

# 사양토에서의 용적수분 함량 측정을 위한 TDR 및 FDR 센서의 검증

허승오\* · 하상건 · 김정규<sup>1</sup>

국립농업과학원, <sup>1</sup>고려대학교 환경생태공학부

## Verification of TDR and FDR Sensors for Volumetric Soil Water Content Measurement in Sandy Loam Soil

Seung-Oh Hur,\* Sang-Keun Ha, and Jeong-Gyu Kim<sup>1</sup>

Soil Management Division, National Institute of Agricultural Science & Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea

<sup>1</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

This study was to verify and calibrate seven kinds of soil water sensors for volumetric soil water content(VSWC) measurement under field. Types of sensors were TDR (Time Domain Reflectometry) and FDR(Frequency Domain Reflectometry). Two kinds of TDR were TRIME(profile type), and Mini-TRASE(rod type). Five kinds of FDR were EasyAG, EnviroSCAN, PR-1(profile type), and WET-1(rod type). VSWC by TRIME and Mini-TRASE compared with VSWC by soil core showed the standard error of about 2.4%, and 1.4% which is the smallest value among all the sensors used in the experiment, respectively. The errors of EasyAG and EnviroSCAN analyzed with scaled frequency(SF) were about 2.6%, and 2.8% and those by 1 versus 1 correspondence were about 2.6%, and 2.6%, respectively. WET-1 showed about 2.0% of error, which is the smallest value among errors by FDR sensors. PR-1 with the error of about 4.7% should be hard for application in field. Therefore, users on soil water sensors have to take into consideration the errors of sensors revealed after the calibration for the correct measurement of VSWC in field. The rest except for PR-1 among the sensors could be used for VSWC measurement with 1.4~2.6% error.

**Key words:** Volumetric Soil Water Content, Soil Water Sensor, TDR, FDR

### 서 언

토양 내에서 물은 효과적인 용매로서 다양한 양분을 용해해 식물이 뿌리를 통하여 흡수 이용할 수 있도록 하는 역할을 하며 증발이나 증산을 통해 지구환경에 많은 영향을 끼친다(Scott, 2000). 이런 토양의 물은 토양수분 퍼텐셜이라는 에너지 차이에 의해 이동하는 특성이 있으며 토양수분 함량과의 관계를 나타내는 토양수분 특성곡선을 통해 에너지와 함량간의 그 관계를 이해할 수 있다(Yoo, 2002). 토양수분 함량은 중량수분함량과 용적수분함량으로 구분하는데, 중량수분 함량은 토양수분과 토양입자간의 무게비율로 나타내는 반면 용적수분 함량은 토양의 전체 부피중 물이 차지하는 부피의 비율을 나타내는 것이다(Yoo, 2002). 그러나 토양수분은 동일한 공간일지라도 시간이나 기

상 및 작물의 생육특성에 따라 달라지므로 토양수분의 이동특성이나 작물에 대한 영향을 정확히 판단하기 위해서는 토양수분 함량 변화에 대한 지속적인 측정이 필요하다. 실시간으로 수분 변화를 측정하기 위해 많은 연구자들은 토양수분 센서를 이용하고 있으며 이렇게 측정된 토양수분(용적수분) 함량을 통해 작물의 수분 수지나 뿌리를 통한 수분 흡수, 물과 양분의 이동, 관개효율이나 관개패턴, 증발산 등의 연구를 수행하고 있다(Blonquist et al., 2006; Canto et al., 2007; Coners & Leuschner, 2005; Galvez & Simmonds, 2006; Gong et al., 2006; McCann et al., 2007; Thompson et al., 2007). 그러나 우리나라에서는 Bae et al.(2003)에 의한 TDR을 이용한 전기전도도와 용적밀도 측정 관련 연구를 제외하고는 토양수분 측정센서를 통한 연구가 일반화되어 있지 않은 현실이며 이들 센서에 대한 이해도 부족한 형편이다. 따라서 본 논문에서는 주로 이용되고 있는 두 가지 형태(TDR, FDR)의 6종의 토양수분 센서의 정확성을 검

접 수 : 2009. 2. 16 수 리 : 2009. 3. 6

\*연락처 : Phone: +82312900336,

E-mail: sohur@rda.go.kr

증해 우리나라와 같은 환경에서 사용할 수 있는지를 살펴보고자 했다.

