

TDR, FDR 센서로 측정한 토양수분 함량의 정확성 검정

Verification of Soil Volumetric Water Content Measured by TDR, FDR Sensors

허승오*, 정강호**, 박찬원***, 하상건****, 김정규*****
Seung Oh Hur, Kang Ho Jung, Chan Won Park, Sang Keon Ha, Jeong Gyu Kim

요지

관개나 수분수지 규명을 위한 기본적인 자료는 토양수분 함량이다. 그러나, 포장상태에서의 토양수분 함량은 직접 측정하는 것이 쉽지 않기 때문에 많은 경우 건조기를 이용한 중량수분 함량 측정 방법을 이용하거나 토양수분 포텐셜 측정용인 텐시오미터를 이용한 토양수분의 에너지 특성을 관개에 활용하는 것이 현실이었다. 중량수분 함량은 시료를 채취해서 건조하기 때문에 시료채취 당시의 토양수분 함량을 아는 것이 어렵고, 토양수분 포텐셜은 에너지를 측정하는 것이기 때문에 이 역시 토양의 수분함량을 얻는 것이 불가능하다. 따라서, 최근에 이런 측정상의 어려움을 극복하기 위해 여러 나라에서 포장에서의 토양수분 함량을 직접 측정하는 다양한 센서를 개발하고 있고 있다. 그 중 몇 가지는 현재 우리나라에 공급되고 있는데, 가격 등의 문제로 별로 알려져 있지는 않다. 센서는 현장에서 수분함량을 파악할 수 있는 장점이 있기 때문에 관개에 직접 적용이 가능하며 자동화시설이나 수분수지 모형 산정에도 활용할 수 있다. 본 시험은 우리나라에 소개되어 있는 몇 가지의 토양수분 측정용 센서를 현장에서 코어를 이용해 측정한 용적수분 함량과 비교하여 센서의 정확도나 이용 가능성을 검정하고자 하였다.

코어를 이용해 실측한 토양 용적수분 함량과 비교하고자 7종의 센서를 선택해 실험에 이용하였다. 가격이 비싼 것으로 알려진 TDR 형태의 센서가 2종이었으며, 나머지 5종은 FDR 형태의 센서였다. TDR 센서는 Soilmoisture사에서 제작한 MiniTrase와 Imko 사의 Trime이고, FDR은 Sentek사에서 개발한 EasyAG, EnviroSCAN과 Delta-T사에서 제작한 PR-1과 WET-2 및 Decagon사에서 제작한 ECH₂O 센서였다. 실험방법은 본량사양토인 포장에서 건조한 상태인 시험구와 물이 포화된 시험구를 만들어 놓고, 그곳에서 센서 종류별로, 측정 깊이별로 토양의 용적수분 함량을 측정하고. 센서로 측정한 위치 바로 옆에서 코어를 이용해 토양시료를 채취하고 이를 건조기에 건조해 용적수분 함량을 측정하였다. 비교결과 TDR인 MiniTrase가 결정계수(r^2)가 0.964이고 표준오차(SE)가 0.01로 좋은 결과를 보여줬고, WET-2가 r^2 와 SE가 0.932와 0.013이였으며 EasyAG는 0.877과 0.0211, EnviroSCAN은 0.803과 0.0259의 값을 보였다. 일반적으로 토양수분 함량 측정오차가 1% 미만인 센서가 정확한 수분함량 해석을 유도할 것이지만 위의 센서 중 MiniTrase를 비롯한 4개의 센서 정도가 토양의 수분 함량을 측정하는데 유용할 것이라는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 토양수분, 토양수분 센서, TDR, FDR

* 정회원 : 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : sohur@rda.go.kr
** 정회원 : 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : stealea@rda.go.kr
*** 비회원 : 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : cwpark@rda.go.kr
**** 정회원 : 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : ha0sk@rda.go.kr
***** 비회원 : 고려대학교 생명환경과학대학 환경생태공학부 · E-mail : lemonkim@korea.ac.kr

