

# 정전용량 탐침을 이용한 토양수분 측정장치 개발

## Development of Soil Moisture Meter using Capacitance Probe

김기복(표준과학연구원)\* · 이남호 · 이종환(한경대) · 이승석(표준과학연구원)

Kim, Ki Bok · Lee, Nam Ho · Lee, Jong Whan · Lee, Seung Seok

### Abstract

This study was conducted to develop a soil moisture meter using capacitance probe. A parallel cylinder type capacitance probe (C-probe) was fabricated. The 5 MHz of crystal oscillator was constructed to detect the capacitance change of the C-probe with moist soil. A third order polynomial regression model for volumetric water content having oscillation frequency changes at 5 MHz as independent variables presented the determination coefficient of 0.979 and root mean square error of  $0.031 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  for all soil samples. A prototype soil moisture meter consisting of the sample container, C-probe, oscillator, frequency counter and related signal procession units presented the correlation coefficient of 0.987 and the root mean square error of  $0.032 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  as compared with the oven drying method for unknown soil samples.

### I. 서론

토양수분은 작물생육환경 측정 및 제어기술 뿐만 아니라 최적 물 관리 기술의 중요한 요소이다. 토양수분 측정방법으로는 석고블럭을 이용하는 방법, 수분장력계를 이용하는 방법, TDR 방법, 중성자 프로브법 등을 들 수 있다. 이들 방법 중 TDR 방식의 수분측정기가 현재 널리 사용되고 있는데 이 방법은 수분을 함유한 토양 내에 2~4선으로 구성된 탐침 형태의 전송선로를 설치하여 토양 내 수분의 변화 등에 따라 선로에서 반사되어 도달되는 전자기파의 시간을 측정함으로써 수분을 측정하는 방법이다. TDR 방식의 수분측정기는 센서의 형상이 비교적 단순하지만 전자기파를 발생시키기 위한 정밀급의 발진회로가 필요할 뿐만 아니라 관련 신호처리 회로가 다소 복잡하다. TDR 방법은 보통 건조된 토양의 유전상수는 2.7 정도로서 순수한 물의 유전상수(80 이상)보다 매우 작기 때문에 이러한 유전상수의 변화를 수분측정에 이용하며 (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).

한편 토양의 유전상수를 이용하는 다른 방법으로서 정전용량 프로브 방법이 있다(de Plater, 1955, Thomas, 1966). 정전용량 프로브 방법은 센서형상이 TDR 방법과 유사하지만 토양 내 수분변화에 따른 전기적인 변화값을 검출하는 원리가 다르다. 즉, 프로브(센서) 내 토양의 수분 변화에 따라 정전용량이 변하기 때문에 이러한 정전용량 변화를 검출함으로써 수분을 알 수 있는 방법으로서 TDR 방법보다 비교적 간단하게 측정장치를 구현할 수 있다.

이러한 토양 내 수분변화에 따른 정전용량 변화를 검출하는 방법으로서 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 고주파가 이용된다.

본 연구는 최근 그 중요성이 증가하고 있는 물관리 자동화 시스템에 필요한 토양수분 측정 장치를 개발하기 위하여 비교적 가격이 저렴하고 간편하게 토양수분을 측정할 수 있는 장치를 개발하기 위하여 수행되었다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 토양 시료의 조제

본 연구에서 사용된 토양은 3가지 종류의 토양으로서 입도 분포는 그림 1에서 보는 바와 같다. 토양 시료의 비중은 type I이 2.69, type II가 2.73으로 각각 분석되었으며 각각의 토양함수비는 용적수분 함수비로서 항온항습기에서 각각의 함수비가 조절되었다. 토양 함수비의 표준값은 공기 오븐 건조법(24-hours, 10 5℃)을 이용하여 결정하였으며 용적수분함량은 다음과 같이 표시된다.

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

여기서,  $\theta$ 는 용적수분함량( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $V_w$ 는 물의 부피( $\text{cm}^3$ ), 그리고  $V_T$ 는 토양의 전체부피( $\text{cm}^3$ )이다. 토양 수분측정 실험시 주위온도는  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수행되었다.

