

고주파의 2개 주파수 변화를 이용한 토양수분 정밀측정⁺

Precision Measurement of Soil Moisture Content using Dual Radio Frequency Changes

김기복* 이승석* 주대성**
정희원

K. B. Kim S. S. Lee D. S. Joo

1. 서론

토양에 함유된 수분은 식물의 생육뿐만 아니라 식물뿌리의 호흡, 미생물 활성 및 토양의 화학적 상태에 큰 영향을 미친다. 즉, 토양수분은 물에 용해된 무기물과 토양 내의 양분을 녹여 식물 뿌리로 흡수될 수 있도록 이동시키며, 토양 속의 온도를 조절하여 뿌리의 영양분 흡수 능력을 향상시키는 기능을 한다. 또한 토양 속으로 수분이 이동하면서 고갈된 산소를 공급하는 등의 중요한 기능을 하고 있다 (Hillel, 1980). 따라서 토양 내 수분이 과다하거나 부족한 경우 인위적으로 최적 상태의 함수비로 조절하는 물 관리 기술의 중요성이 대두되고 있으며 물 관리 기술의 개발에서 가장 중요한 기술 중의 하나는 토양의 수분 함량을 온라인으로 측정하는 것으로서 관개배수 자동화 기술의 핵심부분이라고 할 수 있다.

이러한 토양수분 측정 방법으로서 석고블럭을 이용한 측정방법, 수분장력계를 이용하는 방법, TDR 방식의 수분측정기, 중성자 프로브 등이 주로 이용되고 있다. 이들 방법 중 TDR 방식의 수분측정기가 현재 널리 사용되고 있다. 보통 건조된 토양의 유전상수는 2.7 정도로서 순수한 물의 유전상수(80 이상)보다 매우 작기 때문에 이러한 토양 수분의 변화에 따른 유전상수를 수분측정에 이용한다(Topp et. al., 1980, 1982). TDR 방법은 정확한 수분측정이 가능하나 초기 설치비가 비싸다는 단점이 있으며(Gardner, et al., 1991) 토양의 종류에 영향을 받을 수 있다(Campbell, 1990). 토양의 유전상수를 이용하는 다른 방법으로서 정전용량 프로브 방법이 있다(de Plater, 1955, Thomas, 1966, Kim, et. al., 1998, Rial and Han, 2000). 이러한 정전용량 방법은 센서 내 토양의 함수비에 따른 유전상수의 변화가 센서의 정전용량 변화로 나타나기 때문에 센서의 구조가 간단하고 TDR 방법보다 비교적 간단하게 저렴하게 측정장치를 구성할 수 있다. 토양 내 수분 변화에 따른 정전용량 변화를 검출하는 방법으로서 직류 및 저주파에서는 브릿지 회로방법이 주로 사용되고 고주파에서는 공진주파수 변화법이 이용되고 있다(Wobschall, 1978). 측정주파수로서는 저주파의 경우 토양 내 이온성분 물질들에 의한 이온전도도의 영향 때문에 보통 1 MHz 이상의 고주파 주파수가 이용된다. 이러한 정전용량 방법을 이용하여 토양 내 수분의 흐름에 크게 영향을 주지 않으면서 정확한 토양수분 측정이 가능한 센서 구조에 대한 연구가 수행되었으며 (Kim, et. al., 1998) 실시간으로 토양 함수비를 측정하기 위한 연구가 수행되었다(Kim, et. al., 2001). 그러나 기존의 정전용량 방법을 이용한 토양 수분 측정장치는 회로 구성 및 장치 가격 면에서 TDR 방법보다 양호하다고 할 수 있지만 측정 정확도는 다소 낮다. 또한 TDR 방법과 마찬가지로 정전용량 방법의 경우 센서 내 토양의 다짐밀도 변화와 토양 종류에 따른 측정값 변동이 크게 나타난다는 점이다(Tomer, 1995).

본 연구는 기존의 단일 주파수를 이용하는 방법을 개선하여 서로 다른 2개의 주파수에서의 정전용량 변화를 이용하여 수분 측정 정확도를 향상시키고 아울러 다짐밀도의 영향을 보정할 수 있는 측정 방법을 개발하기 위하여 수행되었다.

