

고주파 정전용량 탐침을 이용한 토양수분 측정

Measurement of Soil Moisture Content using High Frequency Capacitance Probe

김기복* 이종환** 남영현*

정회원 정회원

K. B. Kim J. W. Lee Y. H. Nam

1. 서론

토양 수분의 측정은 작물의 생육환경 측정뿐만 아니라 물 관리 기술 개발의 핵심 요소이다. 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 있는데 이 방법은 수분을 함유한 토양 내에 2~4선으로 구성된 탐침 형태의 전송선로를 설치한 다음 수분의 변화에 따른 전자기파의 반사시간 차이를 이용하여 수분을 측정하는 방법으로서 센서의 형상은 비교적 단순하지만 정밀급의 전자기파 발진회로가 필요할 뿐만 아니라 관련 신호처리 회로가 다소 복잡하다. 보통 건조된 토양의 유전상수는 2.7 정도로서 순수한 물의 유전상수(80 이상)보다 매우 작기 때문에 이러한 유전상수의 변화를 수분측정에 이용한다(Topp et al., 1980, 1982). 유전상수와 토양 수분 사이에는 3차 다항식의 관계가 있음이 여러 연구자에 의해 구명되었다(Topp et al., 1982). TDR 방법은 정확한 수분측정이 가능하나 초기 설치비가 비싸다는 단점이 있다(Gardner, et al., 1991). 토양의 유전상수를 이용하는 다른 방법으로서 정전용량 프로브 방법이 있다(de Plater, 1955, Thomas, 1966). 이러한 정전용량 방법은 구조가 간단하고 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 토양 내 수분변화에 따른 정전용량 변화를 검출하는 방법으로서는 직류 및 저주파에서는 브릿지 회로방법이 주로 사용되고 고주파에서는 공진주파수 변화법이 이용되고 있다. 측정주파수로서는 저주파의 경우 토양 내 이온성분 물질들에 의한 이온전도도의 영향 때문에 보통 1 MHz 이상의 고주파 주파수가 이용된다.

본 연구는 평행 실린더형 고주파 정전용량 프로브를 이용하여 토양 수분을 측정하기 위하여 수행되었으며 토양 수분측정을 위한 발진회로로서 구조가 간단하고 안정한 수정 발진자를 이용하였다.

* 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

** 환경대학교 생물자원기계학과

2. 재료 및 방법

가. 토양 시료의 조제

본 연구에서 사용된 토양은 3가지 종류의 토양으로서 입도 분포는 그림 1에서 보는 바와 같다. 토양 시료의 비중은 type I이 2.66, type II가 2.69, type III가 2.73으로 각각 분석되었으며 각각의 토양함수비는 용적수분 함수비로서 항온항습기에서 각각의 함수비가 조절되었다. 토양 함수비의 표준값은 공기 오븐 건조법(24-hours, 105°C)을 이용하여 결정하였으며 용적수분 함량은 다음과 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), 그리고 V_T 는 토양의 전체부피(cm^3)이다. 토양 수분측정 실험시 주위온도는 토양 시료 I의 경우 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, 토양 시료 II 및 III의 경우 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수행되었다.

나. 수분측정 센서

토양 수분측정 센서로서 그림 2에서 보는 바와 같은 2선식 정전용량 프로브를 제작하였다. 이러한 구조는 TDR 방식의 수분측정기에 주로 사용되고 있다. 프로브의 재질은 구리이며 프로브의 길이와 지름은 각각 50mm와 5mm, 프로브 사이의 간격은 11mm로 하였다. 이러한 센서가 토양에 매설될 때 이론적인 정전용량은 다음과 같이 표시된다(Baxter, 1997).

$$C_c = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon'_s}{\ln \left\{ \frac{b + \sqrt{b^2 - 4a^2}}{2a} \right\}} L \quad (2)$$

여기서, C_c 는 프로브의 이론적인 정전용량(F), ϵ_0 는 진공에서의 유전율($8854 \times 10^{12} \text{F/m}$), ϵ'_s 는 토양의 유전상수, L 은 프로브의 길이(mm), a 는 프로브 직경(mm), b 는 프로브 사이의 간격(mm)이다.

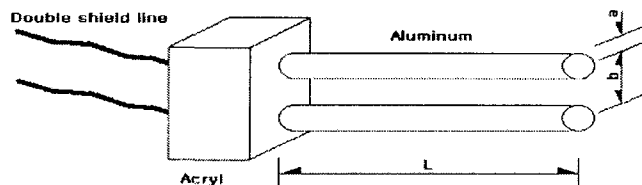


Fig. 2. Capacitance probe for soil moisture sensor.

