

# 화산회토양의 수분함량측정을 위한 Capacitance Soil Moisture Sensor의 Calibration

문경환\* · 좌재호 · 최경산 · 서형호 · 임한철 · 현해남<sup>1</sup>

농촌진흥청 국립원예특작과학원, <sup>1</sup>제주대학교 생물자원산업학부

## Calibrating Capacitance Sensor for Determining Water Content of Volcanic-Ash Soils

Kyung Hwan Moon\*, Jae Ho Joa, Kyung San Choi, Hyoeng Ho Seo,  
Han Cheol Lim, and Hae Nam Hyun<sup>1</sup>

*National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Jeju 690-150*

<sup>1</sup>*Faculty of Bioscience and Industry, Cheju National University, Jeju 690-150*

Capacitance soil moisture sensor is extensively used by soil research and irrigation management with its convenience and accuracy. This experiment was conducted to evaluate the acceptability of capacitance soil moisture sensor, named EnviroSCAN made by Sentek Ltd., in Jeju Island where volcanic ash soils are widely distributed, and to calibrate it to various soils with different amount of soil organic matter. For sensor calibration equation of volcanic ash soils, a logarithm function is better than a typical power function of non-volcanic ash soils. So there are possibilities of under evaluated in soil water contents in very wet and very dry conditions by using typical power function with volcanic ash soil areas. We suggested practical coefficients of typical calibration equation for using capacitance sensor in volcanic ash soils, also suggested equations for estimation of them with soil organic matter contents. The measurement of soil water content with a capacitance sensor can be affected by some soil characteristics such as porosity, soil organic matter content, EC, etc. So those factors should be controlled for improving the accuracy of measurement.

**Key words:** Capacitance soil moisture sensor, Calibration, Volcanic ash soil

### 서 언

토양 중 수분의 함량을 정확하게 측정한다는 것은 농업에서의 물 관리, 수리모델의 개발뿐만 아니라 대부분의 토양에 관한 연구에서 중요하다고 할 수 있다. 지금까지 토양수분함량의 측정은 일정한 부피의 토양을 105°C의 건조기에서 일정한 시간 동안 건조한 후 감소된 중량으로부터 수분함량을 계산하는 열중량법이 표준 방법으로 되어있으나, 이 방법은 측정에 시간이 많이 소모되고 토양시료를 파괴시키게 되므로 동일 장소에서 반복적으로 측정해야 되는 토양수분의 모니터링을 위해서는 이용될 수가 없다는 단점이 있다 (Roth et al., 1990). 이런 점을 개선하기 위하여 센서에 의해 비파괴적으로 토양수분함량을 지속적으로 측정하려는 노력이 오랫동안 진행되어 왔다.

지금까지 개발된 것 중 석고 블록을 이용하여 모세관 공극에 흡수된 수분의 전기전도도를 측정하는 석고블록법은 토양수분장력이 낮을 때에는 거의 모든 공극이 포화되어 측정이 부정확한 단점이 있고, 다공질체를 이용하여 수분장력을 측정하는 텐시오미터법은 작물 물관리 시 관개시점의 판정을 위하여 널리 쓰이고 있지만 수분장력이 1기압보다 높을 때에는 작동되지 않는다는 단점이 있다 (Oh et al., 1998). 한편, 중성자법은 매우 정밀하다고 알려져 있지만 측정기기가 고가이고 방사성물질을 취급한다는 문제점이 있어, 최근에는 TDR, Capacitance sensor 등 물질의 유전율 (Permittivity)을 이용한 토양수분센서가 개발되어 널리 쓰이고 있다.

유전율은 부도체가 외부에 전자기장이 주어졌을 때 얼마나 민감하게 반응하는 지를 나타내는 지표로서, 유전율의 일부를 나타내는 유전상수 (Dielectric Constant)는 물질마다 고유의 특성값을 나타낸다. 토양 내에서는 토양입자 (고체), 물 (액체), 공기 (기체) 등의 유전율은 각각 다르고, 그

접수 : 2011. 5. 12 수리 : 2011. 6. 16

\*연락처 : Phone: +82647412572

E-mail: khmoon@rda.go.kr

중 물의 유전율이 가장 크므로, 토양수분의 많고 적음에 따라 유전율이 영향을 크게 받게 된다. 따라서 토양에 일정한 전자기장을 주어 토양의 겉보기 유전율을 측정하면 토양 수분함량을 간접적으로 측정할 수 있게 된다 (Topp et al., 1980). 고체, 액체, 기체가 섞여 있을 경우 겉보기 유전율은 다음의 단순한 식으로 나타낼 수 있다고 알려져 있다.