*한국표준과학연구원 산업측정표준부 비파괴계측그룹

** (주) S.I.B.

† 본 연구는 2002년도 중소기업 이전기술개발 사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

2. 재료 및 방법

가. 토양 시료의 조제

본 연구에서 사용된 토양은 입도 분포가 서로 다른 2가지 종류의 토양으로서 서울대학교 농업생명과학대학 내 실험포장에서 채취한 것으로서 입도 분포는 그림 1에서 보는 바와 같다. 토양 시료의 비중은 type I의 경우 2.69, type II의 경우 2.73으로 분석되었으며 여러 수준의 토양 함수비를 조성하기 위하여 완전히 건조된 토양 시료에 증류수를 첨가하여 잘 혼합한 다음 항온항습기에서 약 1 주일 동안 함수비를 조절하였다. 공기 오븐 건조법(24-hours, 105℃)을 이용하여 용적수분함량을 결정하였으며 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad (1)$$

여기서, θ 는 용적수분함량($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), V_w 는 물의 부피(cm^3), V_T 는 토양을 포함한 시료의 전체부피(cm^3)를 각각 나타낸다. 실험에 사용된 토양 시료 용적수분함량 범위는 type I의 경우 $0.002\sim 0.437\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, type II의 경우 $0.011\sim 0.511\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ 의 범위를 각각 나타내었으며 실험은 주위온도 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수행되었다.

나. 정전용량형 토양 수분함량 측정 센서제작

토양 함수비 측정 센서는 본 연구의 선행연구(Kim, et. al., 1998)에서 사용되었던 수직평판형 정전용량 센서를 개선하여 그림 2에서 보는바와 같이 제작하였다. 토양 수분의 감지부가 되는 전극부는 유전율이 2.61이고 두께가 $540\mu\text{m}$ 인 테프론에 두께 $12\mu\text{m}$ 의 구리 전극을 증착시켜 수직으로 구성하였으며 전극이 부착된 테프론 면의 반대쪽에 L자 형태의 알루미늄 판을 붙여 센서의 ground effect와 fringing field effect를 제거하도록 하였다 (Baster, 1990). 제작된 센서의 이론적인 정전용량은 아래와 같이 표시되며(Kim, et. al., 1998) 공기 중에서의 정전용량은 약 0.25pF 로 계산되었다.

$$C_c = \frac{2\epsilon_s' \epsilon_0 h}{\pi \ln(r_2/r_1)} \quad (2)$$

여기서, C_c 는 토양시료가 채워진 센서의 정전용량(F), ϵ_s' 는 토양의 유전율, ϵ_0 는 진공에서의 유전상수 ($8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$), h 는 전극부의 길이, r_1 및 r_2 는 한쪽 전극면을 기준으로 한 수직의 다른 쪽 전극의 시작점과 끝점까지의 거리를 각각 나타낸다.

센서 내 토양의 다짐밀도를 변화시켜 가면서 실험을 수행하기 위하여 그림 2에서 보는 바와 같은 부피 189cm^3 의 시료 용기를 제작하여 토양 시료를 채운 후 센서를 용기에 삽입하여 측정하도록 하였다.

다. 수분 측정 주파수 선정

유전상수는 인가되는 교류 전기장에 큰 영향을 받게 되므로 수분 측정 주파수의 선정은 매우 중요하다고 할 수 있다. 100MHz 이하의 주파수에서의 토양의 유전상수가 $100\sim 900\text{MHz}$ 범위에서의 값보다 크게 나타나며 특히 이 범위에서 유전상수는 주파수에 따라 거의 변하지 않는 것으로 보고되고 있으며 (Starr,

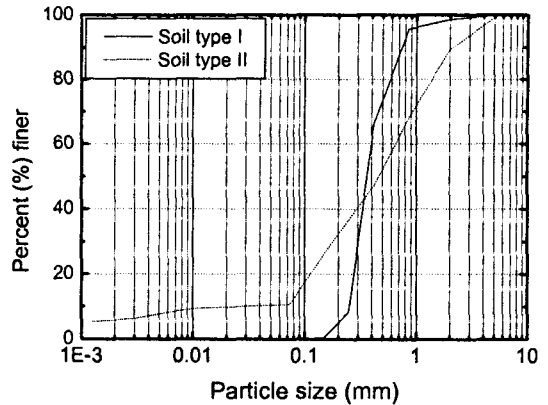


Fig. 1. Grain size distributions of soil samples

1990) 대략 50MHz이하의 주파수 범위에서는 토양의 유전상수는 주파수에 따라 감소하는 것으로 나타났다 (Campbell, 1990). 한편, 가격적인 측면에서 비교적 저렴한 상용 IC의 주파수 한계는 약 25MHz 정도이고 (Ruth, 1999) 30MHz 이상의 주파수에서는 전기적인 노이즈를 제거할 수 있는 별도의 회로가 고려되어야 한다(Hardy, 1978). 따라서 본 연구에서는 수분 측정 주파수로서 5MHz와 20MHz의 2개의 주파수를 선정하였다.

