

# 토양의 세립분 함량과 염분농도가 TDR 측정값에 미치는 영향 고찰

## A Consideration on the Effect of the Fine Content and Salinity of Soils on the TDR Measurement

유 찬\*                      이 근 후\*\*  
Yu, Chan · Lee, Keun-Hoo

### Abstract

Experimental laboratory tests were carried out to assess the effect of fine content and salinity of soils on the measurement of TDR(Time Domain Reflectometry). In the test, using soil column which was made by PVC pipe with the dimension of 25cm height and 20cm diameter, the salinity variation of soil was controlled by the solution which was dissolved NaCl to distilled water in the range of 0~40g·L<sup>-1</sup>. The fine content of soil was controlled by kaolinite which was mixed with Jumunjin sand in the range of 0~50% to the total dry weight. The water contents of soil tested were measured with the conventional oven dry method beside TDR and compared the these values to figure out the extent of effect. As the results of tests, it was appeared that the water content measurement by TDR can be affected by the salinity level, fine contents, and the degree of saturation of the soil.

### I. 서 론

TDR(Time Domain Reflectometry)은 파형 발생기에서 발생하는 구형의 전자기파가 매질 내의 전송선을 통하여 흐르다가 전송선의 변화에 따라 전자기파가 반향되는 특성을 이용하여 매질의 유전상수(dielectric constant,  $K_a$ )와 전기전도도(electrical conductivity, E.C.)를 측정하는 장치이다(Wihte & Zegelin, 1995, 박재현,

1998). 최근에 이 장치를 이용하여 토양의 함수비와 토양수내의 용매의 농도를 측정하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(박재현, 1998; Persson, 2001; Hamed et al., 2005).

TDR은 보통 하나의 탐침을 단자에 연결하여 사용하지만 다중연결장치(multiplexer)를 사용하면 자료저장장치(data logger)와 컴퓨터에 연결하여 동시에 여러 지점에 대한 자료를 연속적으로 관찰할 수 있으며(Soilmoisture

\* 경상대학교 지역환경기반공학과교수 (경상대 농업생명과학연구원)  
(chanyu@gsnu.ac.kr)

\*\* 경상대학교 농업생명과학대학 교수(khlee@gsnu.ac.kr)

키워드 : TDR, 함수비, 토양염도, 세립분함량, 포화도

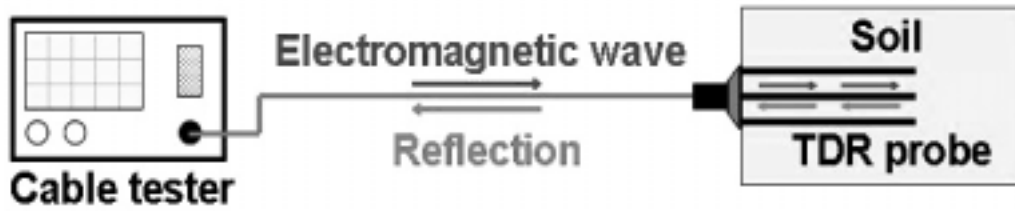


Fig. 1. Schematic diagram of soil water content measurement using TDR

Equipment Corp., 1996), 토양이나 수질 그리고 농경지의 환경 모니터링에 효과적으로 사용할 수 있다.

Topp 등(1980)의 경험식에 의해서 TDR을 이용한 함수량 측정법이 제안된 이래 많은 연구자들에 의하여 이 방법의 유용성이 확인되었으며, 토양의 전기전도도가 클 경우 반향되는 전자기파가 토양내로 흘러가기 때문에 TDR을 통하여 측정되는 반향파의 전압 강하차이로 전기전도도도 측정할 수 있는 장점이 있다.

그러나 Roberto(2002)에 따르면 토양의 전기전도도가  $4\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 보다 큰 경우에는 토양염분의 영향으로 TDR을 이용한 토양 함수량 측정에서 Topp 등(1980)의 경험식을 사용하는 것은 문제가 있을 것으로 보고한 바 있다.

따라서 본 연구에는 토양의 염분이 TDR의 측정값에 미치는 영향을 체계적으로 연구하기 위한 실내실험을 실시하여 그 결과를 제시하였다.

