

TDR을 이용한 토양함수비 측정의 정확성에 대한 실험

Experiment on the Accuracy of Soil Water Content Measurement Using TDR

윤 춘 경* · 유
Yoon, Chun Gyeong · Yu,

찬** · 김 경 한***
Chan · Kim, Kyoung Han

Abstract

Laboratory experiment was performed for the TDR to measure the soil moisture, and the results were compared with the design water content and the one measured by oven-dry method. Sand and kaolinite were used. Variables for the experiment were water content (10~50%), void ratio (0.7~1.3), mixture rate of kaolinite (10~30%), and measurement methods (TDR and oven-dry). In all cases, TDR method showed very accurate and reliable results, and average error and error range were far less than the oven-dry method which is widely used. Considerable error was noticed when water content was 50% where saturation was achieved for both methods. Therefore, TDR was thought to be applicable to the field moisture measurement if it is unsaturated. For field scale application of TDR, more research and verification of the accuracy with diverse soil conditions including physical, chemical, and mineral properties are recommended.

I. 서 론

토양의 함수비는 토공작업뿐만 아니라 관개에서도 매우 중요한 역할을 한다. 작물의 최대 수확을 위한 관개계획에서는 관개속도가 주로 토양의 투수계수에 의하여 결정되지만 관개시간과 양은 주로 토양 함수비에 따라 결정되므로¹⁾ 정확하고 신속한 토양함수비의 측정이 필수적이다. 일반적인 함수비 측정법인 dry oven건조 방법은 토양시료를 채취하여 측정하기 때문에 많은 시간과 인력이 필요하고 여러 가지 요인에 따라서 측정의 정확도가

달라질 수 있다. 이에 최근에는 Time Domain Reflectometry(TDR)을 이용한 토양함수비 측정 방법에 관한 연구가 활발한데, TDR은 한 개의 탐침으로 토양함수비와 토양염도를 측정할 수 있는 새로운 기법이다. TDR을 이용한 방법은 이미 국내에서도 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내의 지반과 토양여건에 따른 TDR을 이용한 함수비 측정시에 측정자료의 신뢰성에 대한 연구가 아직은 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 사질토를 대상으로 함수비의 변화, 세립분함유량의 변화 그리고 공극비

*건국대학교 농업생명과학대학

**Cornell Univ., Research Scholar

***건국대학교 대학원(석사과정)

키워드 : TDR방법, 노건조방법, 탐침토양함수비, 유전율상수, 전자기파, 반향시간

변화에 따른 TDR함수비 측정값을 계획함수비와 및 노건조(oven dry)법에 의해 측정된 함수비값과 비교검토하여 TDR을 이용한 토양함수비 측정값의 정확도를 조사하였다.

II. 이론 및 측정방법

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 파형은 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 고안되었는데 전자기파가 지나가는 지점의 유전율이 변하면 반향되는 파의 전파속도가 변하는 성질을 이용하면 토양의 함수비 측정에도 응용할 수 있다. TDR은 초기에는 액체의 복잡한 유전을 상수를 측정하는 장치로 사용되었으나 그 후 토양을 포함한 여러 물질의 유전특성을 측정하는 장치로 사용되어지고 있으며, 최근에는 TDR을 이용한 토양의 함수비를 측정하는 연구들이 보고되고 있다.^{2,3)}

2. TDR의 보정

TDR장비로 함수비를 측정하기 전에 탐침의 길이와 특성에 대한 보정을 실시하여야 하며 보정식^{4,5)}은 다음과 같다.

$$\Delta t_p = \Delta t_o + \Delta t_s = \Delta t_o + L \cdot n_{aw}/c \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta t_p = \Delta t_o + \Delta t_s = \Delta t_o + L \cdot n_{aw}/c \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Δt_p 는 총반향시간이고, Δt_o 는 Fig. 1에서 l 와 같은 액폭시 레진부분에서의 반향시간 그리고 Δt_s 는 토양속에서의 반향시간이다. L 은

탐침의 길이, c 는 자유공간에서 전자기파의 전파속도(3.0×10^8 m/sec)이다. 또한 n_{aw} 는 공기중에서의 굴절율이고, n_{aw} 는 물속에서의 굴절율이다. 여기서 굴절률(n_a)는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_a = (K_a)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, K_a 는 유전을인데 공기(K_{aw})에서는 1이고 물속(K_{aw})에서는 다음식과 같이 표현된다.^{4,5)}

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

식(4)에서의 T 는 측정시의 물의 온도를 나타낸다. 위와 같은 식으로 탐침의 실제적인 길이(L)와 반향시간(Δt_o)에 대한 보정을 실시한후 그 값을 함수비 측정시에 사용하여야 한다.

