

TDR을 이용한 토양함수비 측정
Mesurement of Soil Water Content using
Time Domain Reflectometry(TDR)

김 경 한* (건국대) · 윤 춘 경 (건국대)
Kim Kyoung Han · Yoon Chun Geong

ABSTRACT

Considerable progress has been made in the application of time-domain reflectometry(TDR) to measurement of soil water content. The TDR provides a means of monitoring the water content of soil over a wide range of values, in the field and in the laboratory. The TDR measures the volumetric moisture content of the soil via a bureid sensor(probe). Probes can be buried and monitored remotely and an immediate result can be obtained. In addition to, the results are very reliable.

I. 서론

도로의 성토나 건축물의 시공에 있어서 함수량은 매우 큰 비중을 차지한다. 또한 작물의 최대 수확을 위한 관개계획에서 관개속도는 주로 토양의 투수계수에 의하여 결정 되지만 관개시간과 양은 토양 함수량과 경우에 따라서는 토양염도에 의하여 결정된다. 이에 정확하고 신속한 함수량의 측정이 요구되어진다. 일반적인 함수량 측정법인 Dry Oven건조 방법은 토양시료를 채취하여 측정하기 때문에 많은 시간과 인력이 필요하고 그 측정방법에 따른 오차가 커진다. 이에 최근에는 Time Domain Reflectometry(TDR)을 이용한 토양 함수량 측정 방법에 대두되고 있는데 TDR은 한 개의 탐침으로 토양함수량과 토양염도를 측정하는 새로운 기법이다. TDR을 이용한 방법은 이미 국내에서 많은 분야에 걸쳐 연구가 진행되었다. 그러나 국내의 지반과 토양여건에 따른 함수량 측정에서 TDR을 이용한 함수량 측정시의 신뢰성에 대한 연구가 아직 미흡하다고 판단되어 본 논문에서는 이 TDR방법에 의한 토양함수량 측정에서의 신뢰성을 검토하였다.

1998년도 한국농공학회 학술 박람회 논문집 (1998년 10월 24일)

II. 재료 및 방법

2. 1. TDR의 기본개념

TDR은 크게 파형 발생기와 오실로스코프로 구성되어 있다. 파형 발생기에서 발생된 구형의 전자기파가 전송선을 통하여 흐르게 되는데 전자기파가 전송선을 통하여 흐르던 중 전송선의 단면이 변하면 그 지점의 임피던스가 변하게 되어 그 구간에서 전자기파가 반향되어 오게 된다. 이때의 파형을 주파수 영역과 대별되는 용어로서 시간영역에서는 모든 특성을 시간으로 표시한다. 즉, 전송선을 통과하는 전자기파의 전파속도를 알고 있으면 반향시간을 통하여 전송선의 길이를 구할 수 있다. TDR은 이러한 원리를 이용하여 매설된 전선의 형상이상점이나 단락점을 검사하는데 사용하는 장치로 고안된 것이나 전자기파가 지나가는 지점의 유전율이 변하면 반향되는 파의 전파속도가 변하는 성질을 이용하면 토양의 함수량 측정에 응용할 수 있다. TDR은 초기에 액체의 복잡한 유전율 상수를 측정하는 장치로 사용되었으나 그후 토양을 포함한 여러 물질의 유전특성을 측정하는 장치로 사용되어지고 있으며 특히 최근에는 TDR을 이용한 토양의 함수량을 측정하는 연구들이 보고되고 있다(Topp, 1980 ; Davis, 1985).

2. 2. TDR의 보정

TDR장비로 함수비를 측정 하기전에 탐침의 길이와 특성에 대한 보정을 실시하여야 하며 보정식은 다음과 같다.

$$\Delta t_p = \Delta t_o + \Delta t_s - \Delta t_o + Ln_{aa}/c \text{ -----(1)}$$

$$\Delta t_p = \Delta t_o + \Delta t_s = \Delta t_o + Ln_{aw}/c \text{ -----(2)}$$

여기서 Δt_p 는 총반향시간이고, Δt_o 는 액폭시 레진에서의 반향시간 그리고 Δt_s 는 토양속에서의 반향시간이다. L은 탐침의 길이 c는 자유공간에서 전자기파의 전파속도($3.0 \times 10^8 \text{m.sec}$)이다. 또한 n_{aa} 는 공기중에서의 굴절률이고 n_{aw} 는 물속에서의 굴절률이다. 여기서 n_a 는 다음식으로 표현된다.

