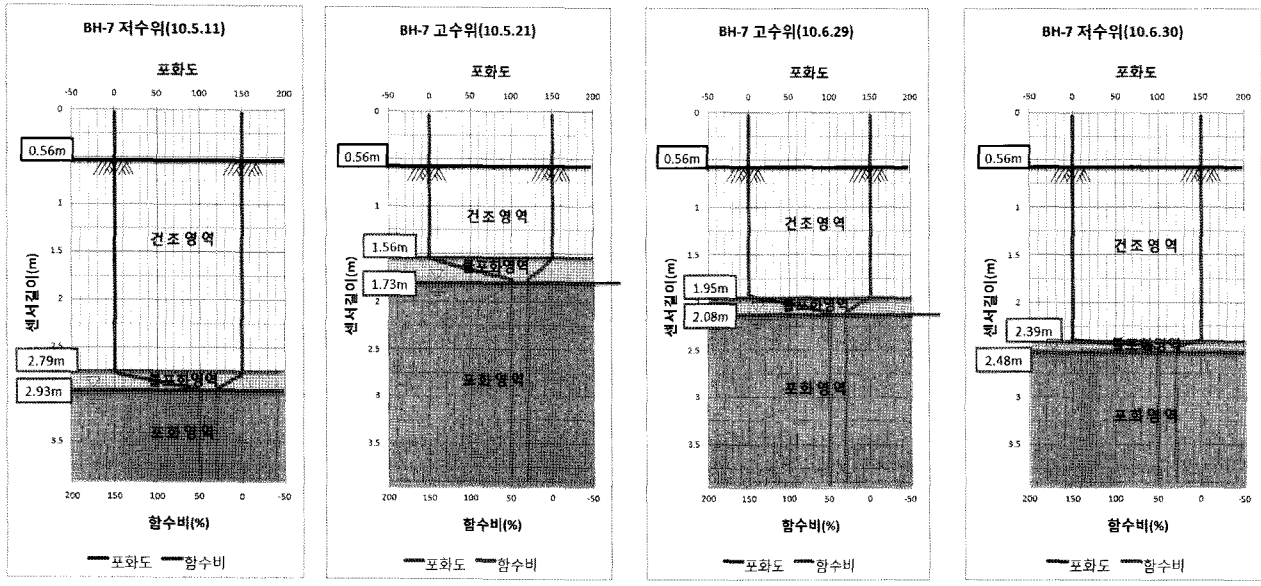
Depth	Mvolt	1차필터링	2차필터링	보정	최종 포화도
1.75758	65.51116	65.31532	64.44989	-30.19239	0.0
1.79273	62.86722	63.25891	60.92740	-11.42139	0.0
1.82788	61.39836	61.49628	57.48809	7.02107	7.0
1.86303	60.22327	59.43987	54.25192	24.54004	24.5
1.89818	56.69800	56.99177	51.32342	40.61796	40.6
1.93333	54.05405	54.34783	48.78703	54.83781	54.8
1.96848	52.29142	51.21426	46.70367	66.90043	66.9
2.00364	47.29730	48.76616	45.10854	76.63532	76.6
2.03879	46.70975	47.78692	44.01038	84.00457	84.0
2.07394	49.35370	48.17861	43.39204	89.09990	89.1
2.10909	48.47239	47.98277	43.21236	92.13325	92.1
2.14424	46.12221	47.39522	43.40923	93.42158	93.4
2.17939	47.59107	47.19937	43.90357	93.36676	93.4
2.21455	47.88484	47.88484	44.60416	92.43174	92.4
2.24970	48.17861	47.98277	45.41280	91.11439	91.1
2.28485	47.88484	48.47239	46.22983	89.92028	89.9
2.32000	49.35370	48.08069	46.95942	89.33590	89.3
2.35515	47.00353	46.80768	47.51461	89.80368	89.8
2.39030	44.06581	44.06581	47.82168	91.70002	91.7
2.42545	41.12809	42.00940	47.82377	95.31733	95.3
2.46061	40.83431	40.14884	47.48343	100.85107	100.0
2.49576	38.48414	38.87583	46.78420	108.39210	100.0





(a) 저수위-1                      (b) 고수위-1                      (c) 고수위-2                      (d) 저수위-2

그림 12. BH-6 수위변화에 따른 지하수위 및 불포화영역



(a) 저수위-1                      (b) 고수위-1                      (c) 고수위-2                      (d) 저수위-2

그림 13. BH-7 수위변화에 따른 지하수위 및 불포화영역

과 같이 Spread Sheet를 이용한 정량화된 값으로 나타나지만 본 논문에서는 그래프를 이용하여 불포화영역과 지하수위를 그림 12~13과 같이 나타내었다.