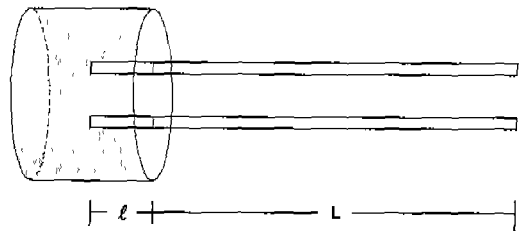


Fig. 1. TDR probe diagram

3. 토양함수비 측정

탐침을 토양에 설치하면 동축선과 토양이 만나 는 지점에서 임피던스의 변화가 발생하여 Fig. 2와 같은 형태로 전자기파가 1차 반향되며, 탐침을 되돌아오면서 다시 임피던스의 변화가 발생하여 2

차 반향이 일어난다. 이 두 반향점 사이는 전자기 파가 탐침을 지나는 구간으로 토양의 함수비 변화

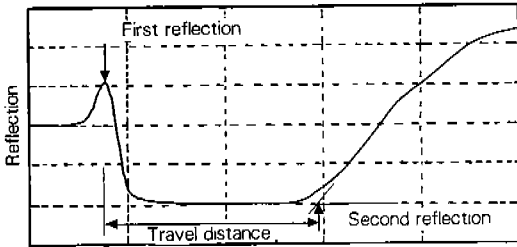


Fig. 2. Representation of the computation of bulk dielectric

에 따라 탐침주위의 유전율이 변하므로 2차 반향점에서 반향되어 돌아오는 시간에 변화를 가져온다.

이 때 TDR을 이용하여 측정하는 것은 탐침을 통과하여 반향되는 전자기파의 반향시간이다. 반향시간을 이용하여 함수비를 산정하기 위해서 먼저 함수비에 따른 유전율상수를 계산하게 된다. 이 때 유전율상수 K_a 는 다음식과 같이 표현된다.

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

여기서, c 는 자유공간에서 전자기파의 전파속도이고, Δt_s 는 TDR 신호의 전달시간이며, L 은 흙속에 묻혀 있는 탐침의 길이를 의미한다. Topp등은 유전율상수로부터 함수비를 추정하는 식을 다음과 같이 제안하였으며,⁶⁾ 이 식은 그 높은 정확성으로 인해서 현재까지 광범위하게 사용되고 있다.¹⁾ 하지만 Herkelrath에 의하면 유기물을 많이 함유하고 있는 토양에서는 위의 식을 사용할 수 없다는 보고도 있다.⁷⁾

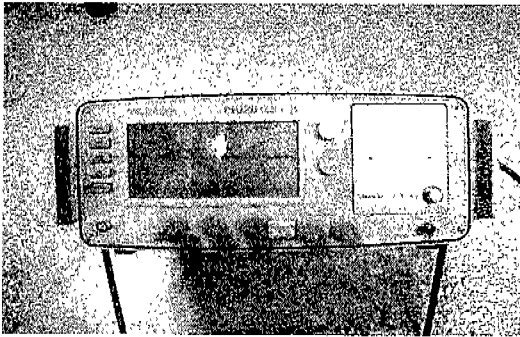
$$\theta = \frac{(-530 + 292 K_a - 5.5 K_a^2 + 0.043 K_a^3)}{10^4} \dots\dots\dots (6)$$

4. 탐침의 형상에 따른 특성

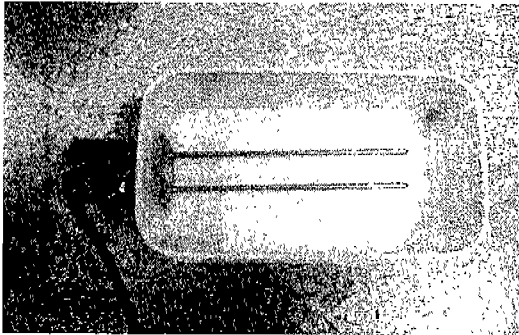
토양내 임피던스 변화를 측정하기 위해 설치되는 탐침의 기하학적 모양은 여러 형태로 제안되었는데 탐침형상의 기본적인 가정은 TDR과 탐침을 연결하는 동축케이블의 기하학적 모양을 유지시켜 주는 것이다. 탐침의 숫자에 따라 2선식, 3선식, 4선식으로 나눌 수 있다. 2선식 탐침을 이용하여 함수비를 측정하는 경우에는 평행한 두 선의 형상이 탐침과 연결되는 동축선과 그 형상이 달라 동축선과 탐침이 만나는 경계에서 적지 않은 신호의 손실이 발생하게 되는데 이문제를 해결하기 위하여 간혹 임피던스 일치장치를 설치하기도 한다. 하지만 탐침이 짧을 경우($\leq 15\text{cm}$)에는 임피던스 불일치로 인한 잡음이 발생하여 신호 해석시 문제가 되기도 한다. 3선식이나 4선식 탐침은 동축전송선의 기하학적인 모습을 그대로 유지하는 모양인데 임피던스 불일치로 발생하는 불필요한 잡음을 감소시켜줄 뿐만 아니라 임피던스 일치장치를 필요로 하지 않는 장점이 있다.^{8,9)} TDR의 성능은 일반적으로 대역폭으로 나타내는데 여기서 대역폭이란 직류 혹은 전압이 0인 값으로부터 가장 높은 진동수까지의 진동범위를 나타낸다. TDR은 대역폭이 크고 탐침의 길이가 길수록 많은 수의 반향신호를 측정할 수 있어 정확한 실험결과를 얻을 수 있다. 하지만 길이가 긴 탐침은 토양 내에 설치하기가 어려울 뿐만 아니라 측정영역이 커지는 단점이 있다.^{8,9)}

5. 함수비 측정장비

본 실험에서 사용한 장비는 Tektronics 1502B 케이블 테스터로서 기기의 대역폭은 2.5GHz, 이고 probe는 탐침길이 150.0mm의 2선식(2-rod wave guide)을 사용하였다 실험용 용기는 탐침 중심으로부터 반경 20.0mm 지역이 영향권임을 고려하여¹⁰⁾ 길이 170.0mm, 폭 60.0mm, 높이 40.0mm인 직사각형의 플라스틱 용기를 사용하여 제작하였다. Fig. 3에서는 Tektronics 1502B 장비와 실험에 사용된 용기를 보여주고 있다.