$$n_a = (Ka)^{1/2} \text{ -----(3)}$$

여기서 Ka는 유전율인데 공기에서는 1이고 물속에서는 다음식과 같이 표현된다.

$$Kaw = 87.740 - 0.40008T + 0.398 \times 10^{-4}T^2 - 1.410 \times 10^{-6}T^3 \text{ -----(4)}$$

식(4)에서의 T는 물에서 측정할때의 물의 온도를 나타낸다. 위와 같은 식으로 탐침의 실제적인 길이(L)와 반향시간(Δt_o)에 대한 보정을 실시한후 그 값을 함수비측정시에 사용하여야 한다.

2. 3. 토양함수량 측정

반향파를 통하여 1차 반향점, 2차 반향점이 생기며 이 두 값의 차이에 의하여 반향시간을 분

석하게 된다. 토양에 탐침이 설치되었을 경우 전자기파가 반향되는 전기적 특성은 다음과 같다. 탐침을 토양에 설치하면 동축선과 토양이 만나는 지점에서 임피던스의 변화가 발생하여 전자기파가 1차 반향되며, 탐침을 되돌아오면서 다시 임피던스의 변화가 발생하여 2차 반향이 일어난다. 이 두 반향점 사이는 전자기파가 탐침을 지나는 구간으로 토양의 함수량 변화에 따라 탐침주위의 유전율이 변하므로 2차 반향점에서 반향되어 돌아오는 시간에 변화를 가져온다. 이때 TDR을 이용하여 측정하는 것은 탐침을 통과하여 반향 되는 전자기파의 반향시간이다. 반향시간을 이용하여 함수량을 산정하기 위해서 먼저 함수량에 따른 유전율상수를 계산하게 된다. 이 때 유전율상수 K_a 와 탐침의 길이 그리고 반향시간은 다음식과 같은 관계를 가지고 있다.

$$K_a = \left\{ \frac{c \Delta t_s}{L} \right\}^2 \text{-----}(5)$$

여기서 c 는 자유공간에서의 전자기파의 전파속도($3.0 \times 10^8 \text{m/sec}$)이고 Δt_s 는 TDR 신호의 전달 시간이며 L 은 흙속에 묻혀있는 탐침의 길이를 의미한다.

Topp등은 유전율상수로부터 함수량을 추정하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = \frac{(-530 + 292 K_a - 5.5 K_a^2 + 0.043 K_a^3)}{10^4} \text{-----}(6)$$

하지만 Herkelrath(1991)에 의하면 유기물을 많이 함유하고 있는 토양에서는 위의 식을 사용할 수 없다고 보고하고 있다.

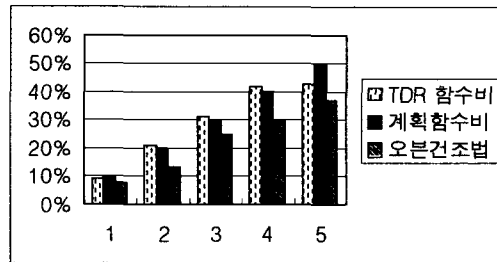
2. 4. 탐침의 형상에 따른 특성

토양 내 임피던스 변화를 측정하기 위해 설치되는 탐침의 기하학적 모양은 여러 형태로 제안되었는데 탐침형상의 기본적인 가정은 TDR과 탐침을 연결하는 동축케이블의 기하학적 모양을 유지시켜 주는 것이다. 탐침의 숫자에 따라 2선식, 3선식, 4선식으로 나눌 수 있다. 2선식 탐침을 이용하여 함수량을 측정하는 경우에는 평행한 두 선의 형상이 탐침과 연결되는 동축선과 그 형상이 달라 동축선과 탐침이 만나는 경계에서 적지 않은 신호의 손실이 발생하게 되는데 이문제를 해결하기 위하여 간혹 임피던스 일치장치를 설치하기도 한다. 하지만 탐침이 짧은 경우($\leq 15\text{cm}$)에는 임피던스 불일치로 인한 잡음이 발생하여 신호 해석시 문제가 되기도 한다. 3선식이나 4선식 탐침은 동축전송선의 기하학적인 모습을 유지하는 모습인데 임피던스 불일치로 발생하는 필요없는 잡음을 감소시켜줄 뿐만 아니라 임피던스 일치장치를 필요로 하지 않는 장점이 있다. TDR의 성능은 일반적으로 대역폭으로 나타내는데 여기서 대역폭이란 직류 혹은 전압이 0인 값으로부터 가장 높은 진동수까지의 진동범위를 나타낸다. TDR의 대역폭은 크고 탐침의 길이가 길수록 많은 수의 반향신호를 측정할 수 있어 정확한 실험결과를 얻을 수 있다. 하지만 길이가 긴 탐침을 토양 내에 설치할 경우 어려움이 있으며 측정영역이 커지는 단점이 있다.

