

TDR 측정시스템이 도입된 압력판 추출 시험기를 이용한 흡-함수특성곡선 연구

Soil Water Characteristic Curve Using Volumetric Pressure Plate Extractor Incorporated with TDR System

정 영 석¹ Jung, Young-Seok

사 회 동¹ Sa, Hee-Dong

강 성 훈¹ Kang, Seonghun

오 세 봉² Oh, Se-Boong

이 중 섭³ Lee, Jong-Sub

Abstract

The purpose of this study is to measure the volumetric water content of unsaturated soils during drying and wetting process by using volumetric pressure plate extractor (VPPE) incorporated with time domain reflectometry (TDR). The VPPE consists of a pressure cell, a pressure regulator, a burette system and a TDR probe. Two samples with different initial void ratios were prepared in the pressure cell, and the air pressure at the range of 0.1 kPa - 50 kPa was applied to adjust the matric suction by the pressure regulator. The burette system was used to measure the volumetric water content change of the sample according to the matric suction. In addition, the TDR probe, installed in the cell, was used to evaluate the dielectric constant from the reflected signal of the electromagnetic wave at the probe. The volumetric water content of specimen was estimated by the empirical equation between the volumetric water content and dielectric constant, which was calibrated with the Jumunjin sand. The test results show that the volumetric water content calculated by TDR probe is strongly correlated to the measured value by burette system. The hysteresis occurs during drying and wetting process. Furthermore, the degree of hysteresis reduces in the repeated process. This study suggests that TDR may be effectively used to evaluate the water content soil for the determination of water characteristic curve of unsaturated soils.

요 지

흡-함수특성곡선에 대한 선행 연구결과들의 경우, 정량적으로 간극수 유출입량을 측정하여 모관흡수력에 따른 체적함수비를 산정하였다. 본 연구에서는, 압력판 추출시험기(VPPE)에 Time Domain Reflectometry(TDR) 측정 시스템을 도입하여 불포화토의 건조과정 및 습윤과정 진행에 따른 유전상수를 측정하여 체적함수비를 산정하고자 하였다. 압력판 추출 시험기는 압력셀, 압력조절장치, 뷰렛 시스템, TDR 프로브로 구성된다. 압력셀에 초기 간극비가 다른 두 시료를 조성한 후, 압력조절장치를 이용하여 압력셀 내부에 0.1kPa - 50kPa 범위의 공기압을 가하여 모관흡수력을

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

2 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Department of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-3290-3838, jongsub@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

조절하였다. 그리고 뷰렛시스템을 이용하여 모관흡수력 변화에 따른 시료의 체적함수비 변화를 측정하였다. 또한, 압력셀 내부에 설치된 TDR 프로브를 이용하여 프로브 양단에서 발생하는 전자기파의 반사 신호로부터 유전상수를 산정하였다. 주문진 표준사의 체적함수비 변화에 따른 유전상수 측정에 대한 보정으로 도출한 체적함수비와 유전상수 관계를 이용하여 시료의 체적함수비를 산정하였다. 실험 결과, 시료의 초기 간극비와 상관없이 TDR 프로브에 의해 산정된 체적함수비는 뷰렛 시스템을 통해 정량적으로 산정된 체적함수비와 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한, 건조과정 및 습윤과정 진행에 따라 동일한 모관흡수력에 대한 함수비의 차이가 존재하는 이력현상(Hysteresis)이 발생하였고, 건조과정 및 습윤과정의 반복에 따라 이력현상은 줄어들었다. 본 연구에서 적용된 전자기파의 시간영역반사법(TDR)을 통해 불포화토의 흡-함수특성곡선을 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Dielectric constant, Soil water characteristic curve, Time domain reflectometry, Unsaturated soils, Volumetric water content

1. 서론

일반적으로, 지표부근의 지반은 대부분 불포화 상태로 존재하나, 지반 구조물 설계 시 포화 지반이라 가정하는 것이 대부분이다. 이는 포화상태로 가정하는 것이 간단하고 안전성을 확보할 수 있기 때문이다(Song et al., 2010). 그러나, 불포화 지반을 포화상태로 가정하면 보수적인 설계가 될 뿐만 아니라, 불포화토의 역학적 거동 특성을 반영할 수 없기에 많은 문제점이 발생한다. 불포화토는 흙 입자와 물로 구성된 포화토와 달리 흙 입자-물-공기 3상 구조로 이루어져 있기 때문에 포화토와 거동 특성 및 해석의 궤가 다르기 때문이다(Byun et al., 2012; Hwang et al., 2012). 이와 같은 불포화토의 거동 특성을 파악하기 위해서는 흡-함수특성곡선 (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)을 산정하는 것이 반드시 필요하다(Hwang and Kim, 2004). 흡-함수특성곡선은 모관흡수력에 따른 포화도 또는 체적함수비 사이의 관계를 나타내어주는 불포화토 고유의 물성으로 불포화 지반내 물의 흐름을 파악하는데 가장 중요한 상관관계이다(Song, 2013). 또한, 흡-함수특성곡선은 흙의 종류, 입도, 온도, 간극의 크기 등에 따라 변화하게 되는데, 특히 Assouline(2006)에 따르면 흙의 간극비 또는 밀도에 따라 흡-함수특성곡선이 크게 변화한다.

흙의 함수비를 측정할 위한 방법으로는 시료의 샘플링을 통한 중량함수비 측정이 일반적으로 사용된다. 그러나, 샘플링의 과정에서 시료 교란에 관한 문제가 발생하기에 이를 위한 대체방안으로 비파괴 방법에 대한 연구가 수행되어왔다. Davis and Chudobiak(1975)에 의해, 전자기파의 시간영역반사법(Time Domain Reflectometry,

TDR)을 이용하여 흙의 체적함수비를 측정하는 방법이 개발되었다. 이는, 시료에 설치한 전극에서 발생하는 전자기파의 반사신호로부터 유전상수를 측정하는 방법이다. Topp et al.(1980)는 TDR측정 방식을 이용하여 흙 종류에 따른 유전상수와 체적함수비의 관계를 제안하여 시간영역반사법을 통한 함수비 평가의 가능성을 보여주었다. TDR측정 방식은 다른 방법보다 체적함수비의 측정 오차가 1%-2% 내외로 정확도 면에서 우수하고 실시간으로 시료의 함수비를 측정할 수 있다는 장점이 있다(Jones et al., 2002).

본 연구에서는 불포화토의 흡-함수특성곡선 실험시, 간극비가 다른 두 시료의 건조과정 및 습윤과정 진행에 따른 함수특성의 변화를 실시간으로 파악하기 위하여 TDR 측정 시스템을 압력판 추출 시험기에 도입하였다. 본 논문에서는 먼저 흡-함수특성곡선에 대한 이론적 배경 및 TDR의 측정원리에 대해 설명한 후, 본 연구에서 사용된 압력판 추출 시험기 및 TDR측정시스템의 특징에 대해 서술하였다. 이어서, 초기 간극비에 따른 흡-함수특성곡선의 변화, TDR 프로브에 대한 실내실험 및 측정 결과에 대해 보여준 후, 그 결과에 대해 분석 및 토의하였다.