### 재료 및 방법

**토양수분 센서** 토양수분 함량 측정 정도를 파악하는 본 시험에 사용된 토양수분 센서는 7종의 센서를 선택해 실험에 이용했다. 가격이 비싼 것으로 알려진 Time Domain Reflectometry (TDR) 형태의 센서 2종과 5종의 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 형태의 센서를 이용했다. TDR 센서는 Soilmoisture (USA)에서 제작한 Mini-TRASE와 Imko (German)의 TRIME이고, FDR은 Sentek(Australia)에서 개발한 EasyAG, EnviroSCAN과 Delta-T (England)에서 제작한 PR-1과 WET-1 및 Decagon(USA)에서 제작한 ECH<sub>2</sub>O 센서였다. 센서의크기가 20cm인 TRIME과 10cm인 EasyAG, EnviroSCAN 및 PR-1은 프로파일형 토양수분센서로 투입관을 설치하고 깊이별로 측정하도록 제작된 센서이고, 센서의 크기가 20cm인 Mini-Trase와 10cm인 WET-1은 탐침(rod) 형태의 토양수분 센서로 탐침을 토양 내에 설치해 수분함량을 측정하는 센서이다. 센서의 크기가 20cm인 ECH<sub>2</sub>O는 탐침대신에 평면판의 막대모양으로 되어 있으며 역시 평면판을 토양 내에 삽입해 수분함량을 측정하는 센서이다(Fig. 1). 프로파일 형인 TRIME은 유전상수를 결정하기 위해 1MHz 에서 1 GHz까지의 전압펄스신호를 사용하며, EasyAG와 EnviroSCAN은 100MHz 근처의 주파수를 이용한다. PR-1은 토양의 유전율을 센서 내에서 제공근의 형태로 나타내게 되어 있다. 탐침형인 Mini-TRASE는 탐침의 길이에 따른 파장의 전송시간의 함수로 걸보기 유전율을 표현하며, WET-1은 토양의 유전상수를 결정하기 위해 20MHz의 파장을 사용한다.

#### 센서의 특성

##### TDR 센서

전기적인 펄스의 전송시간을 측정하는 TDR에 의한 토양수분 측정은 토양수분 함량에 따른 전자기파의

걸보기 유전율의 변화를 이용하는 방법으로 일정 장소에서 실시간으로 쉽게 측정할 수 있으며 탐침의 수가 두 개(Mini-Trase)이거나 세 개 또는 실린더 형태(TRIME)의 probe로 되어 있는 것이 일반적이다. 탐침은 전도체로 이루어져 있으며 그중 하나는 TDR 펄스를 수송하는 것이고, 나머지는 체적을 감지하거나 전기적인 경로를 결정하기 위한 가상의 접지역할을 하는 것이다. 전기장 및 편극률(electric susceptibility)과 관련하여 나타나는 유전율은 진공상태의 유전율에 대한 매질의 유전율의 비를 유전상수라고 하며 토양 내부에 존재하는 광물질의 유전상수 값은 3~5 정도이고 온도 의존성이 큰 물의 유전상수는 80으로 유전율 차이가 크게 나타난다. 이런 유전율의 차이를 기본으로 하여 토양수분함량에 따른 걸보기 유전율의 변화를 살펴보았던 Topp et al.(1980, 1988)은 여러 가지 토양에서 토양수분함량( $\theta_v$ )과 펄스의 이동시간으로부터 계산된 걸보기 유전율( $\theta_a$ )의 관계를 다음과 같이 다중 방정식으로 표현하였고,

$$\theta_v = (-530+292\epsilon_a-5.5\epsilon_a^2+0.043\epsilon_a^3)/10^4$$

Ledieu et al.(1986)은 토양수분 함량( $\theta_v$ )과 이동시간(t)간의 직접적인 관계로 표현했는데 대부분의 토양에서 다음과 같이 직선관계를 보인다고 했다.

$$\theta_v = 5.69t-17.58$$

그러나 이들 식을 적용하는데 있어 주의해야 할 점은 염류나 유기물 함량 등의 영향을 받는다는 것이다(Evet, 2002).