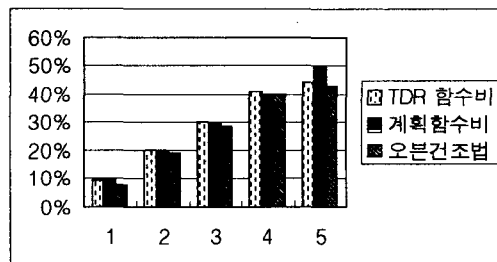
III 결과 및 고찰

3. 1. 세립분 함량에 따른 함수비 측정

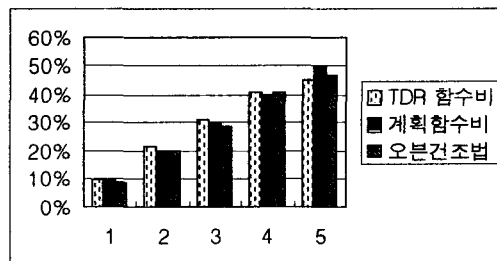
실험은 건조시킨 토양의 초기함수비를 측정하고, 실험 하고자 하는 함수비를 조절하여 TDR 을 이용한 함수비 측정결과와 Dry Oven을 이용한 함수비 측정결과를 비교 하였으며 그 결과는 Figure-3과 같다.



a) 사질토+세립분10%



b) 사질토 + 세립분20%



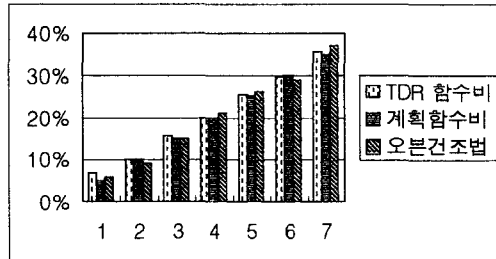
c) 사질토 + 세립분30%

Figure-3. 사질토+세립분 함량에 따른 함수비

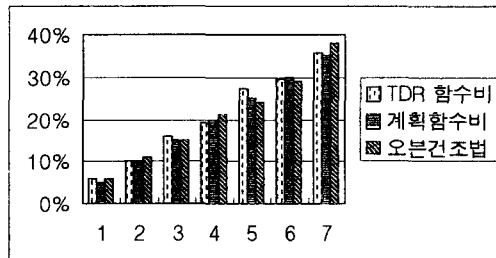
세립토의 함유량이 높은 경우에는 투수성이 낮아서 오픈건조 방법은 채취할때 오차가 작아서 함수량측정시의 정도가 높게 나타나고 TDR에 의한 함수량 측정 또한 높은 정도를 나타낸다. 그러나 세립토의 함유량이 줄어들거나 사질토만으로 함수량을 측정할 경우 오픈건조방법에 의한 함수량 측정은 시료 채취시에 생기는 오차가 커짐에 따라 함수량 측정오차가 커지고 시료의 동질성 또한 파괴된다. 특히 포화도 100% 이상의 함수비가 되면 그 오차는 굉장히 커진다. 그러나 TDR의 경우는 Probe주변의 함수량을 평균값을 구하여 나타내므로 그 측정 정도가 높은 것으로 나타났다.

3. 2. 다짐도에 따른 함수량 측정

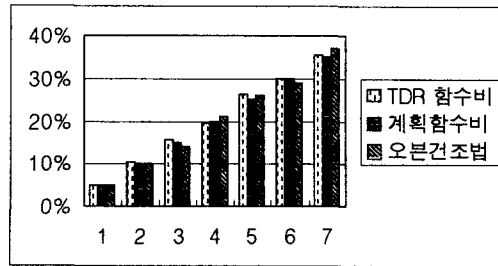
다짐도에 따른 함수량 측정의 정도를 확인하기 위하여 e값을 각각 0.7, 1.0, 1.3 으로 만들어 측정한 결과를 Figure-4에 나타내었다. 이 실험에서는 사질토만 사용하였기 때문에 앞의 실험의 결과로 알 수 있듯이 오픈건조방법은 포화도 100%이상에서는 측정오차가 커져서 신뢰할수 있는 값을 얻을수 없다. 그러나 TDR에 의한 함수량 측정방법은 주변값을 평균하여 구하는 특징과 시료의 유전특성에 의하여 함수비를 구하는 특징 때문에 다짐도를 달리한다 하여도 함수량측정에서는 높은 정도를 나타내는 것으로 나타났다.