2. 배경이론

2.1 흡-함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

흡-함수특성곡선은 모관흡수력과 함수비의 관계를 나타내는 것으로, 불포화토의 해석에 있어서 중요한 역

할을 한다(Fredlund, 2002). 흡-함수특성곡선으로부터 불포화도의 전단강도, 투수계수, 입도분포, 함수비와 같은 특성을 얻을 수 있고, 이를 기반으로 사면의 안정성, 지반 구조물 내 지하수 흐름 등을 파악할 수 있다. 이처럼, 흡-함수특성곡선은 불포화 토질역학에 있어 기본적인 도입부로 자리잡았다(Barbour, 1998).

흡-함수특성곡선은 건조과정 및 습윤과정에 대한 곡선으로 이루어진다. 건조 곡선의 경우는 모관흡수력 증가에 따른 시료 내 수분의 탈착을 나타내고, 습윤 곡선의 경우는 모관흡수력 감소에 따른 시료 내 수분의 흡착을 나타낸다. 일반적으로 건조 과정과 습윤과정의 곡선에서 동일한 모관흡수력에 대한 함수비의 차이가 존재하는 이력현상(Hysteresis)이 발생하는데, 건조과정에서의 시료 내 함수비가 습윤과정에서보다 더 크다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 이러한 이력현상은 잉크병 효과(ink bottle effect), 접촉각 효과(contact angle effect), 흡의 팽창 수축에 대한 메커니즘으로 설명된다. 실제의 불포화 지반은 불균일한 모양 및 크기의 간극이 연결되어 있어, 모관상승이 일어날 때 건조과정 및 습윤과정에서 그 높이가 다르게 나타나는데 이를 잉크병 효과라고 한다. 또한, 건조 과정 보다 습윤과정에 대한 메니스커스의 접촉각이 큰데, 이에 따른 영향을 접촉각 효과라 한다(Hillel, 1971; Bear, 1979; Lu and Likos, 2004). 건조과정 및 습윤과정이 진행되면서 흡의 팽창수축이 발생하고 이로 인해 흡의 구조, 입도 분포에 변화가 발생하여 모관상승 높이의 차가 생긴다(Hillel and Mottas, 1966). 그러나, 선행 연구들의 경우 습윤 곡선 산정을 위한 실험 소요시간이 너무 길다는 문제로 건조곡선에 대한 실험만을 진행하여 이력현상을 파악하는데 어려움이 있다(Fredlund, 2006).

흡-함수특성곡선은 흡의 입도분포, 종류, 소성지수, 형상 등에 따라 곡선의 모양이 변화한다. 대표적으로, 세립분 함량이 증가할수록 혹은 소성이 증가할수록 동일한 모관흡수력에 대해 시료가 포함하는 함수비 양 및 공기함입치(Air Entry Value, AEV)가 증가하고, 곡선의 경사가 완만하게 이루어 진다(Fredlund and Xing, 1994; Hillel, 1998; Vanapalli et al., 1999; Yang et al., 2004). 이는, 점토의 경우 간극이 작고 물과 점토광물 사이의 흡인력이 크게 작용하기 때문이다. 이처럼, 흡-함수특성 실험의 조건에 따라 곡선의 모양이 다양하기에 흡-함수특성곡선을 활용한 불포화도의 거동 해석에 있어 위의 조건들을 고려해주어야 한다.

2.2 Time Domain Reflectometry(TDR) 원리

TDR 측정시스템은 일반적으로 신호 발신기, 동축 케이블, 측정 프로브로 구성된다. 신호 발신기에서 발생된 전자기적 펄스는 동축 케이블을 따라 측정 프로브로 전달되고, 프로브 양단에서 매질의 변화로 인하여 TDR 신호의 반사가 발생한다. Fig. 1과 같이 측정 프로브의 영향범위내 유전상수가 증가함에 따라 반사된 두 신호 사이의 거리가 증가하게 된다. 프로브 양단에서 발생한 반사신호 간의 거리 L_a [m]와 유전상수 k [-]의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa = \left(\frac{L_a / V_p}{L} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, L [m]은 프로브 길이, V_p [-]는 동축케이블의 경우와 진공상태인 경우에 대한 속도의 비율을 나타낸다. 시료의 함수비를 평가하는 경우, 명확한 신호를 얻기 위해 V_p 는 일반적으로 0.99가 사용 된다(Cassel et al., 1995; Amato and Ritchie, 1995; Ranjan and Domytrak, 1997). 따라서, 반사신호 간의 거리 L_a [m]와 유전상수 k [-]에 관한 식 (1)은 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\kappa = \left(\frac{L_a}{L} \right)^2 \quad (2)$$

물질에 따른 유전상수의 값을 Table 1에 정리하였다. 공기는 1, 건조 시료의 경우 2-6인 반면, 물은 80으로 매우 큰 값을 지닌다. 따라서, 물-공기-흡 3상의 구조로 이루어진 불포화토는 함수비에 따라 유전상수가 민감

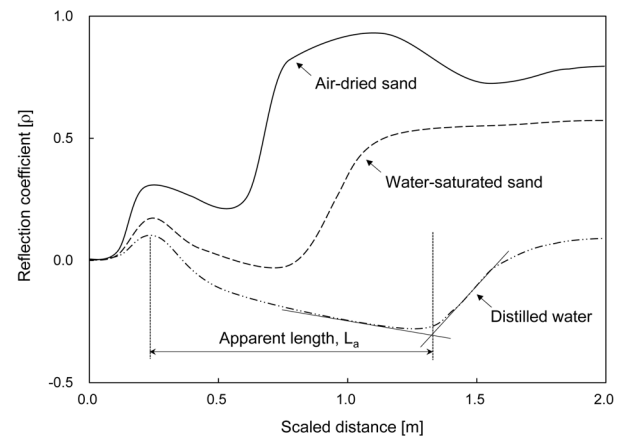


Fig. 1. Typical TDR waveform (Jones et al., 2002)

하게 변화하게 되고, 반사신호 간의 거리를 통해 유전상수를 산정하여 시료의 함수비를 평가하는 것은 합리적이다(Hoekstra and Delaney, 1974).

Topp et al.(1980)는 유전상수 $k[-]$ 와 체적함수비 $q_v[-]$ 의 관계를 제안하기 위해 TDR 측정시스템을 이용한 실내실험을 진행하였다. 이를 통해, 균질한 시료에 대해 일반적으로 적용할 수 있는 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$\theta_v = 4 \times 10^{-6} \kappa^3 - 5.5 \times 10^{-4} \kappa^2 + 2.92 \times 10^{-2} \kappa - 5.3 \times 10^{-2} \quad (3)$$

Topp et al.(1980)이 제안한 위의 경험식의 경우 대체로 높은 정확성을 보이나, 체적함수비가 0.5를 초과하거나 유기물질 혹은 점토의 함량이 높은 시료의 경우에 부정확한 한계를 지니고 있다. 이에 따라, 보다 정확한 함수비 평가를 위해 각 시료에 대해 유전상수-체적함수비의 관계를 도출하는 것이 필요함을 알 수 있다.

