

# TDR 센서 기반 수위 측정 시스템 구현

이승목\*, 김태민\*\*, 이용환\*\*\*, 김영형\*\*\*\*

## Implementation of a Water-Level Measurement System based on TDR Sensor

Seung-Mok Lee\*, Tae-Min Kim\*\*, Yong-Hwan Lee\*\*\*, and Young-Hyung Kim\*\*\*\*

---

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2022년도 산학협력 거점형 플랫폼(R&D) (No. G21S301405802)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

---

### 요 약

본 논문은 수위 측정 시스템을 구현하여 TDR(Time Domain Reflectometry) 데이터에 기반한 수위를 측정하는 방법을 제안하였다. 개발된 보드를 사용하여 TDR 센서 라인에 펄스를 보내고 되돌아온 반사 신호로부터 TDR 데이터를 측정하였고 이 데이터를 연속적으로 전송 받고 이를 모니터링하는 프로그램을 개발하였다. 물의 수위를 측정하는 실험은 TDR 센서 라인을 일정 거리마다 물에 잠기게 하는 방법으로 TDR 데이터를 획득하였다. TDR 데이터의 변화 지점을 검출하고 이에 대한 거리를 계산함으로써 수위 측정을 하였다. 실제 물에 잠긴 센서의 수위와 측정된 수위를 비교함으로써 제안된 방법의 성능을 평가하였고, 제안된 방법으로 4회 실험한 수위 값의 RMSE 오차가 22.6cm, 16.6cm, 18.4cm, 및 25.8cm이며, 안정적인 수위가 측정됨을 확인하였다.

### Abstract

This paper proposes a method to measure the water level based on TDR(Time Domain Reflectometry) data by implementing water-level measurement system. Using the developed hardware board, a pulse was sent to the TDR sensor line and the TDR data was measured from the reflected wave. A monitoring program was developed to continuously receive and monitor this data. In the experiment to measure the water level, the TDR data was acquired by submerging the TDR sensor in water at a certain distance. The water level was measured by detecting the change point of the TDR data and calculating the distance. The performance of the proposed method was evaluated by comparing the actual water level of the sensor submerged in water with the measured water level, and the proposed method showed that the water level was stably measured with RMSE errors of 22.6cm, 16.6cm, 18.4cm, and 25.8cm of the 4 experiments.

### Keywords

TDR technique, TDR measurement, TDR sensor, water-level measurement, monitoring system

---

\* (주)신세계엔지니어링 연구소장  
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3703-5998>  
\*\* CHIPWORK 대표  
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5847-9945>  
\*\*\* 금오공과대학교 전자공학부 교수  
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1222-8283>  
\*\*\*\* 금오공과대학교 IT 융합학과 교수(교신저자)  
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5708-854X>

• Received: Nov. 30, 2021, Revised: Jan. 13, 2022, Accepted: Jan. 16, 2022  
• Corresponding Author: Young-Hyung Kim  
Dept. of IT Convergence, Kumoh National Institute of Technology, 61  
Daehak-ro(yangho-dong), Gumi, Gyeongbuk, 39177, Korea,  
Tel.: +82-54-478-7428, Email: [kic126@kumoh.ac.kr](mailto:kic126@kumoh.ac.kr)

## 1. 서 론

최근에는 다양한 분야에서 데이터를 분석하고 활용하기 위하여 적극적으로 데이터를 수집하는 추세이다. 특히 기후 변화에 따른 환경적 요소에 대한 데이터가 중요해지고 있다. 이와 관련하여 강수와 같은 기후 요인으로 토양 수분의 공간적 및 시간적 변화를 조사하기 위하여 과거에는 토양 샘플을 분석하였으며 현재에는 토양 수분 프로브를 사용하고 있다. 토양 수분 함량과 전기 전도도를 측정하는 방법으로 TDR(Time Domain Reflectometry)이 있다.

