

굴절을 기반 토양 수분 센서

심은선¹ · 화수빈¹ · 장익훈² · 나준희³ · 김민희^{1,+}

Refractive index-based soil moisture sensor

Eun-Seon Sim¹, Su-Bin Hwa¹, Ik-Hoon Jang², Jun-Hee Na³, and Min-Hoi Kim^{1,+}

Abstract

We developed a highly accurate, yet inexpensive, refractive index (RI)-based soil moisture sensor. To detect the RI, a light guide was set with a light-emitting diode and photodiode. When the air fills the space between the soil particles, most of the incident light is reflected at the interface between the waveguide and the air because of the large RI difference. As the moisture of the soil increases, the macroscopic soil RI increases. This allows incident light to pass through the interface. The intensity of the light reaching the photodiode was simulated according to the change in the soil RI. Using the simulation results, we designed and manufactured a curved glass waveguide. We evaluated the performance of the RI-based soil sensor by comparing it with a commercially available, high-cost and high-performance time-domain reflectometer (TDR). Our sensor was 96% accurate, surpassing the costly TDR sensor.

Keywords : Soil moisture sensors, Refractive index, Total reflection.

1. 서 론

토양의 수분량은 작물의 생장에 직접적인 영향을 주는 여러 농업 데이터에서 가장 높은 중요도를 가지고 있다. 농업과 더불어 토목, 방재 등의 분야에서도 토양이 포함하고 있는 수분의 양을 측정할 필요성이 있으며, 다양한 토양 내 수분 측정 방식이 개발되어 사용되고 있다.

토양의 수분을 측정하는 방법에는 건토 중량법, TDR(time domain reflectometry) 및 FDR(frequency domain reflectometry) 방식, COSMIC-ray 중성자 측정 방법, 수분장력(tensiometer) 방법, EC(electrical conductivity) 측정 방법 등이 있다 [1].

건토 중량법은 시료를 채취한 후 건조시켜 측정하는 방식으

로 정확성은 높으나 토양이 손상되는 파괴적 방식이며 지속적인 측정이 어려워서 연속적으로 토양을 상태를 모니터링해야 하는 실제 농가에 적용되기는 어렵다 [1,2]. TDR 및 FDR 센서는 수분량 변화에 따라서 고주파에서의 impedance 변화를 측정하는 원리이며 정확도는 높으나 센서 및 모듈 가격이 고가라는 단점이 존재한다 [3,4]. COSMIC-ray 중성자 센서는 대면적의 수분량을 측정할 수 있는 장비이지만 매우 고가이며 기술적 접근이 어려워서 일반적인 농가에서 사용하기 힘들다는 문제점이 있다 [5,6]. 수분장력센서는 수분의 장력을 측정하는 방식으로 바로 전기적인 출력값이 나오지 않으며 지속적으로 물을 보충해 주어야 한다는 단점이 있다 [3,7]. EC 센서는 저가의 센서이지만 전기전도도가 수분의 양뿐만 아니라 토양의 이온의 양과 같은 다른 요인에도 복합적인 영향을 받으므로 정확도가 떨어지고 전극이 부식되는 문제점이 있다 [8]. 따라서, 저가로 구현이 가능하며 동시에 높은 정확도와 안정성을 갖춘 고성능 토양 수분 센서의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 토양의 수분 함유량에 따라 토양의 굴절률이 변화하는 현상을 이용하여 높은 정확도를 가지는 저가의 굴절을 기반 토양 수분 센서(refractive index based soil moisture sensor)를 개발하였다. Fig. 1에서와 같이 굴절을 감지하기 위한 곡선형 도파로에 빛을 조사하여서 전반사가 되어 수광부에 도달하는 빛의 양의 변화를 감지하였다. 빛을 조사할 때 토양입자 사이를 공기가 채우고 있는 경우 도파로와 굴절률 차이가 커서 대부분의 빛이 전반사 되지만, 토양의 수분 함량이 높아질수록 토양의 굴절률이 증가하여 빛이 투과하게 된다. 토양의 굴절을

