



TDR을 이용한 토양함수량과 토양염도의 측정 - 원리 및 적용 -

정 상 옥
(경북대학교 농과대학 교수)

요 약

작물의 최대 수확을 위한 관개계획은 작물의 수분장력 스트레스와 삼투스트레스를 최소화 시킬 수 있도록 언제 얼마의 물을 어떤 속도로 공급해 줄 것인가를 결정하는 것이다. 이는 토양, 작물 및 대기의 여러가지 요소를 측정하여 결정할 수 있다. 관개속도는 주로 토양의 투수계수에 의하여 결정되지만 관개시간과 양은 토양함수량과 경우에 따라서는 토양염도에 의하여 결정된다. Time Domain Reflectometry (TDR)는 한개의 탐침으로 토양함수량과 토양염도를 동시에 측정하는 새로운 기법이다. TDR의 측정원리와 상업용 TDR 장비에 대하여 자세히 설명하였다. TDR 탐침의 간격, 직경 및 길이의 제한요소를 토양함수량과 전기전도도의 함수로 나타내었다. 토양 column 및 현장에서의 TDR 전극 삽입과 케이블테스터의 신속한 분리기법과 토양층에 TDR 탐침을 영구히 설치하는 기법에 대하여 자세히 설명하였다.

이동시간과 소멸시간을 측정하여 구하는 장치이다. 이동시간은 전매상수에 비례하고 전매상수는 오직 토양함수량의 함수이다. 펄스의 소멸은 토양의 전기전도도에 비례하고 전기전도도는 토양수분 염도에 관련된다. 펄스 이동시간과 소멸은 Tektronics 1502 케이블테스터로 측정한다.

나. 토양함수량 측정

전매상수 (ϵ)는 다음 식과 같이 이동시간 t (s), 탐침길이 l (cm), 및 진공에서의 빛의 속도 c (cm/s)의 함수로 표시된다(Topp et al, 1980 ; Dalton et al., 1984).

$$\epsilon = \left[\frac{ct}{2l} \right]^2 \dots\dots\dots (1)$$

토양 전매상수와 체적 토양함수량 (θ)과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \dots\dots\dots (2)$$

1. TDR의 원리

가. 기본개념

TDR은 어떤 매질의 전매상수(dielectric constant)와 전기전도도를 그 매질속에 삽입한 두개의 평행 탐침을 통하여 보낸 전자펄스의

이 식은 여러가지 토양에 대하여 잘 맞는 것으로 확인되었다. 단지 이탄토나 중식토의 경우 수정이 필요하다. 식 (1)에서와 같이 전위펄스가 주어진 길이의 도선을 이동하는데 소요되는 시간을 측정하면 식 (2)로 토양함수

량을 측정할 수 있다. 습윤토양에서 전위펄스가 30cm 길이의 도선을 통과하는데 2nano-sec정도 걸린다. 이 같은 극히 짧은 시간은 상용장비에 의하여 정확하게 측정할 수 있다. 케이블테스터를 이용한 토양함수량 측정과정을 이 장비에 의하여 얻어지는 특정한 파동모양에 기준하여 설명하겠다.

그림. 1은 케이블테스터와 습윤토양속에 매설된 평행 금속탐침이 연결된 것과 확대된 파동모양 및 토양함수량 측정을 위한 기능스위치의 셋팅상태를 보여주고 있다. TDR 파동모양에는 특수한 뾰족한 점이 있는데 이것이 전매상수 측정에 이용된다. 그림. 1(a)에서 A

점은 펄스가 토양으로 들어가는 점이고 B점은 펄스가 탐침 끝까지 갔다가 다시 돌아와 펄스원에 까지 돌아온 점이다. 따라서 AB간의 거리는 탐침길이의 두배이다. 케이블테스터는 파동선이 불연속이 되는 점까지의 길이(이 경우에는 탐침의 길이)를 직접 읽을 수 있게 설계되어 있다. 그 길이는 진공관(CRT : cathode ray tube)화면에서 직접 읽을 수 있다. 이 화면은 기능 셋팅(S2)의 위치에 따라 연직 한칸이 어떤 길이 단위를 나타내고 있다. 다른 방법으로는 그 길이는 수평조정셋팅(D1)을 이용하여 그림. 1(b)와 같이 A점을 연직 기준선에 맞춘 다음에 거리 다이얼