TDR 센서를 활용한 연구로 토양이나 눈의 수분 함량에 대한 공간적 분포 연구가 있다[1][2]. 그리고 토양 관개 기법에 TDR 토양 수분 측정기를 사용하였고[3], 또한 위성 이미지의 검증 및 보정에 활용되었다[4]. FDR(Frequency Domain Reflectometry) 방식은 토양을 커패시터로 사용하여 최대 공진 주파수를 측정하는 방법으로 FDR 센서를 이용하여 토양의 염도를 측정하는 연구도 있으며 농산물의 수분함량 및 품질 평가를 위한 유전분광법 기술도 연구되어지고 있다[5][6].

수위 측정과 관련한 센서로는 접촉식이나 비접촉식 센서가 있으며 접촉식의 경우 센서 부식의 문제를 가짐으로 초음파 센서, 적외선 센서, 정전용량식 센서 등의 비접촉식 센서를 활용한 연구가 많이 이루어지고 있다. 초음파 센서를 사용한 IoT 기반 플랫폼에 대한 연구나 홀 센서에 기반한 수위측정에 대한 연구가 있으며[7][8], 카메라로 촬영한 영상에서 마커를 검출하여 수위를 측정하는 방법에 대한 연구도 있다[9]. 그리고 전류 펄스를 발사하여 수위에 따라 변화하는 영구자석에 의한 반사를 감지하고 이를 통해 측정하는 액위 센서 시스템의 구현에 대한 연구도 있다[10].

본 논문에서는 오염이나 이물 등의 환경의 영향을 적게 받는 TDR 센서 라인을 활용하여 수위를 측정하는 방법을 제안하고 이의 성능을 확인하기 위하여 시스템을 구현하여 실험하였다. 구현된 시스템은 TDR 센서 라인에 펄스를 보내고 되돌아온 반사 신호로부터 TDR 데이터를 측정하는 방식의 개발된 보드를 사용하였으며, 측정된 값을 주기적으로

통신으로 전송 받고 이를 모니터링하는 프로그램을 개발하였다. 그리고 물의 수위를 측정하는 방법은 TDR 센서의 일정 거리마다 물에 잠기게 한 후, 펄스 신호를 보내고 반사된 신호를 샘플링하여 아날로그-디지털 변환기를 통해 TDR 데이터를 획득하고, 이어서 TDR 데이터를 필터링한 후, 수위 검출을 위한 탐색 범위 내의 최대 변화 지점을 검출함으로써 수위에 발생 지점에 대한 거리를 측정하였다. 2장에서는 일반적인 TDR 센서 기반 시스템 및 이의 원리에 대해 서술하고, 3장에서는 제안된 수위 측정 방법에 대하여 기술하였다. 4장에서는 TDR 센서 라인의 일정 거리마다 물에 잠기게 하여 물에 잠긴 지점에서 반사된 반사 신호에 대한 TDR 데이터를 획득하고 물에 잠긴 위치를 측정하였고 측정 방법의 성능을 확인하였다. 이어서 5장에서는 제안된 방법인 TDR 데이터로부터 수위를 측정하는 방법에 대한 성능을 평가하고 결론을 내렸다.

## II. TDR 기반 시스템

전기 전도도를 측정하는 TDR 기반 시스템의 요소를 그림 1에 나타내었다. 그림 1을 살펴보면 마이크로 컨트롤러에 의해 제어되는 여러 가지 전자 모듈로 구성되며 Pulse Shaping 회로에서 스트로브 신호를 생성한 후, 이 스트로브 신호는 TDR 펄스 발생기와 샘플링 펄스 발생기에 전달된다.