##### FDR 센서

FDR 센서는 전기용량(capacitance)을 이용한 방법으로 공명 진동수의 변화를 측정하며 발진기로 불리는 전자회로에 의해 반복적인 파장을 생성한다. 사인파의 형태가 일반적인 파장이며 다른 형태로는 삼각파나 바늘형태의 침파, 사각파 등이 있다(Evet, 2002). FDR의 파장대역은 직류전원의 유도효과를 피하기 위해 100 kHz보다 커야 하며 축전판 사이의 매질을 토양으로 하고 토양수분 함량에 따라 변화하는



Fig. 1. Sensors tested in the experiment (TRIME, EasyAG, EnviroSCAN, PR-1, Mini-TRASE, and WET-1 from the left).

주파수의 변화를 탐지하도록 되어 있다. FDR 센서는 탐침 형태 (WET-1), 실린더 형태 (EasyAG, EnviroSCAN, PR-1)이거나 평면형태 (ECH<sub>2</sub>O)로 되어 있는 것이 일반적이다. Dean et al.(1987)에 의해 개발된 실린더 형태는 전기용량을 겉보기 유전율로 나타내며 공명 진동수의 형태로 표현한다. 실린더 형태의 FDR센서에 대한 연구는 Evett & Steiner(1995)가 Sentry 200AP(Troxler, USA)를, Paltineanu & Starr(1997, 1998), Baumhardt et al.(2000)이 EnviroSCAN(Sentek, Australia)의 보정을 실시했으며 이 센서들은 scaled 과장(SF)을 이용하며 그 수식은 다음과 같다.

$$SF = (F_a - F_s)/(F_a - F_w)$$

F<sub>a</sub>는 공기 중에서 센서의 주파수이고, F<sub>s</sub>는 토양 내에서의 주파수, F<sub>w</sub>는 물에서의 주파수이다. FDR 센서도 TDR처럼 염류나 유기물 함량의 영향을 받는다.

**실험장소 및 측정** 본 실험을 수행하기 위해 경기도 수원시 농업과학기술원의 구내포장을 이용했으며, 토양은 본량통이며 토성은 사양토였다(Table 1). 시험구는 가로·세로 2m×2m의 크기로 했으며, 포화된 수분함량을 측정하기 위한 습윤구역과 건조상태의 토양수분 함량 측정을 위한 건조구역으로 구분했다. 습윤구역과 건조구역 간의 거리는 2m를 유지하고 2m×0.5m인 플라스틱 판을 토양에 매설해 습윤구역의 물이 건조구역에 영향을 미치지 않도록 했다. 각각의 시험구에서 프로파일 형태의 센서는 3반복으로 매설해 측정을 했고 탐침과 평면판 형태의 센서는 각각의 시험구에서 30회 이상 측정했다. 습윤구역 시험구에는 2 ton의 물을 공급한 다음 하루가 지난 후 측정을 실시했고, 건조구역은 실험이 있기 1개월 전부터 건조되도록 했다. 탐침 형태의 센서(Mini-TRASE, WET-1)



Fig. 2. Soil sampling by core for volumetric soil water content.

는 토양수분 함량의 측정은 지상으로부터 5 cm 이하의 깊이에서 센서를 이용해 토양용적수분함량을 먼저 측정하고 그 이후에 토양용적수분 함량 측정용 1인치 코어를 이용해 센서로 측정한 부위의 주변을 3반복으로 시료를 채취했으며(Fig. 2), 프로파일 센서 (TRIME, EasyAG, EnviroSCAN, PR-1)의 경우 센서가 묻혀 있는 깊이에 맞춰 시료를 채취했다. 채취한 토양은 저울에 평량해 건조기에 넣고 건조시킨 후 수분함량을 산출했다. 코어로 시료를 채취할 때는 센서의 측정용적과 측정부위를 같이 하기 위해 센서의 1/2 높이 지점에 코어의 가운데 부분을 일치시켜서 채취했다. 센서의 주위에서 3반복으로 실시한 코어 시료채취 간의 측정에 대한 표준오차(SE)는 Table 2에 나타났다.