1. 서 론

토양 내에서 물은 효과적인 용매로서 다양한 양분을 녹여 식물이 뿌리를 통하여 흡수 이용할 수 있도록 하는 역할을 하며 증발이나 충산을 통해 지구환경에 많은 영향을 끼친다. 따라서 토양이 물을 간직하고 있는 조건이나 상황을 이해한다면 물의 역할과 작물 또는 식물의 생장여건 및 증발산을 통한 에너지의 이동 등을 이해할 수 있을 것이다. 토양학에서는 이를 위한 토대를 토양수분함량의 이해로부터 출발한다. 토양수분 함량은 중량수분함량과 용적수분함량으로 구분하는데 중량수분 함량은 토양수분과 토양입자간의 무게비율로 나타내는 반면 용적수분 함량은 토양의 전체 부피중 물이 차지하는 부피의 비율을 나타내는 것으로 이들을 측정하는 가장 일반적인 방법은 토양시료의 채취를 통해 이루어진다. 그러나 토양수분은 동일한 공간일지라도 시간이나 기상 및 작물의 생육특성에 따라 달라지므로 토양수분의 수리특성이나 에너지 흐름 및 작물에의 영향을 정확히 판단하기 위해서는 변하고 있는 토양수분 함량을 계속 살펴야만 한다. 실시간으로 수분 변화량을 살펴보는 것은 시료를 채취하는 방법으로는 쉽지 않기 때문에 많은 연구자들은 토양수분 센서를 이용하게 되었으며 이렇게 측정한 토양수분(용적수분) 함량을 통해 작물의 수분 수지나 뿌리를 통한 수분 흡수, 물이나 양분의 이동, 관개효율이나 관개패턴, 증발산 등의 연구를 수행하게 되었다. 그러나 우리나라에서는 이런 토양수분 측정센서를 통한 연구가 일반화되어 있지 않은 현실이며 이를 센서에 대한 이해도 부족한 형편이라 할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 주로 이용되고 있는 두 종류(TDR, FDR)의 토양수분 센서의 정확성을 검정해 토양수분 측정에 어느 정도 이용할 수 있는지를 살펴보고자 했다.

2. 재료 및 방법

토양수분 센서 토양수분 함량 측정 정도를 파악하는 본 시험에 사용된 토양수분 센서는 7종의 센서를 선택해 실험에 이용했다. 가격이 비싼 것으로 알려진 TDR(Time Domain Reflectometry) 형태의 센서가 2종이었으며, 나머지 5종은 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 형태의 센서였다. TDR 센서는 Soilmoisture(USA)에서 제작한 MiniTrase와 Imko(German)의 TRIME이고, FDR은 Sentek(Australia)에서 개발한 EasyAG, EnviroSCAN과 Delta-T(England)에서 제작한 PR-1과 WET-2 및 Decagon(USA)에서 제작한 ECH₂O 센서였다. Trime과 EasyAG, EnviroSCAN 및 PR-1은 실린더 형태의 토양수분센서로 access 튜브를 토양 내에 묻어 놓고 깊이별로 측정하도록 제작된 센서이고, MiniTrase와 WET-2는 rod 형태의 토양수분 센서로 rod를 토양 내로 삽입해 측정된 값을 사용하는 센서이다. ECH₂O는 rod대신에 평면판의 막대모양으로 되어 있으며 역시 평면판을 토양 내에 삽입해 측정된 값을 이용하는 센서이다(Fig. 1).