## II. 재료 및 실험

### 가. TDR을 이용한 함수량 측정원리

TDR 장비는 Fig 1에서와 같이 파형 발생기(pulse generator)와 오실로스코프(oscilloscope)로 구성되어 있으며, TDR의 측정원리는 파형 발생기에서 발생된 구형의 전자기파(square

magnetic wave)가 전송선을 통하여 흐르다가 전송선의 단면이 변하면 그 지점의 임피던스가 변하게 되며 이때 반향되어 오는 전자기파의 파형을 시간영역(time domain)으로 측정하는 것이다.

TDR을 이용하여 토양 내 함수량을 측정하는 방법은 Fig. 2에서와 같이 파형발생기에서 발생된 전자기파 신호가 흐르는 매질의 임피던스가 변함에 따라 파가 반향 되는 정도가 달라지며, 또한 매질의 유전율이 변함에 따라 전자기파 속도가 달라지는 특성을 이용한 것이다(박재현, 1998).

이러한 TDR 반향파의 변화는 탐침의 기하학적 모양이나 탐침의 개수 등에 따라서 차이가 있으며, 3선식 탐침(3-wire waveguide)의 경우에는 동축선과 토양이 만나는 지점에서 임피던스 변화에 따른 1차 반향이 발생하고 탐침을 되돌아 오면서 2차반향이 발생하게 되는데, 이 두 반향점 사이는 전자기파가 탐침을 지나는 구간으로 토양의 함수량 변화에 따른 유전율이 변하므로

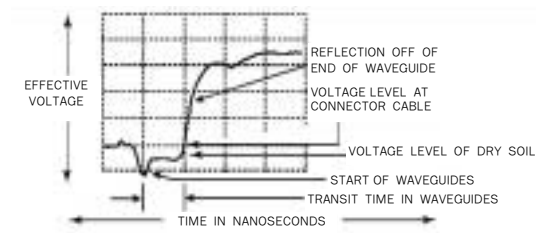


Fig. 2. Reflection wave from TDR

2차 반향점에서 반향되어 돌아오는 시간(travel time)에 변화를 가져온다. 이 시간차이를 이용하여 함수율에 따른 유전율 상수(dielectric permittivity constant)를 계산할 수 있다 (Soilmoisture Equipment Corp., 1996).

토양내 함수율이 증가하게 되면 유전율 상수도 증가하게 되는데, Topp 등(1980)은 유전율 상수로부터 함수량을 추정하는 경험식(1)을 제안하였다.

$$\theta = \frac{(-530 + 292K_a - 5.5K_a^2 + 0.043K_a^3)}{10} \quad (1)$$

여기서,  $\theta$ 는 토양의 체적함수비(%) 그리고  $K_a$ 는 유전율 상수이다.

경험식 (1)은 Dalton(1992), Zegelin 등(1992)에 의해서 대부분의 토양에 적용할 수 있는 것으로 알려져 있지만, 유기물 함량과 염분농도가 높은 토양에서는 사용하기 어렵다고 보고된 바 있다(Herkelrath, 1991; Roberto, 2002). 그러나 이러한 영향은 반대로 TDR을 토양내 유기 오염물질의 농도나 전기전도도를 측정하는데 이용될 수 있는 연구에 단초를 제공하기도 하였다. 따라서 본 연구에서 농경지에서 흔히 접할 수 있는 문제인 토양의 염류농도가 TDR의 측정값에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

#### 나. 재료 및 실험장비

본 연구에서는 미국 Soilmoisture사에서 제작하여 판매하고 있는 TRASE-1 TDR장비를 사용하였으며, 직경 20cm PVC 파이프를 25cm 높이로 절단하여 아래 부분은 아크릴 받침대에 고정하여 방수가 되도록 제작하여 토양킬럼으로 사용하였다 (Fig. 3). 한편 실험에 사용된 탐침은 매설용(buried type)으로서 직경 2mm, 길이

20cm의 스텐인레스 재질의 봉이 3열로 배열된 제품을 구입하여 사용하였다(Fig. 4).

시료는 조립질인 경우에는 주문진 표준사를, 세립분은 200번 표준체(0.075mm) 통과 고령토(kaolinite)를 각각 사용하였다. 실험방법은 시료내의 세립분을 전체시료중량의 0%, 10%, 20%, 30%, 50%가 되도록 함유비율을 조정하고 각각의 경우에 대해서 포화도를 20%~90%로 조절하여 실험하였다.