$$\epsilon^{\alpha} = \epsilon_a^{\alpha} f_a + \epsilon_s^{\alpha} f_s + \epsilon_w^{\alpha} \theta \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_a^{\alpha}$ ,  $\epsilon_s^{\alpha}$ ,  $\epsilon_w^{\alpha}$ 는 각각 공기, 토양고체와 물의 유전율이고,  $f_a$ ,  $f_s$ 는 공기, 토양고체의 부피비를 나타내며,  $\theta$ 는 토양수분함량 (부피비)을 나타낸다.  $\alpha$ 는 0과 1사이의 계수로 대체로 0.5의 값을 취한다. 위 식에 의하면 상대유전율의 제곱근과 토양수분함량 간에는 비례관계가 성립하게 된다 (Gardner et al., 1998). 또는 공기 중의 전자기파의 주파수를 기준으로 물속에서의 주파수의 차와 토양 속에서의 주파수의 차간의 비율을 나타내는 Scaled frequency (SF)와 토양 중의 용적수분함량 간에도 일정한 관계를 나타내는데, 이것도 결국은 수분함량에 따른 겉보기 유전율의 변화를 이용하여 토양수분함량을 측정하는 것과 같은 원리이다 (Fares and Jenkins, 2007; Polyakov et al., 2005). 최근에는 토양의 깊이에 따른 수분함량의 변동을 실시간으로 추적할 수 있게 개발된 Multisensor capacitance probes가 개발되어 작물의 물관리나 토양수분의 연구에 다양하게 활용되고 있다. 이 중 호주의 Sentek (Ltd.)사에서 개발된 EnviroSCAN은 이용자가 원하는 대로 층위별로 센서를 추가하여 토양수분변화를 지속적으로 측정할 수 있는 장점도 있어 토양을 연구하는데 널리 이용되고 있다.

그러나 유전율을 이용하여 토양수분함량을 측정하는 방법은 토양용액의 전기전도도, 온도, 토양종류 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Fares and Jenkins, 2007; Robinson et al., 1998). 단순히 작물의 물관리 등 토양수분함량의 상대적인 변동이 중요할 경우에는 센서에서 제공되는 일반적인 default식을 이용하는 것으로도 충분하지만, 증발산량의 계산 등 토양수분함량을 정확하게 알아내기 위해서는 조사지점의 토양조건에서 Calibration 작업을 수행해서 토양수분함량의 변동을 추정해야 한다 (Geesing et al., 2004). 사전적인 의미로서 Calibration은

어떤 변수에 대하여 오랫동안 이용하여 표준적인 것으로 받아들여지는 방법과 새로운 방법 간에 정밀한 관계를 수립하는 것이라고 정의할 수 있다 (Bell et al., 1987). 이를 토양수분에 적용하면 시험대상인 토양을 이용하여 표준적인 측정방법에 의한 측정값과 새로운 Capacitance sensor 측정값 간의 명확한 관계를 찾아내는 것이라고 할 수 있다.

화산회토양이라고 불리는 Andisols은 Ammonium oxalate 침출성 Al +  $\frac{1}{2}$ Fe 함량이 높고, 용적밀도가 낮으며, 인산 흡착력이 높은 특징을 가지고 있다. 특히 제주도에 많이 분포하는 화산회토양들이 토양수분과 관련된 물리적 특징으로는 공극률과 유기물함량이 높은 토양이 많다는 점이다. 그 간의 연구에 의하면 토양수분을 측정하는 Capacitance sensor와 실제 토양수분함량 간의 관계도 화산회토양에서는 비화산회토양과 다르게 나타나고 있다고 보고된 바도 있다. 이는 화산회토양인 경우에는 상대적으로 높은 공극률을 나타내고 있고, 특히 미세한 공극이 많기 때문에 토양입자에 부착할 수 있는 수분의 양이 비화산회토양에 비하여 매우 다르기 때문이라고 해석되었다 (Regalado, 2004).

