정전용량 방식을 이용한 지하수위 장기 계측 장치의 개발과 분석

Development and Analysis of Long-Term Measurement Systems for Groundwater Level Using Electric Capacity

김석주* · 김도균**

Kim, Seok-Ju*, and Kim, Do-Kyun**

Abstract

In soil dams and embankments made of soil, deterioration and stress release owing to internal and external influences occur, and the instability of the body increases as the shear strength decreases. In particular, understanding the location and flow of underground water is very important for securing the long-term stability of waterfront structures in contact with water. However, the physical limitations of measuring equipment cause many difficulties in understanding the existence and location of groundwater over a long period of time. In this study, measuring equipment using electric capacity was developed for the long-term measurement of groundwater, and contactless measuring sensors were manufactured to eliminate the possibility of corrosion by water. In addition, the precision of the measurement data was improved by applying waterproof and water-repellent coatings to the measurement sensor. Laboratory tests conducted using the developed equipment demonstrate the high precision of the measurement data according to the groundwater level change and enhanced durability of the sensor, which facilitate long-term measurements in the field.

Key words : Electric Capacity, Contactless, Groundwater Level, Water-Repellency, Long-term Measurement

요 지

토사로 이루어진 흙댐과 제방은 내외부의 영향으로 인한 시간열화와 응력해방이 발생하고 전단강도가 감소하여 제체의 불안정성이 증가한다. 특히, 물과 접하는 수변구조물의 장기안정을 확보하기 위해서는 지중의 지하수의 위치와 흐름을 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 계측 장비의 물리적인 한계로 인하여 지하수의 존재와 그 위치를 장기간에 걸쳐 파악하는데 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 지하수위의 장기적인 계측을 위해 정전용량 방식을 이용한 계측 장비를 개발하였고, 물에 의한 부식 가능성을 제거한 비접촉식 계측 센서를 제작하였다. 또한, 계측센서에 방수 및 발수 코팅처리를 하여 계측 데이터의 정밀도를 높였다. 개발장비를 이용하여 실내시험을 수행한 결과 지하수위 변화에 따른 계측 데이터의 정밀도가 높고 센서의 내구성이 강화되어 현장에서의 장기계측이 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 정전용량, 비접촉, 지하수위, 발수코팅, 장기계측

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

토목구조물은 공용기간동안 장기적인 기능을 유지해야

하며, 각종 계측 센서를 이용한 장기 계측을 통하여 구조물의 장기적인 안정평가가 가능하다. 이러한 요구에 부합하여 구조물의 장기거동 계측을 위한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 교량분야에서는 사장교 교량의 상시진동신호의 고유

*정회원, 경북도립대학교 토목공학과 겸임교수(E-mail: smbstory@naver.com)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College

**교신저자, 정회원, 경북도립대학교 토목공학과 초빙교수(Tel: +82-54-650-0294, Fax: +82-54-650-0299, E-mail: civildokun@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College

진동수에 관한 장기적인 동적거동 특성에 관하여(Park et al., 2006), 철도분야에서는 Light-Weight Deflectometer (LWD)를 이용한 고속철도 자갈레도의 선형에 관한 장기거동 특성이 연구되었다(Choi et al., 2021). 관로분야에서는 광섬유센서를 이용한 쓰레기 이송관로의 장기계측시스템 구축을 위한 연구가 수행되었고(Kim and Song, 2016), 지반보강분야에서는, 앵커의 장기거동 특성과 인장력 손실을 평가하기 위한 연구(Lee and Lee, 2015) 등이 수행되었다.

토목구조물은 발생한 잔류변형의 흔적이 명확히 드러나는 경우도 있지만, 흙으로 이루어진 흙댐과 제방에서는 변형이 발생되어도 흙재료의 특성으로 인하여 변형의 흔적이 육안으로 쉽게 발견되지 않는 어려움이 있다. 이것은 흙이 비연속체이면서 탄성과 소성의 성질을 동시에 나타내기 때문이다. 특히, 흙으로 이루어진 흙댐과 제방은 투수발생 유무와 정도에 따라 제체의 안정에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 그러므로, 제체의 변형 발생과 지하수위 변화에 대한 장기간에 걸친 계측의 필요성이 존재한다.

지하수위 측정을 위해 현재 적용되는 방식은 전기접촉방식과 간극수압측정방식으로 구분할 수 있다. 그러나, 이 두 가지 방식은 측정센서의 부식 및 망실에 대한 한계점이 존재한다. 계측 시작 후 일정시간이 지나면 작동불능의 상태가 발생되어 계측이 불가능하게 되므로 현장에서는 장기계측의 필요성이 지속적으로 요구되고 있다.

본 연구에서는 기존의 한계점을 극복하고 장기적인 지하수위 계측이 가능한 비접촉식 계측시스템을 개발하였고, 성능평가를 위한 실내시험을 수행하여 그 정확도와 장기계측의 가능성을 확인하고자 하였다.