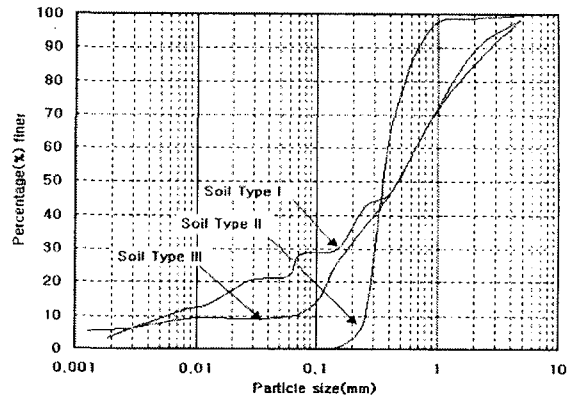


Fig. 1. Grain size distribution of soil samples.

다. 고주파 임피던스 측정시스템

정전용량 프로브의 고주파 임피던스를 분석하고 고주파를 이용한 토양수분 측정 가능성을 검토하기 위하여 그림 3에서 보는 바와 같은 Q-meter를 이용하여 고주파 임피던스 측정시스템을 구성하였다. 아크릴로 제작된 부피 175cm³의 직육각형의 샘플홀더에 토양을 채운 다음 센서를 삽입하여 토양 함수비에 따른 센서의 정전용량(C_c)과 전기전도도(G_c)를 각각 측정하여 분석에 사용하였다.

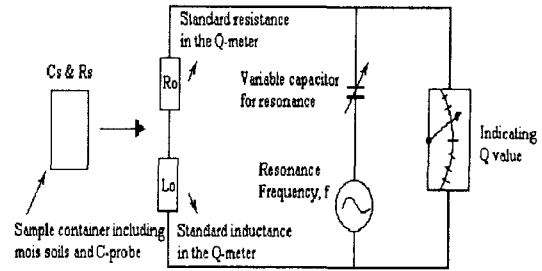


Fig. 3. RF impedance measurement system using Q-meter(HP4342).

3. 결과 및 고찰

가. 센서 및 토양의 임피던스 분석

본 연구에서 사용된 수분 센서의 정전용량을 측정한 결과 표 1에서 보는바와 같다. 식 (2)에서 센서의 이론적인 정전용량은 약 2pF로서 실제 측정값이 약 2배 이상 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이러한 이유로는 센서의 리드선의 영향과 표유용량의 영향 때문이며 전반적으로 30 MHz의 측정범위 까지 비교적 안정한 값을 나타내는 것으로 나타났다.

Table 1. Capacitances of C-probe with air in frequency range of 1.0 to 30MHz.

Frequency(MHz)	1	5	10	15	20	30
Capacitance(pF)	4.5	4.4	4.6	4.7	4.2	4.0

토양 시료 I 을 이용하여 정전용량과 전도도를 각각 측정한 결과 그림 4에서 보는바와 같이 토양 함수비가 증가함에 따라 센서의 임피던스는 거의 다항 함수적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 단순비교는 어렵지만 TDR 방식의 수분측정에서 토양의 유전상수와 함수비의 3차 다항함수의 관계와 거의 유사한 것으로 생각된다. 한편, 정전용량의 경우 측정주파수의 증가에 따라 정전용량은 감소하는 것으로 나타났는데 전반적으로 동일한 토양 함수비에서 대체적으로 shift 하여 감소하는 것으로 분석되었다. 이상의 분석결과를 토대로 다음과 같은 토양 함수비와 임피던스 사이의 3차 다항함수를 가정한 후 회귀분석을 실시하였으며 그 결과는 표 2에서 보는바와 같다.

$$\theta = aC_c^3 + bC_c^2 + cC_c + d \tag{3}$$

$$\theta = aG_c^3 + bG_c^2 + cG_c + d \tag{4}$$

대체적으로 상관계수가 0.95이상을 나타내어 고주파 임피던스를 이용할 경우 토양의 함수비 측정이 가능한 것으로 나타났으며 전기전도도보다 정전용량과의 상관계수가 높게 나타났다.