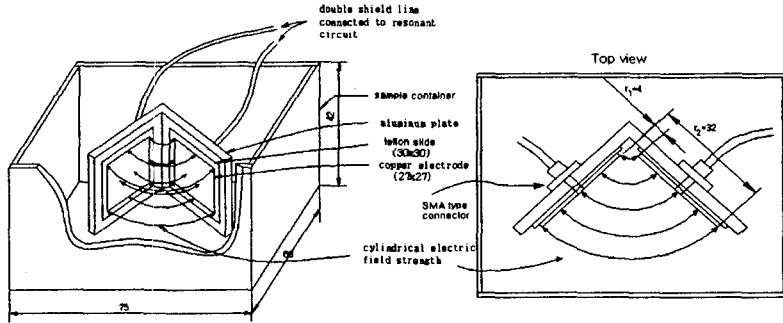


Fig. 2. Schematic view of the perpendicular plate type moisture sensor and sample container

라. 토양 수분함량 측정회로 개발

설계·제작된 토양 센서의 정전용량 변화를 이용하여 토양 수분함량을 측정할 수 있는 회로를 설계·제작하였다. 센서의 토양 수분함량 변화에 따른 정전용량 변화를 검출하기 위하여 고주파 발진회로의 주파수 변화를 검출하는 회로를 제작하였다. 고주파 발진회로는 Kim 등(2001)에 의해 제안된 수정발진자를 응용한 회로를 개선하여 5MHz와 20MHz의 발진회로를 각각 설계·제작하였다. 개발된 수분 측정용 발진회로는 그림 3에서 보는바와 같이 수정발진자의 등가회로에 토양 수분측정용 센서가 병렬로 연결될 경우 수정발진자의 공진점이 변하는 원리(Millman and Halkias., 1987)를 이용한 것으로서 식(3)에서 보는바와 같이 토양 수분의 정전용량(C_c) 만큼의 주파수 감소분(Δf)이 발생하며 그림 4에서 보는바와 같이 NAND gate를 이용하여 비교적 간단한 발진회로를 구현할 수 있다.

$$f_p' = f_p - \frac{C_o}{2\pi\sqrt{L_o C_o}} \cdot \frac{C_c}{C_1(C_1 + C_c)} = f_p - \Delta f \quad (3)$$

여기서, f_p' 는 정전용량 센서가 병렬로 연결될 때의 공진주파수(MHz), f_p 는 수정발진자 자체의 공진주파수(MHz), C_o , C_1 , R_o , L_o 는 각각 수정발진자의 등가정전용량(pF), 등가저항(Ω), 등가인덕턴스(H)를 나타낸다.

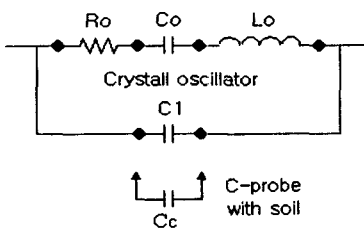


Fig. 3. Equivalent circuit of the crystal oscillator and moisture sensor.

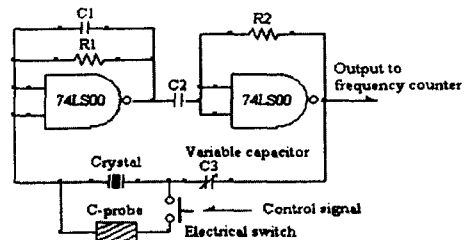


Fig. 4. Circuit diagram of the oscillator.