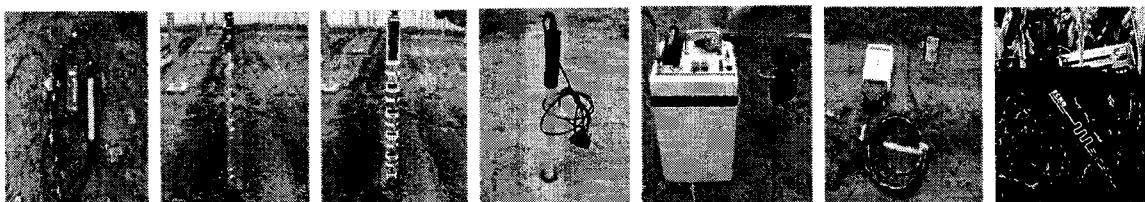


Fig. 1. Sensors for experiment (TRIME, EasyAG, EnviroSCAN, PR-1, MiniTrase, WET-2, ECH₂O)

센서의 특성

1) 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 탐침(rod)의 수가 두 개(MiniTrase)이거나 세 개 또는 실린더 형태(TRIME)의 probe로 되

어 있는 것이 일반적이다. 탐침은 전도체로 이루어져 있으며 그중 하나는 TDR 펄스를 수송하는 것이고, 다른 것은 체적을 감지하거나 전기적인 경로를 결정하기 위한 가상의 접지역할을 하는 것이다. 전기장 및 편극률(electric susceptibility)과 관련하여 나타나는 유전율은 자유공간의 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 토양이 젖거나 밀라감에 따른 걸보기 유전율의 변화를 살펴보았던 Topp 등(1980, 1998)은 여러 가지 무기토양에서 토양수분 함량과 펄스의 이동시간으로부터 계산된 걸보기 유전율의 관계를 단일 다중방정식과 선형함수로 표현하였고, Ledieu 등(1986)은 토양수분 함량과 이동시간간의 직접적인 관계로 표현했는데 대부분의 토양에서 직선관계를 나타냈다. 그러나 이들 식을 적용하는데 있어 주의해야 할 점은 EC로 대표되는 염류나 유기물 함량 등의 영향을 받는다는 사실이다.

2) FDR 센서

FDR 센서는 전기용량(capacitance)을 이용한 방법으로 공명 진동수나 그것의 변화를 측정하며 반복적인 파장을 생성해 내는 발진기로 불리는 전자회로에 의해 생성된다. 사인파의 형태가 일반적인 파장이며 다른 형태로는 삼각파나 바늘형태의 첨파, 사각파 등이 있다. 유의할 점은 TDR에서 이용되는 step 펄스와 유사한 짧은 상승시간을 가지는 파장이라 해도 그 방법이 파장의 여행 시간을 해석하지 않거나 파장이 probe의 탐침과 연관되어 나타나는 것이 아니라면 TDR 방법이 아니라 FDR 방법에 해당된다는 것이다. 즉, 도식적인 분석을 통해 파장의 안내자 역할을 하는 탐침의 길이에 따른 전송시간을 인식하는 것이 아니라 공명 발진기가 탐침을 따라 전송되는 반사 신호의 피크(피크는 탐침의 끝에서 반사가 일어난 후의 어떤 시간에 발생)를 인식하는 것은 TDR 방법이 될 수 없다. 수식적으로 말하면, 파장 $L(m/cycle)$ 과 공명진동수 $f(cycles/s)$ 를 곱해서 나타나는 값은 파장의 전송시간을 제공해 주는 것이 아니므로 이런 측정방식은 TDR이 아닌 FDR 방식이 된다. FDR의 파장대역은 직류전원의 유도효과를 피하기 위해 100 kHz보다 훨씬 커야 하며 전기용량 회로의 유전체로는 토양을 이용한다. 전형적인 발진기는 코일에 의한 유도기, 저항과 축전기로 구성되며 이것들은 종종 RLC나 LC회로로 불린다. Dean 등(1987)에 의해 처음 개발된 실린더 형태는 전기용량은 걸보기 유전율로 나타낼 수 있으며 공명 진동수의 형태로 표현한다. FDR 센서도 TDR처럼 EC나 유기물 함량의 영향을 받으며 그 정도는 TDR보다 더 할 수 있다.

