

지반의 함수비 평가를 위한 관입형 TDR 프로브의 개발 및 적용

Development and Application of TDR Penetrometer for Evaluation of Soil Water Content of Subsoil

홍 원 택¹ Hong, Won-Taek

정 영 석² Jung, Young-Seok

이 중 섭³ Lee, Jong-Sub

변 용 훈⁴ Byun, Yong-Hoon

Abstract

Dielectric constant depends on the variation of soil water content, and the estimation of soil water content using time domain reflectometry (TDR) has been studied by many researchers. The purpose of this study is the development and application of TDR penetrometer (TDRP) in order to evaluate the soil water content according to the penetration depth. The TDRP consists of cone, sleeve, driving rod, hammer, and guide. Three electrodes, which are used to measure the dielectric constant of soils, are mounted on the surface of sleeve and, in turn, connected with coaxial cable and time domain reflectometer. To establish the relationship between the volumetric water content and dielectric constant, several laboratory tests by using the TDRP are performed in the specimens with a variety of volumetric water content. The experimental results show that the dielectric constant is strongly correlated to volumetric water content as polynomial equations with an order of 3. In addition, the volumetric water content calculated from the dielectric constant is similar to that obtained from the sample weight. In the field, a small sampler is used to compare the volumetric water content calculated from the dielectric constant with the volumetric water content obtained from the sample. The results of field application demonstrate that the volumetric water content estimated by the TDRP shows similar trend to the gravimetric water content of sample. This study suggests that the TDRP is effectively used to evaluate the volumetric water content of unsaturated soils according to the penetration depth.

요 지

불포화토의 함수비 변화에 따라 유전상수는 민감하게 변화하므로, TDR 프로브를 이용하여 유전상수를 측정함으로써 흙의 체적함수비를 산정하기 위한 연구가 여러차례 시도되어 왔다. 본 연구에서는 불포화지반의 깊이에 따른 함수상태를 획득하기 위하여 관입형 TDR 프로브(TDRP)를 개발 및 현장적용을 수행하였다. 개발된 TDRP는 콘, 주면부, 룯드, 그리고 해머 및 가이드로 구성된다. 지반의 유전상수를 측정하기 위한 세계의 전극은 주면부의 표면에 설치되었으며, 세계의 전극은 동축선과 연결한 후, reflectometer에 연결하여 TDRP 측정 시스템을 구성하였다. 체적함수비-유전상수의 관계를 결정하기 위하여, 실내실험에서 체적함수비 변화에 따른 주면진사의 유전상수를 측정하였다. 실험결과,

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3838, Fax: +82-2-928-7656, asan1103@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

체적함수비-유전상수의 관계는 프로브의 설치방식에 관계없이 3차 다항식으로 결정되었으며, 시료의 체적함수비와 높은 상관성을 나타내었다. TDRP의 현장적용실험은 현장에서 소형 sampler로 채취된 시료의 중량함수비 결과와 비교 및 분석되었으며, TDRP로 산정된 체적함수비와 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서 개발된 관입형 TDR 프로브는 관입심도에 따라 대상지반의 체적함수비를 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Dielectric constant, Penetrometer, Time domain reflectometry, Unsaturated soil, Volumetric water content

1. 서론

일반적으로, 물-공기-흙입자로 구성된 불포화토에서 함수비는 지반구조물의 안정성 평가에 지배적인 영향을 미치게 된다. 도로의 경우, 겨울철 동상발생으로 인한 포장 파손 및 여름철 강우로 인한 지지력 감소와 같은 문제점이 발생할 수 있으므로, 이러한 문제를 예방하기 위하여 도로포장구조체의 하부구조에서 함수비 변화를 측정하기 위한 연구가 수행되어 왔다(Kim and Jeon, 2005; Cho et al., 2013). 또한, 사면의 경우 강우로 인한 침투현상으로 인해 사면내 간극수압 분포와 포화깊이는 변화되고, 이로부터 전단강도의 감소를 유발한 후 사면파괴에 도달하게 되므로, 심도에 따라 지반의 함수상태를 평가하기 위한 기법이 요구된다.

불포화토의 함수량 측정을 위하여 여러 가지 방식의 계측장비들에 대한 연구가 수행되어 왔다. Tensiometer의 경우, 포화되어 있는 튜브내의 압력과 흙의 matric potential 차이로부터 평형상태에 도달하기까지 물이 이동하며, 이때 변화하는 압력을 측정함으로써 흙의 함수상태를 모니터링 한다(Kim, 2003). 한편, Topp et al.(1980)은 TDR 프로브를 사용함으로써 측정된 유전상수로부터 지반의 함수상태 평가에 대한 가능성을 보여주었다. TDR 프로브는 실시간으로 지반의 함수비 측정이 가능하므로 지반환경공학 분야에서 보편적으로 활용되어 왔으며, 여러 연구자들에 의하여 프로브 종류 및 온도에 대한 민감성 분석에 관련된 연구 또한 수행되어 왔다(Jones et al., 2002; Kim and Jeon, 2005; Cho et al., 2010). 또 하나의 유전상수 측정방법인 FDR(Frequency domain reflectometry) 프로브는 직류전원의 유도효과를 피하기 위하여 100MHz 이상의 고주파수의 전자파를 이용하여 함수상태를 보다 높은 정밀도로 평가할 수 있음을 보여주었다(Kim et al., 2004; Hur et al., 2009). 이러한 함수량 측정 장비는 주로 대상현장의 함수상태 모니터링에 적합한 반면, 장기 모니터링시 동결발생과 같은 기후조