1.2 지하수위 계측시스템의 고찰

제체의 누수 가능성 및 취약부를 평가하는 일반적인 방법은 육안에 의한 현장조사방법과 계측장비를 사용한 간접조사방법이 있다. 지하수위 측정을 위해서는 계측장비를 이용한 간접조사방법이 주로 사용되고 있으며, 센서부가 물에 닿으면 전기전도가 되면서 측정기의 헤드에 소리가 울리는 방식의 지점형 센서들이 주로 사용되고 있다. 지점형 센서방식은 수위측정 홀(Hole) 전체 깊이에 대한 연속된 데이터 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 분포형 센서시스템을 이용한 연구들이 수행되었다.

분포형 센서의 종류에는 빛의 산란과 파장의 위상변화를 분석하는 분포형 광섬유센서가 있으며, 관련된 연구로는 온도변화에 따른 토양수분 측정과 침수발생 측정을 위한 연구(Sayde et al., 2010; Su et al., 2015; Gurbuz et al., 2017)가 있다. 분포형 광섬유센서에는 원하는 측정구간을 지정하여 계측 가능한 Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) 방식과, 광섬유 센서의 전구간을 측정하는 Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) 방식으로 구분할 수 있다.

또한, 전기펄스 발사후 반사된 전기펄스와 왕복시간을 측정하는 Time Domain Reflectometry (TDR) 센서가 있다. 초기에는 동축케이블의 불연속 지점 즉, 케이블의 결함이 발생된 위치를 찾아내는데 사용되었고(Moffitt, 1964), 토양의 수분함량을 측정하기위해 사용되었다(Topp et al., 1980). 지반분야에 관한 최근의 연구로는 TDR센서를 이용하여 제방의 포화도 및 지하수위의 해석을 위한 연구(Kim et al., 2011)와 TDR센서를 이용한 대형 모형제방의 침투해석을 위한 연구(Park et al., 2012)가 있다.

분포형 광섬유센서와 분포형 TDR 센서는 모두 센서의 전체길이에 대하여 설정된 일정 간격으로 데이터를 측정 및 획득하여 분석하는 방식이다. 그러므로, 분포형 센서 시스템은 멀티포인트로 부터의 측정 데이터의 수가 많다는 장점과 동시에 많은 수의 데이터를 후처리 및 가공하여야하고, 데이터의 후처리 시간이 길어질수록 실시간 구조물 모니터링에 적용하기 곤란한 단점이 있다. 또한, 절대변위가 아닌 상대변위로 해석해야하는 단점이 있으며, 분포형 광섬유센서 시스템의 경우 고가의 장비가 구비되어야하는 단점이 있다. 이러한 점들은 향후 장기계측 시스템 적용시 극복해야할 부분이다. 반면, 본 연구에서 개발된 장치는 정전용량 원리를 이용하여 측정된 지하수위를 하나의 값으로 나타내는 방식이며, 데이터의 후처리 과정이 추가로 필요하지 않고, 실시간으로 데이터를 획득하여 분석할 수 있는 장점이 있다.

2. 시험 장치의 개발

2.1 정전용량 이론

본 연구는 정전용량(Electric Capacity) 이론을 활용하여 계측장비를 제작하였다. 정전용량은 축전기에 걸여준 전위(전압)당 충전되는 전하량으로서 1 Volt의 전압을 걸었을 때 축전기 역할을 하는 회로에 모이는 전하량이다. 이상적인 평행판 축전기의 경우, 정전용량(정전기 용량)은 전극의 면적과 유전체의 유전상수에 비례하고 전극 사이의 거리에 반비례한다. 정전용량은 커패시턴스(Capacitance)라고도 하며, 축전기 역할을 하는 회로에서 도체의 모양이나 도체판 사이를 절연하고 있는 유전체에 의해 정해진다. 도체계에서는 용량계수(Capacity Coefficient)가 사용되며, SI 단위는 패럿(F)이다.

이상적인 평행판 축전기의 경우, 축전기의 정전용량 C 의 크기는 전극의 면적 A 에 비례하고, 전극사이의 거리에 반비례한다. 전극 사이의 유전체의 유전율을 ϵ 이라고 하면, 정전용량 C 는 Eq. (1)과 같다.

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

그러므로, 전극의 표면적이 클수록, 간격이 좁을수록, 유

전체의 유전율이 클수록 정전용량이 커진다.

Fig. 1은 Eq. (1)을 그림으로 나타낸 것이며 2매의 극판사이의 정전용량이 결정될 수 있다. 여기서, V : 전압, Q : 전하, A : 극판의 면적, d : 극판간의 간격이다.