이 연구에서는 제주도에 많이 분포하는 유기물함량이 서로 다른 세 종류의 토양 (비화산회토 1, 화산회토 2종)을 시험재료로 하여, 수분함량과 Capacitance sensor를 이용하여 SF 값을 측정하고, 이를 바탕으로 적합한 Calibration식을 작성해보고, 최근 많이 이용되는 Multisensor capacitance probes가 화산회토 지역에서도 그 효용성이 있는 지 검증해보고자 하였다.

## 재료 및 방법

**공시 토양** 시험에 이용된 토양은 제주도 제주시에 위치한 온난화대응농업연구센터 시험포장내의 유기물함량이 각각 다른 암갈색 비화산회토양 (Dark brown soil, DBS), 농암갈색 화산회토양 (Very dark brown soil, VDDBS), 흑색 화산회토양 (Black soil, BS)의 세 가지를 대상으로 하였다. 각 토양의 유기물함량은 암갈색 비화산회토양이  $35 \text{ g kg}^{-1}$ , 농암갈색 화산회토양이  $70 \text{ g kg}^{-1}$ , 흑색 화산회토양이  $248 \text{ g kg}^{-1}$ 로 유기물 함량이 비교적 높은 토양이었으며, 각각의 토양에 대한 입경분포는 Table 1에 나타내었다.

**Table 1. Physical characteristics of experimented soils.**

| Soil types         | Soil texture | Percentage |      |      | Soil organic matter<br>( $\text{g kg}^{-1}$ ) |
|--------------------|--------------|------------|------|------|---|
|                    |              | Sand       | Silt | Clay |   |
| DBS <sup>†</sup>   | SiCL         | 9.9        | 51.8 | 38.3 | 35  |
| VDDBS <sup>‡</sup> | SiL          | 10.9       | 69.4 | 19.7 | 70  |
| BS <sup>§</sup>    | SiL          | 16.7       | 64.8 | 18.5 | 248   |

<sup>†</sup>Dark brown soil, <sup>‡</sup>Very dark brown soil, <sup>§</sup>Black soil.

**토양수분함량의 측정** 시험은 통풍이 잘되고 그늘진 하우스에서 수행하였다. 채취한 세 종류의 공시토양에 충분한 양의 물을 흡수시킨 다음 망사가 깔린 바닥에 넓게 펼쳐 시간이 지남에 따라 수분이 지속적으로 감소되도록 하면서 수분함량의 변화를 측정하였다. 토양수분의 측정은 처리 1일 후부터 3개월 정도의 기간에 토양이 건조되는 상태를 고려하여 시험 전에 잘 섞은 후 7회 수행하였고, 매회 중앙법에 의한 수분함량과 용적밀도를 측정하기 위한 코어 시료도 별도로 채취하였다. 토양수분함량을 측정하기 위한 Capacitance sensor는 호주의 Sentek (Ltd.)사에서 제작한 EnviroSCAN을 이용하였는데 이 센서는 국외에서도 측정의 안정성이 인정되고 있다 (Fares and Alva, 2000; Jabro et al., 2005). 용적수분함량을 측정하기 위하여 가로, 세로, 깊이가 각각 40, 40, 40 cm인 플라스틱 상자에 가급적 용적밀도가 균일하도록 토양을 충전하여 수분함량을 측정하였다. 토양수분센서로 수분함량을 측정한 후에는 측정 지점 주위에서 3개의 코어시료를 채취하였다. 용적밀도의 변동에 따른 수분함량 측정의 차이를 검정하기 위하여 1회 측정 시 각 토양에 대하여 3-5개 정도 서로 다른 용적밀도가 되도록 토양을 충전한 후 측정을 하였다. 용적수분함량은 100 ml 코어로 채취한 토양시료의 중량을 잰 후 이를 105℃의 건조기에서 24시간 이상 건조시킨 후 중량을 재어 용적밀도, 중량수분함량을 계산한 후 이로부터 환산하였다.