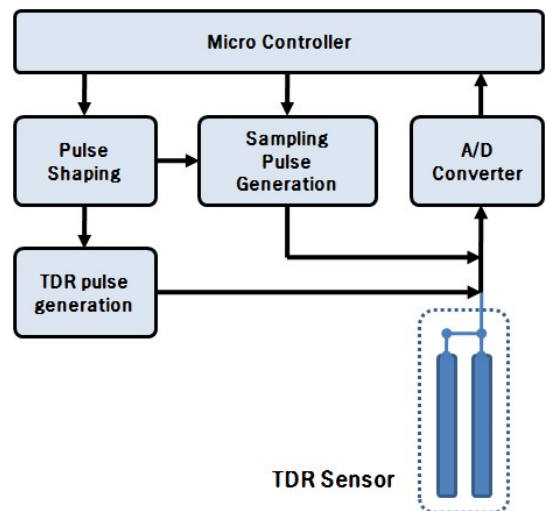


그림 1. TDR 기반 시스템의 요소들  
Fig. 1. Elements of the TDR-based system

이 스트로브 신호로부터 TDR 펄스 발생기는 상승/하강 시간이 아주 짧은 가우스 니들 펄스를 생성하고 A/D 컨버터 회로의 샘플링을 초기화한다. 그리고 스트로브 신호를 지연하여 샘플링 펄스를 생성한다.

TDR 프로브를 사용해 토양의 수분을 측정하는 경우, TDR 펄스 발생기에서 생성된 니들 펄스가 동축케이블을 통해 이동하고 수분의 상태에 따른 TDR 센서 프로브의 임피던스 불연속성으로 반사 신호가 발생된다. 그리고 이 반사된 신호는 A/D 컨버터 회로로 되돌아가게 되며, 고주파 필터, DC 블록을 거쳐 차동 아날로그-디지털 변환기를 통한 샘플링하게 된다. 이를 통해 전환된 디지털 신호인 TDR 데이터는 추가적인 처리 및 분석을 통하여 토양의 수분을 측정하게 된다.

TDR 기반 시스템에서 물에 잠긴 프로브 병렬 로드 대해 펄스 발생기에서 내보낸 니들 펄스의 반사를 측정하는 경우, 샘플링 윈도우의 최대 폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t_{MAX} = \frac{2L\sqrt{\epsilon_w}}{c} \quad (1)$$

여기서  $L$ 은 TDR 프로브 병렬 로드 길이고  $\epsilon_w$ 는 물의 상대 유전율이다. 그리고  $c$ 는 진공에서의 광속을 의미한다.

### III. 제안된 수위 측정 방법

본 논문에서는 자체 개발한 TDR 측정 모듈 및 TDR 모니터링 시스템을 사용하여 넓은 범위에 대한 반사 신호의 TDR 데이터를 측정하였으며, 이를 통신으로 전송하고 실시간으로 분석 및 모니터링 하였다. 개발된 시스템은 그림 2에 나타내었으며 수조의 수위에 따라 변화하는 반사 신호로부터 TDR 데이터를 획득하고 이 TDR 데이터의 변화 시점을 검출함으로써 수위를 측정하였다.

전체 길이 4.3m인 TDR 센서 라인을 사용하였고, 우선 기준이 되는 지점은 센서 시작점부터 10cm 거리로 물에 잠기게 하면서 획득한 TDR 데이터에서

물에 잠긴 위치에 대한 신호 변화가 잘 나타나는 가까운 지점을 기준으로 정하였다. 그리고 이어서 센서 라인의 물에 잠기는 지점은 10cm 단위로 거리를 늘여가며 TDR 데이터를 획득하였다.

그림 3은 기준이 되는 지점에서 획득한 반사 신호에 대한 TDR 데이터로 TDR 센서 라인의 50cm 지점이 물에 잠긴 경우, 이 지점에 대한 반사 신호의 TDR 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 TDR 센서 라인의 연결부까지의 반사된 신호의 데이터가 가지는 특징을 보여주고 있다. 그림 3(b)는 펄스 신호가 TDR 센서 라인의 물에 잠긴 부분에 의해 반사된 시점을 나타내고 있으며, 물에 잠긴 지점이 멀어질수록 이 반사된 신호로 인하여 TDR 데이터의 변화 시점이 비례적으로 지연되어 나타나게 된다.