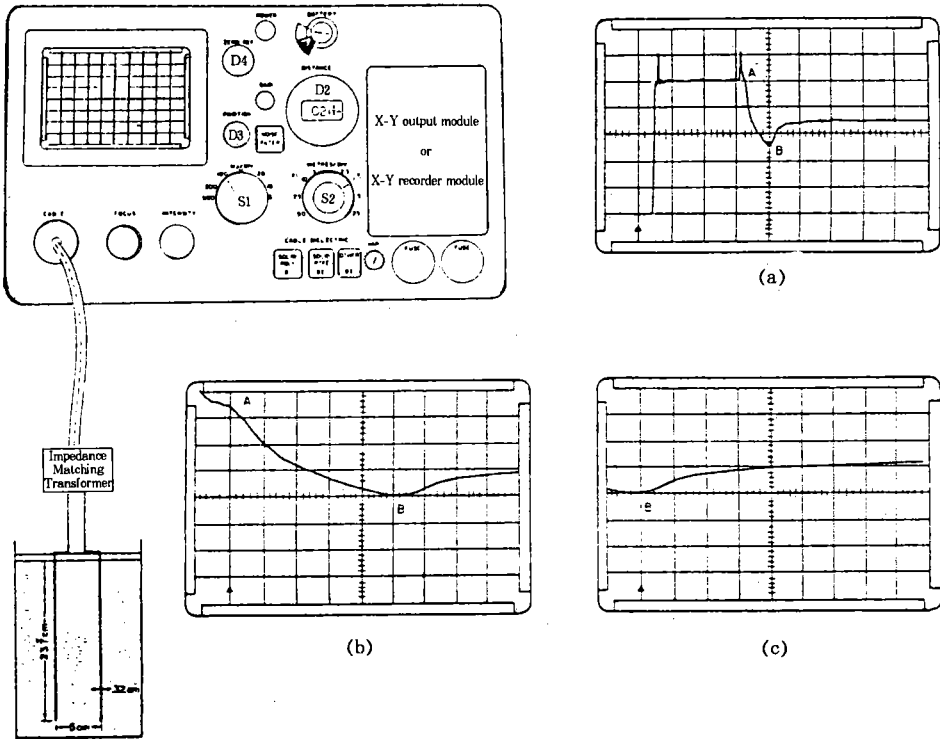


그림. 1. (a) Expanded TDR waveform on CRT used to measure moisture content. Point A results from pulse entering soil. Point B results from reflected voltage returning to source. S1 and S2 settings are 100m/div and 0.1m/div respectively
 (b) Expanded TDR waveform on CRT moved with vertical adjust (D3) to measure time/distance with aid of graduations on CRT. S1, and S2 settings same as in Figure 2a
 (c) Expanded TDR waveform on CRT after displacement using distance dial (D2) to measure path length/time

(D2)을 돌려 파동을 왼쪽으로 이동시켜 그림. 1(c)와 같이 B점이 연직 기준선에 도달하게 하면 길이를 D2에서 직접 읽을 수 있다.

거리와 시간은 다음의 관계가 있다.

$$\text{거리} = \text{펄스속도} \times \text{이동시간} \dots\dots\dots (3)$$

전자이론에 의하면 펄스속도는 다음과 같이 매질의 전매상수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V = c/\sqrt{\epsilon} \dots\dots\dots (4)$$

전화선이나 다른 도선쌍은 피복선의 전매상수가 알려져 있다. 따라서 그 길이는 단순히 상수항 ($c/\sqrt{\epsilon}$)과 이동시간의 곱으로 구할 수 있다. 케이블테스터 사용자는 전매상수 조절 손잡이(그림. 1의 B1, B2)를 적당하게 셋팅하여 수평축을 직접 읽을 수 있고, 이는 실제 파동 이동거리의 1/2을 나타낸다.

한편, 토양함수량 측정은 위와는 반대로 이동거리 ($2l$)가 주어졌을 때 유효전매상수를 구하는 것이다. Tektronix 1502 케이블테스터를 이용할 때 전매상수는 다음과 같이 구한다.

먼저 케이블테스터의 전매상수를 $\epsilon=1$ 로 놓는다. 케이블테스터의 점 AB간의 거리가 S라면 TDR 펄스의 이동거리는 $2S$ 가 되며 펄스 이동시간을 T라면 식 (3)과 (4)에 의하여 다음과 같게 된다.

$$S = (c/\sqrt{\epsilon}) \times T \dots\dots\dots (5)$$

그러나 실제 점 AB간의 길이는 탐침길이의 2배인 $2l$ 이다. 이 실제 이동거리를 토양의 유효전매상수와 이동시간으로 나타내면 식 (4)에 의하여 다음과 같게 된다.

$$2l = (c/\sqrt{\epsilon}) \times T \dots\dots\dots (6)$$

식 (5)와 (6)의 비례관계에서

$$\sqrt{\epsilon} = S/l \dots\dots\dots (7)$$

또, 양변을 제곱하면

$$\epsilon = (S/l)^2 \dots\dots\dots (8)$$

이 된다. 따라서 토양의 유효전매상수는 점 AB간의 거리와 탐침길이의 비를 제곱하면 구할 수 있다. 이는 케이블테스터를 이용할 때 다른 이론들(Topp et al., 1982 ; Dalton et al., 1984)에 의한 경로길이와는 명확한 차이를 나타낸다.