염분농도에 따른 영향은 증류수에 NaCl을  $5g \cdot L^{-1}$ ,  $10g \cdot L^{-1}$ ,  $20g \cdot L^{-1}$  그리고  $40g \cdot L^{-1}$ 의 농도로 용해시켜 사용하였는데, EC-meter로 측정된 용액의 전기전도도는 약 0.507, 0.978, 1.894 그리고  $3.540 dS \cdot m^{-1}$ 로 나타났다. 실험방법은 포화도를 90%로 조절하여 실시하였다. 이때 토양



Fig. 3. Soil column & Trase-1 TDR

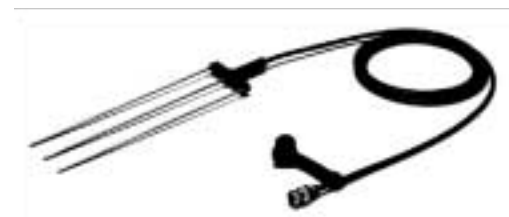


Fig. 4. TDR waveguide (3-wire buried type)

컬럼 내의 시료의 밀도는 건조단위중량을  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 으로 같게 하여 실험을 실시하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 가. 표준사내 염분농도가 TDR 측정값에 미치는 영향

Fig. 5는 표준사 만을 사용하여 증류수에 NaCl을  $0 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  용해시킨 용액으로 수분 양을 변화시키면서 TDR과 노건조법으로 동시에 측정된 함수비 값을 나타낸 것이다. 이때 TDR을 이용해 측정된 함수비는 체적함수비이므로 이를 중량함수비로 변환하여 비교하였다.

Fig. 5(a)는 증류수만을 사용하여 실험한 결과로서 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 사이에 큰 차이가 없이 매우 양호한 결과를 나타내었다. 증류수에  $\text{NaCl } 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 를 용해시켜 실험한 Fig. 5(b)에서는 앞의 경우와 비교했을 때 노건조법에 의한 측정값과 TDR을 이용한 측정값 사이에 약간의 차이가 발생하지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. TDR로 측정된 값이 노건조법 보다는 약간 작게 측정되는 것으로 나타났다.

Fig. 5(c)은  $\text{NaCl } 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 을 용해시켜 실험한 경우인데, 측정정도는 양호한 편이었지만 함수비 15% 이상에서는 TDR을 이용한 측정이 불가능하였다.  $\text{NaCl } 40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 을 용해시켜 실험한