건과 흙의 물리화학적 특성으로 인해 내구성이 저하될 수 있다. 이에 따라, 지반의 함수상태를 신속하고, 정확하게 측정할 수 있으며, 심도에 따른 함수비 변화를 평가할 수 있는 장비 개발에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 불포화토에서의 지반조사시, 심도에 따른 함수특성을 획득하기 위하여 관입형 TDR 프로브를 개발하였으며, 실내보정실험 수행 및 현장에 적용하였다. 본 논문에서는 TDR 프로브의 측정원리와 활용방법에 대해 설명한 후, 관입형 TDR 프로브를 소개하였으며, 관입형 TDR 프로브를 이용한 실내보정실험 및 현장적용실험의 과정 및 결과를 다룬다.

2. Time Domain Reflectometry 원리

TDR 프로브는 전기적 불연속성을 지닌 유전체에 프로브를 접촉시킨 후, 전자기적 펄스를 발신하고, 반사되어 돌아오는 반응을 측정함으로써 이용된다. Fig. 1과 같이, 전자기적 펄스의 속도는 전자기파의 겉보기 길이와 전극의 길이를 이용하여 계산되며, 이는 프로브에 접촉된 유전체의 유전율에 따라 변화하게 된다. 흙에서의 전자기파 속도(v) 및 유전상수(K_a)의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

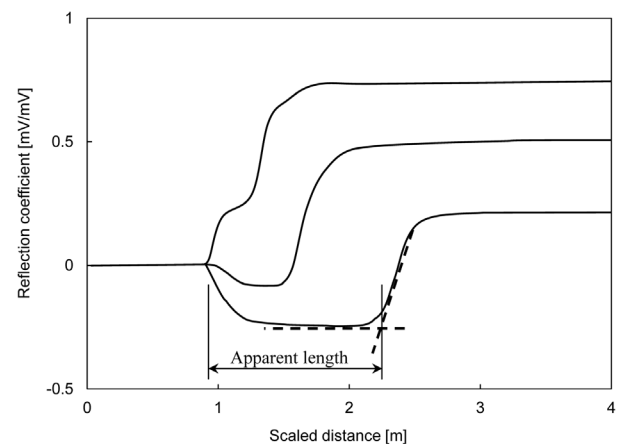


Fig. 1. Typical TDR waveform

$$v = \frac{2L}{t} = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad (1)$$

여기서, t 는 전자기파의 이동시간, L 은 TDR 프로브의 길이, 그리고 c 는 진공상태에서의 전자기파 속도(3×10^8 m/s)를 나타낸다. 전자기파의 이동시간(t)은 발생한 펄스가 TDR 프로브의 초기지점에서 반사되어 측정된 시점부터 끝단까지 도달한 후 반사되어 오기까지 경과된 시간을 의미하며, reflectometer에서 측정되는 겉보기 길이(L_a , apparent length)는 다음의 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$L_a = \frac{ct}{2} \quad (2)$$

식 (1) 및 식 (2)로부터, 실제 TDR 프로브의 전극 길이(L) 및 겉보기 길이(L_a)를 이용하여, 식 (3)과 같이 유전상수를 산정할 수 있다.

$$K_a = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{L_a}{L}\right)^2 \quad (3)$$

유전상수는 전극으로 사용되는 프로브 사이에 유전체가 존재하는 경우와 진공상태인 경우의 전기용량 비로 정의된다. 일반적으로 공기의 유전상수는 1, 물의 유전상수는 81이며, 건조된 흙의 유전상수는 3~8의 값으로 나타난다. 이와 같이 물과 흙의 상대적인 유전상수 차이가 크므로, 불포화토에서의 유전상수는 함수비에 따라 민감하게 변화하게 된다.

유전상수의 변화로부터 흙의 함수비를 산정하기 위하여 많은 연구자들이 TDR프로브를 이용하였다(Bensona and Bosscher, 1999; O'Connor and Dowding, 1999). Topp et al.(1980)은 다양한 종류의 흙에 대하여 체적함수비 및 유전상수를 측정 후, 체적함수비와 유전상수의 경험적 관계를 제안하여 널리 이용되어 왔다. 여기서 Topp et al.(1980)이 제안한 경험식의 계수는 모래와 점토지반에 대하여 제안한 값이며, 온도나 밀도에는 큰 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 또한, 체적함수비 및 유전상수의 관계에 대하여 Topp et al.(1980)이 제안한 3차 다항식보다 단순한 형태의 식들도 제시된 바 있다(Malicki et al., 1996; Topp et al., 1996).