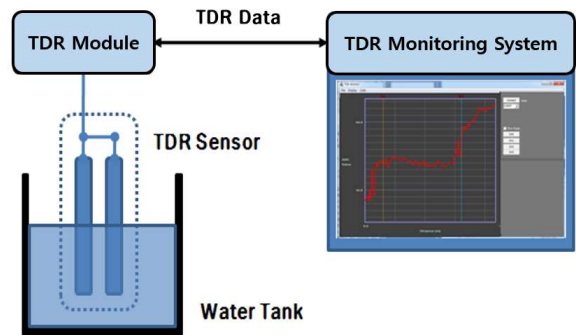


그림 2. TDR 모니터링 시스템  
Fig. 2. TDR monitoring system

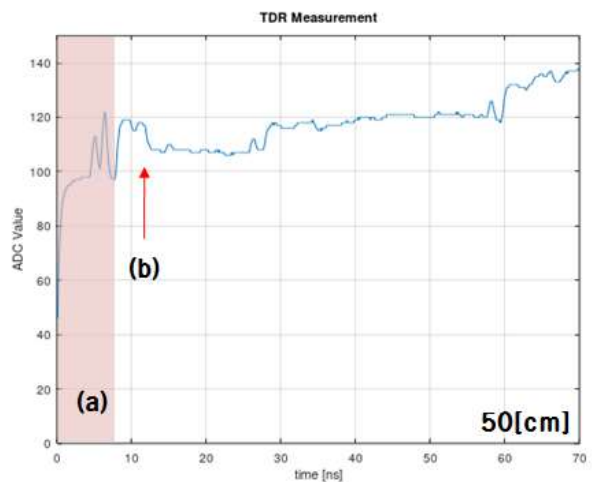


그림 3. TDR 측정 그래프  
Fig. 3. Graph of TDR measurement

TDR 데이터로부터 신호 변화가 나타나는 시점 (즉, 물에 잠긴 지점)을 검출한 후, 수위  $L$ 은 식 (2)와 같이 계산되어진다.

$$L = \alpha(t - t_0) + l_0 \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는 지연 시간과 거리사이의 변환 계수이며  $t, t_0$ 는 물에 잠긴 센서로부터 측정된 시간과 기준으로 설정한 시간을 의미한다.  $l_0$ 는 오프셋 거리를 의미한다.

본 논문에서 제안된 수위 측정 방법은 그림 4에 나타내었으며, TDR 센서 라인의 10cm 거리마다 물에 잠기게 하여 반사되는 신호를 측정한 데이터를 측정하고, 스무딩 필터(Smoothing filter)를 통하여 잡음이 포함된 신호에서 변화가 크게 나타나는 시점이 잘 검출될 수 있도록 한다. 그리고 필터된 데이터에서 대해 탐색 범위 내에서 최대 음의 경사를 가지는 지점을 찾고 식 (2)를 통해 수위에 해당하는 거리를 계산한다.

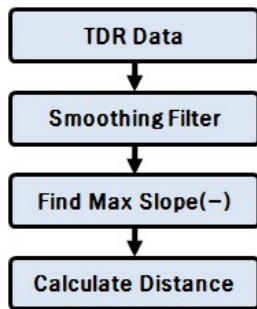


그림 4. 수위 측정 방법  
Fig. 4. Method of water-level measurement

#### IV. 실험 및 고찰

제안된 수위 측정 방법은 기준 측정 위치를 센서의 시작위치로부터 잡음이 적고 명확하게 신호가 나타나는 지점인 50cm 지점을 설정하였다. 그리고 10cm 간격으로 센서 라인의 특정 지점에 대하여 물에 잠기게 하고 반사되는 신호를 측정하였다. 그림 5는 측정 실험과 관련하여 TDR 측정 모듈, TDR 센서, 그리고 센서 라인의 특정 지점을 수통에 잠기게 하는 수위 측정 실험을 나타내었다.