Tektronix 1502 케이블테스터를 이용하여 S를 구하는 다른 방법은 다음과 같다.

- ① 그래프 스케일을 고려하여 AB간의 거리를 CRT화면에서 바로 읽는다.(그림. 1(b))
- ② 점 B를 점 A위치로 이동시킨 후 거리 다이얼(D2)을 읽는다.(그림. 1(b), (c))
- ③ 추후의 분석을 위하여 파동모양을 x-y 레코더에 저장한다.
- ④ 추후의 분석을 위하여 파동모양을 디지털저하여 PC에 저장한다.

직접 측정할 때 파동의 불연속점을 결정하는 데 주관성이 개재될 수도 있다.

3. 토양 전기전도도/염도의 측정

토양 전기전도도(σ)는 토양함수량(θ)과 공극수분염도(σ_w)의 함수로 표시된다(Rhoades et al., 1976).

$$\sigma = \sigma_w \theta f + \sigma_s \dots\dots\dots (9)$$

여기서 f 는 굴곡계수(tortuosity factor)이는 σ_s 는 토양광물의 표면전도도이다. 따라서 토양수분 전기전도도는 f 와 σ_s 가 주어졌을 때 토양함수량과 토양 전기전도도를 동시에 측정하여 구할 수 있다. 토양수분 염도는 토양수분 전기전도도로 부터 둘 사이의 관계로부터 구

할 수 있다(US Salinity Laboratory Staff, 1954).

이전의 연구에서 밝혀졌듯이(Dalton et al, 1989; Dasberg and Dalton, 1985; Dalton and van Genuchten, 1986) 토양 전기전도도는 송전전압(V_t), 반송전압(V_r) 및 매질의 전매상수의 함수로 나타낼 수 있다.

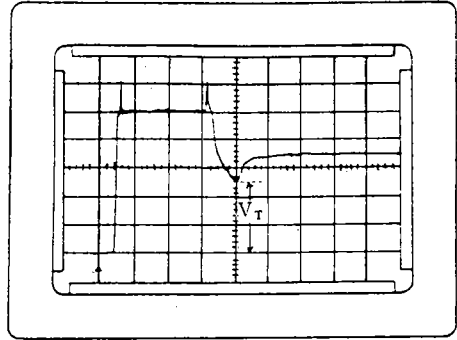
$$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon}}{120\pi} \ln(V_t/V_r) \dots\dots\dots (10)$$

그림. 2는 토양함수량과 염도를 동시에 측정할 수 있는 CRT 화면의 TDR 파동모양 전부를 보여주고 있다.

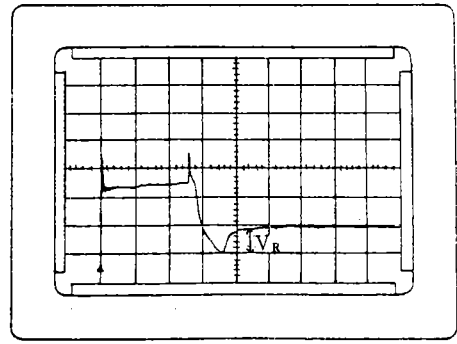
송전전압(V_t)는 아주 쉽게 구할 수 있다. 먼저 meter/div 스위치(S2)를 이용하여 파동모양을 축소시켜 TDR 펄스 기준선 전압(V_0)을 나타내게 한 후(그림. 2a), 연직 및 수평 위치조정 다이얼 D3와 D1을 조정하여 기준선을 CRT 화면의 아래쪽 선과 일치시킨다. 다음에 수평조정 다이얼 D1을 이용하여 점 B를 CRT 화면의 중앙에 위치시킨다. 송전전압(V_t)는 기준선에서 점 B까지의 눈금을 읽으면 바로 구할 수 있다(그림. 2a).

반송전압(V_r)는 먼저 연직 조정다이얼 D3을 이용하여 점 B를 화면이 기준선에 일치시키고 난 후, 거리다이얼 D2를 전매상수 측정 때 얻은 값 만큼 돌려 점 B를 왼쪽을 이동시킨다(그림. 2b). 반송전압은 TDR 파동이 중앙연직선을 교차하는 점을 읽으면 된다. 최근 Yanuka et al.(1988)이 본 계산에서 사용된 반송전압은 수차폐에 걸친 내부반사 때문에 진실 값이 아니라고 지적하였으나, 이 측정방법의 독자적인 토양전기전도도 측정 값과 아주 잘 맞기 때문에 그로 인한 오차는 매우 작을 것이다(Dalton, 1987).