3. 관입형 TDR 프로브

3.1 형상

본 연구에서는 불포화지반의 심도별 함수비를 평가하기 위하여 관입형 TDR 프로브(TDR penetrometer, TDRP)를 개발하였다. TDRP는 Fig. 2와 같이 유전상수를 측정하는 TDR 프로브(직경 $D = 20$ mm), 연결롯드(직경 $D = 22$ mm), 그리고 동적관입을 위한 해머 및 가이드로 구성된다. TDR 프로브의 선단부는 지반으로의 원활한 관입을 위하여 선단각이 60° 인 원추형으로 설계되었으며, 관입시 마모를 방지하기 위하여 스테인레스 스틸로 제작되었다. 지반의 유전상수를 측정하기 위하여 주변부의 표면을 따라 Fig. 3과 같이 전극을 설치하였으며, 주변부는 설치되는 전극간의 합선 및 간섭 영향을 최소화하기 위하여 폴리아미드 재질로 제작되었다. TDR 프로브는 3전극 타입으로서, 세개의 전극은 길이 80mm, 두께 1.5mm의 스테인레스 스틸 재질로 제작되었으며, 6mm 간격으로 배열되었다. TDRP는 동적관입시험과 같이 해머를 낙하시킴으로써 지반에 동적으로 관입되며, 관입이 진행됨에 따라 대상지반을 교란시키게 된다. 이에 따라, 유전상수 측정시 관입에 의한 지반의 교란영향을 최소화하기 위하여, 전극은 선단의 콘에 근접한 6mm 상단에 위치시켰다.