(a) TDR 측정 모듈  
(a) TDR measurement module



(b) TDR 센서  
(b) TDR sensor



(c) 수위 측정 실험  
(c) Experiment of water-level measurement

그림 5. TDR 측정 실험

Fig. 5. Experiments of TDR water-level measurement

그림 6은 50cm 지점이 물에 잠긴 반사파를 측정하는 신호가 나타내는 특정 시점이 물에 잠긴 위치가 변화함에 따라 거리에 따라 지연된 시점에 반사 신호의 특징이 나타나는 것을 보여준다. 마찬가지로 그림 6(a)-(f)를 살펴보면, 센서의 물에 넣는 위치를 거리 50cm씩 증가시키며 측정된 신호의 경우에도 거리에 비례하여 지연되어 특징을 가지는 것을 알 수 있다.

TDR 센서의 물에 잠긴 위치에 대해 측정된 반사 신호의 특징이 나타나는 시점을 검출하고, 이 시점을 거리로 변환하여 실제 수위 레벨에 대한 TDR 센서에 의한 측정 수위에 대한 특성 그래프를 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 그림 7에서 적색 직선은 측정된 데이터가 실제 수위에 맞게 수위를 측정되었다는 최적의 경우를 표시한 것이며, 수위 측정에 의해 실제 측정된 수위를 청색으로 나타내었다.

그림 6과 그림 7을 살펴보면 오차를 가지지만 실제 수위에 맞게 선형적인 변화를 가짐을 알 수 있다. 그리고 수위가 검출되는 센서 라인의 기준점으로부터 거리가 멀어질수록 TDR 데이터에서 변화 정도가 줄어들고 잡음이 증가하여 측정 오차가 증가하는 것을 알 수 있다.