유전율은 전기장이나 다른 매질에 의해서 매질이 얼마나 영향을 받는지 또는 매질이 저장할 수 있는 전하량을 의미한다. 기호로는 ϵ 을 사용하고, Eq. (2)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_s \quad (2)$$

여기서, ϵ : 유전율, ϵ_0 : 진공중의 유전율, ϵ_s : 비유전율이다. 비유전율은 진공중 유전율에 대해서 매질의 유전율이 가지는 상대적인 비를 나타낸다.

유전체의 비유전율(ϵ_s)은 유전상수(Dielectric Constant)로도 표시되며 Chan and Knight (1999)에 의해 Table 1과 같이 연구되었다. 그중 물의 유전상수는 80.36으로 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 여기서, 물의 유전율이 다른 매질과 비교해 높은 값을 나타내는 이유는 물분자 구조가 쌍극자 모멘트의 영향을 받기 때문이다(Santamarina et al., 2001).

본 연구에서 개발된 계측장치의 기본원리는 다음과 같다. 장치에 DC전원을 공급하면 회로장치에서 AC주파수파형을 발진한다. 그 후, 2선 케이블 주위의 매질의 유전율에 따른 케이블 사이의 정전용량 변화에 따라 AC주파수의 파형이 변화되고, 이것을 수신하여 최종적으로 DC (mV)로 표시하여 수위를 나타낸다. 유전율 변화에 의해 지하수위를 측정하

Fig. 1. Electric Capacity Concept

Table 1. Dielectric Constant of Materials (Chan and Knight, 1999)

Materials	Dielectric constant
Air	1.00
Water	80.36
Sand	4.5
Clay	11.8
Silty Clay	7.6
Silty Loam	5.3

는 분포형 TDR 방식과 유사한 방식이다. 그러나, 측정센서 전체구간에서 시간에 따라 반사되는 신호의 다측점 데이터를 획득한 후 이벤트의 발생지점 및 크기를 결정하기위해 데이터를 추가적으로 가공처리 하여야하는 TDR과는 달리 개발된 장치에서는 한 개의 값을 획득하여 지하수위를 표시하는 차이점이 있다.

현재까지 소개된 유전율을 이용한 측정방법에는 TDR과, 고주파 전기펄스 발사 후 토양에서 반사된 반사파를 프로브에서 흡수하는 것으로, 측정매질의 인피던스의 영향으로 변화된 전압의 진폭감쇄를 측정하는 Amplitude Domain Reflectometry (ADR; Gaskin and Miller, 1996; Miller and Gaskin, 1996; Kim et al., 2008)이 있다. 이때, 매질의 수분량이 증가할수록 진폭은 작아진다. 또한, 전자파를 측정매질로 방출 후 전자파의 전달 속도 및 진동수변화를 측정하는 Frequency Domain Reflectometry (FDR; Beiping et al., 1996a; Beiping et al., 1996b; Kim, Chae et al., 2009)이 있으며, 발생한 전자기파의 매질에서의 반사특성을 벡터 네트워크 어네일러(VNA)에서 검출하여 실수부와 허수부의 복소유전율 상수를 측정하는 Frequency Domain Refectometry with Vector Network Analyzer (FDR-V; Kim and Makoto, 2003; Kim, Jeong et al., 2009; Park et al., 2014) 등의 방법들이 연구되고 있다. 이들 모두 매질의 유전율 차이에 따른 전기장(Electric Field)의 변화에 반응하는 정도의 차이를 이용하여 측정하는 방식이다.

2.2 장치개발

개발장치의 주요기능과 측정 개념은 Fig. 2와 같다. 지하수의 위치를 측정하기 위하여 2개의 구리선으로 이루어진 센서부와 센서부에 접촉된 물에 의한 유전율 변화에 따른 정전용량의 변화를 측정하는 데이터 측정부로 구성된다. 본 개발장치는 장기 계측을 위하여 물과 전선부의 금속이 직접 접촉하지 않도록 하였고, 센서부의 망실 없이 장기 계측이 가능하도록 하였다. 측정센서의 말단부에는 케이블의 피복

Fig. 2. Ground Water Measurement System

(a) Cable Sensor

(b) Analysis Circuit

(c) Data Measurement

(d) Total Measurement System

Fig. 3. Picture of Measurement System

재질이 구리선을 밀봉하도록 구조적으로 처리되었다.

개발된 측정시스템의 주요부는 기능에 따라 3부분으로 구성된다(Fig. 3). 계측센서는 실제 현장에 적용되는 제방의 규모를 고려하여 길이 30 m까지 측정 가능하도록 개발되었다. 분석회로는 공급 전원의 편리성 확보를 위하여 소형 건전지를 사용하였고, 계측된 데이터의 확인을 위하여 소형 멀티미터를 사용하였다. 개발장치의 전체적인 특징으로는 크기와 부피가 작은 형태로 개발되어 향후 현장 적용성을 높이도록 하였다.