이상 TDR 파동모양으로 부터 토양함수량과 토양 전기전도도를 구하는 방법을 소개하였다. 이 값들은 x-y레코더나 다른 자료취득



(a)



(b)

그림. 2. (a) Compressed and aligned waveform with point B positioned on vertical grid to measure V_t using gradations on CRT
(B) Point B positioned on Baseline. Waveform displaced distance determined previously by dielectric constant determination procedure, then V_r is read using gradations on CRT

계통을 통해 재생된 자료로 부터 구할 수도 있다.

2. TDR 탐침의 설계기준

가. 탐침의 간격 및 직경

원칙적으로 탐침쌍은 측정매질보다 전기전도도가 훨씬 큰 어떤 재료로도 만들 수 있다. 전극쌍을 케이블테스터에 연결하는 방식은 토양측정 실험상수에 의하여 결정된다. 탐침이 토양속에 매설된다면 전극쌍은 토양표면에서

송전선으로 케이블테스터와 연결하여야 한다. 만약에 토양 column이나 지표면에서 측정할 때와 같이 전극쌍이 케이블테스터에 바로 연결된다면 송전선을 전극쌍에 영구히 부착하지 않아도 된다.

최상의 효율을 얻기 위하여 전극쌍의 임피던스는 TDR과 연결되는 송전선의 임피던스와 맞아야 한다. 첫번째 개략도로 평행 전극의 임피던스(Z_0)는 토양의 전매상수, 탐침의 간격(s) 및 직경(d)의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Ramo and Whinnery, 1959).

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \left[\frac{2s}{d} \right] \dots\dots\dots (11)$$

식 (11)과 식 (2)로부터 탐침의 임피던스를 토양함수량의 함수로 나타낼 수 있다. 그림. 3은 여러가지 탐침의 간격과 직경의 비(s/d)와 토양함수량에 대한 TDR 탐침의 임피던스 값의 변화를 보여주고 있다. 전극의 임피던스는 토양함수량, 전극의 직경 및 간격에 따라 상당히 변화한다.

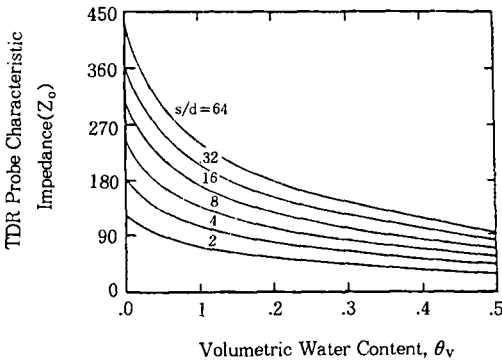


그림. 3. TDR probe characteristic impedance as a function of water content for various s/d ratios

전극의 간격과 직경의 비(s/d)의 최적 값도 토양함수량의 함수로 나타내면 편리하다. 식 (11)의 Z_0 를 송전선의 임피던스라고 하면 최

적 s/d는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{s}{d} = \frac{1}{2} \exp \left[\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon}}{120} \right] \dots\dots\dots (12)$$

식 (2)에서 전매상수를 토양함수량의 함수로 나타내면 식 (12)의 최적 s/d 값은 토양함수량의 함수로 표시된다. 그림. 4는 송전선의 임피던스가 50 및 256 ohm인 경우에 최적 s/d 값과 토양함수량의 관계를 나타낸다.

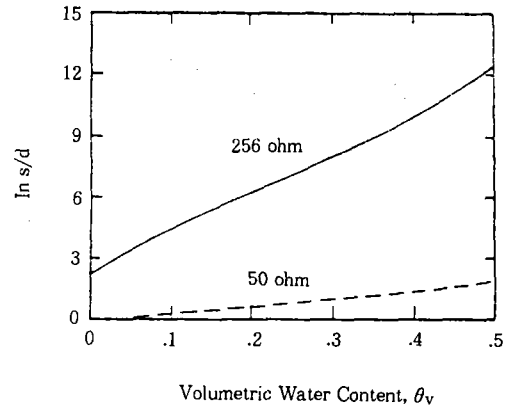


그림. 4. TDR electrode separation to diameter (s/d) ratios as a function of water content for characteristic probe impedances of 50 ohm and 256 ohm

실제로 한개의 전극 간격과 직경이 여러 범위의 토양함수량에 대하여 사용된다. 따라서 최적 탐침간격은 샘플링 체적등 특정한 실험 조건에 의하여 결정되는 경우가 많다. 다음에 설명하는 것은 간격 5cm와 직경 0.32cm를 사용하였다.