## 결과 및 고찰

### 프로파일 형 센서

#### TRIME

TDR 센서인 TRIME은 Topp et al.(1980)이 제시한 유전율과 토양수분 함량간의 3차 관계식을 감안해 센

Table 1. Characteristics of soil in experimental site.

Soil Series	OM	Sand	Silt	Clay	Soil texture
	g kg <sup>-1</sup>	%	%	%	
Bonryang	13.4	59.4	33.5	7.1	Sandy loam

Table 2. Standard errors(SE) of data measured by core sampling.

Type	Sensors	Minimum SE(%)	Maximum SE(%)	n
Profile	TRIME	0.17	0.96	90
	EasyAG	0.10	1.14	72
	EnviroSCAN	0.05	0.95	81
	PR-1	0.35	0.87	30
Rod	Mini-TRASE	0.02	1.05	153
	WET-1	0.08	1.06	105

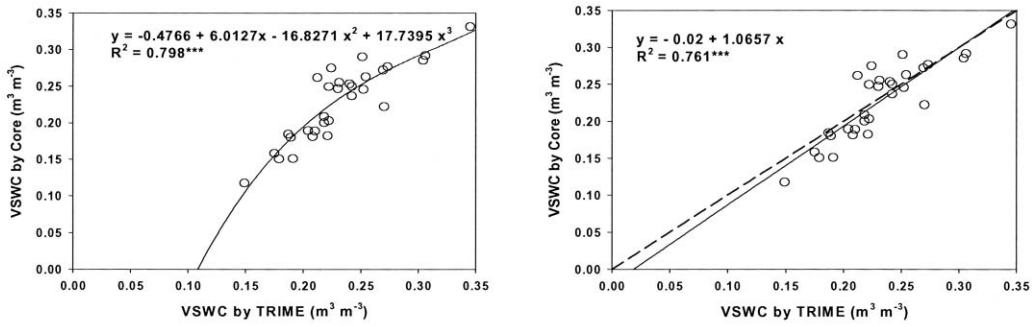


Fig. 3. Relation between volumetric soil water content(VSWC) measured by TRIME and soil core method.

서로 측정한 값과 코어로 실측한 값 사이의 관계를 Fig. 3의 좌측 그림과 같이 3차함수로 분석하고, 1:1 선에의 근접성을 확인하기 위해 직선관계로도 분석했다. 이것은 3차식의 관계에서는 결정계수( $R^2$ )가 0.798이며 표준오차가  $0.0243(m^3 \cdot m^{-3})$ 로 코어 측정값과 약 2.4%의 오차가 있음을 보여주고 있으며, 1차 선형식의 관계에서는 결정계수가 0.761이며 표준오차가  $0.0255(m^3 \cdot m^{-3})$ 로 코어 측정값과 약 2.6%의 오차가 있음을 보여주고 있다. 두 개의 경우 모두 p가 0.001보다 작아 고도의 유의성이 있음을 보여주고 있다.

EasyAG

프로파일 형 FDR 센서인 EasyAG는 50cm 깊이까지의 토양단면에 대한 측정이 가능하다. 센서 출고 시에 SF와 토양수분 함량간의 관계가 멱함수(power function)의 형태로 표현된 것을 감안해 센서로 측정 한 값과 코어로 실측한 값 사이의 관계를 Fig. 4의 좌측 그림과 같이 멱함수로 분석을 해보고, 1:1선에의 근접성을 확인하기 위해 직선관계로도 분석을 했다. EasyAG는 멱함수의 관계에서는 결정계수가 0.844이며 표준오차가  $0.0256(m^3 \cdot m^{-3})$ 로 코어 측정값과 약 2.6%의 오차가 있음을 보여주고 있으며, 직선 관계에서는 결정계수가 0.843이고 표준오차가  $0.0257(m^3 \cdot m^{-3})$ 로 코어 측정값과 약 2.6%의 오차가 있음을 보여주고 있다. 두 개의 경우 모두 p가 0.001보다 작아 고도의 유

의성이 있음을 보여주고 있으나(Fig. 4), 직선관계로 분석했을 경우 전체적으로 약간 과소 측정하는 경향을 보였다.