3. 시험 방법 및 결과 분석

3.1 시험 방법

비접촉식 센서개발을 위하여 본 연구에서는 최대 30 m까지 측정 가능한 센서를 개발하였다. 센서부의 재료는 국내에서 제작된 동양전자케이블(사)의 D-SPC-109 모델의 제품을 사용하였다. 사용된 재료는 오디오시스템의 앰프(Amplifier)와 스피커(Speaker)를 연결하는 용도로 제작되었으나, 수위 측정을 위한 본 계측시스템 개발에 최적의 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단되어 차용되었다. 전선부 단면은 1심인 0.12 mm 직경인 20개의 주석도금된 금속 코아로 이루어져 있으며, 총 2심으로 구성되었고 외피는 크리스탈 PVC로

피복되었다.

또한, 측정 정확도를 높이기 위하여 전선의 표면에 발수코팅 처리를 수행하였다. 발수코팅은 우리생활의 다양한 분야에 적용되고 있으며, 성능향상을 위한 연구도 활발하다. 대표적인 연구로는 유리표면에 적용된 발수코팅제의 내구성 향상을 위한 연구(Kim et al., 2001)와 스프레이 용액으로 코팅된 직물의 발수성 향상에 관한 연구(Lee et al., 2010)가 있다. 건설분야에서는 콘크리트 표면에 함침된 발수제가 콘크리트 강도유지에 효과적인 성능을 나타낸다(Hwang et al., 2000)는 연구결과가 보고되었다.

센서부의 발수코팅 처리는 비접촉식 센서 시스템의 매우 중요한 부분이다. 본 연구에서는 발수코팅을 위하여 국내 1개사의 제품과 해외 2개사의 제품을 선택하고 시험결과를 비교하였으나, 해외 2개사의 제품 적용시 보다 양호한 결과를 나타내었다. 본 연구의 결과로 제시된 발수코팅 제품은 일본의 CCI(사)에서 개발한 SMART VIEW ONE 제품(Fig. 4)과 터키의 NASIOL(사)에서 개발한 ZR53 제품이다(Fig. 5). 이들 2가지 제품은 자동차의 도장면 보호를 위한 발수기능을 극대화 하기 위하여 개발되었으며, 본 연구에서는 물과 접촉되는 센서부의 발수능을 향상시키고 침수부와 비 침수부의 명확한 구분을 확인하기 위하여 적용되었다.

지하수위는 수압의 크기에 따라 상승 및 하강을 반복하

Fig. 4. SMART VIEW ONE Product in Japan

Fig. 5. ZR53 Product in Turkey

로, 센서부는 침수 및 비침수 조건을 명확히 구분할 수 있어야 한다. 그러므로, 발수코팅 제품을 사용함으로써 센서부 수위 경계면의 명확한 구분이 가능하도록 하였다. 개발장치에 사용된 전원은 일본의 TOSHIBA(사)에서 개발된 6F22KGG SP-1U 제품을 사용하였다. 사용된 전원의 크기는 소형이며 전기용량은 DC 9 V이다.

본 연구에서는 소형의 휴대용 건전지를 사용할 경우에도 데이터 측정시 충분한 전원공급이 될 수 있도록 하기 위하여, 저전력 회로시스템으로 설계 및 개발되었다. 분석된 데이터의 측정을 위하여 멀티미터를 사용하였고, 미국의 FLUKE(사)에서 개발된 FLUKE-101 제품을 사용하여 밀리볼트(mV)값을 측정하였다. 즉, 측정된 mV값의 크기에 따라 센서부의 침수된 길이를 확인하였다.

실내시험은 경북도립대학교 내의 실내 대형 수조장치를

Fig. 6. Large Water Tank Test

사용하여 수행되었다(Fig. 6).

수조의 크기는 가로 2.8 m, 세로 1.6 m, 높이 1.1 m이다. 데이터 획득을 위하여 50 cm 간격마다 센서를 침수시키면서 측정하였고, 0 m~30 m 까지 총 61개 지점에서 데이터가 측정되었다. 센서케이블의 침수시 수조 내에서의 중첩으로 인한 전기장의 교란이 발생되지 않도록 센서케이블의 간격을 확보하여 시험을 수행하였다. 멀티미터에 표시된 초기 측정값은 mV 값이며, mV 값으로 부터 침수거리 미터(m)로 변환하였다. 측정값 변환시 1 mV는 1 m에 대응하였다.

3.2 결과 및 분석

첫 번째 시험은 센서부에 코팅처리 없이 수행되었다. 센서부는 50 cm 간격으로 침수되었고, 최대 30 m까지 총 61회 데이터가 측정되었다. Table 2는 시험에서 측정된 데이터이고 측정된 mV 값으로 부터 센서부의 침수거리를 m단위로 환산하였다.