**토양수분센서의 SF의 측정** 토양수분센서의 Calibration 식을 알아보기 위하여 제조사에서 제시한 이론을 적용하였다. 토양수분함량과 반응하는 Scaled frequency (SF)는 공기와 물 매체 중의 주파수의 차와 토양수분과 물 매체의 주파수 간의 비율로서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$SF = (F_A - F_S)/(F_A - F_W) \tag{2}$$

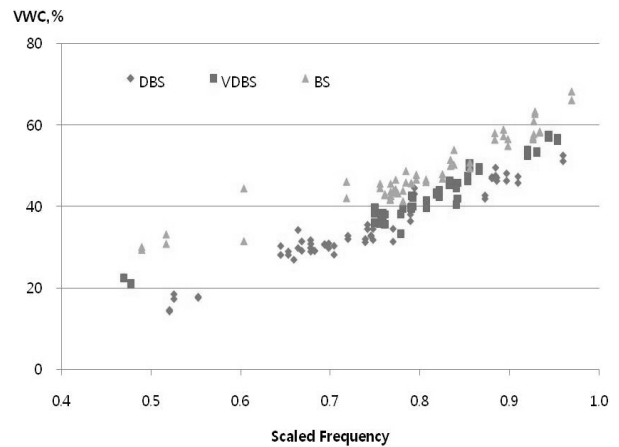
여기서,  $F_A$ 는 센서를 싸고 있는 튜브를 공기 중에 놓아

측정된 값,  $F_S$ 는 토양 중에 넣어서 측정된 값,  $F_W$ 는 물속에 넣어서 측정된 값이다. 따라서 SF는 공기와 물의 주파수 차이에 대한 공기와 토양의 주파수 차이의 비율을 의미하게 되며, 0보다는 크고 1보다는 작은 값을 가지게 된다. 계산된 SF값은 코어로 측정된 용적수분함량과 비교하여 이로부터 적합한 관계식을 도출하였다.

### 결과 및 고찰

Figure 1에는 암갈색 비화산회토양, 농암갈색 화산회토양, 흑색 화산회토양의 세 가지 토양에 대해서 센서에서 측정된 SF값과 용적수분함량의 관계를 나타내었다.

세 토양 모두에서 SF와 용적수분함량 간에는 일정한 관계가 있음이 나타나지만 세 가지 토양 간에는 그 경향이 다르게 나타나고 있는 점도 있었다. 측정된 수분함량의 범위



**Fig. 1. Relationship of scaled frequencies and volumetric soil water contents with three different types of soils. DBS, VDBS and BS represent dark brown non-volcanic ash soil, very dark brown volcanic ash soil, and black volcanic ash soil, respectively. BS, black volcanic ash soil; VDBS, very dark brown volcanic ash soil; DBS, dark brown non-volcanic ash soil.**

**Table 2. Functional coefficients for each calibration function for experimented soils.**

| Function types <sup>‡</sup> | Soil type <sup>†</sup> | Sample no. | Coefficient a |         |       | Coefficient b |         |       | R <sup>2</sup> |
|-----------------------------|------------------------|------------|---------------|---------|-------|---------------|---------|-------|----------------|
|                             |                        |            | a             | t-value | p     | b             | t-value | p     |                |
| Logarithm function          | DBS                    | 58         | 0.3550        | 22.9    | 0.000 | -0.4995       | -9.20   | 0.000 | 0.903          |
|                             | VDBS                   | 56         | 0.4751        | 25.4    | 0.000 | -0.9627       | -13.8   | 0.000 | 0.923          |
|                             | BS                     | 58         | 0.5667        | 28.5    | 0.000 | -1.3859       | -18.1   | 0.000 | 0.934          |
| Power function              | DBS                    | 58         | 0.1190        | -31.9   | 0.000 | 0.5207        | 27.9    | 0.000 | 0.936          |
|                             | VDBS                   | 56         | 0.0910        | -18.7   | 0.000 | 0.5848        | 17.2    | 0.000 | 0.888          |
|                             | BS                     | 58         | 0.0569        | -21.8   | 0.000 | 0.6841        | 20.3    | 0.000 | 0.903          |

<sup>†</sup>DBS, Dark brown soil; VDBS, Very dark brown soil; BS, Black soil.

<sup>‡</sup>Function types are  $Y=a \times \ln(X)+b$  for logarithm function,  $Y=a \times X^b$  for power function.

에서는 대체로 같은 SF값에 대하여 암갈색 비화산회토양, 농암갈색 화산회토양, 흑색 화산회토양 순으로 수분함량이 높았고, 그 차이는 수분함량이 낮아질수록 커지는 경향이 있었다. 이러한 결과는 Capacitance sensor를 이용하여 토양수분함량의 변화경향을 보고자 할 경우에는 큰 차이가 없을지라도 그 절대량을 정확하게 측정하고자 할 경우에는 세 가지 토양에서 각기 다른 형태의 Calibration 식을 적용하여야 함을 분명하게 나타내고 있다.