¹ 한밭대학교 창의융합학과(Department of Creative Convergence, Hanbat National University)

125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Republic of Korea

² ㈜지농 FarmAI 연구소 (FarmAI Lab, Jinong)

25, Simin-daero 248beon-gil, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 14067, Republic of Korea

³ 충남대학교 전기전자통신공학교육과 (Department of Electrical, Electronics & Communication Engineering Edu., Chungnam National University) 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

⁺Corresponding author: mhkim8@hanbat.ac.kr

(Received: Oct. 1, 2021, Revised : Oct. 18, 2021, Accepted : Nov. 15, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

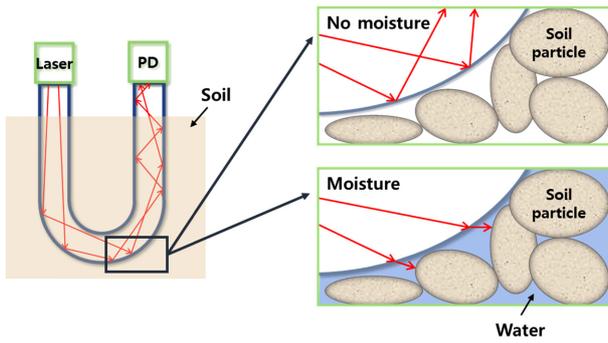


Fig. 1. Schematic diagram of refractive index-based soil moisture sensor operation.

변화에 따른 빛의 전달을 시뮬레이션 하여서 센서의 동작 가능성을 미리 살펴보았다. 시뮬레이션을 기초로 하여서 굴절률 토양 센서를 제작하고, 이를 상용화된 고가의 고주파 센서와 비교하여 성능을 평가하였다. 그 결과 개발된 센서의 성능이 상용화된 센서의 96% 수준의 정확도를 갖는 것을 확인하였다.

2. 연구 방법

Fig. 1과 같이 본 연구에서 개발한 굴절률 기반 토양 수분 센서는 빛이 진행하는 도파로와 발광부, 수광부로 구성된다. 도파로는 빛의 전반사 현상을 이용하기 위해서 곡면이 존재하면서 발광부와 수광부가 한 쪽 면에 위치할 수 있는 U자형 유리막대로 제작하였다. 유리막대 도파로의 지름과 형태는 Fig. 2(a)에서 보이는 것과 같다. 도파로로 더 저가의 플라스틱 소재가 사용될 수 있으나 플라스틱의 경우 장기간 사용시 물의 흡수로 인한 이력현상이 발생할 수 있어서 유리막대로 제작되었다. 도파로의 끝에 위치한 발광부는 650 nm 파장의 50 mW 레이저 모듈(50 mW 레드 레이저 모듈, AMYTA)을 사용하였고 반대쪽 수광부에는 파워미터(Pocket Laser Power Meter-840011, Sper Scientific)를 사용하였다. 도파로의 길이가 길지 않고 곡률이 작지 않아서 완벽한 직진성을 요구하지 않기 때문에 직진성이 떨어지는 저가의 LED도 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 이와 함께 Fig. 2(c)처럼 네 개의 측면이 메쉬와 천으로 구성된 구조물에 토양을 담고 U자형 유리막대를 토양에 묻었다. 이 때, U자형 유리막대는 가장 낮은 위치의 깊이가 70 mm가 되도록 설치되었다. 본 연구에서 개발한 굴절률 기반 토양 수분 센서 데이터를 평가하기 위해서 Fig. 2(b)에 제시된 75 MHz에서 동작하는 고가의 TDR 방식의 센서(EC-5, Decagon Device)를 이용하는 모듈을 추가적으로 설치하였다. Fig. 2(c)와 같이 발광부와 수광부를 구동하기 위한 구동회로와 마이크로 컨트롤러를 연결하여 전체 시스템을 구성하였다.