실내시험에 수행된 센서의 실제 길이 30 m와 계측 데이터로부터 획득된 침수거리를 Fig. 7에 표시한 결과, 침수된 센서의 길이가 길어질수록 측정값의 크기도 점차 증가하여 선형적인 분포를 나타내었다.

그러나, 초기 0 m 근처에서는 측정된 거리가 실제 침수된 거리와 유사하게 나타났으나, 침수거리가 길어질수록 센서의 실제길이에 비하여 측정된 값이 전반적으로 높게 나타났다.

Fig 8에서 실제 길이와 계측데이터의 오차를 비교한 결과, 0 m에서 30 m로 침수 길이가 길어질수록 계측데이터의 값이 전반적으로 크게 나타났고, 발생된 오차도 점차 증가되었다. 오차값의 범위는 -0.2 m에서 2.33 m까지로 확인되었다.

그러나, 측정값이 다소 선형적으로 증가하고 일정한 경향성을 나타내어 계측 데이터의 일정한 보정을 통하여 보다 정확한 측정값을 결정할 수 있을 것으로 판단되었다.

한편, 센서부의 발수코팅 처리는 물과의 접촉경계면을 보다 명확히 할 수 있는 방법이다. 그러므로, 발수코팅에 의한 계측데이터의 특성을 확인하기 위하여 센서길이 30 m 전체에 일본 CCI(사)의 발수코팅 제품을 도포한 후

Table 2. Raw Data of 30 m Sensors (None Coated)

Actual Distance (m)	None Coated Test Distance (mV, m)	None Coated Test Data Error (m)	Actual Distance (m)	None Coated Test Distance (mV, m)	None Coated Test Data Error (m)
0.0	0.030	0.03	15.5	16.680	1.18
0.5	0.298	-0.20	16.0	17.200	1.20
1.0	0.887	-0.11	16.5	17.750	1.25
1.5	1.392	-0.11	17.0	18.300	1.30
2.0	1.980	-0.02	17.5	18.900	1.40
2.5	2.480	-0.02	18.0	19.390	1.39
3.0	3.047	0.05	18.5	19.970	1.47
3.5	3.600	0.10	19.0	20.490	1.49
4.0	4.140	0.14	19.5	21.070	1.57
4.5	4.660	0.16	20.0	21.590	1.59
5.0	5.200	0.20	20.5	22.160	1.66
5.5	5.660	0.16	21.0	22.670	1.67
6.0	6.230	0.23	21.5	23.210	1.71
6.5	6.730	0.23	22.0	23.760	1.76
7.0	7.300	0.30	22.5	24.300	1.80
7.5	7.860	0.36	23.0	24.820	1.82
8.0	8.540	0.54	23.5	25.390	1.89
8.5	9.050	0.55	24.0	25.920	1.92
9.0	9.670	0.67	24.5	26.470	1.97
9.5	10.210	0.71	25.0	26.990	1.99
10.0	10.730	0.73	25.5	27.550	2.05
10.5	11.300	0.80	26.0	28.020	2.02
11.0	11.900	0.90	26.5	28.640	2.14
11.5	12.390	0.89	27.0	29.140	2.14
12.0	12.930	0.93	27.5	29.680	2.18
12.5	13.450	0.95	28.0	30.180	2.18
13.0	14.000	1.00	28.5	30.760	2.26
13.5	14.560	1.06	29.0	31.280	2.28
14.0	15.050	1.05	29.5	31.830	2.33
14.5	15.650	1.15	30.0	32.180	2.18
15.0	16.140	1.14

Fig. 7. None Coated Cable Test Data

Fig. 8. Data Error of None Coated Cable Test

Table 3. Raw Data of 30 m Sensors (Coated Using Japan Product)

Actual Distance (m)	Coated Test Distance (mV, m)	Coated Test Data Error (m)	Actual Distance (m)	Coated Test Distance (mV, m)	Coated Test Data Error (m)
0.0	0.003	0.003	15.5	15.420	-0.080
0.5	0.408	-0.092	16.0	15.930	-0.070
1.0	0.900	-0.100	16.5	16.420	-0.080
1.5	1.410	-0.090	17.0	16.910	-0.090
2.0	1.910	-0.090	17.5	17.400	-0.100
2.5	2.400	-0.100	18.0	17.880	-0.120
3.0	2.940	-0.060	18.5	18.400	-0.100
3.5	3.470	-0.030	19.0	18.930	-0.070
4.0	4.030	0.030	19.5	19.450	-0.050
4.5	4.500	0.000	20.0	19.940	-0.060
5.0	5.020	0.020	20.5	20.430	-0.070
5.5	5.500	0.000	21.0	20.910	-0.090
6.0	6.000	0.000	21.5	21.430	-0.070
6.5	6.410	-0.090	22.0	21.940	-0.060
7.0	6.930	-0.070	22.5	22.420	-0.080
7.5	7.400	-0.100	23.0	22.920	-0.080
8.0	7.920	-0.080	23.5	23.440	-0.060
8.5	8.450	-0.050	24.0	23.930	-0.070
9.0	9.000	0.000	24.5	24.420	-0.080
9.5	9.480	-0.020	25.0	24.910	-0.090
10.0	9.980	-0.020	25.5	25.420	-0.080
10.5	10.480	-0.020	26.0	25.900	-0.100
11.0	10.990	-0.010	26.5	26.400	-0.100
11.5	11.470	-0.030	27.0	26.920	-0.080
12.0	12.000	0.000	27.5	27.400	-0.100
12.5	12.460	-0.040	28.0	27.900	-0.100
13.0	12.920	-0.080	28.5	28.370	-0.130
13.5	13.460	-0.040	29.0	28.860	-0.140
14.0	13.930	-0.070	29.5	29.380	-0.120
14.5	14.420	-0.080	30.0	29.900	-0.100
15.0	14.910	-0.090			

