

## 누수탐지를 위한 저비용 CAP형 TDR 탐사기법

김진만\* · 최봉혁\*\* · 조진우\*\*\* · 조원범\*\*\*\*

Kim, Jin Man\*, Choi, Bong Hyuck\*\*, Cho, Jin Woo\*\*\*, Cho, Won Beom\*\*\*\*

## Low-Cost CAP-type TDR Exploration Techniques for Leak Detection

### ABSTRACT

The river levee collapse and flood damages are dramatically increased due to the floods which caused by abnormal weather nowadays. The counterplan like TDR(Time Domain Reflectometry) river levee leaking exploration technique is needed to that levee failure causes of levee failure such as levee failure by penetration, piping, inadequate levee materials selection, poor compaction are almost 52% of the failure. This research practiced various comparing experiments of existing TDR(probe and tube types) and developing CAP type TDR to evaluate acrylic small CAP mould and low-cost TDR levee leaking monitoring system which was used probe type TDR. As the result, evaluated TDR system had 20cm critical exploration performance which was a leaking exploration performance, The functional ratio of TDR exploration sensitivity of dry density was sensitive more than 3 times than dry density, and weathered granite soil foundation water contents(w)—dielectric constant( $\epsilon$ ) corelation formula was suggested to measure functional ratio on developing cap type TDR system.

**Key words** : Dielectrical constant, Water content, Dry density, Correlation, Time Domain Reflectometry(TDR)

### 초록

최근 이상기후에 따른 홍수로 인해 하천제방 붕괴 및 홍수피해가 급증하고 있다. 하천제방 관련 홍수피해는 침투에 의한 제방붕괴 및 파이프, 부적절한 축제재료선정, 다짐불량 등 제방누수와 관련된 제방과피요인이 52% 정도를 차지하는 것으로 나타나, 이에 대한 대책으로 저비용 TDR(Time Domain Reflectometry) 하천제방 누수탐사기법과 같은 대책이 요구된다.

본 논문에서는 아크릴로 제작된 소형 캡슐모양의 CAP(CAPSule)형 몰드 및 기존 탐침형 TDR를 사용하는 저비용 TDR 제방누수 모니터링 시스템의 성능을 평가하고자 기존 TDR(탐침형, 튜브형)과 개발 CAP형 TDR에 대한 다양한 비교실험을 수행하였다.

실험결과, 평가된 TDR시스템은 20cm 정도의 누수탐사능력인 임계탐사능이 존재하며, 함수비, 건조단위중량 등에 대한 TDR 탐사 민감도의 경우 건조단위중량에 비해 함수비가 3배 이상 민감한 것으로 평가되었다. 또한, 개발 CAP형 TDR 시스템의 경우 함수비 측정을 위한 화강풍화 토 지반 함수비(w)-유전상수( $\epsilon$ ) 관계식을 제시하였다.

**검색어** : 유전상수, 함수비, 건조단위중량, 상관관계, 시간영역 반사측정기(TDR)

\* 정희원 · 한국건설기술연구원, Geo-인프라연구실 선임연구위원 (jmkim@kict.re.kr)

\*\* 정희원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원, Geo-인프라연구실 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institut of Construction Technology · bhchoi@kict.re.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원, Geo-인프라연구실 전임연구위원 (jwcho@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원, Geo-인프라연구실 박사후연구원 (wbcho@kict.re.kr)

Received November 8 2012, Revised January 10 2013, Accepted May 8 2013

## 1. 서론

하천제방 관련 홍수피해는 다양한 원인에 의해 발생되나, 2002년까지의 하천제방 관련 피해조사 결과에 따르면 하천제방 붕괴는 침투에 의한 제방붕괴 및 파이핑, 부적절한 축제재료선정, 다짐불량 등 제방의 토공 관련된 부분이 52% 정도인 것으로 평가되고 있다 (한국건설기술연구원, 2004).

하천제방누수는 외수위가 상승하여 제체 또는 기초지반을 통해 제내측으로 침투수가 유출하는 현상을 말한다. 이때, 제체누수는 침윤선이 제내지 비탈면에 도달하여 침투수가 유출하는 것으로 심각할 경우 제방붕괴를 야기 시킨다.

하천제방 제체누수의 원인은 제방단면이 너무 작은 경우, 제방이 사질토 또는 조립토를 다량으로 포함한 토사로 만들어지고 제외지 또는 중심부에 물막이벽이 없는 경우, 제체를 충분히 다치지 않은 경우, 두더지 등의 동물에 의해 구멍이 뚫린 경우, 제체 내에 매설되어 있는 구조물과의 접합부에 흐름이 생기는 경우 등이 있다. 한편, 기초지반누수는 파이핑 현상으로도 불리우며, 치수 상 문제가 되기 때문에 유선망, 침투압, 누수량 등을 검토하여 충분한 대책을 강구해야 한다.