나. 용적수분함량에 따른 발진주파수 변화

토양 시료의 용적수분함량에 따른 각각의 발진회로의 발진주파수 변화를 분석한 결과 그림 7에서 보는 바와 같다. 각 발진주파수에서 센서 내 토양의 용적수분함량이 증가함에 발진주파수는 거의 다항 함수적으로 감소하는 것으로 나타났으며 본 연구의 선행연구(Kim, 2001)와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 기존의 여러 연구자들에 의해 보고된 토양 용적수분함량과 유전상수의 3차 다항식 관계(Topp et al., 1982, Campbell, 1990)와 유사한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 즉, 토양 함수비가 증가할 경우 토양 시료의 유전율이 증가하게 되고 이에 따라 센서의 정전용량이 식(2)에 따라 증가하게 되어 최종적으로 발진회로의 주파수 변화를 나타내는 식(3)에 의해 발진회로의 공진주파수가 감소하게 된다. 한편, 그림 5에서 토양 시료(soil type I 및 soil type 2)에 따라 주파수 변화 특성이 다소 다르게 나타나는 것을 알 수 있는데 토양 시료의 조성 및 입도 분포 특성에 따른 차이로 생각된다. 이러한 결과와 관련하여 Tomer(1995)는 정전용량형 센서를 이용할 경우 토양의 유전율이 토양의 조성 및 특성에 영향을 받을 수 있다고 지적한 바 있다. 따라서 보다 정밀한 토양 용적수분함량을 측정하기 위해서는 토양의 조성 및 입도 분포와 같은 특성에 따른 영향들을 고려해야 할 것으로 판단된다.

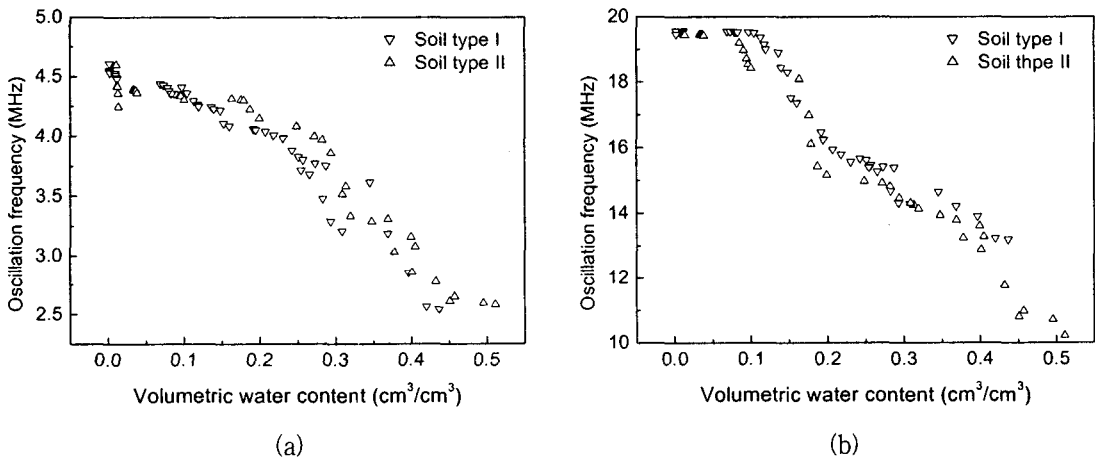


Fig. 5. Volumetric water content dependence of oscillation frequency at indicated moist soil types at (a) 5MHz and (b) 20MHz.

다. 토양 용적수분함량 측정 모델 개발 및 평가

토양 용적수분함량 측정 모델을 개발하기 위하여 5MHz의 주파수 변화와 20MHz의 주파수 변화를 동시에 고려하여 다음 식(4)와 같은 모델을 개발하고 평가하였다. 전술한 바와 같이 토양의 유전상수는 함수하고 있는 수분뿐만 아니라 인가되는 교류 주파수의 함수이며 주파수 변화에 따라 그 특성이 다르게 나타나게 된다. 따라서 단일 주파수를 이용하여 수분함량 측정 모델을 개발하는 것 보다 2개 혹은 그 이상의 주파수들을 이용한 중회귀 모델을 고려하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

$$\theta = af_5 + bf_{20} + c \quad (4)$$

여기서, f_5 는 5MHz에서의 발진주파수 변화(MHz), f_{20} 은 20MHz에서의 발진주파수 변화(MHz), a, b, c는 중회귀계수를 각각 나타낸다.