시험을 수행하였다. 측정간격은 이전 시험과 동일하게 50 cm 간격으로 최대 30 m까지 측정되었고 그 결과는 Table 3과 같다.

측정된 데이터는 0 m부터 30 m까지 전반적으로 실제길이에 유사한 값을 나타내었다(Fig. 9).

비코팅된 시험의 결과와 비교하면 측정값의 정확도가 상당히 향상된 것을 알 수 있다.

Fig. 10에서 실제 길이와 계측 데이터의 오차범위는 -0.140 m에서 0.030 m로 확인되었고, 발생한 오차의 평균값은 -0.066 m로 확인되었다. 시험결과로부터 센서부에 코팅을 적용할 경우 비코팅시 보다 정확한 측정값을 얻을 수 있다는

것을 알 수 있다.

또한, 발수코팅의 효과를 추가적으로 확인하기 위하여 터키 NASIOL(사)의 발수코팅 제품으로 도포하고 추가적인 시험을 수행하였다. 시험 방법은 이전과 동일하게 하였고, Table 4의 측정데이터를 획득하였다.

Fig. 11에서 센서의 실제 길이 30 m와 계측 데이터를 비교한 결과, 일본 제품으로 코팅된 센서의 시험결과와 마찬가지로 실제길이와 측정값이 매우 유사한 형태로 나타났다.

Fig. 12에서 오차비교를 통한 정확도를 확인한 결과, 오차값의 범위는 -0.137 m에서 0.110 m의 범위 내에서 확인되었고, 오차값의 평균은 -0.023 m로 나타났다.

Fig. 9. Coated Cable Test Data Using Japan Product

Fig. 10. Data Error of Coated Cable Test Using Japan Product

Table 4. Raw Data of 30 m Sensors (Coated Using Turkey Product)

Actual Distance (m)	Coated Test Distance (mV, m)	Coated Test Data Error (m)	Actual Distance (m)	Coated Test Distance (mV, m)	Coated Test Data Error (m)
0.0	0.003	0.003	15.5	15.400	-0.100
0.5	0.400	-0.100	16.0	15.950	-0.050
1.0	0.867	-0.133	16.5	16.380	-0.120
1.5	1.417	-0.083	17.0	16.890	-0.110
2.0	1.863	-0.137	17.5	17.390	-0.110
2.5	2.445	-0.055	18.0	17.930	-0.070
3.0	2.950	-0.050	18.5	18.370	-0.130
3.5	3.420	-0.080	19.0	19.000	0.000
4.0	3.960	-0.040	19.5	19.500	0.000
4.5	4.460	-0.040	20.0	20.000	0.000
5.0	5.020	0.020	20.5	20.500	0.000
5.5	5.500	0.000	21.0	21.030	0.030
6.0	6.010	0.010	21.5	21.520	0.020
6.5	6.480	-0.020	22.0	22.040	0.040
7.0	7.040	0.040	22.5	22.460	-0.040
7.5	7.500	0.000	23.0	23.000	0.000
8.0	8.030	0.030	23.5	23.480	-0.020
8.5	8.500	0.000	24.0	24.010	0.010
9.0	9.020	0.020	24.5	24.480	-0.020
9.5	9.570	0.070	25.0	24.980	-0.020
10.0	10.090	0.090	25.5	25.440	-0.060
10.5	10.560	0.060	26.0	25.960	-0.040
11.0	11.100	0.100	26.5	26.430	-0.070
11.5	11.600	0.100	27.0	26.890	-0.110
12.0	12.110	0.110	27.5	27.380	-0.120
12.5	12.590	0.090	28.0	27.870	-0.130
13.0	13.080	0.080	28.5	28.410	-0.090
13.5	13.500	0.000	29.0	28.870	-0.130
14.0	14.060	0.060	29.5	29.400	-0.100
14.5	14.500	0.000	30.0	29.920	-0.080
15.0	15.050	0.050