한편, TDR(Time Domain Reflectometry) 기법은 전기신호를 발생하는 장치, 전기신호를 전달하는 장치, 반사신호를 측정하여 분석하는 장치 등으로 구성되어 전기신호가 전달매체를 따라 발생시킨 전자기파에 의하여 전달매체 자체의 물리적, 전기적 변화나 전달매체 주변의 변화를 탐지하는 방법이다.

하천제방은 토류구조물로서 흙, 물, 공기로 구성되어 있는데, 일반적으로 공기의 경우 1, 흙의 경우 4~10, 물의 경우 78~80의 유전상수 값을 가지고 있다. 따라서, 제체누수가 발생된다면 하천제방의 토체는 흡입자 사이의 간극에 물이 차지하는 비율이 커짐으로써 유전상수 값의 변화를 발생시킨다. TDR 기법은 복합물질(공기, 물, 흡입자 등)로 구성된 토체의 유전상수 변화에 따른 전자기파의 상호간섭효과를 이용하여 주변물질의 특성(함수비, 유전상수값, 변위 등)을 감지하는 시스템이다.

Worsching 등(2006)은 모형제방을 구축하여 분포형 TDR센서와 표면장력계, 간극수압계 등의 측정값을 통한 하천제방 모니터링 시스템의 효용성 평가하였으며, Scheuermann 등(2009)은 강우시 물 침투에 따른 함수비 변화특성을 평가하고자 모래로 축조된 대형모형제방에서 분포형 TDR센서를 비교·설치하여 계측치와 수치해석결과를 비교하는 방식으로 개발 분포형 TDR센서의 현장 적용성을 검토하였다.

기존의 연구결과 개발된 분포형 TDR센서는 제방의 설치와 매설이 동시에 수행되어야 하며, 지층 변화에 따른 센서의 절단 등의 문제가 발생되어 장기 모니터링에 있어서 효율적인 방법이

필요하다.

본 논문에서는 영구 설치구조물인 CAP(CAPsule)형 몰드 및 기존 탐침형 TDR 센서를 이용하는 저비용 TDR 제방누수모니터링시스템 개발을 하고자 개발된 CAP형 TDR센서와 기존 탐침형 및 튜브형 TDR 센서에 대한 TDR 탐사능 효과, 함수비에 의한 효과, 단위중량에 의한 효과 등 다양한 형태의 비교실험을 수행하였다.

## 2. TDR기법

하천제방은 토류구조물로서 흙, 물, 공기로 구성되어 있는데, 일반적으로 공기의 경우 1, 흙의 경우 4~10, 물의 경우 80의 유전상수 값을 가지고 있다. 따라서, 제체누수가 발생된다면 하천제방의 토체는 흡입자 사이의 간극에 물이 차지하는 비율이 커짐으로써 유전상수 값의 변화를 발생시킨다.

TDR기법은 전기신호를 발생하는 장치, 전기신호를 전달하는 장치, 반사신호를 측정하여 분석하는 장치 등으로 구성되어, 전자기파의 상호간섭효과를 이용하여 공기, 물, 흡입자 등으로 구성된 토체의 함수비 및 변위 등을 감지하는 시스템이다.

앞서 언급되었듯이 TDR 탐침 또는 안내관(waveguide)을 따라서 파형화된 전자기신호의 탐사시간은 탐사파속도 및 탐침길이에 의존한다. 이때 탐사파 신호는 탐침 및 안내관 주변 재료의 유전상수(dielectric constant)에 영향을 받는다. 이 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다(Davis와 Chudobiak, 1975).

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

여기서  $K_a$ 는 겉보기 유전상수(apparent dielectric constant),  $C$ 는 자유공간속에서의 전자기파 속도,  $\Delta t$ 는 탐사시간,  $L$ 은 waveguide length 등이다. 식 (1)은 겉보기 탐침길이(apparent probe length,  $L_a = c\Delta t/2$ ): 실제탐침길이의 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 등(1980) 및 Ledieu 등(1986) 등은 식 (3) 및 식 (4)와 같은 관계식을 제안하였다.

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

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

또한, Topp과 Davis(1985)는 효율적인 TDR 센서의 중심축 간격이 약 5cm인 2축형 탐침봉 센서이며, 이러한 센서에 의한 측정 체적의 경우 탐침봉 사이의 중앙점으로부터 탐침봉 간격의

1.4배인 원기둥 범위라고 제시하였다. Zegelin 등(1989)은 Fig. 1과 같은 TDR 센서에 의해 형성되는 전자기장 필드를 제시하였다.