(a) Textronics 1502B



(b) Test box

Fig. 3. TDR and test box

III. 실험재료

실험에 사용한 토양시료는 모래였으며, 실험에서 세립분함유량을 조절하기 위해서는 카올리나이트를 사용하였다. 각각의 흙이 가지고 있는 물리적 성질과 입도 분포곡선은 Table 1과 Fig. 4와 같다.

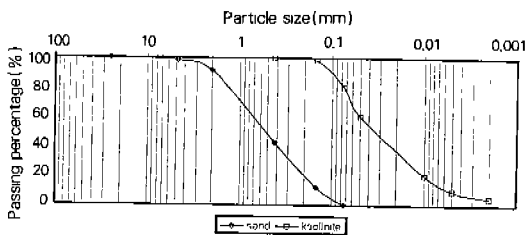


Fig. 4. Particles size distribution curve

Table 1. Physical properties of soils

Soil	Gs	LL	PI	Cu	Cg	USCS
sand	2.64	-	-	4.61	1.2	SP
kaolinite	2.70	42.4	17.0	-	-	CL

2. 실험방법

TDR에서 사용하는 탐침은 토양의 함수비 측정에서 흙의 구조, 화학성분 혹은 염분도에 받는 영향이 최소화되도록 설계되어있다. 따라서 본 연구에서는 TDR을 이용한 토양의 함수비 측정시에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되는 세립분의 함량과 밀도(간극비) 변화에 따른 TDR의 정확성 알아보기 위한 실험을 실시하였다. 우선 앞에서의 시료들을 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 24시간이상 노건조하여 수분을 없앤뒤에 세립분함량에 따른 토양의 함수비를 측정하기 위해서 우선 시료의 밀도는 실험용기의 체적(408cm³)에 대해서 시료의 간극비가 1.0이 되도록 시료의 중량을 고정시키고 그 시료의 중량 백분율중에서 세립분의 함유량이 각각 10%, 20%, 30%가 되도록 모래와 카올리나이트를 1/100의 정밀도와 최대 4kg까지를 칭량할 수 있는 전자저울(미국 OHAUS)로 계량하여 실험용 스푼으로 약 10분간 고르게 혼합하였다. 이때 시료는 함수비나 간극비의 경우의 수 각각에 대해서 모두 준비되었다. 계획함수비는 준비된 노건조 시료에 500ml용량의 메스실린더로 물을 계량하여 10%~50%까지 10%씩 다르게 조절하여 이때에도 실험용 스푼을 이용하여 2시간 고르게 혼합하여 TDR과 노건조(oven dry)법으로 함수비를 측정하였다. 이때 노건조법은 TDR에 의한 측정이 끝난 후 중심에서 좌우부분의 중간에서 약 100g씩의 시료를 채취하여 평균값을 취하였다.

시료의 밀도가 TDR의 함수비측정 정도에 미치는 영향을 확인하기 위해서는 모래만을 사용하여 간극비(e)를 각각 0.7, 1.0, 1.3으로 조절하였으며, 이때 계획함수비는 10%~35%까지 5%씩 다르게 하여 실험을 실시하였다. 한편 동일한 간극비를 가지는 토양에서 세립분함유량이 함수비측정에 미

치는 영향을 파악하기 위하여 세립분 함유량 10%, 30%, 50%에 대해서 간극비를 0.8과 1.0이 되도록 조절하여 함수비는 5%~35%까지 5%씩 조절하여 실험하였다.

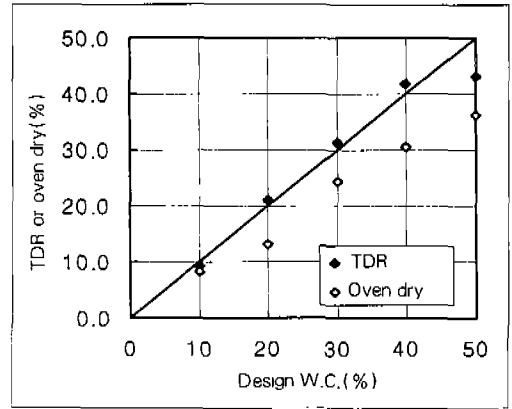
IV. 결과 및 고찰

1. 세립분 함량에 따른 함수비 측정

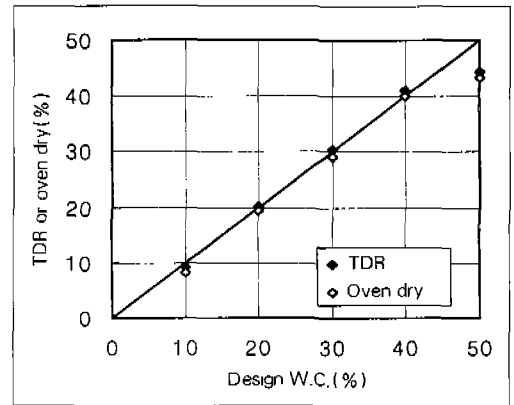
Fig. 5(a)는 세립분함량 10% 경우인데, TDR로 함수비를 측정한 경우는 계획함수비와 비슷한 함수로 측정되는데 반해서 노건조법으로 측정한 경우에는 계획함수비와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그림에서는 계획함수비에 대해서 TDR은 함수비에 따라서 4.3~14.0%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차는 7.2% 정도로 나타났다. 그러나 노건조법은 함수비에 따라서는 18.0%~35.0%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차도 24.7%로서 TDR 보다는 오차가 현저히 큰 것으로 나타났다.