Fig. 11. Coated Cable Test Data Using Turkey Product

Fig. 12. Data Error of Coated Cable Test Using Turkey Product

Table 5. Data Accuracy of Water Repellency Cables

Coating Products	Error Maximum (m)	Error Minimum (m)	Absolute Error (m)	Mean Absolute Error (m)	RMSE	Reference
None Coated	2.330	-0.202	2.532	1.121	1.358	Sensor Length (30 m)
Japan	0.030	-0.140	0.170	0.066	0.076	
Turkey	0.110	-0.137	0.247	0.023	0.072	

Fig. 8에서, 발생된 오차가 30 m 전구간에 걸쳐 점진적으로 증가하여 최대 2 m 33 cm의 크기의 오차가 발생하였으나 Fig. 10에서는 14 cm 이하, Fig. 12에서는 13.7 cm 이하의 오차가 발생되었다. 이것은 케이블의 PVC 피복과 물과의 관계가 친수성에서 비 친수성(발수성)으로 변하여 유전율의 감소를 발생시킨 것으로 판단되며, 유전율의 감소로 인하여 최종 표시된 mV의 값이 감소하였고, 측정 오차가 감소하여 결과적으로 센서시스템의 정확도를 향상시킨 것으로 평가된다.

이상의 총 3회의 시험결과로부터 측정 센서의 발수코팅 유무에 따른 센서의 정확도를 종합적으로 비교분석하였다. Table 5는 적용된 센서의 측정 데이터로부터 확인된 오차값의 크기와 정도를 정리한 것이며 다양한 특징들을 확인할 수 있다. 일본 및 터키의 코팅제품으로 30 m 길이의 센서부를 코팅 및 비코팅 처리하고 시험으로 획득한 데이터의 결과를 분석하였다. 비코팅시 오차최대값이 2.33 m (비코팅)에서 0.030 m (일본)와 0.110 m (터키)로 감소하였고, 오차최소값도 -0.202 m (비코팅)에서 -0.140 m (일본)와 -0.137 m (터키)로 감소하였다. 오차의 절대크기도 2.532 m (비코팅)에서 0.170 m (일본)와 0.247 m (터키)로 감소하였고, 오차평균의 절대값도 1.121 m (비코팅)에서 0.066 m (일본), 0.023 m (터키)로 나타나 코팅처리시 전체적인 데이터의 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

또한, RMSE 분석을 수행하였다. Root Mean Square Error (RMSE)는 표준편차를 일반화시킨 척도로서 실제값과 관측

값과의 차이가 얼마인가를 알려주는데 많이 사용되는 척도이며, 그 값이 0에 가까울수록 정확도가 우수함을 의미한다. 분석결과 RMSE값이 비코팅시: 1.358, 일본: 0.073, 터키: 0.072로 나타나 센서부를 코팅처리 할 경우 보다 정확한 값이 나타남을 알 수 있으며, 코팅을 한 경우에는 터키제품이 일본제품보다 더 정확한 값을 나타내었다.

한편, 본 시험은 센서부 수침시 사람의 육안과 조작에 의존한 측정이 수행되었으므로 측정시 오차(시험오차)가 존재할 수 있다. 그러함에도 데이터의 일관성이 높게 나타났으며, 향후 정밀도 높은 시험 수행시 보다 정확한 측정 결과를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하수위의 장기계측이 가능한 비접촉식 계측시스템을 개발하고, 실내시험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 정전용량 이론을 이용한 비접촉식 수위계측 시스템은 센서부의 금속체가 물과 직접 접촉하지 않으므로 부식과 망실의 결과를 제거할 수 있어 장기계측에 매우 유리하며, 센서 케이블의 피복부 표면에 발수코팅처리를 함으로써 센서의 침수부와 비침수부의 경계를 명확하게 구분하여 계측 데이터의 정확도를 향상시킬 수 있었다.
2. 발수코팅된 센서의 계측결과는 비코팅처리된 결과에

비해 오차와 정확도 분석에서 보다 정확한 것으로 확인되었다. 오차평균의 절대값은 센서부 비코팅시에 1.121 m로 나타났으나 일본제품 고팅처리시 0.066 m, 터키제품 코팅처리시 0.023 m로 나타나 발수코팅으로 인한 측정오차가 감소하였고 RMSE분석에서 비코팅시 1.358에서 0.073 (일본)과 0.072 (터키)로 감소하여 센서부 코팅시 정확도가 향상되었다.