나. TDR 탐침의 길이

TDR을 이용하여 토양함수량을 측정할 때 가장 기본적인 조건은 그림. 1에서와 같이 점 A, B를 인식할 수 있어야 한다. 점 A는 토양함수량이나 염도에 관계없이 항상 인식할 수 있으나, 점 B는 어떤 특정한 탐침길이와 토양

전기전도도의 조합에 대하여는 사라질 수도 있다($V_r=0$). 개념적으로 이런 현상은 매질의 높은 전기전도도에 의하여 전위펄스가 완전히 소멸되는 경우에 발생한다. 펄스의 에너지는 고정되어 있으므로 TDR 기법의 효용성은 경로길이와 토양전기전도도에 의존한다.

이러한 의존도는 정량적으로 나타낼 수 있다. 반사전위는 감소계수(α)와 경로길이(2ℓ)에 지수함수적으로 감소한다. 즉,

$$V_r = V_T \exp(-2\alpha\ell) \quad \dots\dots\dots (13)$$

개략적으로 α 는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Dalton et al., 1984).

$$\alpha = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\epsilon}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

식 (13)과 (14)에서 ℓ 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\ell = \frac{\ln(V_t/V_r)\sqrt{\epsilon}}{120\pi\sigma} \quad \dots\dots\dots (15)$$

점 B에서 반사전위는 최소한 송전전위의 10%가 되면 감지된다고 임의로 기준을 정하면 식 (15)는 주어진 σ 와 ϵ 에 대한 최대 탐침 길이를 나타낸다.

나아가 토양의 전기전도도(σ)는 함수량(θ), 공극수분 전기전도도(σ_w), 토양광물 전기전도도(σ_s)와 굴곡계수 $f(\theta)$ 로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_w \theta f(\theta) + \sigma_s \quad \dots\dots\dots (16)$$

식 (15)는 식 (2) 및 (16)과 함께 주어진 함수량, 토양의 종류 및 공극수분 전도도의 조합에 대하여 TDR 탐침의 최대길이를 구할 수 있다.

그림. 5a와 5b는 세사질 로움토양에 대한 TDR 탐침의 최대길이와 함수량 및 공극수분 전도도의 관계를 보여주고 있다. 다른 토양에

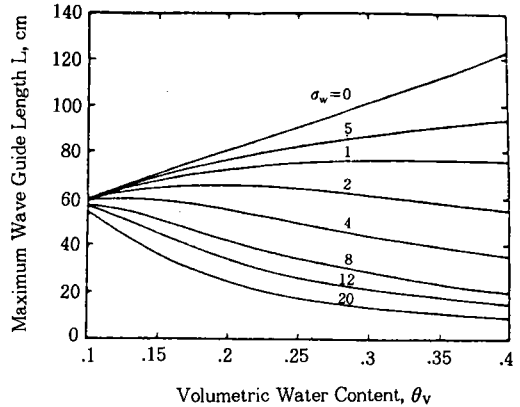


그림. 5a. Maximum TDR probe length as a function of salinity at various water contents

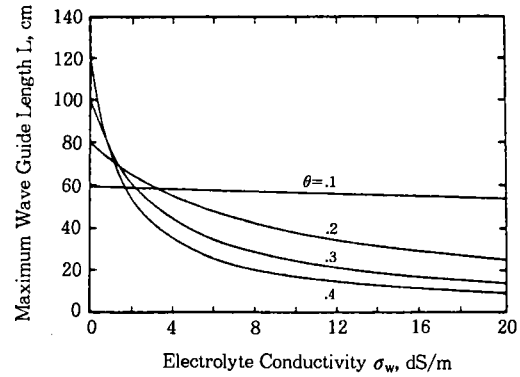


그림. 5b. Maximum TDR probe length as a function of water content over a wide range of soil water salinities (σ_w)

대하여도 $f(\theta)$ 값만 구할 수 있으면 이들의 관계를 개략적으로 구할 수 있다(Rhoades, 1976). 이들의 관계는 여러가지 실험조건에 대한 추가적인 설계기준을 제공한다.

염도가 별 문제가 안될 경우에는 Tektronics 1502 케이블테스터의 탐침길이는 토양함수량과 토성에 의하여 좌우된다. 표-1은 토양수분 전기전도도(σ_w)의 상한을 3dS/m로 하였을 때 세가지 토성과 광범위한 토양함수량 분포에 대한 탐침의 길이를 보여주고 있다.