Fig. 5(b)는 세립분함량이 20%인 경우인데, 그림에서는 세립분함량 10%인 경우보다 노건조법으로 측정된 함수비가 TDR로 측정된 함수비와 차이가 작은 것으로 나타나 세립분 함량이 증가함에 따라서 노건조법에 의한 함수비 측정도 그 정확성이 증가되었다는 사실을 알 수 있었다. 그림에서는 계획함수비에 대해서 TDR은 함수비에 따라서 0.5%~11.5%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차는 4.9%로 나타났다. 노건조법은 함수비에 따라서 0.3%~19.0%의 오차범위를 나타내었으며, 평균 오차는 7.7%로 나타나 세립분함유량 10%인 경우 보다는 그 정확성이 많이 향상되었음을 알 수 있었다. 그러나 이 경우에도 TDR보다는 정확성이 낮게 나타났다.

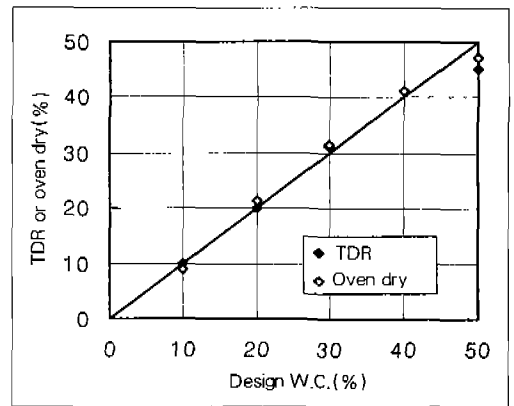
Fig. 5(c)는 세립분함량 30%인 경우이며, 그림에서는 계획함수비에 대한 TDR과 노건조법에 의한 측정값이 유사한 정확성을 나타내었다. 그림에서는 계획함수비에 대해서 TDR은 함수비에 따라서 0.4%~9.7%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차는 3.4%로 세립분함유량이 20%인 경우보다 오차가 작아진 것으로 나타났다. 또한 노건조법도



(a) Fine content 10%



(b) Fine content 20%



(c) Fine Content 30%

Fig. 5. Water content measurements with different fine contents

함수비에 따라서 2.5%~10.0%의 오차범위를 나타내었으며, 평균 오차는 5.8%로 나타나 세립분함유량 20%인 경우보다 오차가 작아진 것으로 나타났다. 세립분함유량 10%의 경우에 계획함수비와 노건조법으로 측정한 함수비 사이에 차이가 큰 것으로 나타났는데, 이 원인은 세립분함유량이 적고 포화되지 않은 모래의 경우에는 투수계수가 크기 때문에 흙속에서 수분의 이동이 빠르기 때문이라고 판단된다. 즉 시료내의 수분은 중력에 의해서 실험용기의 아래 부분에 고일 수 있으며, 노건조법에서 처럼 캔으로 채취된 시료들의 함수비를 평균 함수비로 결정하기 때문에 발생하는 오차로 판단되었다.

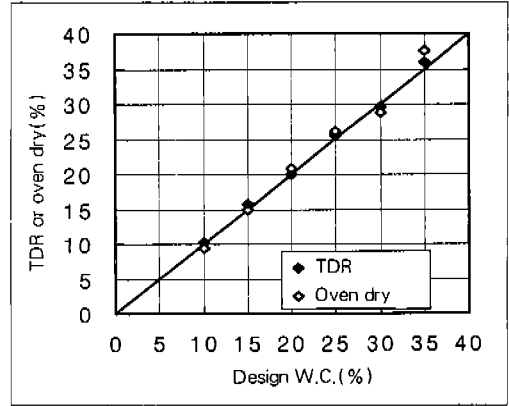
그러나 세립분함유량이 아주 작은 사질토의 함수비 측정에서는 노건조법이 적절하지 못할 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 특히 함수비가 커질수록 그 상대적인 오차는 현저하게 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 TDR을 사용한 경우에는 탐침(Probe) 주변 함수비의 평균값을 구하여 나타내므로 세립분의 함유량에 따른 영향을 적게 받으면서 정도가 높은 측정을 할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

계획함수비가 50%인 경우에는 TDR의 경우에도 모두 오차가 크게 나타났는데, 이유는 시료의 비중이 조금씩 변화하지만 대체로 함수비 37%~40%사이에서 포화상태에 도달한다고 보면 포화상태 이후에는 TDR을 이용한 함수비 측정의 정확성도 많이 떨어진다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 TDR을 이용한 함수비 측정의 적정 구간은 5~35% 정도로서 포화상태 이전까지는 매우 정확한 측정이 가능함을 알 수 있었다.