시뮬레이션은 상용 FEM(finite element method) 프로그램인

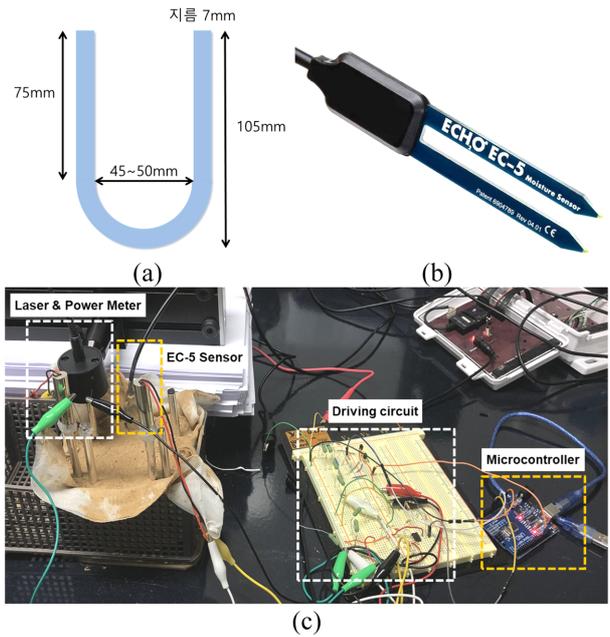


Fig. 2. (a) U-shaped optical waveguide. (b) EC-5 Sensor. and (c) sensor system with driving circuit and microcontroller.

LightTools 9.0 (synopsys) 를 활용하였다. 광경로상 매질의 굴절률을 토양의 습도를 모사하여 가변하였으며, 입력단의 광량 출력에 도달하는 비율을 통해 정량화를 진행하였다. 토양의 습도 변화는 미세한 물방울이 토양에 침투하는 것을 모사하였으며, 시뮬레이션의 광원은 550 nm 단일 파장이다.

3. 이론 및 시뮬레이션

전반사는 빛이 굴절률이 큰 물질로부터 굴절률이 작은 물질의 경계면으로 진행할 때, 입사각이 특정 임계각보다 크면 빛이 경계면을 투과하지 못하고 모두 반사되는 원리이다. 스넬의 굴절 법칙에 의하면 전반사가 일어나는 임계각(θ_c)는 식(1)과 같이 계산된다.

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 굴절률이 1.52인 유리막대의 외벽면에 공기가 접하는 경우 θ_c 는 약 41°이고, 굴절률이 1.33인 유리막대에 물이 접하는 경우 θ_c 는 61°가 된다. 이에 따라 공기가 접하면 입사각이 41°- 90°일 때 전반사가 일어나고, 물이 접하면 입사각이 61°- 90°일 때 전반사가 일어난다. 즉, 빛이 곡면을 진행하면서 공기가 접할 때는 전반사가 많이 일어나서 수광부에 많은 빛이 도달한다. 하지만, 물이 접할 때는 공기가 접할 때 전반사가 일어나던 41°와 61°사이의 입사각을 가지는 빛들이 전반사가 일