EnviroSCAN

동일한 제작사에서 EasyAG보다 먼저 생산된 EnviroSCAN은 프로파일 형 FDR 센서이며, 1m 깊이 까지 측정할 수 있다. 이 센서 또한 출고시에 SF와 토양수분 함량간의 관계를 멱함수의 형태로 나타냈으므로 그 관계를 살펴보고, 1:1 직선관계로도 분석했다. 멱함수의 관계에서는 결정계수가 0.811이며 표준오차가  $0.0278(m^3 \cdot m^{-3})$ 로 코어 측정값과 약 2.8%의 오차가 있음을 보여주고 있으며, 1:1 직선 관계에서는 결정계수가 0.834이고 표준오차가  $0.026(m^3 \cdot m^{-3})$ 로 코어 측정값과 2.6%의 오차가 있음을 보여주고 있다. 두 개의 경우 모두 p가 0.001보다 작아 고도의 유의성이 있음을 보여주고 있다(Fig. 5).

PR-1

프로파일 형 FDR 센서인 PR-1은 센서로부터 발생되는 출력 전압의 함수로 표현되는 유전율과 토양수분 함량을 직선 관계로 나타낸다. Figure 6에 나타난 측정횟수가 다른 토양단면 측정용 센서에 비해 작는데 그 이유는 측정시 투입관 내에서 방향을 조금씩 바꿀 때마다 측정값이 달리 나오는 경우가 많아서 그

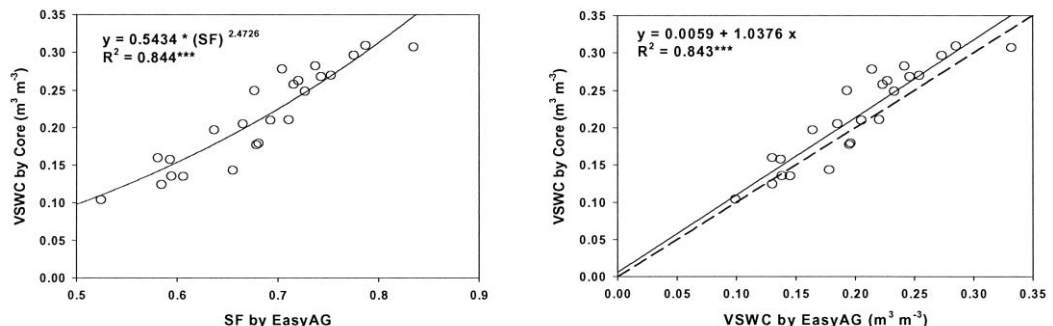


Fig. 4. Relation between volumetric soil water content measured by EasyAG and soil core method.

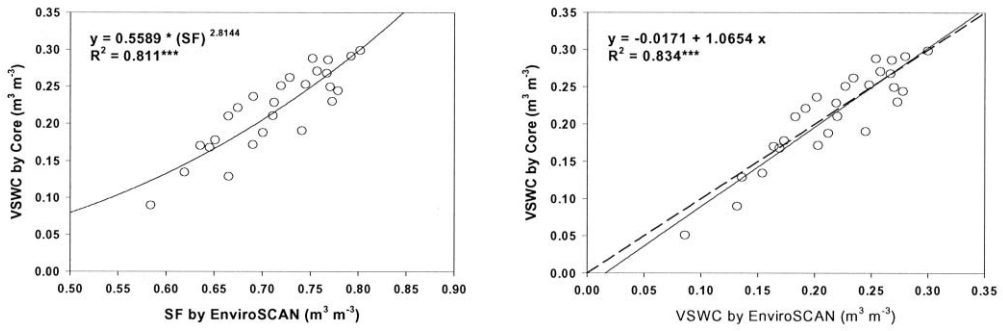


Fig. 5. Relation between volumetric soil water content measured by EnviroSCAN and soil core method.