한편, 독일 Karlsruhe 대학의 Worsching 등(2006)은 제방누수 탐사기법을 위한 TDR기법의 효율성 평가를 위하여 비탈면 경사 1:2.5, 둑마루 폭 1m, 제방높이 1.4m, 제방저판 폭 8m, 둑마루 연장 2.2m 등에 대한 제방모형실험을 수행하였다. Fig. 2에서는 사용 계측기 종류 및 단면도를 보여준다. 이때 하천제방 누수특성은 TDR 센서에 의해 측정된 함수비를 이용하여 구해진 포화영역의 진전 정도를 도식화 하는 방식으로 수행되었다.

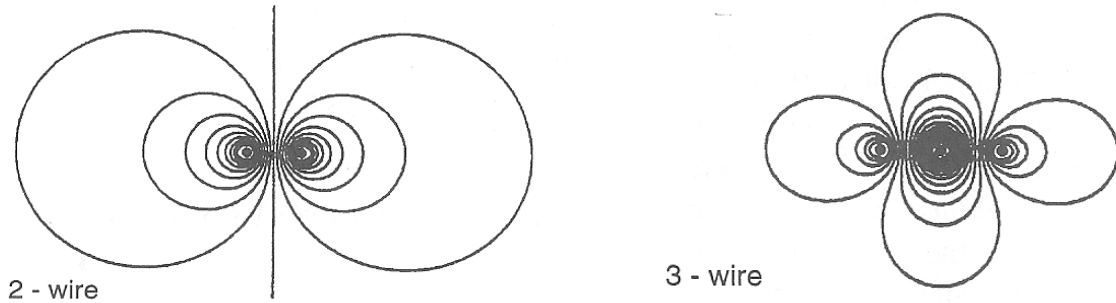


Fig. 1. Contours of dimensionless electric field distribution normal to direction of probe insertion for a material of uniform dielectric constant (from Zegelin 등, 1989)

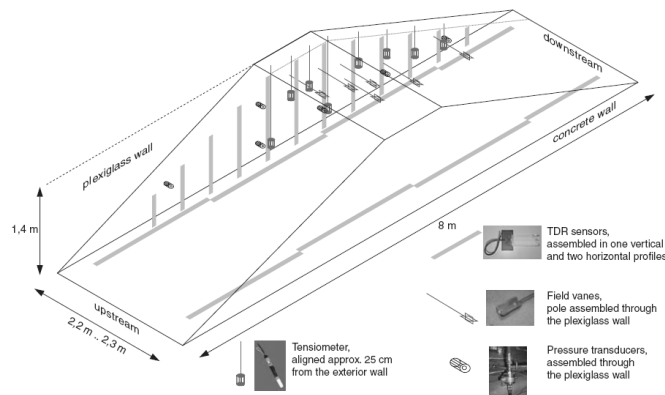


Fig. 2. Conceptual diagram of Full - scale model experiments and the measuring instrument (Karlsruhe university in Germany)

### 3. 실내실험

성토재료로서 화강풍화토를 선정하였으며, 시료의 균질성을 높이는 차원에서 10번체(2mm) 통과분만을 사용하였다.

#### 3.1 실험재료

본 실험에서는 다양한 실험토체 직경, 함수비 및 밀도조건에서 TDR종류별 화강풍화토의 유전상수 변화를 분석하였다. 본 실험에 사용된 화강풍화토의 공학적 특성은 Table 1과 같다. 실험시료는 국내 하천제방특성을 고려하여 대표적인

#### 3.2 사용 TDR 장비

본 실험에 사용된 TDR 장비는 Fig. 3에서 보듯이 탐침형 및 튜브형으로서 독일 IMKO(주) 제품을 사용하였다. TDR 장비는 지반의 유전상수를 계측하여 계측값을 체적함수비로

Table 1. Characteristics of the weathered granite soils

Specific gravity	Plastic Index	Grain-size Property			
		Passing % of No. 200 (%)	Coefficient of urvature (Cg)	Uniformity coefficient (Cu)	U.S.C.S.
2.667	N.P	26.0	0.1	10.8	SM
Compaction Property		Shear Strength Peoperty			
Maximum dry density (t/m <sup>3</sup> )	Optimum water content (%)	Cohesion (kgf/cm <sup>2</sup> )		Internal friction angle (°)	
1.751	15.6	0.132		30.16	