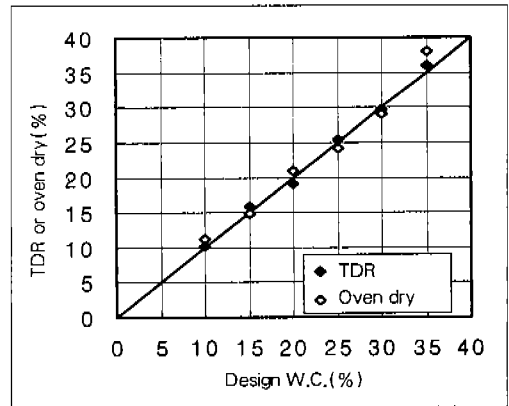
2. 간극비에 따른 함수비 측정

시료의 밀도가 TDR의 함수비 측정의 정도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다.

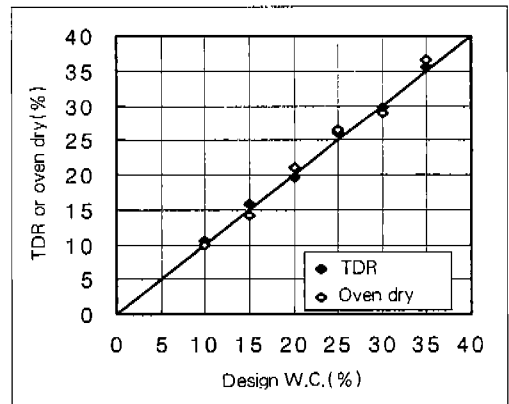
Fig. 6(a)는 간극비가 0.7인 경우인데, 실험에 사용된 모래의 비중은 2.64이므로 포화도 100%일 때 함수비는 26.5%로 계산되었다. 따라서 간극비



(a) $e = 0.7$



(b) $e = 1.0$



(c) $e = 1.3$

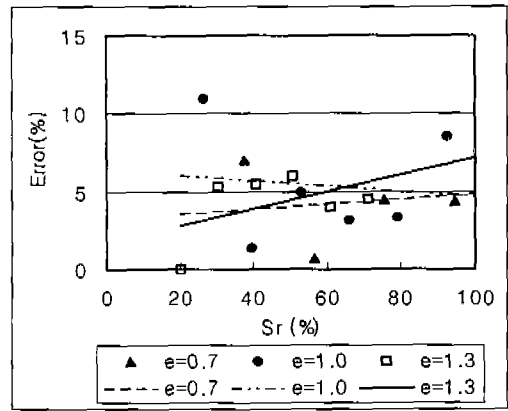
Fig. 6. Relationship of water content and void-ratio

0.7에서는 포화도 100%이상인 경우에서도 실험이 이루어졌는데, 전체적인 측정값의 경향은 계획함수비에 대해서 TDR은 함수비에 따라서 0.7~7.1%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차가 2.0%로서 매우 정확도가 높았다. 노건조법은 함수비에 따라서 2.5%~10.0%의 오차범위를 나타내었으며, 평균 오차는 4.6%로 나타나 TDR을 사용하여 함수비를 측정할 경우보다 오차가 큰 것으로 나타났다.

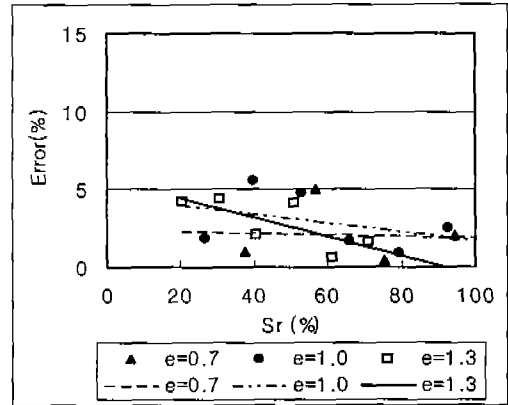
Fig. 6(b)는 간극비가 1.0인 경우인데, 포화도 100%에 도달하는 함수비는 37.9%로 계산되었다. 따라서 함수비 10%일때의 포화도는 26.4%이므로 포화도 26.4%~100%이상인 경우에 실험이 이루어졌는데, 전체적인 측정값의 경향은 계획함수비에 대해서 TDR은 함수비에 따라서 1.0~5.6%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차는 2.9%로서 간극비 0.7인 경우보다 평균오차는 약간 커졌으나 역시 정확도가 매우 높았다. 노건조법은 함수비에 따라서 1.3%~11.0%의 오차범위를 나타내었으며, 평균 오차는 5.4%로 나타나 간극비 0.7인 경우보다 오차의 범위와 평균오차 모두 커진 것으로 나타났으며, TDR을 사용하여 함수비를 측정할 경우보다 오차가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 6(c)는 간극비가 1.3인 경우인데, 포화도 100%에 도달하는 함수비는 49.2%로서 실험에서 가장 높았던 함수비 35%일때의 포화도는 71.0%였다. 따라서 포화되지 않은 상태들에 대해서 실험이 이루어졌는데, 전체적인 측정값의 경향은 계획함수비에 대해서 TDR은 함수비에 따라서 0.7~4.4%의 오차를 나타내었으며, 평균 오차는 2.9%로서 간극비 1.0인 경우보다 오차범위는 감소하였지만 평균오차는 유사한 것으로 나타났다. 노건조법은 함수비에 따라서 0.0%~6.0%의 오차범위를 나타내었으며, 평균오차는 4.2%로서 나타나 간극비 1.0인 경우보다 오차의 범위와 평균오차 모두 작아진 것으로 나타났다.