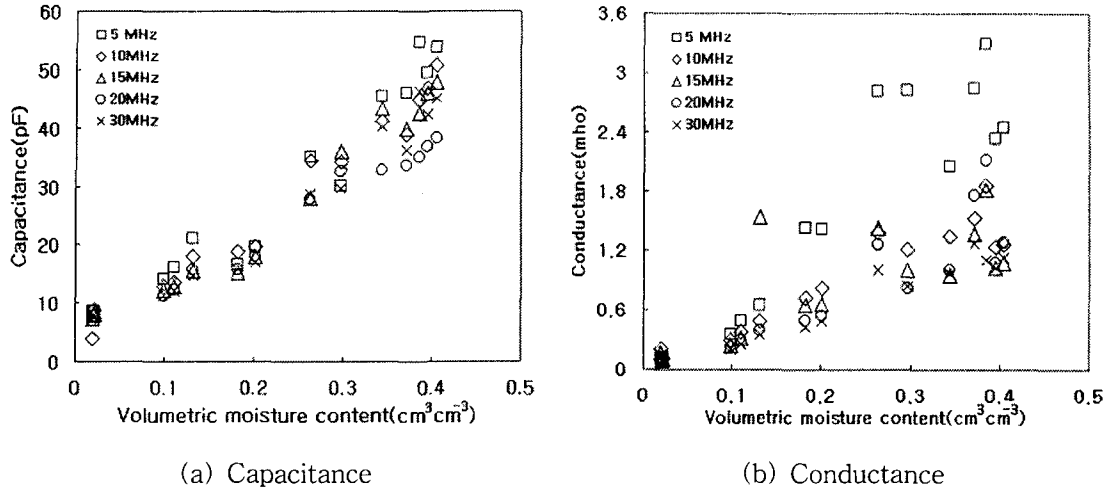


Fig.4. RF impedance vs. volumetric moisture content ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) of the soil type I at indicated frequency levels.

Table 2. Regression analysis results between the impedance of C-probe and volumetric moisture content of soil type I (eqn.(9) and (10)) at different frequencies and room temperature of $22 \pm 1^\circ\text{C}$.

Dependent variable	Frequency (MHz)	5	10	15	20	30
Capacitance	Correlation coefficient	0.983	0.987	0.992	0.992	0.993
	Root mean square error	0.0299	0.0257	0.0208	0.0207	0.0196
Conductance	Correlation coefficient	0.950	0.963	0.957	0.973	0.978
	Root mean square error	0.0507	0.0440	0.0405	0.0379	0.0339

나. 토양 함수비 측정회로 개발

그림 4 및 표 2에서 분석된 결과를 이용하여 토양 함수비를 측정할 수 있는 회로를 설계·제작하였다. 먼저 토양 수분측정 센서의 정전용량 변화를 발진회로의 주파수 변화로 감지하기 위하여 수정 발진자를 이용한 토양 수분측정 회로를 구성하였다. 측정 주파수는 비교적 제작이 용이한 5 MHz의 주파수로 하였다. 본 연구에서 제작된 수분 측정용 발진회로는 그림 5에서 보는바와 같이 수정발진자의 등가회로에 토양 수분측정용 센서가 병렬로 연결될 경우 수정발진자의 공진점이 변하는 원리(Millman etc, 1987)를 이용한 것으로서 식(5)에서 보는바와 같이 토양 수분의 정전용량(C_c) 만큼의 주파수 감소분(Δf)이 발생하며 그림

6에서 보는바와 같이 NAND gate를 이용하여 비교적 간단한 발진회로를 구현할 수 있다.

$$f'_p = f_p - \frac{C_o}{2\pi\sqrt{L_o C_o}} \cdot \frac{C_c}{C_1(C_1 + C_c)} = f_p - \Delta f \quad (5)$$

여기서, f_p 는 정전용량 센서가 병렬로 연결될 때의 공진주파수(MHz), f'_p 는 수정발진자의 공진주파수(MHz), C_o , C_1 , R_o , L_o 는 각각 수정발진자의 등가 정전용량(pF), 등가 저항(Ω), 등가 인덕턴스(H)를 나타낸다.

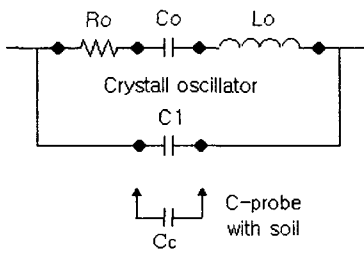


Fig. 5. Equivalent circuit of the crystal oscillator and moisture sensor

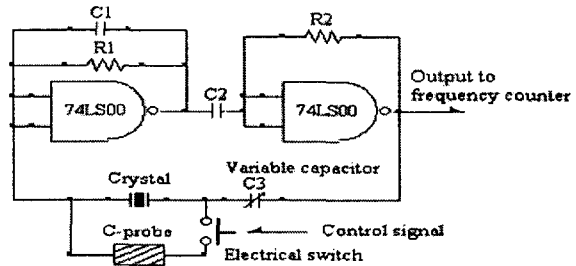


Fig. 6. Circuit diagram of the 5MHz oscillator.