그림 12(a), (d)와 같이 저수위의 지하수위가 서로 다른 이유는 현장조건상 수문을 개방하여 저수위조건을 만든다고 하더라도 일정한 수위를 유지할 수 없어 지하수위가 다르게 형성되어, 같은 저수위라 할지라도 지하수위가 다르게 나타났다.

그림 14는 수문개폐 후 10일이 경과된 시점에서, BH-

6~7 공내 지하수위를 계측한 자료에 따라 제방 내의 침윤선을 작도한 것이며, 그림 15는 수문개폐 후 1일이 경과된 시점에서 제방 내의 침윤선을 작도한 것이다. 처음 저수위 조건에서 수문을 닫아 고수위 조건을 만들고 10일 경과 후 계측한 결과 수위 차이가 크게 발생하였고 고수위 조건에서 수문을 열어 저수위 조건을 만들고 1일 경과 후 계측한 결과 수위 차이는 크게 발생되지 않았다.

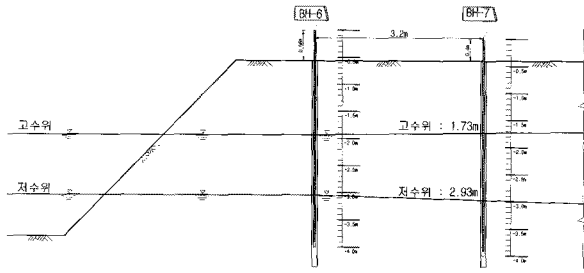


그림 14. BH-7 공내 지하수위를 이용한 제방 내의 침윤선 작도 (10일 경과)

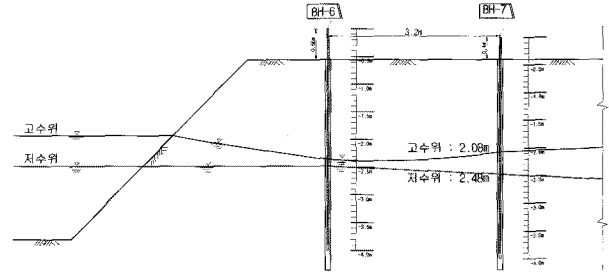


그림 15. BH-7 공내 지하수위를 이용한 제방 내의 침윤선 작도(1일 후)

## 5. 결론

TDR센서를 이용하면 제방의 지하수위 변화 및 지표면 침투로 인한 포화대 하강, 불포화영역의 변화 등을 정확히 파악할 수 있으므로 제방의 안정해석시 신뢰도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 경제적이고 합리적인 설계가 가능할 것이다. 이를 위해 TDR계측기 및 아크릴모형으로 실내실험을 수행하였으며, 현장실험을 통하여 제방의 포화도 변화를 계측하였다. 실내실험 및 현장시험의 결과는 다음과 같다.

- (1) 포화도 변화에 따른 TDR데이터 변화는 일정하였으며, 회귀 분석을 통한 함수화 과정을 거쳐 현장지반의 포화도 및 함수비를 정량적으로 파악할 수 있었다.
- (2) 아크릴모형실험을 통하여 지하수위를 변화시켜본 결과 TDR센서를 이용하여 그 변화를 정확히 파악할 수 있었으며, 측방침투 뿐만 아니라 모관상승에 의한 불포화영역 또한 정확히 파악할 수 있어 이를 근거로 TDR센서의 현장 적용성을 증명할 수 있었다.
- (3) 표준사로 충전한 이유는 계측 데이터의 필터링 및 계산과정에서 실내실험과 현장의 조건을 동일하게

모사하고 현장의 조건을 단일화하기 위함이다.

- (4) 아크릴모형실험 및 보정과정을 통하여 지하수위 변화와 측방침투에 대한 TDR센서의 현장 적용성도 증명할 수 있었으며, 계측 결과분석을 위한 TDR데이터의 필터링 및 계산기법을 결정하여, TDR을 이용한 지반의 포화도 계측기법을 만들 수 있었다.
- (5) 현장 제방의 지하수 거동을 TDR센서를 이용하여 파악할 수 있었으며, 포화 및 불포화영역의 구분과 변화 등을 정확히 파악할 수 있는 해석기법으로 제공될 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 제방 안정해석의 신뢰도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 경제적이고 합리적인 계측 설계가 가능할 것이다.

## 참고 문헌

1. Beck, T. J., Kane, W.F., "Current and Potential Uses of TDR for Geotechnical Monitoring", Proceedings, 47th Highway Geology Symposium, 1996, pp.94-103.
2. Kane, W.F., Beck, T. J., "Development of a TDR system to Monitor Landslide Activity", Proceedings, 45th Highway Geology Symposium, 1994, pp.163-173.
3. 한희수, "나노-TDR센서를 이용한 토목구조물 모니터링 시스템", 구조물진단학회지, 제13권 제5호, 2009, pp.93-100.

(접수일자 2010. 10. 1, 심사완료일 2011. 1. 19)