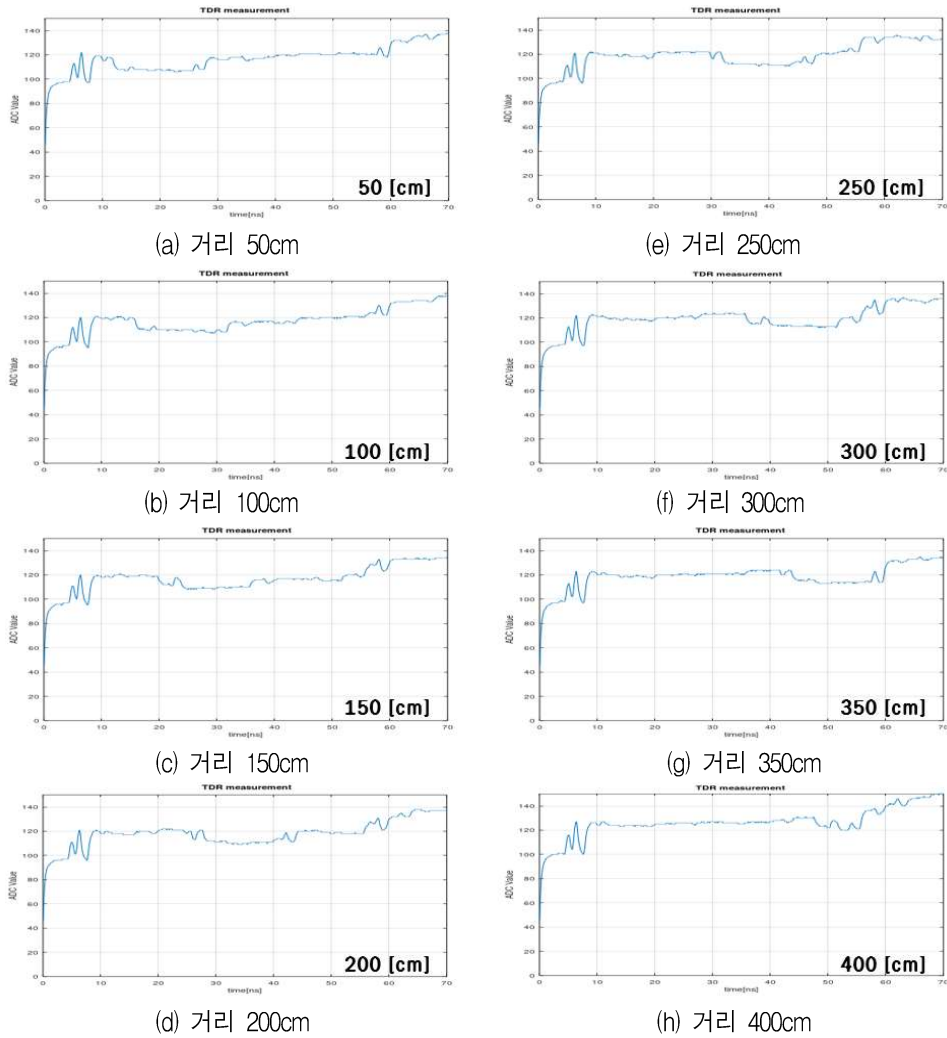


그림 6. 거리별 TDR 측정 그래프

Fig. 6. Graph of TDR measurement depends on water-level distance, (a) 50cm, (b) 100cm, (c) 150cm, (d) 200cm, (e) 250cm, (f) 300cm, (g) 350cm, (h) 400cm

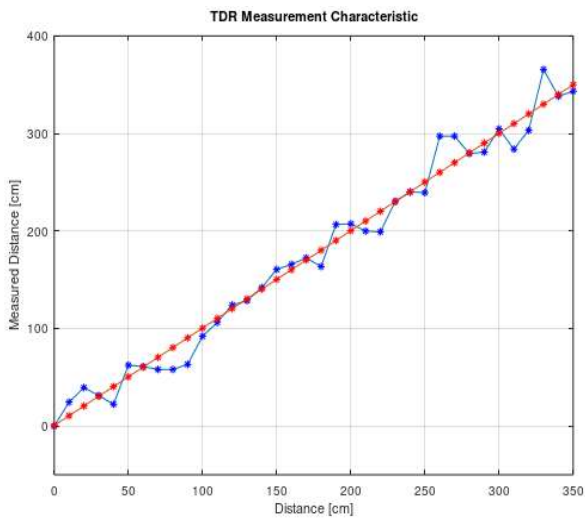


그림 7. TDR 수위 측정 특성

Fig. 7. Characteristics of TDR water-level measurement

제안된 수위 측정 방법의 성능은 측정된 수위와 실제 수위 사이의 평균 제곱근 오차(Root mean square error)를 계산하였다. 실험은 총 4회 진행하여 TDR 데이터를 측정하였으며 처음 측정한 TDR 데이터로부터 얻은 변환 계수와 오프셋을 사용하여 평균 제곱근 오차를 구하였으며 각각 22.6cm, 16.6cm, 18.4cm, 그리고 25.8cm로 나타났다.

## V. 결 론

본 논문은 TDR 센서에 기반하여 수위를 측정하는 방법을 제안하였고 수위 측정 시스템을 구현하여 실제 제안된 방법으로 안정적인 수위 측정이 가

능함을 확인하였다. 제안된 방법을 사용하여 10cm 간격으로 물에 잠긴 TDR 센서를 측정한 수위 측정의 성능은 측정한 측정 수위와 실제 수위의 평균 제곱근 편차(Root mean square error)로 평가하였으며 4회 실험하여 평균 제곱근 오차가 작은 경우는 16.6cm이고, 큰 경우는 25.8cm로 나타났다. 수위 측정에 오차를 가지지만 안정적으로 측정됨을 확인하였다. 하지만 변형에 따른 TDR 센서로부터 측정된 신호에 잡음이 많이 발생하는 문제점을 가지고 있음을 확인하였다. 정밀한 측정을 위하여 TDR 센서 라인의 반사 신호의 감쇄 및 TDR 측정 모듈의 잡음을 줄여야 함으로 이를 개선하기 위한 연구를 이어가고자 한다.