따라서 그림 6에서 보는바와 같이 발진회로의 수정발진자에 정전용량 프로브를 병렬로 연결하여 발진주파수의 변화를 이용하여 토양 수분을 측정하였다. 이때 발진주파수의 측정은 상용 주파수측정기를 이용하였다. 토양 시료 II 및 III에 대하여 토양 함수비에 따른 발진주파수 변화를 측정한 결과 그림 7에서 보는바와 같이 거의 다항함수적으로 감소함을 나타내었는데 이러한 결과는 식(3)과 그림 4(a)의 결과로부터 충분히 설명되어 질 수 있다. 따라서 다음 식(6)과 같이 토양 함수비와 발진주파수 사이에 3차 다항함수 관계를 가정하여 회귀분석을 실시하였다.

$$\theta = af_p^3 + bf_p^2 + cf_p + d \quad (6)$$

여기서, a , b , c 는 회귀계수를 나타낸다.

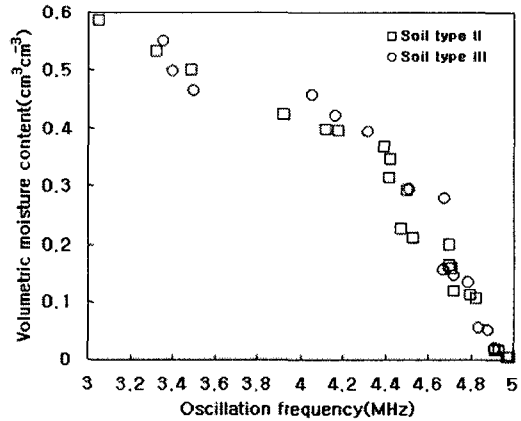


Fig. 7. Frequency variations of the oscillator depending on volumetric moisture content of the soil samples of 5MHz initial frequency and room temperature of $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Table 3. Regression analysis expressing the volumetric moisture content dependence of the oscillation frequency at initial frequency of 5MHz and room temperature of 5 MHz initial frequency and room temperature of $20\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Soil type	Regression coefficients				Determination coefficients	Root mean Square error
	a	b	c	d		
II	-0.097	1.019	-3.717	5.185	0.979	0.028
III	-0.143	1.507	-5.390	7.027	0.983	0.033
All samples	-0.107	1.114	-3.995	5.422	0.979	0.031

$$\text{Model} : \theta = af_p^3 + bf_p^2 + cf_p + d$$

표 3에서 나타난 바와 같이 회귀분석 결과 모델의 결정계수가 0.97이상을 나타내었으며 특히 토양 시료 I 및 II를 합한 경우에도 결정계수가 0.979로 나타나 본 연구에서 설계 제작된 정전용량 프로브와 발진회로를 이용할 경우 정확한 토양 함수비의 측정이 가능할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

토양 함수비를 측정하기 위하여 탐침형 정전용량 프로브를 설계·제작한 후 고주파 임피던스를 측정하였다. 토양의 고주파 정전용량과 토양 함수비 사이에 3차 다항함수 관계가 있는 것으로 나타났으며 기존의 TDR 방법의 경우와 유사한 결과를 나타내었다. 센서의 정전용량 변화를 발진회로의 주파수 변화로 검출하기 위하여 수정발진자를 이용한 5 MHz 발진회로를 제작하여 토양 함수비를 측정한 결과 모델의 결정계수가 0.97이상, RMS 오차는 $0.03\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 을 나타내어 정확한 토양 함수비의 측정이 가능한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

- 1) de Plater, C.V. 1955. A portable capacitance-type soil moisture meter. Soil. Sci. 80:391-395.
- 2) 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.
- 3) Millman, J., and C. C. Halkias. 1987. Electronic devices and circuits. McGraw-Hill Book Company, New York.
- 4) Thomas, A. M. 1966. In situ measurement of moisture in soil similar substances by fringes capacitance. J. Sci. Instrumentation. 43:21-27.
- 5) 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.
- 6) 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.