연결롯드는 케이블의 배선을 위하여 중공관 형태로 제작되었으며, 롯데와 주변부 사이에는 관입에 따른 롯

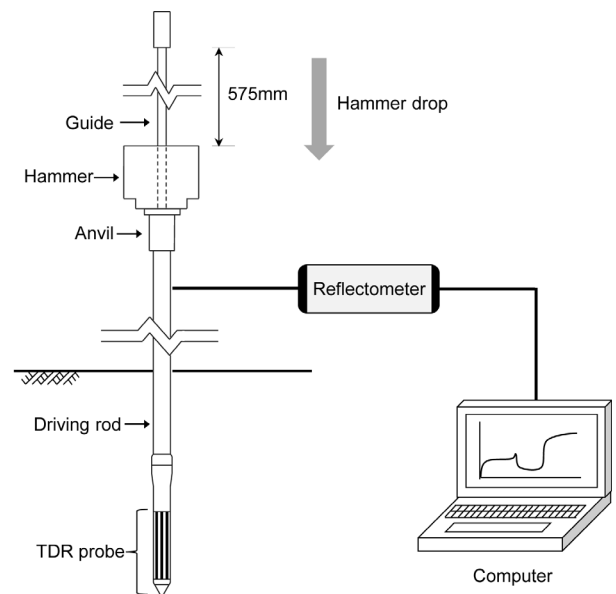


Fig. 2. TDRP (TDR penetrometer) with measurement system

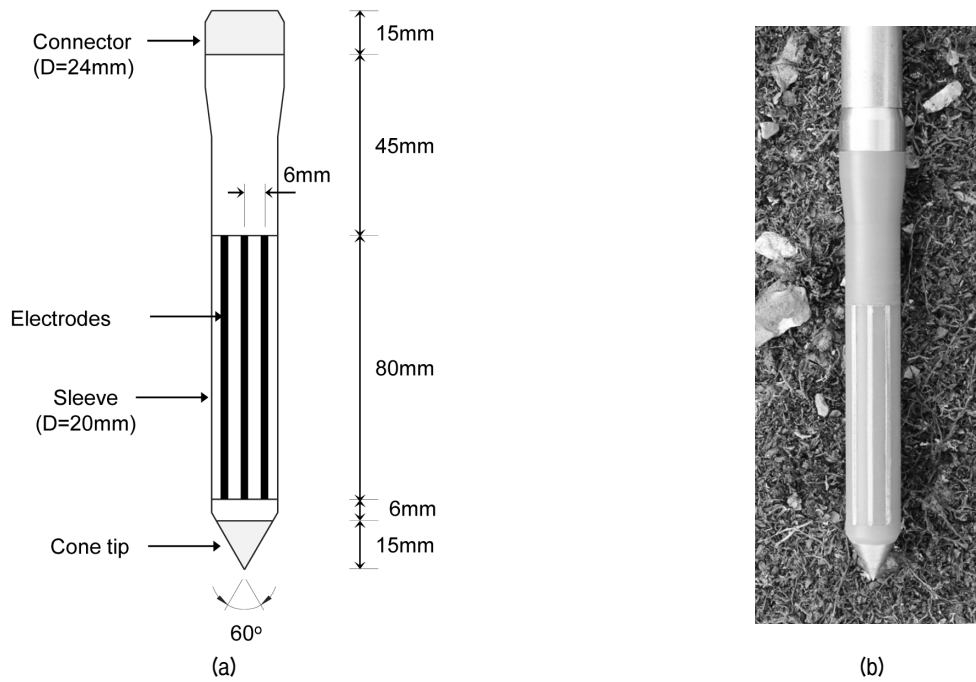


Fig. 3. TDR probe: (a) schematic drawing; (b) photographic picture

드와 지반 사이의 마찰을 최소화 하기 위하여 직경을 $D = 24\text{mm}$ 로 확대한 연결부를 배치하였다. 또한, 동적 관입을 위한 해머 및 가이드는 동적콘관입시험(ASTM D6951)의 제원과 동일하게 무게 8kg의 해머를 높이 575mm에서 낙하되도록 설계되었다.

3.2 회로구성 및 측정 시스템

TDRP는 세계의 전극 중 중심전극에 동축선 내부를 연결하고, 양쪽 전극에 동축선 외부를 연결하여 회로를 구성하였다. 동축선 내부에 연결된 전극에서는 전자기적 펄스를 발신하고, 동축선 외부에 연결된 전극에서는 전기적인 경로를 유도하기 위한 접지의 역할을 한다. 중심전극 주위에 있는 매질의 유전상수에 따라 중심전극을 통하여 반사되어 오는 출력신호의 이동시간은 변화하게 되며, 이를 통하여 매질의 상태변화를 추정할 수 있다. TDRP의 세계의 전극과 연결된 동축케이블은 signal generator 및 oscilloscope의 기능을 동시에 포함하고 있는 reflectometer(Hyperlabs, HL1101)에 연결되고, 컴퓨터에 기록 및 저장되도록 측정시스템을 구성하였다. 또한, 신호 측정시 잡음을 제거하기 위하여 256개의 신호를 평균함으로써, 매질의 유전상수 변화에 의한 결과만을 반영하도록 하였다.

4. 실내실험

TDRP에 의해 측정되는 매질의 유전상수는 흙의 특성뿐만 아니라, probe의 재질 및 형상, 그리고 연결케이블 등에 의해 영향 받아 변화하게 된다. 따라서, TDRP를 이용하여 현장의 체적함수비를 산정하려는 경우, 실내실험을 통하여 유전상수와 체적함수비의 관계에 대한 연구가 선행되어야 한다. TDRP의 실내실험을 위하여 Fig. 4와 같이 직경 180mm, 높이 200mm의 몰드를 제작하였으며, TDR 프로브는 주변의 금속재료에 영향을 받으므로, 플라스틱 재질을 이용하였다. 실내실험에서는 시료의 입도분포에 따른 영향을 배제하기 위하여, 40번 체를 통과하고 50번 체에 잔류하는 평균입경 (D_{50}) 0.36mm의 주문진사를 사용하였다. 시료는 시료혼합기를 사용하여 설정된 함수비에 따라 증류수와 주문진사를 혼합시킨 후, 제작된 몰드에 3개의 층으로 나누어 다짐하여 조성되었다. 시료조성이 완료되면 함수분포상태가 안정되도록 5분동안 대기한 후, TDR 측정 시스템을 이용하여 전자기적 신호를 측정하였다. 이때, TDRP의 위치는 Fig. 4(a)와 같이 주변부의 전극이 시료의 표면에 접촉하도록 시료상부에서 측정하는 방법과, Fig. 4(b)와 같이 주변부의 전극이 시료의 중심에 오도록 높이 100mm 위치까지 관입한 후 측정하는 방법을 이용하였다. 측정 완료 후, 전극 프로브가 위치된 높이의 3개소에서 시료

를 채취한 후 함수비를 재확인하였다.

TDRP를 공기중 및 시료의 체적함수비를 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%로 변화시켜 실험을 수행하였으며, 공기중 및 체적함수비 0, 10, 20, 30, 40%에 해당하는

결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 TDRP의 전극 시작단에서 신호의 반사가 시작되는 점을 0m로 조절하여 전극 끝단에서 신호의 반사가 종료되는 점까지의 신호를 보여주고 있다. 프로브를 위치시킨 방법에 따라 수행