Table 1. Dielectric constant of material (Davis and Annan, 1989; Daniels, 1996)

Type	Material	Dielectric constant
Air	Air	1
Water	Water	80
	Fresh water ice	3 - 4
	Sea water ice	4 - 8
Soil	Dry clay	2 - 6
	Dry clayey soil	4 - 6
	Dry loamy soil	4 - 6
	Dry sandstone soil	2 - 3
	Dry sandy soil	4 - 6
	Wet clay	15 - 40
	Wet clayey soil	10 - 15
	Wet loamy soil	10 - 20
	Wet sandstone soil	5 - 10
	Wet sandy soil	15 - 30
	Silt	5 - 30
	Permafrost	4 - 8
	Others	Basalt
Calcite		7.8 - 8.5
Coal		3.5 - 8
Granite		5 - 7
Kaolinite		11.8
Limestone		4 - 8
Mica		6.4
Quartz		4.5
Shales		5 - 15

3. 실내실험

3.1 실험시료

본 연구에서는 #30체와 #50체 사이의 입경을 지니는 주문진 표준사($D_{50}=0.46\text{mm}$)를 사용하였고, 입도분포곡선은 Fig. 2와 같다. 비중의 경우, ASTM에서 규정하고 있는 D854 방법을 통하여 산정하였다. 최대 간극비 및 최소 간극비의 경우 ASTM의 D4253과 D4254 방법을 통하여 산정하였다. 본 연구에 사용된 시료의 기본성질은 Table 2와 같다. 비중은 2.62, 최대간극비는 0.99, 최소간극비는 0.62로 나타났다. 균등계수와 굵은계수는 각각 1.56, 1.05로 나타났고, 통일분류법(USCS)에 따르면 SP로 분류된다. 시료의 경우, 초기 간극비를 0.84, 0.79로 다르게 조성하였고 TDR측정 시스템을 이용하여 유전율을 측정하며 흡-함수특성곡선을 산정하였다.

3.2 압력판 추출시험기(Volumeter Pressure Plate Extractor, VPPE)

압력판 추출시험기는 압력셀 내부로 공기압을 가하

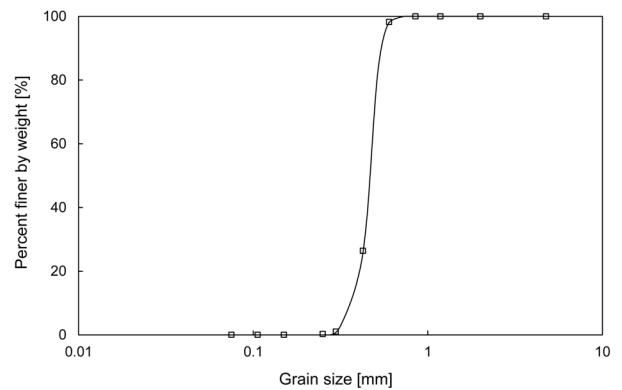


Fig. 2. Particle size distribution of Jumunjin sand

Table 2. Index properties of Jumunjin sand

Property	Value
G_s	2.62
e_{max}	0.99
e_{min}	0.62
D_{10}	0.32 mm
D_{30}	0.41 mm
D_{50}	0.46 mm
D_{60}	0.50 mm
C_u	1.56
C_c	1.05
USCS	SP

여 모관흡수력을 조절하고, 이를 통해 함수비 변화를 발생시킬 수 있는 장치이다. Fig. 3은 실험에 사용된 압력판 추출시험기의 모식도로 Soilmoisture Equipment Corp.에서 개발한 압력판 추출시험기를 개량하였다(Soilmoisture Equipment Corporation, 2005). 압력판 추출기 시스템은 크게 레귤레이터, 뷰렛 시스템, 멤브레인, 원형 압력셀로 구성된다. 모관흡수력의 조절을 통한 지반의 건조과정 및 습윤과정의 구현을 위해 저압용 레귤레이터(0kPa - 70kPa)를 설치하였다. 또한, 디지털 게이지와 연결하여 압력셀 내부로 유입되는 공기압을 0.1kPa 단위로 측정할 수 있도록 하였다. 뷰렛 시스템은 건조 및 습윤과정에서 발생하는 간극수의 유출입량을 측정하고, 이를 통해 시편의 함수비 변화를 확인할 수 있다. Padilla et al.(2006)에 따르면 전형적인 불포화토 실험장비의 경우 세라믹디스크를 사용하는데, 흙-함수특성곡선(SWCC) 측정에 있어 많은 시간이 소요된다(Tinjum et al., 1997; Vanapalli et al., 1999; Song, 2010). 이는 세라믹디스크의 경우 투수성이 작기 때문이다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 사용되던 세라믹디스크를 멤브레인으로 대체하였고, 각각에 대한 제원은 Table 3과 같다. 멤브레인의 경우, 세라믹디스크에 비하여 두께가 얇고 투수계수가 크기 때문에 모관흡수력의 평형도달 시간을 촉진시킬 수 있다(Nishimura et al., 2012). 시료 셀의 경우, 폴리아미드 재질을 사용

하여 셀의 변형을 방지하고, 전자기파를 이용한 함수비 데이터 측정 시 합선 및 간섭의 영향을 최소화 시키고자 하였다.

3.3 TDR 측정시스템

TDR 측정시스템은 크게 TDR장비, 연결 케이블, 측정 프로브로 구성된다. TDR장비의 경우 TDR-100(Campbell Scientific Inc.)을 사용하였고, 여기서 발생하는 전자기파는 연결 케이블을 따라 측정 프로브까지 전파된다. 전파된 전자기파는 측정 프로브의 양단에서 반사가 일어나게 되고, 반사된 신호의 시간차를 이용하여 유전상수를 산정하였다. 추가적으로 신호 측정을 최소화하기 위해 256개 신호를 평균하여 측정하였다. 연결 케이블은 3m 길이의 RG 58 C/U 타입을 사용하였다. 케이블 길이의 경우, 길이가 길수록 반사된 신호 크기를 감소시켜 유전상수 산정을 위한 프로브 양 끝단의 반사점을 구분하기 어려운 단점이 있다(Herklath et al., 1991). 또한, Heimovaara(1993)에 따르면, 프로브 길이가 10cm인 경우 15m 이하의 케이블을 사용해야 프로브 양단으로부터 명확한 신호를 얻을 수 있다. 측정 프로브는 원형 형상의 2-롯드 타입으로 제작하였다. 2-롯드 타입의 경우 시료 교란에 대한 영향을 최소화 할 수 있다(White and Zegelin, 1995). 프로브 재질은, 가장 보편적으로 사용하고 있는 스테인레스 스틸을 사용하였다. 프로브의 길이는 동일하게 11cm로 설정하였고, 2개의 스테인레스 스틸 롯드 중 1개는 동축선 내부에 연결하고, 나머지 전극의 경우 동축선 외부에 연결하여 회로를 구성하였다.

3.4 프로브 보정

시료의 체적함수비를 산정하기 위해서는 정확한 유전상수의 측정이 필요한데, 이를 위해서는 공기와 물에 대한 프로브의 캘리브레이션을 반드시 수행해야 한다(Heimovaara, 1993; Robinson et al., 2003). 제작한 TDR 프로브에 대해 공기, 증류수 외에도 시료의 체적함수비를 변화시키며 실험을 수행하였고, 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 체적함수비가 증가함에 따라, 프로브 양단에서 발생하는 반사신호 간의 길이가 증가하였다. 유전상수는 반사된 신호간의 거리를 식 (2)에 대입하여 산정하였다.