### 2. 수분측정 센서 및 토양 샘플홀더

토양 수분측정 센서로서 그림 2에서 보는 바와 같은 2선식 정전용량 프로브를 제작하였다. 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).

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

여기서,  $C_s$ 는 프로브의 이론적인 정전용량(F),  $\epsilon_0$ 는 진공에서의 유전율( $8854 \times 10^{12} \text{F/m}$ ),  $\epsilon'_s$ 는 토양의 유전상수,  $L$ 은 프로브의 길이(mm),  $a$ 는 프로브 직경(mm),  $b$ 는 프로브 사이의 간격(mm)이다.

토양수분에 따른 센서의 정전용량 변화를 측정하기 위하여 아크릴로 제작된 부피  $175\text{cm}^3$ 의 직육각형의 샘플홀더를 제작하여 수분을 함유한 토양을 채운 다음 정전용량 센서를 삽입하여 측정하였다.

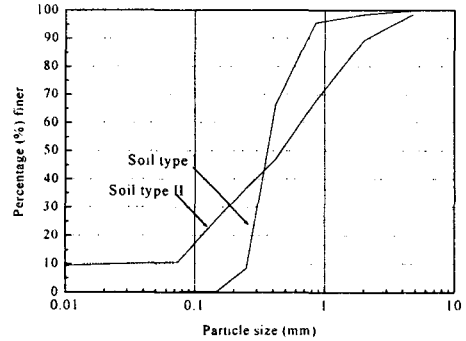


Fig 1. Grain size distribution of soil samples.

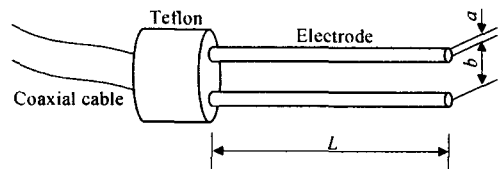


Fig. 2. Capacitance probe for soil moisture sensor.

### 3. 토양수분 측정장치 개발

토양 수분측정 센서의 정전용량 변화를 발진회로의 주파수 변화로 감지하기 위하여 수정 발진자를 이용한 토양 수분측정 회로를 구성하였다. 측정 주파수는 본 연구의 기초연구의 결과(김 등, 1998)인 5 MHz의 주파수로 하였다. 본 연구에서 제작된 수분 측정용 발진회로는 그림 3에서 보는바와 같이 수정발진자의 등가회로에 토양 수분측정용 센서가 병렬로 연결될 경우 수정발진자의 공진점이 변하는 원리(Millman etc, 1987)를 이용한 것으로서 식(3)에서 보는바와 같이 토양수분의 정전용량( $C_s$ ) 만큼의 주파수 감소분( $\Delta f$ )이 발생하며 토양수분 측정회로로서 수정발진자와 NAND gate를 조합한 발진회로를 제작하였다. 개발된 토양수분 측정장치는 그림 4에서 보는바와 같이 주파수 변화를 계측하기 위한 주파수 카운터와 연산을 위한 마이크로프로세서로 구성하였으며 최종적으로 용적수분함량이 LCD에 표시된다.

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

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( $\Omega$ ), 등가 인덕턴스(H)를 나타낸다.

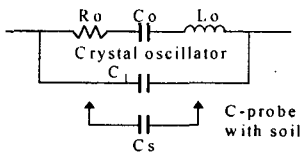


Fig. 3. Equivalent circuit of the crystal oscillator and capacitance probe.