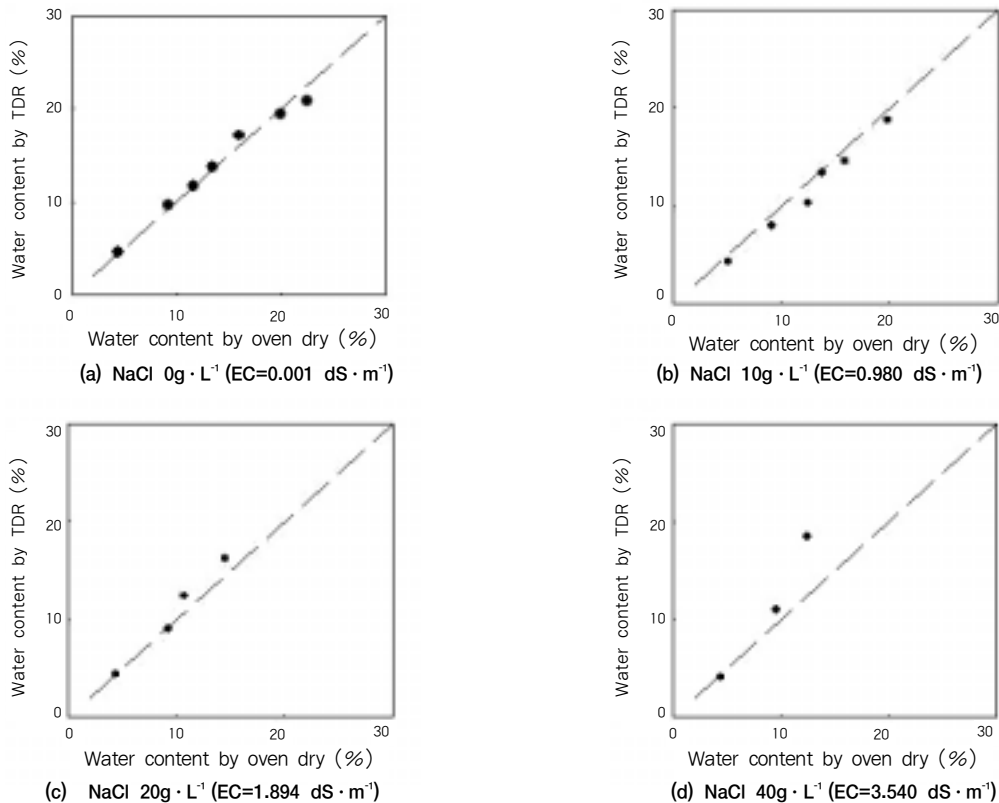


Fig. 5. Relationship between water content and salinity of soils

Fig. 5(d)에서도 TDR을 이용해서 함수비 15% 이상에서는 측정이 불가능하였고 측정정도도 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 NaCl 10g·L<sup>-1</sup>을 증류수에 용해시켰을 때, 전기전도도를 기준으로하면 EC=3.54 dS·m<sup>-1</sup>로서 Roberto(2002)가 발표했던 EC=4.0 dS·m<sup>-1</sup>와 비교했을 때는 약간 낮게 나타났다.

따라서 모래를 대상으로 했을 때, 간극수내 염분농도가 증가되면 TDR을 이용한 함수비 측정의 정확성에 영향을 주며, 전기전도도를 기준으로하면 약 EC=1.0 dS·m<sup>-1</sup>이하의 토양에서는 TDR을 이용한 정상적인 측정을 기대할 수 있지만, 그 이상에서는 함수비가 낮은 경우에 사용이 가능하고 EC=3.0 dS·m<sup>-1</sup>

이상인 토양에서는 TDR을 이용한 함수비 측정 시에 주의를 기울일 필요가 있을 것으로 판단되었다.

**나. 토양 종류별 염분함량이 TDR 측정값에 미치는 영향**

Fig. 6는 표준사에 고령토를 이용하여 세립분(입자직경 0.075mm 이하)의 함유량을 0%, 20%, 30% 그리고 50%로 조절하고 동시에 NaCl을 용해시킨 증류수로 함수비를 변화시키면서 TDR과 노건조법으로 동시에 측정한 함수비 값을 추세선과 함께 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)는 증류수만을 사용하여 실험한