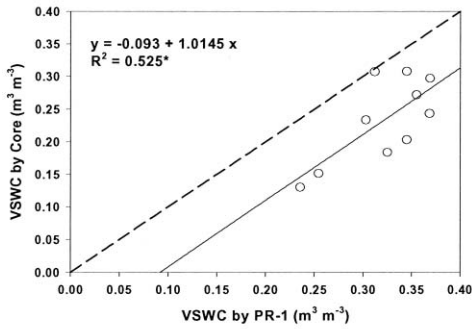


Fig. 6. Relation between volumetric soil water content measured by PR-1 and soil core method.

경우의 측정값을 제외했기 때문이다. 코어로 측정된 토양수분 함량과 비교한 결과 결정계수는 0.525로서 다른 단면 측정용 센서에 비해 낮은 값을 보였고, 표준오차도 0.0471로서 코어로 측정된 값과 약 4.7%의 오차를 보였다. 이는 다른 센서들에 비해 약 2배에 가까운 오차이며, 동일지점에서 방향을 조금씩 바꿀 때마다 달라지는 측정 값을 고려할 때 현장에서의 사용은 문제가 될 것이다.

탐침형 센서

Mini-TRASE

Mini-TRASE는 TDR 센서로서 센서에서 발생하는 파장의 피크가 토양 수분함량과 탐침의 펄스에너지

반사에 의해 생성되는 두 가지가 있으며, 이런 과정 분석을 통해 토양수분 함량을 결정한다. 센서로 측정된 값과 코어로 실측한 값을 비교했을 때 결정계수는 0.939이었으며 표준오차는 0.0143(m³ · m⁻³)로 코어 측정값과 약 1.4%의 오차가 있음을 보여주고 있다. 또한, p가 0.001보다 작아 고도의 유의성이 존재했으며, 오차는 실험에 사용했던 7종의 센서들 중에서 가장 작게 나타났으나 수분함량이 낮은 곳(20% 이하)에서는 core 측정방법보다 작게 측정하는 경향이였다.

WET-1

탐침형태의 FDR 센서인 WET-1은 유전율에 의한 굴절률과 토양수분 함량 간의 함수관계를 직선관계로 표현하기에 측정결과를 1:1 직선관계로 분석했다. 이 센서로 측정된 값과 코어로 실측한 값을 분석한 결과 결정계수는 0.855이었으며 표준오차는 0.0197(m³ · m⁻³)로 코어 측정값과 약 2.0%의 오차가 있음을 보여주고 있다. 또한, p가 0.001보다 작아 고도의 유의성이 존재했으며, 오차는 실험에 사용했던 FDR 센서들 중에서 가장 작게 나타났으나 수분함량이 낮은 곳(20% 이하)에서는 Mini-TRASE와 마찬가지로 작게 측정하는 경향을 보였다.

센서는 제작시에 발생하는 기계적 오차와 현장 사용시에 발생하는 측정오차를 감안해 보정(Calibration)을 실시하는 것이 바람직하지만, 이는 센서의 측정값

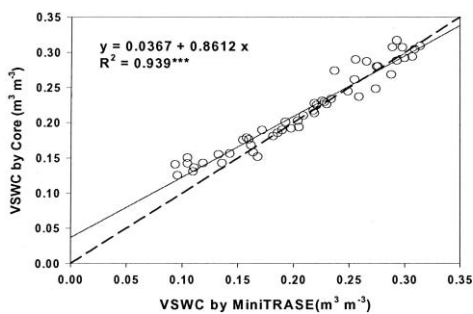


Fig. 7. Relation between volumetric soil water content measured by Mini-TRASE and soil core method.