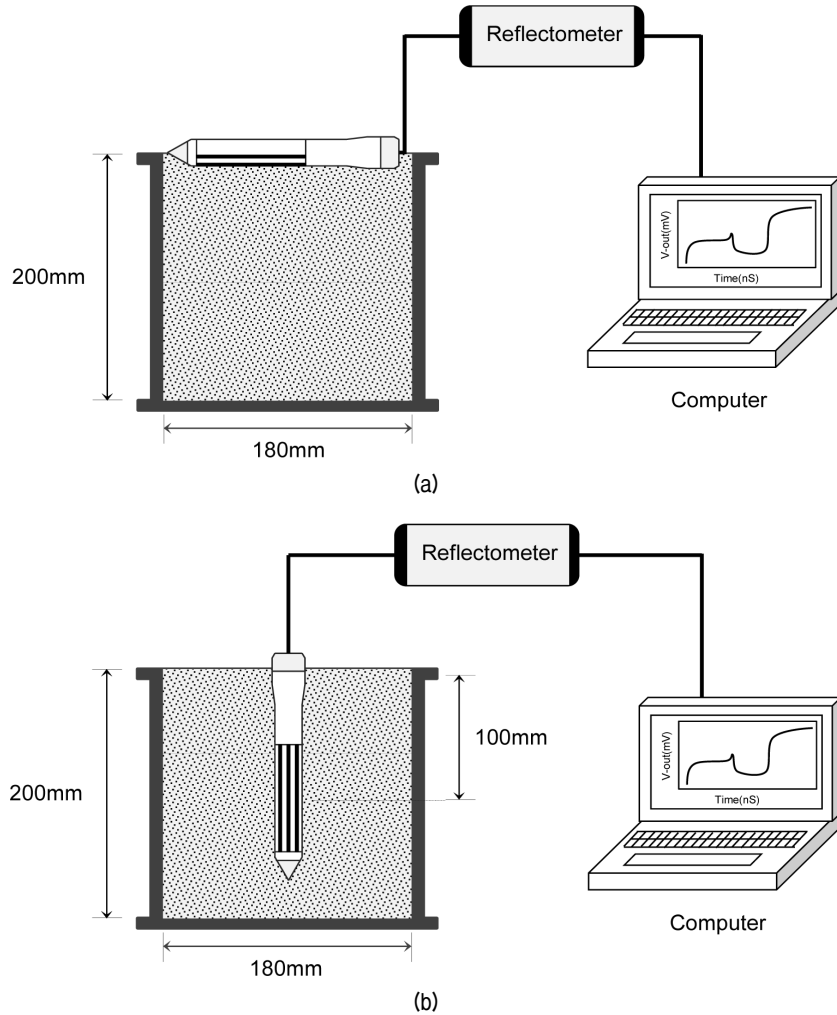


Fig. 4. Schematic drawing of calibration of TDR probe: (a) surface contact; (b) penetration

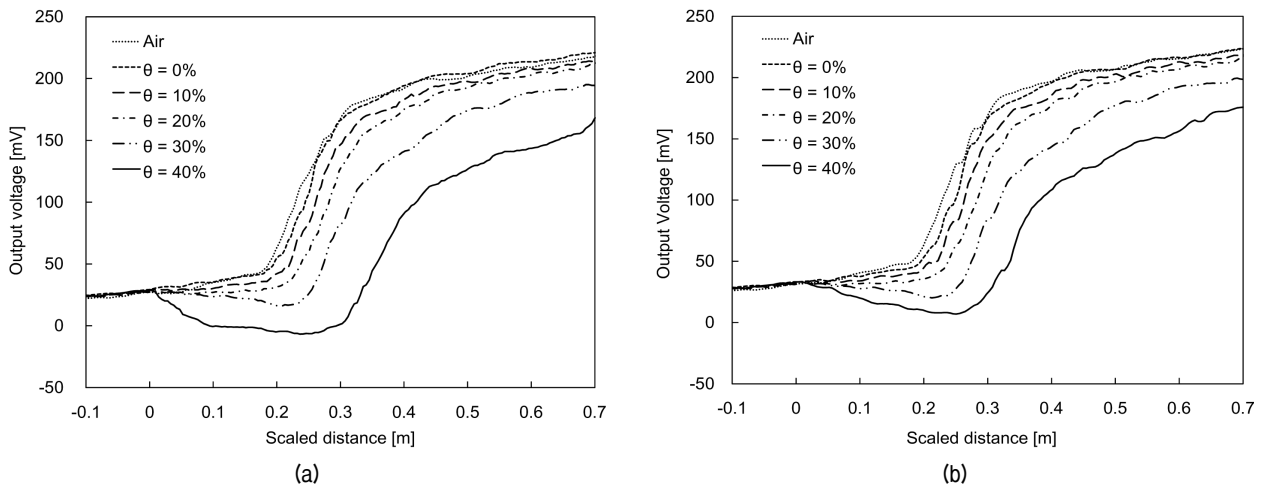


Fig. 5. TDR waveform measured in calibration: (a) surface contact; (b) penetration

한 실험결과, 체적함수비가 증가함에 따라 겉보기 길이는 점차 증가하는 하였으며, 측정된 전자기파의 형상에는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

실내실험의 결과로서 획득한 체적함수비와 유전상수의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 체적함수비는 시료조성시 결정된 값을 의미하며, reflectometer상에서 펄스가 프로브를 따라 반사되어 산정된 유전상수들 각 체적함수비마다 점으로 나타내어 표시하였다.