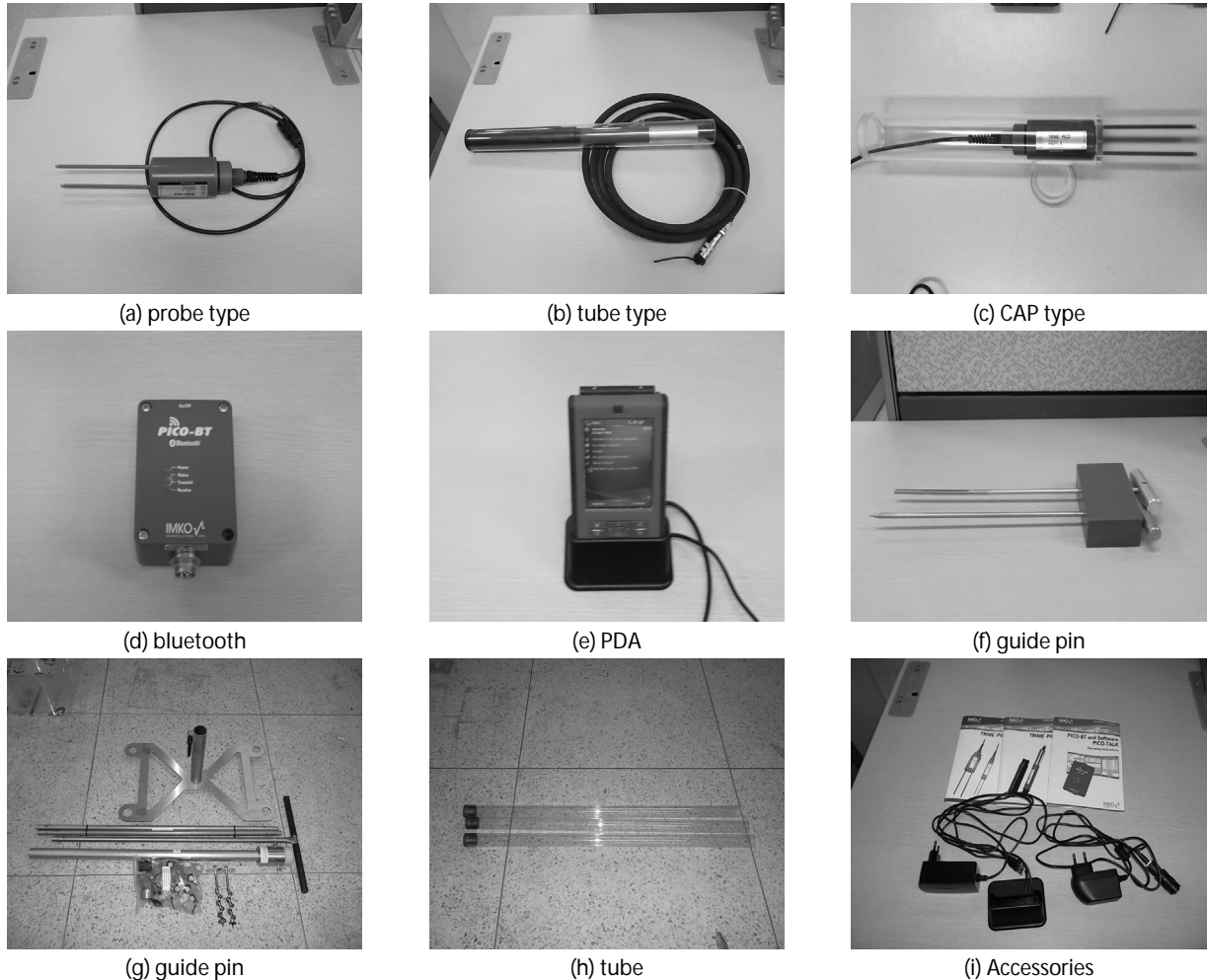


Fig. 3. TDR equipment components

변환할 수 있는 센서, 무선 블루투스 모듈 데이터 수신기, 데이터 입출력을 위한 PDA 등으로 구성된다. 또한, 관련 부속용품은 탐침형의 경우 TDR 탐침을 땅속에 설치하기 위한 가이드핀이, 튜브형의 경우 매설깊이별 유전상수측정을 위한 관측용 연결튜브(1m, 2m) 등이 있다. 본 장비는 크기가

작아 휴대가 간편하며, 무선 블루투스 모듈과 PDA를 이용하여 현장조사에 용이하다. TDR센서의 특징은 Table 2와 같다.

또한 개발된 CAP형 TDR 몰드는 기존 탐침형 TDR센서와 비교하였을 때 최대 75%의 비용이 절감되는 아크릴 CAP으로 Fig 3(c)와 같이 탐침형 TDR센서의 삽입을 위하여 길이 56cm(탐침부 16cm), 직경 8cm이며, 측정데이터의 아크릴 간섭을 최소화 하기 위하여 탐침부의 직경을 1.5mm로 제작되었다(한국건설기술연구원, 2012).