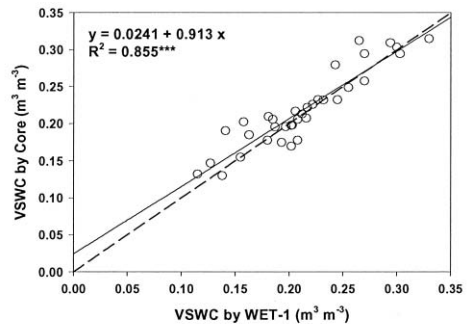


Fig. 8. Relation between volumetric soil water content measured by WET-1 and soil core method.

**Table 2. Statistical characteristics of verification on soil water sensors.**

Type	Sensors	Calibration Equation	R <sup>2</sup>	Standard Error(%)	n
Profile	TRIME	$y = -0.4766 + 6.0127x - 16.8271x^2 + 17.7395x^3$	0.798 <sup>***</sup>	2.43	30
	EasyAG	$y = 0.0059 + 1.0376x$	0.843 <sup>***</sup>	2.57	24
	EnviroSCAN	$y = -0.0171 + 1.0654x$	0.834 <sup>***</sup>	2.60	27
	PR-1	$y = -0.093 + 1.0145x$	0.525 <sup>*</sup>	4.71	10
Rod	Mini-TRASE	$y = 0.0367 + 0.8612x$	0.939 <sup>***</sup>	1.43	51
	WET-1	$y = 0.0241 + 0.913x$	0.855 <sup>***</sup>	1.97	35

x : Soil water content measured by sensor

**Table 3. Standard error by comparison of the measured data and the data estimated by application of calibration equation.**

Type	Sensors	Standard Error(%)	n
Profile	TRIME	2.55	30
	EasyAG	2.46	24
	EnviroSCAN	2.51	27
	PR-1	4.21	10
Rod	Mini-TRASE	1.41	51
	WET-1	1.91	35

을 그냥 사용할 수 있는지의 문제와 연결될 수 있기 때문에 센서로 측정시에 나타나는 값의 오차와 보정식에 의한 오차를 비교해 보아 판단하는 것이 우선적일 것이다. Table 2는 센서 값과 코어 측정값의 비교를 통해 표준 오차와 보정식을 구한 것이고, Table 3은 그 보정식에 의해 변경된 센서 값과 측정값을 비교해 표준오차를 구한 것이다. Mini-TRASE를 비롯한 5종의 센서는 보정식을 사용할 경우 표준오차가 개선된 반면 TRIME은 보정되기 이전에 비해 표준오차가 약간 상승했다. 이러한 결과는 TRIME의 경우에는 센서로 측정한 값을 바로 사용해도 무방하다고 판단할 수 있으며, 5종의 센서는 측정의 정밀도와 정확도 향상을 위해서 보정을 실시하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 이상과 같은 TDR, FDR 센서로 구분되는 6종의 토양수분 센서로 측정한 수분함량(x)을 코어를 이용한 토양 용적수분함량과 비교한 결과를 종합해 보면(Table 2, Table 3), 프로파일 형 토양수분 센서들인 TRIME, EasyAG, EnviroSCAN, PR-1의 측정오차가 탐침형인 Mini-TRASE, WET-1에 비해 큰 경향을 나타내고 있으며, 토양수분 센서 개별 측정 오차나 측정시의 문제점을 살펴보았을 때 6종의 센서 중 PR-1은 현장에서 사용하지 않는 것이 바람직할 것이다.

## 요 약

토양의 용적수분 함량을 현장에서 측정할 수 있어 토양 내 물 이동이나 관개관리에 효과적으로 이용할 수 있는 6종의 토양수분 센서에 대한 검정을 실시했

다. TDR 형태의 센서가 2종으로 토양단면 측정용인 TRIME과 탐침형태인 Mini-TRASE이었으며, 4종은 FDR 형태의 센서로 토양단면 측정용인 EasyAG, EnviroSCAN, PR-1과 탐침형태의 WET-1 센서였다.