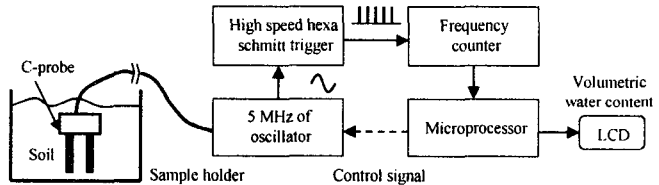


Fig. 5. Block diagram of the prototype soil moisture meter.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 함수비에 따른 발진주파수 변화

토양 함수비에 따른 발진주파수 변화는 그림 7에서 보는바와 같이 거의 다항 함수적으로 감소함을 나타내었는데 이러한 결과는 식(2)와 식(3)의 결과로부터 충분히 설명되어 질 수 있다. 즉, 함수비 증가에 따라 토양의 유전율이 증가하게 되고 이러한 유전율 증가에 따라 센서의 정전용량이 증가하게 된다(식 (2)). 따라서 정전용량이 증가함에 따라 식 (3)에 의해 발진회로의 발진주파수가 감소하게 된다.

### 2. 토양 함수비 측정모형 개발

상기의 결과를 기초로 하여 적절한 토양함수비 측정 모형을 개발하기 위하여 다음 식(4)과 같이 토양 함수비와 발진주파수사이 3차 다항함수 관계를 가정하여 회귀분석을 실시하였다.

$$\theta = af_p^3 + bf_p^2 + cf_p + d \quad (4)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 회귀계수를 나타낸다.

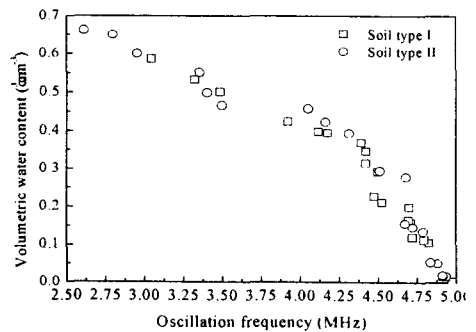


Fig. 4. Frequency variations of the oscillator depending on volumetric moisture content of the soil samples at 5 MHz of initial frequency.

표 1에서 나타난 바와 같이 회귀분석 결과 모델의 결정계수가 0.97이상을 나타내었으며 특히 토양 시료 I 및 II를 합한 경우에도 결정계수가 0.979로 나타났다. 개발된 토양수분 측정 모형 및 장치의 성능을 검증하기 위하여 토양 type 1 및 II의 미지의 함수비에 대하여 적용한 결과 그림 6에서 보는바와 같이 본 연구에서 개발된 토양수분 측정장치를 이용할 경우 정확한 함수비 측정이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Regression analysis expressing the volumetric moisture content dependence of the oscillation frequency at initial frequency of 5MHz.

Soil type	Regression coefficients				R <sup>2</sup>	RMSE
	a	b	c	d		
I	-0.097	1.019	-3.717	5.185	0.979	0.028
II	-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

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

#### IV. 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 내장한 토양수분 측정장치를 개발하여 미지의 시료에 적용한 결과 RMS 오차가 0.032 cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>로서 정확한 토양 함수비의 측정이 가능한 것으로 나타났다.

#### V. 참고문헌

- 1) 김기복, 이남호, 노상하. 1998. 고주파 임피던스를 이용한 토양수분함량 측정에 관한 연구. 한국농공학회지. 41(6), pp.79-88.
- 2) de Plater, C.V. 1955. A portable capacitance-type soil moisture meter. Soil. Sci. 80:391-395.
- 3) 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.
- 4) Millman, J., and C. C. Halkias. 1987. Electronic devices and circuits. McGraw-Hill Book Company, New York.
- 5) Thomas, A. M. 1966. In situ measurement of moisture in soil similar substances by fringes capacitance. J. Sci. Instrumentation. 43:21-27.
- 6) 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.
- 7) 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.

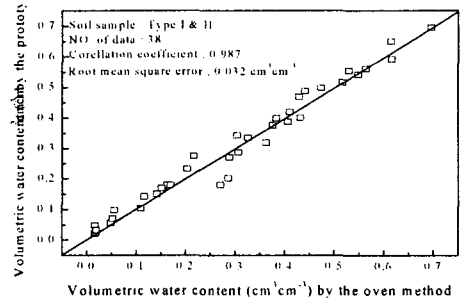


Fig 6. Performance test results of unknown volumetric moisture content of soil type I and II.