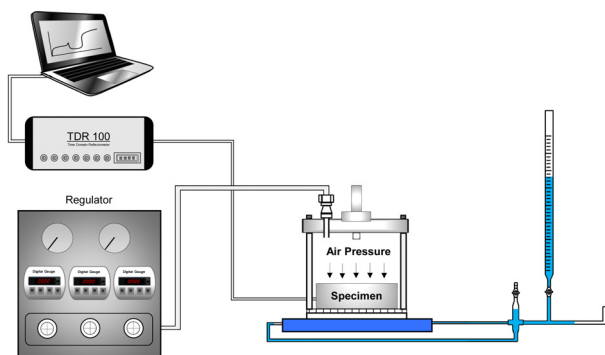


Fig. 3. Schematic drawing of measurement system

Table 3. Specification of membrane and ceramic disk

	Membrane	Ceramic disk
Pore size	0.2 μm	0.5 μm
Thickness	145 μm	7 mm
AEV	350 kPa	500 kPa
Hydraulic conductivity	5.19×10^{-9} m/s	7.95×10^{-10} m/s
Material	Polyethersulfone	Ceramic

식 (2)를 이용하여 산정한 유전상수와 체적함수비의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 유전상수는 측정된 신호로부터 산정된 값을, 체적함수비의 경우는 조성된 시료의 함수비를 나타낸다. Topp et al.(1980)이 제안한 식 (3)과 같은 3차식의 경우 균질한 흙에 대한 일반적인 관계식이기에 주문진 표준사에 대한 캘리브레이션을 바탕으로 적합한 변형식을 도출하였고, 식 (4)와 같다.

$$\theta_v = 4 \times 10^{-6} \kappa^3 - 5.5 \times 10^{-4} \kappa^2 + 2.92 \times 10^{-2} \kappa - 7.1 \times 10^{-2} \quad (4)$$

여기서 $q_v[-]$ 는 체적함수비를 의미하며, $k[-]$ 는 유전상수이다.

실험에 사용된 주문진 표준사에서 체적함수비-유전상수의 관계를 Topp et al.(1980)에 의해 수행된 여러

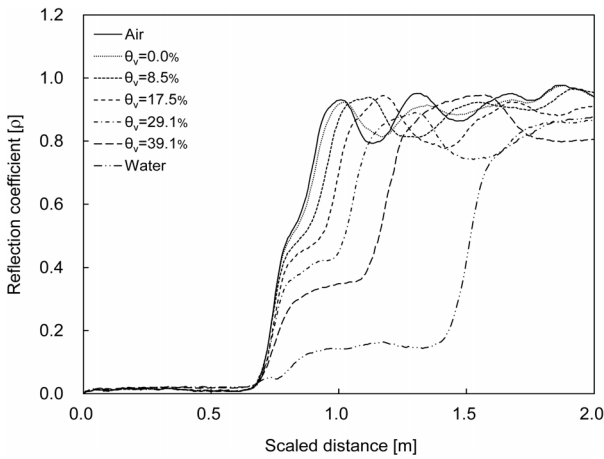


Fig. 4. Results of TDR calibration waveform, θ_v denotes the volumetric water content

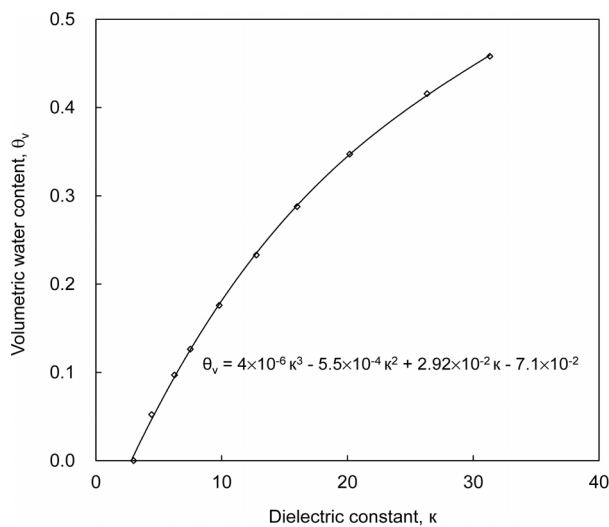


Fig. 5. Relationship between κ and θ_v in embedded TDR

종류의 흙에 대한 결과와 비교하였고, Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6과 같이, 주문진 표준사의 실험 결과가 다른 시료의 체적함수비-유전상수 관계들과 유사한 결과를 보였다. Topp et al.(1980)에 따르면, 서로 다른 시료의 경우 밀도, 구조 등이 다양하지만 그에 따른 체적함수비-유전상수 관계가 크게 차이 나지 않는데, 주문진 표준사에 대한 보정결과는 이를 뒷받침해주고 있다.

3.5 실험 절차

전자기파의 시간영역반사법(Time Domain Reflectometry, TDR)을 이용하여 불포화토의 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성을 파악하기 위해, 다음과 같은 과정으로 실험이 진행되었다.

- 1) 볼트너트 체결방식 및 오링을 이용하여 압력판 추출기시험기의 공기 유출입을 차단시킨다.
- 2) 실험에 앞서, 멤브레인을 미리 포화시키기 위해 물에 침지시킨다.
- 3) 준비된 #30체와 #50체 사이의 입경을 지닌 주문진 표준사로 간극비 0.79, 0.84에 대하여 시료를 성형한다.
- 4) 시편 외부에 물을 채운 후 완전한 포화를 위해 24시간 이상 기다린다.
- 5) 시료 세팅이 완료되면, 압력조절장치로 시료의 모관흡수력을 조절하며 건조 및 습윤과정을 진행하였다. Lin et al.(2009)에 따르면, 모래의 경우 일반적으로 50kPa내에서 흙-함수특성곡선의 변화가 심

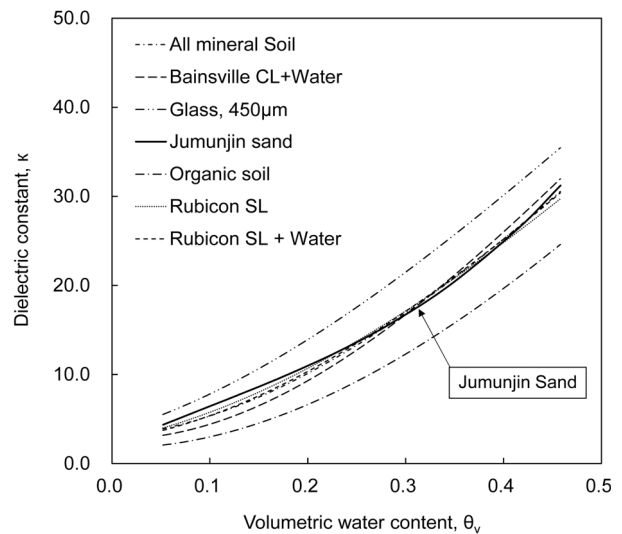


Fig. 6. Relationship between dielectric constant and volumetric water content (Topp et al., 1980)

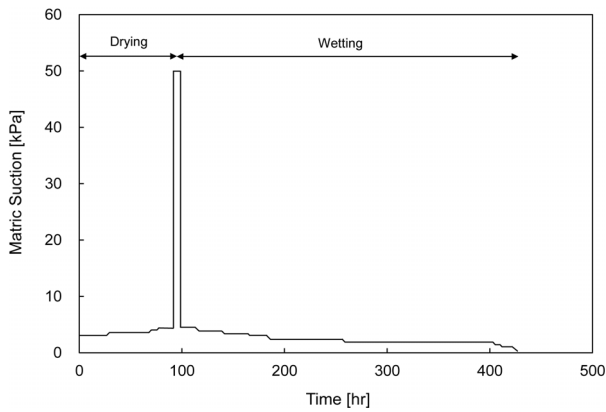
하므로 0.1kPa - 50kPa사이의 공기압에 대해 단계적으로 가하였다. 간극비에 따른 흡-함수특성곡선 및 이력현상의 변화를 파악하기 위해 건조 및 습윤 2회 반복과정에 대한 실험을 수행하였다.