코어로 측정한 용적수분함량과 비교한 결과 TRIME은 1차 선형식의 관계에서 코어 측정값과 약 2.4%의 오차를 나타냈고, Mini-TRASE는 코어 용적수분함량과 약 1.4%의 오차를 나타냈으며, 이 오차는 실험에 사용했던 7종의 센서들 중에서 가장 작은 값이었다. EasyAG는 SF로 분석했을 때는 코어 측정값과 약 2.6%의 오차를 나타냈고, 센서로 측정한 토양수분 함량을 코어수분함량과 직접적으로 비교했을 때 역시 약 2.6%의 오차를 나타냈다. EnviroSCAN은 SF로 분석했을 때는 코어 측정값과 약 2.8%의 오차를 나타냈고, 센서로 측정한 토양수분 함량을 코어수분함량과 직접적으로 비교했을 때는 2.6%의 오차를 나타냈다. WET-1은 센서로 측정한 값과 코어로 실측한 값 사이에 약 2.0%의 오차가 있음을 보여주고 있으며, 이것은 검정에 사용했던 FDR 센서들 중에서는 가장 작은 값이었다. PR-1은 측정시 access 튜브 내에서 방향을 조금씩 바꿀 때마다 측정값이 달리 나오는 경우가 많아 수분함량 측정횟수가 많지 않았으나 실측값과 약 4.7%의 오차를 보였다. 결론적으로 센서의 정확성을 검증하기 위해 사용된 6종의 센서 중 PR-1은 현장 측정에 문제가 있을 것으로 여겨진다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원

의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

## 인 용 문 헌

- Bae, B.S., W.J. Choi, G.H. Han, K.H. Han, S.H. Yoo, and H.M. Ro. 2003. Calculation of Bulk and Solution Electrical Conductivity of Soil Using Time Domain Reflectometry Measurements. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 36:1-7
- Baumhardt, R.L., R.J. Lascano and S.R. Evett. 2000. Soil material, temperature and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64:1940-1946.
- Blonquist Jr. J.M., S.B. Jones and D.A. Robinson. 2006. Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor, *Agricultural Water Management*, 84:153-165
- Canto, G., P.J. Tejada, J.C. Munoz, J.A. Sobrino, M.A. Soriano, E. Fereres, V. Vega and M. Pastor. 2007. Monitoring yield and fruit quality parameters in open-canopy tree crops under water stress. Implications for ASTER. *Remote Sensing of Environment*, 107:455-470.
- Coners, H. and C. Leuschner. 2005. In situ measurement of fine root water absorption in three temperate tree species-Temporal variability and control by soil and atmospheric factors. *Basic and Applied Ecology*. 6:395-405
- Dean, T.J., J.P. Bell and A.J. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part I. Sensor design and performance. *J. Hydrol.* 93:67-78.
- Evett S.R. and J.L. Steiner. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type moisture gauges based on field calibration.. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:961-968.
- Galvez, J.F and L.P. Simmonds. 2006. Monitoring and modelling the three-dimensional flow of water under drip irrigation, *Agricultural Water Management*, 83:197-208
- Gong, D., S. Kang, L. Zhang, T. Du and L. Yao. 2006. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements, *Agricultural Water Management*, 83:119-129
- Ledieu, J., P. De Ridder, P. De Clerck and S. Dautrebande. 1986. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *J. of Hydrology*. 88:319-328.
- McCann, I., E. Kee, J. Adkins, E. Ernest and J. Ernest. 2007. Effect of irrigation rate on yield of drip-irrigated seedless watermelon in a humid region, *Scientia Horticulturae*, 113:155-161.
- Paltineanu, I.C. and J.L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1576-1585.
- Scott, H.D. 2000. *Soil Physics - Agricultural and Environmental Applications*. p. 166-167. Iowa State University Press. Ames, USA.
- Starr, J.L. and I.C. Paltineanu. 1998. Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:114-122.
- Thompson, R.B., M. Gallardo, L.C. Valdez and M.D. Fernandez. 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors, *Agricultural Water Management*, 88:147-158
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16:574-582.
- Topp, G.C.; M. Yanuka, W.D. Zebchuk and S. Zegelin. 1988. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.* 24:945-952.
- Yoo S. H. 2002. *Soil encyclopedia*. Seoul National University Press. Seoul, Korea