이상에서 계획함수비와 비교했을 때 TDR이나 노건조법에 의한 함수비 측정값은 간극비가 커질수록 함수비에 따른 그 오차의 범위가 좁혀지고



(a) Oven Dry



(b) TDR

Fig. 7. Relationship of measurement error and void-ratio

있는 것으로 나타났다. 이는 간극비가 작은 경우보다는 큰 경우가 토양내에서 수분의 이동이 용이해지므로, 수분의 분포가 균질해지기 때문이라고 판단된다. 그러나 함수비나 포화도의 증가에 따른 오차의 변화경향은 일정하지 않으며 Fig. 7에는 포화도와 간극비의 변화에 따른 함수비 측정시 오차의 경향이 요약되어있다. Fig. 7(a)는 노건조법의 경우인데, 간극비 0.7과 1.3에서는 포화도가 증가함에 따라 오차도 증가하는 경향을 나타내었으며, 간극비 1.0에서는 포화도가 증가함에 따라서 오차가 조금 감소하여 측정시의 여러 가지 상황에 따라서 그 경향이 일정하지 않은 것으로 나타났

다. 그러나 Fig. 7(b)의 TDR의 경우에 간극비 0.7에서는 포화도에 따른 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나고 있으며, 간극비 1.0과 1.3에서는 포화도가 증가함에 따라서 오차도 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 TDR을 이용한 함수비 측정은 간극비 변화에 따른 영향을 거의 받지 않으면서 측정오차도 노건조법 보다는 훨씬 낮은 장점을 가지는 것으로 나타났다.

3. 세립분 함량과 간극비변화에 따른 함수비 측정

한편 동일한 간극비를 가지는 토양에서 세립분 함유량이 함수비 측정에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험의 결과는 Fig. 8에 제시되어 있다. Fig. 8(a)와 (c), (e)는 전체 시료중에서 세립분의 중량백분율이 10%, 30%, 50%인 시료의 간극비를 0.8이 되도록 조절하고 이때의 계획함수비를 5%~35%까지 5%씩 증가시키면서 TDR과 노건조법에 의하여 함수비를 측정한 결과이다. 간극비 0.8인 경우에 노건조법으로 측정된 함수비와 계획함수비를 비교하면 세립분함유량 10%인 경우에 오차범위는 0.7%~18.0%였으며, 평균오차는 7.2%로 나타났다. 세립분함유량 30%인 경우는 오차범위가 2.0%~11.4%였으며, 평균오차는 6.0%로 나타났다. 세립분함유량 50%인 경우는 오차범위가 2.5%~22.0%였으며, 평균오차는 8.6%로 나타나 가장 큰 오차를 나타내었다.

Fig. 8(b), (d) 그리고 (f)는 세립분 10%, 30%, 50%인 시료의 간극비를 1.0이 되도록 조절하여 같은 방법으로 실험한 결과이다. 간극비 1.0인 경우에 노건조법으로 측정된 함수비와 계획함수비를 비교하면 세립분함유량 10%인 경우에 오차범위는 0.0%~11.4%였으며, 평균오차는 4.6%로 간극비 0.8에서보다 오차가 많이 감소된 것으로 나타났다. 세립분함유량 30%인 경우는 오차범위가 4.0%~18.0%, 평균오차는 9.1%로 나타났으며, 세립분함유량 50%인 경우는 오차범위가 4.0%~7.1%, 평

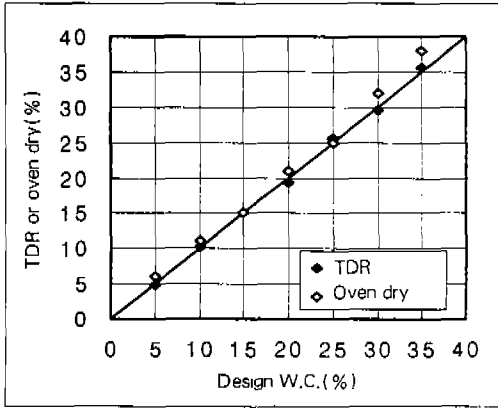
균오차는 5.8%로 나타났다.

간극비 0.8인 경우에 TDR을 이용하여 측정된 함수비와 계획함수비를 비교하면 세립분함유량 10%인 경우에 오차범위는 0.1%~2.6%였으며, 평균오차는 1.9%로 나타났다. 세립분함유량 30%인 경우는 오차범위가 1.6%~6.2%였으며, 평균오차는 3.2%로 나타났다. 세립분함유량 50%인 경우는 오차범위가 0.0%~2.7%였으며, 평균오차는 1.3%로 나타나 전반적으로 오차가 매우 작았던 것으로 나타났다.