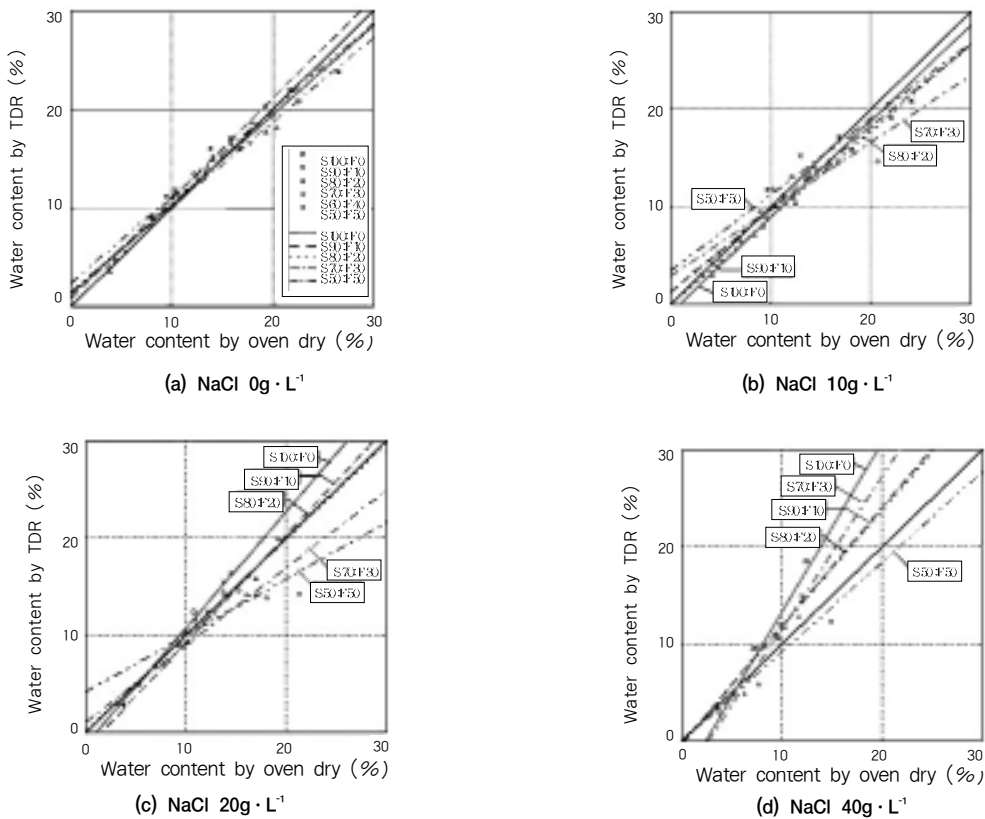


Fig. 6. Influence of the fine content with the soil salinity variation on the TDR measurement [S: Sand content (%), F: Fine content (%)]

경우로서 세립분 함량의 변화에 따른 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비사이의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 증류수에  $\text{NaCl } 10\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 용해시켜 실험한 경우로서 증류수만을 사용하여 실험한 경우에 비해서 세립분 함량 30%미만인 경우에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나, 세립분 함량이 30%이상인 경우에는 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 차이가 증가되어 제한된 함수비 범위(10%~20%)외에는 큰 오차가 발생할 것으로 예상되었다.

$\text{NaCl}$ 을  $20\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 용해시킨 Fig. 6(c)의 경우에는 세립분 함량 10%와 20%를 제외한 세립분 함량 0%, 30% 그리고 50%의 경우에서 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 값의 차이가 현저하게 커지는 것으로 나타났다.  $\text{NaCl}$ 을  $40\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 용해시킨 Fig. 6(d)의 경우에는 모든 대상 시료의 실험결과가 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 값의 상대적 차이가 현저하게 커졌으며, 특히 함수비 10~15%이상에서는 TDR을 이용한 함수비 측정이 불가능한 것으로 나타나 모래만 사용한 경우와 유사한 경향이 관찰되었다.

이상의 결과에서는 모래뿐만 아니라 세립분이 포함된 토양의 경우에서도 염분의 농도가 TDR을 이용한 함수비 측정에 영향을 미치며, 전기전도도를 기준으로하면 약  $\text{EC}=1.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이하에서

세립분 함량이 30%미만인 토양은 TDR을 이용한 정상적인 측정을 기대할 수 있었지만, 그 이상의 경우에는 제한된 함수비 범위(10%~20%)에서만 사용이 가능하고  $\text{EC}=3.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  이상인 토양에서는 모래에서와 같이 TDR을 이용한 함수비 측정 시에 주의를 기울일 필요가 있을 것으로 판단되었다.

Table. 1은 오븐 건조법에 의해 측정된 함수비를 기준으로 토양내 세립분의 변화와 염분농도 변화에 따른 TDR 측정값의 오차정도를 정리한 것이다. 모래(S100:F0)의 경우에는 함수비변화에 따른 오차의 평균이 4.23%로서 비교적 양호한 결과를 나타내었으며,  $\text{NaCl } 0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 인 경우에서 평균 6.38%의 오차가 발생된 것으로 나타났다. 그러나 다른 경우들에서는 평균 10% 이상의 오차가 발생하는 것으로 나타났고, 이러한 경향은 세립분의 함량에 따라서도 다양하게 나타났다.

또한 실험결과에서는 염분농도에 따라서도 함수비가 증가될수록 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 값의 차이가 비례하여 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 모래와 세립분이 포함된 토양 모두에서 함수비의 상대적 함유정도가 측정값과 관련이 있을 것으로 판단되었으며, 이와 관련되어 포화도와 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 값 사이의 관련성을 알아보기 위한 분석을 실시하였다.