표-1. 토양수분 전기전도도(σ_w)의 상한을 3dS/m로 하였을 때 세가지 토성과 광범위한 토양함수량 분포에 대한 탐침의 길이

토양함수량	sandy loam	loam	clay
	TDR 탐침 길이(cm)		
0.10	58.2	34.9	33.5
0.20	59.3	37.6	35.6
0.30	50.4	34.6	30.9
0.40	41.8	30.6	25.9
0.50	36.2	27.9	22.5

다. TDR 탐침과 케이블테스터의 연결

전극이 만들어지면 이를 케이블테스터에 연결하는 방법을 강구하여야 한다. 궁극적으로 평행전극은 50ohm 동축 케이블(coaxial cable)로 케이블테스터와 연결되어야 한다. 이 연결은 적용에 따른 특정한 제약조건에 따라서 다른 방법을 사용하여야 한다. 앞에서 언급한 대로 전극의 임피던스는 토양함수량의 변화에 따라서 변화시킬 수는 없다. 토양함수량 측정시 전극 임피던스의 변화를 고려할 때 Anzac TP 103과 같은 50-200 ohm 임피던스에 matching pulse transformer가 적당하다고 알려져 있다. 이 경우 임피던스 matching transformer는 여러개의 탐침을 신속하게 읽기 위하여 신속탈착이 가능한 연결장치를 이용하여 TDR 전극에 직접 연결할 수 있다. 이 분야의 추가적인 연구는 임피던스 matching transformer 없이도 탐침과 케이블테스터의 연결이 가능하게 할 것이다.

그림. 6은 시험중인 연결장치의 설계도이다. 고품 PVC 블록에다 직경 3.2mm, 깊이 3mm, 폭 5cm의 홈을 파서 두개의 얇은 금속 띠를 홈의 바닥에 접착시켜, 평행탐침 전극에 밀착시킬 때 전극에 연결되도록 한다. 동축선과 금속판을 연결시키는 변압기는 손잡이로 이용되는 1.3cm짜리 PVC tube에 설치하였다. 동축선은 손잡이에 고정시켰다.

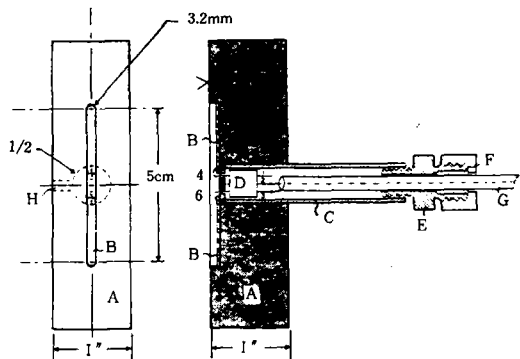


그림. 6. Detailed diagram of quick connect interface used for surface and lysimeter installed TDR probes. (A) 2.54cm square PVC plastic bar with milled slot 5.0cm long, 3.2mm wide, and 3.0mm deep and 1.3cm hole to hold the handle; (b) silver metal conact strips glued to bottom of slot; (C) Handle 1.3cm PVC plastic bar bored out to house; (D) the impedance matching transformer (Adams Russell part no. TP-103); (E) tube fitting used as a cable clamp, male connector, 0.64cm tube O.D. to 0.32cm pipe (Swagelock cat. no. 400-1-2 or equivalent). Note fitting was back-drilled out so as to accept cable and ferrule was replaced with; (F) a small piece of plastic or rubber tubing; (G) coaxial cable, 50ohm (Belden no. 8219); (H) set screw to hold handle in place.

Column실험이나 지표면에서의 함수량 측정시 이와 같은 전극제작과 연결방식은 여러가지 어려운 문제를 야기할 수 있는 다른 방법에 비하여 효율적이고 간단하다.

3. TDR 적용

가. Column 라이시미터 적용

TDR 기법은 중성자법이나 감마선법이 부적합한 column 연구의 토양함수량 측정에 아

주 적당하다. 더우기 한개의 샘플에서 함수량과 염도를 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다. Column 연구에서 TDR 탐침의 제작은 실제 토양에서의 탐침제작과는 아주 다르다. 실제 토양의 탐침제작에는 많은 시간이 소요된다. 다음은 직경 45cm, 높이 1.5m의 PVC 라이시미터 실험에 사용한 시스템이다.

염분부식에 강한 직경 0.32cm의 스텐레스 봉을 column의 공극수분 전기전도도에 따라 적당한 길이로 자른다. 염도가 문제 안될 때는 30cm 길이로 자른다. 1인치 사각 PVC 기둥을 적당한 길이로 잘라서 두개의 스텐레스 봉을 끼울 수 있도록 5cm 간격으로 구멍을 뚫는다. PVC 한면이 라이시미터 측면에 부착되도록 잘라내고 필요한 높이마다 부착시킨다. PVC 블록의 구멍을 이용하여 같은 위치에 라이시미터 벽면에도 구멍을 뚫어 나중에 전극을 토양속으로 바로 삽입할 수 있도록 한다. 알루미늄 봉 삽입기를 이용하여 토양에 구멍을 뚫고 난 후 스텐레스 봉을 삽입하여 끝 3mm가 PVC 블록 밖으로 돌출하도록 하고 강력본드로 PVC 블록과 스텐레스 봉이 움직이지 않도록 붙인다. 그림. 7이 최종상태를

보여준다.