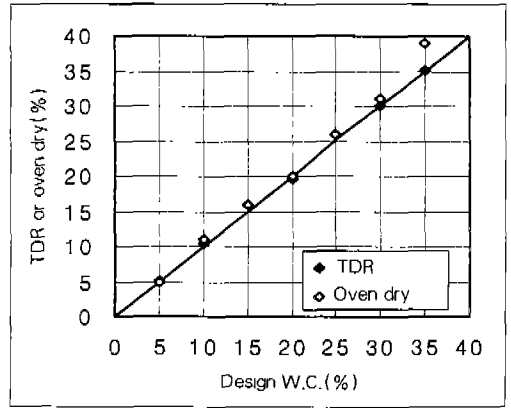
한편 간극비 1.0인 경우에는 세립분함유량 10%인 경우에 오차범위는 0.1%~5.6%였으며, 평균오차는 2.8%로 나타났다. 또한 세립분함유량 30%인 경우는 오차범위가 0.2%~4.0%, 평균오차는 2.1%로 나타났으며, 세립분함유량 50%인 경우는 오차범위가 0.1%~3.3%, 평균오차는 2.0%로 나타나 간극비 1.0의 경우에는 전체적인 오차의 정도가 비슷하게 나타났다.

이상에서 노건조법에 의해서 측정된 함수비는 간극비와 세립분함유량이 변화함에 따라서 오차의 발생이 실험조건등에 따라서 일정한 경향없이 불규칙하게 나타났지만, TDR을 이용한 경우에는 전체적으로 노건조법에 비해 오차규모가 작고, 비슷한 정도의 오차범위와 평균오차를 나타내면서 함수비를 보다 정확히 측정할 수 있는 것으로 나타났다.

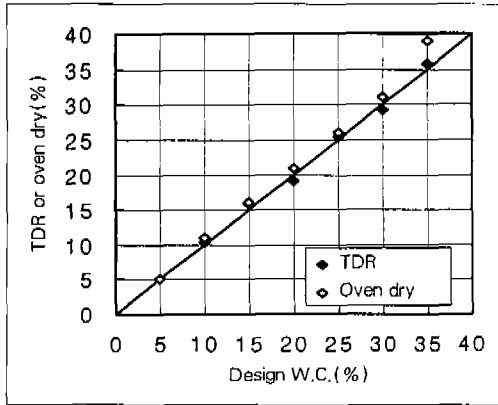
Fig. 9는 TDR을 이용한 함수비측정에서 세립분 함유량과 간극비의 관계를 나타낸 것이다.그림에서는 노건조법으로 함수비를 측정한 경우에 세립분의 함량이 증가할수록 오차는 커지며, 간극비 0.8에서 오차가 간극비 1.0보다 큰 것으로 나타났다. 그러나 TDR을 이용하여 함수비를 측정한 경우에는 세립분함유량이 증가할수록 오차는 오히려 감소하는 경향을 보이며, 간극비 0.8과 1.0에서 발생하는 오차는 매우 작아서 노건조법과 비교하여 같은 간극비차이에 따른 오차의 발생이 매우 작은 것으로 나타났다.