Table 1. Summary of the average error with test conditions

Mixing ratio	NaCl ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )			
	0	10	20	40
S100:F0	4.23%	10.64%	7.99%	23.48%
S90:F10	8.38%	9.55%	9.55%	14.97%
S80:F20	7.65%	12.72%	5.12%	16.55%
S70:F30	4.71%	9.75%	12.41%	25.23%
S50:F50	6.94%	11.08%	15.34%	15.90%
Average	6.38%	10.75%	10.09%	19.22%

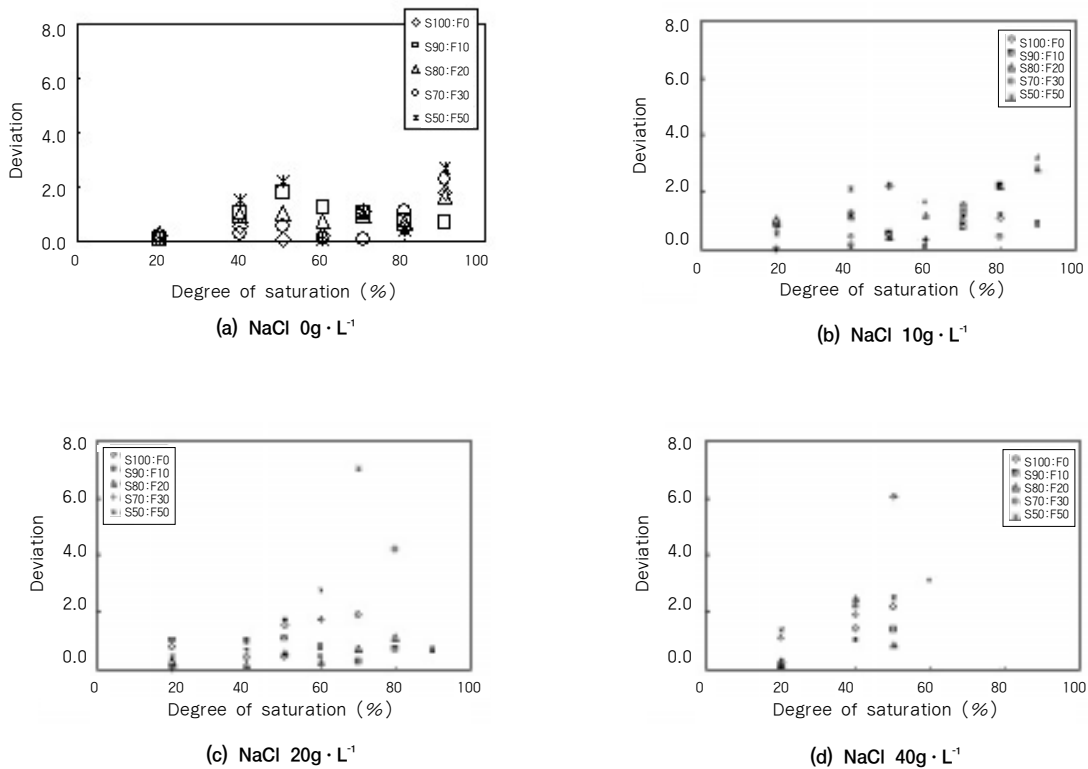
**다. 토양내 세립분 함량에 따른 TDR 측정값의 변화**

Fig. 7은 노건조법으로 측정한 함수비 값에 대한 TDR 측정값의 분산 정도를 시료의 포화도와 관련지어 분석한 결과이다. Fig. 7(a)의 NaCl 0g·L<sup>-1</sup>에서는 최대 2.6%의 측정값의 차이가 발생되었으며, 세립분 함량 50%일때 포화도 50%와 90%에서 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 세립분의 함량이 증가할수록 측정값 사이의 편차가 커지는 것으로 나타났다. NaCl 10g·L<sup>-1</sup>의 경우는 NaCl 0g·L<sup>-1</sup>의 경우와 큰 차이가 없었지만 측정값 간 차이가 약간 증가된 것으로 나타났다. NaCl 20g·L<sup>-1</sup>의 경우에는 포화도 50%에서부터 포화도가

증가될수록 측정값 사이의 편차가 점점 커지는 것으로 나타났으며, NaCl 40g·L<sup>-1</sup>의 경우에서도 포화도가 증가할수록 측정값 사이의 편차가 점점 증가 되는 경향을 관찰할 수 있었다. 또한 포화도 50%~60%이상 에서는 TDR에 의한 함수비 측정이 불가능한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구결과에 따르면 포화도 50% 이상에서는 TDR을 이용한 토양수분 측정에서 염도에 따른 영향과 측정값 자체의 오차가 커지는 것으로 판단되었다.