**Table 2.** Specifications and features of the TDR sensor

Probe type (TRIME-PICO64)	Tube type (TRIME-PICO IPH)
◦0~100% vol. water content	◦Measuring range : 3m
◦Soil temperature measurement sensor	◦0~60% vol. water content
◦Conductivity range : 12dS/m of bulk soil	◦Rod length : 180mm
◦Rod length : 160mm	◦Tube length : 1m, 2m, 3m

### 3.3 실험방법 및 범위

TDR 측정 관련된 하천제방의 영향요소는 제방에 따른 현장함수비, 축제재료변화에 따른 흙 종류, 다짐정도에 따른

**Table 3.** Type and content of the TDR test

Evaluation item	Experiment item	Variation of value	
Exploration of TDR	Diameter of column		
	10, 15, 20, 25, 30cm		
	Variation factor	water content	12%, 25%
		type of sensor	Probe, CAP, Tube type
dry density		1.35g/cm <sup>3</sup>	
Variation of water content	Water content		
	3, 6, 9, 12, 15, 18%		
	Variation factor	type of sensor	Probe, CAP, Tube type
		dry density	1.35g/cm <sup>3</sup>
Variation of dry density	Dry density		
	1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45g/cm <sup>3</sup>		
	Variation factor	type of sensor	Probe, CAP, Tube type
		water content	15%



(a) Sample preparation



(b) Guide pin



(c) Guide pin



(d) Experiment view(probe type)



(e) Experiment view(cap type)



(f) Experiment view(tube type)

**Fig. 4.** Experiment scene of experimental mold product and dielectric constants

단위중량변화 등이다. 본 실험은 기존 탐침형 TDR 센서를 이용한 저비용 TDR 제방누수모니터링시스템 개발하고자 CAP(CAPSule)형 TDR모니터링시스템 개발하는 것으로서, 실험범위의 경우 1) 적정 TDR 소형실험토체 크기 선정을 위한 실험토체 내경별 유전상수측정실험, 2) TDR센서 종류에 따른 영향요소(함수비, 단위중량변화, 흙 종류)별 유전상수 비교를 통한 개발 CAP형 TDR센서의 효용성 평가 등이다. Table 2는 본 실험에서 수행한 TDR실험의 종류 및 내용을 보여준다.

한편, 소형실험토체의 다짐은 결정된 건조단위중량 및 함수비로 제조된 시료를 소형아크릴 토체에 압착판 및 고무망치를 이용하여 수행하였다(Fig. 4(a)참조). TDR센서 거치는 튜브형의 경우 아크릴 튜브를 고무망치로 타격하여 관입시키는 방식으로, 탐침형 및 CAP형의 경우 스테인레스 스틸 제작된 송곳모양의 가이드핀으로 타격하여 설치 홀을 완성한 후 센서를 거치하는 방식으로 수행되었다(Fig. 4(a)~(c)참조).

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 TDR센서의 탐사능 효과

본 실험은 TDR 관련 실내실험을 수행할 소형실험토체의 최적 크기를 선정하고자 수행되었다. 이때 실험 관련 변화인자는 함수비(12%, 25%), 단위중량 (1.35t/m<sup>3</sup>), 탐침형, CAP형, 튜브형 등 TDR 종류, 아크릴 직경 (10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm) 등을 채택 하였다.

Fig. 5 및 Table 4는 TDR 종류, 함수비, 소형실험토체 직경 변화에 따른 유전상수값을 보여준다. 소형실험토체 직경 변화에 따른 유전상수값은 TDR 종류, 함수비에 상관없이 10cm~20cm에서 소형실험토체 직경이 증가할수록 유전상수가 증가하는 경향을 보이다가, 20cm 이후의 경우 유전상수값의 변화가 보이지 않는 임계직경을 나타내는 경향을 보인다. 이러한 임계직경은 TDR센서의 최대탐사범위를 나타낸다.

함수비, 센서종류 등 변화인자별로 경향을 살펴보면, 소형 실험토체 직경 변화에 따른 유전상수값 변화특성은 Table 4에서 보듯이 12% 저함수비의 경우 탐침형 6.40~8.59, CAP형 3.71~4.06, 튜브형 5.93~7.58로, 25% 고함수비의 경우 탐침형 21.23~23.07, CAP형 5.43~7.23, 튜브형 20.43~23.01 등으로 나타났다.

한편, 소형실험토체 직경 변화에 따른 저함수비/고함수비 유전상수값( $\epsilon_{\omega_{12\%}} / \epsilon_{\omega_{25\%}}$ ) 변화특성은 탐침형 30.1%~37.3%, CAP형 56.2%~68.3%, 튜브형 29.2%~33.6%로 나타나, 저함수비(12%) 보다 고함수비(25%)의 유전상수값이 29.2%~68.3% 정도 크게 나타내는 경향을 보였다.