실험장소 및 측정 본 실험을 수행하기 위해 경기도 수원시 농업과학기술원의 구내포장을 이용했으며, 토성은 본량사양토였다. 시험구는 가로·세로 2m×2m의 크기로 구성하되 포화된 수분함량을 측정하기 위한 습윤구역과 건조상태의 토양수분 함량 측정을 위한 건조구역으로 구분해 동일한 센서를 토양에 매설하고 측정을 실시했다. 습윤구역을 만들기 위해 하루 동안 습윤구역으로 구분된 장소에 물을 계속 공급해 충분히 젖은 상태를 유지하도록 했고, 건조구역은 실험이 있기 전부터 건조되도록 했다. 토양수분 함량의 측정은 센서를 이용해 토양용적수분함량을 먼저 측정하고 그 이후에 토양용적수분 함량 측정용 코어를 이용해 센서로 측정한 부위의 주변을 3반복으로 시료를 채취하고(Fig. 2) 채취한 토양을 평양해 건조기에 넣고 건조시킨 후 수분함량을 산출했다.

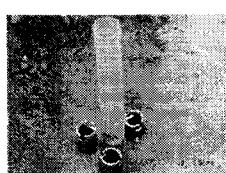


Fig. 2. Soil sampling by core for volumetric soil water content

3. 결 론

코어를 이용해 현장의 토양에서 측정한 토양수분 함량은 용적수분 함량으로 일정한 토양 부피 내에 수분이 얼마나 있는지를 알려준다. 용적수분 함량을 알면 수분모형에 적용되고 있는 여러 가지의 토양관련 자료를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있고 농업분야 같은 경우에는 관개량 산정 등의 관개와 관련된 결과 해석이 쉽다. TDR 2종과 FDR 5종의 수분함량을 코어로 측정한 값과 비교한 결과는 다음과 같다.

TRIME은 실린더 형태의 TDR 센서로서 유전상수를 결정하기 위해 대략 1MHz에서 1GHz까지의 전압펄스신호를 사용한다. Topp 등(1980)에 의한 TDR의 유전율과 토양수분 함량간의 관계가 3차식으로 표현된 것을 감안해 센서로 측정한 값과 코어로 실측한 값 사이의 관계를 Fig. 3의 좌측 그림과 같이 3차로 분석을 해보고 일반적인 직선관계로 분석을 해보았다. 그 결과를 살펴보면 실린더 형 TDR 센서인 TRIME은 3차식의 관계에서는 결정계수(R^2)가 0.7794이며 표준오차(SE)가 0.0242($m^3 \cdot m^{-3}$)로 측정값과 약 2.4%의 오차가 있음을 보여주고 있으며, 1차 선형식의 관계에서는 결정계수(R^2)가 0.7617이며 표준오차(SE)가 0.0254($m^3 \cdot m^{-3}$)로 측정값과 약 2.5%의 오차가 있음을 보여주고 있다. 두 개의 경우 모두 p 가 0.001보다 작아 고도의 유의성이 있음을 보여주고 있다.