측정 도중에 전극은 전대로 움직여서는 안된다. 그렇지 않으면 공기틈이 생기게 되어 큰 오차가 발생하게 된다(Annan, 1977). 직경이 작은 봉은 약하므로 특별히 주의하여야 한다. 이러한 전극삽입 방법은 간단하고 정확하다. 이 방법은 최소한의 제작시간과 쉬운삽입을 할 수 있다. 시간 경과에 따른 함수량의 분포 변화는 전극연결 시스템을 전극쌍에 연결시키므로서 여러개의 column을 쉽게 관측할 수 있다.

나. 지표면에서의 TDR 적용

Column 라이시미터에서 설명한 전극삽입과 신속탈착 방법은 지표면(0-30cm)에서의 함수량과 염도의 빠른 측정에도 이상적이다. 토양 조건의 큰 변동이 예상될 때는 이 방법이 미리 조립된 전극쌍을 삽입하는 것보다 훨씬 유리하다. 토양표면이 건조하고 단단할 때는 작은 직경의 전극을 한개씩 손으로 삽입하는 것이 좋다. 왜냐하면 쌍으로 조립된 것을 삽입하면 굽어지거나 부러지기 쉽기 때문이다. 이 방법은 토양염도의 변화가 심하여 전극 길이의 조정이 필요할 때에도 적당하다.

삽입시에는 지표면에 움직이지 않게 설치된 기준자가 필요하다. 이 기준자의 두께는 매우 중요하며 전극직경의 5배 정도가 적당한 것으로 알려져 있다. 각 전극은 알루미늄으로 제작된 삽입기의 도움을 받아 땅속으로 밀어 넣는다. 여러가지 전극길이와 삽입깊이에 맞게 여러개의 삽입기를 만들어야 한다. 최종삽입 완료는 접착제 대신 friction fit를 사용하는 것 이외에는 column 라이시미터에서 설명한 바와 같으며, 전극의 끝 3mm가 지표면 밖으로 돌출하도록 한다. 신속탈착장치를 이용하여 측정을 하고, 한 곳의 측정이 끝나면 전극을 뽑아서 다음 위치로 이동하여 같은 과정을 반복한다.

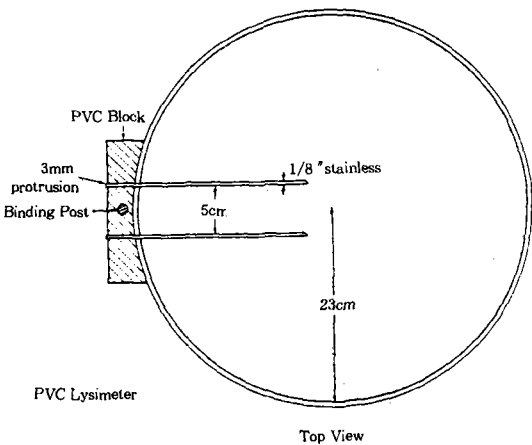


그림. 7. Top view cross section of PVC lysimeter equipped with TDR electrode. Probes can be placed at a series of depths to characterise soil water and salinity distributions

다. 불포화층에서의 TDR 적용

전극쌍이 땅속에 매설될 때는 256 ohm 2인치 TV 송전선을 필요한 길이의 PVC 파이프 끝에 묻혀 있는 전극쌍에 직접 연결시킨다(그림. 8). TV 케이블은 PVC 파이프 안에서 지표면까지 올라와서 50 ohm 동축케이블에 연결된다. 이 경우 임피던스 matching transformer는 50 ohm짜리와 256 ohm짜리 송전선 사이

에 연결되고 신속탈착은 banana-plug connector가 된다.

4. 결 언

TDR은 토양 상태가 많이 변화하는 현장에서 토양함수량을 신속하게 측정하는 데 이용될 수 있다. 지표면에서 접근할 수 있는 전극은 일시적 또는 영구적으로 설치할 수 있다. 한번에 한개의 전극을 삽입할 수 있고 전극길이를 조정할 수 있는 것은 아주 간단한 토양이나 높은 염도의 현장에서 부딪치는 문제를 경감시켜 준다.

TDR 방법은 토양수분과 염도의 시간적, 공간적 분포를 연구하는 데 아주 이상적이다. 왜냐하면 TDR 방법은 동일한 토양샘플에 대하여 함수량을 반복 관측하며, 토양의 공간적 변화에 따른 불확실성을 제거하여 주기 때문이다. 이 방법은 재래적인 방법에 비하여 많은 장점을 제공하고 있으며, 염도가 높거나 낮거나 상관없이 관계계획에 효과적인 도구가 될 것이다.