결론적으로 본 실험에 사용된 TDR 센서(탐침형, CAP형, 튜브형)는 임계탐사능이 20cm 정도이며, 탐침형 센서의 경우 탐침봉 간격(탐침형 봉간격 4cm)의 5배 이상인 것으로 판명되었다. 이러한 특성은 앞서 언급 되었듯이 TDR 센서의 탐침봉 간격, 형상, 발생 전자기장 크기 등의 영향으로 한정된 범위 만 탐사할 수 있는 탐사능의 한계, 즉 사용 장비특성에 기인하는 것을 확인 할 수 있었다.

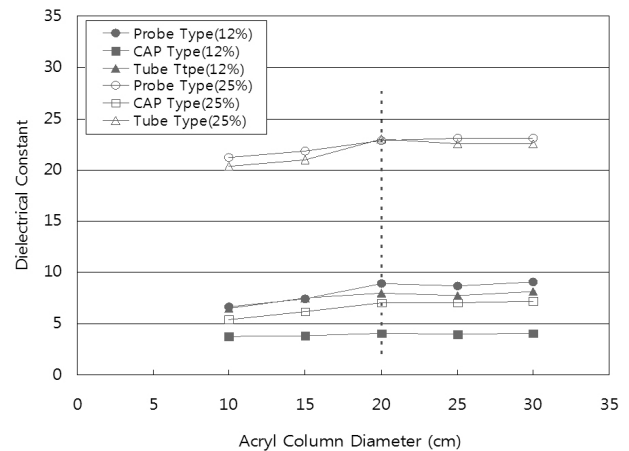


Fig. 5. The variation in dielectrical constant as a function of acryl column diameter

Table 4. The variation in dielectrical constant as a function of acryl column diameter

Diameter of column			Variation of value				
			10	15	20	25	30
Weathered granite soils	Probe type	Water Content 12%	6.40	7.22	8.45	8.47	8.59
		Water Content 25%	21.23	21.81	22.88	23.07	23.06
	CAP type	Water Content 12%	3.71	3.80	4.00	3.99	4.06
		Water Content 25%	5.43	6.22	7.05	7.03	7.23
	Tube type	Water Content 12%	5.93	6.92	7.50	7.53	7.58
		Water Content 25%	20.34	20.96	23.01	22.56	22.58

#### 4.2 함수비 변화에 따른 TDR센서별 효율성 평가

본 실험은 TDR센서 종류 (탐침형, CAP형, 튜브형), 단위중량(1.35t/m<sup>3</sup>) 별로 함수비(3.81~27.79%)를 8단계로 변화시키며 유전상수값을 측정하는 방식으로 수행되었다.

Fig. 6 및 Table 5는 TDR센서 종류별 소형실험토체의 함수비 변화에 따른 유전상수값을 보여준다. 함수비 변화에 따른 유전상수값은 TDR 종류에 상관없이 함수비가 증가할수록 유전상수값이 증가하는 경향을 보였다. 이때 함수비, 센서종류 등 변화인자별로 경향을 살펴보면, 함수비 변화에 따른 유전상수값 변화특성은 Table 5에서 보듯이 탐침형 3.38~21.36, CAP형 3.29~6.88, 튜브형 3.50~21.88 등으로 나타났다. 함수비 변화에 따른 유전상수값( $\epsilon_{\omega_{1.35\%}}/\epsilon_{\omega_{28.72\%}}$ ) 변화특성은 탐침형 632%, CAP형 209%, 튜브형 625% 등으로 증가하는 것으로 나타나며, 탐침형 및 튜브형의 경우 유사한 유전상수값을 제시하고, CAP형의 경우 탐침형 및 튜브형에 비해 민감도가 떨어지는 것으로 평가되었다. 또한, 함수비 3.8%에서 유전상수값( $\epsilon_{\omega_{1.35\%}}/\epsilon_{\omega_{28.72\%}}$ )은 탐침형 3.38, 튜브형 3.50 등으로 둔감한 CAP형 3.29와 거의 유사한 값으로 나타나, TDR센서의 경우 저함수비 측정에 문제가 있는 것으로 평가되었다. 실험결과로부터 추정된 TDR센서 종류별 유전상수값-함수비 관계식은 다음과 같다. 결론적으로 흙의 유전상수특성

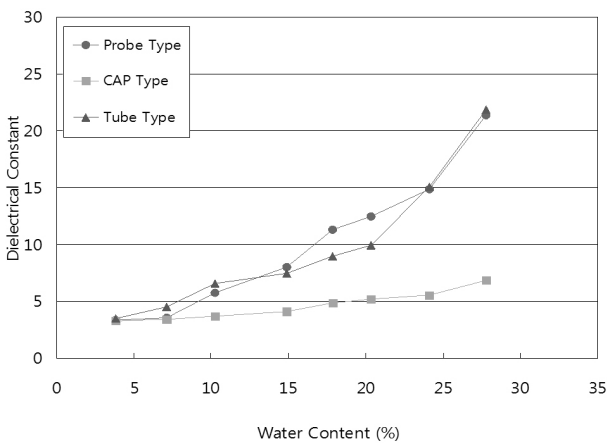


Fig. 6. The variation in dielectric constant as a function of water content

Table 5. The variation in dielectric constant as a function of water content

Measure Water Content(%)		Variation of value							
		3.81	7.11	10.27	14.88	17.87	20.32	24.09	27.79
Weathered granite soils	Probe type	3.38	3.57	5.72	8.00	11.27	12.47	14.84	21.36
	CAP type	3.29	3.43	3.68	4.13	4.88	5.20	5.57	6.88
	Tube type	3.50	4.51	6.56	7.49	9.00	9.91	15.04	21.88