a) e = 0.7



b) e = 1.0



c) $e = 1.3$

Figure-4 다짐도에 따른 함수량 측정

실험은 먼저 건조시킨 토양의 초기함수비를 측정하고 실험하고자 하는 함수비를 조절하여 TDR을 이용하여 측정한 함수량과 채취한 시료를 Dry Oven에서 건조하여 측정한 함수량을 비교하였는데 세립토일때는 TDR을 이용한 방법과 Dry Oven에서 건조하는 방법 모두가 신뢰할 수 있을 만한 값을 나타 냈지만 투수성이 큰 사질토일 경우는 TDR을 이용한 함수량 측정 방법이 더 높은 정도를 나타내었다. 동일한 사질토에서 e값을 각각 0.7, 1.0, 1.3으로 다짐도를 달리하여 실험을 실시한 결과 TDR을 이용한 함수량 측정방법은 TDR은 시료의 유전특성에만 반응하도록 되어있기 때문에 다짐도를 달리하여도 함수량 값은 신뢰할 수 있는 정도를 나타내었다. 마지막으로 TDR측정법의 신뢰정도를 확인하기 위하여 신뢰성 검토를 하였는데 이는 Table-2와 같다.

	상 관 계 수		
	TDR-계획함수비	오븐법-계획함수비	TDR-오븐법
Figure-3 a)	0.976104	0.990622	0.973927
Figure-3 b)	0.986868	0.986569	0.999942
Figure-3 c)	0.989345	0.996915	0.995828
Figure-4 a)	0.998204	0.997899	0.995212
Figure-4 b)	0.995788	0.991876	0.985997
Figure-4 c)	0.998325	0.99599	0.995356

Table-2 신뢰성검토

IV. 결론

- (1) TDR을 이용하여 측정한 함수비 와 Dry Oven에 의하여 함수비를 측정한 결과를 비교한 결과 TDR을 이용하여 함수비를 측정하는 방법은 그 정도가 상당히 높아 앞으로 토양의 함수비 측정에 유용하게 사용될 것이라 기대되고 이에 따라 많은 인력과 시간을 절약할

수 있고 또한 이로 인하여 경제적인 비용 절감도 가져올 수 있다고 판단된다.

- (2) 일반적으로 사용하는 건조 방법은 순간적인 함수비 변화를 측정할 수 없으나 TDR을 이용한 방법은 Probe를 토양속에 묻어서 지속적인 모니터링이 가능하게 하여 순간적인 함수량의 변화도 측정할 수 있다.
- (3) 본 실험에서는 다중연결장치를 사용하지 않고 개별적인 실험을 시행하였지만 다중연결 장치를 사용하면 순간적인 함수량의 변화뿐만 아니라 많은 지점의 함수량을 동시에 측정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Kim, D.J (1996). "Application of an automated time domain reflectometry to solute transport study at field scale : Experimental methodology and calibration of TDR." *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 29, NO. 6, pp. 699-712
2. Kim, D.J (1996). "Application of an automated time domain reflectometry to solute transport study at field scale : Transport concept." *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 29, No.6, pp.713-724
3. 박재현, (1997) 비포화 영역에서 용존 오염물질거동에 관한 실험적 연구, 박사학위 논문.
4. 박재현, 윤성용, 김상준, 선우중호, (1997) TDR을 이용한 토양함수량의 측정. *한국수자원 학회논문집 Vol.30 No.6*, pp 587~595
5. 정상욱, (1996) TDR을 이용한 토양함수량과 토양염도의 측정. *한국농공학회지 Vol.38 No.4*, pp 53~62
6. Topp, G.C. (1993). "Soil water content." *Soil sampling & methods of analysis*. Edited by Carter, M.R., Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers pp. 541-557
7. Topp, G.C. and Davis, J.L.(1985). "Time domain reflectometry(TDR) and its application to irrigation scheduling." *Advances in irrigation*, Edited by Hillel, D., Vol. 3, Academic, New York