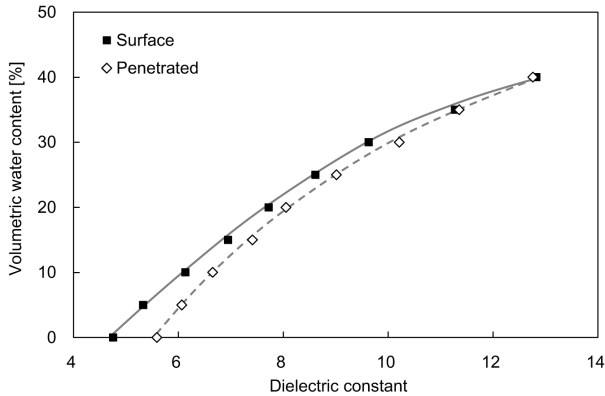


Fig. 6. Correlation between dielectric constant and volumetric water content obtained from calibration

Fig. 6에서 나타난 체적함수비와 유전상수의 관계는 식 (2)와 같이 2차 다항식으로 표현될 수 있다.

$$\theta = a + bK_a + cK_a^2 \quad (4)$$

여기서, 결정된 관계식의 상수 a, b, c는 Table 1에 정리하였다. 각 체적함수비로 조성된 시료에서 결정된 관계식의 상수들은 프로브를 위치시킨 방법에 따라 차이가 미소하게 나타났다. 또한, 동일한 체적함수비로 조성된 시료에서 프로브를 위치시킨 방법차이에 의하여 발생된 유전상수의 차이는 체적함수비가 증가함에 따라 점차 줄어들었다. 이는 유전상수의 측정값이 관입영향에 의해 크게 변화되지 않음을 보여주고 있다. 일반적으로 이용되는 Topp et al.(1980)이 제안한 관계식은 상용 TDR 프로브를 이용하여 프로브 주변에 접촉되어 있는 지반재료의 유전상수를 직접 측정함으로써 도출되었다. 반면에, 본 연구에서 개발된 TDRP는 유전상수 측정을 위한 전극이 폴리아미드 재질의 주변부에 설치되어 있기 때문에, 전극에서 측정된 유전상수는 지반재료의 특성뿐만 아니라, 주변부의 재질의 특성도 동시에 포함되어 나타난다. 이러한 이유로, 본 연구에서 도출된 체적함수비와 유전상수의 관계는 Topp et al.(1980)이 제안

한 식과는 다른 양상으로 나타난다.

Table 1. Correlation constants determined from calibration

Contact method	a	b	c	R ²
Surface	-44.303	11.011	-0.3475	0.999
Penetrated	-60.833	13.498	-0.442	0.998

Fig. 7은 시료의 샘플로부터 측정된 체적함수비와 식 (4)로부터 추정된 체적함수비의 관계를 나타낸다. 결과적으로, TDRP를 이용한 추정값은 실제 측정값과 상당히 높은 상호관계성을 가지고 있음을 보여주었다. 또한, TDRP로 추정된 체적함수비는 관입에 의한 지반재료의 교란에도 불구하고, 대상 흙의 체적함수비를 효과적으로 나타낼 수 있는 것으로 판단된다.

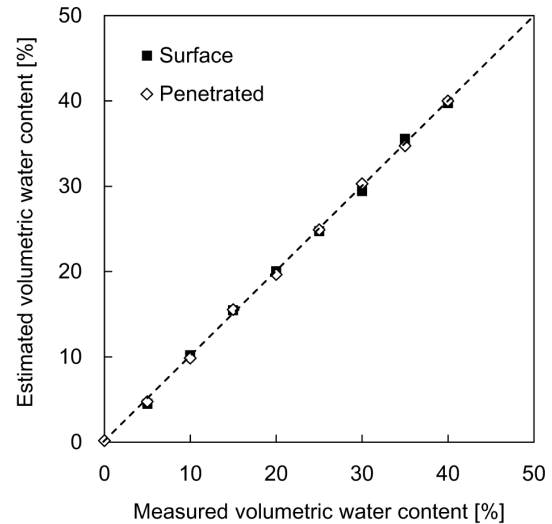


Fig. 7. Comparison of estimated volumetric water content with measured volumetric water content

5. 현장 적용실험

현장 적용실험은 해머를 낙하시킴으로써 가해진 에너지로 TDRP를 해당심도까지 관입한 후, 연결된 측정 시스템에서 전자기파 신호를 측정함으로써 수행되었다. TDRP의 관입심도 0, 20, 40, 60, 80, 90cm에서 각각 전자기파를 측정하였으며, 측정된 신호는 Fig. 8에 나타났다. 심도가 증가함에 따라 측정된 전자기파의 겉보기 길이는 점차 증가하였으며, 각 심도에서 측정된 겉보기 길이를 식 (3)에 대입함으로써 산정된 유전상수는 5.9부터 13까지 나타났다. 이때 사용된 관계식의 상수는 실내 실험에서 TDR 프로브를 주문진사에 관입시킴으로써 결정된 값들을 이용하였다.