은 TDR센서 종류에 상관없이 함수비가 증가할수록 유전상수값이 209%~632% 증가하는 경향을 보이는 함수비에 민감한 것으로 평가 되었다.

이러한 특성은 앞서 언급 되었듯이 공기 1, 흙 구성광물 4~10 정도, 물 78~81 등 재료특성에 의한 영향으로 판단된다. 또한, 개발된 CAP형 TDR센서는 다른 센서에 비해 아크릴 케이싱의 영향으로 민감도가 다소 떨어지지만 이는 유전상수 변화의 폭이 작을 뿐 유전상수값-함수비 관계식을 이용한 함수비 측정 시 무리가 없는 것으로 평가되었다.

- 탐침형 :  $W_n = -0.0481\epsilon^2 + 2.4399\epsilon - 2.3319$  ( $R^2=0.9856$ )
- CAP형 :  $W_n = -1.2603\epsilon^2 + 19.062\epsilon - 43.804$  ( $R^2=0.9823$ )
- 튜브형 :  $W_n = -0.0877\epsilon^2 + 3.4991\epsilon - 7.1623$  ( $R^2=0.9822$ )

#### 4.3 단위중량에 따른 TDR센서별 효율성 평가

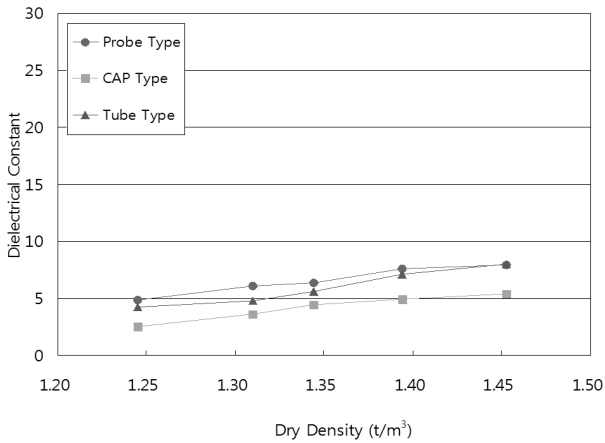
본 실험에서는 함수비를 15%로 고정시킨 후 하천제방 현장에서 발생할 수 있는 건조단위중량 변화에 따른 유전상수값의 영향 정도를 평가하고자 하였다. 따라서 본 실험은 건조단위중량의 증가를 유발시키기 위해 토체 내 흡입자 및 물의 양을 동일한 비율로 증가를 시키고, 단위중량당 공기량을 감소시킨 후 유전상수값을 측정하는 방식으로 수행하였다. Fig. 7 및 Table 6은 흙 종류 및 TDR 종류별 소형실험토체의 건조단위중량(공기량) 변화에 따른 유전상수값을 보여준다. 건조단위중량 변화에 따른 유전상수값은 흙 종류 및 TDR 종류에 상관없이 건조단위 중량이 증가할수록 유전상수값이 증가하는 경향을 보였다.

이때 건조단위중량 변화에 따른 흙 종류별 유전상수값 변화특성은 Table 6에서 보듯이 탐침형 4.85~7.92, CAP형 2.55~5.43, 튜브형 4.22~8.00 등으로 나타났으며, 건조단위중량(공기량) 변화(1.25~1.45t/m<sup>3</sup>)에 따른 유전상수값( $\epsilon_{\text{sand } \gamma_{1.46}}/\epsilon_{\text{sand } \gamma_{1.25}}$ ) 변화 특성은 탐침형 163%, CAP형 213%, 튜브형 190% 등으로 증가하는 것으로 평가되었다.

흙의 유전상수특성은 기존 TDR의 경우 함수비에 따른 유전상수값 625%~632%와 달리 TDR센서 종류에 상관없이 건조단위중량이 증가할수록 유전상수값이 토체내 공기량 감

**Table 6.** The variation in dielectrical constant as a function of dry density

Dry Density (t/m <sup>3</sup> )		Variation of value				
		1.25	1.31	1.34	1.39	1.45
Weathered granite soils	Probe type	4.85	6.08	6.4	7.57	7.92
	CAP type	2.55	3.60	4.42	4.91	5.43
	Tube type	4.22	4.78	5.59	7.14	8.00



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

소에 의하여 163%~213% 정도 증가하는 것으로 평가되었다.