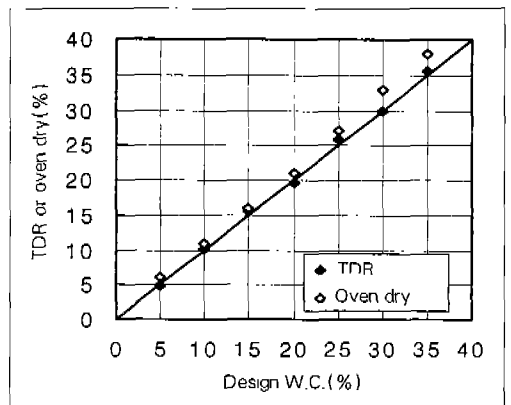
(a) Fine content 10%, e=0.8



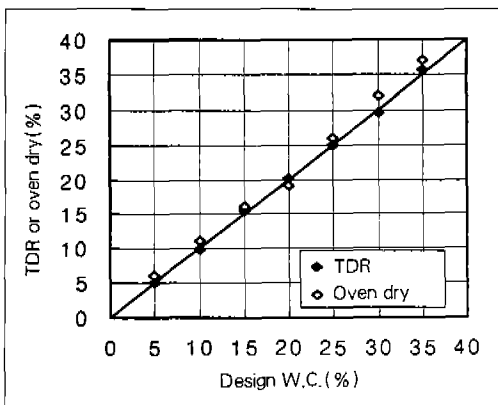
(b) Fine content 10%, e=1.0



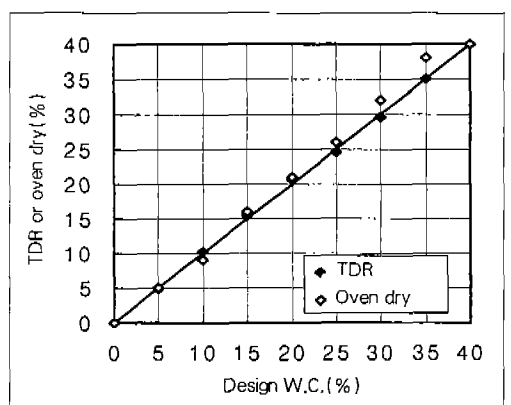
(c) Fine content 30%, e=0.8



(d) Fine content 30%, e=1.0



(e) Fine content 50%, e=0.8



(f) Fine content 50%, e=1.0

Fig. 8. Water Content According to the Fine Content and Void Ratio

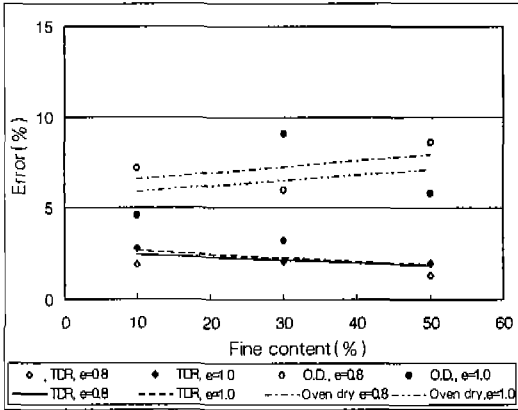


Fig. 9. Relationships of among measurement error, fine content and void ratio

IV. 결 론

본 연구에서는 TDR을 이용한 함수비 측정의 신뢰성을 알아보기 위하여 실내실험을 통하여 토양조건의 변화에 따른 TDR의 측정값을 계획함수비를 기준으로 비교·검토하였으며, 또한 현재 함수비 측정의 일반적인 방법인 노건조법을 병행 실시하여 이때의 측정값과도 비교하였다. 실험결과에 의하면 일반적으로 토양의 여러 가지 조건변화에 대해서 TDR에 의한 측정값이 노건조법에 비하여 정확도가 높았으며, 이러한 결과는 향후 TDR을 이용하여 현장에서 함수비 측정에 다양하게 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 세립분함량이 10%미만인 경우에 사질토의 투수계수가 크기 때문에 계획함수비에 대한 노건조법의 측정함수비는 오차가 크게 발생하였다. 그러나 TDR을 사용한 경우에는 탐침(probe)주변 함수비의 평균값을 구하여 나타내므로 세립분의 함유량에 따른 영향을 적게 받으면서 측정오차가 낮았다.

2) 계획함수비와 비교했을 때 TDR이나 노건조법에 의한 함수비 측정값이 간극비가 커질수록 함수비에 따른 그 오차의 범위가 좁혀지고 있는 것으로 나타났다. 이는 간극비가 작은 경우보다는

큰 경우가 토양내에서 수분의 이동이 용이해지므로, 수분의 분포가 균질해지기 때문이라고 판단되었다.

3) 노건조법은 포화도 증가와 간극비변화에 따른 측정값의 정확성이 일정하지 않은 경향을 나타냈으나, TDR을 이용한 측정에서는 간극비 변화에 따른 영향을 거의 받지 않으면서 포화도가 증가할수록 측정오차도 작아지는 장점을 가지는 것으로 나타났다.

4) 노건조법에 의해서 측정된 함수비는 간극비와 세립분함유량이 변화함에 따라서 발생하는 오차의 정도가 실험조건동에 따라서 일정한 경향없이 불규칙하게 나타났지만, TDR을 이용한 경우에는 전체적으로 비슷한 정도의 오차범위와 낮은 평균오차를 나타내면서 함수비를 측정할 수 있는 것으로 나타났다.

이상으로 사질토를 대상으로 세립분 함유량과 간극비의 변화등에 따른 TDR을 이용한 토양의 함수비측정의 정확성에 대해서 알아보았다. 분석결과에 의하면 기존의 노건조법과 비교했을 때, TDR을 이용할 경우에는 정확성이 높은 함수비 측정이 가능할 것으로 판단되었다. 이러한 TDR에 의한 토양 함수비 측정은 측정시간이나 방법등이 노건조법에 비해서 대단히 간단하고 빠르므로 경제성 및 실용성에서도 많은 장점을 가지고 있다고 판단되었다.

따라서 토양함수비 측정에 TDR의 다양한 활용을 위하여 본격적인 관심과 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 건국대학교 학술진흥연구비의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 박재현, 1997, 비포화 영역에서 용존 오염물질 거동에 관한 실험적 연구, 박사학위논문.
2. 박재현, 윤성용, 김상준, 선우중호, 1997, TDR

- 을 이용한 토양함수량의 측정. 한국수자원학회 논문집 30(6), pp. 587~595.
3. 정상옥, 1996, TDR을 이용한 토양함수량과 토양염도의 측정. 한국농공학회지, 38(4), pp.53~62.
 4. Baker, T. H W. and Goodrich, L. E., 1987, "Measurement of Soil Water Content Using the Combined Time Domain Reflectometry Thermal Conductivity Probe." Canadian Geotechnical Journal, 24, pp. 160~163.
 5. Herkerira, W. N., Mamburg, S. P. and Murpfy, F., 1991, Automatic real time monitoring of soil moisture in a remote field area with TDR, Water Resour. Res., 27, pp. 857~864.
 6. Kim, D.J, 1996, "Application of an automated time domain reflectometry to solute transport study at field scale : Experimental mehtodology and calibration of TDR." Econ. Environ. Geol., 29(6), pp. 699~712.
 7. Kim, D. J, 1996, "Application of an automated time domian reflectometry to solute transport study at field scale : Transport concept." Econ. Environ. Geol., 29(6), pp. 713~724.
 8. 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.
 9. 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.
 10. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines, Water Resour. Res. 16, pp. 574~582.