· logarithm function:  $Y = a \times \ln(X) + b$  (3)

· power function:  $Y = a \times X^b$  (4)

여기서 Y는 SF, X는 용적수분함량이고, a, b, c는 계수이다. Figure 2에는 각각 흑색 화산회토양, 농암갈색 화산회토양, 암갈색 비화산회토양에 대하여 용적토양수분함량과 SF간의 관계를 나타내고 최적함수를 지수식 형태 및 로그식 형태의 두 가지로 나타내었다. 암갈색 비화산회토양에서는 지수식이 로그식보다 결정계수 ( $R^2$ )값이 더 높게 나타났지만, 농암갈색 화산회토양과 흑색 화산회토양에서는 오히려 로그식이 지수식보다 결정계수가 높게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 대부분의 토양에서 Capacitance sensor를 이용할 때 지수식으로 나타내는 것이 적합하다는 그 간의 결과들을 고려할 때 화산회토양은 비화산회토양과 다른 경향을 나타내고 있음을 보여주고 있다 (Paltineanu

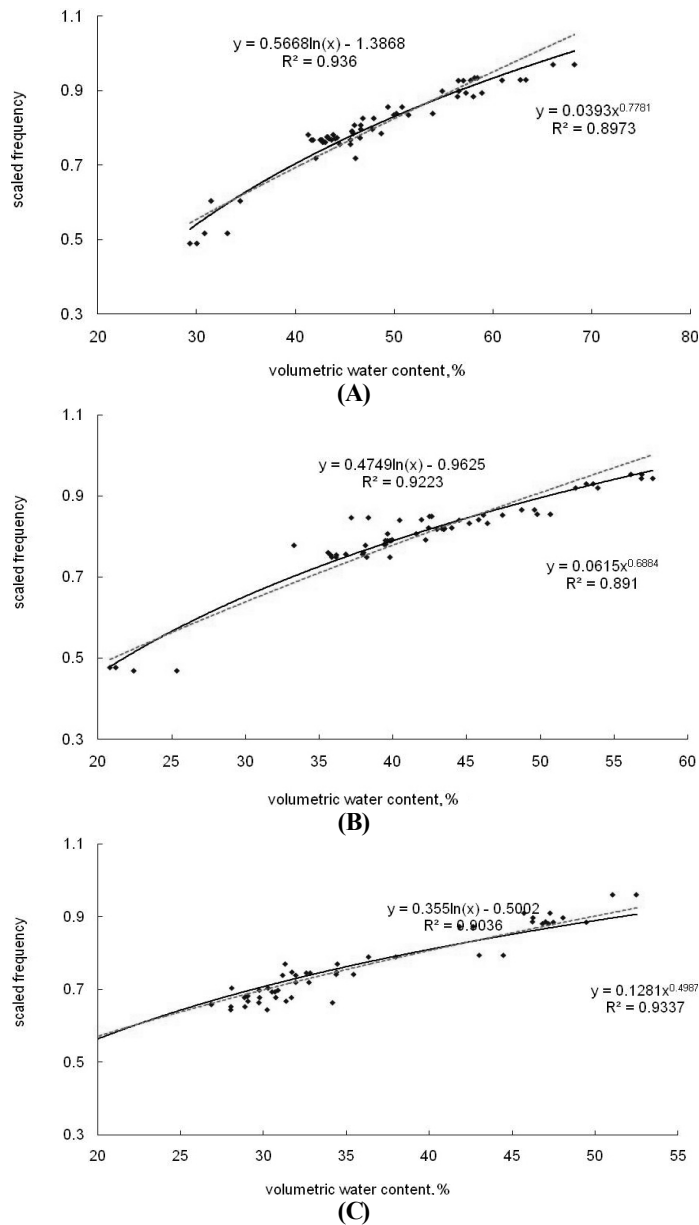


Fig. 2. Different fitted curves and equations for three types of soils - (A) black volcanic ash soil, (B) very dark brown volcanic ash soil, (C) dark brown non-volcanic ash soil. Dotted lines are for equation of power functions and solid lines are for equation of logarithmic functions, respectively.