- 건조 및 습윤과정이 진행되는 동안, 각 가압단계가 끝날 때 마다 TDR 측정시스템을 이용하여 전자기파 신호를 측정하였다.

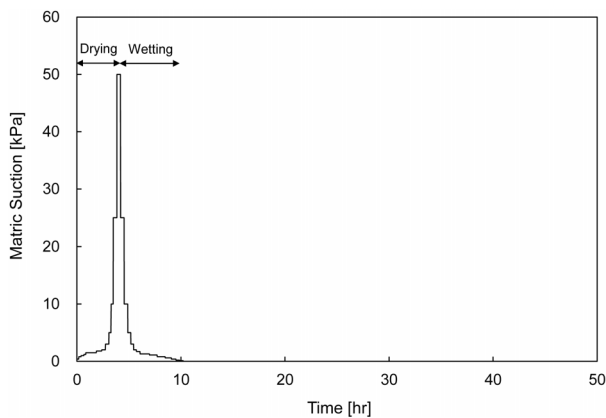
4. 실험 결과

4.1 흡-함수특성 곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

흡-함수특성곡선 실험을 진행하며 건조과정 및 습윤과정에서 각 가압단계에 대한 소요시간을 측정한 후, 세라믹 디스크를 사용한 선행연구의 결과와 비교하였고 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 주문진 표준사에 대해 세라믹 디스크를 사용하여 흡-함수특성실험을 진행한 결과이다. 사용된 주문진 표준사의 경우, 비중 2.621,



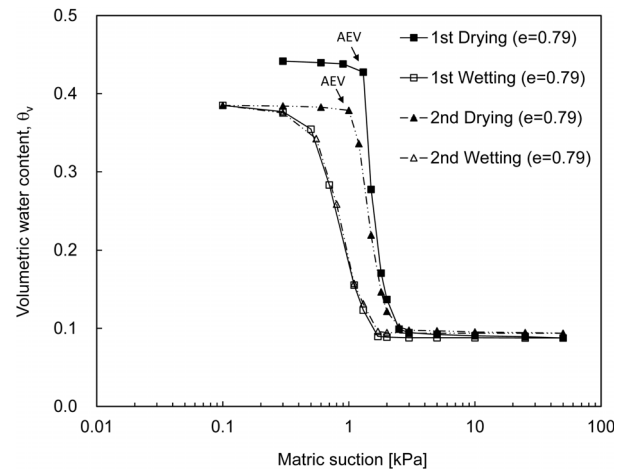
(a)



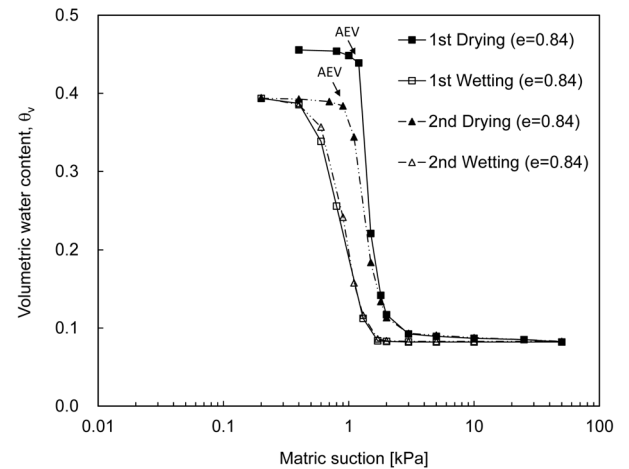
(b)

Fig. 7. Experimental time comparison : (a) using ceramic disk (Song, 2013); (b) using membrane

최대 간극비 0.919, 최소 간극비 0.625, 균등계수 1.5, 곡률계수 1.0으로 본 연구의 시료와 유사한 특성을 지녔다. Fig. 7(a)와 같이 세라믹디스크를 사용하였을 경우 건조 및 습윤과정 1회 과정에 대해 약 2주일이 걸린 반면, 멤브레인을 사용하였을 경우 Fig. 7(b)와 같이 1회의 건조 및 습윤과정에 대해 약 10시간이 소요되었다. 이러한 실험 소요시간의 단축은 멤브레인의 두께가 145mm로 세라믹디스크와 비교했을 때 매우 얇기 때문이다. 또한, 멤브레인의 투수계수가 세라믹디스크에 비해 약 7배 가량 크기 때문에 모관흡수력의 평형 도달시간을 촉진시킬 수 있다. 따라서, 멤브레인을 사용한 압력판 추출시험기는, 오랜 시험 소요시간으로 인한 습윤과정 진행 및 다중 반복과정에 대한 흡-함수특성곡선 실험진행에 대한 한계점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 8. Soil water characteristic curve : (a) void ratio of e=0.79; (b) void ratio of e=0.84

건조 및 습윤과정 각각에 대한 모관흡수력과 체적함수비 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 간극비 0.79, 0.84에 대한 2회 반복과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 나타낸 것으로 두 경우 모두, 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 시료의 체적함수비가 감소하였고, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 체적함수비가 증가하였다. 또한, 공기함입치(Air Entry Value, AEV)보다 큰 모관흡수력이 가해지면 시료내에 급격한 체적함수비 변화가 발생하였다. 3kPa 부근에서 잔류 포화상태에 도달하였고 이 때의 체적함수비는 건조과정 습윤과정 모두 유사한 값을 보였다. 한편, 동일한 모관흡수력에 대한 체적함수비 값이 일치하지 않는 현상(Hysteresis)이 발생하였다. 이는 잉크병효과, 접촉각 효과, 건조 및 습윤과정에 따른 흡의 팽창수축으로 인한 흡의 구조 변화 때문으로 판단된다(Hillel and Mottas, 1966; Bear, 1979;

Lu and Likos, 2004). 두 가지 경우 모두 1차 과정에서 더 큰 이력현상이 발생하였고, 건조 및 습윤에 대한 반복과정 진행에 따라 이력현상이 줄어들었다. 건조과정의 경우, 1차과정에서 2차과정으로 진행 됨에 따라 동일한 모관흡수력에 대해 대체적으로 체적함수비가 감소하는 경향을 보였고, 습윤과정의 경우 1차과정과 2차과정에서 유사한 함수특성을 나타냈다. 또한, 두 시료 모두 2차과정에 대한 반복과정이 진행됨에 따라 공기함입치(AEV)가 약간 감소하는 경향을 보였다.