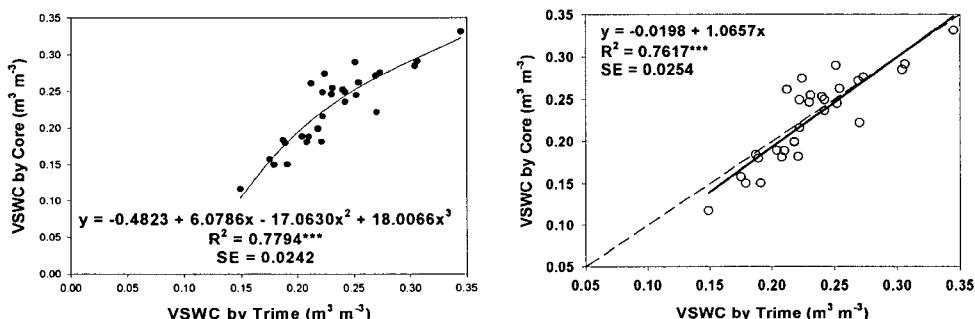


Fig. 3. Relation between volumetric soil water contents by TRIME and core

Easy AG와 EnviroSCAN은 동일한 회사의 다른 버전의 제품으로 실린더 형태의 FDR 센서다. 실린더 형태의 FDR센서에 대한 연구는 Heathman, G.C.(1993), Evett & Steiner(1995)가 Sentry 200AP(Troxler, USA)를, Paltineanu & Starr(1997), Baumhardt 등(2000)이 EnviroSCAN (Sentek, Australia)의 보정을 하고자 하는 실험을 실시했으며, 이 센서들은 scaled 과장(SF)을 이용해 토양수분 함량을 나타내는 장치다.

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

여기서, F_a 는 공기 중에서 센서의 주파수이고, F_s 는 토양 내에서의 주파수, F_w 는 물에서의 주파수로 EasyAG와 EnviroSCAN 둘 모두 이 SF를 표식자로 해서 토양수분 함량을 측정한다. 또한, EasyAG와 EnviroSCAN은 높이가 10cm로서 측정반경은 센서의 표면으로부터 EasyAG는 5cm, EnviroSCAN은 10cm이다. 이 센서들은 토양단면 내에서 깊이별로 측정이 가능한 센서로서 EasyAG는 10, 20, 30, 50cm 깊이를 측정할 수 있고 EnviroSCAN은 보통 1m 깊이까지 10cm마다 측정할 수 있다. 또한, SF로 나타내는 이런 센서종류는 반드시 공기 중에서의 주파수와 물 속에서의 주파수를 따로 측정해주는 표준화작업(Normalization)을 실시해야 한다. 그런 이후에 토양

수분 함량을 측정하고 측정 시의 주파수를 확보해야 SF에 따른 토양수분 함량을 표시할 수 있다. Figure 3과 4는 EasyAG와 EnviroSCAN으로 측정한 SF 값과 코어로 측정한 토양수분 함량간의 관계(좌측 그림)를 나타낸 것과 센서로 직접 토양수분 함량을 읽은 값을 역시 코어로 측정한 값과 비교(우측 그림)한 그림이다. EasyAG의 경우는 토양수분 함량을 SF로 결정하는 것이 결정계수를 더 높여주는 것으로 나타났으며 표준오차는 두 경우 모두 약 2.1%의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. EnviroSCAN은 SF로 수분함량을 나타내는 것 보다는 직접 측정한 토양수분 함량으로 나타내는 것이 결정계수 값을 더 높였고 표준오차도 약 2.6%로 0.16% 작게 나타났다.