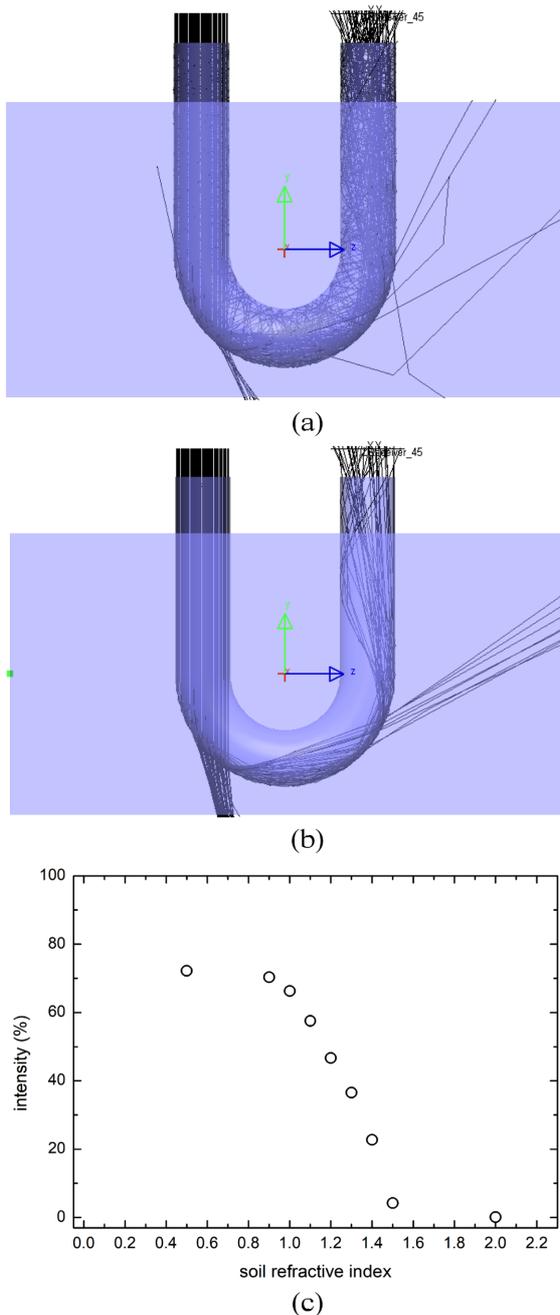


Fig. 3. Optical simulation; (a) in contact with air (b) in contact with water. (c) Relative intensity of received optical power monitored with increasing refractive index.

어나지 않고 일부가 투과되기 때문에 수광부에 도달하는 빛이 줄어든다.

개발된 U자형 도파로에서 빛의 전달을 확인하기 위해서 광학 시뮬레이션을 Fig. 3과 같이 진행하였다. 도파로 외부의 굴절률이 변함에 따라서 유리도파로를 따라서 수광부에 도달하는 빛의 양을 시뮬레이션 하였다. 물이 토양의 공극을 일부 채운 경우를 시뮬레이션 하기 위해서는 매우 작은 영역별로 도파로가

물 혹은 공기와 접하는 것으로 시뮬레이션 해야 하나, 시뮬레이션의 복잡도를 낮추기 위해서 거시적으로 토양의 굴절률이 변하는 것으로 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과, Fig. 3(a)와 같이 유리막대에 공기만 접한 경우, 발광부에서 조사된 빛의 약 66%가 수광부에 도달한다. 이에 비하여 유리막대에 물이 접한 경우에는 Fig. 3(b)와 같이 발광부에서 조사된 빛이 더 많이 투과되어서 수광부에서 감지되는 빛은 약 36%이다. 토양의 굴절률이 증가함에 따라 모니터링된 광전력의 상대 강도는 Fig. 3(c)와 같이 나타난다. 굴절률이 증가함에 따라 투과되는 빛의 양이 많아지므로 결과적으로 감지되는 빛의 상대강도는 감소한다는 것을 확인하였다. 토양 내 수분 함유량에 따라 굴절률은 거시적으로 1 초과 1.33 미만의 값에서 유동적으로 변하고, 굴절률의 변화에 따라 감지되는 빛의 상대적인 양을 통해 토양 수분량을 측정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 개발한 굴절률 기반 토양 수분 센서는 U자형 유리막대에 접하는 물, 공기 또는 토양의 비율에 따라 발광부로부터 조사되는 빛이 반사 또는 굴절되어 수광부로 도달하는 정도가 달라지는 것을 이용하여 토양 내 수분 함유량을 측정함에 따라 토양의 구성 성분과 유기질 함유량에 따른 영향이 최소화되어 측정 정확도가 향상되는 원리이다.

4. 결과 및 고찰

굴절률 기반 토양 수분 센서의 데이터를 평가하기 위해 상용화된 고가의 TDR 센서와 비교실험을 진행하였다. 두 센서를 통해 10분 간격으로 약 30000분 동안 측정된 상대 광량과 수분량은 Fig. 4(a)와 같다. 측정 시간 동안 시스템 오류로 인하여 손실된 데이터는 제외하였다. 측정을 시작한 시간을 기준으로 500분이 경과한 시점에서 토양의 표면에 물을 부어서 수분을 공급하였다. TDR 센서를 통해 얻은 수분량 데이터는 수분을 공급함에 따라 약 17%에서 약 21%로 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 수분량의 급격한 증가 시점에 상대광량 또한 급격하게 변화하여 즉각적인 반응이 나타나는 것을 확인하였다. 단, 최대 수분량에 도달하는 시점이 TDR센서와 비교하여 늦춰진다. 수분이 증력과 증발에 의해서 감소함에 따라서 상대 광량은 다시 점차 증가하는 경향을 보였다.