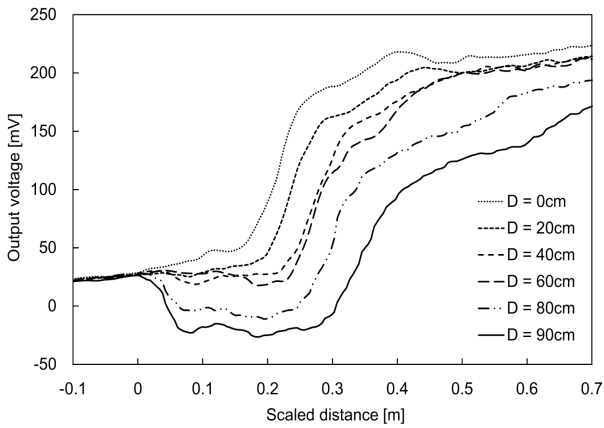


Fig. 8. Experimental results of the field test

TDRP를 이용한 현장 관입실험의 결과와 비교하기 위하여, 직경 22mm의 소형 sampler를 제작하였으며, 심도 20, 40, 60, 80, 90cm에서 시료를 채취하였다. 채취된 시료를 입도분석한 결과, 평균입경(D_{50})은 2.2mm, 60% 통과량(D_{60}) 및 10% 통과량(D_{10}) 입경은 각각 3.4mm 및 0.06mm로 나타났다.

소형 sampler를 이용한 시료채취시 sampler 내부의 시료는 교란되므로 정확한 체적함수비 산정에 한계가 있다. 따라서, 본 절에서는 채취된 시료의 중량함수비와 TDRP를 이용하여 추정된 체적함수비의 경향성을 비교하고자 하였으며, 이를 Fig. 9에 도시하였다.

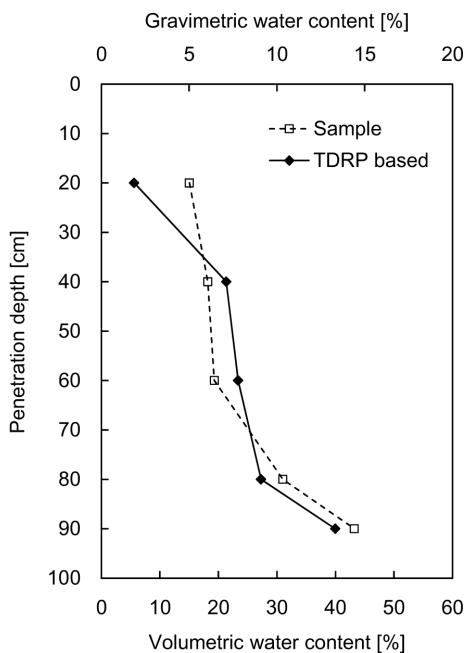


Fig. 9. Profiles of volumetric water content estimated by TDRP and gravimetric water content estimated by sample

TDRP로 산정한 체적함수비와 시료의 중량함수비는 심도가 증가함에 따라 유사하게 증가하였으며, 심도에 따라 변화의 크기에 다소 차이가 나타났다. 이러한 차이는 심도에 따른 대상지반의 밀도차이에 의한 것으로 판단된다. 한편, 매우 균등한 입자크기의 특성을 나타내는 주문진사로 조성한 시료보다 현장 지반재료는 입도분포가 넓고 광물특성상의 차이가 존재하기 때문에 현장에서 채취된 시료를 이용하여 보정실험을 수행한다면, 현장의 체적함수비를 보다 높은 정확도로 평가할 수 있을 것이다. 즉, TDRP를 이용하여 현장의 체적함수비 산정시 동일한 시료로부터 산정한 $K_a - \theta$ 관계식의 정립이 선행된다면, 보다 정확한 현장 체적함수비를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 불포화지반에서 깊이에 따른 함수상태를 획득하기 위하여 관입형 TDR 프로브(TDRP)를 개발하였다. 개발된 TDRP는 전극이 설치된 원추형의 TDR 프로브, 연결로트드, 그리고 동적관입을 위한 해머 및 가이드로 구성된다. 지반의 함수변화를 측정하기 위한 3개의 전극은 TDR 프로브의 주변부 표면을 따라 설치되었으며, 주변부는 전극간의 합선을 방지하기 위하여 폴리아미드 재질로 제작되었다. 3개의 전극중 중심전극과 양쪽 전극을 각각 동축선 내부 및 외부에 연결한 후, reflectometer에 연결하여 측정시스템을 구성하였다.