간극비 변화에 따른 흡-함수특성곡선을 비교하기 위해 건조 및 습윤과정 각각에 대한 모관흡수력-체적함수비 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 선행연구의 결과와 같이, 간극비가 작을수록 흡-함수특성곡선이 우측으로 약간 이동하는 경향을 보였다(Aubertin et al., 1998; Kawai et al., 2000; Yang et al., 2004; Sun et al., 2006). 또한, 간극비가 작을수록 1차과정, 2차과정 모두 공기함입치(Air Entry Value, AEV)가 커지는 경향을 보였다. 간극비 0.79 시료의 경우 1차과정은 1.2kPa, 2차과정은 1.0kPa 부근으로 나타났고, 간극비 0.84 시료의 경우는 1차과정은 1.1kPa, 2차과정은 0.9kPa의 결과를 보였다. 포화 체적함수비의 경우는 간극비가 클수록 더 큰 값을 지녔고, 잔류 체적함수비의 경우 간극비가 클수록 더 작은 값을 보였다. 이는, 간극비가 클수록 건조과정 및 습윤과정을 진행함에 따라 시료의 체적함수비의 변화폭이 크다는 것을 의미한다. 또한, 간극비가 작을수록 공기함입치(AEV)보다 큰 모관흡수력 범위에서 항상 더 큰 체적함수비를 지니는 결과를 보였다.

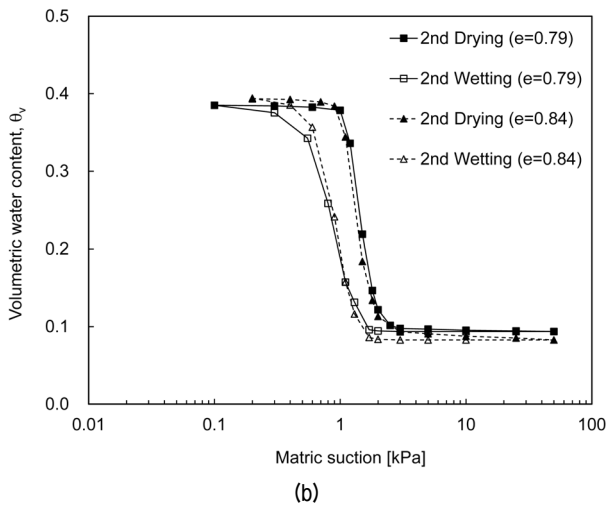
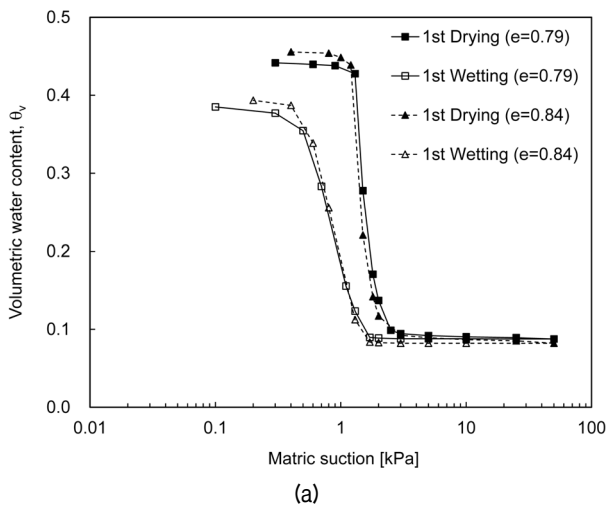


Fig. 9. Soil water characteristic curve comparison : (a) 1st process; (b) 2nd process

4.2 흡-함수특성곡선과 TDR 신호 결과 비교

건조 과정 및 습윤과정 각각에 대한 TDR 신호 데이터와 흡-함수특성곡선의 변화 양상에 대해 비교하였고, 이를 Fig. 10에 나타내었다. 건조과정의 경우, 시료의 체적함수비가 감소함에 따라 측정 신호가 좌측으로 이동하는 경향을 보인다. 이는, 반사신호 간의 길이가 감소되는 것으로 유전상수의 감소를 의미한다. 건조과정 중 측정된 TDR 신호 데이터의 경우, Fig. 10(a)와 같이 1.1kPa와 1.5kPa의 신호 사이에서 확연한 변화가 발생하는데, 이는 공기함입치(AEV) 부근에서 급격한 체적함수비의 변화가 발생하는 흡-함수특성곡선의 결과를 잘 나타낸다. 습윤과정의 경우, 건조과정과는 반대로 시료의 체적함수비가 증가함에 따라 측정 신호가 우측으로 이동하

는 경향을 보이는데, 이는 유전상수의 증가를 잘 보여준다. 또한, 1.3kPa 에서 신호가 우측으로 이동하기 시작하고 0.8kPa 부근까지 가장 큰 변화가 발생하는데, 이는

흡-함수특성곡선과 유사한 결과를 나타낸다. 이를 통해, 프로브로 측정된 TDR 신호는 건조과정 및 습윤과정에 따른 시료 내 함수비 변화 양상을 효과적으로 나타낼