한편, 기존의 제안된 단일 측정주파수를 이용하는 3차 다항식(Kim, et. al., 2001)인 다음 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 상기 식(5)의 결과와 비교·분석하였다.

$$\theta = af_5^3 + bf_5^2 + cf_5 + d \quad (5)$$

$$\theta = af_{20}^3 + bf_{20}^2 + cf_{20} + d \quad (6)$$

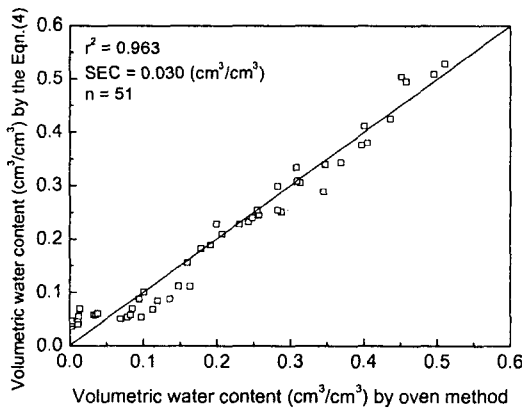
여기서, d는 회귀모델의 회귀계수를 나타낸다.

용적수분함량 측정 모델을 개발하기 위한 중회귀분석은 통계소프트웨어인 SAS version 6.2를 이용하였으며 회귀모델의 평가 및 비교는 결정계수(r^2), 예측표준오차(SEC), 검증표준오차(SEP), bias를 이용하여 분석하였다. 표 3은 회귀분석 결과를 나타낸 것으로서 대체적으로 본 연구에서 제안한 2개 주파수를 이용하는 모델(식(4))의 결과가 단일 주파수를 이용한 모델보다 양호한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 특히 실험에 사용된 2 종류의 토양 시료를 모두 합하여 분석한 결과 식(4)의 모델의 결정계수는 0.966, 검증표준오차는 $0.027(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$, bias는 $0.001(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 로서 식(5) 및 식(6)의 결과보다 정확한 토양수분의 측정이 가능한 것으로 분석되었다.

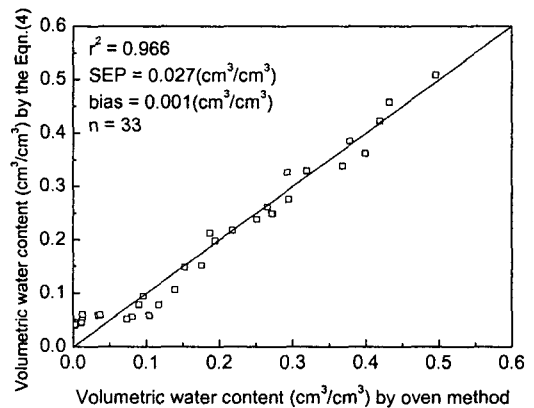
Table 3. Regression analysis results of equation (4), (5) and (6).

Soil type	Model	Calibration			Prediction				Soil type	Model	Calibration			Prediction			
		r^2 ¹⁾	SEC ²⁾	n ⁴⁾	r^2	SEP ³⁾	bias	n			r^2	SEC	n	r^2	SEP	bias	n
I		0.947	0.031	27	0.952	0.028	0.004	18	I	Eqn.(5)	0.974	0.021	27	0.985	0.016	0.005	18
										Eqn.(6)	0.940	0.033		0.942	0.031	0.004	
II	Eqn. (4)	0.977	0.027	24	0.981	0.023	-0.001	15	II	Eqn.(5)	0.938	0.046	24	0.970	0.039	0.007	15
										Eqn.(6)	0.975	0.029		0.977	0.026	0.004	
All		0.966	0.030	51	0.966	0.027	0.001	33	All	Eqn.(5)	0.949	0.035	51	0.953	0.032	0.003	33
										Eqn.(7)	0.951	0.035		0.953	0.031	0.004	

1): determination coefficient, 2): standard error calibration, 3): standard error of prediction and 4): NO. of data



(a) Calibration



(b) Prediction

Fig. 6. Plot of volumetric water content by oven method versus calculated and predicted volumetric water content by Eqn.(4).