**Table 3. Recommended coefficients of calibration equation for EnviroSCAN capacitance soil moisture sensor for volcanic ash soils.**

| Soil types <sup>†</sup> | a <sup>‡</sup> | b      | c       | R <sup>2</sup> |
|-------------------------|----------------|--------|---------|----------------|
| BS                      | 0.1568         | 0.4939 | -0.2599 | 0.9568         |
| VDBS                    | 0.1703         | 0.4721 | -0.1874 | 0.9480         |
| DBS                     | 0.1957         | 0.4040 | -0.0686 | 0.9648         |
| Default                 | 0.1957         | 0.4040 | 0.02852 | -              |

<sup>†</sup>BS, black volcanic ash soil; VDBS, very dark brown volcanic ash soil; DBS, dark brown non-volcanic ash soil.

<sup>‡</sup>a, b, c means coefficients of equation,  $Y = a \times (X^b + c)$ , Y: SF, X: volumetric water content.

and Starr, 1997). 또 이로부터 일반토양에 적용되는 지수식을 이용하여 토양수분함량을 추정하였을 때 화산회토양에서는 토양수분함량이 매우 많거나 또는 아주 낮아 건조한 상태에서는 센서로 측정된 토양수분함량이 토양수분함량의 절대값보다 낮게 추정되고, 중간 정도의 토양수분함량에서는 절대값보다 높게 추정될 것으로 판단되었다.

또한, 이러한 경향은 시험 토양 중 공극률이 가장 높고 토양유기물함량이 가장 많은 흑색 화산회토양에서 심하게 나타나므로 Andic soil properties와도 상관이 있는 것으로 추정되었다. 물리적으로는 화산회토양특성이 강해질수록 토양 내에서 매우 미세한 공극의 분포가 증가하는 경향이므로 이와 관련이 있는 것으로 추정되었다. 즉, 공극이 매우 작은 상태에서는 토양수분이 토양과 단단하게 결합되는 경향이 크게 되어 외부의 전기장에 주어졌을 때 물분자가 전기적 쌍극자로서 쉽게 반응하기가 어려울 수 있으며, 따라서 Capacitance sensor 에 대한 반응이 약하게 나타날 것이다. Bell et al. (1987)은 이와 유사하게 토양의 공극크기 분포에 따라 토양 종류별로 Calibration식이 다르게 나타날 수 있다고 한 바 있다. 이러한 가설이 맞다면 토양의 입도 분포가 매우 다르게 나타나는 경우-특히, 소공극이 많이 분포하는 경우-에는 Capacitance sensor을 이용에 매우 주의할 필요가 있을 것이다.

실험의 결과에서는 화산회토양에서 Capacitance sensor를 이용하여 토양수분함량의 절대값을 측정하거나 지속적으로 모니터링하고자 할 경우에는 센서 제작업체에서 제시하는 Calibration식을 이용하기 보다는 시험하고자 하는 현장에서 Calibration과정을 거쳐 식을 보정하여 이용하여야 할 것으로 판단된다. 현재 Sentek (Ltd.)사에서 제공하는 Capacitance sensor는 식 3의 형태를 기본으로 하여 사용자가 직접 지수식에 3개의 계수를 입력하여 Calibration식을 작성할 수 있도록 기회를 제공하고 있다. 다만 현재에는 지수식 형태의 Calibration식에 관해서만 제공되고 있다는 점을 감안해야 할 것이다.

· typical power function:  $Y = a \times (X^b + c)$  (5)

여기서, Y는 SF, X는 용적토양수분함량 (%), a, b, c는 사용자가 입력할 수 있는 계수이다. 실험 결과 화산회토양에서는 Calibration식이 로그식으로 표현되어야 하지만 현재 지수식 형태로만 제공되고 있으므로, 유효수분범위에서 지수식에 적합한 최적의 계수를 찾아서 이용하는 것이 실용적이다.