따라서 TDR을 이용한 토양 함수비의 측정은 토양의 염분농도에 영향을 받으며, 이는 토양의 세립분 함유량에 따라서도 다른 경향을 나타내고 있다는 사실을 알 수 있었다.



**Fig. 7. Comparison of the effect of the fine content and salinity on the TDR measurement with the degree of saturation of soil**

그러나 기존에 주로 사용되고 있는 Topp 등 (1980)의 경험식은 이를 충분히 반영하지 못하고 있으며, 따라서 본 연구에서 확인된 토양의 염분이나 세립분 함량 그리고 포화도 등의 인자들이 미치는 영향을 반영할 수 있는 경험식이나 실험식의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

TDR을 이용한 토양 함수비 측정에서 토양의 염분 농도가 미치는 영향에 대해서 실내실험을 실시하여 알아보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 모래를 대상으로 한 실험결과, 간극수내 염분농도가 증가되면 TDR을 이용한 함수비측정의 정확성에 영향을 주며, 전기전도도를 기준으로하면 약  $EC=1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  이하의 토양에서는 TDR을 이용한 정상적인 측정이 가능하였지만, 그 이상에서는 함수비가 낮은 경우에 사용이 가능하고  $EC=3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  이상인 토양에서는 TDR을 이용한 함수비 측정의 정확성이 현저히 저하되고 측정이 불가능한 경우도 있었다.

2. 세립분이 포함된 토양에 대한 실험결과, 모래에서와 같이 간극수내 염분농도가 TDR을 이용한 함수비측정에 영향을 미치며, 다만 세립분 함량에 따라서 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 전기전도도를 기준으로하면 약  $EC=1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  이하에서 세립분 함량이 30 %미만인 토양은 TDR을 이용한 정상적인 측정이 가능하였지만, 그 이상의 경우에는 제한된 함수비 범위(10%~20%)에서만 사용이 가능하고  $EC=3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  이상인 토양에서는 모래에서와 같이 TDR을 이용한 함수비 측정의 정확성이 현저히 저하되고 측정이 불가능한 경우도 있었다.

3. 실험결과에서는 염분농도에 따라서도 함수비가 증가될수록 TDR과 오븐건조법에 의해서 측정된 함수비 값의 차이가 비례하여 커지는 것을 알 수 있었다. 모래와 세립분이 포함된 토양 모두에서 포화도 50 %이상에서 TDR을 이용한 토양

수분 측정값의 편차나 염도에 따른 영향이 커지는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 박재현, 1998, 비포화 영역에서 용존 오염물질 거동에 관한 실험적 연구, 서울대학교 박사학위논문, p235.
2. Dalton, F. N., 1992, Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk density. In Topp, G. C. et al., Eds, Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Sepc. Publ. No. 30, SSSA, pp.143-167.
3. Hamed, Y., M. Persson, & R. berndtsson, 2005, Using Time Domain Reflectometry for Tracking Water and Salinity Movements in a Contour Ridge Managed Catchment in Tunisia, pp.10, from M. Persson's internet site.
4. Herkelrath, W. N., 1991, Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with TDR, Water resource research, 27, pp.857-864.
5. Persson M., 2001, Using Time Domain Reflectometry for Non-Aqueous Phase Liquid Saturation Measurements, TDR-2001, 2nd Intl' symposium & workshop on T.D.R. innovative geotechnical application, IL, USA, pp.362-371.
6. Roberto, A., 2002, A simple emperical method to evaluate the electrical conductivity of soils and waters by TDR, 17th WCSS, pp.821-1-8.
7. Soilmoisture Equipment Corp., 1996, Operating instruction, version 2000.
8. 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, pp.574-582.
9. White, I. & S.J. Zegelin, 1995, Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content, Handbook of vadose zone characterization & monitoring (Wilson, Everett & Cullen ed.), pp.343-385, Lewis.
10. Zegelin, S. J., White, I. & Russell, G. F., 1992, A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil water content, In Topp, G. C. et al., Eds. Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Sepc. Publ. No. 30, SSSA, pp.187-208.

본 연구는 환경부 '핵심환경기술개발연구 사업'의 지원(과제번호 20060082)에 의해 수행된 연구결과임.