4. 요약 및 결론

본 연구는 기존의 단일 주파수변화를 이용하는 토양 용적수분함량 측정의 정확도를 향상시키고 토양의 조성비 및 입도 분포가 서로 다른 토양 시료에 대해서도 정확한 측정이 가능한 측정방법을 개발하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 수직 평판형 정전용량 센서를 설계·제작한 후 고주파 정전용량을 측정하고 분석한 결과 토양 수분함량 측정 센서로서의 사용 가능한 것으로 나타났다. 고주파의 2개 주파수 변화를 이용하여 기존의 단일 주파수 변화를 이용하는 방법과 비교하기 위하여 5MHz와 20MHz의 측정주파수를 선정하였다. 선행연구에서 제안된 토양 수분측정용 고주파 발진회로(Kim, et. al., 2001)를 개선하여 5MHz와 20MHz의 발진회로를 각각 설계·제작하였다. 센서 내 토양의 수분함량 변화에 의한 정전용량 변화를 발진주파수 변화로 측정하기 위하여 주파수카운터 회로와 관련 신호처리 회로를 제작하였다. 각각의 발진회로에서 토양 수분의 증가에 따라 발진주파수는 거의 다항 함수적으로 감소하였으며 기존의 연구결과와 동일한 경향을 나타내었다. 5MHz와 20MHz의 발진주파수 변화를 독립변수로 하여 용적수분함량을 측정하기 위한 중회귀모델을 분석한 결과 기존의 단일 발진주파수 변화를 독립변수로한 3차의 다항식 모델의 결과보다 양호한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 2종류의 토양 시료를 대상으로 하여 분석한 결과 본 연구에서 제안한 2개의 주파수를 이용한 중회귀모델의 결정계수는 0.966, 검증표준오차는 $0.027(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$, bias는 $0.001(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 로 나타나 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 2종류의 토양 시료만을 대상으로 하였으므로 앞으로 보다 많은 여러 종류의 토양 시료를 대상으로 하는 보완연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. Baxter, L. K. 1997. Capacitive sensors-Design and applications. IEEE Press.
2. Campbell, J. E. 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:332-341.
3. Clarke, K. and D. Hess. 1971 Communication circuits: analysis and design. Addison, Wesley. New York.
4. de Plater, C.V. 1955. A portable capacitance-type soil moisture meter. Soil. Sci. 80:391-395.
5. Gardner, C. M. K., J. P. Bell, J. D. Cooper, T. J. Dean, M.G. Hodnett, and N. Gardner. 1991. Soil water content. Marcel Dekker, New York.
6. Hardy, J. K. 1978. High frequency circuit design. Prentice-Hall Company. Reston, Virginia.
7. Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic Press, Inc. Orlando, FL.
8. Kim, K. B., N. H. Lee, and S. H. Noh.. 1998. Measurement of Soil Moisture Content Using RF Impedance in the Range of 1 to 30 MHz. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. 40(6): 79-88.
9. Kim, K. B., N. H. Lee, J. W. Lee, S. S. Lee, and S. H. Noh. 2001. Development of a Real-Time Soil Moisture Meter using Oscillation Frequency Shift Method. Agricultural and Biosystems Engineering. 2(2):41-49.
10. Millman, J., and C. C. Halkias. 1987. Electronic devices and circuits. McGraw-Hill Book Company, New York.

11. Rial, W. S., and Y. J. Han. 2000. Assessing Soil Water Content Using Complex Permittivity. *Transactions of the ASAE* 43(6):1979-1985.
12. Ruth, B. 1999. A capacitance sensor with planar sensitivity for monitoring soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:48-54.
13. Starr, G. C., B. Lowery, E. T. Cooley, and G. L. Hart. 1999. Development of a resonant length technique for soil water content measurement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:278-285.
14. Thomas, A. M. 1966. In situ measurement of moisture in soil and similar substances by fringe capacitance. *J. Sci. Instrumentation.* 43:21-27
15. Tomer, M. D., and J. L. Anderson. 1995. Field evaluation of a soil water-capacitance probe in a fine sand. *Soil Sci.* 159:90-98.
16. Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resource. Res.* 16:574-582.
17. Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:672-678.
18. Weast, R. C., M. J. Astel, and W. H. Beyer. 1985. *Handbook of Chemistry and Physics.* CRC. Press.
19. Wobschall, D. 1977. A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water, the semidisperse model. *IEEE Trans. Geosci. Electronics* 15(1):49-58.
20. Wobschall, D. 1978. A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geoscience Electronics* 16(2):112-118.