공기 중 수분량의 변화에 대한 토양 내의 수분량과 상대 광량의 변화를 알아보기 위하여 제습 효과가 있는 냉방기를 작동시켜 측정을 진행하였다. Fig. 4(a)에서 약 10000분 이후의 측정 데이터를 살펴보면 수분량 데이터가 약 17%부터 19%사이에서 증가와 감소하는 경향이 반복되는 것을 알 수 있는데 이는 냉방기의 작동 유무에 따라 발생한 결과이다. 냉방기가 작동하는 경우에는 제습 효과로 인하여 공기 중의 수분량이 감소하기 때문에 토양 내 수분이 쉽게 증발하여 토양 내 수분량이 감소하게 된다. 따라서, TDR 센서로 측정된 수분량이 감소함과

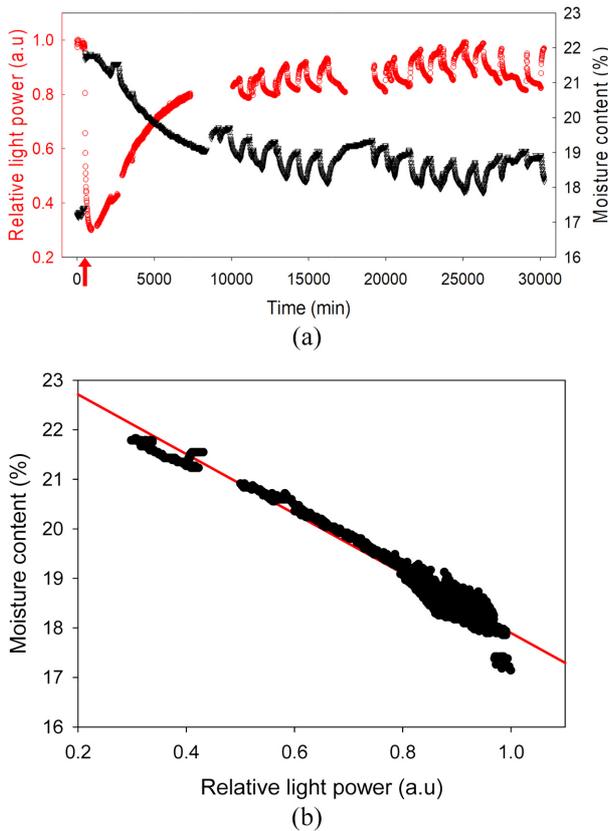


Fig. 4. (a) Moisture content and relative light quantity data measured for 30000 minutes. Red arrow indicates the water supply. (b) Moisture content monitored by relative light power.

동시에 굴절률 기반 토양 수분 센서로 측정된 상대 광량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 냉방기가 작동하지 않는 경우에는 센서가 설치된 영역 보다 아래쪽의 토양의 수분이 건조된 위쪽으로 올라오거나, 높은 비율로 공기 중에 존재하는 수분을 토양이 흡수하여 토양 내 수분량이 다시 증가하게 되고 이 때, 상대 광량은 감소하게 된다. 1%이내의 미세한 수분 변화량을 제작된 센서가 정밀하게 감지하며 작동하는 것을 확인할 수 있다.