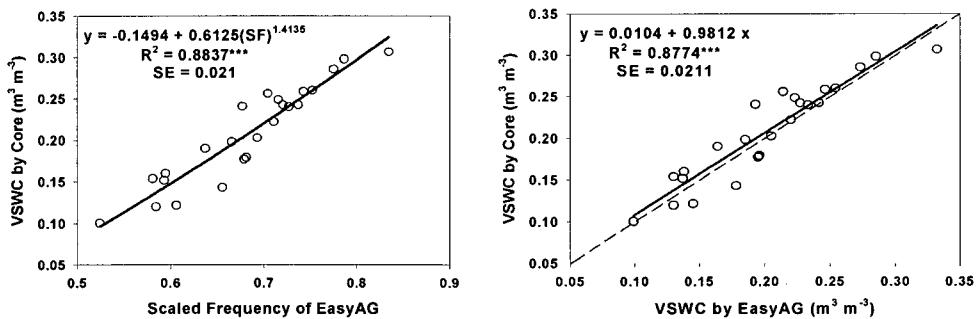


Fig. 4. Relation between volumetric soil water contents by EasyAG and core

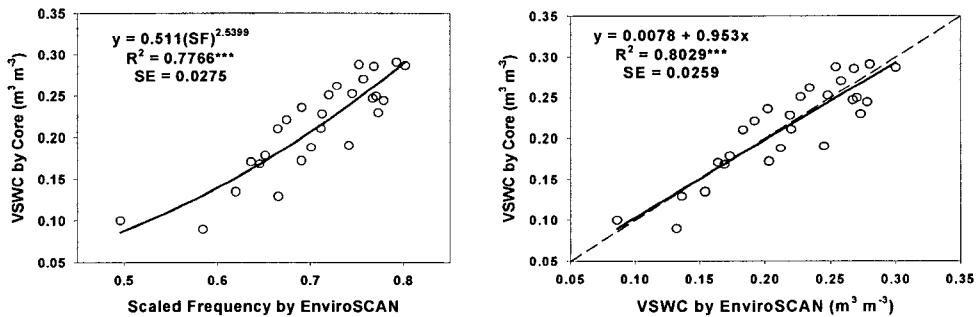


Fig. 5. Relation between volumetric soil water contents by EnviroSCAN and core

PR-1과 WET-2는 Delta-T사에서 개발한 다른 형태의 FDR 센서로 PR-1은 실린더 형태로 EasyAG와 EnviroSCAN처럼 10cm마다 깊이별로 토양 단면 내를 측정할 수 있는 형태이며 WET-2는 세 개의 탐침(rod)이 달려 있는 형태이다. PR-1으로 측정한 수분함량과 코어로 측정한 수분함량을 비교한 결과 PR-1의 측정 자료는 다른 센서들과는 달리 습윤지역과 건조지역에서의 수분함량 차이가 별로 없어 센서 자체의 정확성에 의심이 가는 결과를 얻어 다른 센서들이 측정 자료수가 30이었던 것과는 달리 10개의 측정자료로 분석을 실시했다. 결과적으로 PR-1은 실제 토양수분 함량에 비해 대략 1%부터 15%까지의 범위로 오차를 나타냈으며 전체적으로는 수분함량을 과다 추정하는 결과를 보였다. WET-2는 토양수분 함량, 온도, EC를 측정할 수 있는 센서로 측정 센서와 측정값을 보여주는 장치로 구성되어 있다. 주파수는 20MHz의 신호를 만들어 내고 측정범위는 수분함량이 80%, 온도는 40°C, EC는 $6 \text{ ds} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 측정할 수 있다. 그러나, 본 시험에서는 수분함량 위주로 측정결과를 비교했으므로 온도와 EC에 대해서는 따로 검증실험이 필요할 것이

다. WET-2로 측정한 수분함량과 코어로 측정한 수분함량을 직접 비교한 결과 결정계수는 0.932였고 표준오차는 0.013으로 측정값과의 오차가 약 1.3%를 나타냈으며 고도의 유의성을 보였다. 그러나, 건조한 상태에서는 측정값이 다소 과소평가되는 경향이었다.