TDRP를 이용하여 획득한 유전상수와 체적함수비의 상호관계를 획득하기 위하여 주문진사를 이용한 시료의 체적함수비를 변화시키고, 이때 유전상수를 측정하여 상호비교 하였다. 보정실험은 TDRP의 전극을 시료 상부에 접촉한 후 측정하는 방법과 전극이 시료 중심에 위치하도록 프로브를 관입한 후 측정하는 방법을 이용하였다. 실험결과, 시료와 프로브의 위치에 관계없이 체적함수비가 증가함에 따라, 전자기파의 유전상수가 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 체적함수비와 유전상수의 관계는 2차 다항식으로 추정할 수 있었으며, 추정된 체적함수비는 시료에서 실제 측정된 체적함수비와 높은 상관성을 나타내었다.

현장적용실험에서는 측정목표심도까지 TDRP를 동적관입한 후, 전자기적 신호를 측정하였다. 실험결과, 심도가 증가함에 따라, TDRP를 이용하여 측정한 전자기파의 길보기 길이는 점차 증가하였다. 또한, TDRP를

이용한 현장 체적함수비 평가 결과와 비교하기 위하여 소형 sampler를 이용한 시료채취를 수행하였다. 채취된 시료의 중량함수비와 TDRP로 추정된 체적함수비의 변화를 비교하였으며, 각각의 함수비 추상도는 유사한 형태를 나타내었다. 그러나 현장실험으로부터 획득한 체적함수비는 실내에서 주문진표준사를 이용하여 획득한 관계식을 이용하여 추정된 결과이므로, 현장시료를 이용한 보정실험이 선행된다면 보다 높은 정확도로 현장 함수비 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 관입형 TDR 프로브는 동적관입 방법을 이용하여 대상지반의 심도별 함수상태를 평가할 수 있는 장비로서 별도의 관입장비 및 천공의 과정이 필요치 않으므로, 현장상태의 함수비 평가를 위한 새로운 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구S04(13SCIPS04))에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM D6951 (2009), "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications", *Annual Book of ASTM Standard*, 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. Benson, C. and Bosscher, P. (1999), "Time-domain Reflectometry in Geotechnics: A Review", *Nondestructive and Automated Testing for Soil and Rock Properties*, STP 1350, ASTM, W. Marr and C. Fairhurst, Eds., pp.113-136.
3. Cho, M. H., Lee, Y. H., Kim, N., and Park, J. (2010), "A Study on Measuring and Calibration Method using Time Domain Reflectometry Sensor under Road Pavement", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.10, No.2, pp.23-30.
4. Cho, M., Lee, Y., Kim, N., and Jee, K. (2013), "Temperature Sensitivity Analysis of TDR Moisture Content Sensor for Road Pavement", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.1, pp.329-336.
5. Hur, S. O., Ha, S. K., and Kim, J. G. (2009), "Verification of TDR and FDR Sensors for Volumetric Soil Water Content Measurement in Sandy Loam Soil", *Korean Journal of soil science and fertilizer*, Vol.42, No.2, pp.110-116.
6. Jones, S. B., Wraith, J. M., and Or, D. (2002), "Time domain reflectometry measurement principles and applications", *Hydrological Processes*, Vol.16, No.1, pp.141-153.
7. Kim, B. and Jeon, S. I. (2005), "Development of Calibration Model and Analysis of Soil Water Content using Time-Domain Reflectometry Probe in LTPP Sections", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.7, No.4, pp.103-112.
8. Kim, K. D. (2003), "Soil Moisture Management Use of Tensiometer in Protected Cultivation", *The Korean Research Society for Protected Horticulture*, Vol.16, No.2, pp.1-7.
9. Kim, M. I., Jeong, G. C., and Park, C. K. (2004), "A Development of Dielectric Measurement System for Detecting Physical Parameters of Ground in Subsurface Dam", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.14, No.4, pp.361-369.
10. Malicki, M. A., Plagge, R., and Roth, C. H. (1996), "Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil", *European Journal of Soil Science*, Vol.47, No.3, pp.357-366.
11. O'Connor, K. M. and C. H. Dowding (1999), *GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes*, CRC Press.
12. Topp, G. C., Davis, J. C., and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic Determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Lines", *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp.574-582.
13. Topp, G. C., Hayhoe, H. N., and Watt, M. (1996), "Point Specific Measurement and Monitoring of Soil Water Content with an Emphasis on TDR", *Canadian Journal of Soil Science*, Vol.76, No.3, pp.307-316.

Received : October 21st, 2014
 Revised : January 16th, 2015
 Accepted : January 19th, 2015