## References

- [1] D. A. Robinson, S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or, and S. P. Friedman, "A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry", *Vadose Zone Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 444-475, Nov. 2003. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.4440>.
- [2] D. Canone, M. Previati, S. Ferraris, and R. Haverkamp, "A new coaxial time domain reflectometry probe for water content measurement in forest floor litter", *Vadose Zone Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 363-372, May 2009. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0110>.
- [3] W. Paul, "Prospects for controlled application of water and fertiliser, based on sensing permittivity of soil", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 36, pp. 151-163, Nov. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00098-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00098-4).
- [4] W. A. Dorigo, W. Wagner, R. Hohensinn, S. Hahn, C. Paulik, A. Xaver, A. Gruber, M. Drusch, S. Mecklenburg, P. van Oevelen, A. Robock, and T. Jackson, "The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements", *Hydrology Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 1675-1698, No. 5, May 2011. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>.
- [5] A. Wilczek, A. Szyplowska, W. Skierucha, J. Ciešta, V. Pichler, and G. Janik, "Determination of Soil Pore Water Salinity Using an FDR Sensor Working at Various Frequencies up to 500 MHz", *Sensors*, Vol. 12, No. 8, pp. 10890-10905, Aug. 2012. <https://doi.org/10.3390/s120810890>.
- [6] W. Skierucha, A. Wilczek, and A. Szyplowska, "Dielectric spectroscopy in agrophysics", *International Agrophysics*, Vol. 26, No. 2, pp. 187-197, Apr. 2012. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0027-5>.
- [7] J. Park, M. S. Kang, J. H. Song, and S. M. Jun, "Design and Implementation of IoT-Based Intelligent Platform for Water Level Monitoring", *Journal of the Korean Society of Rural Planning*, Vol. 21, No. 4, pp. 177-186, Dec. 2015. <http://x.doi.org/10.7851/ksrp2015.21.4.177>.
- [8] M. Kim, J. Lee, and G. Song, "Implementation of Water Depth Indicator using Contactless Smart Sensors", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 733-739, Jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.6.733>.
- [9] J. S. Shin and D. S. Kang, "A Study on Measure Method of Water Level Using Marker Recognition and Rotation Algorithm", *Journal of KIIT*, Vol. 11, No. 5, pp. 167-173, May 2013. <http://dx.doi.org/10.14801/kiitr.2013.11.5.167>.
- [10] W. J. Choi and J. T. Lee, "The Implementation of Magnetostrictive Type Level Sensor System using Guided Pulse Wave", *Journal of KIIT*, Vol. 10, No. 6, pp. 23-30, Jun. 2012.

저자소개

이 승 목 (Seung-Mok Lee)



1996년 2월 : 금오공과대학교  
전자공학과(공학사)  
1998년 2월 : 금오공과대학교  
대학원 전자공학과(공학석사)  
2016년 2월 : 금오공과대학교  
대학원 전자공학과 (공학박사)  
2017년 9월 ~ 현재 :

(주)신세계엔지니어링 연구소장  
관심분야 : 컴퓨터비전, 영상처리, 임베디드, 자동화

김 태 민 (Tae-Min Kim)



1994년 2월 : 금오공과대학교  
전자공학과(공학사)  
1998년 2월 : 금오공과대학교  
대학원 전자공학과(공학석사)  
2002년 2월 : 금오공과대학교  
대학원 전자공학과(공학박사)  
2002년 ~ 현재 : CHIPWORK 대표

관심분야 : 반도체설계, FPGA 설계

이 용 환 (Yong-Hwan Lee)



1993년 : 연세대학교  
전자공학과(공학사)  
1999년 : 연세대학교  
전자공학과(공학박사)  
1999년 ~ 2004년 : 삼성전자  
하이닉스 반도체  
2004년 ~ 현재 : 금오공과대학교

자공학부 교수  
관심분야 : SoC, 컴퓨터 비전, 고속인터페이스,  
임베디드시스템, 마이크로프로세서 아키텍처

김 영 형 (Young-Hyung Kim)



1992년 2월 : 금오공과대학교  
전자공학과(공학사)  
1996년 2월 : 금오공과대학교  
대학원 산업경영학과(경영학석사)  
2010년 2월 : 금오공과대학교  
대학원 산업경영학과(경영학박사)  
2014년 ~ 현재 : 금오공과대학교

IT융합학과 교수  
2016년 ~ 2017년 : 3D 프린팅 산업협회장  
관심분야 : 산업조직, HRD, 리더십, 3D 프린팅