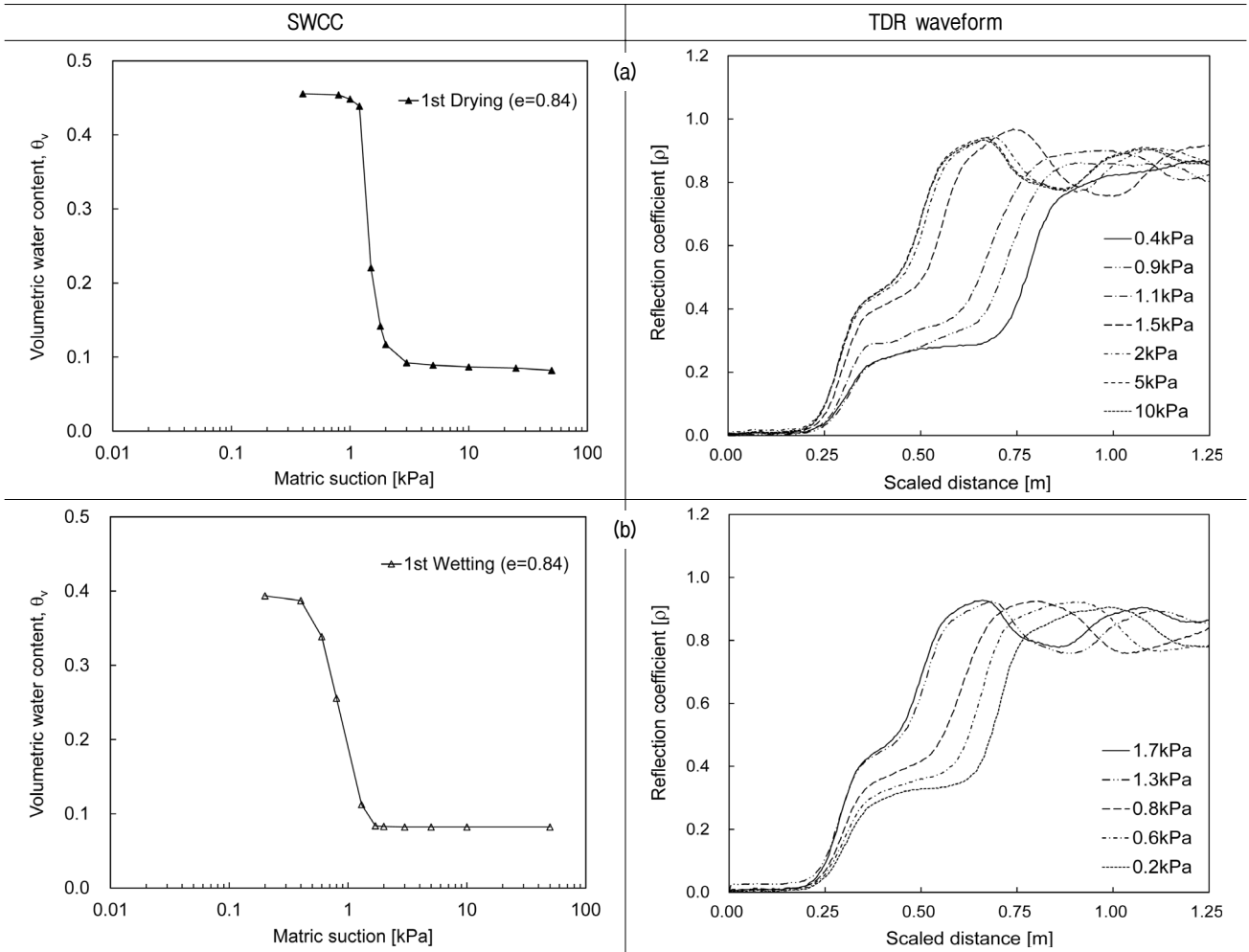


Fig. 10. Results of TDR waveform : (a) drying process; (b) wetting process

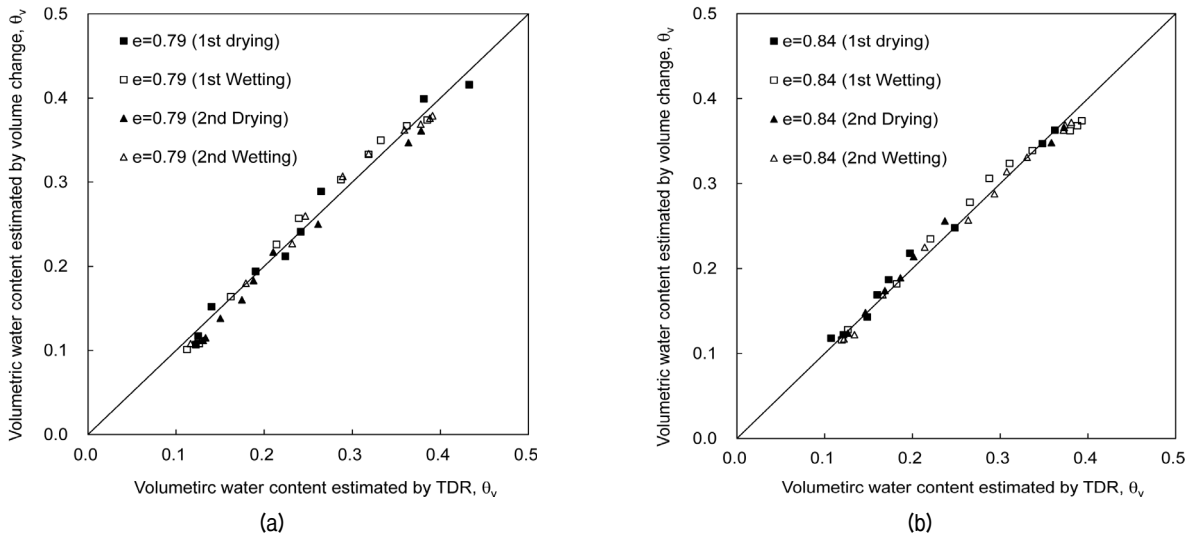


Fig. 11. Volumetric water content comparison : (a) void ratio of 0.79; (b) void ratio of 0.84

수 있는 것으로 판단된다.

건조과정 및 습윤과정에서 측정된 TDR 신호를 분석하여 유전상수를 산정한 후, 프로브 캘리브레이션을 바탕으로 도출한 유전상수-체적함수비 관계식으로 각 가압단계에 따른 체적함수비를 추정하였다. 두 시료의 TDR 신호 데이터로 산정된 체적함수비 결과를 흡-함수특성곡선의 함수비 결과와 비교하였고, Fig. 11에 나타내었다. 초기 간극비 0.79 시료에 대한 비교 결과는 Fig. 11(a)와 같고, 건조과정 및 습윤과정에 대해 TDR 프로브를 통해 산정된 체적함수비와 뷰렛을 통해 계산된 체적함수비는 정비례 관계를 보인다. Fig. 11(b)는 초기 간극비 0.84에 대한 결과로, TDR 신호 분석으로 산정된 체적함수비는 부피 변화량을 통해 산정된 흡-함수특성곡선의 결과와 유사한 값을 보였다. 이와 같이, 두 시료의 경우 모두 TDR 프로브를 통해 측정된 신호 분석 결과와 뷰렛시스템을 통해 측정된 함수비 결과는 매우 유사하였다. 이를 통해, TDR 측정시스템을 통한 건조과정 및 습윤과정에서의 시료 내 체적함수비 예측이 신뢰할만한 방법으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 압력관 추출시험기에 TDR 측정 시스템을 도입하여 간극비 변화 및 다중 반복과정에 따른 함수특성을 파악하고, 뷰렛시스템을 통해 측정된 체적함수비 결과와 비교 분석하였다. 다중 반복과정에 대한 함수특성실험을 시행하기 위해 기존의 연구에서 사용되던 세라믹디스크 대신 투수계수가 큰 멤브레인을 사용하여 모관흡수력의 평형도달 시간을 단축하였다. 30번체를 통과하고 50번체에 잔류하는 균등한 주문진 표준사로 간극비가 0.79와 0.84인 두가지 시료를 조성하고, 흡-함수특성곡선 및 이력현상의 변화양상에 대해 관찰하였다. TDR을 통한 체적함수비 산정을 위해, 제작한 원형 프로브에 대해 주문진사를 이용하여 캘리브레이션을 진행하였다. 이를 바탕으로 체적함수비-유전상수에 대한 3차 관계식을 추정하였다. 또한, 건조과정 및 습윤과정에서 측정된 TDR 신호 분석을 통해 각 가압단계별 시료의 체적함수비를 산정하였다. 본 연구를 통해 제시된 결론은 다음과 같다.

(1) 기존의 흡-함수특성실험에 대한 연구에서 사용되던 세라믹디스크 대신 두께가 얇으며 투수계수가

큰 멤브레인을 사용하여, 모관흡수력의 평형점 도달까지 1주일 이상 걸리던 기존 연구의 단점을 보완하였다.