3. 개발된 계측 시스템의 측정가능 길이는 최대 30 m이며, 30 m 이하 길이에서 지하수위를 측정하고자 하는 수변 구조물의 안정평가시 유효하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.
4. 계측시 획득된 원본 데이터는 추가적인 보정절차 없이 계측결과를 바로 확인하고 적용할 수 있어 신속한 데이터 관리가 가능하여 향후 실시간 구조물 모니터링 시스템 등의 구축시 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Beiping, J., Mitsuno, T., Akae, T., and Nagahoria, K. (1996a). Measurement of soil dielectric constant by frequency domain reflectometry and its application to soil moisture measurement of specified depth. *Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, Vol. 1996, No. 182, pp. 201-206.
- Beiping, J., Mitsuno, T., Akae, T., and Nagahoria, K. (1996b). Determination of field soil water content by frequency domain reflectometry (FDR) technique. *Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, Vol. 1996, No. 182, pp. 207-214.
- Chan, C.Y., and Knight, R.J. (1999). Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials. *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 85-93.
- Choi, Y.T., Park, B.S., Hwang, S.H., and Shim, G.S. (2021). Study on ballast track behavior based on long-term monitoring. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 24, No. 5, pp. 441-448.
- Gaskin, G.J., and Miller, J.D. (1996). Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 63, No. 2, pp. 153-159.
- Gurbuz, A., Peker, I., Aydin, K., Tugcu, O., and Acan, S. (2017). The application of distributed fiber sensors in determination of seepage in Derince dam. *International Journal of sensor Networks*, Vol. 25, No. 3, pp. 176-183.
- Hwang, I.D., Lee, W.J., Youm, H.N., and Chung, Y.J. (2000). The evaluation of n-octyl ethoxy silane as a water repellent of concrete. *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 37, No. 12, pp. 1172-1177.
- Kim, D.K., Cha, M.S., Lee, J.E., Lee, G.W., and Lee, S.B. (2001). Surface properties of water-repellency coating films and their durability effects. *Applied Chemistry*, Vol. 5, No. 1, pp. 76-79.
- Kim, H.B., and Song, J.H. (2016). Experimental study for establishment of long-term monitoring system using fiber optical sensor for pipeline system for waste transportation. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 4, pp. 35-43.
- 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 Korea Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 2, pp. 63-72.
- Kim, M.I., and Makoto, N. (2003). An experimental study to estimate physical properties of porous media by a permittivity method. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 13, No. 4, pp. 405-418.
- Kim, M.I., Chae, B.G., and Cho, Y.C. (2008). Study on rainfall infiltration characteristics for weathered soils: Analysis of soil volumetric water content and its application. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 1, pp. 83-92.
- Kim, M.I., Chae, B.G., and Jeong, G.C. (2009). Correlation of unsaturated soil and dielectric property for monitoring of subsurface characteristics: Development of unsaturated dielectric mixing models and its application. *Environmental Geology*, Vol. 57, No. 1, pp. 49-58.
- Kim, M.I., Jeong, G.C., Chung, I.M., and Kim, N.W. (2009). Experimental assessment of the infiltration properties of a coarse soil medium in a dielectric infiltration test. *Environmental Geology*, Vol. 57, No. 3, pp. 591-600.
- Lee, B.J., and Lee, J.K. (2015). Evaluation of loss prestress force of tensile anchor by long term measurement. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 10, pp. 15-22.
- Lee, S.Y., Cho, J.W., and Kim, Y.H. (2010). Electrical heating effect and water repelling property of fabrics spray-coated with mixed solution of carbon nanotubes and hyperbranched polyurethane. *Textile Science and Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 184-190.
- Miller, J.D., and Gaskin, G.D. (1996). *Theta probe ML2x*,

- principle of operation and applications* (2nd ed.). Aberdeen, UK: Macaulay Land Use Research Institute (MLURI).
- Moffitt, L.R. (1964). Time domain reflectometry -Theory and applications. *Engineering Design News*, pp. 38-44.
- Park, J.C., Park, C.M., Kim, B.H., Lee, I.G., and Jo, B.W. (2006). Dynamic characteristics of seohae cable-stayed bridge based on long-term measurements. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 10, No. 6, pp. 115-123.
- Park, M.C., Lee, J.W., Kim, Y.S., and 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.
- Park, S.T., Jung, G.H., Yoo, H.J., Choi, E.Y., Choi, K.Y., and Lee, Y.B. (2014). Measuring water content characteristics by using frequency domain reflectometry sensor in coconut coir substrate. *Protected Horticulture and Plant Factory*, Vol. 23, No. 2, pp. 158-166.
- Santamarina, J.C., Klein, K.A., and Fam, M.A. (2001). *Soils and waves*. New York: Wiley, p. 488.
- Sayde, C., Gregory, C., Gil-Rodriguez, M., Tuffillaro, N., Tyler, S., Van de Giesen, N., et al. (2010). Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, Vol. 46, pp. 1-8. doi:10.1029/2009WR007846
- Su, H., Hu, J., and Yang, M. (2015). Dam seepage monitoring based on distributed optical fiber temperature system. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Sensors Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 9-13.
- 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. 574-582.

Received	September 17, 2021
Revised	September 23, 2021
Accepted	October 29, 2021