이러한 특성은 다짐에 의해서 전체 토체 부피에서 유전상수값이 물에 비해 작은 공기( $\epsilon_{air} = 1$ )량이 작아짐으로서 발생된 토체 전체 유전상수값의 증가특성에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 개발된 CAP형 TDR센서는 다른 센서에 비해 다짐도(공기량)에 영향이 크지 않아 함수비 측정에 무리가 없는 것으로 평가되었다.

### 5. 결론

누수로 인한 하천제방피해는 침투에 의한 제방붕괴 및 파이핑, 부적절한 축제재료선정, 다짐불량 등과 연관되어 증가 추세에 있다. 또한, 해외 각국은 전기비저항, TDR, OTDR 등 다양한 모니터링기법을 이용하여 제체누수관리시스템을 구축운용하고 있으나, 국내의 경우 관련 연구가 미미한 실정에 있다.

본 연구에서는 기존 탐침형 TDR 센서를 이용한 저비용 TDR 제방누수모니터링시스템 개발하고자 CAP(CAPsule)형태 TDR 모니터링시스템 제안하였다. 또한, 이를 위해 본 연구는 1) TDR 센서의 탐사능 효과, 2) 함수비 변화에 따른

TDR센서별 효율성 평가, 3) 단위중량에 따른 TDR 센서별 효율성 평가 등을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 10cm, 15cm, 20cm, 25cm 30cm 등으로 아크릴 직경을 변화시켜가며 수행된 TDR 센서의 탐사능 평가 결과, 탐침형, CAP형, 튜브형 등은 TDR 센서의 임계탐사능이 탐침봉 간격의 5배인 20cm 이상인 것으로 평가되었다.
- (2) 함수비변화에 따른 유전상수 평가 결과, 흙의 유전상수는 TDR 센서 종류에 상관없이 함수비가 증가할수록 유전상수값이 209%~632% 증가하는 경향을 보여 함수비에 민감한 것으로 평가되었다.
- (3) TDR 센서는 함수비 3.8% 에서 유전상수값( $\epsilon_{\omega_{1.35\%}} / \epsilon_{\omega_{28.72\%}}$ )이 탐침형 3.38, 튜브형 3.50으로서 둔감한 CAP형 3.29와 유사한 값으로 나타나, 저함수비 측정에 다소 부정확한 것으로 평가되었다.
- (4) 건조단위중량(공기량) 변화(1.25~1.45t/m<sup>3</sup>)에 따른 유전상수값의 변화특성은 탐침형 163%, CAP형 213%, 튜브형 190% 등으로 나타나, 건조단위중량이 증가할수록 유전상수값이 공기량 감소에 의하여 163%~213% 증가하는 것으로 평가되었다.
- (5) 개발된 CAP형 TDR센서는 하천제방누수 판정을 위한 함수비-유전상수 관계식의 경우  $W_n = -1.2603\epsilon^2 + 19.062\epsilon - 43.804$ 를 제안하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(유비쿼터스기법을 활용한 하천시설물 재해종합관리시스템 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

Kim, K. H. (2004). *Levee development of advanced technologies relevant*, Final Report, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement.



- Kim, J. M. (2011). *Development of integrated system of damage management for river facility using ubiquitous technology( II)*, Strategic Research Project Annual-Report, KICT 2011-115, Korea Institute of Construction Technology, pp. 97-123.
- Davis, J. L. and Chudobiak, W. J. (1975). "In-situ Meter for Measuring Relative Permittivity of Soils." *Geol. Surv. Can.*, Ottawa, Pap 75-1A, pp. 75-79.
- Ledieu, J., De Ridder, P. and Dautrebande, A. (1986). "A method for measuring soil moisture by time domain reflectometry." *Hydrology*, Vol. 88, pp. 319-328.
- Scheuermann, A., Huebner, C., Schlaeger, S. and Wagner, N. (2009). "Spatial time domain reflectometry and its application for the measurement of water content distributions along flat ribbon cables in a full-scale levee model." *Water Resour. Res.*, Vol. 45, pp. 1-15.
- Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines." *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 3, pp. 574-582.
- 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.
- Worsching, H., Becker, R., Schlaeger, S., Bieberstein, A. and Kudella, P. (2006). "Spatial-TDR moisture measurement in a large scale levee model made of loamy soil material." *Proc. TDR 2006*, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 33, pp. 1-15.
- Zegelin, S. J., White, I. and Jenkins, D. R. (1989). "Improved field probes for soil water contents and electrical conductivity measurement using time-domain reflectometry." *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 11, pp. 2367-2376.