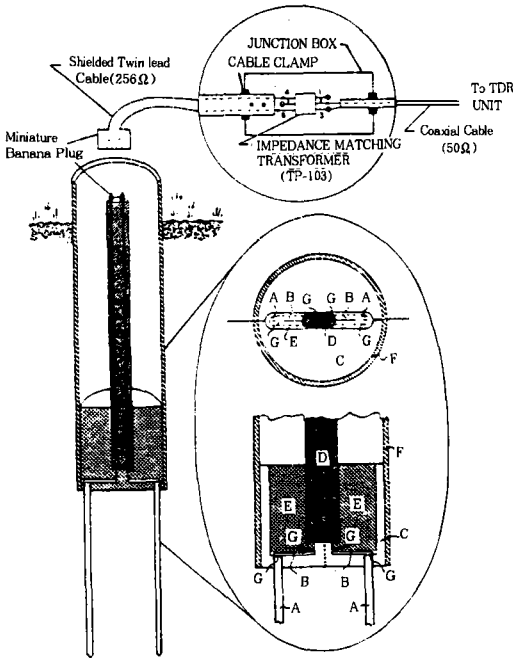


그림. 8. (A) stainless steel TDR rods; (B) metal strips soldered to TDR rods; (C) solid PVC plastic plug with milled slot and two holes to hold the TDR rods; (D) shielded transmission line; (E) epoxy poured in slot to hold assembly in place; (F) 5cm schedule 125 PCV pipe; (G) soldered joints; Note 1: Rods A were soldered onto metal strips B and stripped leads of shield transmission line D soldered to strips B. Then rods A were placed through the holes in plug C and the slot filled with epoxy. The assembled plug was glued into the end of the PVC pipe C as shown

참 고 문 헌

1. Annan, A. O. 1977. Time-Domain Reflectometry air-gap problem for parallel wire transmission lines. Report of activities, Part B : Paper 77-1B : Geol. Surv. Canada : 59-62.
2. Dalton, F. N., Herkelrath, W. N., Rawlins, D. S., and Rhoades, J. D. 1984. Time Domain Reflectometry : Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. Science 224 : 989-990.
3. Dasberg, S. and Dalton, F. N. 1985. Field measurement of soil water content and

bulk electrical conductivity with time-domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal 49 : 293-297.

4. Dalton, F. N. and van Genuchten, M. Th. 1986. The time-domain reflectometry for measuring soil water content and salinity. Geoderma 38 : 237-250.
5. Dalton, F. N. 1987. Measurement of soil water content and electrical conductivity using time-domain reflectometry. International conference on measurement of soil and plant water status 1 : 95-98.
6. Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., and Prather, R. J. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Science Society of America Journal 40 : 651-655.
7. Ramo, S. and Whinnery, J. R. 1959. Fields and waves in modern radio. Wiley, New York, N. Y.
8. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content : measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research 16 : 574-582.
9. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Applications to wetting fronts and steep gradients. Soil Science Society of America Journal 46 : 672-684.
10. U. S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook 60. US Government Printing Office, 160p.
11. Yanuka, M., Topp, G. C., Zegelin, S., and Zebchuk, W. D. 1988. Multiple reflections

and attenuation of time-domain reflectometry pulses : theoretical considerations for applications to soil. and water. Water Resources Research 24 : 934-944.

본 논문은 Dalton, F. N. and Poss, J. A.의 "Soil water content and Salinity assessment for irrigation scheduling using time-domain reflectometry : Principles and applications" in Acta Horticultrae 278 : 381-393.를 번역한 것임

역 자 후 기

토양함수량과 토양염도 측정의 신기술인 TDR의 원리와 적용방법에 관한 논문을 소개하였다.

이 분야에 관련된 연구논문이 많이 출판되었는 바, 관심있는 독자들을 위하여 몇가지 대표적인 논문을 소개하면 다음과 같다.

1. Topp, G. C. Reynolds, W. D. and Green, R. E. 1992 (Eds.) Advances in measurement of soil physical properties : Bring theory into practice. Chapter 2. Soil water content measurement by Time-Domain reflectometry. pp.143-208, Soil Science Society of America Special Publication No. 30.
2. Vogeler, I., Clothier, B. E., Green, S. R., Scotter, D. R., and Tillman, R. W. 1996. Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. Soil Science Society of America Journal 60(1) : 5-12
3. Werkhoven, C. 1994. Time-domain reflectometry for detecting soil moisture content. Computers in Agriculture, Proceedings of the 5th International Conference, ASAE pp.853-857.