- (2) 다중 반복과정에 대한 흡-함수특성실험을 수행하고, 이에 따른 이력현상의 변화를 파악하였다. 실험결과, 동일한 모관흡수력에서 체적함수비가 일치하지 않는 이력현상이 발생하였고 1차과정에서의 이력현상이 2차과정의 이력현상 보다 더 크게 나타났다.
- (3) 간극비가 다른 두 시료에 대해 흡-함수특성실험을 수행하고, 이에 따른 흡-함수특성곡선의 변화를 파악하였다. 실험 결과, 간극비가 클수록 포화 체적함수비는 증가하고, 공기 함입치(AEV) 및 잔류 체적함수비는 감소하였다. 이는 간극비가 클수록 상대적으로 물에 대한 흡착작용이 잘 일어나지 않으므로 흡-함수특성곡선의 기울기가 급격하게 형성되는 것을 나타낸다.
- (4) 압력관 추출시험기에 TDR 측정 시스템을 도입하여, 건조과정 및 습윤과정 진행에 따른 체적함수비 변화를 파악하고자 하였다. 실험 결과, TDR 신호는 공기함입치(AEV)에서 급격한 변화를 보였고, 시료 내 체적함수비의 증가 및 감소에 대한 변화 양상을 잘 나타내었다.
- (5) 실내 실험을 통해 산정된 체적함수비와 유전상수의 3차 관계식을 이용하여 TDR 신호를 분석한 결과, 뷰렛 시스템을 통해 산정된 체적함수비와 유사한 결과를 보였다. 이는 새롭게 도입된 TDR 측정시스템을 통해 신뢰할 만한 함수비 결과를 얻을 수 있음을 보여준다.
- (6) 본 연구에서 도입된 TDR 측정 시스템은 불포화토의 함수특성을 효율적으로 평가할 수 있는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고문헌 (References)

1. Amato, M. and Ritchie, J. T. (1995), "Small Spatial Scale Soil

- Water Content Measurement with Time-domain Reflectometry”, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.59, No.2, pp.325-329.
2. Assouline, S. (2006), “Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function”, *Vadose Zone Journal*, Vol.5, No.2, pp.697-705.
 3. ASTM D854-10 (2005), “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.08.
 4. ASTM D4253-00 (2006), “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight for Soils Using a Vibration Table”, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.08
 5. ASTM D4254-00 (2006), “Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight for Soils Calculation of Relative Density”, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.08
 6. Barbour, S. L. (1998), “Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The Soil-water Characteristic Curve: A Historical Perspective”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.5, pp.873-894.
 7. Bear, J. (1979), “Hydraulic of Groundwater”, McGraw-Hill, New York, pp.567.
 8. 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. Farihurst, Eds., pp.113-136.
 9. Byun, Y. H., Cho, S. H., Yoon, H. K., Choo, Y. W., Kim, D. S., and Lee, J. S. (2012), “Void Ratio Evaluation of Unsaturated Soils by Compressional and Shear Waves”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.12, pp.41-51.
 10. Cassel, D. K., Kachanoski, R. G., and Topp, G. C. (1994), “Practical Considerations for Using a TDR Cable Tester”, *Soil technology*, Vol.7, No.2, pp.113-126.
 11. Davis, J. L. and Chudobiak, W. J. (1975), “Relative Permittivity Measurements of a Sand and Clay Soil in Situ”, *Geological Survey of Canada*, Paper, pp.361-365.
 12. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), “Flow Lows”, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, New York, pp.107-123.
 13. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), “Equations for the Soil-water Characteristic Curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.4, pp.521-532.
 14. Fredlund, D. G. (2002), “Use of Soil-water Characteristic Curve in the Implementation of Unsaturated Soil Mechanics”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, pp.20-23.
 15. Fredlund, D. G. (2006), “Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.3, pp.286-321.
 16. Heimovaara, T. J. (1993), “Design of Triple-wire Time Domain Reflectometry Probes in Practice and Theory”, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.57, No.6, pp.1410-1417.
 17. Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P., and Murphy, F. (1991), “Automatic, Real-time Monitoring of Soil Moisture in a Remote Field Area with Time Domain Reflectometry”, *Water Resources Research*, Vol.27, No.5, pp.857-864.
 18. Hillel, D. and Mottas, J. (1966), “Effect of Plate Impedance, Wetting Method and Aging on Soil Moisture Retention”, *Soil Science*, Vol.102, No.2, pp.135-139.
 19. Hillel, D. (1971), “Soil and Water”, Academic Press, New York.
 20. Hillel, D. (1998), “Environmental Soil Physics”, Academic Press, San Diego, USA.
 21. Hoekstra, P. and Delaney, A. (1974), “Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies”, *Journal of Geophysical Research*, Vol.79, No.11, pp.1699-1708.
 22. Hwang, C. S. and Kim, T. H. (2004), “Determination of the Unsaturated Hydraulic Conductivity of Function”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.3, pp.47-51.
 23. Hwang, W. K., Kang, K. M., Kim, T. H., and Song, Y. S. (2012), “Effect of Soil Structure on Soil-water Characteristic in Unsaturated Soil”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.2, pp.33-42.
 24. 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.
 25. Kumar, S. and Malik, R. S. (1990), “Verification of Quick Capillary Rise Approach for Determining Pore Geometrical Characteristics in Soils of Varying Texture”, *Soil Science*, Vol.150, No.6, pp.883-888.
 26. Lin, Y., Schanz, T., and Fredlund D. G. (2009), “Modified Pressure Plate Apparatus and Column Testing Device for Measuring SWCC of Sand”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.32, No.5, pp.1-15.
 27. Lu, N. and Likos, W. J. (2004), “Unsaturated Soil Mechanics”, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
 28. Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (2012), “Microporous Membrane Technology for Measurement of Soil-water Characteristic Curve”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.35, No.2, pp.201-208.
 29. O’Connor, K. M. and C. H. Dowding (1999), “Geomeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes”, CRC Press.
 30. Padilla, J. M., Perera, Y. Y., Houston, W. N., Perez, N., and Fredlund, D. G. (2006), “Quantification of Air Diffusion through High Air-entry Ceramic Disk”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, UNSAT 2006, Carefree, Arizona, April 2-6, Vol.2, pp.1852-1863.
 31. Ranjan, R. S. and Domytrak, C. J. (1997), “Effective Volume Measured by TDR Miniprobos”, *Transactions of the ASAE*, Vol.40, No.4, pp.1059-1066.
 32. Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., and Friedman, S. P. (2003), “A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry”, *Vadose Zone Journal*, Vol.2, No.4, pp.444-475.
 33. Soilmoisture Equipment Corporation (2005), “Volumetric Pressure Plate Extractor and Hysteresis Attachments”, Operating Instructions: Model 1250, Santabarbara, CA, USA, pp.1-12.
 34. Song, Y. S., Lee, N. W., Hwang, W. K., and Kim, T. H. (2010), “Construction and Application of an Automated Apparatus for Calculating the Soil-water Characteristic Curve”, *Journal of Engineering Geology*, Vol.20, No.3, pp.281-295.
 35. Song, Y. S. (2013), “Estimation on Unsaturated Hydraulic Conductivity Function of Jumoonjin Sand for Various Relative Densities”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.6, pp.2369-2379.
 36. Tinjum, J. M., Benson, C. H., and Blotz, L. R. (1997), “Soil-water Characteristic Curves for Compacted Clays”, *J. Geotech Geoenviron. Eng.*, Vol.123, No.11, pp.1060-1069.
 37. 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.
38. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., and Pufahl, D. E. (1999), “The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-water Characteristics of a Compacted Till”, *Geotechnique*, Vol.49, No.2, pp.143-159.
39. White, I. and Zegelin, S. J. (1995), “Electric and Dielectric Methods for Monitoring Soil-water Content”, *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*, pp.343-385.
40. Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E. C., and Fredlund, D. G. (2004), “Factors Affecting Drying and Wetting Soil-water Characteristic Curves of Sandy Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, No.5, pp.908-920.

Received : February 11th, 2015

Revised : July 7th, 2015

Accepted : July 10th, 2015