약 30000분 동안 수분량과 상대 광량을 측정된 결과(Fig. 4(a)), 수분량이 증가하면 수광부에서 감지되는 상대 광량이 낮아지고 수분량이 감소함에 따라 상대 광량은 커진다는 것을 대략적으로 확인하였다. 이를 기반으로 Fig. 4(b)에 토양 내 수분량과 수광부에서 감지되는 상대 광량의 관계를 나타냈다. 굴절률 기반 토양 수분 센서를 통해 측정된 상대 광량을 통하여 수분량을 결정할 수 있다는 가정하에 두 측정치 간의 관계의 형태를 규명하기 위하여 회귀분석을 진행하였다. 독립변수 X는 상대 광량이며, 종속변수 Y는 수분량을 의미한다. 회귀분석을 진행한 결과, 회귀결정계수 $R^2=0.9688$ 이었고, 식(2)와 같은 관계식을 얻었다.

$$y = -6.02x + 23.9 \tag{2}$$

회귀분석 결과에 따라, 본 연구에서 개발한 굴절률 기반 토양 수분 센서는 상용화된 고가의 TDR 방식의 센서에 대하여 약 96%의 정확도로 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)에서는 수분량이 약 17-22%인 경우의 측정 결과를 보여주었는데 이 범위를 벗어나도 수분량 증가에 따른 광량 감소의 관계는 유지될 것으로 사료된다. 단, 매우 수분량이 높은 경우에는 이미 충분한 빛이 투과되어 더 이상의 변화가 없을 수 있지만, 실제 토양에서는 25%이상의 수분량이 나타나기가 어렵기 때문에 실질적인 적용에는 큰 문제는 되지 않는다. 또한, Fig. 4(b)에서 상대광량이 낮은 경우(수분량이 낮은 경우)에 관계식과 오차가 커지는데 이는 Fig. 4(a)의 0분 근처의 측정치로 큰 시간단위에서 발생하는 반복측정에서의 오차로 보여진다.

5. 결 론

본 연구에서는 높은 정확도를 가진 저가의 굴절률 기반 토양 수분 센서를 개발하였다. 토양의 수분 함유량에 따라 토양의 굴절률이 변화하는 현상을 이용하여 상대 광량의 변화를 측정할 수 있었으며, 수분량이 증가함에 따라 상대 광량은 감소한다는 것을 확인하였다. 또한, 상용화된 고가의 TDR 방식의 토양 수분 센서에 대하여 약 96%의 정확도로 측정이 가능하므로 농업과 더불어 토목, 방재 등의 분야에서 토양이 포함하고 있는 수분량을 측정하기 위한 센서로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원(P0012744, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)과 한국연구재단의 지원(No.2018R1A6A1A03026005)을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] S. K. Kim, J. M. Park, K. Y. Kim, and M. H. Choi, "Current status and prospect of soil moisture data from ground observation in Korea", *Water for future*, Vol. 48, No. 12, pp. 16-21, 2015.
- [2] F. S. Zazueta and J. Xin, "Soil moisture sensors", *Soil Sci*, Vol. 73, pp. 391-401, 1994.
- [3] R. Muñoz-Carpena, S. Shukla, and K. Morgan, "Field devices for monitoring soil water content", *EDIS*, Vol. 8, pp. 1-16, 2004.
- [4] W. Skierucha, A. Wilczek, A. Szyplowska, C. Slawiński, and K. Lamorski, "A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity", *Sens.*, Vol. 12, No. 10, pp.

- 13545-13566, 2012.
- [5] M. Zreda, D. Desilets, T. P. A Ferré, and R. L. Scott, "Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, No. 21, 2008.
- [6] M. Zreda, W. J. Shuttleworth, X. Zeng, C. Zweck, D. Desilets, T. Franz, and R. Rosolem, "COSMOS: The cosmic-ray soil moisture observing system", *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, Vol. 16, No. 11, pp. 4079-4099, 2012.
- [7] L. A. Freeman, M. C. Carpenter, D. O. Rosenberry, J. P. Rousseau, R. Unger, and J. S. McLean, *Use of submersible pressure transducers in water-resources investigations*, US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations 8-A3, pp. 40-43, 2004.
- [8] F. Kizito, C. S. Campbell, G. S. Campbell, D. R. Cobos, B. L. Teare, B. Carter, and J. W. Hopmans, "Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor", *J. Hydrol.*, Vol. 352, No. 3-4, pp 367-378, 2008.