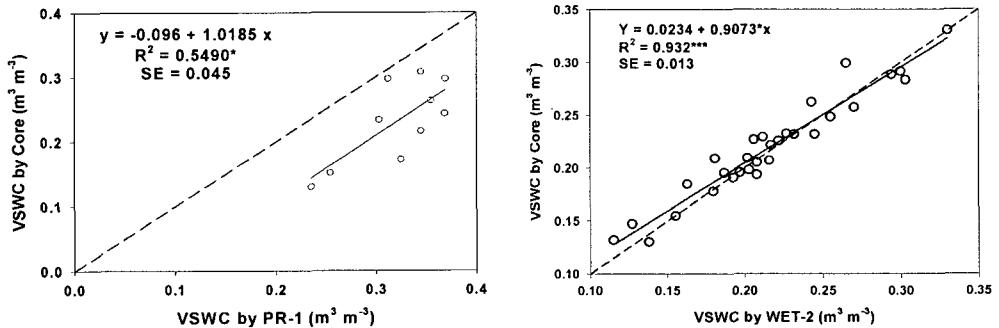


Fig. 6. Relation between volumetric soil water contents by PR-1, WET-2 and core

MiniTrase는 두 개의 탐침이 달린 TDR로서 토양수분함량을 펄스의 이동시간으로부터 계산하는 시스템으로 되어 있으며 PDA와 연결해서 측정결과를 볼 수 있도록 되어 있다. 측정수분 함량의 범위는 수분함량 100%까지이며 45°C 이상인 지역에서는 측정이 가능하지 않다. 이것은 다른 수분측정 센서들과는 달리 측정에 소요되는 장치들이 많은데 multiplexer가 반드시 있어야 한다. MiniTrase로 측정한 수분함량과 코어로 측정한 수분함량을 비교해본 결과 결정계수는 0.9637이었고 표준오차는 0.01로 측정값과 1%의 오차를 나타내 측정대상 센서 중에서 가장 좋은 결과를 보였다. 또한 통계적으로 고도의 유의성이 있었다(Fig. 7). 그러나, WET-2처럼 건조한 상태에서는 약간 과소평가하는 경향이 있었고, 과습한 조건에서도 약간 과대평가하는 경향이 있었다.

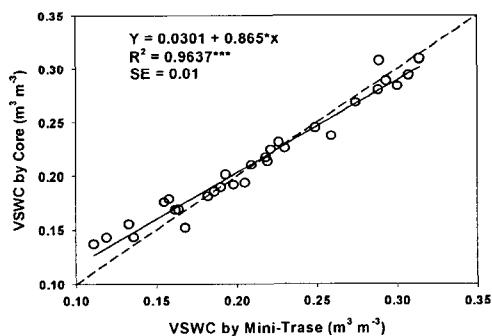


Fig. 7. Relation between volumetric soil water contents by MiniTrase and core

Decagon에서 제작한 ECH₂O는 평판형 타입의 FDR 센서로서 센서의 길이에 따라 세분화되며 본 시험에 사용한 평판의 길이가 20cm인 경우 측정가능 수분 함량은 40%까지로 제한적이며 5MHz의 주파수를 가진다. 본 시험을 통해 ECH₂O로 측정한 수분함량을 코어로 측정한 수분함량과 비교하고자 하였으나 센서로 측정한 값이 토양수분 함량이 유사하다고 판단되는 비슷한 위치에서 반복적으로 측정할 때마다 전혀 다른 값으로 읽혀져 코어로 측정한 수분함량과 비교를 할 수 없었다.

결과적으로 토양의 용적수분함량을 측정하는 7종의 센서를 코어를 이용한 토양의 용적수분함량과 직접비교를 통해 수분함량 측정에 사용할만한 센서를 검증하고자 한 결과 탐침형태 TDR인

Mini-Trase와 탐침형태 FDR인 WET-2가 비교적 좋은 측정결과를 보여주었고 토양단면을 깊이 별로 측정하는 EasyAG, EnviroSCAN도 토양의 깊이마다 측정하는 편리성을 참고할 때 토양수분 함량 센서로 이용가능하다는 결론을 얻을 수 있었다. Access 튜브 내로 센서를 삽입시켜 토양단면의 수분함량을 측정할 수 있는 TDR의 일종인 TRIME는 우리나라 조건에서는 약간의 개선이 필요하다고 판단되었으며 PR-1과 ECH₂O는 우리나라 환경에서 측정을 하기 위해서는 새로운 방법이 모색되어야 할 것이라고 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 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(6):1940-1946. Nov.-Dec.
2. Dean, T. J., J. P. Bell, and A. B. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part I. Sensor design and performance. *J.Hydrol.* (Amsterdam) 93:67-78.
3. Evett, S. R. and J. L. Steiner, 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59(4):961-968.
4. Heathman, G. C. 1993. Soil moisture determination using a resonant frequency capacitance probe. Paper no. 931053. ASAE, St. Joseph, MI. Field calibration for 200AP.
5. 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.
6. 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(6):1576-1585.
7. 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 (3), 574-582.
8. Topp, G. C., and W. D. Reynolds. 1998. Time domain reflectometry: A seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil Tillage Res.* Vol. 47. Pp. 125-132.