Table 3에는 실험한 세 가지 토양에 대하여 Sentek (Ltd.)사의 EnviroSCAN Capacitance sensor를 이용할 수 있도록 Calibration 식의 a, b, c의 계수값을 추정된 것을 나타내었다. 이를 보면 대체로 유기물함량이 높고 공극률이 커질수록 a값은 작아지고 b값은 커지는 경향을 보이고 있다. 반면 암갈색 비화산회토양은 a, b, c 세 개의 계수값 중에서 c값에서만 근소한 차이를 보이고 있으므로 우리나라에 흔히 있는 유기물함량이 낮은 일반적인 토양에서는 default로 제시되는 값을 이용하더라도 측정에 큰 오차는 없을 것으로 판단되었다. 반면, 토양의 공극률 분포가 일반적인 경우에서 많이 벗어나거나, 유기물함량이 높거나, 또는 토양 용액 중의 EC가 높은 지역에서 토양수분함량을 Capacitance sensor를 이용하여 정확하게 측정하고자 할 경우에는 그 지점에서 Calibration을 수행한 다음 이용하는 것이 바람직할 것이다.

## 요 약

최근 편리함과 측정의 정확성으로 인해 Capacitance sensor가 토양수분 연구나 물관리에 국제적으로도 널리 이용되고 있다. 이 연구는 Capacitance sensor (EnviroSCAN, Sentek Ltd.)가 화산회토양이 많이 분포하는 제주도 지역에서도 활용성이 있는지를 알아보기 위해 유기물함량이 다른 제주도의 대표적인 토양 종류를 이용하여 Calibration 시험을 수행하였다. 시험 결과 화산회토양에서는 비화산회토양과 달리 센서의 Scaled frequency와 토양의 용적수분함량 간에 Calibration식이 로그식 형태로 나타내는 것이 일반적으로 적용되는 지수식 형태로 나타내는 것보다 상관이 더 높게 나타났다. 또한 화산회토양이 많이 분포하는 지역에

서는 토양수분함량이 높아 습하거나 매우 적어 건조할 경우에는 Capacitance sensor에 의한 수분함량 측정값이 건조기를 이용한 수분함량 값보다 과소하게 측정될 수 있다. Capacitance sensor를 이용하여 화산회토양에서 토양 수분함량을 정확하게 측정하기 위해서 Calibration식에 적용될 수 있는 현실적인 계수값을 제시하였다. 또 현재 이용되는 EnviroSCAN capacitance probes의 활용성을 제고하기 위해서 계수값을 유기물함량별로 추정하는 식을 제시하였다. Capacitance sensor를 이용하여 토양수분함량을 정확하게 측정하기 위해서는 사전에 토양의 공극분포, 유기물함량, EC 등 측정여건을 파악하여 조절하는 것이 필요하였다.

## 인 용 문 헌

- Bell, J.P., T.J. Dean, and M.G. Hodnett. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II. Field techniques, evaluation and calibration. *J. Hydrol.* 93:79-90.
- Fares, A. and A.K. Alva. 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Sci.* 19:57-64.
- Fares, A.H. and H. Jenkins. 2007. Temperature-dependent scaled frequency: Improved accuracy of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:894.
- Gardner, C., T. Dean, and J. Cooper. 1998. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. *J. Agric. Eng. Res.* 71:395-403.
- Geesing, D., M. Bachmaier, and U. Schmidhalter. 2004. Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Aust. J. Soil Res.* 42:289-299.
- Jabro, J., B. Leib, and A. Jabro. 2005. Estimating soil water content using site-specific calibration of capacitance measurements from sentek enviroscan systems. *Appl. Eng. Agric.* 21:393-399.
- Oh, Y.T., D.S. Oh, K.C. Song, J.S. Shin, and J.N. Im. 1998. Application of dielectric sensor for soil moisture measurement. *Korean J. Soc. Soil Sci. Fert.* 31:85-94.
- Paltineanu, I. and J. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1576-1585.
- Polyakov, V., A. Fares, and M. Ryder. 2005. Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. *Vadose Zone J* 4:1004.
- Regalado, C. 2004. A physical interpretation of logarithmic TDR calibration equations of volcanic soils and their solid fraction permittivity based on Lichtenecker's mixing formulae. *Geoderma* 123:41-50.
- Robinson, D., C. Gardner, J. Evans, J. Cooper, M. Hodnett, and J. Bell. 1998. The dielectric calibration of capacitance probes for soil hydrology using an oscillation frequency response model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2:111-120.
- Roth, K., R. Schulin, H. Fluhler, and W. Attinger. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Wat. Resour. Res.* 26:2267-2273.
- Topp, G., J. Davis, and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Wat. Resour. Res.* 16:574-582.